

**BOVEDAS ARCO DE DIRECTRIZ  
CATENARIA EN  
CERAMICA ARMADA**

*oficina regional de ciencia y tecnología de  
la unesco para américa latina y el caribe*

10 JAN. 1986



unesco

**JUAN MANUEL GALASSO**  
INGENIERO CIVIL

**BÓVEDAS ARCO DE DIRECTRIZ  
CATENARIA EN  
CERÁMICA ARMADA**

Ing. Eladio Dieste

Ing. Eugenio R. Montañez.

UNESCO

World Heritage Site  
UNESCO

Las ideas expresadas por los autores de los artículos firmados, pertenecen a los mismos y no reflejan necesariamente las de Unesco. Las designaciones empleadas, las expresiones y la presentación adoptada para todos los materiales de esta publicación, no deben ser interpretadas por parte de algún país o territorio, como una toma de partido en relación con su régimen político o con el trazado de sus fronteras.

Publicado e impreso en 1985 por la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe  
ROSTLAC - Montevideo - Uruguay

## PREFACIO

La Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe tiene sumo gusto en presentar el documento "Bóvedas Arco de Directriz Geométrica en Cerámica Armada", preparado por los Ingenieros Eladio Dieste y Eugenio R. Montañez.

Durante su larga trayectoria, como ingenieros civiles y académicos, ambos autores uruguayos desarrollaron una tecnología que puede tener gran relevancia en construcciones de distinta índole, entre las cuales están las viviendas sociales.

El ladrillo, que se adquiere a muy bajo precio localmente, es el principal material de las bóvedas cuyos cálculos y construcción se describen en esta obra.

Considerando que la construcción del techo constituye una parte importante del costo de las construcciones, la alternativa que se propone en esta obra es de tomarse en cuenta.

\* \* \*

## CONTENIDO

Introducción .....	1
Nomenclatura .....	iii
Capítulo I .....	1
Aplicación en viviendas - interés social .....	1
Capítulo II .....	3
Curva Catenaria .....	3
Capítulo III .....	5
Bóvedas arco de directriz catenaria .....	5
Pandeo de arcos .....	6
Determinación del módulo E .....	8
Capítulo IV .....	11
Ejemplos de cálculo bóveda cilíndrica .....	11
Estructura de apoyo pilares, vigas de borde y tensores .....	13
Capítulo V .....	15
Bóveda ondulada continua .....	15
Estructura de apoyo - pilares - vigas - tensores .....	20
Capítulo VI .....	23
Boveda shed o diente de sierra .....	23
Estructura de apoyo - pilares - vigas - tensores .....	27
Capítulo VII .....	29
Construcción de las bóvedas .....	29
Ejecución de la bóveda doble curvatura .....	34
Lucernarios .....	36

\* \* \*

## INTRODUCCION

Las propiedades especiales del hormigón facilitaron el nacimiento de las bóvedas delgadas, y las enormes y fantásticas posibilidades de éstas hacen justicia a los atributos de aquél.

A medida que iban superándose dificultades teóricas, ese mundo de posibilidades fue ensanchándose en grado inimaginable.

Pero la concreción de obras con esas estructuras, la expansión de su uso, estuvo muy frenada, dificultada por el aspecto económico. El hormigón posibilitó el nacimiento de las bóvedas delgadas, pero no facilitó su expansión.

Las técnicas constructivas desarrolladas en Uruguay utilizando piezas de cerámica como material resistente, superan esa dificultad económica, colocando las bóvedas en condiciones competitivas con las soluciones tradicionales, y ofreciendo una calidad superior.

La disminución drástica de los encofrados, sus numerosas reutilizaciones, y la continuidad de trabajo, abatió los costos viabilizando su uso en variadísimas aplicaciones y dimensiones.

En el estudio y proyecto de nuestras bóvedas catenarias, se deben considerar simultánea y conjuntamente varios aspectos que intervienen, a saber; a) forma y dimensiones de la lámina; b) método de cálculo; c) técnica constructiva; d) equipos de construcción necesario. Todos deben estar presentes en nuestra conciencia de manera que la dificultad en uno se resuelve con la intervención o participación de todos, otorgando así varios grados de libertad al problema.

En este artículo describiremos el proyecto y la construcción de dos tecnologías muy definidas y claras, cuyos cálculos estructurales hemos depurado. Estas tecnologías son "*Bóvedas arco de directriz catenaria*" y "*Bóvedas autoportantes de directriz catenaria, sin túpanos*".

Hay otras estructuras laminares de forma y construcción inusuales, atípicas, que no se explican aquí pero incluimos sus fotos a título ilustrativo.

Si los desarrollos teóricos, ejemplos de cálculo o explicaciones constructivas no fueran suficientemente claras y dejaran dudas, cualquier interesado puede formular consultas, sea a través de Unesco o directamente a los autores, a la calle Carlos Roxlo 1606 Montevideo - Uruguay. Tel.: 49 84 75 - 41 46 30.

## NOMENCLATURA

L	luz transversal de la bóveda.
f	flecha de la bóveda.
R	sección real o activa del arco considerado.
e'	espesor aparente de la bóveda.
e	espesor equivalente = sección real de una faja/ancho de la faja.
I	momento de inercia baricéntrico de la sección transversal.
S	desarrollo del arco.
s/2	desarrollo de $\frac{1}{2}$ arco = l en fórmula del pandeo.
E	módulo de elasticidad del material de la bóveda.
pp	peso propio por m <sup>2</sup> de bóveda.
q	carga total por m <sup>2</sup> de la bóveda = pp + sobrecarga.
qcr	carga crítica que provoca el pandeo.
$\varphi_0$	ángulo entre el eje x y la tangente en el arranque.
$\varphi$	ángulo entre el eje x y la tangente en cualquier punto.
x,y	coordenadas de un elemento de bóveda.
$\rho$	radio de curvatura de la directriz en un punto.
N	fuerza transversal o empuje actuando en el plano tangente a la superficie media de la bóveda.
N $\varphi$	fuerza transversal en el punto definido por el ángulo $\varphi$ .
Q	fuerza normal al plano tangente.
V	componente vertical del empuje N.
H	componente horizontal del empuje N.
H	altura de algún elemento.
M	momento flector en un elemento de la bóveda.
$\sigma$	tensión de compresión según normal a la sección.
$\sigma$	tensión de compresión en la cerámica, en el mortero o en el hormigón.
$\sigma_e$	tensión de tracción en el acero.
$\tau$	tensión de corte.
$\lambda$	$1/\text{tg } \varphi$ .
X	coeficiente de $EI/l^3$ . (fórmula de pandeo).
$\delta$	deformación en un punto.

## CAPITULO I

### APLICACION EN VIVIENDAS - INTERES SOCIAL

Las bóvedas de grandes luces han despertado siempre un gran interés, tanto de técnicos como no técnicos, por su espectacularidad arquitectónica, la audacia y atrevimiento técnico que implican, y su presumible dificultad teórica de cálculo y de construcción. Ellas tienen un amplio campo de aplicación en locales industriales, comerciales, deportivos y religiosos, depósitos, garages y están siempre ligadas a la construcción de obras que generan grandes expectativas en la comunidad.

Las bóvedas pequeñas, de poca luz, no despiertan el mismo interés, no llaman la atención, porque de manera consciente o subconsciente se les considera un problema menor de ingeniería, y su aplicación no se ha desarrollado en la medida de sus méritos.

La bóveda de vano pequeño ejecutada en cerámica armada tiene un vastísimo campo de aplicación como techo de viviendas, sean unidades aisladas o principalmente en los vastos programas de construcción de viviendas económicas.

Han sido desplazadas y/o sustituidas por la tecnología del hormigón armado que se aplica de manera indiscriminada y con frecuencia irracional.

Entre los elementos o partes que constituyen una vivienda, pisos, paredes y techo, este último es el más caro y difícil de efectuar y esto fue así en todos los tiempos.

La bóveda de cerámica como techo de vivienda es una solución económica que aporta confort, y le está reservado un rol de gran trascendencia social, pues pone al alcance de las clases más humildes un conjunto de ventajas que no logran otras tecnologías, a saber:

- a) gran economía de materiales, en especial hierro y madera, que en general son caros y a veces de difícil obtención;
- b) amplia utilización del ladrillo, material barato y que abunda en casi todos los rincones del mundo;
- c) aislación térmica importante que se puede aumentar a voluntad de manera fácil y económica. Para valorar debidamente esta ventaja, basta compararla con los techos de losa de hormigón armado y con los de chapa metálica que son la pesadilla de millones de familias;
- d) efecto estético agradable tanto interno como externo con un costo adicional mínimo;
- e) es una tecnología simple al alcance de cualquier artesano común;
- f) durabilidad indefinida con gastos de conservación muy bajos.

Para completar este resumen sobre su aplicación en viviendas van estas observaciones:



El cálculo de la bóveda, apoyos, tensores, vigas de borde se hace como se indica más adelante:

Los valles de las bóvedas apoyan directamente sobre las paredes inferiores, lo que condiciona la planta arquitectónica al techo. Esto puede ser visto como una limitación molesta, pero es compensada por las grandes ventajas.

Los tensores conviene ubicarlos en correspondencias con las paredes transversales o a la vista en lugares convenientes.

Conviene volar las bóvedas con respecto a las fachadas delantera y trasera para protegerlas de la lluvia y el sol.

Lo mismo sucede con las vigas de borde laterales, cuyo voladizado es protector.

Si por razones constructivas el tensor se coloca por debajo de su posición ideal (intersección del empuje y el eje del apoyo) se introduce un momento flector, generalmente pequeño, pero que hay que resistir.

Pueden abrirse agujeros en la bóveda, o mejor preveerlos durante su construcción con un número entero de piezas, agregando pequeños refuerzos necesarios.

Tratándose de viviendas conviene esmerar la terminación interior de las juntas como más adelante se indica.

Esmerar también el alisado superior para evitar el pasaje de humedad.

Las fotos muestran algunas viviendas solucionadas con bóvedas de ladrillo.

\* \* \*

## CAPITULO II

### CURVA CATENARIA

La catenaria, curva básica fundamental en la Ingeniería estructural, es "incómoda" desde el punto de vista analítico. Su ecuación es:

$$y = R \cdot \cos h \frac{x}{R}$$

con respecto a los ejes x-y de la figura 1, siendo R el parámetro de la catenaria, e igual al radio de curvatura en el vértice.

El simple trazado de la curva ya es trabajoso, y los cálculos que derivan de la ecuación son engorrosos, introduciendo un factor de desánimo en el técnico proyectista.

Para evitar esas dificultades, se han construido tablas que nos dan todos los valores necesarios en los cálculos, tablas que figuran en cuaderno independiente.

Estas tablas fueron hechas en la Facultad de Ingeniería de Montevideo con la intervención de la Ing. Saravia y Ariel Ramos, siguiendo el camino de tablas hechas previamente por el Ing. E. Dieste.

Prácticamente siempre la luz "L" y la flecha "f" son conocidos, son datos, de donde es fácil calcular por tanteos el parámetro R correspondiente.

En efecto, para  $x = L/2$ ,  $y = R + f$ ,  
 $R + f = R \cos h \frac{L/2}{R}$  de donde  $1 + \frac{f}{R} = \cos h \frac{L}{2R}$

La única incógnita es R que se calcula por tanteos con una buena tabla de líneas hiperbólicas.

Tratándose de techos en bóveda encontramos la catenaria dispuesta con la curvatura hacia abajo.

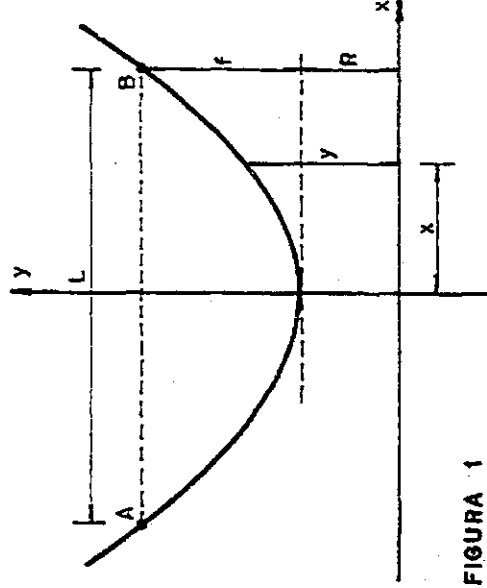


FIGURA 1

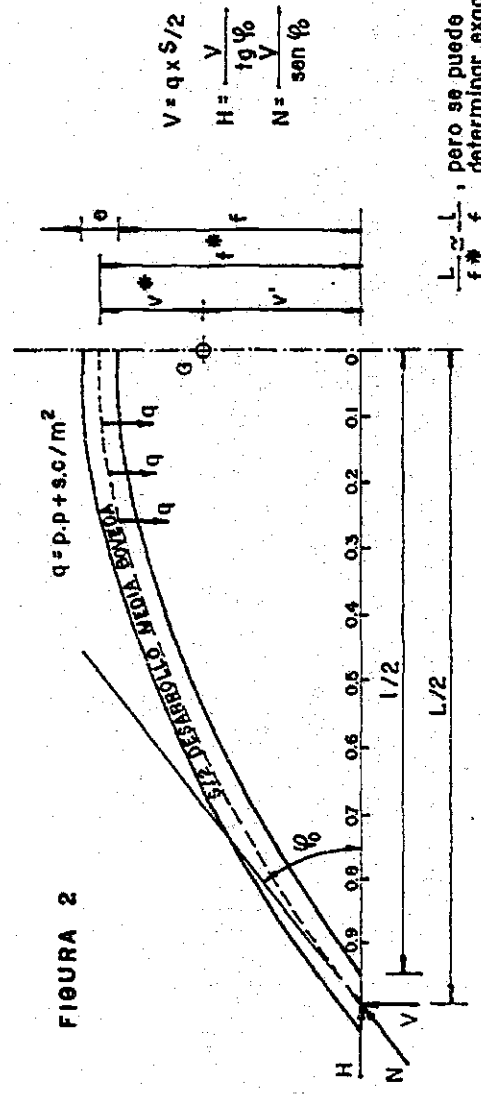


FIGURA 2

$$\frac{L}{f} \approx \frac{L}{f} \text{ , pero se puede determinar exacto}$$

y su ecuación es

$$y = R + f - R \cos h \frac{x}{R}$$

Los coeficientes angulares de las tangentes geométricas a esta curva están dados por

$$y' = - \operatorname{sen} h \frac{x}{R}$$

$$\text{En el arranque izquierdo } \operatorname{tg} \varphi_0 = - \operatorname{sen} h \frac{-L}{2R}$$

Conociendo pues  $L/f$  o su inversa  $f/L$ , las tablas nos dan todos los valores que necesitamos en los cálculos. En las tablas figuran directamente el ángulo  $\varphi_0$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_0$ ;  $\cos \varphi_0$ ;  $\operatorname{sen} \varphi_0$ . Para los demás valores, la tabla suministra los coeficientes necesarios para su determinación en función de los datos o de valores ya calculados.

Las 20 líneas inferiores nos dan los coeficientes por los que hay que multiplicar  $f^*$  para obtener las ordenadas de 20 puntos de media catenaria.

Los valores de los momentos estáticos  $W$ , momentos de inercia, módulo de sección  $W$ , se utilizan sólo en el cálculo de las autoportantes, en las que la flexión longitudinal hace trabajar toda la sección transversal de la bóveda.

\* \* \*

### CAPITULO III

#### BOVEDAS ARCO DE DIRECTRIZ CATENARIA

Damos este nombre a aquellas bóvedas de directriz catenaria que trabajan fundamentalmente como arcos, para diferenciarlas de las "bóvedas autoportantes de directriz catenaria". Estas últimas serán tratadas en la 2a. parte de este artículo.

La bóveda arco de directriz catenaria, sometida a una carga uniforme en todo su desarrollo, tiene su eje coincidente con la funicular de la carga uniforme, con lo que la bóveda está sometida a compresión axial, igual que un pilar con carga centrada.

Si la pieza es corta (bóveda pequeña), se rompe cuando la tensión alcanza el valor de rotura propio del material.

Si la pieza es larga (bóvedas medianas y grandes) se rompe por pandeo, cuando las tensiones de compresión principales están muy lejos del  $\sigma_{rot}$  propio del material.

Debemos notar que en los hechos, prácticamente todas las bóvedas están en el caso de piezas largas.

Por lo tanto, la verificación del pandeo es el problema fundamental y primario del cálculo de estos arcos.

Conviene destacar que las tensiones en estas bóvedas sometidas a su propio peso solamente, son muy bajas aún con grandes luces y flecha pequeña.

Ejemplo:  $L = 100 \text{ m}$   $f = 10 \text{ m}$   $\sigma_{m\acute{a}x.} = 27 \text{ k/cm}^2$   
como todos lo podrán verificar más adelante.

Para carga uniforme, como es el caso del peso propio, el empuje está dado por la expresión general.

$$N\psi = \rho q \cos \psi$$

siendo  $\rho$  el radio de curvatura en el punto considerado, y  $q$  la carga peso propio + sobre carga por  $\text{m}^2$ .

Llamando  $\Omega$  la sección transversal de un arco de  $l \text{ m}$  de ancho, la tensión será

$$\sigma = \frac{N\psi}{\Omega} = \frac{\rho q \cos \psi}{\Omega}$$

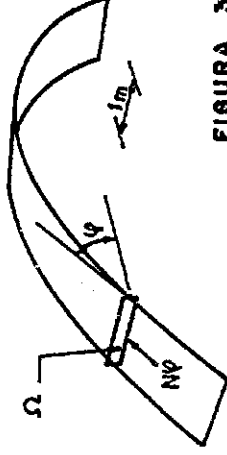


FIGURA 3

Si  $q$  está constituido por el peso propio solamente,  $q$  y  $\Omega$  son proporcionales,  $q/\Omega =$  cte., o sea que la tensión es independiente de la sección.

Al aumentar la sección aumentamos la inercia  $I$  y con ello la seguridad al pandeo, pero no disminuimos la tensión.

El empuje  $N\%$  se calcula como lo expresa la figura 2, siendo conocida la componen vertical  $V = q s/2$

$$N\% = \frac{V}{\text{sen } \varphi} \quad H = \frac{V}{\text{tg } \varphi}$$

#### PANDEO DE ARCOS

El pandeo de piezas rectas, de sección constante o no, ha sido estudiado extensamente, existiendo amplia bibliografía.

No sucede lo mismo con el pandeo de piezas curvas, en particular arcos, de sección constante o no; en este campo las publicaciones son poco numerosas.

Este estudio, además de complejo y engorroso ha estado rodeado de incertidumbres, por la dificultad de encuadrado matemáticamente sin introducir hipótesis simplificadoras que aparten sensiblemente el fenómeno de la realidad física.

Se destacan 2 métodos en el cálculo de la carga crítica que provoca el pandeo.

#### 1) Método de aproximaciones sucesivas

Es un método gráfico-analítico, que tiene la virtud de ver y sentir en todo momento el fenómeno físico que se desea resolver.

#### 2) Método - Aplicación de la fórmula

$$q_{cr} = \frac{\chi EI}{l^3}$$

donde  $\chi$  es función de  $\gamma = l/\text{tg } \varphi$   
"l" es la longitud de medio arco =  $s/2$

siendo  $q_{cr}$  transversal al eje (ej. p.p.t.s.c.) para el ancho de arco considerado y por unidad de desarrollo (cm).

Esta fórmula está expuesta en la obra "Pandeo de Láminas de doble curvatura" del Prof. Eladio Dieste, publicada en Montevideo en 1970.

Para bóvedas de directriz catenaria, de espesor, sección e inercia constante, la fórmula es válida para cualquier relación  $L/f$ .

Esta expresión es válida también con buena aproximación, para bóvedas rebajadas ( $L/f \geq 5$ ) con sección de inercia variable, pero una variación simétrica respecto del eje de la catenaria

$$q_{cr} = \bar{\chi} \frac{E I_m}{l^3}$$

de donde  $I_m = \sqrt[3]{I_a \cdot I_r \cdot I_c}$   
siendo  $I_a$ ,  $I_r$ ,  $I_c$  las inercias en arranque, ríñón y clave.

El error que se comete para  $L/f = 5$  es pequeño y disminuye rápidamente al aumentar esta relación.

Este grado de aproximación es más que suficiente desde el punto de vista práctico. se obtiene en función de  $\gamma = l/tg \varphi_0$  de la tabla.

tg $\varphi_0$	$\gamma = l/tg \varphi_0$	X
4	0.25	14.80
2	0.50	11.98
1.333	0.75	9.80
1	1.00	8.16
0.8	1.25	6.92
0.666	1.50	5.98
0.571	1.75	5.25
0.5	2.00	4.66
0.444	2.25	4.19
0.4	2.50	3.80
0.3636	2.75	3.48
0.333	3.00	3.20
0.3077	3.25	2.97
0.2857	3.50	2.76
0.2666	3.75	2.59

Para valores de tg  $\varphi_0$  intermedios, se calcula por interpolación.

DETERMINACION DEL MODULO E

Para la verificación del pandeo precisamos el valor del E de flexión del completo "cerámica - cemento - hierro". Considerando que estas bóvedas de cerámica son de *cofradas rápidamente, aproximadamente 14 horas después de terminadas*, el módulo que vamos utilizar es el de ese momento crítico. Lo más conveniente es determinarlo mediante un simple ensayo en la forma que se detalla.

Se construye una faja de bóveda de 1 m de ancho, con relación  $L/f$  cualquiera, aunque aconsejamos  $L/f = 8$ . Sea  $L = 8$  m, con apoyos A y B firmes.

Se debe utilizar un molde con dispositivos que permitan bajarlo rápidamente, sin vibraciones ni golpes.

Se instalan flexímetros de manera de tomar las deformaciones según la vertical, en los cuartos de la luz (riñones) y en la clave.

Conviene reproducir el ritmo del futuro trabajo; terminar la faja a las 17 hs. y desensofrarla a las 7 hs. del día siguiente. Ya libre la bóveda se leen los flexímetros. De inmediato se carga suavemente en el riñón ( $\frac{1}{4}$  de L) una carga conocida, ej. 30 kg y se miden las deformaciones verticales luego de estabilizadas (luego de aproximadamente 15 minutos). Luego se agrega suavemente otros 30 kg en el mismo punto y se miden las deformaciones estabilizadas (luego de aproximadamente 15 minutos). Se agrega una tercera carga y se miden deformaciones.

Las deformaciones producidas por las fuerzas directas son absolutamente despreciables, contando sólo las de flexión.

Con estas pequeñas cargas estamos muy debajo del límite elástico, y esta forma de cargar el arco permite confirmarlo.

La deformación vertical en el punto de carga está dada por la siguiente expresión:

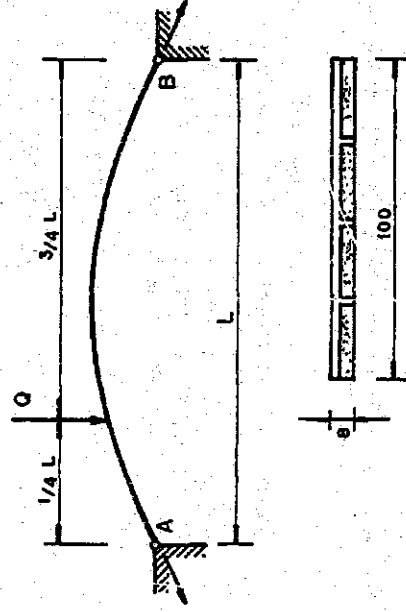
$$\delta = 0,0016 \frac{PL^3}{EI}$$

$\delta$  es el descenso medido bajo la carga, en cm en la dirección vertical

P la carga aplicada, en kg

L la cuerda del arco, en cm

FIGURA 4



En la fórmula que nos da " $\delta$ " no aparece " $f$ " porque fue deducida para  $\frac{L}{f} = 8$ , pero es válida para  $\frac{L}{f}$  variando de 6 a 12, con error menor de 3% con respecto a la media.

Si el arco de prueba se construyó con las mismas piezas cerámicas que se utilizarán en futura obra, la fórmula da directamente el EI a utilizar en la determinación de  $q_{cr}$ .

$$EI = \frac{0,0016 PL^3}{\delta}$$

Si se construyó con piezas diferentes, se calcula el I de la sección actuante en el ensayo; ej: si se usó ladrillo

$$I = \frac{100 \times 8^3}{12} = 4266,7 \text{ cm}^4$$

sustituyendo arriba calculamos E.

El ensayo descrito cargando el arco en el riñón, tiene la ventaja de la deformación grande, pero hay dificultad con las lecturas de los flexímetros, porque el punto no se mueve verticalmente.

Si el ensayo se efectúa cargando en la clave, el descenso es vertical y la lectura de los flexímetros más perfecta. En este caso la deformación será:

$$\delta = 0,000828 \frac{PL^3}{EI}$$

Las piezas cerámicas de fábrica, utilizadas en la construcción aquí en el Uruguay (ladrillos, ticholos, bovedillas) tienen una resistencia a la rotura

$$\sigma_{rot} \geq 220 \text{ k/cm}^2$$

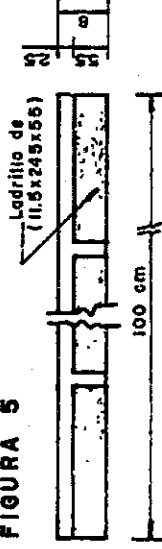
El mortero de arena y cemento portland, utilizado en la ejecución de la bóveda tiene

$$\sigma_{rot.14hs.} \geq 50 \text{ k/cm}^2 \text{ y } \sigma_{rot.28d.} \geq 300 \text{ k/cm}^2$$

Trabajando con temperaturas superiores a los 10°C. obtenemos valores de  $E \geq 70.000 \text{ k/cm}^2$  a las 14 hs. y  $E \geq 150.000 \text{ k/cm}^2$  a los 28 días, siendo frecuente valores superiores a 200.000 k/cm<sup>2</sup>

La verificación del pandeo la hacemos siempre en el estado más crítico, tomando un coeficiente de seguridad igual o superior a 4.

FIGURA 5





Antes de entrar a los ejemplos de cálculo aclaramos que:

- 1) La bóveda arco de directriz catenaria descarga en elementos resistentes que sean capaces de resistir sus empujes. En la generalidad de los casos estos apoyos están constituidos por vigas de descarga, pilares y tensores;
- 2) Para luces pequeñas, la estabilidad de la estructura está asegurada con la inercia propia del espesor.

Para las luces grandes, es necesario aumentar la inercia, lo que se logra ondulando la lámina, sea de manera continua o discontinua como en la bóveda Shed.

Ejemplos de los tres tipos pueden observarse en las fotos.

\* \* \*

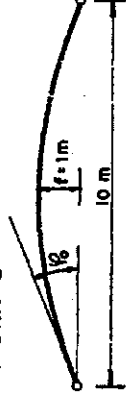
## CAPITULO IV

### EJEMPLOS DE CALCULO BOVEDA CILINDRICA

Sea una bóveda 10 m de luz y 1 m de flecha;  $\frac{L}{f} = 10$ . De la tabla sacamos los

valores  $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0.4052$ ;  
 $\operatorname{sen} \varphi_0 = 0.3755$ ;  
 $\operatorname{cos} \varphi_0 = 0.9268$ ;  
 $S/L = 1.0262$ .

FIGURA 6



Vamos a verificarle con una sección maciza de 8 cm de espesor, como la indicada anteriormente, 5,5 cm de ladrillo y 2,5 cm de mortero de arena y cemento.

El peso específico de la combinación cerámica-cemento-hierro es, en nuestro caso, 1850 k/m<sup>3</sup>.

pp de la bóveda por m<sup>2</sup> = 1850 x 0.08 = 148 k/m<sup>2</sup>  
 sobrecarga, 15% de 148 =  $\frac{22}{170}$  k/m<sup>2</sup>

Esta sobrecarga ha probado ser perfectamente suficiente para las solicitaciones previsibles siguientes:

- a) eventuales cargas durante la construcción;
- b) viento, con velocidades de 150 km/h. o más, que se registran periódicamente en nuestro país.

$$s/2 = 5 \times 1,0262 = 5,131 \text{ m}$$

$$V = 170 \text{ k/m}^2 \times 5,131 \text{ m} = 872,27 \text{ kg}$$

$$H = \frac{V}{\operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{872,27}{0,4052} = 2152,69 \text{ kg} \rightarrow 2153 \text{ kg/m}$$

$$N = \frac{V}{\operatorname{sen} \varphi_0} = \frac{872,27}{0,3755} = 2323 \text{ kg/m}$$

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{2323}{800} = 2,9 \text{ kg/cm}^2$$

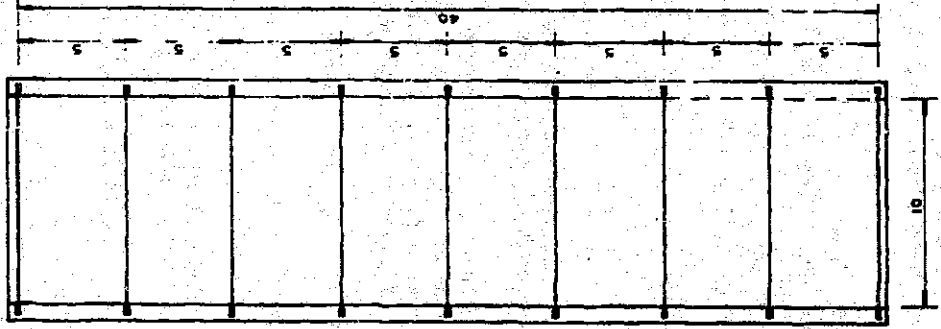
Observarse que  $\sigma_c$  es bajísimo, como habíamos adelantado.

Verificación del pando:

$$\gamma = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{1}{0.4052} = 2,468$$

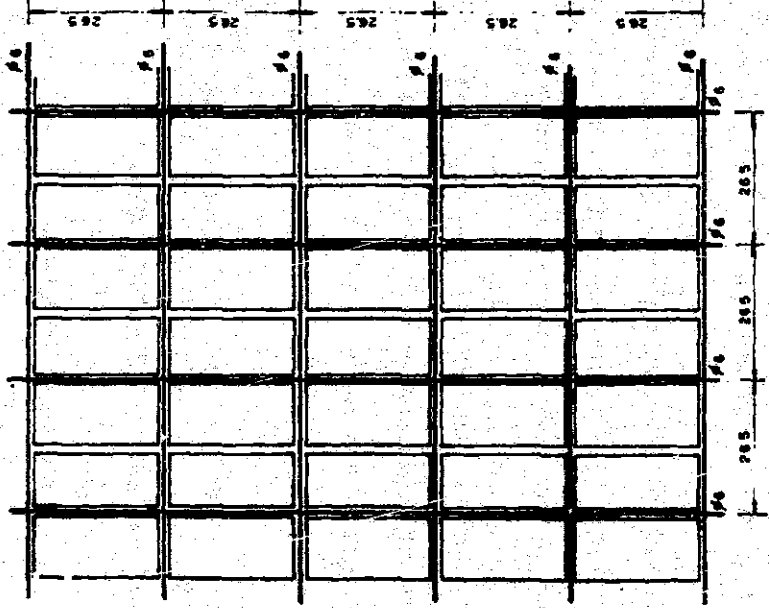
Interpolado en la tabla dada,  $X = 3,85$ .

**PLANTA (a)**  
ESCALA 1:250

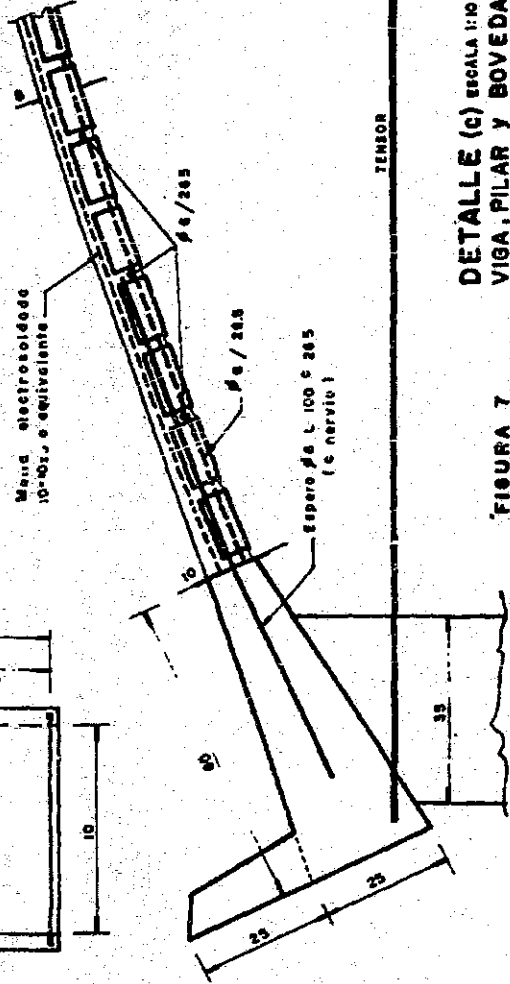


**ARMADURA DE JUNTAS (b)**

ESCALA 1:10



Mande electrosoldada  
10-037, e equivalente



**DETALLE (c)** ESCALA 1:10  
VIGA, PILAR Y BOVEDA

FIGURA 7

$$q_{cr} = 3,85 \cdot \frac{EI}{13} = 3,85 \times \frac{70.000 \times 4266,66}{5133} = 8,517 \text{ k/cm} \approx 851,7 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Conf. seg.} = \frac{851,7}{170} = 5,01 \text{ Verifica muy bien.}$$

#### ESTRUCTURA DE APOYO PILARES, VIGAS DE BORDE Y TENSORES:

Supongamos que el local tenga 40 m de longitud. Un molde móvil de 5 m tendría 8 usos (bastante bien), y en tal caso parece razonable y conveniente disponer los pilares c/5m

Las vigas de borde están sometidas al empuje  $N = 2323 \text{ kg/m}$  y a su peso propio.

Las formas más comunes son las que se indican, formando canalón.

Como se van contruyendo sucesivamente las fajas a razón de 1 por día, los estados de carga serán: 1°) un tramo cargado; 2°) 2 tramos cargados; luego 3 tramos cargados, etc. Los Mf de los estados transitorios los dividimos por 1,4, los superponemos con el estado definitivo y dimensionamos la viga para la envolvente de los diagramas.

Es indudable que la falda de la bóveda colabora con la viga, aliviándola, pero la cuantía de esta ayuda es incierta. La forma práctica de considerarla es aumentar prudentemente las tensiones de trabajo; ej. 10% o 15%.

El esfuerzo final en los tensores intermedios es:

$$H = 2153 \text{ kg/m} \times 5 = 10.765 \text{ kg.}$$

Desde el punto de vista estático convendría ubicar el tensor a la altura de la intersección del eje del pilar y el N de la bóveda, anulando asflexiones en el pilar.

Pero esta posición del tensor dificulta o impide el pasaje del molde. Se soluciona: a) prolongando la nariz de la viga; b) bajando el tensor, introduciendo flexión y corante en el pilar; c) con a) y b) combinados convenientemente.

La estructura de apoyo puede hacerse sin juntas de dilatación, pero en la bóveda conviene colocar una junta en el medio, que va de viga a viga de borde. Estas juntas se realizan como ya es tradicional con mastic y bandas adhesivas, o ~~en~~ dos resaltos en ambos bordes y una cubierta.

\* \* \*

## CAPITULO V

### BOVEDA ONDULADA CONTINUA

De la expresión  $q_{cr} = X \frac{EI}{l^3}$  observamos que cuando aumenta "l" sin variar los otros factores, disminuye rápidamente la carga crítica.

E es una constante propia del material.

X se puede aumentar levemente peraltando mucho la bóveda, lo que no es económico ni elegante.

Lo único que podemos aumentar fácil y considerablemente es l. Una forma es aumentar el espesor, pero esto encarece la propia bóveda y toda la estructura de sostén.

Otra forma es disponer arcos de rigidez, por encima o por debajo de la bóveda, pero esta solución complica la construcción, encarece y le da pasadez a la estructura.

Lo más práctico, económico y elegante es ondular la bóveda, con lo que se aumenta grandemente la rigidez con un aumento pequesísimo de su peso.

La ondulación constante resuelve la rigidez pero complica la viga de borde y los desagües pluviales. Llegamos así a la ondulación variable, de un máximo en la clave a 0 en los arranques; tal como la hemos definido en la página 2.



FIGURA 8

Sea esta la onda de la clave, H su altura y "d" su amplitud y "e" su espesor.

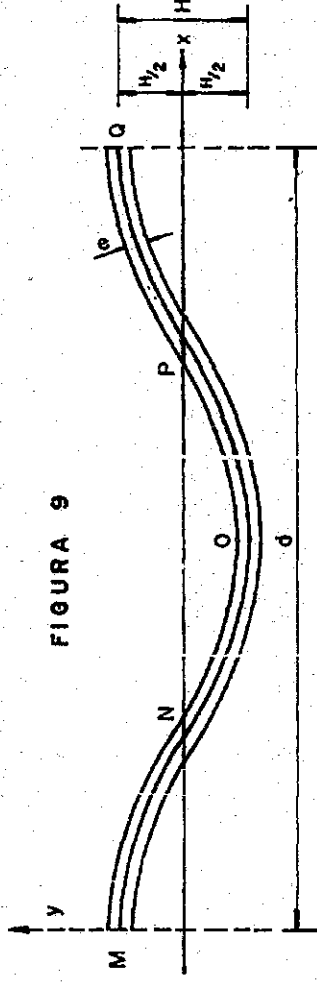


FIGURA 9

Puede ser una curva arbitraria, variación sinusoidal, segmentos de parábolas; otras curvas.

Para alturas  $H \leq d/12$  que resuelven la mayoría de los casos, el momento de inercia de la onda entera (ancho "d") con respecto al eje X puede tomarse:

$$\text{con variación sinusoidal } I_{xx} = ed \cdot \frac{H^2}{8} \equiv e \cdot \frac{H^2}{8} \text{ para ancho de } lm$$

$$\text{con variación parabólica } I_{xx} = ed \cdot \frac{H^2}{7,5} \equiv e \cdot \frac{H^2}{7,5} \text{ para ancho de } lm$$

Estas expresiones de  $I_{xx}$  dan un error inferior al 1%.

Si es maciza "e" es el espesor real. Si es ahuecada "e" es el espesor equivalente:  

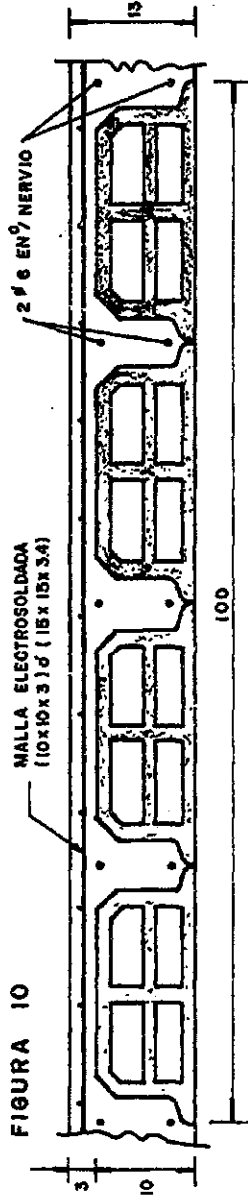
$$te = \frac{\text{sección real de } l \text{ m de ancho}}{100}$$

Ejemplo de cálculo:

Nos proponemos cubrir un local de 22 m x 60 m. de acuerdo a la planta y cortes que siguen, en los que se adoptó una onda de 5 m de amplitud y separación de pilares 5 m. Como el molde móvil tiene igual dimensión, se utilizará 12 veces.

No habría inconveniente en tomar una amplitud de 4 m, con lo que el molde móvil se usaría 15 veces; pero adoptamos 5 mt.

Para la construcción elegimos piezas de cerámica de 25 cm x 25 cm x 10 cm



que serán cubiertas con una capa superior de argamasa armada de 3 cms. Lo que se muestra es un corte longitudinal, o sea que los huecos y los nervios corren según la catenaria.

Sus características son:

$$\text{Carga por m}^2 = 170 \text{ p.p.} + 20 \text{ s.c.} = 190 \text{ k/m}^2$$

$$\text{Sección útil } \Omega = 860 \text{ cm}^2/\text{m}$$

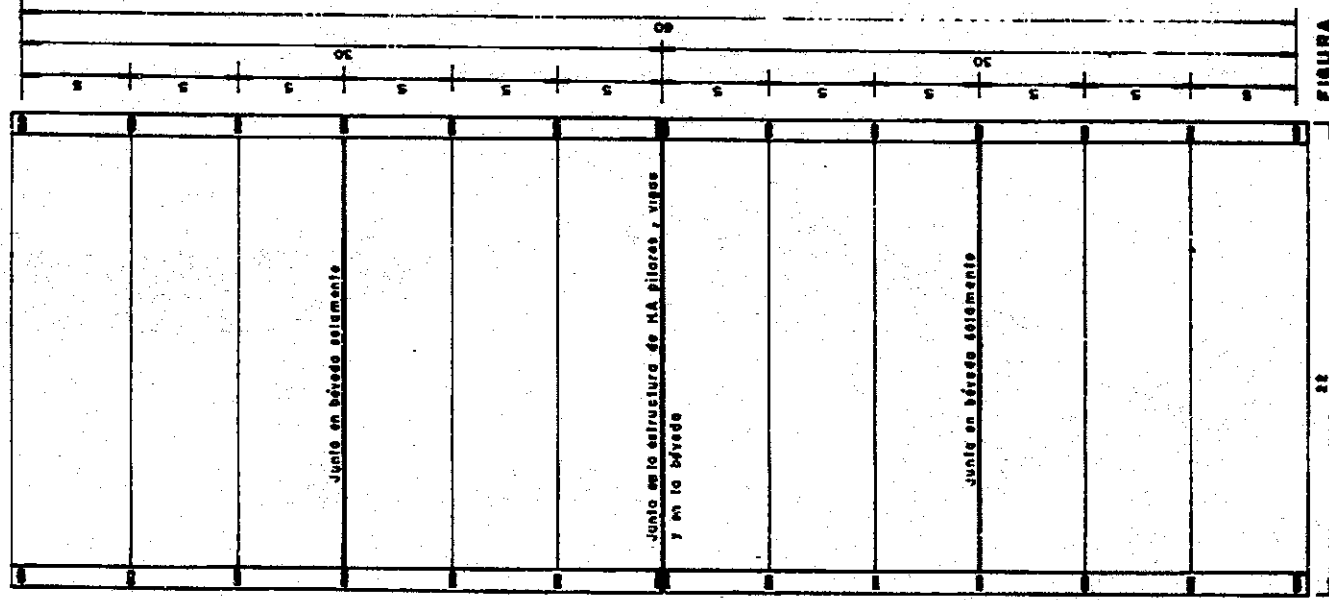
$$I_G = 14.248 \text{ cm}^4/\text{m de ancho}$$

Tomemos  $L/f = 8$  y verifiquemos la bóveda cilíndrica.

$$\text{tg } \varphi_0 = 0.5100; \quad \gamma = 1.96; \quad X = 4.754; \quad \text{sen } \varphi_0 = 0.4543$$

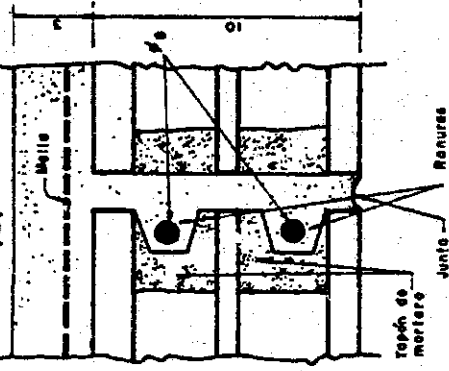
PLANTA (a)

ESCALA 1:250



NERVO LONGITUDINAL CORTE (b)

ESCALA 1:10



(c)



ARMADURA DE LA BOVEDA PLANTA (d)

ESCALA 1:25

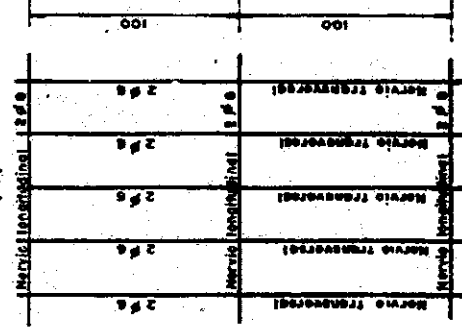


FIGURA II





$$\cos \varphi_0 = 0,8908; l = e/2 = (11 - 0,75 \text{ de viga}) 1,04051 = 10,665 \text{ m}$$

$$V = 10,665 \times 190 = 2026 \text{ kg}$$

$$H = V/\text{tg} \varphi_0 = 2026/0,51 = 3973 \text{ kg}$$

$$N = H/\cos \varphi_0 = 3973/0,8908 = 4460 \text{ kg}$$

$$\sigma_c = 4460/860 = 5,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_{cr} = X \frac{EI}{l^3} = 4,754 \times \frac{70.000 \times 14.248}{10,665^3 \times 10^6} = \frac{4741,4}{1213,06} = 3,91 \text{ k/cm para } 1 \text{ m de ancho y } 1 \text{ cm de desarrollo.}$$

Si multiplicamos por 100 tenemos  $q_{cr}$  para 1 m de desarrollo, o sea  $q_{cr}$  por  $\text{m}^2$  de bóveda.

$$\text{coef. seg.} = \frac{391}{190} = 2,06; \text{ es bajo.}$$

No verifica, a pesar de tener un  $\sigma_c$  bajísimo.

Vamos a aumentar  $I$  ondulando la bóveda.

Siendo la ondulación variable, la inercia también lo es.

La altura de la onda varía de forma prácticamente parabólica al pasar de la clave a los arranques. Siendo así, en el  $\frac{x}{4}$  de la luz tendrá una altura de onda igual a  $\frac{3}{4}$  de la clave.

El  $I$  a utilizar es la media geométrica de la inercia en la clave  $I_c$ , en el riñón  $I_r$  y en el arranque  $I_a$ .

$$I_m = \sqrt[3]{I_c \cdot I_r \cdot I_a}$$

Tomamos una onda de  $H = 30 \text{ cm}$

$$I_{xx} = 8,6 \times 100 \times 30^2/8 = 96.750$$

$$I_c \text{ propio } = \frac{14.248}{110.998} \text{ cm}^4$$

$$I_{yy} = 8,6 \times 100 \times 22,5^2/8 = 54.422$$

$$I_c = \frac{14.248}{68.670} \text{ cm}^4$$

$$I_m = \sqrt[3]{110.998 \times 68.670 \times 14.248} = 47.710 \text{ cm}^4$$

$$q_{cr} = 4,754 \times \frac{70.000 \times 47.710}{1213,06 \times 10^6} = \frac{15876,9}{1213,06} = 13,09 \text{ k/cm} = 1309 \text{ k/m}^2$$

$$\text{Coef. seg.} = \frac{1309}{190} = 6,89$$

Hemos conseguido un coeficiente de seguridad amplio con una onda muy suave que no vale la pena disminuir. Como se indica en los dibujos, la armadura es la constructiva; transversalmente  $2 \phi 6$  en cada nervio; longitudinalmente  $2 \phi 8$  cada metro; una malla electrosoldada  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3 \text{ mm}$  o equivalente en la capa de arena y portland superior.

ESTRUCTURA DE APOYO - PILARES - VIGAS - TENSORES

La viga de borde se calcula con los sucesivos estados de carga; 1 tramo; 2 tramos; 3 tramos; etc.

La sollicitación es el N de la bóveda y el peso propio de la viga.

El N se considera uniforme e igual al de la flecha media.

La forma más racional de la viga es hacerla inclinada con su eje coincidiendo con la sollicitación resultante. En los dibujos se indican también otras formas que también resuelven y pueden presentar sus ventajas.

Para facilitar el pasaje del molde móvil hay que bajar el tensor, (lo que introduce flexión y cortante en el pilar), o aumentar la nariz de la viga, o ambas cosas simultáneamente.

Por razones constructivas la viga debe sobresalir del pilar, por lo que sus dimensiones son mayores que las necesarias.

Conocidas las sollicitaciones, el diámetro y armado de las vigas de borde y pilares se hacen como es tradición en el hormigón armado.

Para resistir los empujes de la bóveda hemos insistido en la solución del tensor interior, porque es el más práctico y económico, y muchas veces sirve de sostén a la instalación eléctrica. Pero existen otras soluciones, también aceptables; a) prolongando los pilares y dándoles un tensor arriba de la bóveda poniendo el tensor arriba de la bóveda y abajo en piso; b) contrafuertes, sean macizos o calados. En ambos casos se necesita tensor abajo en el piso.

Si el tensor interior la nave queda de una gran limpieza estructural y en muchos casos permite disminuir la altura del arranque.

Los tensores se pueden ejecutar de varias maneras; a) en hierro común de construcción, b) con hierro tratado, c) con perfiles cuadrados, d) con alambres de precompresión envasados.

Cualquiera sea la solución elegida, conviene darles tensión previa antes de bajar el molde, en 2 etapas: 1) al terminar la faja de bóveda que descarga en él; 2) al terminar la siguiente.

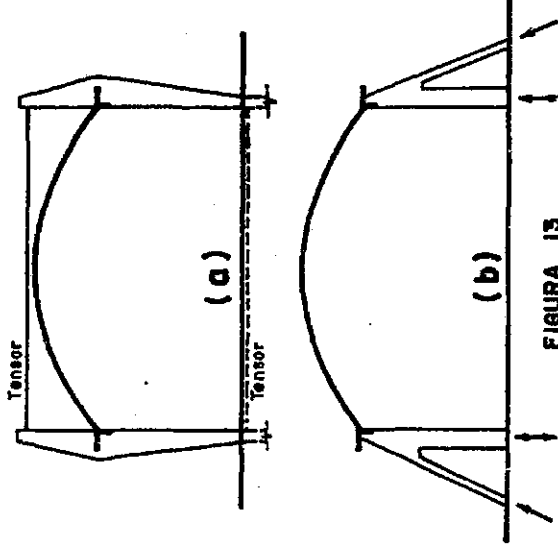


FIGURA 13

De acuerdo a la solución elegida, la tensión previa puede ser dada por a) pinzado de hierros; b) por manguitos; c) con tuerca colocada en un extremo roscado; d) dando 2 estiradas con los equipos de precompresión.

La tensión previa mantiene incambiada la separación de las vigas de borde; la bóveda descarga como sobre apoyos inamovibles y se comporta tal como previsto.

Si no se da tensión previa, el tensor entra en carga al desencofrar, estirándose por el empuje de la bóveda, y este aumento de la cuerda provoca fisuraciones en las bóvedas de doble curvatura.

La bóveda cilíndrica, con igual rigidez en todo su desarrollo, acompaña bien la deformación del tensor.

En las de doble curvatura, la zona de más inercia se resiste a la deformación, y esta se produce en la zona de menos inercia, próxima a los apoyos, fisurándose.

#### Juntas de dilatación

La estructura de apoyo llevará juntas de dilatación, de acuerdo a las normas y el sentido común. En correspondencia, también la bóveda.

Además de estas juntas generales, la bóveda puede y conviene que lleve juntas adicionales, ubicadas en la cumbre de una onda y que terminan en las vigas de borde.

Puede aprovecharse la necesidad de una junta para ubicar una faja de iluminación (lucernario) del ancho que se desee, cuidando de que permita el movimiento de la junta.

\* \* \*

## CAPITULO VI

### BOVEDA SHED O DIENTE DE SIERRA

Esta bóveda surgió para dar iluminación zenital al local.

Con la fuerte inclinación que tiene el lucernario, próxima a la vertical, observamos que una conveniente orientación de los mismos evita o reduce a un mínimo la entrada del sol.

Un beneficio adicional es el notable acondicionamiento acústico, resultante de la gran dispersión del sonido producido por las bóvedas.

En la curva a adoptar en la sección de la clave intervienen 3 factores; a) separación de los pilares; b) ancho del local; c) superficie de iluminación necesaria.

Definida la separación de los pilares igual a la amplitud de la onda (igual al ancho del molde), y fijado el % de iluminación, conocemos la superficie S del lucernario.

Esta queda entre 2 arcos que, para estos efectos, suponemos parabólicos por su semejanza con la catenaria y por practicidad de los cálculos.

Iluminando h y L a la altura y el ancho de cada lente, la superficie del mismo será:

$$\Omega = 2/3 hL.$$

$$\text{Calculamos "h" haciendo: } 2/3 hL = S + \Delta S$$

Aumentamos S en 25 ó 30% por las reducciones debidas a la unión de las bóvedas adyacentes, etc.

"h" sería la altura libre máxima de entrada de luz, del dintel al antepecho del lucernario.

Para mayor claridad me referiré a los planos que se anexan.

Los lucernarios no toman todo el ancho del local, sino que empiezan donde la separación entre las 2 bóvedas tiene una altura discreta, evitando trabajos engorrosos y vidrios pequeños poco útiles.

Los puntos A de todas las secciones están contenidos en un plano vertical.

En la sección de la clave, puede observarse, que el desarrollo de la bóveda es 60 cm mayor que en el arranque. Esos 60 cm resultan de agregar la caja para los montantes y 2 piezas cerámicas, una interior y otra exterior al lucernario, que protege a este de la lluvia y el viento. Ver figura 21.

Además ese aumento de desarrollo permite curvar más la bóveda y obtener mayor inercia, mantener inclinación del lucernario y la elegancia de la forma.

Trazamos la curva de clave basados en lo siguiente:

- a) Ancho de la faja igual a la separación de pilares.
- b) Altura máxima del lucernario = h. Con estos parámetros y experiencia de obras anteriores se van tanteando curvas hasta llegar a la que satisfacc las condiciones de rigidez de la bóveda.

Vamos a verificar la curva A B C D E F G H I J. Para ello emplearemos la expresión

$$q_{cr} = X \frac{EIm}{l^3}$$

El E ya es conocido, tenemos que calcular Im, media geométrica de la I mínima de varias secciones. Como dijimos antes, en la zona próxima a los arranques, las bóvedas adyacentes se amarran de manera que trabajen desde el principio como una unidad.

Este tabique armado entre el lucernario y el arranque, aumenta considerablemente la rigidez de la bóveda, y la forma de tenerlo en cuenta es que aparezca en una o más de una de las secciones que componen Im. Por ej. en el proyecto que hemos presentado, consideramos las secciones que resulten de dividir la semi-luz 14,36 en 5 partes iguales; o sea, seccionescada 2,87 m. En la sección 11,49 interviene la pared, aumentando la inercia de una de las secciones de baja inercia. En cada una de estas secciones tenemos que determinar la ubicación del baricentro G, los momentos de inercia Ixx e Iyy con respecto a los ejes que pasan por G, y luego los ejes principales de inercia. Aunque todas las fuerzas actuantes son verticales la dirección de la mayor deformación de cada sector de la faja de bóveda es la que corresponde a la inercia mínima de ese sector, como se muestra en la página 28.

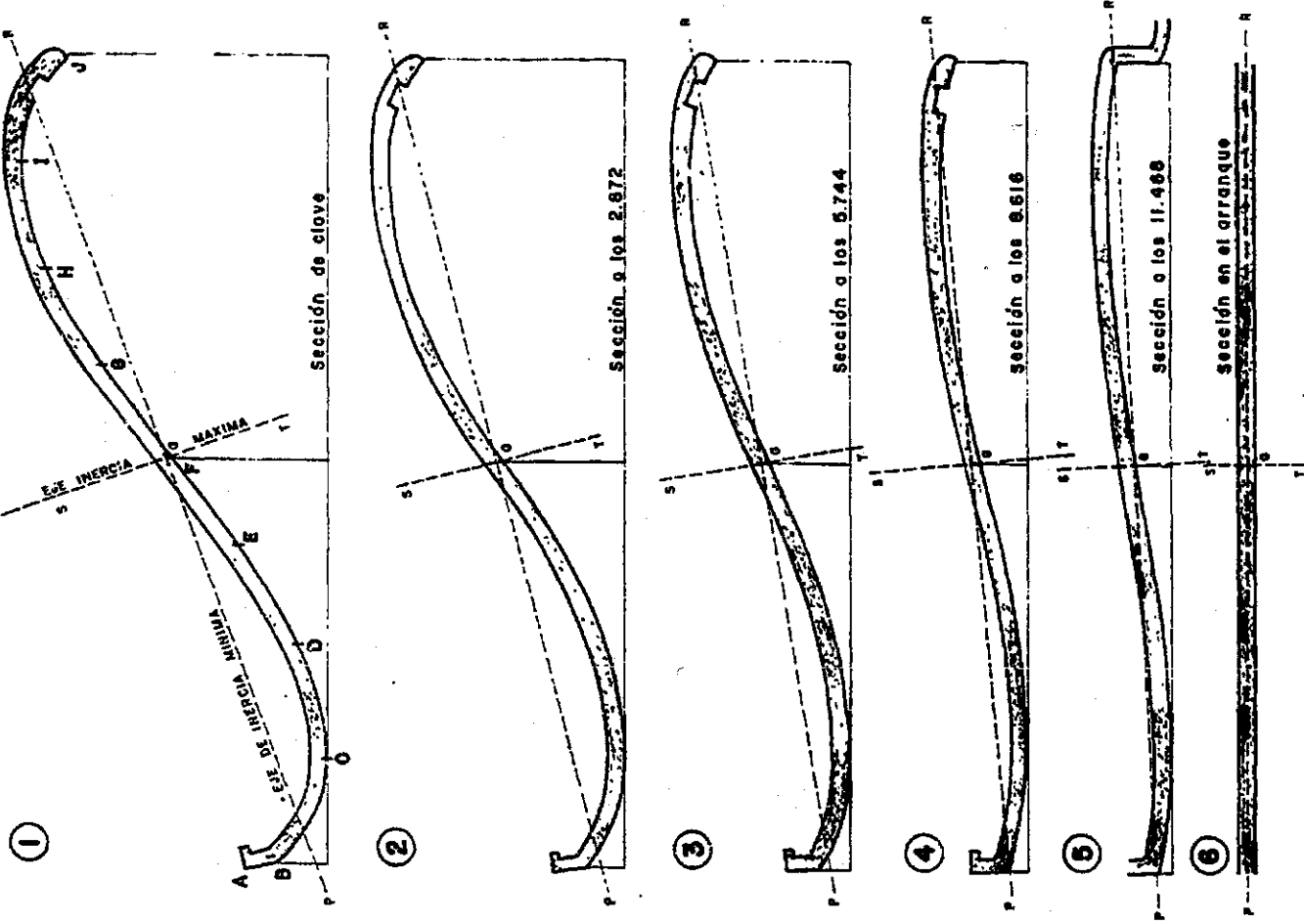
Para el cálculo de I medio consideramos el I mínimo de cada una de las secciones elegidas, haciendo así hipótesis conservadora, del lado de la seguridad.

$$I_m = \sqrt[6]{I_{1\text{mín.}} I_{2\text{mín.}} I_{3\text{mín.}} I_{4\text{mín.}} I_{5\text{mín.}} I_{6\text{mín.}}}$$

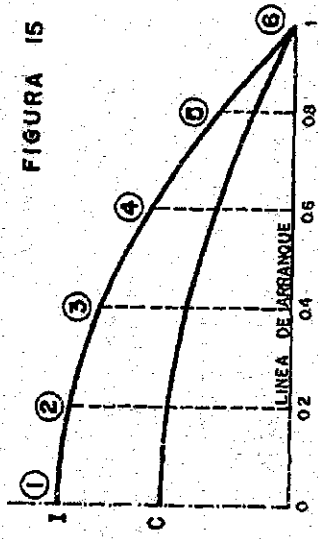
Si con este I llegamos a una  $q_{cr}$  baja, que nos da un coeficiente de seguridad menor que 4, reestudiamos la curva de clave a los efectos de aumentar su inercia.

Si por el contrario, da un coeficiente de seguridad muy elevado, reestudiamos la curva suavizándola, lo que facilita y abarata la ejecución del molde y de la propia bóveda.

FIGURA 14



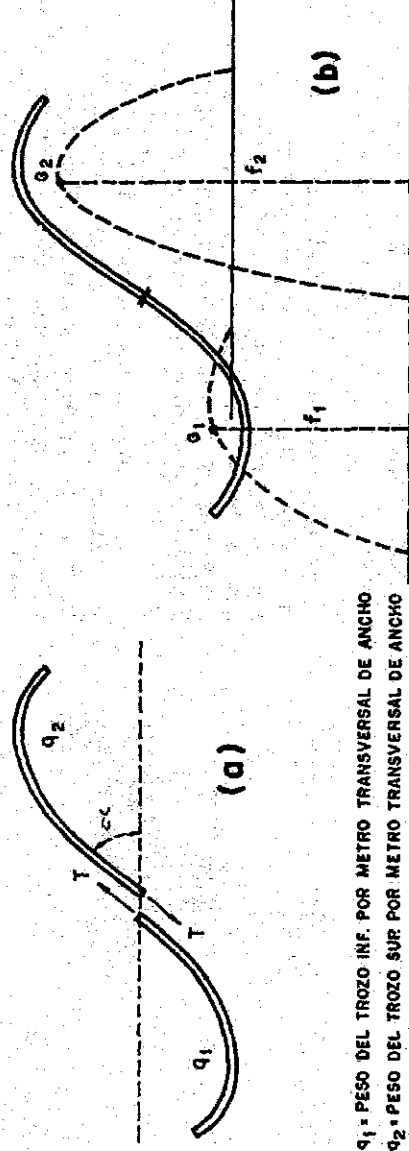
Definida la curva de clave, los puntos de las curvas de las otras secciones se obtienen con las tablas de ordenadas



Conviene ordenar los resultados en un cuadro.

$x =$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$	$f =$
0,2										
0,4										
0,6										
0,8										

FIGURA 16



$q_1$  = PESO DEL TROZO INF. POR METRO TRANSVERSAL DE ANCHO  
 $q_2$  = PESO DEL TROZO SUR POR METRO TRANSVERSAL DE ANCHO

En cada faja de bóveda A-B-C...I-J, la mitad inferior (menores flechas) está sometida a compresiones transversales mayores que la mitad superior, y por tanto descien- de más que ésta. Esta diferencia de deformaciones, da origen a tracciones longitudina- les que conviene cuantificar.

Generalmente estas tensiones son bajas, y están cubiertas ampliamente por la arma- dura longitudinal constructiva dispuesta cada mt. En casos muy especiales conviene ve- rificarlas, y para eso hemos logrado la siguiente fórmula:

$$T = \frac{q}{\text{sen } \alpha} \cdot \frac{S_1 f_2^2 - S_2 f_1^2}{S_1 f_2^2 + S_2 f_1^2}$$

$S_1$  y  $S_2$  son los desarrollos de los arcos que pasan por los baricentros  $G_1$  y  $G_2$ . De la experiencia resulta que  $q_1$  y  $q_2$  son sensiblemente iguales, y los designamos  $q$ .

Para  $L = 30$  m;  $f_1 = 3.00$ ;  $f_2 = 4.20$ ;  $\alpha = 45^\circ$ , ancho de faja = 6,00 (6,60 en la clave resulta  $T = 278$  kg/m. Para  $\sigma = 1400$  k/cm<sup>2</sup>,  $F_e = 0,20$  cm<sup>2</sup>  $< 2 \phi 6$  c/m.

#### ESTRUCTURA DE APOYO - PILARES - VIGAS - TENSORES

En las bóvedas cilíndricas y en las de ondulación continua, el empuje la bóveda sobre las vigas de borde es prácticamente uniforme en intensidad y dirección.

No sucede lo mismo en la bóveda SHED, donde la fuerte ondulación genera empujes de intensidad y dirección diferente. Es necesario dividir el ancho de 5 m en 5 fajas de 1 m y calcular el empuje de cada una.

La composición de los 5 N dan el N medio, cuya inclinación es la que se adopta para la viga. Los distintos N se dividen en 2 componentes; una según la inclina- ción media y otra según la normal a ésta.

Estas componentes normales se anulan en cada tramo, pero producen torsión de sentido alternativo a lo largo de la vi- ga, cuyas tensiones no son de mayor entí- dad pero conviene cuantificar.

Para la viga se calcularán los suce- sivos estados de carga: lo  $M_f$  transito- rios se dividen por 1,4 y se superponen con el diagrama de  $M_f$  del estado defini- tivo. El dimensionado de la viga se ha- ce con la envolvente de ambos diagramas

Generalmente, este tipo de bóveda tiene la ondulación más fuerte, por lo que, para liberar el molde hay que bajar- lo más, obligando a bajar también el tensor para dejarle paso. Otros recursos prácti- cos ya mencionados son, prolongar la nariz de la viga, y/o articular el molde.

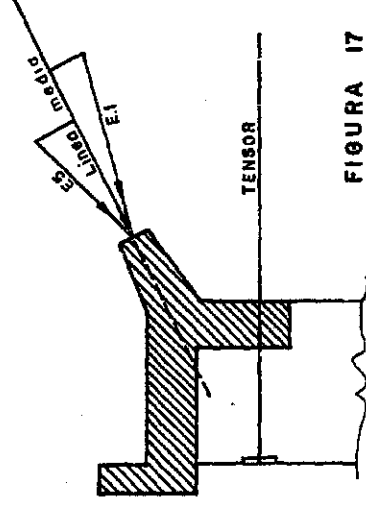


FIGURA 17

\* \* \*

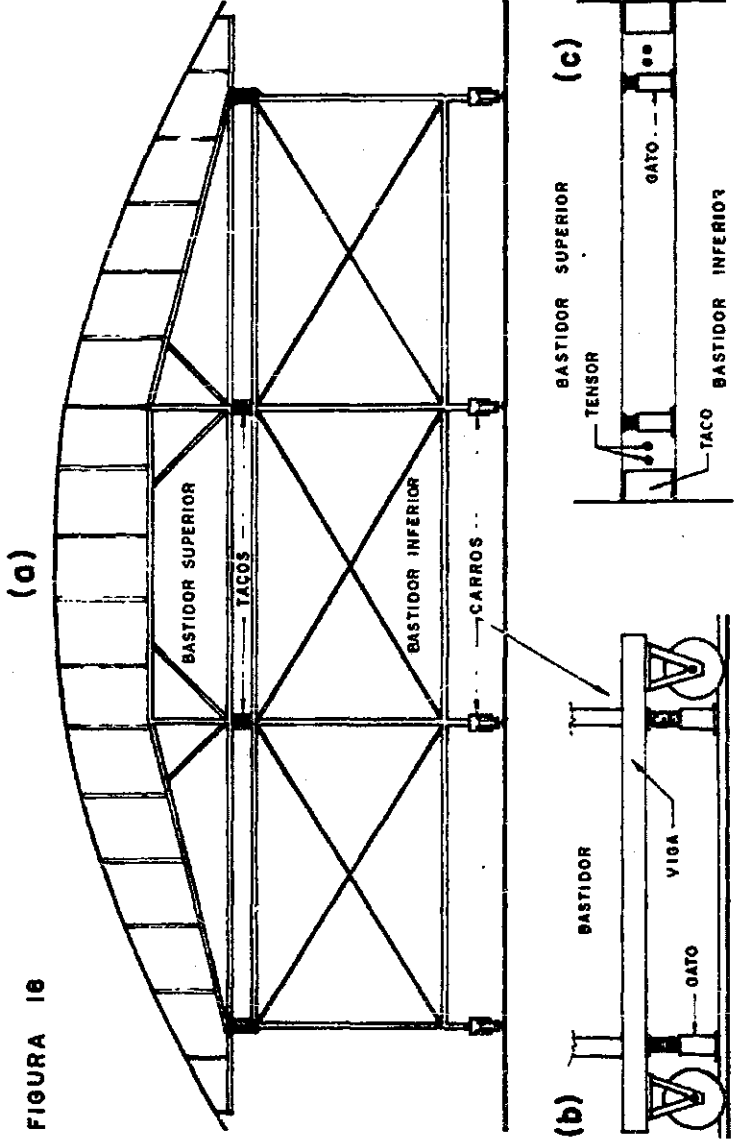


## CAPITULO VII

### CONSTRUCCION DE LAS BOVEDAS

Tanto las "Bóvedas arco" como para las "Autoportantes" el procedimiento de construcción se basa en un conjunto de ideas y elementos básicos que son los siguientes:

- 1) Dar forma catenaria a todas las secciones transversales de las bóvedas, de manera que para el peso propio, el arco comprendido entre 2 secciones transversales vecinas está en compresión pura, en la etapa crítica inicial.
- 2) Con la directriz catenaria y las dimensiones más frecuentes en ambos tipos de bóvedas, las tensiones son muy bajas, ej. en bóvedas arco,  $L = 40 \text{ m}$   $f = L/8$   
 $\sigma_c = 9,2 \text{ kg./cm}^2$ , tensión ampliamente superada por la resistencia del mortero a las 14 hs. de ser colocado.
- 3) Utilización de piezas prefabricadas de pequeñas dimensiones, que se adaptan bien a la forma del molde y son fácilmente manejables. Estas piezas pueden ser de hormigón, normal o poroso, vidrio, PVC o cualquier otro material, aunque el material cerámico sigue siendo el ideal. Estas piezas son unidas con mortero de cemento, tratando que las juntas sean finas.
- 4) Terminada la construcción de la bóveda arco, aproximadamente el 93% de su desarrollo tiene su resistencia definitiva (piezas prefabricadas), y el 7% constituido por el mortero de varias juntas, está en condiciones ideales para un fraguado y endurecimiento rápido, por su pequeño volumen en contacto con cerámica siempre ávida de agua.
- 5) Excelente comportamiento del complejo "ladrillo-mortero-hierro" como una unidad, estructuralmente viable y confiable.
- 6) Solidarizar todos los arcos de una moldeada de manera que trabaje como unidad, tanto en la forma cilíndrica como en el gausa. La armadura longitudinal convenientemente dispuesta, logra solidarizar los arcos que componen cada faja, completándose con la armadura transversal.
- 7) Utilización de la ondulación para que, con pequeño aumento de peso, incrementar mucho su momento de inercia, y por tanto su resistencia al pandeo y a momento flectores transversales.
- 8) Utilización de un molde móvil, cuya dimensión longitudinal es una pequeña fracción del largo total del local a techar, y cuyo costo alto se amortiza en el gran número de usos, en una o varias obras.
- 9) Desencofrado rápido, consecuencia de la aplicación de los 8 principios anteriores. En grandes bóvedas, 14 hs. después de terminada.
- 10) Ritmo continuo de trabajo con un molde de pequeñas dimensiones, como resultado de aplicar los 9 ítems anteriores.



Supongamos tenemos construida la estructura de apoyo, fundaciones, pilares y vigas de borde, en las que se han dejado las provisiones para la construcción de la bóveda, esto es, los bigotes en las vigas que se van a empalmar con la armadura transversal de la bóveda. En el anclaje de los tensores las provisiones convenientes de acuerdo al tensor a colocar.

Al iniciar el proyecto estructural, debemos definir el material cerámico a utilizar en la bóveda, para calcular el peso por m<sup>2</sup>, el ancho superior de la viga de borde de donde descarga la bóveda, la separación de los bigotes en la viga, etc.

Elegida la pieza de cerámica a utilizar, esta se convierte en la unidad de medida el ancho del molde, la separación entre ejes pilares y la longitud del local, llevarán un número entero de piezas; el ancho de la junta nos permite ajustar pequeñas diferencias.

Se cuidará que los bigotes dejados en ambas vigas queden bien enfrentados.

El molde desplazable

Está constituido por un bastidor metálico montado sobre ruedas, ajustable a varios anchos de bóvedas.

Los moldes pequeños son más simples en su montaje y operación que los grandes, pero tienen elementos comunes tales como los carros y gatos inferiores y los elementos para pasar el tensor (tacos y gatos).

Si la bóveda tiene tensores interiores, el bastidor está dividido en 2 partes; una inferior al tensor, constituida por varias columnas, travesaños y diagonales montada sobre ruedas; y otra parte superior al tensor. Ambas partes se vinculan por intermedio de tacos que se indican en los dibujos.

Las columnas y travesaños son caños y piezas huecas para que sean rígidas y livianas, las diagonales son cables o hierros redondos comunes con dispositivos para tensar.

En los carros, las ruedas tienen artificios para hacerlas girar horizontalmente y avanzar a 90°.

Los gatos se colocan debajo del carro, en correspondencia con el bastidor que trae las cargas.

En equipos más sofisticados los gatos van arriba de las ruedas construyendo una unidad con ellas; de manera que la descarga se hace siempre a través de las ruedas. Tanto en la bajada como en la subida del molde, los gatos actúan simultáneamente y con igual velocidad. Los más indicados son los gatos de tornillo accionados manual o eléctricamente. Para dar buena estabilidad y uniones fáciles, conviene que sean de buen diámetro (4" a 6") contruidos con caños de pared gruesa.

Si el molde es grande se disponen varias columnas, convenientemente espaciadas y arriostradas.

Es obvio que el arriostrado debe hacerse en los 3 planos, transversal, longitudinal y horizontal.

Para el desplazamiento del molde conviene disminuir el número de carros a 2, si esto es posible, ya que no es fácil que varios carros apoyen y descarguen igualmente.

Las columnas que no apoyan en carros, se complementan con gatos inferiores para la operación del levante, calzado y alineado.

Los caminos por donde se desplazan las ruedas deben ser perfectamente rectos, niveles y firmes de acuerdo al peso del molde, y con dispositivos que mantengan el movimiento rectilíneo y uniforme de todos los carros; ej.: sobre rieles y ruedas con pesañas de ambos lados, o guías que impidan desviarse.

Es obvio que los gatos tienen que tener un recorrido superior a la altura de la onda a salvar.

Una vez bajado el molde y desplazado, los tensores deben quedar enfrentados a los tacos, aprox. a  $\frac{1}{2}$  altura. Estos tacos son de aprox. 30 cm o 40 cm de alto, para considerar pequeños errores, siempre inevitables.

Quando el tensor toca la línea de tacos, se accionan los gatos próximos, cuya distancia al taco prevee la ubicación del tensor entre ellos. Se retiran los tacos, se avanza el molde hasta que el tensor toque los gatos, se reponen los tacos y se bajan y retiran los gatos.

Durante esta operación de atravesar el tensor, los bastidores superior e inferior tienden a desajustarse entre ellos, por lo que conviene colocar dispositivos que controlen ese desajuste.

El bastidor superior al tensor debe ser rígido, y tener las previsiones para apoyar las costillas. Estas deben ser de madera para permitir clavar el forro.

La madera de forro debe ser calibrada, o sea espesor uniforme para evitar pequeños desniveles o dientes, molestos para la correcta colocación de las piezas cerámicas, y no se muevan al pisarlas.

Si la bóveda es ondulada, la tabla de forro corre siempre transversal, debiendo evitarse los puntos angulosos en la continuación de cada tabla. La separación de las costillas es de 80 a 90 cm.

El molde se construye en el lugar donde se va a utilizar por primera vez, o muy próximo.

El molde se empieza a construir con suficiente anticipación de manera que al terminar la estructura de sostén se empieza inmediatamente con la bóveda.

Precauciones Generales: Las piezas de cerámica deben ser inicialmente mojadas, y echarles agua periódicamente para mantenerlas bien húmedas durante la ejecución de la bóveda.

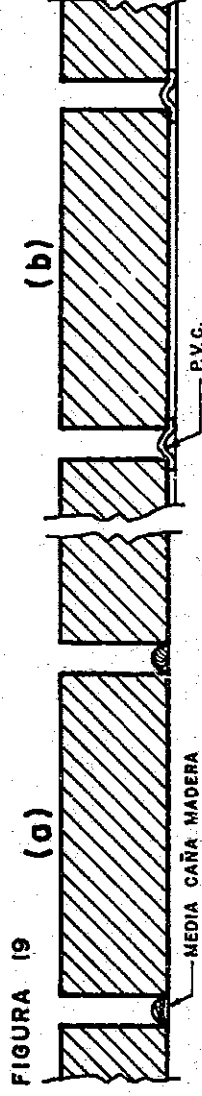
Si las piezas son bovedillas como las indicadas en las de doble curvatura, el 25% de las piezas llevan ranuras y otro 25% son tapadas en un extremo, trabajos estos que tienen que ser preparados con anticipación suficiente para que el mortero endurezca y no ocasiones inconvenientes.

Para subir las piezas y el mortero, el equipo ideal es una grúa de brazo, porque ahorra operarios, atiende ambas faldas a la vez, tomando el material desde un punto alejado y lo deja en el lugar adecuado, reduciendo a un mínimo el personal arriba de la bóveda.

Es muy conveniente disponer de una buena sierra de cortar ladrillos; siempre hay piezas para cortar.

Si la bóveda es de ladrillo y se desea una ejecución prolija y buena terminación de la superficie inferior vista, se marca sobre el forro la ubicación de todas las juntas, y en correspondencia con ellas se clava una varilla con forma de media caña de madera achatada o de PVC, donde el ladrillo pisa las orejas. En esta forma las juntas quedan perfectamente alineadas, sin suciedad de mortero y el rehundido produce un buen efecto de terminación.

Tiene la ventaja adicional que los ladrillos no resbalan sobre el molde, ni los operarios tampoco.



Supongamos tenemos ya el molde con las varillas colocadas, se ponen las piezas cerámicas en su lugar, cubriendo todo el molde con los ladrillos sueltos. Se colocan luego las armaduras  $\phi$  6 longitudinales y transversales formando una malla prácticamente  $26,5 \times 26,5$ .

Se vuelve a mojar la cerámica y se llenan las juntas con mortero de cemento 1 a 2. El llenado se hace por las longitudinales a partir de la viga de borde, insistiendo bien con la cuchara para que la junta quede bien compacta, sin huecos. Donde hay armadura longitudinal, después de cargar un poco de mortero se levanta la armadura, tratando de que quede el centro del ladrillo. Se sigue cargando mortero asegurando que la armadura quede bien sumergida. A medida que se avanza un poco con las juntas longitudinales, se van llenando las transversales insistiendo siempre en la buena compactación y recubrimiento del hierro.

Aproximadamente cada 52 cm. se atan con alambre las 2 armaduras que se cruzan en la junta, dejando salientes los extremos del alambre (10 ó 12 cm). para con ellos atar la malla electrosoldada que arma el aislado.

Las armaduras longitudinales  $\phi$  6 se dejan sobresalir aprox. 50 cm para empalmar con los  $\phi$  6 de la moldeada siguiente.

Terminando de llenar todas las juntas, se coloca arriba la malla electrosoldada  $10 \times 10 \times 3$  mm o equivalente, solapándola 20 cm y afirmándola con los alambres dejados expuestos.

La capa de mortero superior se ejecuta por fajas transversales en 2 etapas, con la finalidad de hacerla más impermeable al agua y la superficie más cerrada y mejor terminada.

Se moja el rústico de la bóveda y se carga la 1<sup>er</sup> capa con abundancia de mortero 1 a 3, fluído, que se extiende y compacta con repetidas pasadas de cuchara, para que penetre en todos lados, sin dejar huecos, quedando la malla apenas sumergida.

Avanzada la 1<sup>er</sup> capa y antes de que esta inicie el fraguado, para que la unión de ambas sea más fácil y segura se carga la 2<sup>a</sup>. capa con mortero 1 a 3 pero más pastoso que la 1<sup>er</sup>. Se le extiende compactando siempre y dándole el espesor definitivo, fretando la superficie hasta dejarla cerrada procurando su impermeabilidad.

Poco después, se pinta la superficie con Antisol o protector de cura. Finalmente, se le da el complemento de impermeabilización y terminación a base de pinturas blancas reflectantes.

#### EJECUCION DE LA BOVEDA DOBLE CURVATURA

Si la bóveda, se ejecuta con piezas huecas 25 x 25 x 10, se marca la superficie del molde con líneas longitudinales y transversales separadas 4 piezas; marcación que permite mantener la alineación de las juntas.

En las bóvedas Shed, donde el desarrollo de la línea de clave es mayor que la del arranque aproximadamente 60 cm, en correspondencia con el lucernario se le agregan 2 líneas más dejando entre ellas la caja para protegerlo y anclar los montantes; como se observa en los dibujos y fotos.

La construcción de la bóveda se inicia simultáneamente de ambos arranques con 2 equipos de obreros.

Supongamos el molde de 6 m y lleve 24 piezas en el ancho. A cada colocador se le asigna un ancho de 6 piezas = 1,50 m donde trabajan sin molestarse. Para la línea entera se necesitan 4 colocadores trabajando coordinadamente a igual ritmo colocando de a líneas enteras.

Terminada una se pasa a la siguiente.

Con la bovedilla convenientemente húmeda, se carga mortero en la sección útil de la pieza y se coloca en su lugar presionándola contra la viga de borde, reponiendo el mortero que se haya desprendido. En igual forma se coloca la vecina y las siguientes hasta terminar la línea.

Se coloca en igual forma la 2ª línea, guiándose por las marcas hechas en el molde, de manera de mantener la alineación de las juntas, y reponer el mortero que cae.

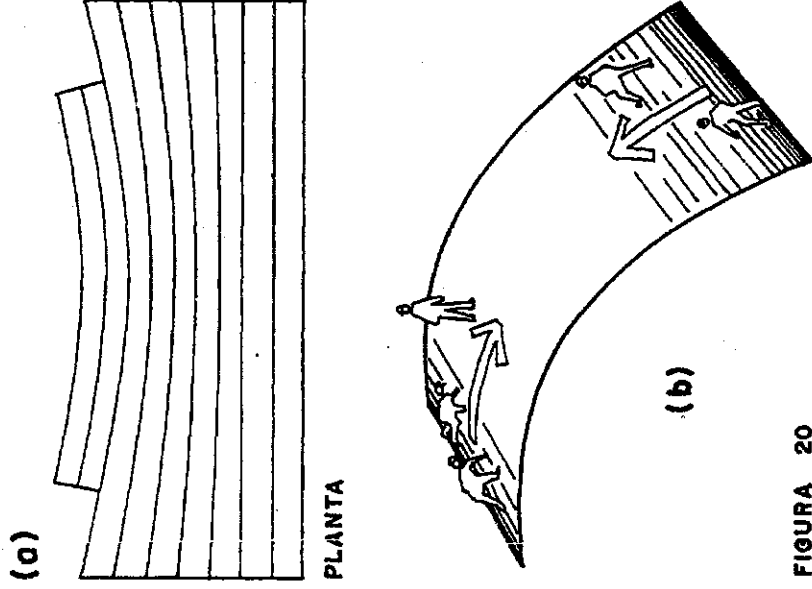


FIGURA 20

En la 4ª línea hay que colocar las piezas con ranuras donde se alojan las armaduras del nervio. Colocados los hierros se les mantiene en su lugar provisoriamente con unas piezas tapadas definitivas, cargando mortero con abundancia en las ranuras y en las de 5ª fila. Y así se siguen haciendo los arcos, dejando los nervios transversales vacíos, hasta hacer unos 6 m de faja. Se colocan los hierros en los nervios transversales, tratando de que queden en la altura prevista. En el cruce con el nervio longitudinal se atan los hierros dejando el alambre saliente para luego atar la malla; después se llenan los nervios transversales, compactándolos bien.

Afirmada así esta parte de faja, se continúa colocando líneas de bovedilla como indicado arriba, manteniendo las alineaciones.

Al llegar cerca de la clave se deja un sólo equipo de obreros para que no se molesten.

Los dos bordes de la faja, el alto y el bajo requieren una ejecución más cuidadosa por su forma y su importancia para la colocación del lucernario, disponiendo armaduras para solidarizarlos con el resto de la lámina. El borde alto trabaja en voladizo, y se armará como tal.

Terminado el rústico de cerámica, se extiende la malla electrosoldada, que se ataca con los alambres dejados a esos efectos, y luego se ejecuta el alisado de cemento arena, en la misma forma que se explicó antes.

Las bóvedas onduladas, continuas o Shed, tienen dimensiones de medianas para grandes, y todos los trabajos para terminar una faja, bajar, correr, subir el molde y ejecutar la bóveda, llevan aproximadamente 2 días. Al día siguiente a primera hora o antes, se baja a los tirantes las tensiones previstas, que son iguales a los empujes de esa faja sobre los pilares afectados, con lo que el molde queda aliviado. Entró a trabajar la bóveda soportando cargas que se restan de las que actuaban sobre el molde.

Tensado los tirantes, se prepara el molde para su descenso, descaizando todos los elementos que fueron caizados o apuntalados para soportar cargas o dar rigidez al molde.

Hecho esto, se bajan simultáneamente y suavemente los gatos apoyándose sobre las ruedas, que apoyarán sobre riel o camino firme que facilite el corrimiento y mantener la traslación.

Llegado a su nueva posición, se levanta el molde con acción suave y simultánea de los gatos, caizando los bordes del molde debajo de las vigas de borde.

La colocación del molde en su posición exacta no es fácil, porque hay que enfrenar correctamente las juntas marcadas en el forro con los hierros de empalme dejados en las vigas. Igual ajuste hay que hacer en el sentido transversal. Para este ajuste, es conveniente colocar en el molde y en la estructura, referencias que faciliten la operación.

Cuando se pide una terminación esmerada del intradós de la bóveda, inmediatamente después de corrido el molde se retocan las juntas, cuando el mortero es fácil de trabajar por no haber adquirido toda su resistencia. Con las herramientas apropiadas se retiran los chorretes o rebabas de mortero, y se rellenan las juntas donde se ha caído el mortero, repasándolas con una pieza en forma de media caña.

#### LUCERNARIOS

La herrería de los lucernarios conviene ejecutarla "in situ" y no en taller.

Sea el lucernario mostrado en la página 37.

Terminada la bóveda nos queda una abertura de 22,40 m. Los vidrios asientan sólo en los montantes, ni arriba ni abajo; y en lo posible se hacen de una sola pieza cuando la altura no es excesiva. Esto limita ya el ancho del vidrio y la separación de los montantes. Definida esta separación, se replantea la ubicación de cada montante marcando la cerámica en la caja superior y en el antepecho.

La medida de los montantes se toma en el sitio, y se cortan en las medidas necesarias para cumplir con el croquis adjunto.

Se perfora el alma del perfil T cada 40 cm para colocar los pasadores que retienen el vidrio. En su extremo inferior se dobla el ala para formar una oreja que impide el corrimiento del vidrio, y en el extremo superior se le sueldan 2  $\emptyset$  8.

Como la separación de los arcos superior e inferior no es fija, sino que varía con la temperatura, los montantes no se pueden afirmar rígidamente en ambos. Lo empotramos en la parte superior haciendo un agujero por donde pasan 2  $\emptyset$  8 soldados al extremo del perfil T y se empotran en la argamasa superior de la bóveda.

El extremo inferior del montante solapa 20 ó 25 cm el antepecho, para evitar la entrada de agua de lluvia con viento.

Frente a cada montante se empotra un hierro  $\emptyset$  8 en el antepecho, que tendrá la dimensión y forma del dibujo, en cuyos extremos se suelda un  $\emptyset$  12. Sobre este  $\emptyset$  12 se suelda el montante.

La deformación del hierro  $\emptyset$  8 inferior acompaña los movimientos de los arcos del tel y antepecho del lucernario.



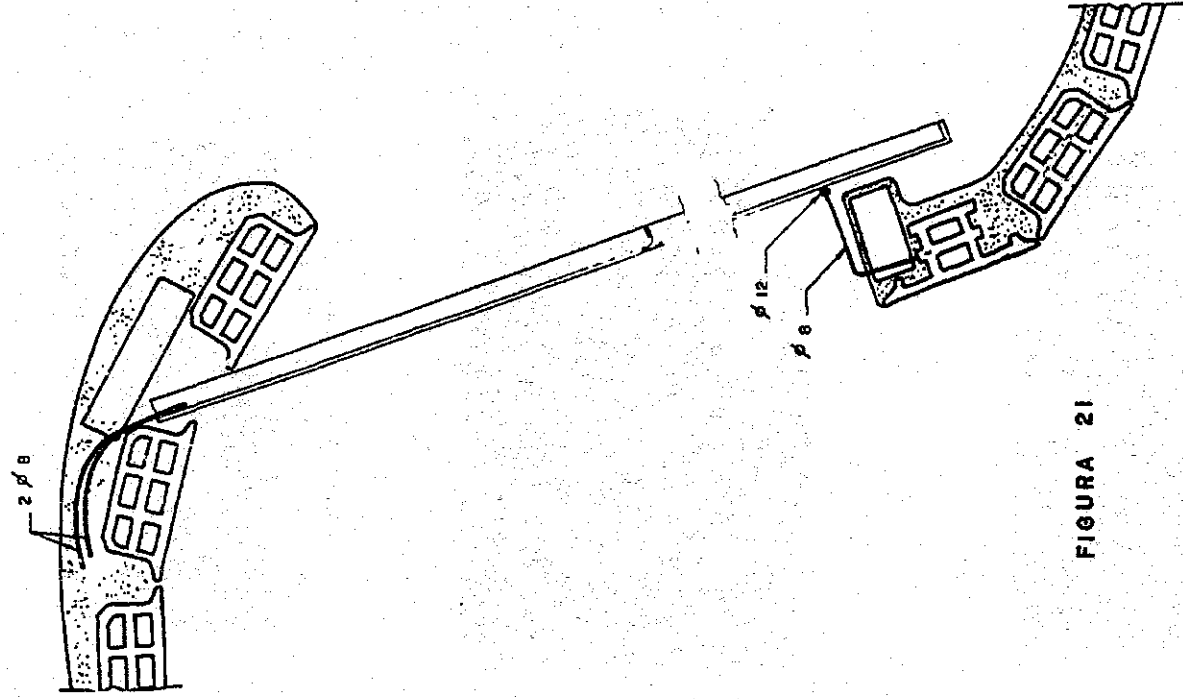


FIGURA 21



Fig. 1 - Bóveda cilíndrica; L = 5 m.  
Falta capa superior.

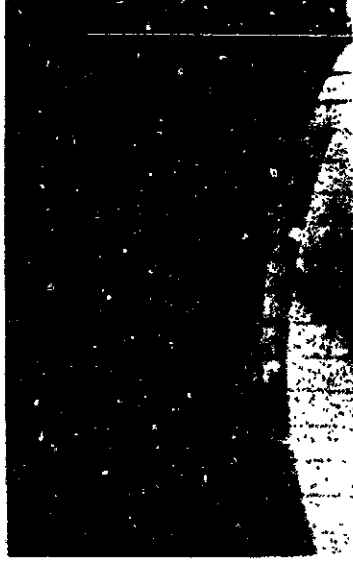


Fig. 2 - Bóveda cilíndrica; L = 16 m.



Fig. 3 - Bóveda de ondulación continua.  
Falta llenar nervios y capa superior.