

Nº 95

2EJ.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DISEÑO ESTRUCTURAL DE COMPUERTAS  
RADIALES**

**T E S I S**  
Que para obtener el Título de  
**INGENIERO CIVIL**  
p r e s e n t a

**JORGE ERNESTO QUINTANA Y TOPETE**



Director de Tesis:

M. en I. Tomás G. Sánchez Reyes

México, D. F.

1992

**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.

## I N D I C E

	Página
CAPITULO I	INTRODUCCION . . . . . 1
CAPITULO II	ESTRUCTURACION . . . . . 24
CAPITULO III	SOLICITACIONES . . . . . 34
CAPITULO IV	EJEMPLO DE DISEÑO. . . . . 52
CAPITULO V	CONCLUSIONES . . . . . 106
	REFERENCIAS . . . . . 107
	BIBLIOGRAFIA . . . . . 108

## C A P I T U L O I

### I N T R O D U C C I O N

El presente trabajo muestra en una forma general los distintos tipos de compuertas que se emplean en la mayoría de las obras hidráulicas de gran importancia como son específicamente los proyectos hidroeléctricos, en sus obras de tomas y de excedencias ó vertedores.

Dentro del contenido de este documento se estudia en forma particular el funcionamiento, tipos y elementos que constituyen una compuerta radial en obras de excedencias; así como algunos criterios y recomendaciones para su diseño estructural, en base a las condiciones de operación y las acciones permanentes y variables actuantes. Presentándose en la parte final el diseño de secciones y tipos de perfiles adecuados que se requieran para operar eficientemente las solicitaciones consideradas.

Para dar inicio al presente trabajo se considera necesario dar los antecedentes que permitan esbozar las características esenciales de un sistema hidráulico; así como de cada una de las partes que lo componen y así poder ubicar las compuertas hidráulicas, dentro del contexto de un proyecto hidroeléctrico.

## **1.1.- OBRAS HIDRAULICAS.**

Se definen como el conjunto de estructuras construídas con el objeto de manejar el recurso agua, con fines de aprovechamiento para beneficio humano y/ó en algunos casos como defensa, para evitar daños materiales y pérdida de vidas por siniestros. De acuerdo a sus funciones, por tanto, las obras hidráulicas pueden clasificarse en los dos grupos siguientes:

### **APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS**

- A).- Abastecimiento de agua a poblaciones.
- B).- Riego de terrenos.
- C).- Producción de energía.
- D).- Navegación fluvial.
- E).- Entarquinamiento.
- F).- Recreación.

### **OBRAS HIDRAULICAS DE DEFENSA**

- A).- Contra inundaciones.
- B).- Contra azolves.
- C).- Conducción de flujos imprevistos.

Es conveniente mencionar que existen obras hidráulicas llamadas de usos múltiples, las cuales cubren diversas funciones -- tanto de aprovechamientos hidráulicos, como de obras de defensa. Como ejemplo se pueden citar obras en donde se conjunta -

la función de riego, generación hidroeléctrica y control de --  
avenidas, tales como Comedero, Sin. y Aguamilpa, Nay. (en cons-  
trucción) entre otras muchas, aprovechando los escurrimientos-  
superficiales de los ríos.

A continuación se definen en forma breve los elementos que cons-  
tituyen un aprovechamiento hidráulico de un río.

- 1.- CUENCA: Es el área de captación, ó cuenca hidrográfica -  
de un río y es toda el área que capta el agua de  
lluvia enviándola al río en cuestión.
- 2.- PRESA: Se define como presa en general al vaso y conjun-  
to de obras, constituidas por cortina, obra de -  
desvío, obra de toma y obra de excedencias. Exis-  
ten presas de almacenamiento y presas de deriva-  
ción, la primera para almacenaje de agua en un -  
vaso, siendo su función el cambiar el régimen na-  
tural de escurrimiento a un régimen seleccionado  
de demanda. Las presas derivadoras en cambio --  
sirven como su nombre lo indica para derivar el-  
escurrimiento natural del río hacia un sistema -  
de conducción determinado.
- 3.- SISTEMA DE CONDUCCION: Puede estar formado por conductos  
abiertos ó cerrados, siendo estos conductos las-  
estructuras a través de las cuales se dirige el-  
agua hasta su destino en la zona del aprovecha--

miento.

4.- SISTEMA DE DISTRIBUCION: Son las estructuras que se construyen en función de la utilización que se le asigna al agua en el aprovechamiento, por ejemplo: canales de riego por gravedad, tuberías a presión para generación de hidroelectricidad, dotación de agua a poblaciones, etc.

5.- SISTEMA DE UTILIZACION DIRECTA DEL AGUA: Se encuentra formado por los mecanismos que generan la satisfacción de la necesidad que dió origen a la construcción del aprovechamiento, por ejemplo: turbinas en el caso de generación de hidroelectricidad, tomas domiciliarias en el caso de abastecimiento de agua a poblaciones, así como procedimientos directos de riego ó almacenamiento, etc.

6.- SISTEMA DE ELIMINACION DE VOLUMENES: Sirve para canalizar el agua que deja de ser utilizable en el aprovechamiento y se compone de diversos tipos de estructuras, de acuerdo a las funciones del aprovechamiento, por ejemplo: sistema de alcantarillado y/o drenes en riego, estructuras de desfogue en proyectos hidroeléctricos, etc.

## 1.2.- OBRA DE CONTROL DE EXCEDENCIAS.

El diseño de las obras de excedencias en proyectos hidroeléctricos reviste una importancia extrema ya que esta estructura es la que proporciona la seguridad de toda la presa, y por lo tanto requiere de un cuidado especial, al seleccionar los criterios con los cuales se diseña. La falla de esta estructura pone en peligro no sólo las instalaciones para generación sino también la cortina, poblaciones y campos que se encuentren aguas abajo del sistema hidroeléctrico.

Como su nombre lo indica las obras de excedencias tienen como función específica el extraer los volúmenes de agua excedentes, que estén llegando al vaso, es decir, agua que ya no puede ser almacenada de forma segura en el embalse, porque de no sacarse produciría una elevación en el nivel del vaso para la cual no están diseñadas las estructuras de la presa. Para determinar los volúmenes a manejar por medio de esta obra, es necesario hacer un estudio hidráulico completo (el cual no está contenido dentro del alcance de este trabajo), considerando tanto la hidrología, la cuenca, como las características del aprovechamiento, fijándose finalmente como resultado de este estudio las dimensiones de los componentes de esta obra, así como las políticas de operación de la misma, es decir la cantidad de agua que debe extraerse del vaso en función de los niveles en el embalse y la operación de la planta hidroeléctrica.

En sí una obra de excedencias consiste de una estructura (gene-

ralmente de concreto) que forma un conducto, el cual se obtura por medio de una estructura metálica llamada compuerta, que al subirse ó bajarse permite ó impide respectivamente el paso del agua a través de dicho conducto, haciendo ésto que se regule la cantidad de fluido a extraerse del embalse.

### 1.3.- COMPUERTAS

Estos elementos, tienen como finalidades la regulación, manejar niveles en embalses y control de gastos por conductos, se utilizan tanto en obras de toma como de excedencias en plantas hidroeléctricas.

En obras de toma estas estructuras se utilizan en casos de emergencia (fallas en tubería a presión) y para mantenimiento de -- turbinas ó conducción.

En obras de excedencias se utilizan las compuertas para controlar los niveles excesivos en el embalse, producto de avenidas, -- así como para hacer mantenimiento ó reparaciones en las estructuras de descarga ubicadas aguas abajo de estas compuertas en -- los canales de servicio, usando los vertedores auxiliares.

De acuerdo a su forma y a las características de su operación, -- las compuertas en general pueden encuadrarse en tres grupos --- principales, que son: compuertas tipo deslizante, compuertas ro -- dantes y compuertas radiales, siendo éstas últimas las que estu -- diaremos más ampliamente a lo largo de los capítulos siguientes de este trabajo.

#### a) Compuertas Deslizantes.

Estas compuertas se componen de tres partes que son: cuer -- po, vástago ó flecha de izaje y sistema accionador que pue -- de ser un motor ó un servomotor.

El cuerpo de la compuerta es el elemento obturador del sistema, el cual impide el paso del agua al deslizarse y cerrar el vano del conducto. Este elemento es metálico, con una superficie plana en el contacto con el agua, deslizando en guías laterales y ligadas al mecanismo de izaje a través del vástago ó flecha. Ver corte tipo de una obra de toma de un proyecto hidroeléctrico en la figura # 1, donde se aprecia que existen dos compuertas deslizando una llamada de servicio y otra de emergencia; la de servicio se emplea cuando se requiere hacer reparaciones en la conducción y la de emergencia se utiliza en caso de falla de la compuerta de servicio ó para mantenimiento de la misma. Es conveniente señalar que este tipo de compuerta puede ser sometida en apertura a la presión hidrostática del embalse y por ésto, requiere de un mecanismo de izaje (malacate ó servomotor) suficientemente potente para vencer la fricción que se genera en las superficies de deslizamiento. El cierre de estas compuertas se hace normalmente con presión equilibrada en ambas caras de la compuerta, por lo que esta maniobra no es crítica, salvo en el remoto caso de tener una falla en la conducción a presión que requiere de un cierre de compuerta con flujo de agua, necesitándose el uso de un servomotor con capacidad suficiente para empujar la compuerta hacia abajo logrando el cierre.

En obra de excedencias suelen utilizarse estas compuertas sólo en caso de emergencia, cuando existen dificultades -

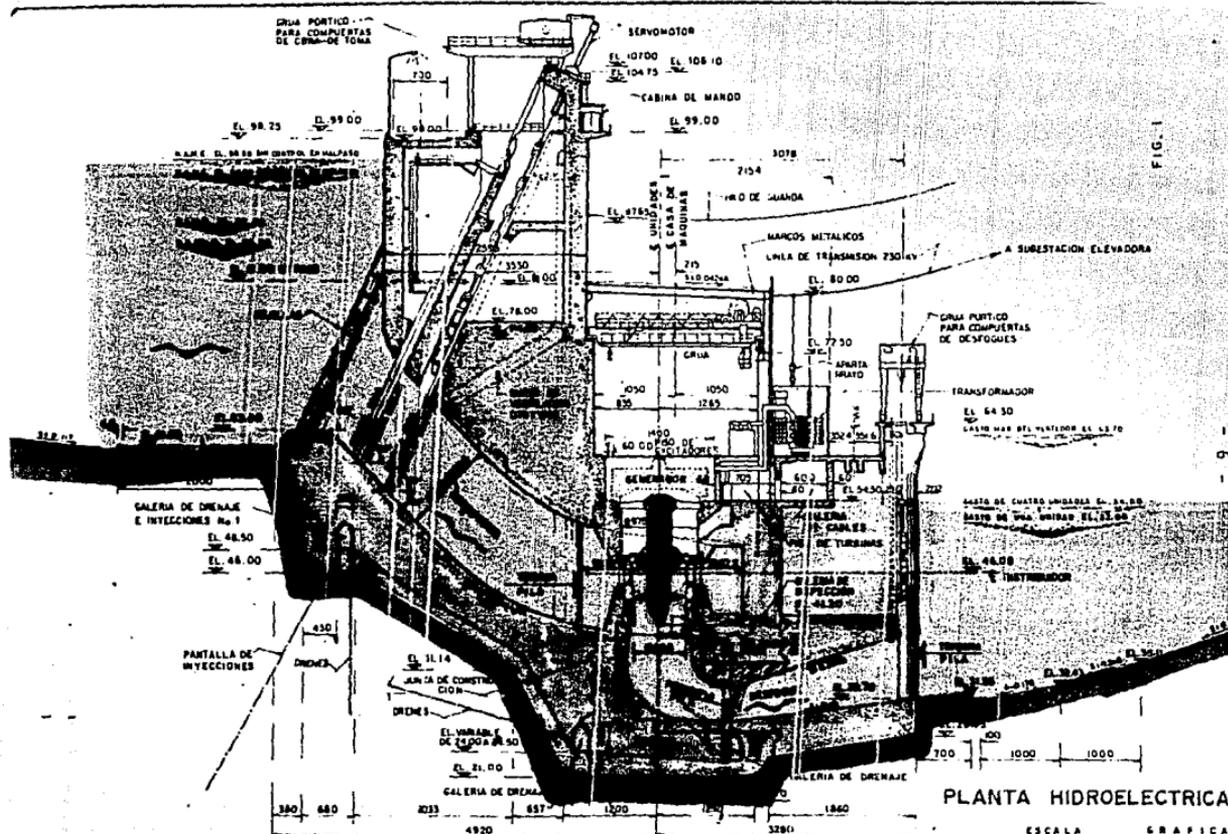


FIG. 1

CORTE TRANSVERSAL POR  $\frac{1}{2}$  UNIDAD

PLANTA HIDROELECTRICA



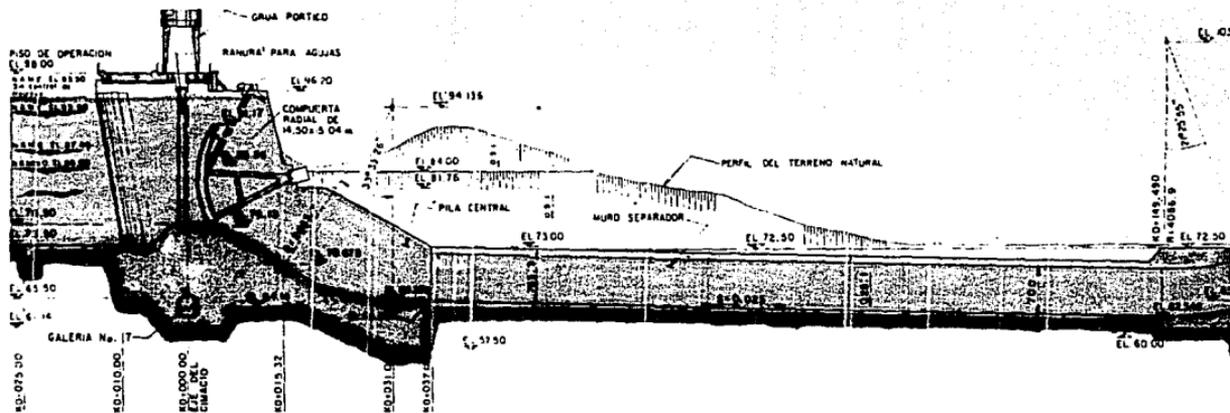
para operar las compuertas de servicio (generalmente radiales) denominándoseles con el nombre de agujas, por no estar integradas en un sólo cuerpo principal, sino en secciones horizontales que se van deslizando una a una por las ranuras guías obturando el vano hasta el nivel deseado.

Ver un ejemplo típico en un proyecto hidroeléctrico en la figura # 2 (Peñitas). Cabe mencionar que dependiendo la carga a soportar y el claro, las agujas pueden ser de material acero ó concreto reforzado.

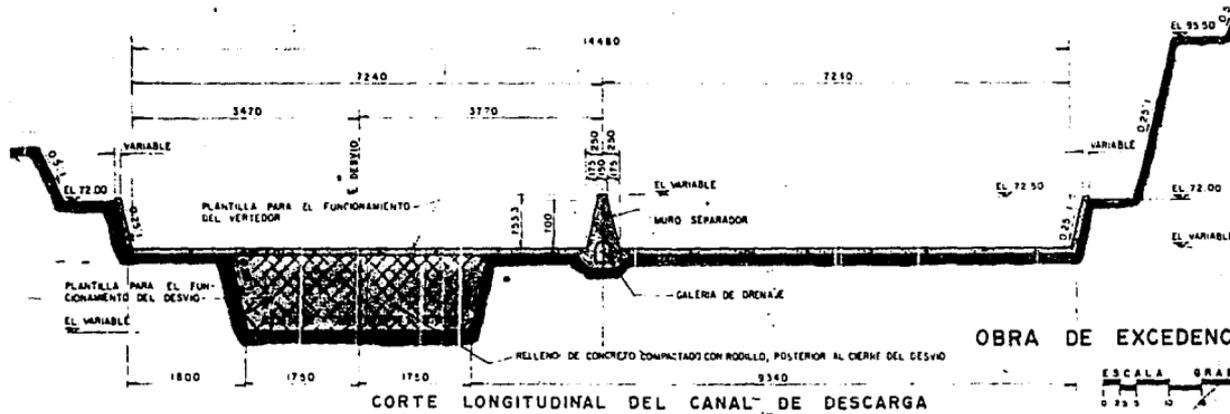
En el caso particular de compuertas deslizantes en obras de riego es importante mencionar que estas estructuras a diferencia de las antes descritas deben ser diseñadas para operar con aperturas parciales.

#### b) Compuertas Rodantes.

Estas compuertas tienen características estructurales, morfológicas, funcionales y de aplicación totalmente similares a las de las compuertas deslizantes, salvo que, en vez de tener superficies planas de deslizamiento, se tienen rodamientos en la compuerta, los cuales se mueven apoyándose en pistas metálicas ligadas a la estructura de concreto que forma el conducto. El empleo de rodamiento en estas compuertas permite su movimiento de modo más fácil, dado que se reduce notablemente la fuerza de fric---



CORTE TRANSVERSAL POR VERTEDOR DE SERVICIO



CORTE LONGITUDINAL DEL CANAL DE DESCARGA

FIG. 2

11

ción que se genera en el caso equivalente de una compuerta deslizante, teniéndose por tanto requerimientos de -- fuerzas de izaje menores y disminución de desgaste entre superficies de apoyo y rodamientos, siendo por ésto susceptibles de ser utilizadas con cargas hidrostáticas mayores por lo que se prefieren en obras de toma profundas, tanto para servicio como para emergencia.

Es importante mencionar que debe tenerse cuidado en seleccionar los materiales a utilizar como pistas y rodamientos en obras profundas porque la alta presión a que se someten estos elementos puede ocasionar su fusión y consecuente inutilización.

En la figura # 3 se puede apreciar una vista frontal de un par de compuertas rodantes colocadas en la plataforma de maniobras de la obra de toma de una presa. En la figura # 4 se observa la parte posterior de las compuertas antes mencionadas, en donde pueden identificarse los rodamientos integrados en el cuerpo de la estructura. Adicionalmente, en ambas fotografías aparece la grúa que se utiliza para subir y bajar dichas compuertas en la obra de toma; obsérvese que en el piso existen rieles que permiten el desplazamiento lateral de la grúa, lo que le permite colocarse en la bocatoma de la compuerta que se piense maniobrar, haciendo ésto por medio de un malacate, por lo que en este caso en particular para cerrar la compuerta ésta se rueda a su condición de sellado por peso propio -

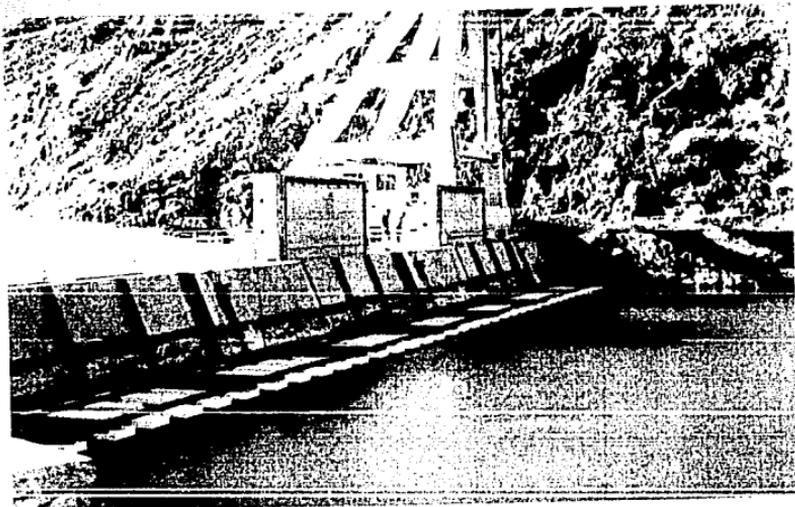


FIG. 3

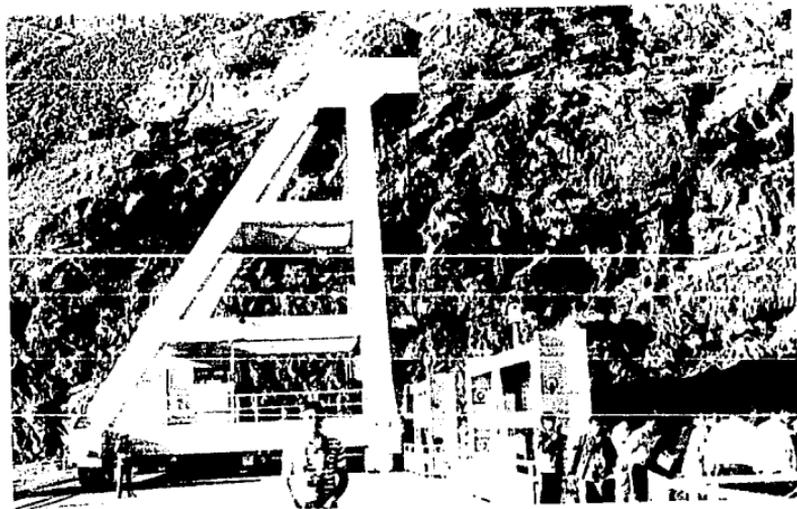


FIG. 4

Únicamente. El mantenimiento de compuertas se hace en general fuera del agua en una caseta de operación ó en una plataforma próxima a la de maniobras.

c) Compuertas Radiales.

Se les designa con este nombre en virtud de que la pantalla frontal tiene la forma de una porción de cilindro, y al operarse giran alrededor de un eje horizontal. Estas compuertas se diseñan actuando el agua en el lado convexo, aún cuando en ocasiones la presión hidrostática ha sido aplicada en el lado cóncavo.

Estructuralmente, la transmisión de cargas en estos elementos se puede describir de la manera siguiente:

Al actuar la presión hidrostática y la placa cilíndrica frontal, las fuerzas que se generan en dicha placa se transmiten a un encamado de vigas horizontales ó verticales de apoyo que a su vez se soportan en los brazos radiales que convergen cada uno en su perno de apoyo, encontrándose éste en el eje del cilindro.

En proyectos hidroeléctricos estas compuertas se usan en general en obras de excedencias, utilizándose también en obras de riego para controlar el abastecimiento de agua, en canales de irrigación y en obras de toma algunas ocasiones.

A veces a las compuertas radiales se les llama también --  
compuertas de segmento.

Las características más importantes de estas compuertas, -  
que las hacen particularmente útiles para ser empleadas -  
en obras de excedencias como compuertas de servicio y de-  
emergencia son:

- i) Dada la geometría de la pantalla y en virtud de que la carga hidrostática es radial también en la compuerta, - el mecanismo de izaje se optimiza en cuanto a potencia, ya que al girar la estructura con respecto a los pernos, éstos funcionan como apoyo para desarrollar un brazo de palanca de segundo orden.
- ii) Estadísticamente se ha observado que estas estructuras presentan con economía una seguridad máxima en estructuras vertedoras.
- iii) En cuanto a mantenimiento de sus partes móviles, cada compuerta tiene chumaceras de tipo autolubrificante, lo cual facilita su accionamiento, y dado que estas chumaceras están por lo regular arriba del tirante del flujo, facilitan grandemente su inspección y en caso necesario la ejecución de maniobras de mantenimiento.
- iv) En cuanto a las guías laterales metálicas que se requieren dejar ahogadas en cada pila, éstas no presentan di-

ficultades ya que son elementos ligeros de fácil instalación, que no requieren tanta precisión en su colocación, ni son tan pesados como los que se emplean en las estructuras deslizantes ó rodantes.

- v) Dado que al fijar la geometría de la compuerta se hace coincidir el eje de rotación con el centro del arco -- del segmento, no existe problema de flotación, pudiéndose aprovechar este efecto para optimizar el mecanismo de izaje.

En la figura # 5 se muestra una compuerta radial típica - en la que se señala de manera clara y objetiva las partes que la componen.

Adicionalmente a los tipos de compuertas antes descritos, existen otras que son menos frecuentes de utilización en obras hidráulicas (particularmente en el caso de proyectos hidroeléctricos) y que sólo mencionaremos brevemente con una descripción general de sus características en los párrafos siguientes:

Compuertas de rodillo, se emplean para claros grandes y cargas hidrostáticas reducidas, consta de un cilindro de acero con una cuchilla metálica de cierre sobre la cresta del vertedor, se opera a través de cables que hacen girar el rodillo sobre los apoyos de las pilas a través de un sistema mecánico a base de dientes. Ver figura # 6.

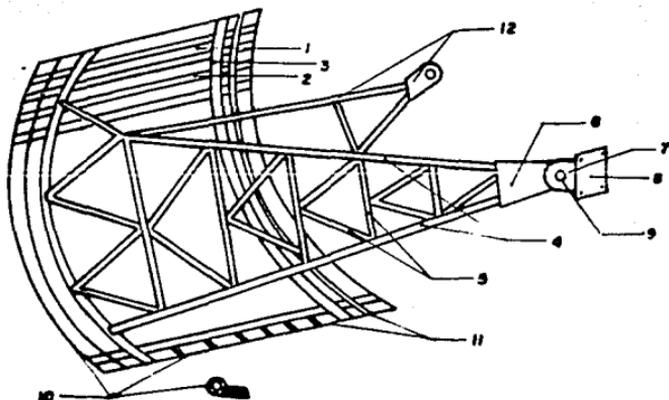


FIG. 5

LOS ELEMENTOS DE QUE CONSTA UNA COMPUERTA RADIAL SON LOS SIGUIENTES:

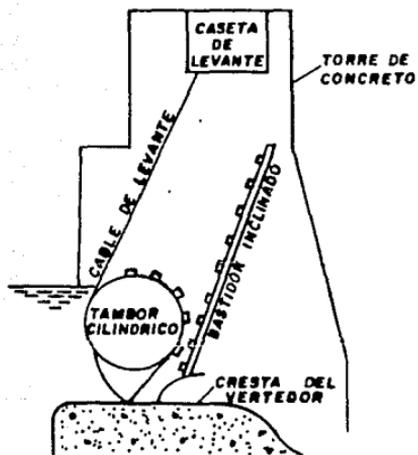
1. CUBIERTA
- 2.- LARGUEROS
- 3.- VIGAS CURVAS (EXTREMAS)
- 4.- LOS BRAZOS
- 5.- CONTRAVIENTO
- 6.- PLACAS LATERALES EN LA UNION DE LOS BRAZOS
- 7.- CUBO DE LOS BRAZOS Y BUJE
- 8.- SOPORTE DEL PERNO
- 9.- EJE O PERNO
- 10.- SELLOS
- 11.- ATIESADORES
- 12.- OREJAS Y MECANISMO DE IZAJE

Compuertas de tambor, se utilizan también para claros grandes y cargas hidrostáticas reducidas, son estructuras metálicas generalmente huecas (por eso su nombre) que se articulan en el vertedor de tal manera que el cierre se logra al tener fuerza de flotación en la compuerta. Ver figura # 7.

Relacionados con el funcionamiento de las compuertas de obra de toma de proyecto hidroeléctrico están los dispositivos de cierre (válvulas) que se colocan antes de las turbinas, específicamente en cada rama de las bifurcaciones de las tuberías a presión. Estas válvulas se utilizan con el fin de permitir el mantenimiento de una turbina sin tener que sacar fuera de operación a las otras turbinas que se alimentan por una tubería a presión común.

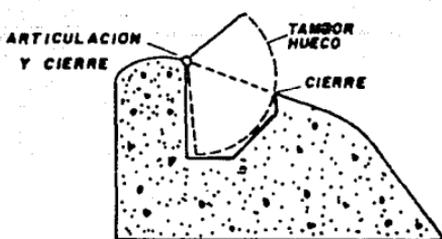
Existen dos tipos de válvulas más comunmente empleadas que son las válvulas de mariposa y las válvulas esféricas, siendo utilizadas las primeras cuando las cargas hidráulicas son altas (mayores de 100m) y las segundas para cargas más reducidas.

Las válvulas de mariposa ó lenteja se componen por un disco metálico balanceado, que se encuentra montado en una flecha vertical u horizontal ver figura # 8 que al girar permite regular el paso del agua a través de la tubería. Cuando la carga hidráulica sobre la válvula es sumamente elevada, en ocasiones se emplea una válvula de mariposa modificada, llamada válvula biplana que consiste en el mismo mecanismo antes descrito; pero el disco metálico se optimiza no haciéndolo de metal sólido sino -



COMPUERTA DE RODILLO

FIG. 6



COMPUERTAS DE TAMBOR

FIG. 7

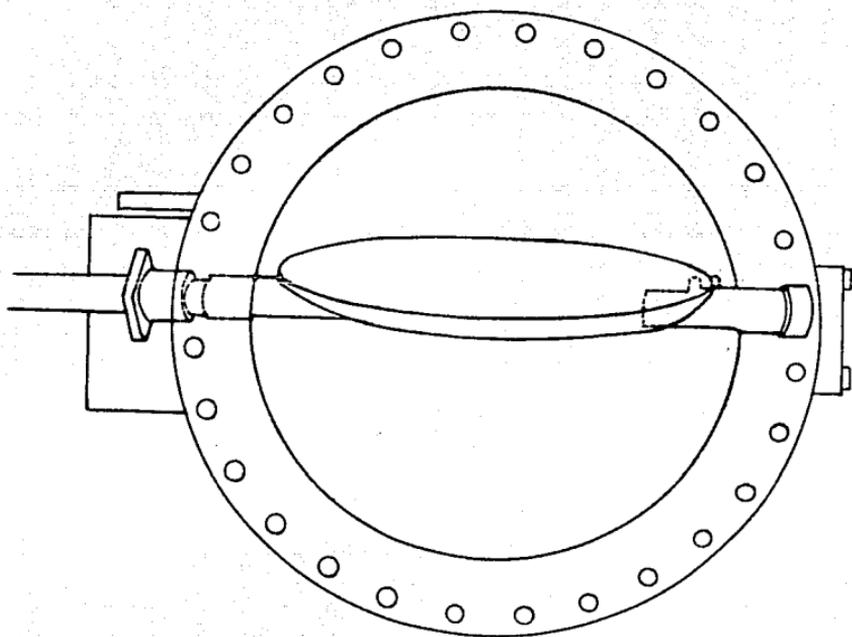


FIG. 8

por medio de dos placas ligadas a través de una celosía ver figura # 9.

Las válvulas esféricas están formadas por una esfera hueca exterior dentro de la cual se aloja otra esfera interior con un hueco tubular al centro, de tal modo que al alinearse el agujero circular de la esfera exterior y el hueco tubular de la esfera interior se permite el paso libre del agua y al desviarse este alineamiento se controla el flujo a través del conducto, ver esquema en la figura # 10.

Tanto para las válvulas de mariposa como para las esféricas los mecanismos por medio de los cuales se accionan pueden ser eléctricos, mecánicos ó hidráulicos, teniéndose por seguridad siempre un mecanismo manual adicionalmente a cualquiera de los antes señalados.

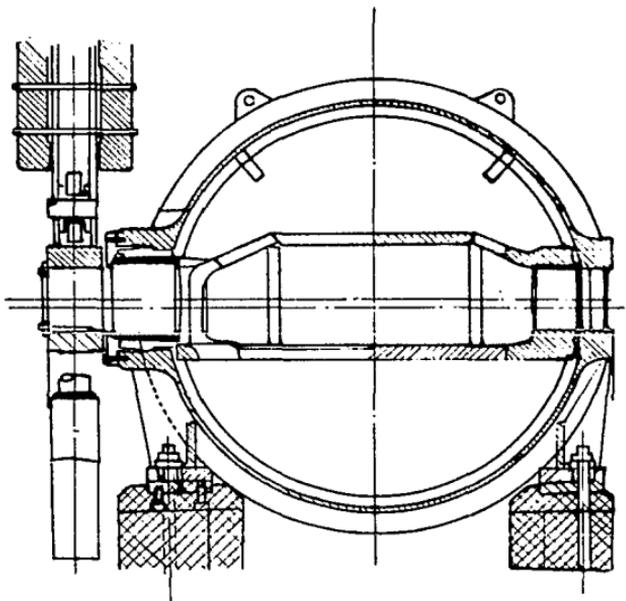


FIG. 9

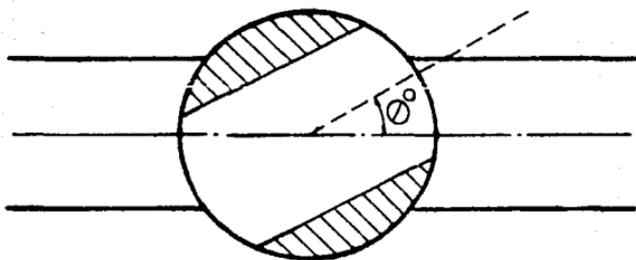


FIG. 10

## C A P Í T U L O I I .

### ESTRUCTURACION

#### ANTECEDENTES

Después de realizar una estadística de la procedencia tecnológica de las compuertas radiales que actualmente se encuentran en los proyectos hidroeléctricos en operación se pudo determinar - que en esas plantas ó por lo menos en la inmensa mayoría de -- ellas, estas estructuras han sido construídas siguiendo crite-- rios, diseño y normas extranjeras, siendo la razón principal de ésto, el que la adquisición de compuertas ha entrado tradicio-- nalmente en la C.F.E. en el rubro de suministro electromecánico de equipo, en virtud de que éstas vienen asociadas, como se es-- tableció en el capítulo anterior, con los equipos de izaje y -- control y se adquieren a los proveedores de los mismos, siendo diseñadas estas estructuras por áreas electromecánicas en el ex-- tranjero.

Pero dado que las compuertas radiales son estructuras metálicas convencionales, sólo con geometría y condiciones de carga y apo-- yo particulares, son por lo tanto totalmente susceptibles de ser analizadas y diseñadas por los métodos tradicionales utilizados en Ingeniería civil. En este capítulo se procede a describir, - aprovechando las experiencias exitosas de uso de estos elemen-- tos tanto en el país como en el extranjero, las diversas estruc-- turaciones utilizadas ya que éstas son la base fundamental, co-- mo bien es conocido, de un adecuado y satisfactorio comporta-- miento estructural de los elementos que la constituyen.

## 2.1 ESTRUCTURACION

En general las compuertas radiales empleadas en obras de exce--  
dencias de proyectos hidroeléctricos en el mundo tienen relacio--  
nes de altura a ancho menores de dos, siendo algunas excepcio--  
nes de ésto, proyectos tales como los de Peñitas, Chis. y Chi--  
coasén, Chis., las cuales tienen relaciones de hasta dos punto  
cuatro. La razón de tratar de mantener baja esta relación al--  
to/ancho es cuestionable desde el punto de vista estructural pe--  
ro en apariencia se debe a que la rigidización de compuertas --  
con relaciones altas resulta cara y a que la no rigidización --  
satisfactoria de estos elementos provoca que dada la flexibili--  
dad de la estructura se observen problemas de vibración durante  
su operación en etapas críticas y en otros casos problemas de -  
operación en izaje por las deformaciones elásticas de los ele--  
mentos.

Un criterio que a menudo se ha seguido para definir la estructu--  
ración de una compuerta es el tener vigas secundarias vertica--  
les curvas apoyadas sobre dos vigas maestras horizontales cuan--  
do se tienen claros largos por cubrir con alturas pequeñas, ---  
mientras que es más usual encontrar estadísticamente que se ha--  
estructurado con vigas horizontales apoyadas en vigas curvas --  
verticales cuando se tiene alturas mayores que los anchos por -  
cubrir. Es necesario aclarar que si bien ésto se observó esta--  
dísticamente, es decisión del Ingeniero, en base al caso en par--  
ticular a tratar, el seleccionar la estructuración más conve--  
niente en base a un prediseño, del cual pueda generarse la solu--

ción más económica tomando en consideración no sólo el costo si no también los aspectos estructurales (peso, rigidez, resistencia, etc.) así como otros factores entre los cuales es posible mencionar la sencillez del proceso constructivo, facilidad de montaje y sencillez en la operación y mantenimiento.

Una estructuración típica a base de vigas secundarias curvas -- apoyadas en vigas horizontales maestras se puede observar en la figura # 11. En este caso el espaciado de las vigas secundarias se hace de tal modo que resulten colocadas en forma equidistante, dada su condición de carga, pudiéndose tener en la pantalla frontal un espesor constante ó variarlo en función de la altura de la compuerta, los brazos pueden ser perpendiculares a la pantalla ó formar un ángulo con ella dependiendo del mecanismo de izaje que se utilice para su operación.

En la figura # 12 se muestra esquemáticamente una estructura a base de vigas secundarias horizontales apoyadas en vigas curvas verticales. A diferencia del caso anterior, las vigas horizontales pueden espaciarse de manera no uniforme, dependiendo de la altura de la compuerta, pues la carga hidrostática al cambiar con la profundidad da condiciones diferentes para las vigas colocadas en la parte superior con respecto a las colocadas en la parte inferior de la compuerta, siendo posible por la misma razón tener placas de pantalla con diferentes espesores -- siendo en la parte superior más delgada que en la parte inferior. Como se ve en la figura en cuestión, las vigas horizonta

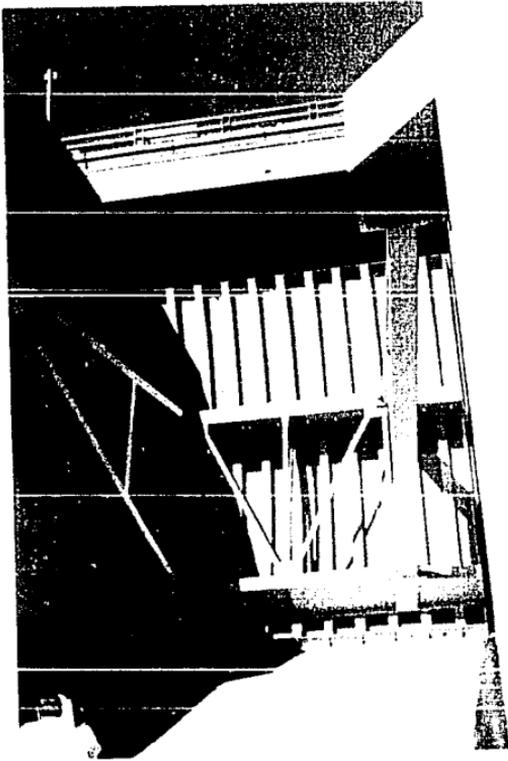


FIG. II

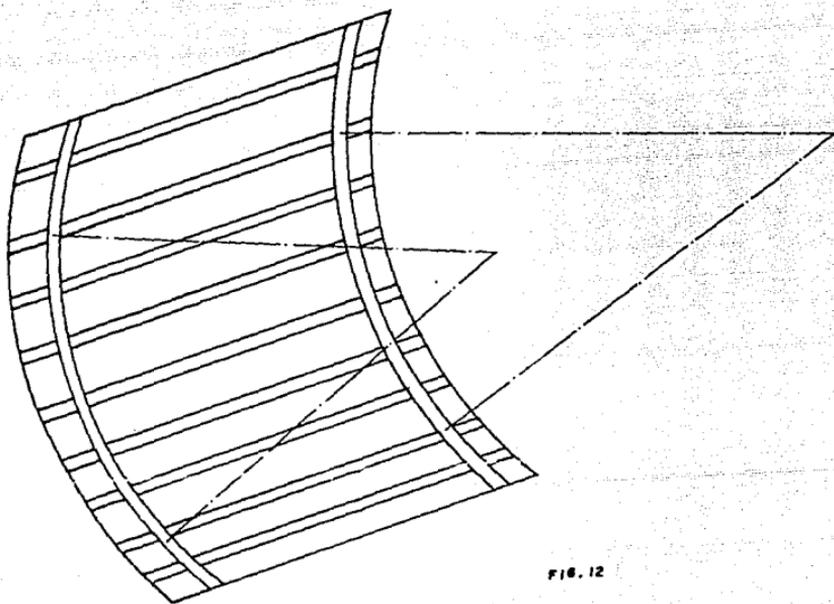


FIG. 12

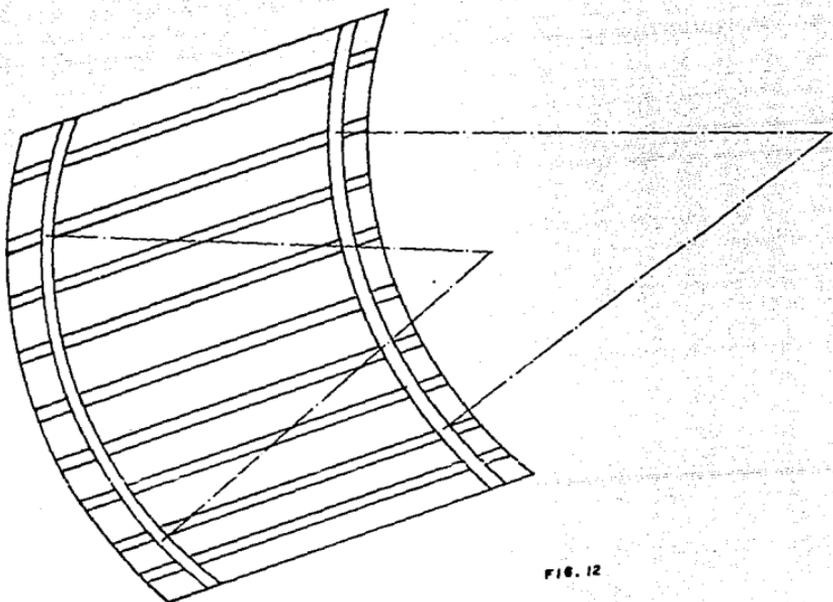


FIG. 12

les se apoyan sobre dos vigas curvas verticales que se sitúan en los extremos de la compuerta, las que a su vez se apoyan en los brazos, los cuales como en el caso descrito anteriormente pueden ser perpendiculares ó oblicuos a la pantalla en función del diseño del mecanismo de izaje.

A continuación se hace una descripción más detallada de la función estructural de los elementos que componen las compuertas radiales a base de vigas horizontales secundarias, ya que el ejemplo que posteriormente se maneja utiliza esta estructura.

La pantalla frontal está formada por placa estructural que al encontrarse expuesta directamente a la carga de agua, debe ser diseñada considerando esta acción fundamental y con condición de apoyo libre sobre los elementos estructurales horizontales de soporte, por lo que el espesor de estas placas se determina al obtener el costo más económico que resulta de analizar y optimizar la separación de las vigas secundarias (mayor espesor de placa) ó la disminución en separación de vigas secundarias que consecuentemente disminuye el espesor de placa pero aumenta el número de vigas horizontales y peso de compuerta.

Las vigas secundarias horizontales se diseñan por tanto, con el área tributaria correspondiente y la presión hidrostática actuante, como vigas simplemente apoyadas sobre las vigas curvas verticales.

Las vigas curvas verticales, se analizan discretizándolas en -- tramos rectos, considerándoles apoyos rígidos en los brazos y -- sometidos a las cargas transmitidas por medio de las vigas se -- cundarias horizontales.

Los brazos de las compuertas son los elementos estructurales -- más importantes, por lo que su diseño debe de realizarse con ex -- tremo cuidado para evitar una posible falla ya que ésta sería -- catastrófica para la presa y sus afectaciones aguas abajo.

La definición de la longitud de los brazos de las compuertas -- así como su ubicación en la obra de excedencias se establecen -- por requerimientos hidráulicos y estructurales pudiéndose tener -- compuertas con brazos esbeltos de manera tal que se haga neces -- rio colocar celosía metálica en el plano de los brazos y per -- pendicularmente entre brazos, de tal modo que se evite el pro -- blema de falla por pandeo de estos elementos, lo anterior dado -- que las cargas que resisten son fundamentalmente de compresión -- por la transmisión de la carga hidrostática y flexión por los -- efectos de la estructuración, que a continuación se apuntan.

- a) Flexión alrededor del eje de mayor momento de inercia transmitido por las vigas horizontales.
- b) Flexión debido a la fricción entre el buje del cubo y el eje ó perno de la compuerta respecto al eje de menor momento de inercia.

- c) Flexión debida al movimiento lateral de la compuerta.
- d) Flexión alrededor del eje de menor momento de inercia, debido al peso propio de la compuerta.

En el caso de tenerse brazos con celosías, los brazos representan las cuerdas de la armadura, iniciándose esta armadura en el perno ó eje y terminando en la viga curva vertical. Para el caso de celosía entre brazos, ésta se coloca para evitar la inestabilidad en este plano y en ocasiones para evitar el cabeceo - excesivo de la pantalla en este plano, lo cual pudiese tener como consecuencia la aparición de dificultades en las maniobras - de operación de las compuertas.

Existen también en algunas plantas hidroeléctricas compuertas a las cuales se les ha colocado una armadura entre brazos fuera - del plano horizontal, con el fin de fijar a ella el mecanismo - de izaje, particularmente en estos casos servomotor, y transmitir las cargas correspondientes a los elementos estructurales. Como un ejemplo de lo anterior puede citarse las compuertas de la planta El Infiernillo de C.F.E. en su obra de excedencias.

En cuanto a los mecanismos de izaje, éstos consisten de malacates ó servomotores, que se unen a la compuerta por una estructura de izaje que puede estar formada por cadenas y orejas de carga ó por una armadura entre brazos tal y como se comentó en el párrafo anterior.

En el caso de emplearse cadenas y orejas, el mecanismo para operar la compuerta consiste en un malacate colocado arriba de la compuerta, entre las pilas, particularmente en el llamado puente de maniobras. Las orejas son por lo general dos en cada compuerta ubicados en la parte inferior de la misma y coincidentes con la proyección del brazo sobre la placa frontal de pantalla, pues con ésto se consigue una transmisión de carga menos desfavorable. Las llamadas orejas son simples placas recortadas, a las que se les hace una perforación para permitir la entrada -- del primer eslabón de la cadena y que se sueldan a la pantalla frontal de las compuertas. El diseño de estas piezas se hace -- considerando la carga de izaje la cual corresponde al peso de -- la compuerta y fuerzas de fricción que se generan entre sellos -- y guías laterales así como la producida en la chumacera de carga. Las cadenas para izaje son estándares y se especifican de acuerdo con la carga de izaje, es conveniente señalar que las -- zonas en que las cadenas entran en contacto con la placa de pantalla es usual colocar placas adicionales para evitar daño por la presión de contacto ejercida por las cadenas sobre la placa frontal.

En el caso de haberse seleccionado cadenas y orejas para mover la compuerta, las desventajas que se deben enfrentar son:

- a) Vibraciones en la cadena en las maniobras de izaje.
- b) Carga adicional al metal de la pantalla por el efecto -- de presión de contacto entre las cadenas y la placa durante su izaje.

- c) Problemas de deterioro de cadenas y orejas por estar en contacto con el agua, así como dificultades en su mante  
nimiento por encontrarse estos elementos en la cara de  
aguas arriba y por tanto sumergidas.

Finalmente, las estructuras que reciben la carga de los brazos -  
son las chumaceras de carga, las cuales se encuentran constituf  
das por el perno y su soporte.

La transmisión de carga de los brazos a las chumaceras se hace  
por el contacto entre la estructura terminal de dichos brazos -  
(cubo y buje) y el perno y su soporte.

El diseño de estos elementos de soporte en compuertas grandes -  
usualmente contempla el ligar las chumaceras de carga a través-  
de una trabe ó viga denominada testera, la cual se coloca entre  
pilas (ligadas a éstas por medio de anclas metálicas) y que se  
emplean con el fin de controlar las deformaciones relativas.

## C A P I T U L O   I I I

### SOLICITACIONES

Para realizar el análisis estructural de las compuertas radiales de obra de excedencias en proyectos hidroeléctricos se requiere como en cualquier otra estructura, el conocer las características de las acciones a las cuales se va a ver sometida, tanto permanentes como variables y accidentales, durante la construcción, transporte, montaje y operación en el transcurso en general de su vida útil.

Es por lo antes señalado que en este capítulo se describen la naturaleza de las acciones que obran sobre estas estructuras así como las combinaciones de carga que deben en su caso considerarse actuando simultáneamente sobre las compuertas. Es conveniente mencionar que a la fecha la revisión y diseño estructural de estos elementos metálicos ha sido realizada de acuerdo al criterio de esfuerzos permisibles por lo que en este trabajo se ha empleado dicho criterio y por lo tanto se valorarán sólo las cargas de servicio correspondientes.

#### Cargas Permanentes

Por definición estas cargas son las que actúan de manera constante sobre una estructura, sin variar en magnitud, dirección y sentido con respecto al tiempo.

Se considera para el caso de compuertas radiales como cargas permanentes las derivadas del peso propio de la estructura. Siendo necesario analizar en este caso las diversas posibilidades de la aplicación del peso propio, pues al girar la compuerta alrededor de su eje (operación de compuerta) cambia la posición de aplicación de estas acciones, pudiendo cambiar adicionalmente las condiciones de apoyo de la estructura, apoyada en el labio inferior al estar cerrada completamente la compuerta ó apoyada en los mecanismos de izaje para el caso de apertura parcial por ejemplo, lo que hace indispensable analizar los casos que resulten más críticos para cada estructura en particular, de acuerdo a la política de operación del vertedor de la planta en estudio y al criterio del Ingeniero de diseño.

Al revisarse sólo el caso de peso propio de compuertas se tiene que analizar los casos extremos por lo menos de compuerta apoyada en el labio inferior y compuerta totalmente abierta.

#### Cargas Variables

Se definen como cargas variables aquellas que por su naturaleza varían con respecto al tiempo, ya sea en magnitud y/o posición. En el caso de compuertas radiales, las cargas variables más significativas que actúan en la estructura son las debidas a la presión hidrostática ya que dicha presión depende del tirante de agua que actúa contra la pantalla frontal y de la condición de operación en que se encuentre la compuerta (cerrada ó parcialmen

te abierta). Debiéndose analizar siempre como casos extremos la condición de carga de compuerta cerrada con tirante máximo en el embalse apoyando sólo en el labio inferior en un primer caso y - apoyada sólo en el mecanismo de izaje en un segundo caso ya que esta última condición se presentará en el preciso momento de iniciar la maniobra de apertura con carga hidrostática máxima.

Es conveniente señalar que en proyectos hidroeléctricos la política de operación de compuertas radiales en obras de excedencias se selecciona de tal modo de operar con condición de compuertas-parcialmente abiertas cuando es necesario controlar avenidas inferiores a la máxima (siendo este caso el más usual).

En estas condiciones se presenta una carga dinámica por el efecto del paso del agua en contacto con el labio inferior de la compuerta cuyo efecto no es valorable de forma teórica, siendo necesario en este caso obtener la excitación dinámica de pruebas en laboratorio realizadas en el modelo hidráulico que se construya para este fin. Es por estas dificultades que en ocasiones este efecto, si no se considera relevante por las características propias de las compuertas a diseñar, se absorbe dentro de los factores de seguridad empleados.

Otras acciones variables que pueden ser importantes en el diseño de compuertas radiales son las debidas a cambios de temperatura y las vibraciones generadas por los mecanismos de izaje en la -- operación de las mismas.

## Cargas Accidentales

Estas cargas se definen como las que ocurren de manera imprevista y cuya determinación en cuanto a magnitud, dirección, sentido y frecuencia de aparición sólo puede ser estimada en base a un análisis probabilístico, no pudiendo ser obtenida una cota máxima independiente de la fijación de una cierta probabilidad de excedencia de este efecto.

Estas cargas se presentan por tanto de manera aleatoria durante la vida útil de la estructura y por lo antes expuesto no son suceptibles de ser estimadas con certeza, por lo que el diseño estructural no puede garantizar de manera absoluta la seguridad total de las estructuras.

Las cargas accidentales que se presentan en compuertas radiales causando efectos importantes en la estructura son las debidas a sismo, teniéndose principalmente que estimar los efectos inducidos por las aceleraciones sísmicas sobre la masa de la estructura de la compuerta, así como el efecto de la aceleración que se produce en la masa de agua en contacto con la pantalla de la compuerta y su efecto sobre la estructura.

Para estimar las cargas de sismo en su efecto sobre la masa de la compuerta es usual realizar un análisis estático, en el cual las fuerzas dinámicas de un sismo se transforman a cargas estáticas equivalentes las cuales se obtienen de multiplicar el coefi-

ciente sísmico determinado para el sitio de ubicación de la estructura por el peso de cada uno de los elementos que forman dicha compuerta (pantalla, vigas, brazos, etc.).

Para tomar en consideración el efecto del sismo en el agua en contacto con la pantalla frontal de la compuerta, el procedimiento más utilizado es emplear una simplificación mediante la cual este efecto se evalúa incrementando el empuje hidrostático con una carga con variación parabólica, considerando un valor cero a la profundidad cero y alcanzando un máximo en el nivel inferior de la compuerta. Este mismo criterio es el que se emplea en el diseño de presas y es conocido genéricamente como criterio de masas adheridas.

#### Combinaciones de Cargas

Para poder realizar el análisis estructural correspondiente es necesario definir las combinaciones de carga bajo las cuales se sometería a la estructura y que dependen de la operación del vertedor.

De manera general las condiciones de carga analizadas deben ser:

Con apoyo en el labio inferior de la compuerta (compuerta cerrada)

Peso propio + carga hidrostática máxima

**Peso propio + carga hidrostática máxima + sismo**

**Peso propio + sismo**

**Con apoyo en el mecanismo de izaje (aperturas)**

**Condición de inicio de apertura**

**Peso propio + carga hidrostática máxima**

**Peso propio + carga hidrostática máxima + sismo**

**Condición de apertura parcial crítica**

**Peso propio + carga hidrostática + efecto dinámico  
del paso de flujo**

**Condición de apertura total**

**Peso propio + sismo**

Como se ha mencionado anteriormente, es posible incluir en estas combinaciones otras condiciones de carga como las producidas por efectos de temperatura y vibraciones por mecanismos, las cuales deben ser analizadas por el ingeniero de diseño y determinar si sus efectos pueden ser importantes ó no de acuerdo a las condiciones particulares de las compuertas a diseñar.

Para todos los casos en que en la combinación de cargas interviene el efecto de cargas accidentales el valor de los esfuerzos -- permisibles a considerar pueden incrementarse en un 33% de acuerdo a lo que se establece en los manuales de diseño de estructuras metálicas (ver referencia 1).

## Carga Hidrostática

En este párrafo se dan las expresiones matemáticas que se emplean para calcular las fuerzas hidrostáticas que se generan en la pantalla frontal de las compuertas, en virtud de que la geometría de dicha pantalla complica el cálculo rápido de estas acciones.

Los datos requeridos para realizar los cálculos son:

- H - carga hidrostática sobre la compuerta (m)
- B - ancho de la compuerta (m)
- A - altura de compuerta (m)
- R - radio de la compuerta (m)
- a - altura del perno de soporte (m)
- b - altura de la compuerta sobre la horizontal (m)
- $\alpha$  - ángulo de arco activo de la compuerta sobre la horizontal (°)
- $\beta$  - ángulo del arco de la compuerta bajo la horizontal (°)
- $\theta$  - ángulo total de la cubierta activa de la compuerta (°)
- $\gamma$  - Peso volumétrico del agua (Kg/m<sup>3</sup>)
- $\omega$  - ángulo de localización de la diferencial de fuerza  $df$  midiéndose  $\omega$  a partir del eje horizontal siendo positivo en dirección de las manecillas del reloj.

En la fig. # 13 se muestran en una compuerta radial, cualquiera - de las variables antes listadas, apreciándose en ella el significado físico de cada una de ellas y el sistema coordinado de - referencia en base al cual se hace el desarrollo siguiente:

Recordando que la presión que actúa en un área plana se puede - calcular multiplicando la presión que se ejerce en el centroide de dicha área por el peso volumétrico del líquido, tendremos pa - ra el caso de la compuerta radial que de acuerdo a la figura # 14 y siendo:

$dA$  - área de aplicación de la presión

$p$  - presión

$h_c$  - centroide del área

$$p = \gamma h_c = \gamma (R \sin \alpha - y)$$

Siendo  $y = R \sin \omega$

Se tiene que:

$$p = \gamma (R \sin \alpha - R \sin \omega)$$

$$p = \gamma R (\sin \alpha - \sin \omega)$$

Dado que  $dA = BR d\omega$

La diferencial de fuerza aplicada en la diferencial de placa es:

$$df = p dA = pBR d\omega$$

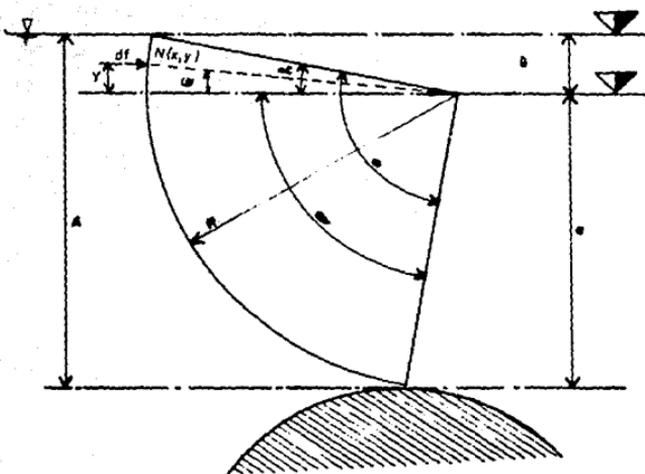


FIG. 13

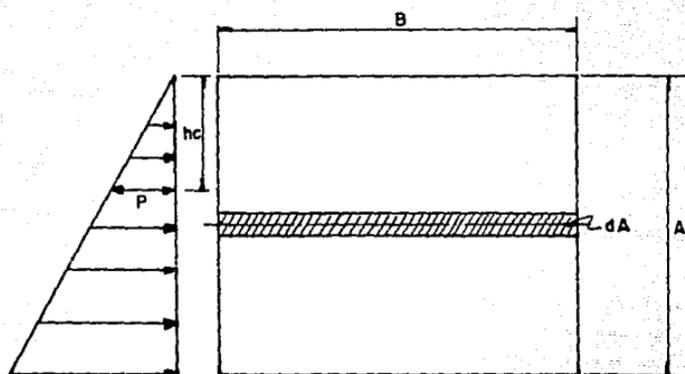


FIG. 14

Y por lo tanto

$$df = BR R (\text{sen}\alpha - \text{sen}\omega) d\omega$$

$$df = B R^2 (\text{sen}\alpha - \text{sen}\omega) d\omega$$

Descomponiendo esta fuerza en sus proyecciones respecto a los ejes x y y se tiene:

$$df_x = \int BR^2 (\text{sen}\alpha - \text{sen}\omega) \cos\omega d\omega$$

$$df_x = \int BR^2 (\text{sen}\alpha \cos\omega - \text{sen}\omega \cos\omega) d\omega$$

$$df_y = \int BR^2 (\text{sen}\alpha - \text{sen}\omega) \text{sen}\omega d\omega$$

$$df_y = \int BR^2 (\text{sen}\alpha \text{sen}\omega - \text{sen}^2\omega) d\omega$$

Integrando entre  $\alpha$  y  $-\beta$  para obtener los empujes totales se tiene:

$$F_x = \int BR^2 \int_{\alpha}^{-\beta} (\text{sen}\alpha \cos\omega - \text{sen}\omega \cos\omega) d\omega$$

$$F_x = \int BR^2 \left[ \text{sen}\alpha \text{sen}\omega + \frac{1}{2} \cos^2\omega \right]_{\alpha}^{-\beta}$$

$$F_x = \int BR^2 (\text{sen}^2\alpha + \frac{1}{2} \cos^2\alpha - \text{sen}\alpha \text{sen}(-\beta) - \frac{1}{2} \cos^2\beta)$$

$$F_x = \int BR^2 (\text{sen}^2\alpha + \frac{1}{2} \cos^2\alpha + \text{sen}\alpha \text{sen}\beta - \frac{1}{2} (1 - \text{sen}^2\beta))$$

$$F_x = \sqrt{BR^2} \left( \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} (1 - \sin^2 \alpha) + \sin \alpha \sin \beta - \frac{1}{2} (1 - \sin^2 \beta) \right)$$

$$F_x = \sqrt{BR^2} \left( \sin^2 \alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{2} + \sin \alpha \sin \beta + \frac{\sin^2 \beta}{2} \right)$$

$$F_x = \frac{\sqrt{BR^2}}{2} (\sin \alpha + \sin \beta)^2$$

Similarmente:

$$F_y = \frac{\sqrt{BR^2}}{2} (\sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \beta - 2 \sin \alpha \cos \beta + 0)$$

Siendo la fuerza resultante:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

Tomando esta resultante un ángulo con la horizontal  
:

$$\tan \rho = \frac{F_y}{F_x}$$

### Cargas debidas a Sismo

En este párrafo se presenta la secuencia que puede seguirse para estimar las cargas sísmico actuantes en cualquier compuerta radial tanto por el efecto de la masa de la estructura, como por el del agua en contacto con ella.

El efecto de la aceleración del suelo, produce en la estructura-metálica de las compuertas respuestas en la ó las direcciones en que se presente dicha aceleración (horizontales ó vertical), las cuales pueden ser valoradas en forma simplista por medio de un análisis estático de la manera siguiente:

Para cada una de las piezas metálicas se determina su peso y se multiplica este valor por el coeficiente sísmico que se le asigne al lugar de ubicación de la planta hidroeléctrica, obteniéndose con esto una carga estática equivalente al efecto del sismo. Esta fuerza aunque en esencia se encuentra distribuída a través de la pieza analizada en función de su masa, por simplicidad se divide pasándose a cada uno de los nodos extremos de dicha estructura la mitad de la carga calculada. Cuando el análisis estructural se realiza por medio de la utilización de algún paquete de cómputo, éste por lo regular hace de manera automática lo descrito anteriormente (paquetes SAP, STRUDL, etc.) colocando en cada nodo fuerzas equivalentes al sismo de los elementos que llegan a ese nodo.

Aunque en un paquete de computadora podría realizarse fácilmente un análisis dinámico más preciso, en general no es utilizado en estas estructuras porque el efecto del sismo en la masa propia de la compuerta no es por lo regular demasiado importante en virtud de tenerse estructuras ligeras que son poco susceptibles a sismo.

En la figura # 15 se puede apreciar en el caso de una aceleración horizontal las fuerzas estáticas equivalentes que se generan en una compuerta, estas fuerzas aparecen localizadas en el centro de los elementos que la constituyen ya que son función de su masa.

En cuanto al efecto producido por el sismo en el movimiento del agua en la frontera con la compuerta, este produce un efecto equivalente estático sobre la compuerta que puede ser considerado como un incremento en la carga hidrostática actuante, que no siendo lineal puede ser calculado por medio de la expresión siguiente:

$$P_{ew} = C \frac{a}{g} h$$

Donde:  $P_{ew}$  es la fuerza de inercia en  $Kg/m^2$   
a aceleración del suelo  
g aceleración de la gravedad  
h profundidad total del agua en el vaso

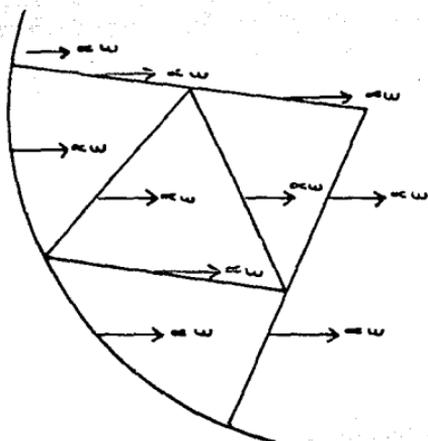


FIG. 15

Siendo C:

$$C = \frac{C_w}{2} \left( \frac{y}{h} \left( 2 - \frac{y}{h} \right) + \frac{y}{h} \left( 2 - \frac{y}{h} \right) \right)$$

Por lo que el coeficiente depende del talud del paramento y del valor  $C_w$  cuando  $y/h = 1.0$  ver figura # 16b

Donde C es un coeficiente adimensional que depende de la magnitud y distribución de presiones y las variables h y y se definen según el esquema mostrado en la figura # 16a.

En el caso de realizar el análisis estructural por medio de un programa de computadora estas fuerzas equivalentes al movimiento del agua deben ser dados como datos externos, ya que el cálculo del efecto del agua en la compuerta no puede ser por lo regular calculado de manera automática dentro del programa por la dificultad existente en simular la frontera entre el agua y la pantalla.

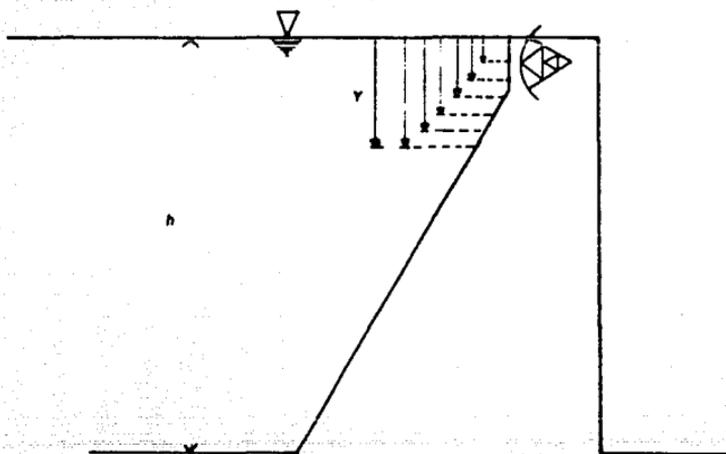


FIG. 16 a

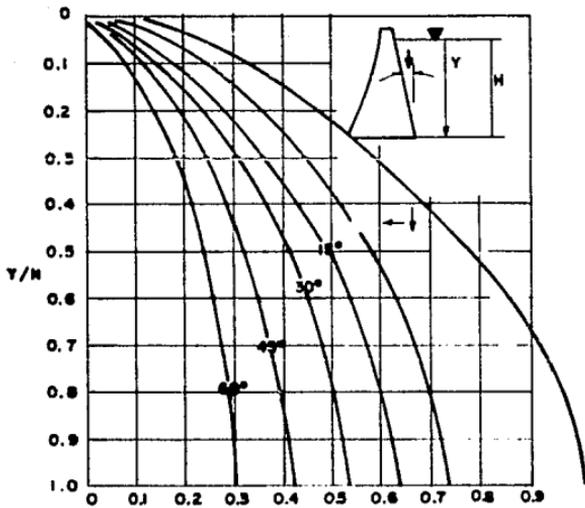


FIG. 10 b

## C A P I T U L O I V

### EJEMPLO DE DISEÑO

#### INTRODUCCION

El ejemplo de diseño que se presenta en este trabajo toma como base una compuerta radial existente en un proyecto hidroeléctrico, la cual presentó en su momento problemas de izaje en operación que obligaron a la Comisión Federal de Electricidad a realizar un estudio detallado de la misma para encontrar la razón de este mal funcionamiento y dar la solución definitiva a ese problema.

De los problemas detectados en el estudio antes citado, se determinó que los más importantes fueron los siguientes en orden de importancia:

#### a) Rigidez asimétrica de los apoyos

Este problema se presenta en las compuertas del vertedor que se localizan en los extremos del mismo, las cuales se apoyan, un brazo en una pila y el otro brazo en la ladera del cerro, ver croquis en la figura #17, ésto ocasiona que las compuertas tengan problemas de rigidez asimétricas de apoyos que hacen que los giros en el plano horizontal de la compuerta en los brazos sean diferentes, propiciándose de manera importan

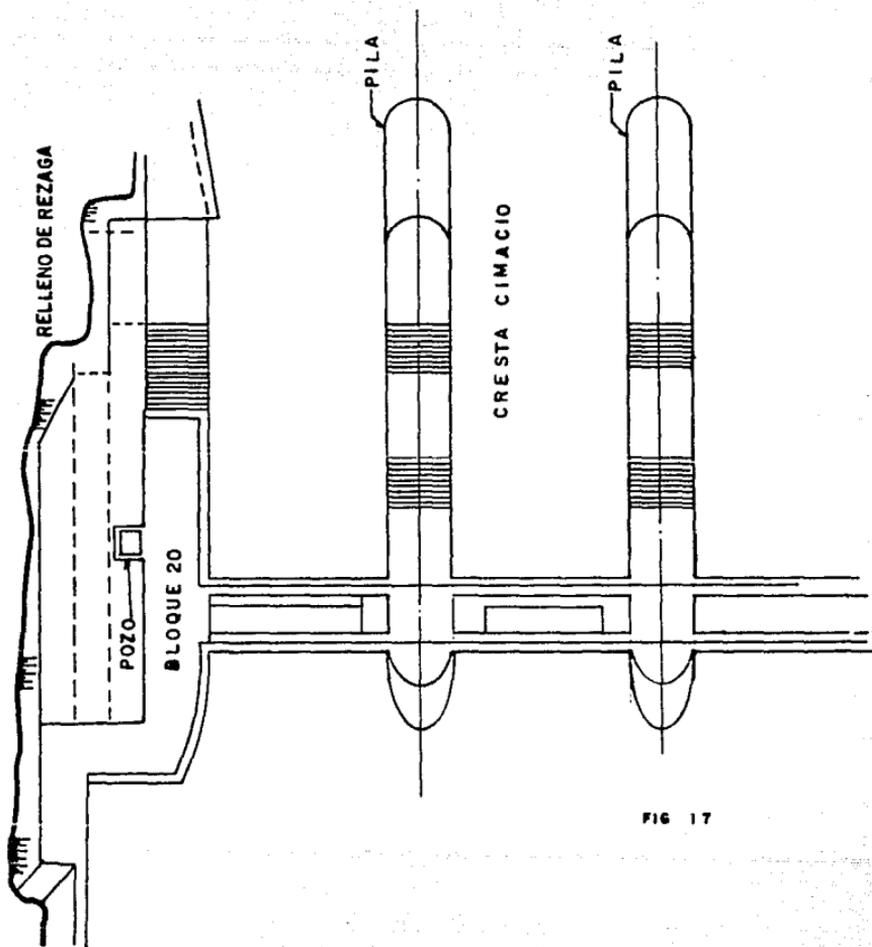


FIG 17

te el atoramiento de la pantalla en la operación de izaje -- con el consiguiente disparo del sistema automático de control de servomotores, aún con cargas hidráulicas pequeñas, -- teniéndose que operar manualmente por tanto, hasta su destrucción.

b) Geometría inadecuada de brazos de la compuerta

Estas compuertas tienen brazos que son oblicuos con respecto a la pantalla frontal para dar cabida a los servomotores que izan a la estructura, y que se ligan a la pantalla como se muestra en la figura # 18a y b. La posición de los brazos al no ser perpendiculares a la pantalla hacen que se generen momentos flexionantes importantes respecto a los ejes verticales de las secciones transversales de los brazos, agravándose -- con ésto, en el caso de las compuertas extremas del vertedor, el problema de atoramiento por la adicional deformación asimétrica que se presenta en los brazos y apoyos de la compuerta.

c) Flexibilidad excesiva de los brazos

Se observó durante visitas a la obra, que al iniciar la operación de las compuertas, éstas presentaban movimientos apreciables a simple vista debidos a la flexibilidad de su es---

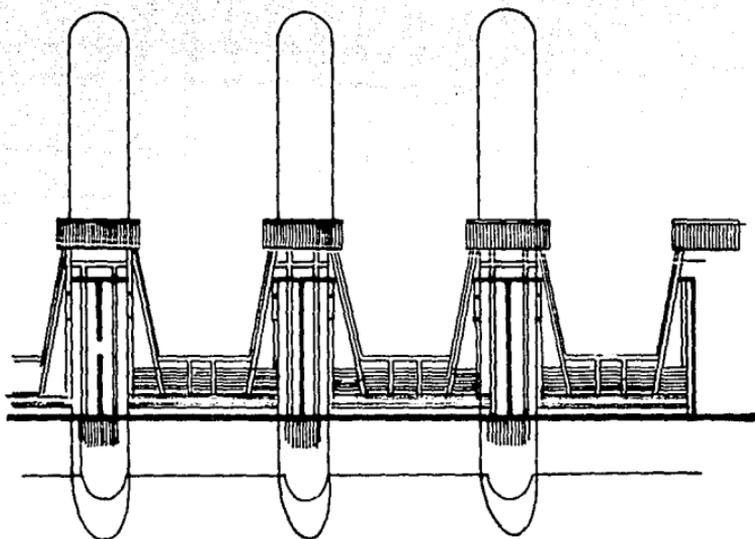


FIG. 18a

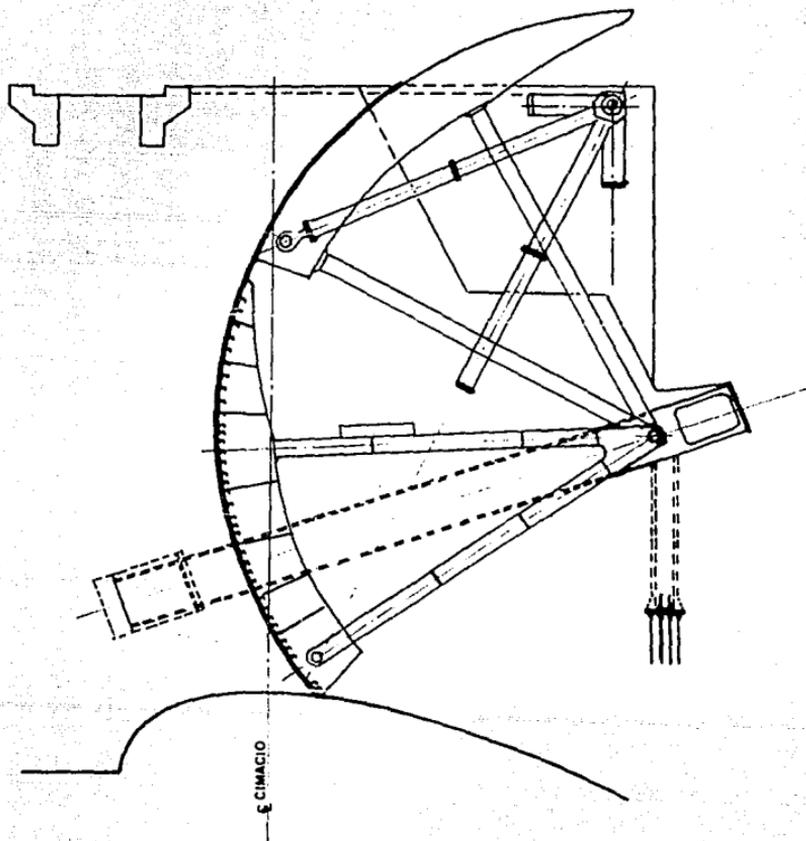


FIG. 10 b

tructuración, principalmente de los brazos, ya que la pantalla es prácticamente una estructura rígida. Esta flexibilidad se debe a que los brazos no tienen arriostramientos intermedios en el plano horizontal ni en los planos oblicuos - que contienen a cada brazo, siendo por ésto estructuras que pueden tener movimientos excesivos que contribuyen a aumentar los problemas de atoramiento de compuertas.

La solución dada por Comisión Federal de Electricidad a los problemas antes señalados fueron los conductentes para minimizar el movimiento asimétrico de apoyos y la rigidización de las compuertas radiales por medio de un sistema efectivo de contraventeos.

En este trabajo se presenta sólo el estudio del comportamiento de las compuertas radiales originales, sin tomar en cuenta la -- asimetría de rigidez en los apoyos y una alternativa de solución a la falta de rigidez de la estructura, a base de contraventeos, haciéndose finalmente un análisis comparativo de ambas condiciones en donde puede apreciarse la disminución lograda en los desplazamientos y el incremento en peso que ésto trae consigo para la estructura metálica.

## MODELO PARA ANALISIS (COMPUERTA ORIGINAL)

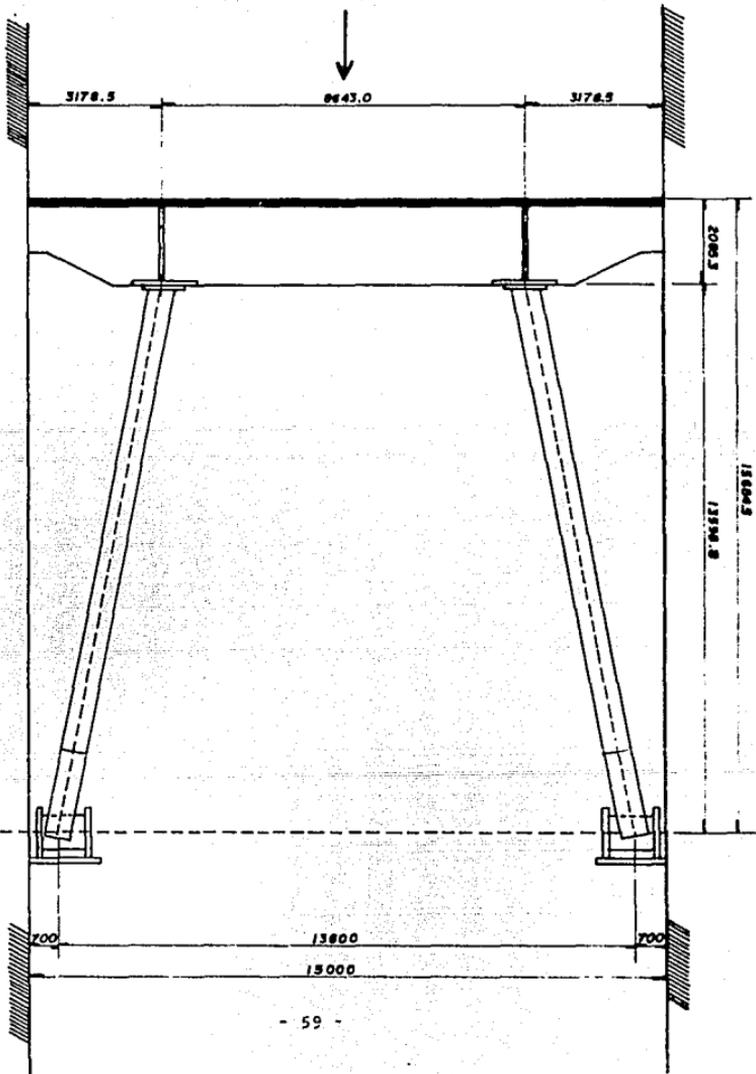
El modelaje de la estructura se idealizó por medio de elementos viga tridimensionales para los brazos y sus rigidizadores de pantalla, considerando ésta como infinitamente rígida al dar en sus elementos estructurales verticales y horizontales que forman el marco frontal elementos viga de una rigidez muy grande comparativamente con los de los brazos y sus contraventeos.

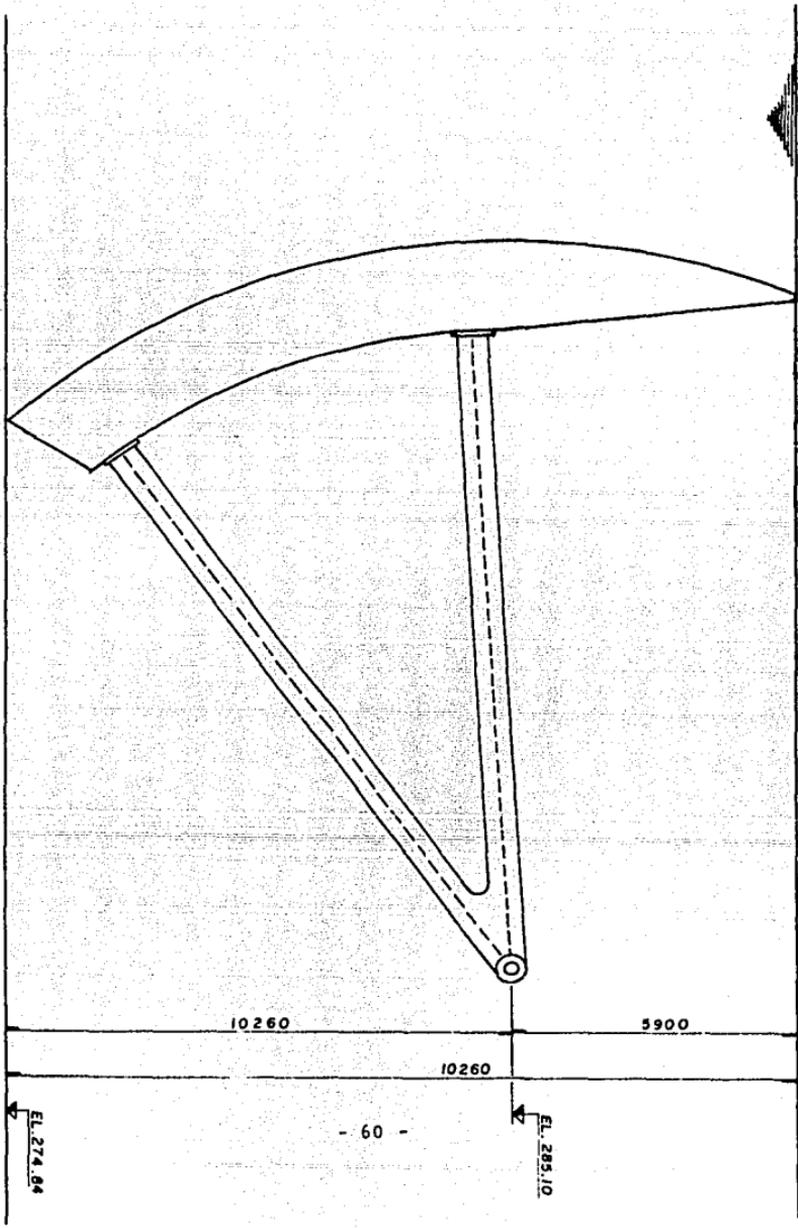
La carga considerada como actuante es únicamente la de peso propio y la de presión hidrostática máxima, con condición de apoyo de soporte en el labio inferior de la compuerta y en los pernos de los brazos.

Una vista en planta y elevación de esta compuerta se puede ver en las figuras # 19 y 20 respectivamente.

La topología del modelo puede verse en perspectiva en la figura # 21, en donde se observa que esta estructura se idealizó considerando 22 nodos todos los cuales corresponden a la estructura, y sus apoyos definiéndose a través de incidencias, la orientación y longitud de cada miembro, así como el marco de referencia local para designar las propiedades geométricas de los mismos. El número total de elementos es de 26, considerados todos de acero A-36. Es conveniente señalar que el número de nodos del modelo se elevó a 22 con la finalidad de poder observar claramente la forma deformada de los brazos.

PLANTA





- 60 -

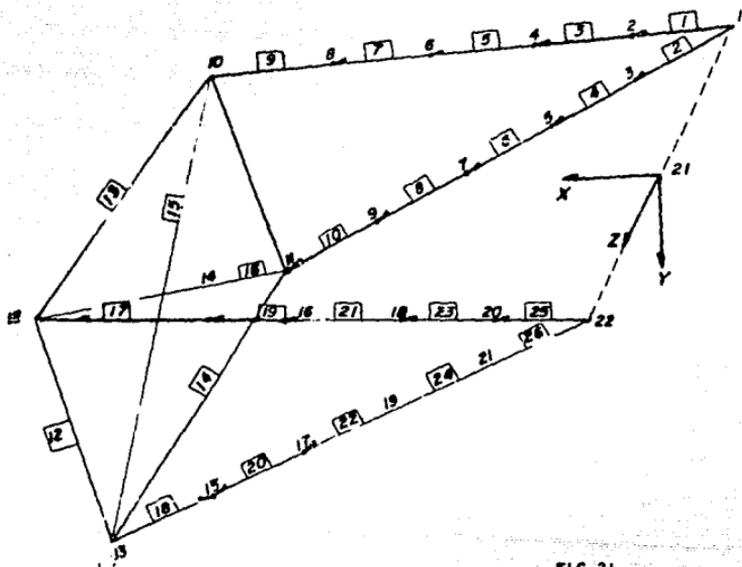


FIG. 21

Por ser el material acero A-36 las propiedades mecánicas correspondientes son:

$$\text{Módulo de elasticidad } E = 2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Relación de Poisson } \nu = 0.3$$

$$\text{Densidad } \gamma_a = 0.00785 \text{ Kg/m}^3$$

Las propiedades de las secciones transversales de los brazos y pantalla son:

Para los brazos superiores las propiedades correspondientes se obtienen de la sección transversal mostrada en la figura # 22, siendo sus valores los que a continuación se enlistan:

$$A = 470.174 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 665.08 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 255,468.26 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 255,468.26 \text{ cm}^4$$

$$S_y = 255,468.26/29.56 = 8,642.36 \text{ cm}^3$$

$$S_z = 8,642.36 \text{ cm}^3$$

$$r_y = 255,468.26/470.174 = 23.31 \text{ cm}$$

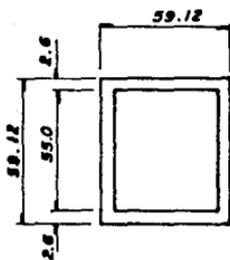
$$r_z = 23.31 \text{ cm}$$

Para los brazos inferiores estas propiedades se obtienen en base a la sección mostrada en la figura # 23 y son:

$$\begin{aligned}A &= 546.258 \text{ cm}^2 \\I_x &= 1,074.19 \text{ cm}^4 \\I_y &= 300,271.32 \text{ cm}^4 \\I_z &= 300,271.32 \text{ cm}^4 \\S_y &= 300,271.32/29.88 = 10,049.24 \text{ cm}^3 \\S_z &= 10,049.24 \text{ cm}^3 \\r_y &= 300,271.32/546.258 = 23.45 \text{ cm} \\r_z &= 23.45 \text{ cm}\end{aligned}$$

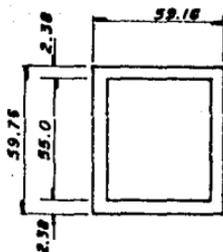
Las propiedades de la sección transversal de los elementos que enmarcan la pantalla de la compuerta, (vigas horizontales y verticales) se consideraron de una sección transversal muy grande - (100 cm x 100 m) de tal manera que su rigidez comparativamente - con la de los brazos fuera mucho mayor para simular lo mejor posible un elemento de pantalla rígido como lo es la estructura -- real. Los valores asignados a estos elementos son:

$$\begin{aligned}A &= 10,000 \text{ cm}^2 \\I_x &= 14,062,500 \text{ cm}^4 \\I_y &= 8,333,333 \text{ cm}^4\end{aligned}$$



B - 5

FIG. 22



B - 1

FIG. 23

$$\begin{aligned}
 I_z &= 8,333,333 \text{ cm}^4 \\
 S_y &= 8,333,333/50 = 167,000 \text{ cm}^3 \\
 S_z &= 167,000 \text{ cm}^3 \\
 r_y &= 8,333,333/10,000 = 28.87 \text{ cm} \\
 r_z &= 28.87 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

En donde las siglas corresponde a:

A - Área

$I_x$  - momento polar de inercia

$I_y$  - momento de inercia alrededor del eje y

$I_z$  - momento de inercia alrededor del eje z

$S_y$  - módulo de sección con respecto al eje y

$S_z$  - módulo de sección con respecto al eje z

$r_y$  - radio de giro de la sección respecto al eje y

$r_z$  - radio de giro de la sección respecto al eje z

De la geometría de la compuerta y de sus planos se obtuvieron - para el modelo las coordenadas de los nudos que son las siguientes:

Nodo	X	Y	Z
1	.000	.000	-680.000
2	245.644	12.229	-635.229
3	198.429	145.316	-635.229
4	531.072	26.438	-583.208
5	428.993	314.167	-583.208
6	773.288	38.497	-539.062
7	624.652	457.465	-539.062
8	1098.870	54.705	-479.721
9	887.654	650.061	-479.721
10	1359.880	67.699	-432.150
11	1098.494	804.467	-432.150
12	1359.880	67.699	432.150
13	1098.494	804.467	432.150
14	1098.870	54.705	479.721
15	887.654	650.061	479.721
16	773.288	38.497	539.062
17	624.652	457.465	539.062
18	531.072	26.438	583.208
19	428.993	314.167	583.208
20	245.644	12.229	635.229
21	198.429	145.316	635.229
22	.000	.000	680.000

Teniéndose como condiciones de frontera, soporte en los nudos 1 y 22 contra desplazamientos lineales, pero permitiéndose el giro - respecto a los tres ejes coordenados puesto que se está considerando un apoyo completamente articulado. Los nudos 11 y 13 se soportan exclusivamente evitando desplazamientos en la dirección vertical, puesto que se considera que la compuerta está apoyada simplemente sobre el cimacio del vertedor, permitiéndose por tanto los desplazamientos y giros en cualquier otra dirección ó sentido.

De acuerdo a su topología la orientación e incidencias de cada miembro se definen en la tabla siguiente:

Miembro	Nudo i	Nudo j
1	1	2
2	1	3
3	2	4
4	3	5
5	4	6
6	5	7
7	6	8
8	7	9
9	8	10
10	9	11
11	10	11
12	12	13
13	10	12

14	13	11
15	10	13
16	12	11
17	14	12
18	13	15
19	16	14
20	17	15
21	18	16
22	19	17
23	20	18
24	21	19
25	22	20
26	22	21

## ANALISIS DE CARGAS

### a) Cargas de Peso Propio

Para la pantalla metálica frontal de la compuerta, su carga de peso propio se estimó en base a los planos estructurales disponibles, de los cuales en la figura # 24 se muestra un arreglo general.

La carga total de peso propio de esta pantalla es:

$$W_p = 42,738.15 \text{ Kg}$$

Como en el modelo para análisis los brazos soportan en cuatro nudos a la pantalla, este peso total se consideró distribuido de manera uniforme en cada uno de esos nudos de conexión, siendo por tanto la carga vertical actuante en ellos la siguiente:

$$\frac{W_p}{4} = 10,684.53 \text{ Kg}$$

En cuanto al peso propio de los brazos, éstos no se calcularon en virtud de que el programa de cómputo que se empleó para realizar el análisis estructural tiene la facilidad de hacer este cálculo internamente a solicitud del usuario.

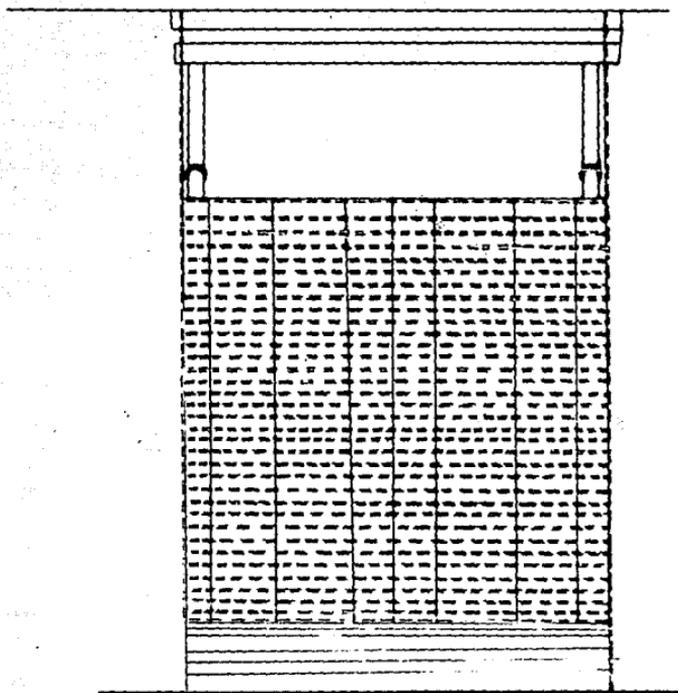


FIG. 24

## b) Empuje Hidrostático

Dado que en el modelo para análisis de la compuerta se simplificó la pantalla frontal como un sólo elemento rígido, unido a la estructura de los brazos a través de sólo cuatro nudos, el empuje hidrostático sobre esta pantalla debe estimarse en primera instancia, transformándose posteriormente a cargas concentradas equivalentes a dicho empuje, las cuales deben ser aplicadas en los cuatro puntos nodales de conexión entre brazos y pantalla.

Para calcular el empuje del agua se requiere usar los datos geométricos de la estructura como se muestran en la figura # 25 y las expresiones matemáticas desarrolladas para este fin en el capítulo III de este trabajo, de la manera siguiente:

Cálculo del empuje horizontal total

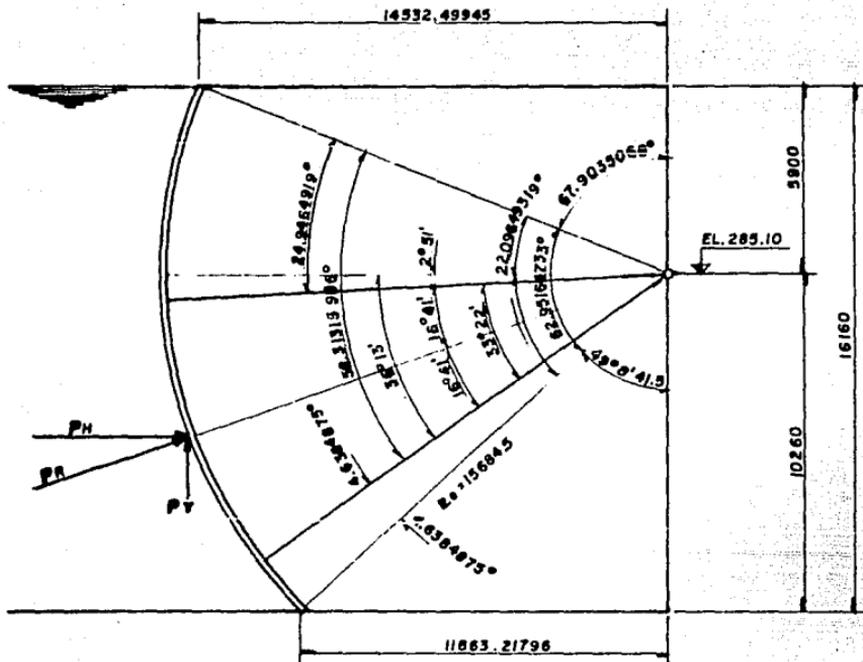
$$F_x = \frac{\gamma}{2} BR^2 (\operatorname{sen} \alpha + \operatorname{sen} \beta)^2$$

$$F_x = \frac{1000 (15) (15.6845)^2}{2} (\operatorname{sen} 22.096^\circ + \operatorname{sen} 40.855^\circ)^2$$

$$F_x = 1,958,592 \text{ Kg}$$

Cálculo del empuje vertical total

$$F_y = \frac{\gamma}{2} BR^2 (\operatorname{sen} \alpha \cos \alpha - \operatorname{sen} \beta \cos \beta - 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \beta + \theta)$$



ELEMENTOS GEOMETRICOS COMPUERTA

$$F_y = 707,449.3 \text{ Kg}$$

Por lo tanto se tiene que el empuje resultante total se encuentra dado por:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_R = \sqrt{(1,958,592)^2 + (707,449.3)^2}$$

$$F_R = 2,082,442.6 \text{ Kg}$$

Ahora bien, el ángulo que se forma entre la horizontal y esta resultante como se muestra en la figura # 26es:

$$\tan \rho = \frac{F_y}{F_x}$$

$$\rho = 19.86^\circ$$

Es importante señalar que este ángulo prácticamente coincide con el medido desde el plano horizontal hasta la bisectriz de los -- brazos ( $\rho' = 19.53^\circ$ ). Esto no es por coincidencia, ya que los -- fabricantes de compuertas se imponen este requisito, puesto que con ésto se logra tener fuerzas iguales en cada uno de los brazos teniéndose con ésto un comportamiento estructural óptimo.

Dado que  $\rho$  y  $\rho'$  son prácticamente iguales en este trabajo se decidió estimar los valores de los empujes vertical y resultante -- que se producirían al igualar dichos ángulos y mantener el valor --

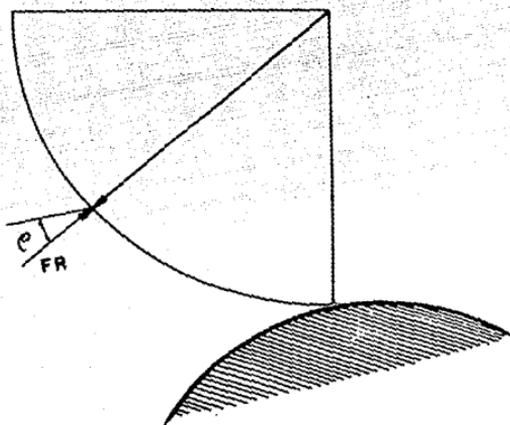


FIG. 26

calculado de  $F_x$ , para tener fuerzas iguales en cada brazo omitiéndose el tener que hacer una distribución diferente más complicada por lo que los nuevos valores serán:

$$F_x = 1,958,592 \text{ Kg}$$

$$F_y = F_x \text{ Tang } \phi'$$

$$F_y = 1,958,592 \tan 19.53^\circ = 694,856.4 \text{ Kg}$$

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_R = \sqrt{(1,958,592)^2 + (694,856.4)^2}$$

$$F_R = 2,078,198.3 \text{ Kg}$$

Considerando estos empujes y de acuerdo a lo mostrado en la figura #27, al trabajarse en el plano Q - Q' en el que actúa  $F_R$ , la proyección de  $F_1$  sobre este plano será  $\frac{F_R}{2}$  y por lo tanto de la misma manera la proyección de  $F_2$  sobre  $\frac{F_R}{2}$  el plano Q - Q' tendrá un valor igual al anterior, siendo por esto que:

$$F_1 = F_2 = \frac{F_R}{2 \cos \alpha}$$

Para calcular las proyecciones de estas fuerzas en las direcciones vertical y horizontal se debe hacer lo siguiente:

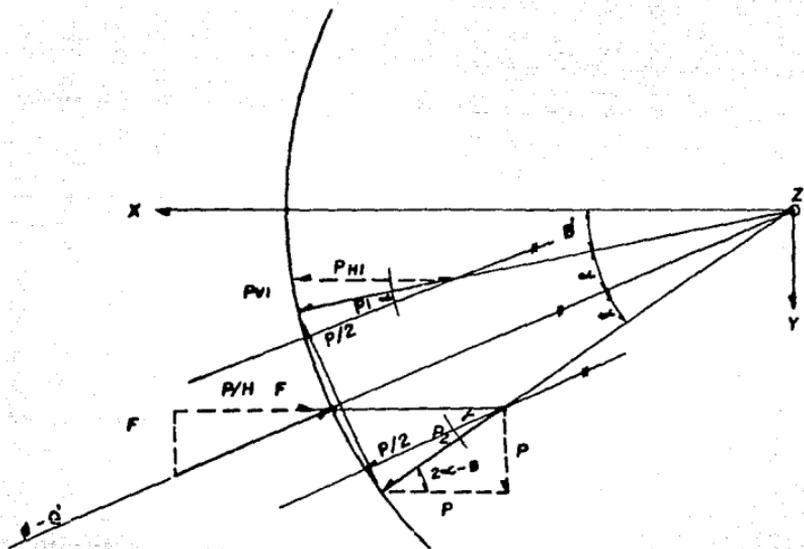


FIG. 27

$$F_{H1} = F_1 \cos \beta' = \frac{F}{2 \cos \alpha'} \cos \beta' = \frac{F \cos \beta'}{2 \cos \alpha'}$$

$$F_{H2} = F_2 \cos (2\alpha' + \beta') = \frac{F}{2 \cos \alpha'} \cos (2\alpha' + \beta') =$$

$$\frac{F \cos (2\alpha' + \beta')}{2 \cos \alpha'}$$

$$F_{V1} = F \sin \beta' = \frac{F}{2 \cos \alpha'} \sin \beta' = \frac{F \sin \beta'}{2 \cos \alpha'}$$

$$F_{V2} = F_2 \sin (2\alpha' + \beta') = \frac{F}{2 \cos \alpha'} \sin (2\alpha' + \beta') =$$

$$\frac{F \sin (2\alpha' + \beta')}{2 \cos \alpha'}$$

Dado que conocemos que:

$$\alpha' = 16^\circ 41'$$

$$\beta' = 2^\circ 51'$$

$$(2\alpha' + \beta') = 36^\circ 13'$$

$$F = 2,078,198 \text{ Kg}$$

$$F_1 = F_2 = \frac{2,078,198}{2 \cos 16^\circ 41'} = 1,084,760.9 \text{ Kg}$$

$$F_{H1} = \frac{2,078,198 \cos (2^\circ 51')}{2 \cos (16^\circ 41')} = 1,083,419.17 \text{ Kg}$$

$$F_{H2} = \frac{2,078,198 \cos(36^{\circ}13')}{2 \cos(16^{\circ}41')} = 875,172.6 \text{ Kg}$$

$$F_{V1} = \frac{2,078,198 \sin(2^{\circ}51')}{2 \cos(16^{\circ}41')} = 53,935.8 \text{ Kg}$$

$$F_{V2} = \frac{2,078,198 \sin(36^{\circ}13')}{2 \cos(16^{\circ}41')} = 640,920.5 \text{ Kg}$$

Con estos valores se debe hacer la verificación de suma de fuerzas en x y y por lo que:

$$F_y = F_{V1} + F_{V2} = 694,856.3 = F_V$$

$$F_x = F_{H1} + F_{H2} = 1,958,591.7 = F_H$$

## ANALISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural de la compuerta se realizó utilizando el paquete de cómputo STRUDL, alimentándolo con datos de las propiedades mecánicas y geométricas de los componentes, para obtener - desplazamientos de nudos, reacciones en los apoyos y los elementos mecánicos en los miembros; todo ésto para cuatro diferentes condiciones de carga que fueron:

- Condición 1 : peso propio de la pantalla frontal
- Condición 2 : peso propio de los brazos
- Condición 3 : empuje hidrostático
- Condición 4 : combinación de las condiciones anteriores.

De las condiciones anteriores, la de diseño obviamente es la 4, - siendo las tres anteriores utilizadas fundamentalmente como medios para verificar en cada una de ellas que los datos proporcionados al paquete fueran correctos al verificarse en cada caso -- los resultados obtenidos en cuanto a desplazamientos congruentes y elementos mecánicos razonables.

Las unidades en los que se pidió la salida del programa fueron: metros, toneladas, grados y segundos.

Los elementos mecánicos de cada elemento estructural de acuerdo a la topología definida con anterioridad se presenta en el anexo

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

A para los veintiseis miembros considerados, así como las reacciones y desplazamientos en los apoyos y los desplazamientos de los veintiún nodos del modelo.

### DISEÑO ESTRUCTURAL

A partir de los datos obtenidos del análisis estructural, se procedió a revisar los brazos de la compuerta, utilizando el criterio de esfuerzos permisibles en miembros sometidos simultáneamente a flexión y carga axial, tal como se muestra a continuación, al utilizarse las fórmulas de interacción aplicables:

$$s_1 \frac{f_a}{F_a} \leq 0.15$$

Utilizar la expresión:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

En caso contrario usar las expresiones siguientes:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \frac{f_{bx}}{F_a}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_m \frac{f_{by}}{f_a}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0$$

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

Donde los subíndices x y y indican los ejes respecto a los cuales se hace la revisión a flexión. En las fórmulas anteriores, las variables tienen el significado siguiente:

$f_a$  = esfuerzo normal actuante debido sólo a la carga axial aplicada.

$f_b$  = esfuerzo normal de compresión debido a la flexión analizada.

$F_a$  = esfuerzo normal permisible si sólo actúan la carga axial.

$F_b$  = esfuerzo normal permisible de compresión si sólo actuara en el miembro momento flexionante (sólo respecto a un eje).

$F'_e = \frac{10\,480\,000}{(Kl_b/r_b)^2}$  siendo este valor el esfuerzo de Euler dividido entre el factor de seguridad. En la expresión K es el factor de longitud efectiva en el plano de flexión y  $l_b$  es la longitud--

no arriostrada en el plano de flexión y  $r_b$  el radio de giro correspondiente.

$C_m$  = es un coeficiente que depende de las condiciones de desplazamiento de los extremos de la pila analizada y que en este caso se consideró -- conservadoramente igual a la unidad.

Para el cálculo de los esfuerzos permisibles  $F_a$  y  $F_b$  se emplean las expresiones siguientes:

$$F_a = \frac{(1 - \frac{(Kl/r)^2}{2 C_c^2})}{F.S.} F_y$$

$$\text{donde } F.S. = \frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8 C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8 C_c^3}$$

F.S. = factor de seguridad

$$S_1 Kl/r \leq C_c$$

$$\text{Siendo: } C_c = \frac{2\pi^2 E}{F_y}$$

En caso de tenerse  $Kl/r > C_c$  la expresión a aplicar para determinar el esfuerzo permisible sería:

$$F_a = \frac{10\,480\,000}{(Kl/r)^2}$$

Para determinar  $F_b$  se tiene primeramente que definir si la sección es compacta ó no para lo cual en este caso en particular de brazos en sección cajón se debe cumplir que la distancia entre soldaduras de las placas conectadas no exceda de  $1600/\sqrt{F_y}$  para que pueda considerarse sección compacta.

Si la sección analizada resulta compacta el esfuerzo  $F_b = 0.66 F_y$

En caso contrario  $F_b = 0.6 F_y$

En todas las expresiones anteriores  $l$  es la longitud efectiva sin arriostramiento y  $r$  es el radio de giro respecto al cual se analiza el pandeo. Como el acero de esta compuerta es A-36 el esfuerzo de fluencia  $F_y = 2,530 \text{ Kg/cm}^2$ .

La aplicación de las fórmulas anteriores en la revisión de los brazos de la compuerta se hizo a través de un programa sencillo de computadora, cuya salida se presenta en la tabla I y II respectivamente para brazo superior e inferior, observándose en dichas tablas que las secciones estructurales propuestas son adecuadas para resistir las cargas de trabajo actuales sobre la compuerta.

TABLA I

DISEÑO EN FLEXOCOMPRESION EN ACERO

BRAZO SUPERIOR

SOLICITACIONES

P= 604323.0 Mmz= 12.00 Miz= 3.549 ton-m

L= 1033.9 May= 1.18 Miy= 0.222 ton-m

PROPIEDADES

As= 470.17 bf= 59.12 Ry= 23.31

Iy= 255468.3 h= 59.12 Rz= 23.31

Sy= 8642.36 dw= 55.00 Ky= 0.65

Sz= 8642.36 t= 2.06 Kz= 0.65

fa= 1285.32 KL/Ry= 28.83 KL/Rz= 28.83

FS= 1.75 Fa= 1407.19

fa/Fa= 0.91 fa/Fy= 0.51 > 0.16 REVISAR POR INESTABILIDAD

fbz= 138.83 fby= 13.65

bf/t= 28.70 < 31.7...BIEN

dw/t= 26.70 < 42.7...BIEN

h/bf= 1.00 < 6 ...BIEN

L/bf= 17.49 < 33.3...BIEN SECCION COMPACTA

Fb= 1670.00 fbz/Fb= 0.083 fby/Fb= 0.008

Cm= 0.85

F'e= 12630.6 1-fa/F'e=0.898

REVISION POR INESTABILIDAD

fa/Fa + Cm/(1-fa/F'e)\*(fbz/Fb + fby/Fb) ≤ 1.0

0.913 + 0.078 + 0.007 = 1.000 ≤ 1.0...BIEN

REVISION DE LOS EXTREMOS

fa/0.6Fv + fbz/Fb + fby/Fb ≤ 1.0

0.846 + 0.083 + 0.008 = 0.938 ≤ 1.0...BIEN

TABLA II

DISEÑO EN FLEXOCOMPRESION EN ACERO

BRAZO INFERIOR

SOLICITACIONES

P= 613945.0 Msz= 3.46 Miz= 3.545 ton-m  
 L= 1383.9 May= 2.00 Miv= 0.273 ton-m

PROPIEDADES

As= 546.26 bf= 59.76 Ry= 23.45  
 Iy= 300271.3 h= 59.76 Rz= 23.45  
 Sy= 10049.24 dw= 55.00 Ky= 1.00  
 Sz= 10049.24 t= 2.38 Kz= 1.00  
 fa= 1123.91 KL/Ry= 59.02 KL/Rz= 59.02  
 FS= 1.83 Fa= 1231.54  
 fa/Fa= 0.91 fa/Fy= 0.44 > 0.16 REVISAR POR INESTABILIDAD  
 fbz= 35.28 fby= 19.89  
 bf/t= 25.11 < 31.7....BIEN  
 dw/t= 23.11 < 42.7....BIEN  
 h/bf= 1.00 < 6 ....BIEN  
 L/bf= 23.16 < 33.3....BIEN SECCION COMPACTA  
 Fb= 1670.00 fbz/Fb= 0.021 fby/Fb= 0.012  
 Cm= 0.85  
 F'e= 3014.6 1-fa/F'e=0.627

REVISION POR INESTABILIDAD

$fa/Fa + Cm/(1-fa/F'e)^4(fbz/Fb + fby/Fb) \leq 1.0$   
 0.913 + 0.028 + 0.016 = 0.957 < 1.0....BIEN

REVISION DE LOS EXTREMOS

$fa/0.6Fy + fbz/Fb + fby/Fb \leq 1.0$   
 0.740 + 0.021 + 0.011 = 0.773 < 1.0....BIEN

## MODELO MODIFICADO PARA ANALISIS (SOLUCION ALTERNATIVA)

Este modelo modifica al original rigidizando la estructura por medio de la adición de elementos metálicos colocados en los brazos tal como se aprecia en las figuras # 28, incrementándose por tanto el número de nodos a 30 y el número de miembros a 66, conservándose las propiedades mecánicas de material (Acero A-36) y adicionándose las propiedades geométricas de los elementos rigidizadores.

El sistema de rigidización se estructuró por medio de vigas C de 12" de peralte conectadas espalda con espalda con placas separadoras de diferente espesor ver figura # 29 en donde se muestra la distribución de estos rigidizadores en la compuerta.

Por lo que las propiedades geométricas de estos elementos considerados en el análisis estructural fueron:

	2CPS 12" S=1/2"	2CPS 12" S=3/4"	2CPS 12" S=1"
A	77.8	77.8	77.8
I <sub>x</sub>	21.86	21.86	21.86
I <sub>y</sub>	778.4	905.45	1048.2
I <sub>z</sub>	10664.8	10664.8	10664.8
S <sub>y</sub>	51.08	59.41	68.8

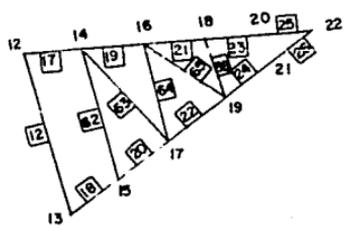
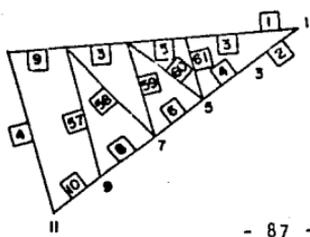
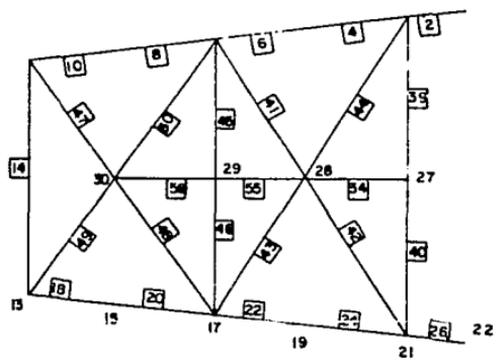
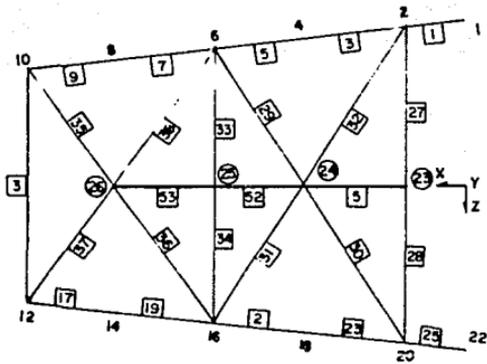
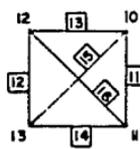
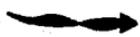
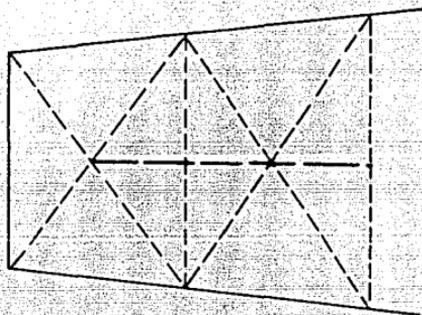


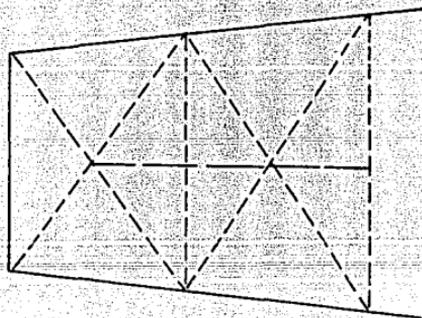
FIG. 2 8



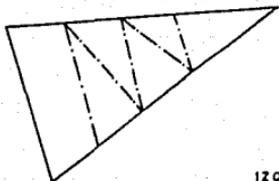
$s = 1''$  - - - - -  
 $s = 1/2$  - - - - -  
 $s = 3/4''$  - - - - -



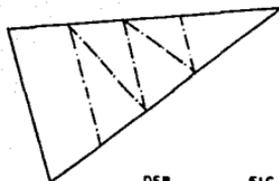
SUPERIOR



INFERIOR



120.



DER.

FIG. 29

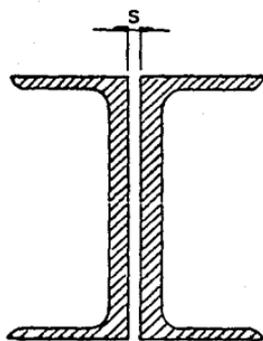


FIG. 29

$s_z$	699.8	699.8	699.8
$r_y$	3.163	3.411	3.671
$r_z$	11.71	11.71	11.71

Ahora bien, al incrementarse el número de elementos en el modelo fue necesario adicionar nudos al mismo, siendo las coordenadas - de estos nudos nuevos las siguientes:

Nudo	X	Y	Z
23	245.664	12.229	0.0
24	531.072	26.438	0.0
25	773.288	38.497	0.0
26	1098.87	54.705	0.0
27	198.429	145.316	0.0
28	428.993	314.167	0.0
29	624.652	457.465	0.0
30	887.654	650.061	0.0

Manteniéndose las condiciones de apoyo del modelo original no -  
 atlesado y aumentando el número de elementos de 26 a 66. Estos  
 nuevos miembros de acuerdo a la topología de la estructura tie-  
 nen las incidencias siguientes:

Miembro	Nudo i	Nudo j
27	2	23
28	23	20
29	6	24
30	24	20
31	16	24
32	24	2
33	6	25
34	25	16
35	10	26
36	26	16
37	12	26
38	26	6
39	3	27
40	27	21
41	7	28
42	28	21
43	17	28
44	28	3
45	7	29
46	29	17

47	11	30
48	30	17
49	13	30
50	30	7

Miembro	Nudo i	Nudo j
51	23	24
52	24	25
53	25	26
54	27	28
55	28	29
56	29	30
57	8	9
58	8	7
59	6	7
60	6	5
61	4	5
62	14	15
63	14	17
64	16	17
65	16	19
66	18	19

En cuanto a la posición, magnitud, dirección y sentido de las cargas aplicadas al modelo estos son exactamente las mismas del modelo sin reforzar, siendo también las combinaciones de carga-

las mismas que se analizaron con anterioridad.

Con los datos anteriores se realizó el análisis estructural correspondiente, obteniéndose elementos mecánicos en miembros y desplazamiento de los nudos, así como reacciones en los apoyos. A partir de estos datos se solicitó al programa "STRUDL" hacer la revisión de los miembros de manera interna y resultando que estos miembros son capaces de resistir de acuerdo al criterio de esfuerzos permisibles las cargas actuantes.

Se consideró que es muy importante presentar a continuación un análisis comparativo entre los más importantes resultados obtenidos de las estructuras analizadas para tratar de generar algunas conclusiones del trabajo desarrollado.

## ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

Dado que el problema más importante que se debió solucionar en estas compuertas fue el movimiento excesivo y como las compuertas tanto en su estado original como en el reforzado no tiene problemas de resistencia, se consideró que en el análisis comparativo los parámetros más importantes a manejar debían basarse en los desplazamientos de la estructura, por lo que a continuación se presenta la información conducente; que puede ser observada adicionalmente en forma gráfica en las figuras # 30 a 35.

# DESPLAZAMIENTOS

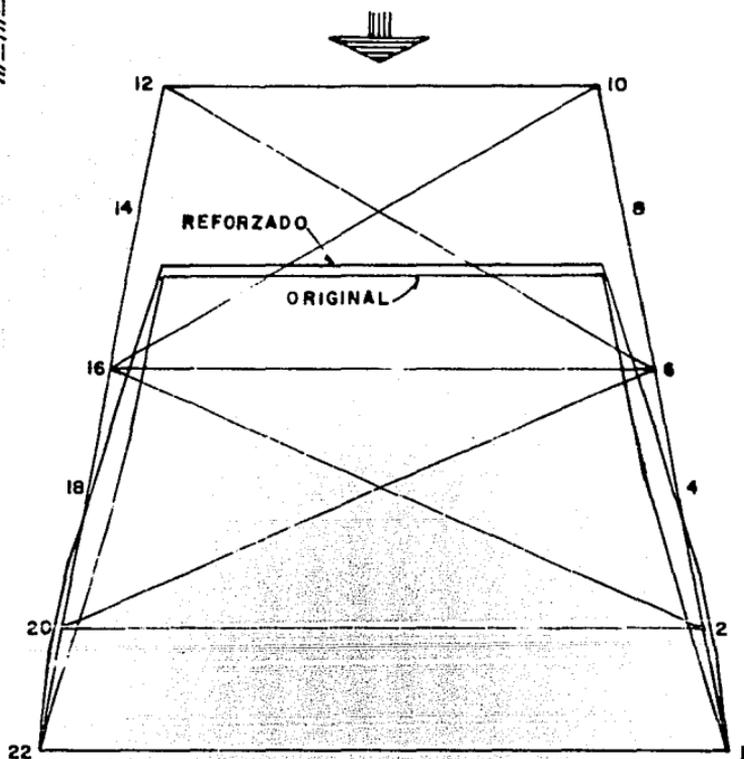
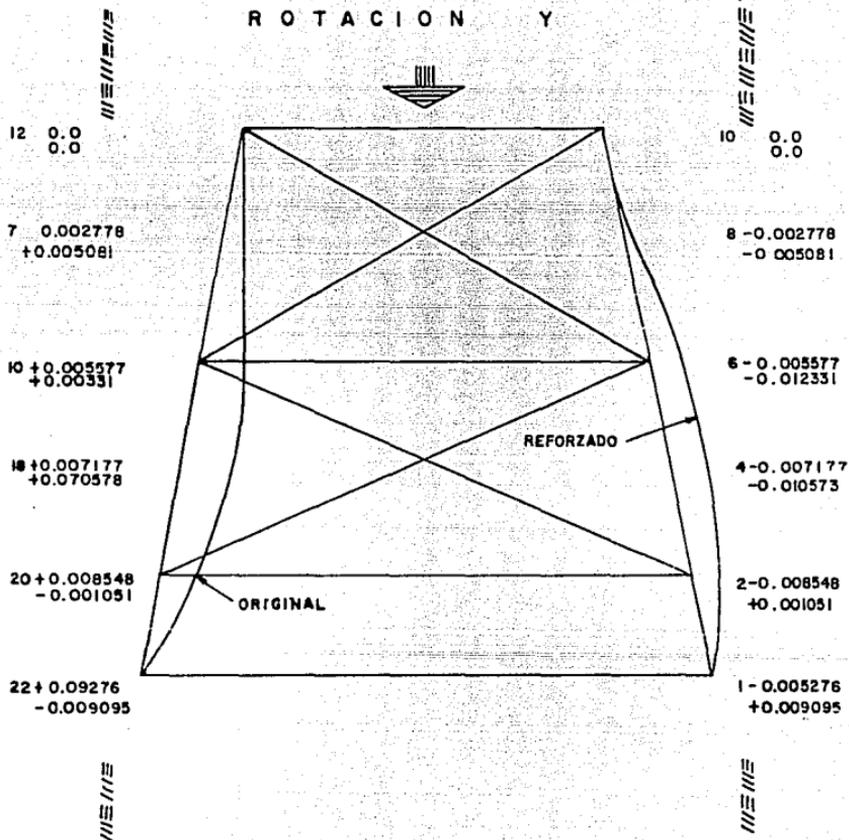


FIG. 30



# ROTACION Y



# R O T A C I O N Y

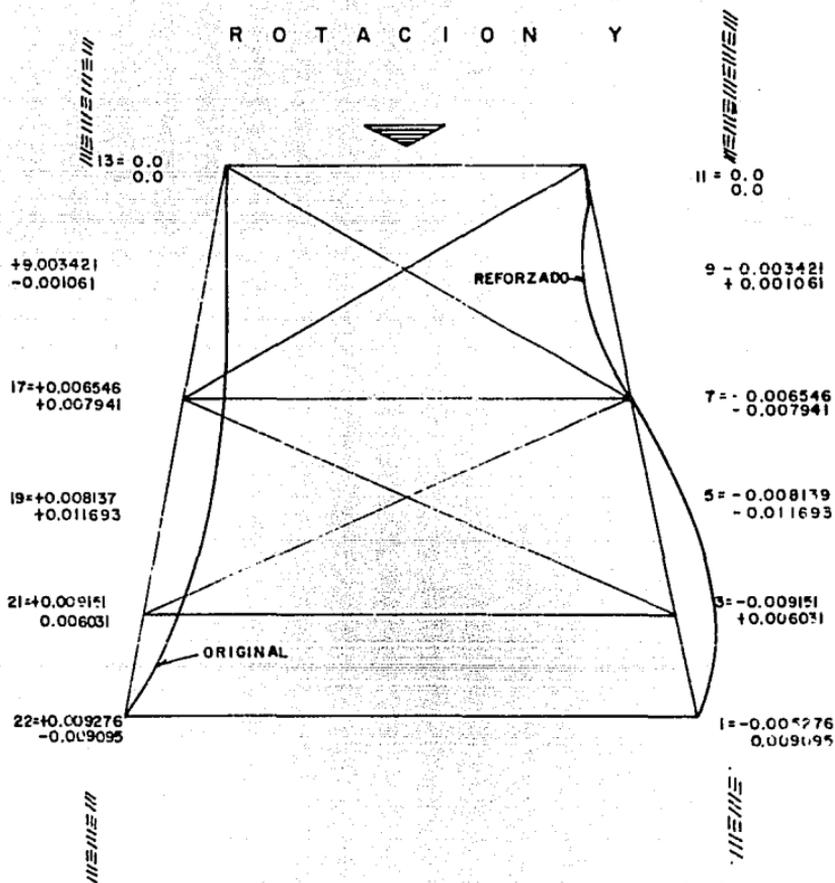
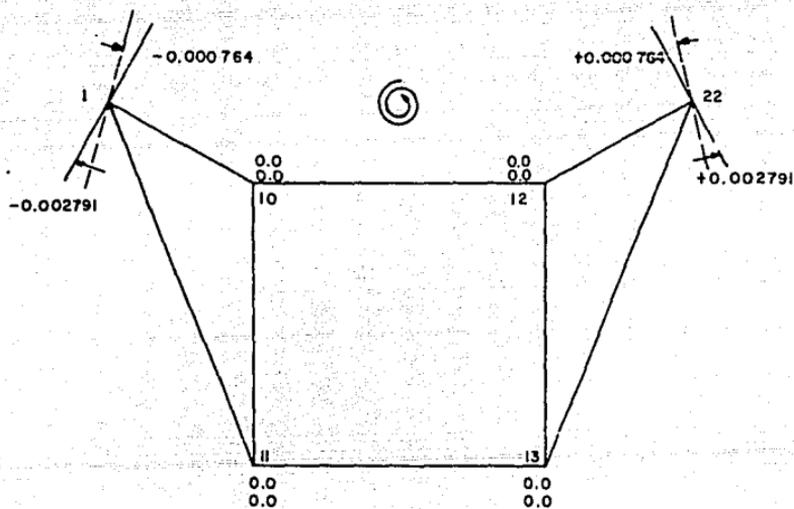


FIG. 33

# R O T A C I O N X



GIROS EN GRADOS

ORIGINAL ———  
 REFORZADO - - -

FIG N° 34

# R O T A C I O N    Z

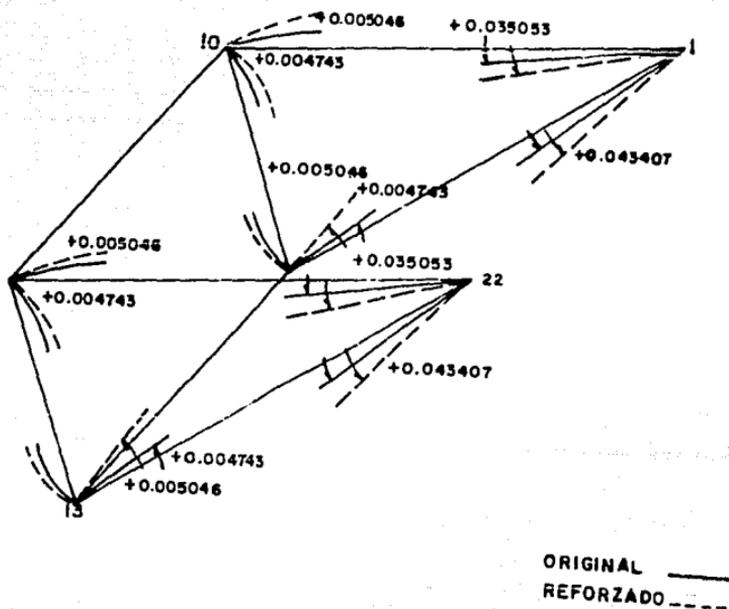


FIG. 35

O = ORIGINAL  
R = REFORZADA

NUDO	CONDICION	DESPLAZAMIENTO	
		X	Z
1	O	-	-
	R	-	-
22	O	-	-
	R	-	-
3	O	-1.96	0.032
	R	-2.085	-0.456
21	O	-1.96	-0.032
	R	-2.085	+0.456
5	O	-4.112	0.078
	R	-4.318	-0.413
19	O	-4.112	-0.078
	R	-4.318	0.413
7	O	-5.66	0.122
	R	-5.703	-0.121
17	O	-5.66	-0.122
	R	-5.703	0.121
9	O	-7.306	0.130
	R	-7.155	0.093
15	O	-7.306	-0.130
	R	-7.155	-0.093

NUDO	CONDICION	DESPLAZAMIENTO	
		X	Z
11	O	-8.439	-
	R	-8.293	-
13	O	-8.439	-
	R	-8.293	-
1	O	-	-
	R	-	-
22	O	-	-
	R	-	-
2	O	-1.496	0.131
	R	-1.382	-0.525
20	O	-1.496	-0.131
	R	-1.382	0.525
4	O	-3.184	0.237
	R	-3.029	-0.460
18	O	-3.184	-0.237
	R	-3.029	0.460
6	O	-4.570	0.270
	R	-4.436	-0.130
16	O	-4.570	-0.270
	R	-4.436	0.130

NUDO	CONDICION	DESPAZAMIENTO	
		X	Z
8	O	-6.382	0.194
	R	-6.241	0.110
14	O	-6.382	-0.194
	R	-6241	-0.110
10	O	-7.829	-
	R	-7.644	-
12	O	-7.829	-
	R	-7.644	-

NUDO	CONDICION	DESP/ROT.	%
11	O	DX -0.008439	-1.73
	R	DX -0.008293	
13	O	DX -0.008439	-1.73
	R	DX -0.008293	
1	O	RX -0.002791	-72.63
	R	RX -0.000764	
22	O	RX +0.002791	-72.63
	R	RX +0.000764	
1	O	RY -0.009276	-1.95
	R	RY +0.009095	
22	O	RY +0.009276	-1.95
	R	RY -0.009095	
1 y 22	O	RZ +0.035053	+23.83
	R	RZ +0.043407	
11 y 13	O	RZ +0.004743	+6.39
	R	RZ +0.005046	

Es por lo anterior que puede concluirse que pese al notable incremento en el reforzamiento con el consecuente aumento en peso y en costo de la estructura, la reducción en desplazamientos no es substancial y por ende no soluciona el problema. La solución real dada a esta estructura requirió de un refuerzo adicional de armadura entre ambos brazos en planos paralelos a la pantalla frontal, con lo cual sí se produjeron reducciones importantes a los desplazamientos del sistema original.

## C A P I T U L O V

### C O N C L U S I O N E S

Del análisis de los resultados de este trabajo se desprenden las conclusiones siguientes:

- a) La estructuración dada a la compuerta original no fue adecuada, ni pensando en las implicaciones que esto acarrearía en su comportamiento estructural, - siendo importante por esto la participación del ingeniero civil en el diseño de estos elementos.
- b) El reforzamiento que se dé a esta estructura para solucionar el problema de flexibilidad excesiva resulta ser siempre caro por requerirse para esto un gran número de elementos estructurales adicionales.

## R E F E R E N C I A S

- 1.- PUBLICACIONES DE LA PORTLAND CEMENT ASOCIATION.- Presas pequeñas de concreto, Ed. Limusa - 1978.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- ENERGIA HIDROELECTRICA.- Turbinas y Plantas Generadoras.- Viejo Zubizaray y Alonso Ed. Limusa.
- 2.- DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO.- Bresler, Lin y Scalzi Ed. Limusa 1970.
- 3.- MANUAL PARA CONSTRUCCIONES.- Cía. Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey, S.A. 1970.
- 4.- MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION.- American Institute of Steel Construction, octava edición.
- 5.- VALVES, GATES, AND STEEL CONDUITS.- Department of interior.- Bureau of Reclamation.
- 6.- TESIS.- DISEÑO DE COMPUERTAS RADIALES DE  $B = 20.00$  M -  $A = 14.5$  M PARA LA PRESA HUITES, SIN.- Miguel Martínez Zurita García.- México, D.F. 1978.