



**BUAP**

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD** **AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE  
POSGRADO

## **“Diseño Estructural de Tanque Circular de Concreto Reforzado para PTAR en Planta de Malta, Grajales “**

**TESINA**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN INGENIERÍA  
ESTRUCTURAL**

PRESENTA:

Bárbara Esther González López

ASESOR:

Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui

PUEBLA, PUE.

FEBRERO 2024

## Acta resolutive de impresión de tesis



Oficio No: SIEP/004/2024

**Asunto:** Carta de Autorización de Impresión de Tesina

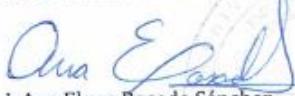
Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza  
Director General de Bibliotecas  
Presente


Por este medio me dirijo a usted para informarle que la tesina con título "Diseño estructural de tanque circular de concreto reforzado para PTAR en Planta de Malta, Grajales" ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por tanto, se autoriza la impresión de tesis del alumno:

Nombre del alumno: Bárbara Esther González López  
Matrícula: 264700834  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Estructural

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z., a 17 de enero de 2024

  
M. I. Ana Elena Posada Sánchez  
Secretaría de Investigación y Estudios  
de Posgrado

  
Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui  
Director de tesina

Facultad  
de Ingeniería

Bvtd. Valsequillo y Av. San Claudio  
sin. edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

## Oficio autorización de tema de tesis/modalidad de titulación



Oficio No. SIEP/1947/2023

**C. Bárbara Esther González López**

Matrícula 264700834

Pasante de la Maestría en Ingeniería Estructural

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesina le autoriza desarrollar el tema titulado: **Diseño estructural de tanque circular de concreto reforzado para PTAR en Planta de Malta, Grajales.** Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Estructural, Assignándose como Director de tesina al Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, a 18 de octubre de 2023.

**M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**

Director



C.c.p. Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui, Director del Tema de Tesina.

C.c.p. Archivo

AEPS/JPHT/sco\*

Facultad  
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

## **Créditos, dedicatorias y agradecimientos**

Agradezco:

A la empresa Ingeniería y Construcciones Ambientales S.A. de C.V. la autorización para el uso de la información del proyecto de Alcance de obras civiles para la planta de tratamiento de Aguas Residuales para los fines académicos correspondientes.

A la empresa SIPSA y sus colaboradores por el apoyo técnico, así como por su experiencia y asistencia en todos los aspectos para el desarrollo de este proyecto.

A la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la BUAP por la oportunidad para concluir con los requisitos para llevar a cabo la titulación de la Maestría.

A mi familia, mi esposo, mis hijas, mi madre y mi hermana, quienes, en todo momento y de diferentes formas, han apoyado las decisiones y el trabajo que realizo.

## *Contenido*

Resumen .....	7
Palabras Clave .....	9
Introducción.....	10
Antecedentes .....	10
Problemática .....	13
Justificación.....	15
Objetivos .....	16
Objetivos particulares .....	16
Descripción del marco conceptual .....	16
Descripción del marco teórico.....	17
Descripción del marco metodológico.....	19
Descripción de los procedimientos ejecutados .....	21
Descripción de los resultados, discusión y validación .....	21
Descripción de la conclusión .....	22
Capítulo I.- Descripción General.....	23
Marco Conceptual .....	23
Marco Teórico .....	28
Capítulo II.- Estructuración y sistemas estructurales .....	36
Criterios Generales.....	38
Métodos de análisis y modelación .....	38
Capítulo III.- Calidad y propiedades de los materiales estructurales y Caracterización de las propiedades del suelo .....	40
Concreto Reforzado .....	41
Acero de Refuerzo.....	42
Caracterización de las propiedades del suelo .....	42
Capítulo IV.- Análisis de Cargas Reglamentarias.....	46
Empuje del suelo.....	46
Carga muerta .....	47

Empuje de fluidos.....	48
Carga Viva .....	48
Capítulo V. - Parámetros de análisis sísmico .....	49
Caracterización del sitio .....	49
Grupo de la estructura .....	49
Factor de comportamiento sísmico.....	51
Factor de redundancia .....	52
Espectro de diseño.....	52
Capítulo VI. – Análisis y Diseño Estructural .....	58
Análisis hidrodinámico de tanque clarificador primario.....	59
Revisión general de la estructura .....	78
Revisión de desplazamientos laterales máximos .....	89
Revisión por sismo de elementos de concreto.....	90
Diseño de elementos estructurales.....	99
Conclusiones/recomendaciones/propuesta .....	119
Bibliografía .....	121
Anexos.....	122

## ***Resumen***

En la planta de malta de Lara Grajales Puebla se contaba con una planta de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, dado el crecimiento de la producción de la empresa, resulto necesario realizar la adecuación y actualización de la PTAR.

La empresa Ingeniería y Construcciones Ambientales, S.A. de C.V. (INCOAM) realizó el proyecto de adecuación y actualización de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Maltera Grajales Puebla, dicha empresa solicito el diseño y cálculo estructural para los tanques de almacenamiento que se encuentran comprendidos en el proyecto de ampliación.

El caso particular de estudio de esta tesina es el Tanque Clarificador Primario que forma parte de la ampliación de la PTAR de la planta de malta el Grajales, Puebla.

El Tanque Clarificador Primario comprende la construcción de un tanque circular con base cónica para la sedimentación de sólidos suspendidos en el agua a tratar. La estructura tiene un diámetro interior de 12.00 m y una altura de muros de 2.80 m. El cono del tanque en la parte inferior alcanza una profundidad de 1.60 m. Adicionalmente la estructura cuenta con una columna interior circular hueca que carga la plataforma del rastrillo rascador de lodos. Además, el tanque tiene un canal perimetral para el rebose de agua sin sólidos, el cual tiene una sección en forma de "L" y se encuentra adosado al muro perimetral del tanque cilíndrico.

El procedimiento de modelado consiste en el empleo de un programa de cómputo especializado que permita realizar la reproducción tridimensional de la estructura considerando cada uno de los elementos que la componen. Cada

elemento se define de acuerdo con la respuesta esperada dentro del análisis estructural considerando en el proceso las propiedades geométricas de las secciones, materiales y su comportamiento mecánico global y particular.

El objetivo de este trabajo es aplicar los procedimientos de análisis y diseño estructural para un tanque circular de concreto reforzado, de 12.00 m de diámetro interior y una altura de muros de 2.80 m, de la PTAR de la planta de malta ubicada en el municipio de Lara Grajales, Puebla, llevando a cabo el procedimiento de modelado de elementos shell utilizando un programa de cómputo especializado que permita realizar la conceptualización tridimensional de la estructura para su análisis y diseño, para, finalmente, realizar el diseño estructural del tanque circular de concreto reforzado aplicando la normativa vigente correspondiente.

La metodología que se aplica para realizar Diseño Estructural de Tanque Circular de Concreto Reforzado para PTAR en Planta de Malta, Grajales es la siguiente:

1. Definir la estructura y los materiales que se utilizarán para su construcción
2. Definir las propiedades de los materiales y del suelo.
3. Definir las cargas reglamentarias
4. Definir los parámetros de análisis sísmico
5. Realizar el análisis y diseño de la estructura, aplicando el procedimiento de análisis estructural para un tanque circular de concreto reforzado empleando un programa de cómputo especializado.

Los elementos estructurales se dimensionan de tal manera que su resistencia, a las diversas acciones de trabajo a las que puedan estar sujetas, sean igual a dichas acciones multiplicadas por factores de carga, de acuerdo con el grado de seguridad deseado o especificado.

Al realizar el análisis de la estructura, los resultados obtenidos de acuerdo con las secciones de los elementos estructurales y propiedades de los materiales

planteadas en el modelo se revisan y comparan con la normativa correspondiente para verificar el comportamiento adecuado ante las cargas solicitadas.

### ***Palabras Clave***

Diseño estructural, deposito circular, tanque circular, tanque de concreto reforzado, análisis estructural, modelo estructural.

# ***Introducción***

## **Antecedentes**

En la planta de malta de Lara Grajales Puebla se contaba con una planta de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, dado el crecimiento de la producción de la empresa, resulto necesario realizar la adecuación y actualización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

La empresa Ingeniería y Construcciones Ambientales, S.A. de C.V. (INCOAM) realizó el proyecto de adecuación y actualización de la PTAR de la Maltera Grajales Puebla, dicha empresa solicito el diseño estructural para los tanques de almacenamiento que se encuentran comprendidos en el proyecto de ampliación.

El espacio para la ubicación de la nueva PTAR se encuentra adyacente a la planta existente. Si bien en el proyecto general de la planta de Malta de Grajales no se contemplaba el proyecto de crecimiento de la PTAR, si se consideró el espacio necesario para una posible modificación o ampliación.

En la Figura 1, se muestra una imagen que contiene la ubicación de la nueva PTAR, indicando también la ubicación del Tanque Clarificador Primario que es el caso de estudio de esta tesina:

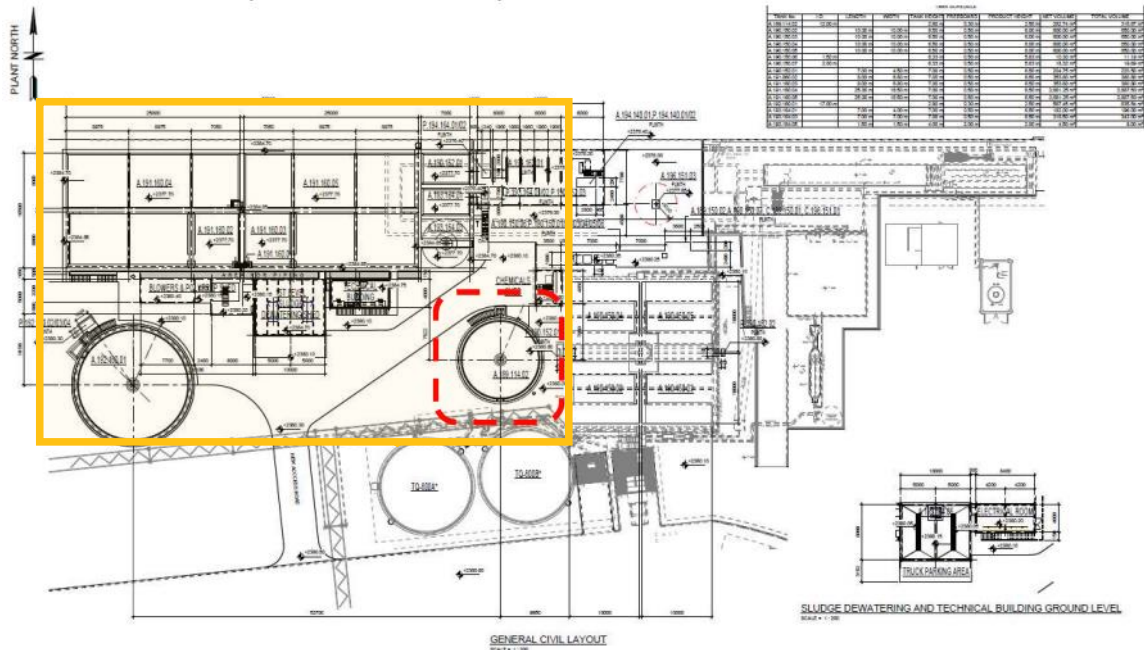


Figura 1. Localización del tanque clarificador primario en el sembrado general de la PTAR

## CLARIFICADOR PRIMARIO.

De acuerdo con el proyecto de la empresa INCOAM, para la construcción del tanque clarificador primario se considerará lo siguiente: (Ingeniería y Construcciones Ambientales S.A. de C.V., 2022)

El tanque clarificador primario es una estructura con forma circular en planta con un diámetro de 12 m medidos a paños interiores de muros. Tiene una columna central por la que discurre un tubo de flujo para llenado, cuenta con un canal perimetral adosado a los muros y un tanque cuadrangular adosado con medidas interiores en planta de 1m x 1m. Se encuentra desplantado a 30 cm por debajo del nivel de terreno de vialidad y el punto más bajo de la losa se encuentra al centro de esta a una profundidad de 1.90 m por debajo del nivel de terreno circundante. Los muros perimetrales son de 2.80 m de altura.

a) Cimentación:

- Se excavará por medios mecánicos hasta la profundidad de 0.3 metros en la orilla con un sobrecancho de 1.5 m y a la profundidad de desplante de la losa cónica, el material producto de excavación será acarreado a banco de tiro autorizado, se compactará el fondo de la excavación por medios de rodillos compactadores.
- Se colará una plantilla de concreto de 5 cm sobre la plataforma de terreno. Sobre esta superficie construirá el tanque.
- Después de finalizar la construcción y pruebas de estanqueidad del tanque se procederá a realizar un relleno controlado con material de banco de calidad subrasante en dos capas de 15 cm compactados hasta llegar al nivel de terreno natural existente.

b) Superestructura:

- La losa de fondo del tanque será de concreto armado con un espesor de 30 cm, los muros se desplantan desde la losa de fondo y serán integrales en armado y colado con la losa, contratrabes y cabezales. Los muros perimetrales serán de 30 cm de espesor, se construirá un chaflán sanitario colado integralmente a la losa y muros en los bordes interiores.
- La columna central es un diámetro de 0.8 m y cubre por completo el tubo de entrada. La corona de la columna se corresponde con el nivel tope de los muros.
- Se construirá un canal perimetral con un espesor de losa de fondo y muro de 15 cm y colado integralmente a los muros de concreto.
- Se considera instalar tuberías de polietileno de alta densidad en el fondo del clarificado, esta tubería va debajo de la losa de cimentación, la tubería es para alimentación de agua y para la extracción de lodos.

c) Protección del concreto.

La superficie interior del tanque se recubrirá con el siguiente sistema:

- Tecnología XOLUTEC: MASTERSEAL P770 para el primario y MASTERSEAL M790 para capa:
- El primario se aplica a razón de 5 metros cuadrados por litro (7 milésimas de espesor).
- La capa base se aplica a razón de 1 litro por metro cuadrado (40 milésimas de espesor).

#### d) MISCELÁNEOS.

En el documento de alcances de proyecto se describe como misceláneos algunas de las instalaciones que se colocarán en el tanque:

Sobre la parte superior del muro del tanque cuadrangular para la descarga de natas se instalará una escalera fabricada en estructura de acero al carbón pintados con un recubrimiento epóxico primario 63% solidos (E-10) Marca COMEX de 0.004" de espesor seco y una pintura de acabado final a base de un poliuretano (U-10) Marca COMEX de 0.003" de espesor, los escalones serán de rejilla Irving galvanizado en caliente y los barandales serán fabricados en acero inoxidable. (Ingeniería y Construcciones Ambientales S.A. de C.V., 2022)

### **Problemática**

El establecer las dimensiones para una estructura circular para contener líquidos puede resultar dudosa, sin embargo, al aplicar conceptos de mecánica y resistencia de materiales podemos resolver este tipo de problemática que se nos presenta.

El ACI 350.3, Diseño Sísmico de Estructuras Contenedoras de Líquidos (ACI 350.3-06) y Comentarios ((350.3R-01) describe el procedimiento para el diseño de estructuras contenedoras de líquidos sometidas a cargas sísmicas. Dicho documento presenta pasos para el diseño de estructuras de concreto

armado contenedoras de líquido para ingresar las fuerzas sísmicas que deben ser aplicadas en una estructura en particular.

El uso de software en el desarrollo de proyectos simplifica el tiempo de cálculo y diseño manual que el profesional en Ingeniería emplea en cada proceso de diseño, reduciendo ampliamente el tiempo y optimizándolo en gran manera. Por tal motivo, es muy necesario que el estructurista sepa sustentar sus cálculos presentados en software, de tal manera que los resultados producto de las cargas modeladas en software sean consistentes con procedimientos de verificación y/o comprobación. (Henry, 2022)

Para el análisis estructural de tanques se deben considerar las propiedades de los materiales propuestos y las secciones de los elementos que aportan rigidez al conjunto, así mismo, las cargas de diseño deben estar apegadas al tipo y dimensiones de los materiales, así como a la reglamentación correspondientes.

Deben considerarse, además, las propiedades del terreno de acuerdo a las indicaciones de un estudio de mecánica de suelos y realizar el análisis sísmico siguiendo las recomendaciones establecidas.

El caso particular de estudio comprende la construcción de un tanque circular con base cónica para la sedimentación de sólidos suspendidos en el agua a tratar. La estructura tiene un diámetro interior de 12.00 m y una altura de muros de 2.80 m. El cono del tanque en la parte inferior alcanza una profundidad de 1.60 m. la estructura cuenta con una columna interior circular hueca que carga la plataforma del rastrillo rascador de lodos. Además, el tanque tiene un canal perimetral para el rebose de agua sin sólidos, el cual tiene una sección en forma de "L" y se encuentra adosado al muro perimetral del tanque cilíndrico.

El procedimiento de modelado consiste en el empleo de un programa de cómputo especializado que permita realizar la reproducción tridimensional de la estructura considerando cada uno de los elementos que la componen. Cada

elemento se define de acuerdo con la respuesta esperada dentro del análisis estructural tomando en cuenta las propiedades geométricas de las secciones, materiales y su comportamiento mecánico global y particular.

*Mediante el análisis estructural se determinan las respuestas del sistema estructural ante la sollicitación de las acciones externas que puedan incidir sobre dicho sistema. La respuesta de una estructura o de un elemento es su comportamiento bajo una acción determinada, está en función de sus propias características y puede expresarse en función de deformaciones, agrietamiento, vibraciones, esfuerzos y reacciones.*

## **Justificación**

Los sistemas de tanques de almacenamiento cumplen con una gran variedad de aplicaciones, y esto cierto para los tanques concreto de empleados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Los tanques de almacenamiento para tratamiento de aguas deben ofrecer seguridad y resistencia para cada proceso.

En términos generales, las estructuras de concreto son durables, funcionales, resistentes y de fácil colocación, por lo que desempeñan un papel primordial en las obras de ingeniería y arquitectura de nuestro país.

La labor de este trabajo consiste en aplicar el procedimiento de análisis estructural para un tanque circular de concreto reforzado empleando un programa de cómputo especializado que permita la reproducción tridimensional de la estructura, idealizando matemáticamente el comportamiento de muros de concreto y losas. Además, el modelo estructural debe ser revisado y comparado con la normativa correspondiente para verificar el comportamiento adecuado ante las cargas solicitadas.

Con la elaboración de este trabajo se pretende proporcionar un ejemplo práctico para el análisis y diseño estructural de tanques circulares de concreto reforzado que sirve de apoyo y ejemplo para llevar a cabo proyectos similares.

## **Objetivos**

Aplicar los procedimientos de análisis y diseño estructural para un tanque circular de concreto reforzado, de 12.00 m de diámetro interior y una altura de muros de 2.80 m, de la PTAR de la planta de malta ubicada en el municipio de Lara Grajales, Puebla.

## **Objetivos particulares**

Aplicar el procedimiento de modelado de elementos shell utilizando un programa de cómputo especializado que permita realizar la conceptualización tridimensional de la estructura para su análisis y diseño.

Realizar el análisis y diseño de un tanque circular de concreto reforzado aplicando la normativa vigente correspondiente.

## **Descripción del marco conceptual**

El diseño de los tanques de agua depende de la función que desempeñan dentro de un proyecto, en el caso particular de estudio, los tanques clarificadores tienen como función reciclar el agua sucia generada de algún proceso para generar agua limpia para ser reutilizada nuevamente. En el tanque se genera como residuo un lodo de alta concentración de minerales que se trata más fácilmente en otros equipos de filtrado o prensado.

El tanque clarificador primario de este caso de estudio, de conformidad con su posición relativa al terreno, es un depósito superficial, considerando que se construye directamente apoyado sobre la superficie del suelo.

El material de construcción más utilizado para este tipo de estructuras es el concreto reforzado, ya que cuenta con ventajas sobre otros materiales.

Para el diseño de tanques contenedores de líquidos, las acciones o cargas de diseño se clasifican en tres categorías: permanentes, variables y accidentales.

### **Descripción del marco teórico**

En el diseño de las estructuras para los depósitos de agua potable o tratada, se deben tomar en cuenta los efectos de las cargas muertas, las cargas vivas y las provocadas por el sismo y el viento, cuando estos últimos sean significativos.

De acuerdo a la teoría, las acciones que se aplican en el diseño estructural de un tanque cilíndrico son:

- Acciones permanentes:  
Cargas muertas: Se considerará el peso de los elementos que constituyen el depósito, incluyendo los pesos de las tuberías y válvulas de gran diámetro, tomando en cuenta el tamaño, número y el espaciamiento de los tubos, incluyendo las cargas reales y tomando en consideración las ampliaciones planeadas.
- Acciones variables
  - La presión interior del agua
  - La presión del suelo
  - Carga viva en escaleras y plataformas

- Otras acciones variables: Otros valores de las cargas vivas para los cambios de temperatura podrán tomarse de los reglamentos locales y se considerarán las condiciones locales
- Acciones accidentales
  - Sismo: Se ha comprobado que, durante los sismos, los depósitos que contienen algún fluido pueden fallar y derramar el líquido contenido. Al proyectar los depósitos para resistir las acciones sísmicas, se deberá tomar en cuenta la masa hidrodinámica del líquido contenido.
  - Las presiones impulsivas y las convectivas: como resultado de un sismo, el contenido de un depósito para el almacenamiento de líquidos, ubicado sobre el terreno, experimenta una oscilación a causa del movimiento del terreno. El fluido en las proximidades de los muros se acelera hacia un lado y otro, esencialmente al unísono con dichos muros, en tanto que el fluido cercano a la parte central del depósito no se acelera, sino que tenderá a oscilar con el periodo natural del chapoteo u oleaje del líquido. (Pavón Rodríguez, 2001)

Del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad obtenemos que, cuando un depósito es sometido a excitación se generan dos tipos de sollicitaciones: presiones hidrodinámicas sobre las paredes y el fondo y fuerzas de inercia en la masa del depósito. A su vez, el movimiento del líquido origina dos tipos de presiones hidrodinámicas: las presiones convectivas asociadas a los modos de vibración y las impulsivas asociadas al modo de cuerpo rígido.

Para llevar a cabo un análisis de esfuerzos detallado de las paredes y el fondo de un depósito es necesario conocer tanto la distribución como la magnitud de las presiones hidrodinámicas locales. Éstas se obtendrán mediante la

combinación de las componentes de presiones impulsivas y convectivas.  
(Comisión Federal de Electricidad, 2015)

## Descripción del marco metodológico

La metodología a aplicarse para realizar el análisis y diseño estructural del Tanque Circular de Concreto Reforzado para la PTAR será de la siguiente forma:

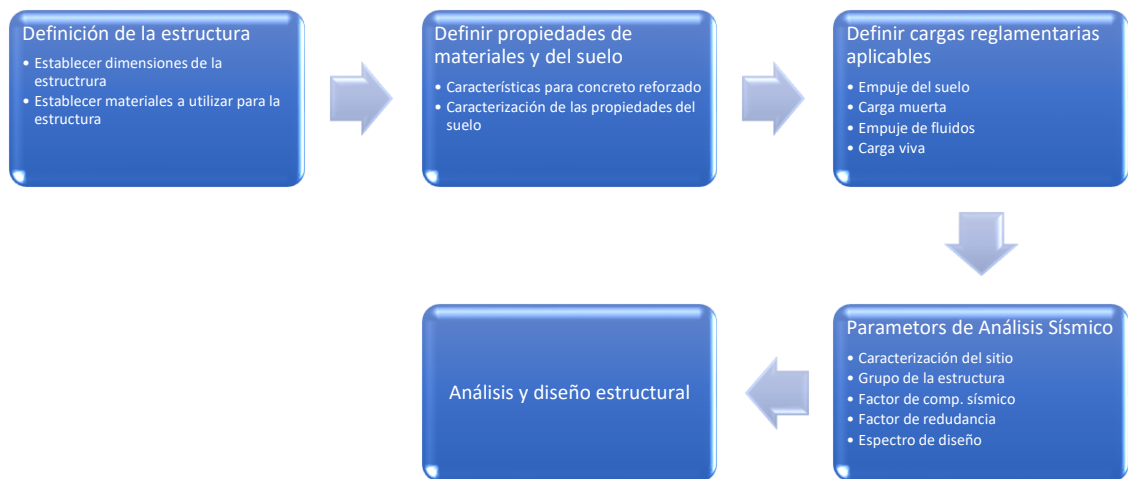


Figura 2. Diagrama descriptivo del procedimiento para el diseño estructural del tanque circular de concreto reforzado para la PTAR

1. Definir la estructura y los materiales que se utilizarán para su construcción que, para este caso, se encuentran descritos en el proyecto de adecuación y actualización de la PTAR de la Maltera Grajales Puebla realizado por la empresa Ingeniería y Construcciones Ambientales, S.A. de C.V. (INCOAM), la cual se incluye como parte de la bibliografía de este trabajo.
2. Definir las propiedades de los materiales y del suelo.  
Las especificaciones de los materiales se encuentran descritas en el proyecto de adecuación y actualización de la PTAR de la Maltera Grajales

Puebla realizado por la empresa Ingeniería y Construcciones Ambientales, S.A. de C.V. (INCOAM) y cumplen con las características conforme al reglamento de construcciones para la ciudad de México.

Para determinar las propiedades mecánicas del suelo donde se desplantará el tanque se recurrió a la información presentada en el estudio “Estudio de Mecánica de Suelos para el proyecto de rehabilitación de la PTAR en la planta de Malta Grajales” realizado por DICIMSA, (DICIMSA, EMS-CCMH-22-16, 2022) donde se consideró que el tanque correspondía a una relación de  $B/L=1$  análoga a un tanque cuadrado.

3. Definir las cargas reglamentarias, para lo cual se realizó un análisis de cargas para este tipo de estructura conforme a los Criterios y Acciones Para el Diseño Estructural de las Edificaciones de las NTC de la Ciudad de México vigente.
4. Definir los parámetros de análisis sísmico, para lo cual se debe tomar en cuenta la ubicación del proyecto de acuerdo a la zonificación sísmica del territorio mexicano que clasifica y estima las características de los movimientos tectónicos que puedan ocurrir y llegaran a afectar a las obras de infraestructura y edificaciones del país desarrollado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad. Además, debe considerarse el destino de las construcciones para determinar su importancia, y con ello, la protección o seguridad que se les provea. También se definirán los factores de comportamiento sísmico y de redundancia, así como el espectro de diseño utilizando los manuales aplicables.
5. Finalmente, una vez definidos todos estos datos, se llevará a cabo el análisis y diseño de la estructura, aplicando el procedimiento de análisis estructural para un tanque circular de concreto reforzado empleando un programa de cómputo especializado que permita la reproducción

tridimensional de esta, idealizando matemáticamente el comportamiento de muros de concreto y losas. El modelo estructural se revisará y comparará con la normativa correspondiente para verificar el comportamiento adecuado ante las cargas solicitadas.

### **Descripción de los procedimientos ejecutados**

Mediante el análisis estructural se determinan las respuestas del sistema ante la sollicitación de las acciones externas que puedan incidir sobre dicho sistema.

Se realizó el modelo tridimensional de la estructura para realizar el análisis, posterior a esto, se revisan las resistencias de los elementos que conforman a la estructura, empleando las disposiciones y consideraciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus respectivas Normas Técnicas Complementarias.

Se realizó el análisis estructural, considerando peso propio y empuje lateral de tierras, de acuerdo con la reglamentación correspondiente, para evaluar el comportamiento particular y general de la estructura.

### **Descripción de los resultados, discusión y validación**

Los elementos estructurales se dimensionan de tal manera que su resistencia, a las diversas acciones de trabajo a las que puedan estar sujetas, sean igual a dichas acciones multiplicadas por factores de carga, de acuerdo con el grado de seguridad deseado o especificado.

## **Descripción de la conclusión**

Se realizó la modelación del tanque circular con un programa de cómputo especializado que utiliza el método de elementos tipo Shell. Gracias a este método, se puede aseverar que los resultados obtenidos son los adecuados. Así mismo, al utilizar este método, se verifica que el espesor de las paredes del tanque propuesto en el proyecto es el adecuado al comparar las fuerzas que actúan con la resistencia de los materiales utilizados.

## ***Capítulo I.- Descripción General***

Esta tesina incluye los trabajos de ingeniería realizados para desarrollar el proyecto estructural del tanque clarificador primario de la Planta de tratamiento de aguas residuales de la Planta de Malta ubicada en Lara Grajales, Puebla.

El trabajo comprende la construcción de un tanque circular con base cónica para la sedimentación de sólidos suspendidos en el agua a tratar. Esta estructura cuenta con un diámetro interior de 12.00 m y una altura de muros de 2.80 m. El cono del tanque en la parte inferior alcanza una profundidad de 1.60 m medidos a partir de la cota +2,380.20 m.s.n.m. adicionalmente la estructura cuenta con una columna interior circular hueca de 0.80 m de diámetro exterior y 0.30 m de diámetro interior, con una altura de 4.40 m medidos desde el fondo del tanque. Esta columna carga la plataforma del rastrillo rascador de lodos.

En la cota +2,382.63 m.s.n.m. se encuentra un canal perimetral para el rebose de agua sin sólidos, este canal tiene una sección en forma de “L” y se encuentra adosado al muro perimetral del tanque cilíndrico.

### **Marco Conceptual**

Tipos de depósito.

Los depósitos de agua pueden ser de diferentes tipos, como depósitos de superficie, depósitos subterráneos o depósitos elevados. También pueden estar fabricados de diferentes materiales, como plástico, metal, fibra de vidrio, concreto, etc.

El diseño de los tanques de agua depende de la función que desempeñan dentro de un proyecto, en el caso particular de estudio, los tanques clarificadores tienen como función reciclar el agua sucia generada de algún proceso para generar agua limpia para ser reutilizada nuevamente. En el tanque se genera

como residuo un lodo de alta concentración de minerales que se trata más fácilmente en otros equipos de filtrado o prensado.

El tanque clarificador primario de este caso de estudio, de conformidad con su posición relativa al terreno, es un depósito superficial, considerando que se construye directamente apoyado sobre la superficie del suelo. Este tipo de depósitos se utiliza cuando el terreno sobre el que se va a desplantar tiene la capacidad necesaria para soportar las cargas impuestas, sin sufrir deformaciones importantes.

#### Geometría de los depósitos.

La configuración teórica más conveniente para un depósito es aquella que para un altura y volumen dados, se tenga un perímetro mínimo, lo cual implica una geometría cilíndrica. Sin embargo, pueden existir otras razones que obliguen a la planta ser rectangular o cuadrada. (Pavón Rodríguez, 2001)

Los depósitos cilíndricos se utilizan generalmente para el tratamiento de aguas residuales, de regulación, tanques de sumergencia, tanques unidireccionales, espesadores de lodos, torres de oscilación, etc. Estos pueden ser de concreto colado, vaciado o colocado en el sitio; pretensados, postensados o de acero. (Pavón Rodríguez, 2001)

La geometría tiene que ver también con el material con el cual se va a construir el depósito, por ejemplo: en los depósitos de mampostería es conveniente adoptar la configuración rectangular, debido a que los depósitos circulares soportan la presión de agua a través de la tensión anular, misma que en los depósitos de concreto reforzado resiste el acero de refuerzo. En los depósitos de mampostería no existe este refuerzo y, por lo tanto, la presión del agua agrietaría las juntas de mortero de la mampostería, que son incapaces de soportar esfuerzos de tensión. Por esta razón, los depósitos de geometría

cilíndrica, por lo general, son de concreto reforzado o presforzado o bien, metálicos. (Pavón Rodríguez, 2001)

Elementos que componen los depósitos.

Los depósitos están compuestos por diversos elementos estructurales, como son:

- Los muros que soportan las acciones consistentes de los empujes de agua y de tierra, así como las fuerzas provocadas por el sismo y el viento.
  - Las cimentaciones que pueden consistir en zapatas corridas bajo los muros o una losa que ejerza una función estructural y que, al mismo tiempo, constituya el piso o fondo de los depósitos.
  - Los pisos o fondos de los depósitos, los cuales pueden ser una losa estructural o una membrana impermeable de concreto sin función estructural.
  - Las cubiertas o tapas de los depósitos
  - Elementos accesorios tales como: escaleras, tuberías, válvulas, etc.
- (Pavón Rodríguez, 2001)

Depósitos de concreto reforzado.

Como describe M. Pavón R. en el Manual para Diseño y construcción de estructuras de concreto para contener líquidos, el material de construcción más utilizado para este tipo de estructuras es el concreto reforzado, ya que cuenta con ventajas sobre otros materiales, como son:

- La impermeabilidad característica del concreto bien dosificado y compactado.
- Requiere un mantenimiento mínimo.
- Posee una gran resistencia al ataque de agentes químicos y al intemperismo.

Los elementos de los depósitos de concreto reforzado tienen la ventaja de poseer capacidad a la compresión, tensión, flexión y cortante y, por otro parte, debido a su rigidez, pueden absorber las deformaciones diferenciales.

Depósitos cilíndricos sin cubierta.

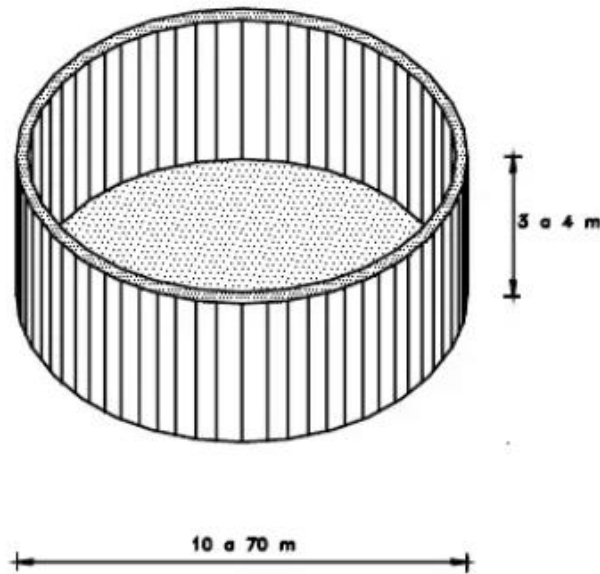


Figura 3. Depósitos cilíndricos de concreto sin cubierta.

Los depósitos cilíndricos sin cubierta que se utilizan en los sistemas de agua potable y tratada pueden ser los espesadores de lodos y los sedimentadores, que son depósitos de gran diámetro con el fondo cónico, contienen rastras y un puente. Sus diámetros varían entre los 5 a 10 y los 70 metros. Su altura normalmente se encuentra entre los 3 y 4 metros. Los muros de los depósitos cilíndricos trabajan principalmente a tensión radial o circunferencial y la principal acción sobre los muros es el empuje hidrostático del agua de adentro hacia afuera, y los empujes exteriores del relleno y del agua freática, si el depósito se encuentra enterrado o semienterrado. El tipo de piso depende de las características de terreno de desplante. (Pavón Rodríguez, 2001)

## Acciones de diseño.

De conformidad con la duración con la cual actúan con una intensidad máxima sobre la estructura, las acciones o cargas de diseño se clasifican en tres categorías: permanentes, variables y accidentales. (Pavón Rodríguez, 2001)

La valuación de las acciones de diseño se efectuará como se especifica a continuación.

- a) Las acciones permanentes son las que actúan en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad varía poco con el tiempo. Las principales acciones que pertenecen a esta categoría, son: la carga muerta; la carga de equipos y tuberías; las deformaciones y los desplazamientos impuestos a la estructura, los cuales varían poco con el tiempo; así como, los debidos al presfuerzo o a movimientos diferenciales permanentes de los apoyos de la estructura.
- b) Las acciones variables son las que actúan sobre la estructura con una intensidad que varía significativamente con el tiempo. Las principales acciones que corresponden a esta categoría, son: la carga viva; el empuje estático del líquido y de tierras; los efectos de los cambios de temperatura; las deformaciones impuestas y los hundimientos diferenciales que tengan una intensidad variable con el tiempo y las acciones debidas al funcionamiento de maquinaria y equipo, incluyendo los efectos dinámicos que puedan presentarse debido a vibraciones, impacto o frenado.
- c) Las acciones accidentales son las que no se deben al funcionamiento normal de la construcción y sólo durante lapsos breves pueden alcanzar intensidades significativas. Pertenecen a esta categoría: las acciones de viento, las acciones sísmicas, explosiones, incendios y otros fenómenos que pueden presentarse en casos extraordinarios. Será necesario tomar precauciones en la estructura, cimentación y en los detalles constructivos, a fin de evitar su comportamiento catastrófico, en caso de que estas acciones llegasen a tener lugar. (Pavón Rodríguez, 2001)

## Marco Teórico

En el diseño de las estructuras para los depósitos de agua potable o tratada, se tomarán en cuenta los efectos de las cargas muertas, las cargas vivas y las provocadas por el sismo y el viento, cuando estos últimos sean significativos.

A continuación, se presenta un resumen de las acciones que se aplican en el diseño estructural del tanque cilíndrico de concreto reforzado de acuerdo con el Manual de Diseño y Construcción de estructuras de concreto para contener líquidos elaborado por Víctor M. Pavón R. para fundación ICA. (Pavón Rodríguez, 2001)

### Acciones permanentes

Las acciones permanentes que deberán tomarse en cuenta para el diseño de depósitos, son las siguientes:

- Cargas muertas: Se considerará el peso de los elementos que constituyen el depósito. Los reglamentos locales de construcción proporcionan valores de los pesos volumétricos de los materiales empleados, para calcular el peso propio de los elementos que son parte del depósito. Las cargas permanentes incluirán los pesos de las tuberías y válvulas de gran diámetro, tomando en cuenta el tamaño, número y el espaciamiento de los tubos, incluyendo las cargas reales y tomando en consideración las ampliaciones planeadas.

### Acciones variables

- La presión interior del agua: La altura del nivel de agua que se considerará en el diseño será hasta el nivel de vertido de excedencias. Para valuar las deformaciones en la estructura y en la cimentación, se

supondrá que el depósito está lleno al 100% en los depósitos para el proceso de potabilización y tratamiento.

- La presión del suelo: Los estudios de Geotecnia establecerán los coeficientes para los empujes de suelos en el sitio donde se vayan a construir los depósitos.
- Carga viva en escaleras y plataformas: En escaleras y plataformas se considerará una carga concentrada móvil de 500 kg. Los barandales se diseñarán para una carga concentrada de 100 kg actuando en cualquier punto del pasamanos y en cualquier dirección.
- Otras acciones variables: Otros valores de las cargas vivas para los cambios de temperatura podrán tomarse de los reglamentos locales y se considerarán las condiciones locales, pero con un diferencial de temperatura no inferior a los 20° C.

#### Acciones accidentales

- Sismo: Se ha comprobado que, durante los sismos, los depósitos que contienen algún fluido pueden fallar y derramar el líquido contenido.

Los reglamentos locales proporcionan información en cuanto a los coeficientes sísmicos y los espectros de diseño aplicables, de conformidad con la sismicidad local y las características del suelo donde se construyan los depósitos.

En caso de que el reglamento local no exista, se recurrirá al Manual de Obras Civiles, tomo "Diseño por Sismo", de la Comisión Federal de Electricidad.

Al proyectar los depósitos para resistir las acciones sísmicas, se deberá tomar en cuenta la masa hidrodinámica del líquido contenido.

Cuando se considere el efecto del sismo simultáneamente con el peso del agua, se supondrá que el depósito está lleno al 100% de su capacidad.

La presión hidrodinámica deberá incluir las presiones impulsivas, así como las convectivas.

Además, el diseño sísmico de los depósitos deberá incluir los efectos sísmicos de las presiones del suelo exterior al depósito y las cargas muertas de la estructura.

(Pavón Rodríguez, 2001)

- Las presiones impulsivas y las convectivas

Como resultado de un sismo, el contenido de un depósito para el almacenamiento de líquidos, ubicado sobre el terreno, experimenta una oscilación a causa del movimiento del terreno. El fluido en las proximidades de los muros se acelera hacia un lado y otro, esencialmente al unísono con dichos muros, en tanto que el fluido cercano a la parte central del depósito no se acelera, sino que tenderá a oscilar con el periodo natural del chapoteo u oleaje del líquido. (Pavón Rodríguez, 2001)

Las presiones del fluido actuando sobre los muros del depósito reflejan estas dos acciones, de las cuales, una de las componentes varía con el tiempo en forma directamente proporcional a las aceleraciones del terreno, en tanto que la otra, varía en el tiempo con el chapoteo u oleaje del líquido. (Pavón Rodríguez, 2001)

Para su estudio, las presiones en el líquido generadas por el movimiento horizontal del terreno se han dividido en aquellas asociadas con la inercia del líquido que se acelera con el terreno (presiones impulsivas), además de las que

están asociadas con el líquido que oscila con el movimiento de chapoteo (presiones convectivas). Estas presiones dinámicas actúan, tanto en las paredes como en el fondo del depósito. (Pavón Rodríguez, 2001)

Además de provocar fuerzas y momentos en las paredes del depósito, unas y otras presiones se combinan con las del fondo para dar lugar a un momento neto de volteo del depósito en conjunto.

A continuación, se proporciona una discusión general de la respuesta dinámica de los depósitos que almacenan líquidos, con el fin de contar con un antecedente para la utilización de los resultados teóricos apropiados.

Las fuerzas impulsivas asociadas a las fuerzas de inercia en el líquido, las cuales, como ya se ha dicho, se relacionan en el tiempo directamente con las aceleraciones del terreno, son principalmente de una alta frecuencia, en el rango de 2 a 5 ciclos por segundo (periodo entre 0.5 y 0.2 seg.). Por otro lado, las presiones convectivas se relacionan en el tiempo con la respuesta oscilatoria (el oleaje o chapoteo) del líquido, generada por las aceleraciones del temblor y fundamentalmente son de una baja frecuencia, cercana a la frecuencia natural del líquido al chapotear. Probablemente no ocurren al mismo tiempo la aceleración máxima del terreno y el movimiento máximo del movimiento de chapoteo del líquido; sin embargo, es posible que una combinación de las presiones impulsivas y convectivas en un instante dado, excedan a las presiones impulsivas o convectivas consideradas separadamente. Por consiguiente, debe emplearse un juicio ingenieril al seleccionar la condición máxima de carga dinámica para la cual se diseñe el depósito. (Pavón Rodríguez, 2001)

Es muy probable que las aceleraciones verticales del terreno no tengan una significación importante. La magnitud del momento de volteo resultante de la fuerza cortante horizontal y la amplitud del movimiento de chapoteo, pueden determinarse a partir del espectro de respuesta de velocidades para el temblor

que se considere. El aspecto significativo lo constituye el momento de volteo provocado por las presiones en las paredes del depósito. (Pavón Rodríguez, 2001)

### Fuerzas hidrodinámicas

Las ecuaciones propuestas por Housner, las cuales pueden encontrarse en varias publicaciones y para este caso en particular, el capítulo de Diseño por Sismo, del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad y el ACI 350.3-06, consideran que, para el diseño sísmico de tanques y depósitos es necesario tomar en cuenta los efectos hidrodinámicos del líquido almacenado, adicionalmente a los efectos de inercia de la masa del conjunto. Las paredes y el fondo de un recipiente necesitan diseñarse ante presiones hidrodinámicas generadas por movimientos impulsivos y convectivos del fluido. Las presiones impulsivas son debidas al impacto del líquido con el recipiente en movimiento, en tanto que las presiones convectivas se deben a las oscilaciones del fluido. (Pavón Rodríguez, 2001)

Así mismo, el capítulo de Diseño por Sismo, del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en la sección 3.8, en la tabla 8.1, presenta los factores de comportamiento sísmico que deberán utilizarse para el diseño de tanques y depósitos. Además, en el punto 3.8.3, presenta el factor de reducción por sobre resistencia.

Del mismo manual obtenemos también que, cuando un depósito es sometido a excitación se generan dos tipos de sollicitaciones: presiones hidrodinámicas sobre las paredes y el fondo y fuerzas de inercia en la masa del depósito. A su vez, el movimiento del líquido origina dos tipos de presiones hidrodinámicas: las presiones convectivas asociadas a los modos de vibración y las impulsivas asociadas al modo de cuerpo rígido. Los cambios en las ordenadas espectrales por amortiguamientos diferentes que 5% se tomarán en cuenta tanto

en la determinación de las presiones impulsivas como convectivas. Los efectos de interacción suelo–estructura sólo se tomarán en cuenta en la determinación de las presiones impulsivas.

En un depósito con paredes y fondo supuestos rígidos, las solicitaciones sísmicas se podrán determinar con base en el modelo equivalente que se muestra en la figura 4. En esta analogía de masas virtuales adheridas, el fluido se sustituye por las masas  $M_0$  y  $M_1$  colocadas a las alturas  $H_0$  y  $H_1$ , respectivamente, desde el fondo del depósito.  $M_0$  se supone unida rígidamente y con ella se simulan los efectos de las presiones impulsivas, mientras que  $M_1$  se supone unida mediante un resorte de rigidez  $K_1$  para simular los efectos de las presiones convectivas debidas exclusivamente al modo fundamental de vibrar del líquido. (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

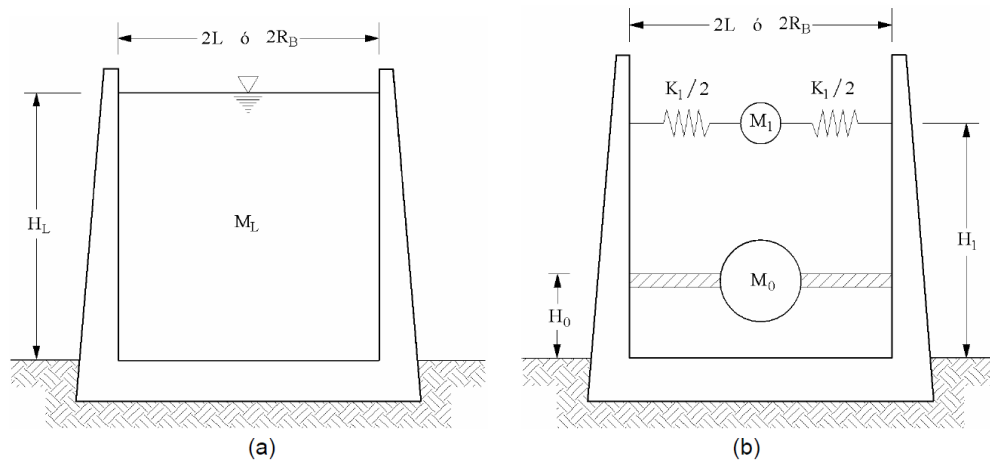


Figura 4. Analogía de las masas virtuales adheridas para un depósito superficial. a) Modelo original, b) Modelo equivalente.

Para depósitos circulares y rectangulares, los parámetros del modelo equivalente se pueden determinar de manera aproximada de acuerdo con las ecuaciones siguientes (Housner, 1963): (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Depósitos circulares:

$$M_0 = \frac{\tanh[1.73(R_B / H_L)]}{1.73(R_B / H_L)} M_L \quad (8.1)$$

$$M_1 = \frac{\tanh[1.84(H_L / R_B)]}{2.17(H_L / R_B)} M_L \quad (8.2)$$

$$K_1 = \frac{4.75gM_1^2H_L}{M_L R_B^2} \quad (8.3)$$

Si no es de interés incluir en el cálculo el momento hidrodinámico sobre el fondo del depósito, entonces: (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Cuando  $H_L / R_B \leq 1.50$ :

$$H_0 = 0.375 H_L \quad (8.4)$$

Cuando  $H_L / R_B > 1.50$ :

$$H_0 = [0.50 - 0.1875(R_B / H_L)] H_L \quad (8.5)$$

Para cualquier relación  $H_L / R_B$ :

$$H_1 = \left\{ 1 - \frac{\cosh[1.84(H_L / R_B)] - 1}{1.84(H_L / R_B) \sinh[1.84(H_L / R_B)]} \right\} H_L \quad (8.6)$$

Si interesa incluir en el cálculo el momento hidrodinámico sobre el fondo del depósito, entonces: (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Cuando  $H_L / R_B \leq 2.67$ :

$$H_0 = \left\{ \frac{1.73(R_B / H_L)}{2 \tanh[1.73(R_B / H_L)]} - \frac{1}{8} \right\} H_L \quad (8.7)$$

Cuando  $H_L / R_B > 2.67$ :

$$H_0 = 0.45 H_L \quad (8.8)$$

Para cualquier relación  $H_L / R_B$ :

$$H_1 = \left\{ 1 - \frac{\cosh[1.84(H_L / R_B)] - 2.01}{1.84(H_L / R_B) \sinh[1.84(H_L / R_B)]} \right\} H_L \quad (8.9)$$

Donde, en las ecuaciones anteriores:

- g es la aceleración de la gravedad
- R<sub>B</sub> es el radio de la base del depósito
- 2L es la dimensión del depósito en la dirección del sismo
- H<sub>L</sub> es el tirante del líquido almacenado
- M<sub>L</sub> es la masa del líquido almacenado

Para llevar a cabo un análisis de esfuerzos detallado de las paredes y el fondo de un depósito es necesario conocer tanto la distribución como la magnitud de las presiones hidrodinámicas locales. Éstas se obtendrán mediante la combinación de las componentes de presiones impulsivas y convectivas, que se valúan en la forma que se indica a continuación. (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Depósitos circulares.

Las presiones impulsivas sobre las paredes se determinan mediante:

$$p_0 = C_0(z) \frac{a(\tilde{T}_0, \beta)}{Q'(\tilde{T}_0)R} \gamma_L R_B \cos \theta_c \quad (8.19)$$

A su vez, las presiones convectivas se valuarán mediante la siguiente ecuación:

$$p_1 = C_1(z) \frac{a(T_1, \beta)}{Q'(T_1)R} \gamma_L R_B \cos \theta_c \quad (8.20)$$

## **Capítulo II.- Estructuración y sistemas estructurales**

Como ya se ha descrito anteriormente, la estructura del tanque clarificador primario se conforma por un cilindro circular de 12.00 m de diámetro con muros de 30 cm de espesor y altura de 2.80 m, la losa de fondo tiene forma de doble cono, el primero tiene un diámetro superior de 12.00 m y diámetro inferior de 1.70 m y baja 0.85 m hasta la cota +2,379.35 m.s.n.m. El segundo cono tiene un diámetro superior de 1.70 m y un diámetro inferior de 1.20 m bajando 0.75 m hasta la cota + 2,378.60 m.s.n.m.

El canal perimetral tiene una sección en forma de “L” con un ancho de 35 cm y una altura de 35 cm con un chaflán en el muro a 45°, el muro y la losa del canal serán de concreto reforzado de 15 cm de espesor. Adicionalmente se colocará un relleno para dar pendiente al canal.

La columna interior tendrá sección circular hueca de 80 cm de diámetro exterior y 30 cm de diámetro interior. Se construirá en concreto reforzado con cuatro ventanas de 20x40 cm en la parte superior y una losa maciza de 25 cm sobre las ventanas para cargar la plataforma mecánica.

Todos los muros principales del tanque serán de 30 cm de espesor y se construirán integralmente con la losa de cimentación, la cual se construirá de 30 cm de espesor sobre la estructura de terracerías propuesta por el estudio de mecánica de suelos. De la misma manera, se reforzará la unión entre muros y losa con un chaflán sanitario de 25 cm.

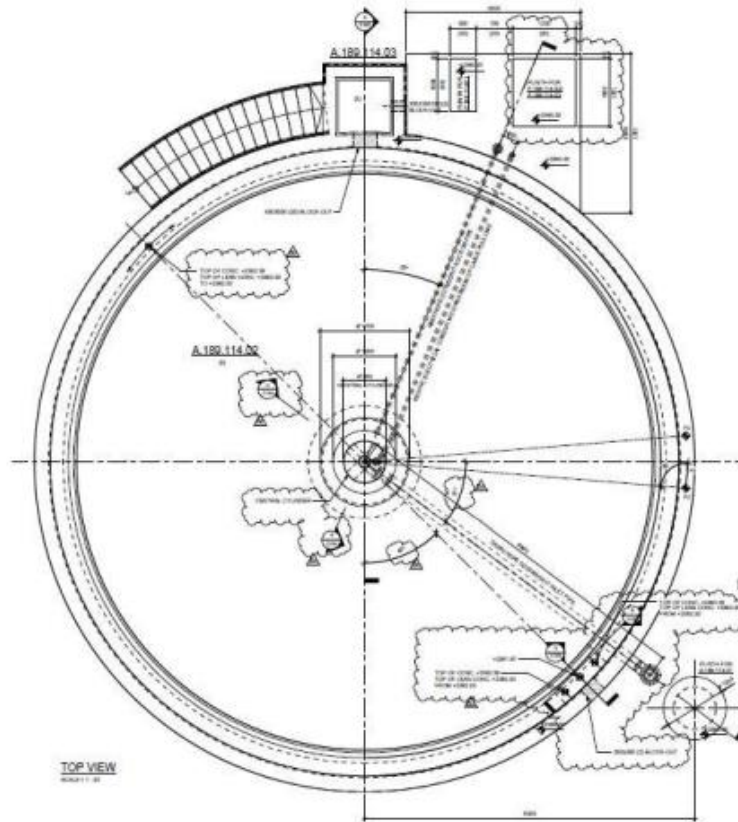


Figura 5. Planta superior de tanque.

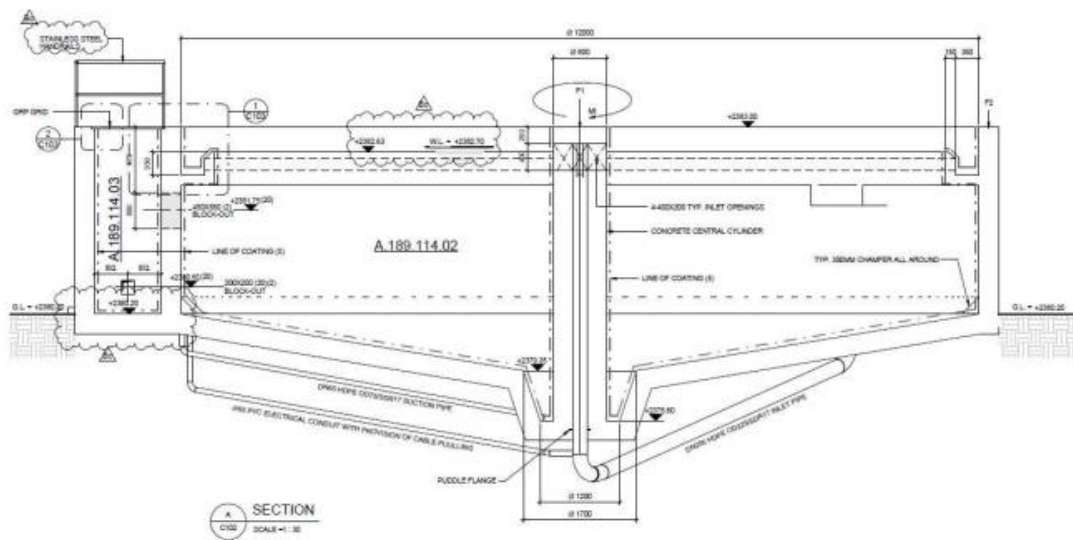


Figura 6. Sección transversal del tanque

## **Criterios Generales**

El análisis estructural del tanque se realizó considerando las propiedades de los materiales propuestos y las secciones de los elementos que aportan rigidez al conjunto.

Las cargas se consideraron en apego a las NTC-CDMX-2017, las recomendaciones del ACI 350.6 y del MDOC-2015 para tanques superficiales. Las cargas de diseño están apegadas al tipo y dimensiones de los materiales, así como a la reglamentación correspondiente.

Se consideraron las propiedades del terreno existente según las indicaciones del estudio de mecánica de suelos. (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

El análisis sísmico se realizó siguiendo las recomendaciones establecidas en las normas técnicas de diseño por sismo NTC-CDMX-2017, el Manual de Obras Civiles (MDOC-2015) y el ACI 350.3.

## **Métodos de análisis y modelación**

El procedimiento del modelado consiste en el empleo de un programa de cómputo especializado que permita realizar la reproducción tridimensional de la estructura considerando cada uno de los elementos que la componen. Cada elemento es definido de acuerdo con la respuesta esperada dentro del análisis estructural considerando en el proceso las propiedades geométricas de las secciones, materiales y su comportamiento mecánico global y particular.

Los elementos definidos para el tipo de estructura que se va a construir corresponden a elementos planos definidos por 4 puntos, este tipo de elementos permiten idealizar matemáticamente el comportamiento de muros de concreto y

losas. El programa de cálculo permite considerar los diferentes grados de libertad en los bordes de elementos planos logrando transferir a través de ellos los esfuerzos provocados por cargas externas. Para el caso de estudio se han considerado que los elementos transmiten esfuerzos tanto en el plano como fuera de él.

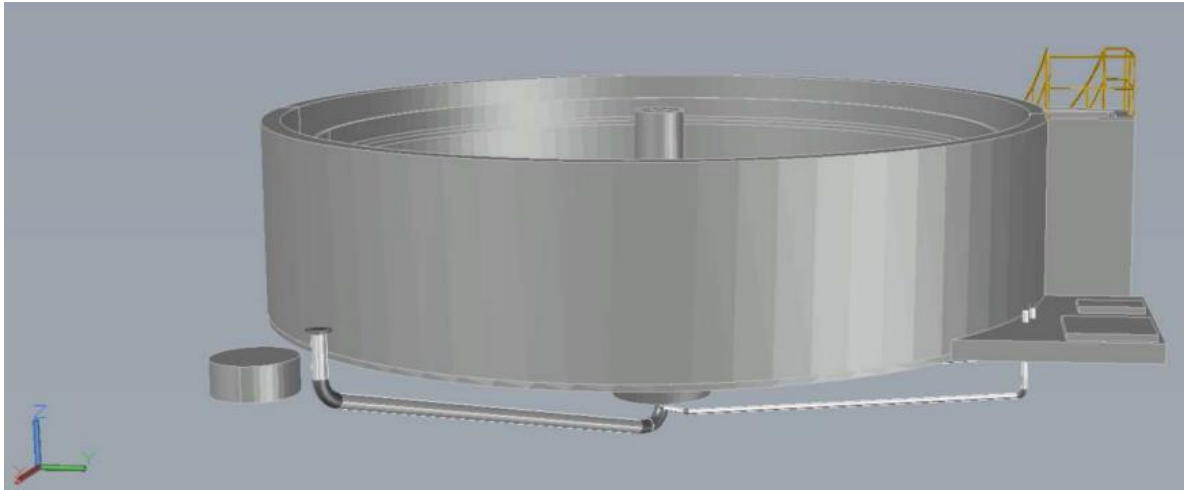


Figura 7. Perspectiva de tanque clarificador primario.

### **Capítulo III.- Calidad y propiedades de los materiales estructurales y Caracterización de las propiedades del suelo**

Para el diseño estructural del tanque clarificador primario se tomaron en cuenta los requerimientos especificados en los alcances del proyecto, que en el punto 2.0 contiene las Especificaciones de Materiales y se describen a continuación:

ESPECIFICACIONES DE MATERIALES (Ingeniería y Construcciones Ambientales S.A. de C.V., 2022)

#### CONCRETO

a) Tanques de concreto	$f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ mínimo.
b) Pilas de cimentación	$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ mínimo.
c) Cabezales de pilas	$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ mínimo.
d) Edificios, escaleras de concreto	$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ mínimo.
e) Bases para equipo	$f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ mínimo.
f) Plantillas	$f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ mínimo.

Los materiales para la construcción de las diferentes estructuras deberán ajustarse a lo siguiente:

El concreto para tanques y estructuras expuestas a agua, lodo o químicos; también deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

- Aditivo impermeabilizante integral.
- Revenimiento: 18 cm.
- Tamaño de agregado máximo:  $\frac{3}{4}$ "
- Relación agua-cemento: 0.4.

El concreto para edificios y otras estructuras deberá cumplir las siguientes especificaciones:

- Revenimiento: 14 cm.
- Tamaño de agregado máximo: ¾".

#### ACERO DE REFUERZO

- a) Acero de Refuerzo ASTM A 615 Grado 60,  $F_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ , para varillas corrugadas del #3 y mayores.
- b) Malla electrosoldada ASTM A 185,  $F_y = 5,000 \text{ kg/cm}^2$ .

#### Concreto Reforzado

Se consideró un concreto reforzado, clase 1, de peso normal con las siguientes características conforme al reglamento de construcciones para la ciudad de México.

- $f'_c$  Mínimo  $300 \text{ kg/cm}^2$  para tanques, escalera y cimentaciones.

$$f'_c = 0.85 \times f_c = 255 \text{ kg/cm}^2.$$

*Ecuación 3.5.e de las NTC-CDMX-C-2017.*

$$\left[ \frac{f'_c}{f_y} \frac{6000 \beta_1}{f_y + 6000} \right]$$

*Ecuación 5.1.1 de las NTC-CDMX-C-*

*2017.*

Porcentaje balanceado.  $P_b = 0.0298$ .

$$P_{m\acute{a}x} = 0.9 P_b$$

*Sección 7.2.3 de las NTC-CDMX-C-*

*2017.*

$$P_{m\acute{a}x} = 0.9 p_b = 0.0269.$$

$$P_{m\acute{i}n} = \frac{0.70 \sqrt{f'_c}}{f_y}$$

*Ecuación 5.1.18 de las NTC-CDMX-C-*

*2017.*

$$P_{m\acute{i}n} = 0.0029$$

Módulo de elasticidad del concreto:

$$E = 11,000 \sqrt{f'c}$$

*Sección 2.1.4 de las NTC-CDMX-C-*

*2017.*

### **Acero de Refuerzo**

Se consideró un acero de refuerzo ASTM A 615 Grado 60,  $F_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ , para varillas corrugadas del #3 y mayores; y ASTM A 185,  $F_y = 5,000 \text{ kg/cm}^2$  para malla electrosoldada, conforme al reglamento de construcciones para la ciudad de México.

### **Caracterización de las propiedades del suelo**

Para determinar las propiedades mecánicas del suelo donde se desplantará el tanque se recurrió a la información presentada en el estudio “Estudio de Mecánica de Suelos para el proyecto de rehabilitación de la PTAR en la planta de Malta Grajales” realizado por DICIMISA, (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022) donde se consideró que el tanque correspondía a una relación de  $B/L=1$  análoga a un tanque cuadrado.

El modelo geotécnico empleado para realizar los análisis de las estructuras que conformarán el proyecto de rehabilitación de la PTAR en la planta de Malta Grajales, Puebla, corresponde al que se indica en la siguiente tabla: (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

Unidad geotécnica	De [m]	A [m]	$N_{SPT}$	%F	Parámetros totales		$\nu$	E [MPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	SUCS
					c [kPa]	$\phi$ [°]				
UE-1	0.0	1.8	26	55	120	0	0.30	13.2	17.0	CL-ML
UE-2	1.8	5.4	9	67	23	25	0.35	13.4	16.0	CL, ML
UE-3	5.4	13.2	22	33	0	37	0.30	27.9	17.5	SM
UE-4	13.2	20.4	44	36	0	40	0.35	75.9	18.0	SM

$N_{SPT}$ : número de golpes en la prueba estándar       $\phi$ : ángulo de fricción en parámetros totales  
E: módulo de elasticidad estático      c: cohesión en parámetros totales  
 $\nu$ : relación de Poisson      %F: porcentaje de finos  
\* NAF= No detectado       $\gamma$ : peso volumétrico  
\*\* El espesor de la capa vegetal es del orden de 20 centímetros.

Figura 8. Extracto del estudio de Mecánica de suelos, Tabla de modelo geotécnico propuesto para la PTAR en planta de malta Grajales, Puebla. (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

La capacidad de carga en condiciones de falla para losas se presenta en la tabla Capacidad de carga para losas cuadradas y rectangulares en condiciones de falla, dicha capacidad de carga depende del ancho de la losa, de su geometría (relación L/B) y de su profundidad de desplante. Para losas desplantadas a 0.5 m de profundidad, la capacidad de carga en condiciones de falla varía desde 212 hasta 323 kPa (21.2 hasta 32.3 t/m<sup>2</sup>). (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

Ancho de losa [B]	Profundidad de desplante [m]	Capacidad de carga en condiciones de falla [kPa]				
		Cuadrada	L/B = 1.5	L/B = 2	L/B = 3	L/B = 5
3	0.50	323	289	273	256	243
6		299	269	254	238	226
9		290	261	246	231	220
12		286	257	242	228	216
15		283	254	240	226	214
18		281	252	238	224	213
21		279	251	237	223	212

Figura 9. Extracto del estudio de Mecánica de suelos: tabla capacidad de carga para losas (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

La capacidad de carga admisible restringida por asentamientos permisibles para losas, se presenta en la figura siguiente, dicha capacidad de carga depende del ancho de losa, de su geometría (relación L/B) y de su profundidad de desplante. Para losas desplantadas a 0.5 m de profundidad, la capacidad de carga restringida por asentamientos varía desde 84 hasta 267 kPa (8.4 hasta 26.7 t/m<sup>2</sup>). (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

Ancho de losa [B]	Profundidad de desplante [m]	Capacidad de carga restringida por asentamientos [kPa]				
		Cuadrada	L/B = 1.5	L/B = 2	L/B = 3	L/B = 5
3	0.50	267	231	213	196	183
6		161	144	136	129	125
9		127	116	111	107	105
12		110	102	99	97	96
15		100	94	92	90	90
18		94	89	88	87	86
21		90	86	85	84	84

Figura 10. Extracto del estudio de Mecánica de suelos: Tabla de capacidad de carga admisible restringida por asentamientos permisible (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

Los módulos de reacción verticales se presentan en la siguiente figura, estos módulos varían desde 1673 hasta 5330 kPa/m y dependen tanto de la geometría de las losas como de su profundidad de desplante. (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

Ancho de losa [B]	Profundidad de desplante [m]	Módulos de reacción vertical [kPa/m]				
		Cuadrada	L/B = 1.5	L/B = 2	L/B = 3	L/B = 5
3	0.50	5330	4619	4264	3921	3670
6		3222	2885	2727	2586	2501
9		2538	2323	2227	2148	2109
12		2204	2049	1983	1935	1915
15		2008	1890	1843	1809	1798
18		1882	1789	1753	1733	1723
21		1795	1719	1694	1679	1673

Figura 11. Extracto del estudio de Mecánica de suelos: tabla módulos de reacción verticales para losas cuadradas y rectangulares. (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

## Capítulo IV.- Análisis de Cargas Reglamentarias

Se realizó un análisis de cargas para este tipo de estructura conforme a los Criterios y Acciones Para el Diseño Estructural de las Edificaciones de las NTC de la Ciudad de México vigente.

### Empuje del suelo

Se consideró el empuje del suelo como en equilibrio estático en reposo debido a las características mecánicas del suelo y geométricas del registro. Este empuje se calcula considerando una masa homogénea de material térreo apoyada en una pared rígida, sin fricción en la interfaz entre estos, sujeta a un esfuerzo vertical efectivo  $\sigma'_o$  y a un esfuerzo horizontal efectivo  $\sigma'_h$  como se muestra en la figura 12.

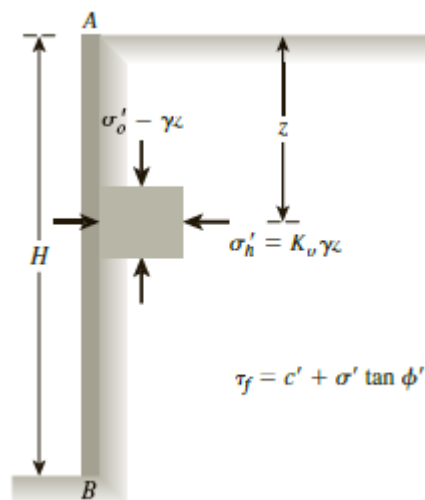


Figura 12. Modelo analítico del estado de empuje en reposo.

El esfuerzo horizontal efectivo a una profundidad  $z$  se relaciona con el esfuerzo vertical efectivo a esa profundidad con la siguiente ecuación: (Braja M. Das, 2016)

$$K = K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o}$$

El coeficiente de empuje en reposo se calcula con la siguiente expresión (jaky, 1944): (Braja M. Das, 2016)

$$K_o = 1 - \sin \phi'$$

Sin embargo, esta expresión suele dar valores aceptables para material granular grueso, en el caso de estudio se considerará que entre los cortes de las excavaciones y las paredes de los registros se colocará un relleno de arena compactada, para este caso es más adecuado utilizar la siguiente ecuación como corrección (sherif, Fang, 1984): (Braja M. Das, 2016)

$$K_o = (1 - \sin \phi) + \left[ \frac{\gamma_d}{\gamma_{d(\min)}} - 1 \right] 5.5$$

Por lo que se han considerado los siguientes valores:

**EMPUJE LATERAL DE TIERRAS: ESTADO EN REPOSO**

$\gamma =$	16 kN/m <sup>3</sup>	peso específico del terreno
$c' =$	23 kN/m <sup>2</sup>	Cohesión del suelo
$\phi' =$	25 °	angulo de fricción interna del suelo

**Carga muerta**

Se consideraron todas aquellas cargas que vayan a actúan en la estructura de manera constante sin tener variaciones importantes en el tiempo de operación, incluyéndose así el peso propio de la estructura, equipamiento e instalaciones y los empujes de suelo y de líquidos contenidos por los tanques.

**Pesos volumétricos de los materiales:**

El peso propio de los elementos estructurales y las cargas muertas provenientes de otros elementos constructivos fueron calculados a partir de los siguientes pesos volumétricos:

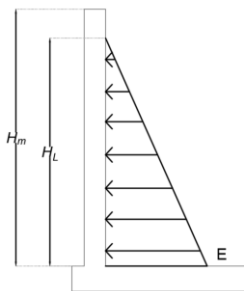
Concreto fresco	2,200 kg/m <sup>3</sup>
Concreto armado (agregados de peso normal), clase 1	2,400 kg/m <sup>3</sup>
Densidad de agua residual contenida	1,050 kg/m <sup>3</sup>

## Empuje de fluidos

### Peso del fluido en la losa de fondo

$$W_{fluido} = \gamma_w H_L = 1,050 \frac{kg}{m^3} * 4.10m = 4,305 \frac{kg}{m^2}$$

### Presión de empuje lateral del fluido en los muros



$$W_{fluido} = \gamma_w H_L = 1,050 \frac{kg}{m^3} * 4.10m = 4,305 \frac{kg}{m^2}$$

## Carga Viva

Para la carga viva se tomó en cuenta todas las acciones que puedan obrar en la estructura con una intensidad que varía significativamente con el tiempo.

Carga viva en pasillos:

$$CV_{max} = 500 \text{ kg/m}^2$$

$$CV_{inst} = 150 \text{ kg/m}^2$$

$$CV_{med} = 40 \text{ kg/m}^2$$

## Capítulo V. - Parámetros de análisis sísmico

### Caracterización del sitio

El estado de Puebla se encuentra en una zona sísmica de poca a frecuente actividad, ya que se han alcanzado a registrar movimientos sísmicos de importancia para el desarrollo de investigación en este territorio, debido a esto, la Comisión Federal de Electricidad, mediante el Instituto de Investigaciones Eléctricas, ha desarrollado la zonificación sísmica del territorio mexicano para poder clasificar y estimar las características de los movimientos tectónicos que puedan ocurrir y llegaran a afectar a las obras de infraestructura y edificaciones del país.

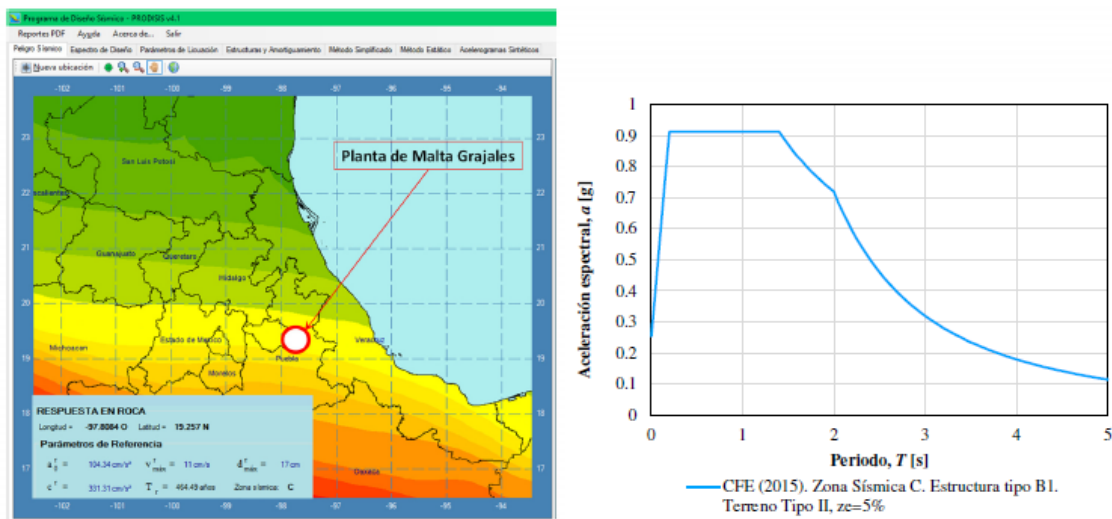


Figura 13. Parámetros sísmicos para formar el espectro transparente regional. (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

### Grupo de la estructura

El destino de las construcciones debe tomarse como referencia para determinar su importancia, y con ello, la protección o seguridad que se les provea. Este criterio se consigna en la tabla 1.1 del Manual de Diseño de Obras Civiles. En

el diseño sísmico de estas estructuras se seguirán criterios especiales acordes con el estado del conocimiento. (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Tabla 1.1 Clasificación de las estructuras según su destino.

GRUPO	DESCRIPCIÓN
A+	<p>Las estructuras de gran importancia, o del Grupo A+, son aquellas en que se requiere un grado de seguridad extrema, ya que su falla causaría cientos o miles de víctimas, y/o graves pérdidas y daños económicos, culturales, ecológicos o sociales.</p> <p>Ejemplos de estructuras de importancia extrema son las grandes presas y las plantas nucleares.</p>
A	<p>Estructuras en que se requiere un grado de seguridad alto. Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas, daños ecológicos o culturales, científicos o tecnológicos de magnitud intensa o excepcionalmente alta, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables, así como construcciones cuyo funcionamiento sea esencial después de un sismo.</p> <p>Ejemplo de ellas son las <b>estructuras fundamentales</b> (principales) de: Centrales de generación, transmisión y distribución eléctrica, instalaciones industriales de proceso, almacenamiento y distribución de hidrocarburos, sistemas de transporte y telecomunicaciones, sistemas de almacenamiento, conducción, distribución y tratamiento de aguas, escuelas, centros de investigación, estadios, hoteles, sistemas de emergencia como estaciones de bomberos u hospitales, etc.</p>
B	<p>Estructuras en las que se requiere un grado de seguridad convencional. Construcciones cuya falla estructural ocasionaría la pérdida de un número reducido de vidas, pérdidas económicas moderadas o pondría en peligro otras construcciones de este grupo y/o daños a las del Grupo A+ y A moderados.</p> <p>Ejemplo de ellas son las naves industriales, locales comerciales, estructuras comunes destinadas a vivienda u oficinas, salas de espectáculos, depósitos y estructuras urbanas o industriales no incluidas en los Grupos A+ y A, así como muros de retención, bodegas ordinarias y bardas.</p>

Figura 14. tabla 1.1. Clasificación de las estructuras según su destino del Manual de Diseño de Obras Civiles (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Por la importancia de la construcción, se clasificó como del **Grupo B1** según el Manual de obras civiles (MDOC-2015) o con un factor de importancia 1, como lo especifica el ACI 350.3, con objeto de tener un comportamiento y resistencia adecuados, evitando daños significativos o un posible colapso y que además evite reparaciones costosas en caso temblores severos.

### Factor de comportamiento sísmico

De acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE, los tanques y depósitos deberán diseñarse utilizando los factores de comportamiento sísmico Q dados en la tabla 8.1 (Harou,1984) de dicho manual, la cual se muestra a continuación:

Tabla 8.1. Factores de comportamiento sísmico.

Tipo	Q
Depósitos de acero	
No anclados, diseñados considerando levantamiento de la base (pueden desarrollar pandeo en la pared con configuración de pata de elefante bajo sobrecarga sísmica)	2 <sup>1</sup>
No anclados, diseñados considerando levantamiento de la base y modo de pandeo elástico de la pared (configuración en diamante)	1.25
Anclados, con pernos de anclaje no dúctiles	1.25
Anclados, con pernos de anclaje dúctiles	3 <sup>2</sup>
Apoyados sobre pedestales dúctiles	3 <sup>2</sup>
Depósitos de concreto	
Concreto reforzado	1.25
Concreto presforzado	1
Tanques elevados	El que corresponda a la estructura de soporte <sup>2,3</sup>

Figura 15. tabla 8.1. Factores de comportamiento sísmico del Manual de Diseño de Obras Civiles (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

A consideración de este proyecto, siendo un depósito de Concreto reforzado, el sistema estructural adoptado y la ductilidad requerida, se empleó

un factor de comportamiento sísmico **Q= 1.25** para la reducción del espectro de diseño.

### **Factor de redundancia**

En el diseño sísmico de tanques, el valor del factor de reducción por sobrerresistencia,  $R$ , dependerá de las características de la estructura de soporte, considerando los criterios definidos para el caso de estructuras de edificios. Tratándose de depósitos, se utilizará un factor de reducción por sobrerresistencia igual a 1.25, a menos que se pueda justificar el uso de un valor mayor para este factor. (Comisión Federal de Electricidad, 2015)

Para considerar la influencia de la hiperestaticidad de la estructura en el análisis sísmico se considera un factor que puede amplificar o reducir el espectro de diseño, para este caso, se ha considerado un factor de redundancia igual a **1.25** según los criterios del inciso 3.8.3. del Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE 2015.

### **Espectro de diseño**

El espectro de diseño es la base para la determinación de las fuerzas sísmicas que actúan sobre la estructura. Según el Manual de Obras Civiles, las ordenadas espectrales en función del periodo natural de interés,  $T_e$ , están dadas por las siguientes expresiones:

$$S_a(T_e, \beta) = \begin{cases} a_0 + [c \beta(T_e, \zeta_e) - a_0] \frac{T_e}{T_a} & \text{si } T_e < T_a \\ c \beta(T_e, \zeta_e) & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ c \beta(T_e, \zeta_e) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r & \text{si } T_b \leq T_e < T_c \\ c \beta(T_e, \zeta_e) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r \rho_c(T_e) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (1.8)$$

$$\rho_c(T_e) = k + (1 - k) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 \quad (1.9)$$

*Dónde:*

$a_0$  ; coeficiente de aceleración del terreno

$c$  ; coeficiente sísmico

$T_e$  ; periodo fundamental de la estructura

$T_a, T_b, T_c$  ; periodos característicos del espectro

$r$  ; exponente que controla la caída del espectro

$\beta(T_e, \zeta_e)$  ; factor de amortiguamiento.

$\rho_c(T_e)$  ; factor que controla la variación del espectro en la rama descendente

(Comisión Federal de Electricidad, 2015)

El espectro de diseño se obtiene a partir de los parámetros sísmicos y nos determinan las magnitudes de las aceleraciones sísmicas máximas que serán aplicadas a la estructura de acuerdo con sus propiedades dinámicas de masa y rigidez.

Para considerar el efecto del amortiguamiento en el movimiento de las masas convectivas e impulsivas del tanque, el manual de obras civiles en el inciso 3.8.5 de los comentarios indica que el movimiento del líquido correspondiente a la masa convectiva disipa una cantidad mínima de energía debiéndose considerar un nivel de amortiguamiento menor para calcular las aceleraciones

asociadas al modo de vibrar de dicha masa, este factor se debe considerar del orden del 1%. De la misma manera el ACI 350.3 indica que dicho nivel de amortiguamiento debe considerarse del 0.5% del amortiguamiento crítico. Para este estudio se consideró el criterio del ACI 350.3.

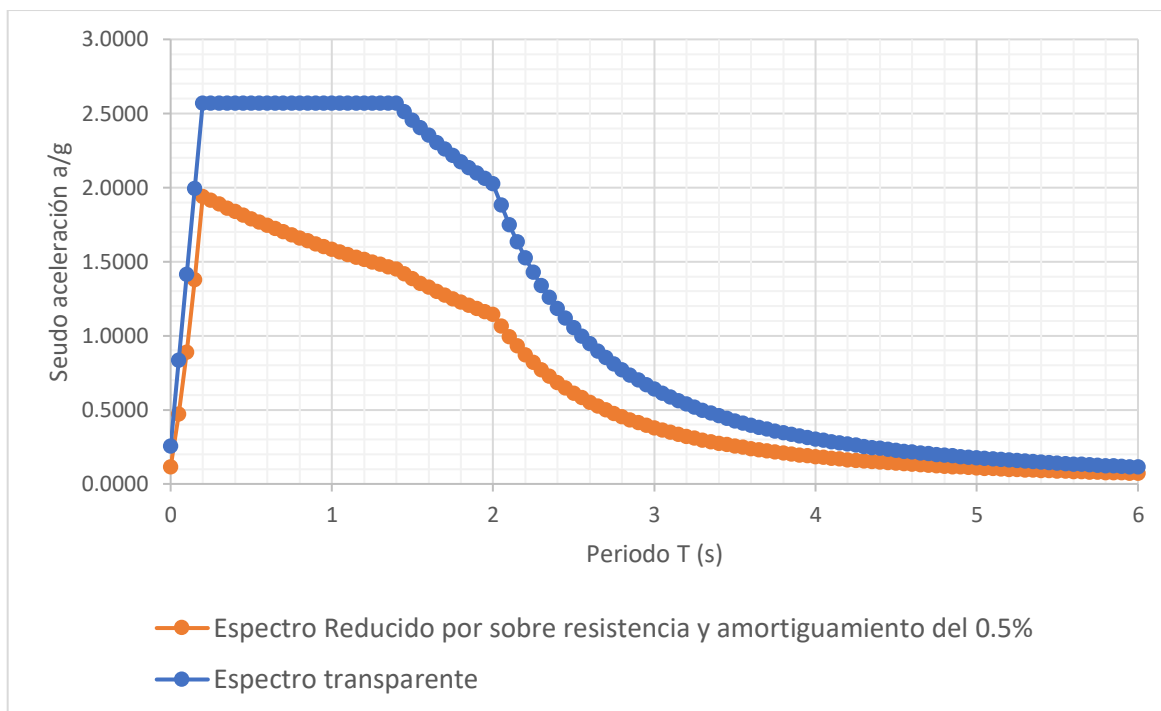


Figura 16. Espectro de diseño reducido por ductilidad  $Q=1.25$ , sobrerresistencia  $R_0=1.25$  y amortiguamiento crítico del 0.5%, para estructuras del Grupo B, según MDOC-CFE-2015.

<b>Parámetros Sísmicos</b>	
<b>Grupo de la Estructura</b>	<b>B</b>
<b>Zona Sísmica</b>	<b>C</b>
<b>Terreno Tipo</b>	<b>II</b>
<b>Aceleración del terreno <math>a_0^r</math></b>	<b>104.340</b>
<b>Aceleración del terreno <math>a_0</math></b>	<b>249.057</b>
<b>Coefficiente sísmico C</b>	<b>894.445</b>
<b><math>T_a</math> (s)</b>	<b>0.200</b>
<b><math>T_b</math> (s)</b>	<b>1.400</b>
<b><math>T_c</math> (s)</b>	<b>2.000</b>
<b>k</b>	<b>1.000</b>
<b>r</b>	<b>0.667</b>
<b>Factor de amortiguamiento crítico <math>\zeta_e</math></b>	<b>1%</b>
<b>Factor de comportamiento Sísmico Q</b>	<b>1.250</b>
<b>Factor de corrección por irregularidad K</b>	<b>1.000</b>
<b>Factor de corrección por sobrerresistencia <math>R_0</math></b>	<b>1.250</b>
<b>Factor de corrección por Redundancia <math>\rho</math></b>	<b>1.000</b>

Figura 17. parámetros Sísmicos; masa convectiva.

Para calcular las aceleraciones correspondientes al modo de vibrar de la masa impulsiva se consideró un amortiguamiento del 5% congruente con ambos códigos de diseño, además de las propiedades dinámicas del tanque y la masa impulsiva moviéndose de manera rígida con el tanque.

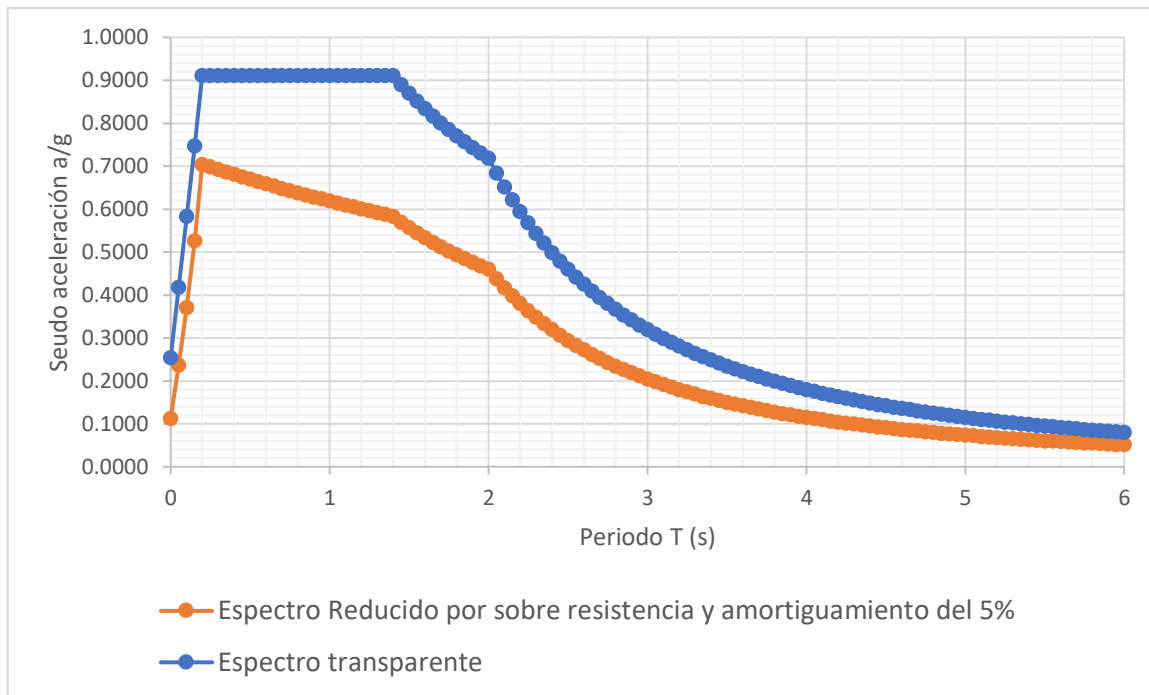


Figura 18. Espectro de diseño reducido por ductilidad  $Q=1.25$ , sobrerresistencia  $R_0=1.25$  y amortiguamiento crítico del 5%, para estructuras del Grupo B, según MDOC-CFE-2015.

<b>Parámetros Sísmicos</b>	
<b>Grupo de la Estructura</b>	<b>B</b>
<b>Zona Sísmica</b>	<b>C</b>
<b>Terreno Tipo</b>	<b>II</b>
<b>Aceleración del terreno <math>a_0^r</math></b>	<b>104.340</b>
<b>Aceleración del terreno <math>a_0</math></b>	<b>249.057</b>
<b>Coefficiente sísmico C</b>	<b>894.445</b>
<b><math>T_a</math> (s)</b>	<b>0.200</b>
<b><math>T_b</math> (s)</b>	<b>1.400</b>
<b><math>T_c</math> (s)</b>	<b>2.000</b>
<b>k</b>	<b>1.000</b>
<b>r</b>	<b>0.667</b>
<b>Factor de amortiguamiento crítico <math>\zeta_e</math></b>	<b>5%</b>
<b>Factor de comportamiento Sísmico Q</b>	<b>1.250</b>
<b>Factor de corrección por irregularidad K</b>	<b>1.000</b>
<b>Factor de corrección por sobrerresistencia <math>R_0</math></b>	<b>1.250</b>
<b>Factor de corrección por Redundancia <math>\rho</math></b>	<b>1.000</b>

Figura 19. Parámetros Sísmicos; masa impulsiva.

## ***Capítulo VI. – Análisis y Diseño Estructural***

Mediante el análisis estructural se determinan las respuestas del sistema ante la sollicitación de las acciones externas que puedan incidir sobre dicho sistema. La respuesta de una estructura o de un elemento es su comportamiento bajo una acción determinada; está en función de sus propias características y puede expresarse en función de deformaciones, agrietamiento, vibraciones, esfuerzos, reacciones.

Se realizó el modelo tridimensional de la estructura para realizar el análisis, posterior a esto, se revisan las resistencias de los elementos que conforman a la estructura, empleando las disposiciones y consideraciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus respectivas Normas Técnicas Complementarias.

Se realizó el análisis estructural, considerando peso propio y empuje lateral de tierras, de acuerdo con la reglamentación correspondiente, para evaluar el comportamiento particular y general de la estructura.

Los elementos estructurales se dimensionan de tal manera que su resistencia, a las diversas acciones de trabajo a las que puedan estar sujetas, sean igual a dichas acciones multiplicadas por factores de carga, de acuerdo con el grado de seguridad deseado o especificado.

## Análisis hidrodinámico de tanque clarificador primario

<i>Dimensiones de tanque</i>		<i>Concreto para tanque</i>	
$t=$	30.00 <i>cm</i>	$f'_c=$	300.00 <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
$b=$	109.80 <i>cm</i>	$E_c=$	242,487.11 <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
$D=$	12.00 <i>m</i>	$\rho_c=$	2,400.00 <i>kg/m<sup>3</sup></i>
$H_w=$	3.16 <i>m</i>	$\rho_L=$	1,050.00 <i>kg/m<sup>3</sup></i>
$H_L=$	2.66 <i>m</i>	$q=$	3,061.06 <i>kg/m<sup>2</sup></i>
$a=$	0.50 <i>m</i>	$g=$	9.81 <i>m/s<sup>2</sup></i>
<i>Masa del contenido</i>		<i>Peso del contenido</i>	
$m_w=$	189.26 <i>tonf*s<sup>2</sup>/m</i>	$W_w=$	1,856.04 <i>kN</i>
$m_L=$	315.30 <i>tonf*s<sup>2</sup>/m</i>	$W_L=$	3,092.03 <i>kN</i>
$m_L=$	32.15 <i>tonf*s<sup>2</sup>/m</i>	$W_L=$	315.30 <i>tonf</i>
$D/H_L=$	4.52		
$H_L/D=$	0.22	$H_L/R_B=$	0.44
<i>Masas equivalentes de aceleración de líquido</i>			
$W_i/W_L=$	0.255	$M_0/M_L=$	0.256
$W_i=$	789.37 <i>kN</i>	$M_0=$	80.59 <i>tonf*s<sup>2</sup>/m</i>
$W_c/W_L=$	0.698	$M_1/M_L=$	0.700
$W_c=$	2,159.67 <i>kN</i>	$M_1=$	220.62 <i>tonf*s<sup>2</sup>/m</i>
		$K_1=$	5,201.03 <i>tonf/m</i>
<i>Alturas a centros de gravedad excluyendo presión en la base EBP</i>			
$h_i=$	1.00 <i>m</i>	$H_0=$	1.00 <i>m</i>
$h_c=$	1.40 <i>m</i>	$H_1=$	1.40 <i>m</i>
<i>Alturas a centros de gravedad incluyendo presión basal IBP</i>			
$h'_i=$	4.87 <i>m</i>	$H_0=$	4.86 <i>m</i>
$h'_c=$	5.03 <i>m</i>	$H_1=$	5.03 <i>m</i>

<b>Coefficiente de masa efectiva</b>			
$\varepsilon=$	0.47		
<b>Propiedades dinámicas</b>			
<b>Periodos de vibración impulsivos y convectivos</b>			
$C_w=$	0.13	$\lambda=$	4.92
$C_L=$	0.21	$\omega_c=$	1.42 rad/s
$\omega_j=$	248.81 rad/s	$T_c=$	4.42 s
$T_j=$	0.03 s		
<b>Factores de amplificación espectral <math>C_i</math> y <math>C_c</math> (ACI 350.3)</b>			
$C_i=$	2.29		
$C_c=$	0.31		
<b>Por espectros de diseño</b>			
	T	Sa/Q'Rp	
$T_j=$	0.03	0.1926	
$T_c=$	4.42	0.0942	
$T_v=$	0.16	0.6848	
<b>Fuerzas dinámicas laterales</b>			
$P_w=$	74,201.20 N	$M_w=$	117,056.10 N-m
$P_j=$	31,557.43 N	$M_j=$	31,420.54 N-m
$P_c=$	95,017.14 N	$M_c=$	132,675.94 N-m
$V=$	142.17 kN	$M_b=$	199.12 kN-m
<b>Cargas impulsivas debidas al líquido</b>			
$w=$	7.90 ton/m		
$\delta=$	0.000356 m		
$K_0=$	2,220,862.68 tonf/m	61690.6301 tonf/m	
$T_0=$	0.03785 s		
$Sa/Q'R=$	0.2071 1/g		

$V_o=$	163.65 tonf		
$M_{V_o}=$	162.94 tonf-m		
<b><i>Cargas impulsivas debidas al tanque</i></b>			
$D_i=$	12.00 m	$D_e=$	12.60 m
$I_x=$	219.36 m <sup>4</sup>		
$W_T=$	1,856.04 tonf	$X=$	1.05 m
$m_T=$	189.26 tonf*s <sup>2</sup> /m	$w=$	699.05 tonf
$\delta=$	9.11085E-06 m	$T_T=$	0.0061 s
$K_T=$	203,717,931.53 tonf/m	$Sa/Q'R=$	0.1317 1/g
$V_T=$	244.53 tonf		
$M_{V_T}=$	257.17 tonf-m		
<b><i>Cargas impulsivas</i></b>			
$V=$	408.18 tonf	$M=$	420.11 tonf-m
<b><i>Cargas convectivas</i></b>			
$m_1=$	220.62 tonf*s <sup>2</sup> /m		
$H_1=$	1.40 m	$T_1=$	1.29 s
$K_1=$	5,201.03 tonf/m	$Sa/Q'R=$	0.5925 1/g
$V_T=$	1,281.91 tonf	$M_{V_T}=$	1,789.97 tonf-m
<b><i>Cortante y momentos totales</i></b>			
$V=$	1,345.32 tonf	$M=$	1,838.61 tonf-m
<b><i>Presiones hidrodinámicas impulsivas en las paredes del depósito circular</i></b>			
$R_B=$	6.00 m	$H_L=$	2.50 m
$H_L/R_B=$	0.42 m	$\rho_L=$	1.05 tonf/m <sup>3</sup>

<i>Presiones hidrodinámicas impulsivas en las paredes del depósito circular</i>							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_o(z)$	$S_a(T_0)$	$\rho_L * R_B$	$Cos \vartheta_c$	$Po$ (tonf/m <sup>2</sup> )
0	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	1.0000	0.00
0	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	1.0000	0.13
0	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	1.0000	0.27
0	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	1.0000	0.34
0	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	1.0000	0.43
0	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	1.0000	0.48
0	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	1.0000	0.51
0	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	1.0000	0.52
0	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	1.0000	0.53
10	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.9848	0.00
10	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.9848	0.13
10	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.9848	0.27
10	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.9848	0.33
10	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.9848	0.42
10	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.9848	0.48
10	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.9848	0.50
10	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.9848	0.51
10	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.9848	0.53
20	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.9397	0.00
20	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.9397	0.12
20	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.9397	0.26
20	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.9397	0.32
20	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.9397	0.40
20	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.9397	0.45
20	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.9397	0.48
20	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.9397	0.49
20	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.9397	0.50
30	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.8660	0.00
30	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.8660	0.11
30	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.8660	0.24

<b>Presiones hidrodinámicas impulsivas en las paredes del depósito circular</b>							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_o(z)$	$S_a(T_0)$	$\rho_L * R_B$	$Cos \vartheta_c$	$Po$ (tonf/m <sup>2</sup> )
30	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.8660	0.29
30	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.8660	0.37
30	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.8660	0.42
30	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.8660	0.44
30	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.8660	0.45
30	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.8660	0.46
40	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.7660	0.00
40	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.7660	0.10
40	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.7660	0.21
40	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.7660	0.26
40	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.7660	0.33
40	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.7660	0.37
40	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.7660	0.39
40	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.7660	0.40
40	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.7660	0.41
50	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.6428	0.00
50	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.6428	0.08
50	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.6428	0.18
50	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.6428	0.22
50	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.6428	0.28
50	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.6428	0.31
50	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.6428	0.33
50	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.6428	0.34
50	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.6428	0.34
60	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.5000	0.00
60	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.5000	0.07
60	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.5000	0.14
60	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.5000	0.17
60	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.5000	0.22
60	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.5000	0.24

<b>Presiones hidrodinámicas impulsivas en las paredes del depósito circular</b>							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_o(z)$	$S_a(T_o)$	$\rho_L * R_B$	$Cos \vartheta_c$	$Po$ (tonf/m <sup>2</sup> )
60	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.5000	0.25
60	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.5000	0.26
60	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.5000	0.27
70	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.3420	0.00
70	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.3420	0.04
70	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.3420	0.09
70	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.3420	0.12
70	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.3420	0.15
70	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.3420	0.17
70	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.3420	0.17
70	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.3420	0.18
70	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.3420	0.18
80	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.1736	0.00
80	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.1736	0.02
80	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.1736	0.05
80	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.1736	0.06
80	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.1736	0.07
80	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.1736	0.08
80	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.1736	0.09
80	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.1736	0.09
80	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.1736	0.09
90	2.50	1.00	0	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	2.19	0.88	0.1	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	1.88	0.75	0.21	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	1.56	0.63	0.26	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	1.25	0.50	0.33	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	0.94	0.38	0.37	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	0.63	0.25	0.39	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	0.31	0.13	0.4	0.2071	6.3	0.0000	0.00
90	0.00	0.00	0.41	0.2071	6.3	0.0000	0.00

Presiones hidrodinámicas convectivas en las paredes del depósito circular							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_1(z)$	$S_a(T_1)$	$\rho_L * R_B$	$\text{Cos } \vartheta_c$	$P_1 \text{ (tonf/m}^2\text{)}$
0	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	1.0000	3.06
0	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	1.0000	2.99
0	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	1.0000	2.61
0	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	1.0000	2.43
0	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	1.0000	2.31
0	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	1.0000	2.28
0	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	1.0000	2.24
0	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	1.0000	2.20
0	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	1.0000	2.13
10	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.9848	3.01
10	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.9848	2.94
10	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.9848	2.57
10	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.9848	2.39
10	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.9848	2.28
10	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.9848	2.24
10	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.9848	2.21
10	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.9848	2.17
10	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.9848	2.10
20	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.9397	2.88
20	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.9397	2.81
20	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.9397	2.46
20	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.9397	2.28
20	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.9397	2.17
20	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.9397	2.14
20	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.9397	2.10
20	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.9397	2.07
20	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.9397	2.00
30	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.8660	2.65
30	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.8660	2.59

Presiones hidrodinámicas convectivas en las paredes del depósito circular							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_1(z)$	$S_a(T_1)$	$\rho_L * R_B$	$Cos \vartheta_c$	$P_1 (tonf/m^2)$
30	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.8660	2.26
30	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.8660	2.10
30	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.8660	2.00
30	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.8660	1.97
30	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.8660	1.94
30	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.8660	1.91
30	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.8660	1.84
40	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.7660	2.34
40	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.7660	2.29
40	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.7660	2.00
40	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.7660	1.86
40	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.7660	1.77
40	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.7660	1.74
40	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.7660	1.72
40	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.7660	1.69
40	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.7660	1.63
50	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.6428	1.97
50	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.6428	1.92
50	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.6428	1.68
50	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.6428	1.56
50	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.6428	1.49
50	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.6428	1.46
50	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.6428	1.44
50	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.6428	1.42
50	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.6428	1.37
60	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.5000	1.53
60	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.5000	1.49
60	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.5000	1.31
60	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.5000	1.21
60	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.5000	1.16

Presiones hidrodinámicas convectivas en las paredes del depósito circular							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_1(z)$	$S_a(T_1)$	$\rho_L * R_B$	$Cos \vartheta_c$	$P_1$ (tonf/m <sup>2</sup> )
60	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.5000	1.14
60	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.5000	1.12
60	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.5000	1.10
60	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.5000	1.06
70	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.3420	1.05
70	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.3420	1.02
70	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.3420	0.89
70	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.3420	0.83
70	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.3420	0.79
70	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.3420	0.78
70	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.3420	0.77
70	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.3420	0.75
70	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.3420	0.73
80	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.1736	0.53
80	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.1736	0.52
80	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.1736	0.45
80	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.1736	0.42
80	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.1736	0.40
80	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.1736	0.40
80	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.1736	0.39
80	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.1736	0.38
80	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.1736	0.37
90	2.50	1.00	0.82	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	2.19	0.88	0.80	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	1.88	0.75	0.70	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	1.56	0.63	0.65	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	1.25	0.50	0.62	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	0.94	0.38	0.61	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	0.63	0.25	0.60	0.5925	6.3	0.0000	0.00
90	0.31	0.13	0.59	0.5925	6.3	0.0000	0.00

Presiones hidrodinámicas convectivas en las paredes del depósito circular							
$\vartheta_c$	$H_{prom}$	$z/H_L$	$C_1(z)$	$S_a(T_1)$	$\rho_L * R_B$	$Cos \vartheta_c$	$P_1 (tonf/m^2)$
90	0.00	0.00	0.57	0.5925	6.3	0.0000	0.00

A continuación, se muestran las capturas de pantalla para la definición de las propiedades mecánicas de los materiales de acuerdo al proyecto y a las normas y reglamentos aplicados:

Figura 20. Definición de propiedades mecánicas para concreto reforzado  $f'c = 300\text{kg/cm}^2$

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name and Display Color: Gr.42

Material Type: Rebar

Material Grade: Grade 60

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Weight and Mass**

Weight per Unit Volume: 7.850E-03

Mass per Unit Volume: 8.005E-06

**Units**

Kgf, cm, C

**Uniaxial Property Data**

Modulus Of Elasticity, E: 2100000.

Poisson, U: 0.3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G:

**Other Properties For Rebar Materials**

Minimum Yield Stress, Fy: 4200.

Minimum Tensile Stress, Fu: 6330.

Expected Yield Stress, Fye: 4640.

Expected Tensile Stress, Fue: 6960.

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 21. Definición de propiedades mecánicas para acero de refuerzo grado 42

El módulo de reacción vertical para la losa de cimentación, que se asigna como un resorte elástico en la losa de fondo, corresponde a  $2204 \text{ kN/m}^2$ . Este

dato se obtiene de los datos que se presentan en la de Módulos de reacción verticales para losas cuadradas y rectangulares, del estudio de Mecánica de suelos y dependen tanto de la geometría de las losas como de su profundidad de desplante. (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

Ancho de losa [B]	Profundidad de desplante [m]	Módulos de reacción vertical [kPa/m]				
		Cuadrada	L/B = 1.5	L/B = 2	L/B = 3	L/B = 5
3	0.50	5330	4619	4264	3921	3670
6		3222	2885	2727	2586	2501
9		2538	2323	2227	2148	2109
12		2204	2049	1983	1935	1915
15		2008	1890	1843	1809	1798
18		1882	1789	1753	1733	1723
21		1795	1719	1694	1679	1673

Figura 22. Extracto del estudio de Mecánica de suelos: Tabla Módulos de reacción verticales. (DICIMISA, EMS-CCMH-22-16, 2022)

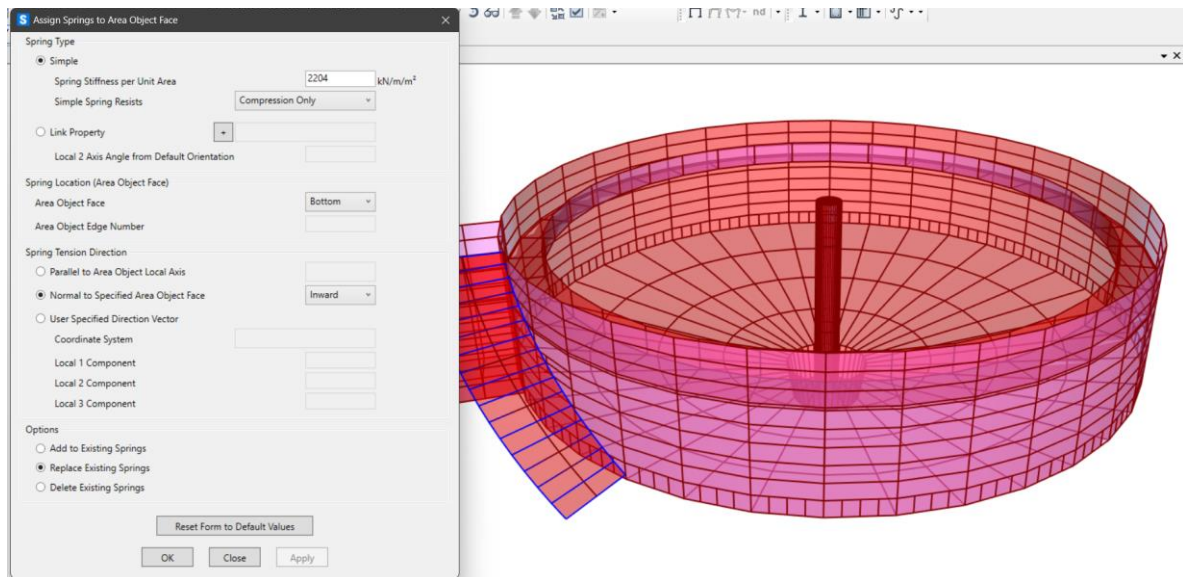


Figura 23. Asignación de módulo de reacción como resorte elástico en losa de fondo

**S** Assign Springs to Area Object Face ×

**Spring Type**

Simple

Spring Stiffness per Unit Area  kN/m/m<sup>2</sup>

Simple Spring Resists  ▾

Link Property

Local 2 Axis Angle from Default Orientation

**Spring Location (Area Object Face)**

Area Object Face  ▾

Area Object Edge Number

**Spring Tension Direction**

Parallel to Area Object Local Axis

Normal to Specified Area Object Face  ▾

User Specified Direction Vector

Coordinate System

Local 1 Component

Local 2 Component

Local 3 Component

**Options**

Add to Existing Springs

Replace Existing Springs

Delete Existing Springs

Figura 24. Asignación de módulo de reacción como resorte elástico en losa de fondo

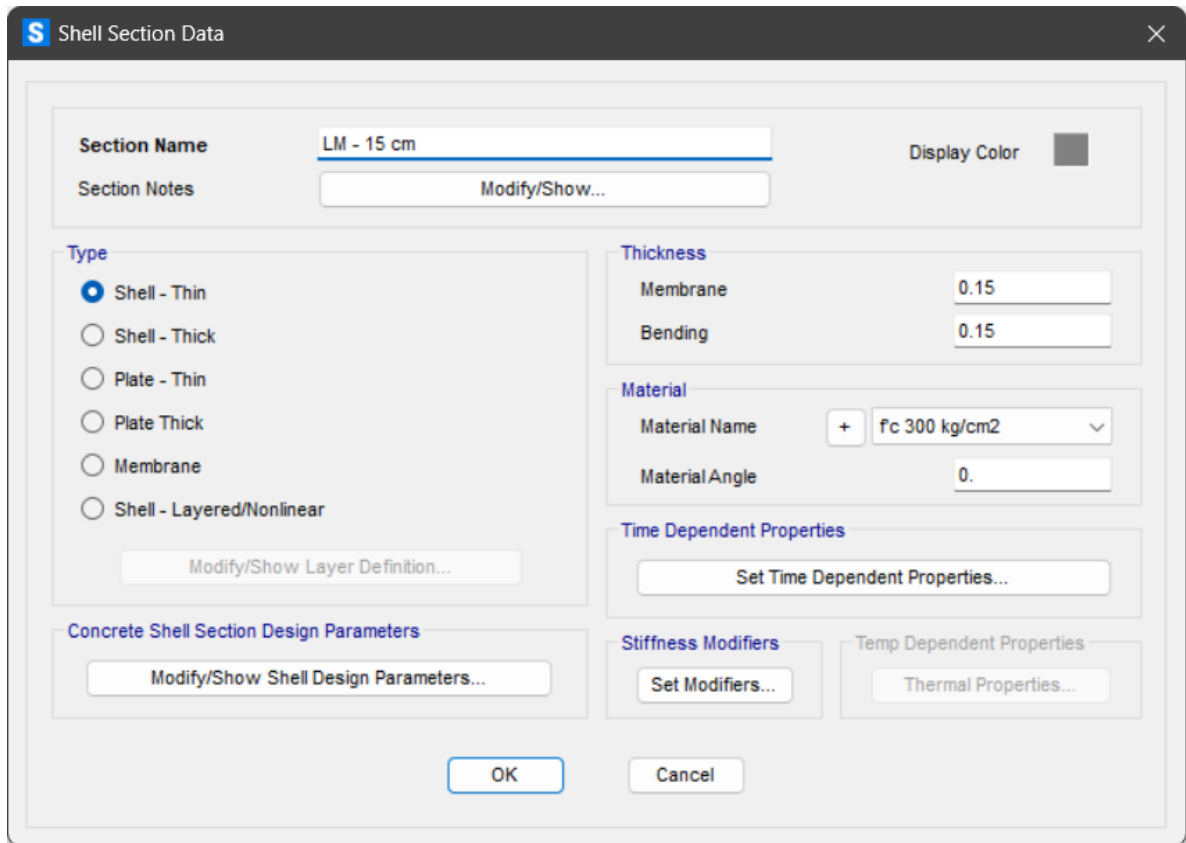


Figura 25. Definición de Shell para losa maciza de 15 cm de espesor

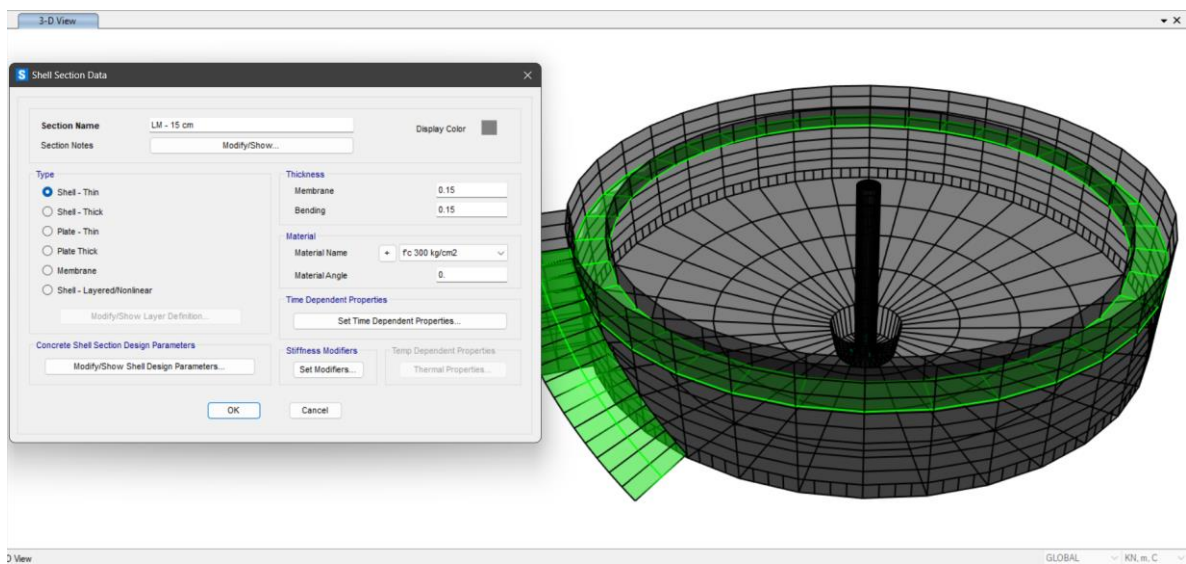


Figura 26. Asignación de propiedad para Shell de 15 cm de espesor

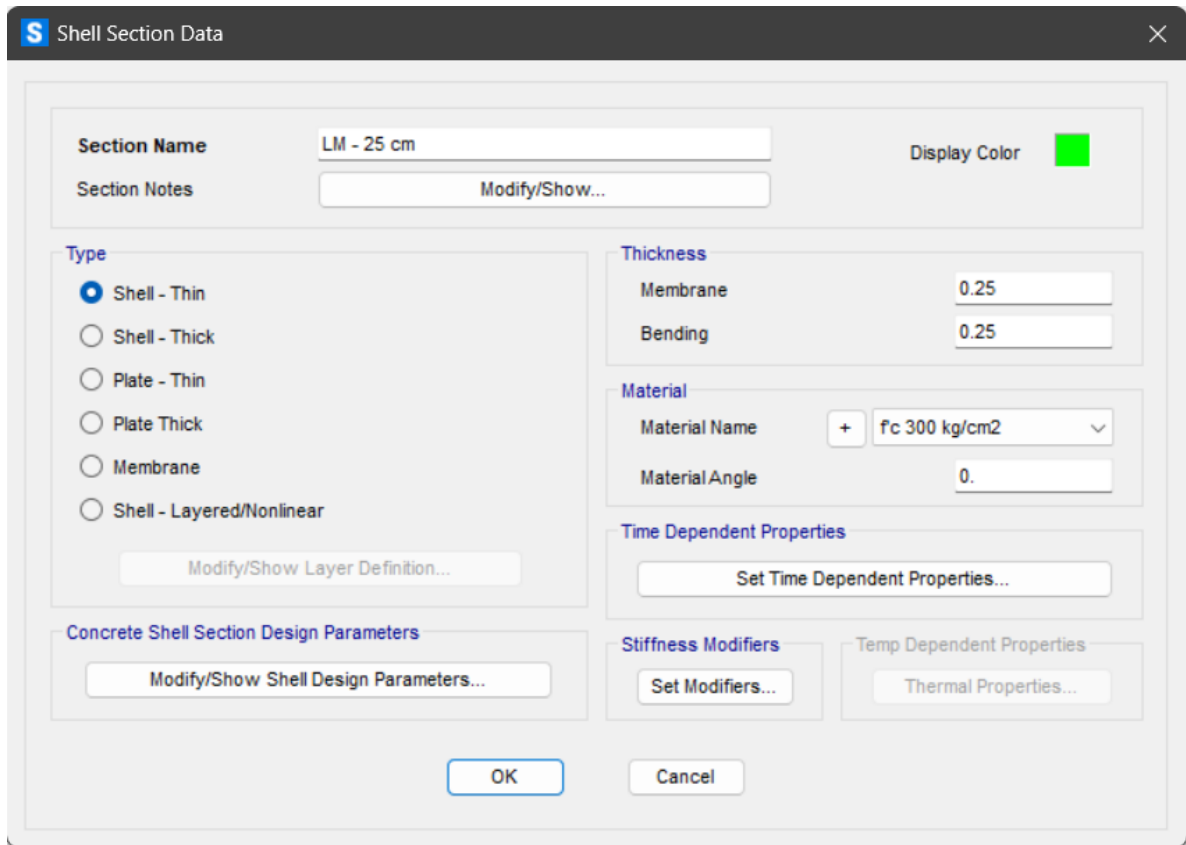


Figura 27. Definición de Shell para losa maciza de 25 cm de espesor

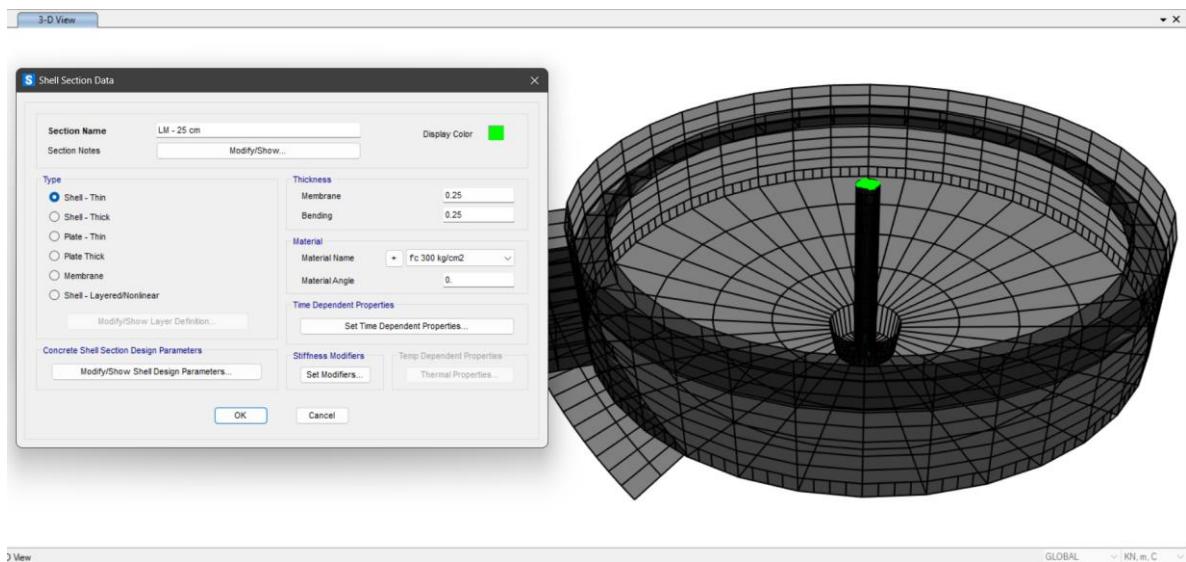


Figura 28. Asignación de propiedad para Shell de 25 cm de espesor

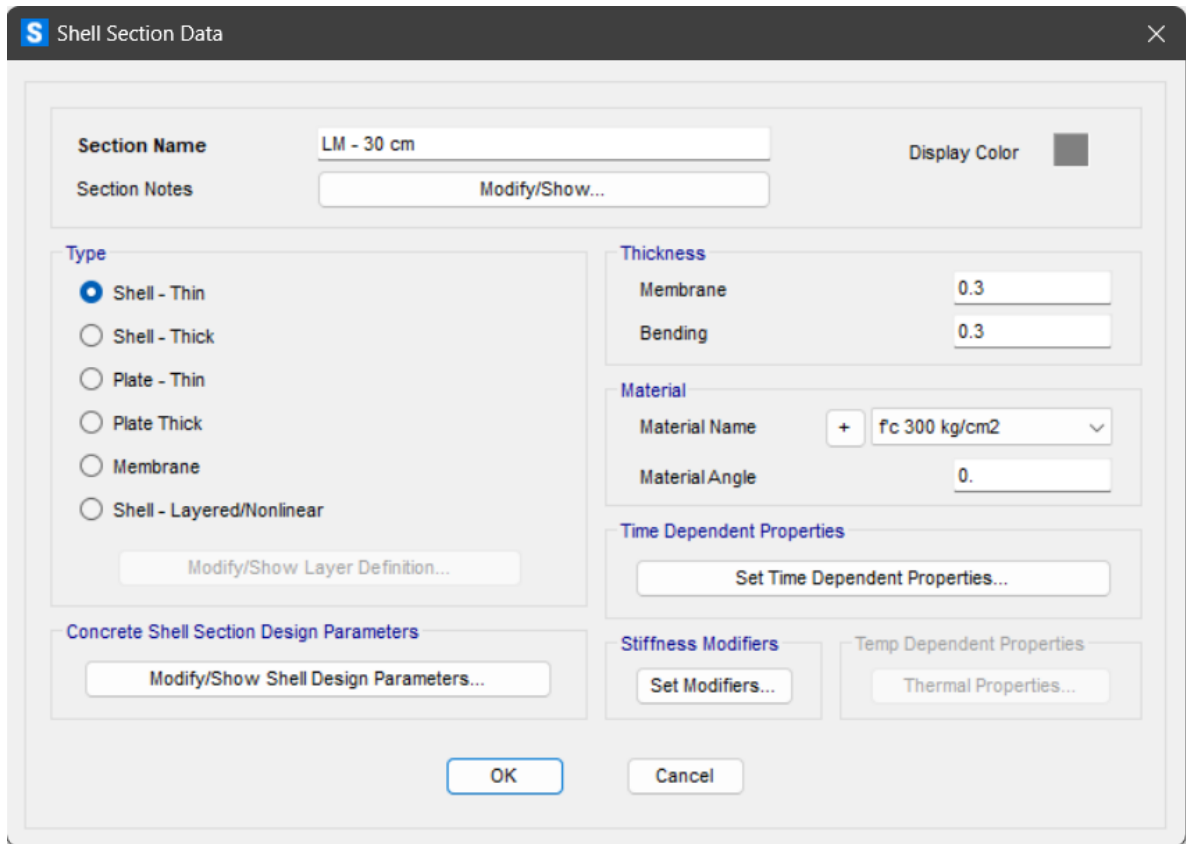


Figura 29. Definición de Shell para losa maciza de 30 cm de espesor

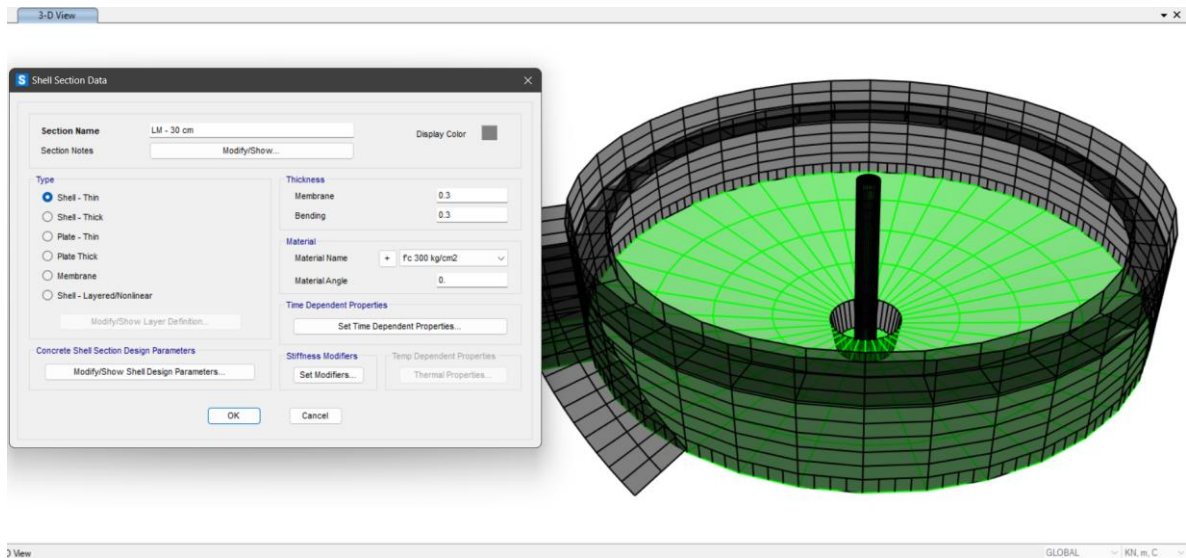


Figura 30. Asignación de propiedad para Shell de 30 cm de espesor

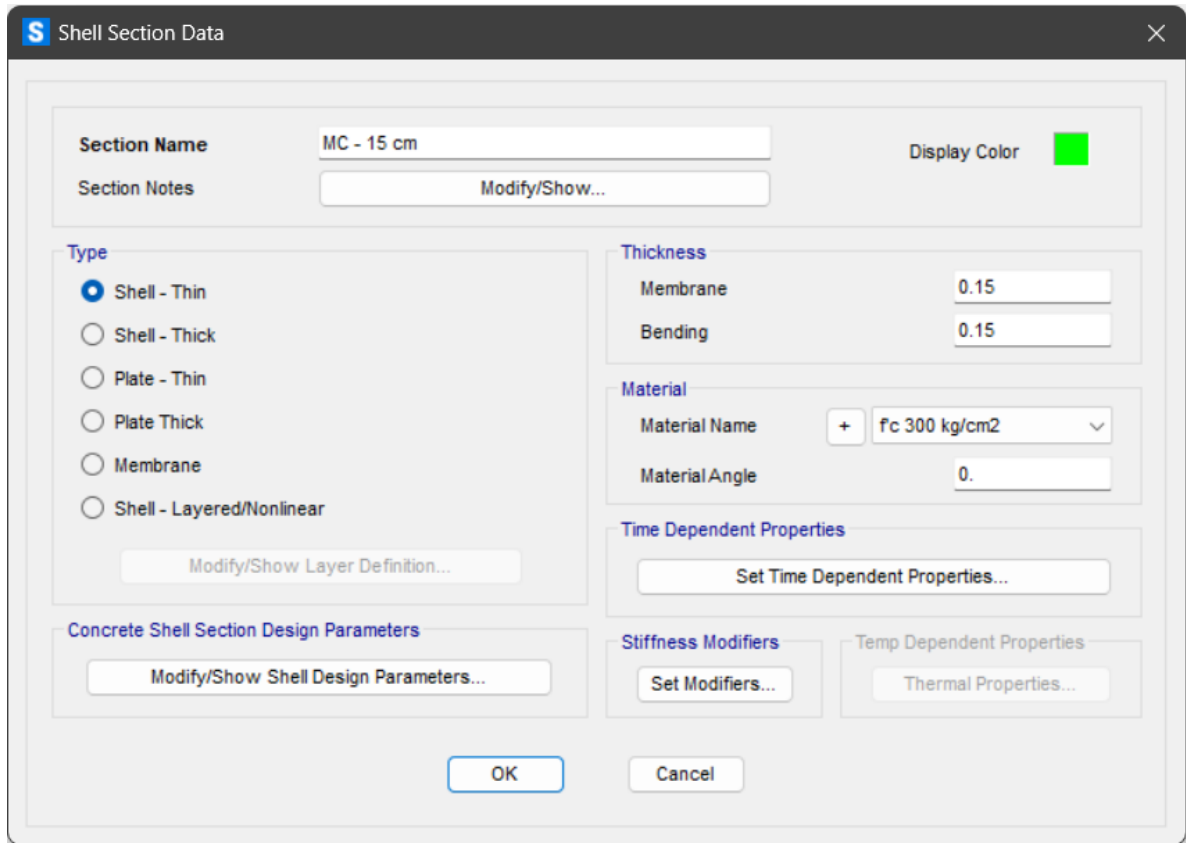


Figura 31. Definición de Shell para muro de concreto de 15 cm de espesor

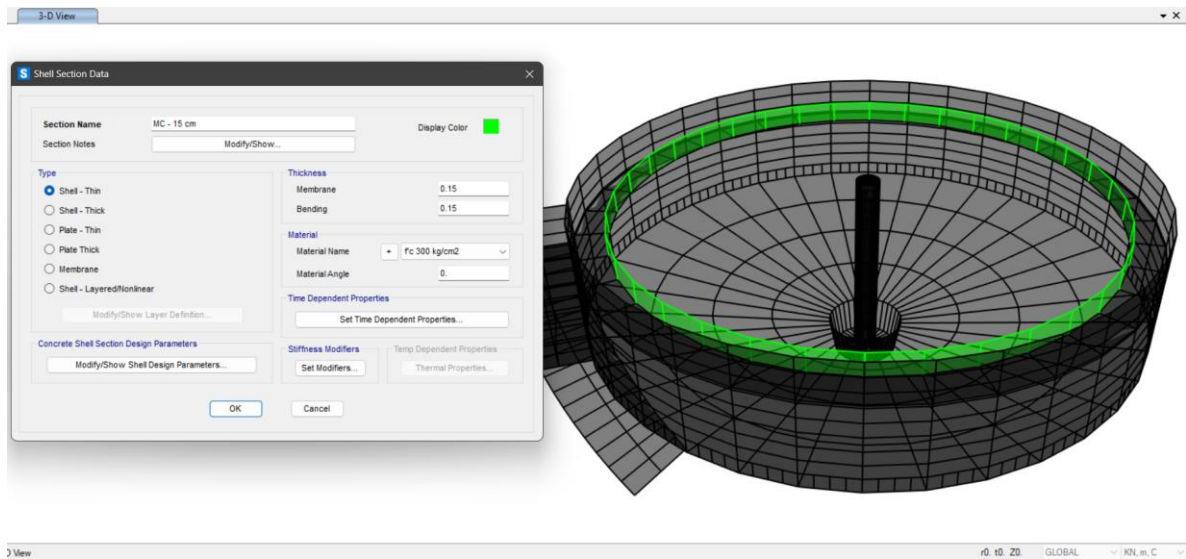


Figura 32. Asignación de propiedad para Shell de 15 cm de espesor

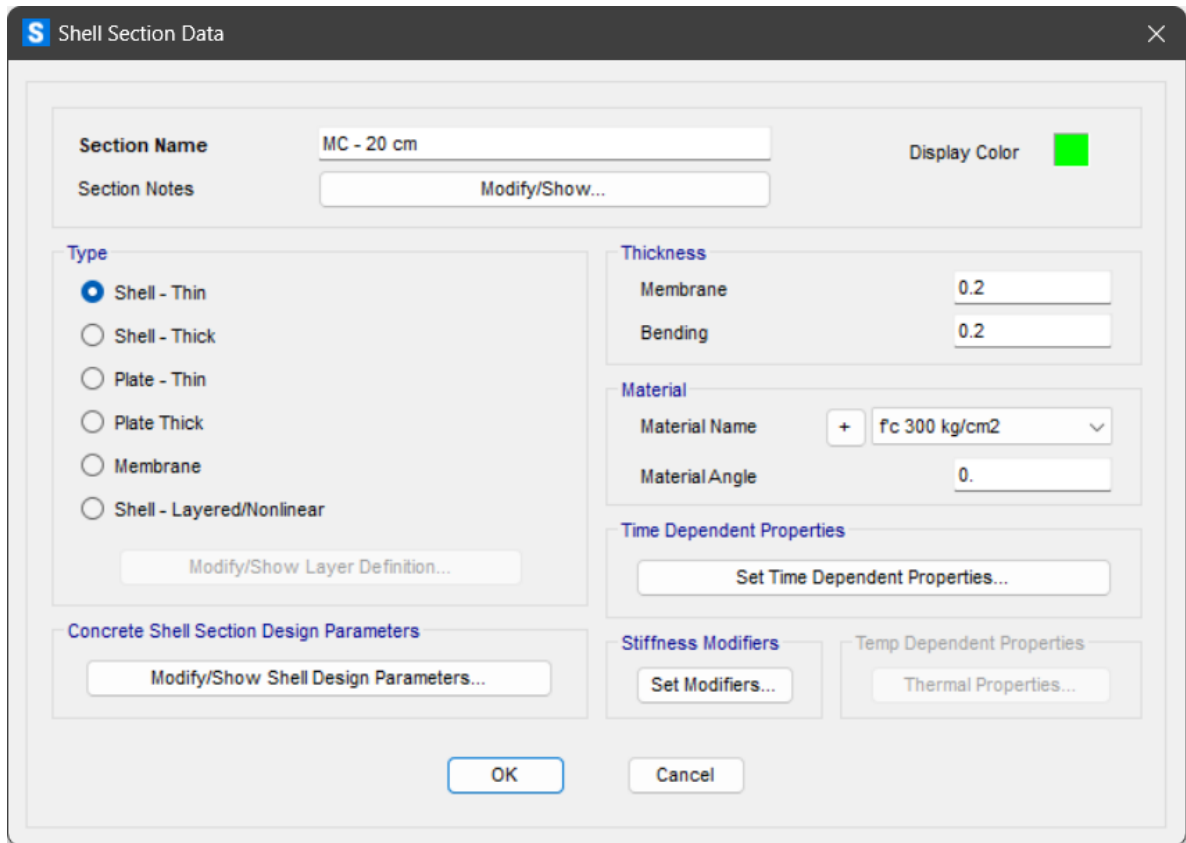


Figura 33. Definición de Shell para muro de concreto de 20 cm de espesor

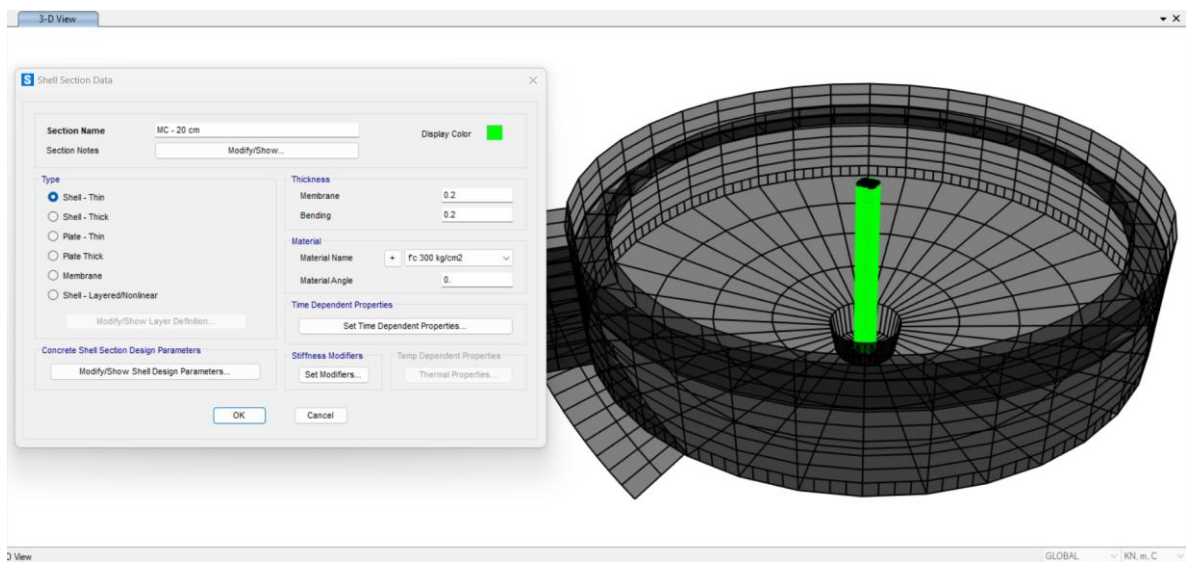


Figura 34. Asignación de propiedad para Shell de 20 cm de espesor

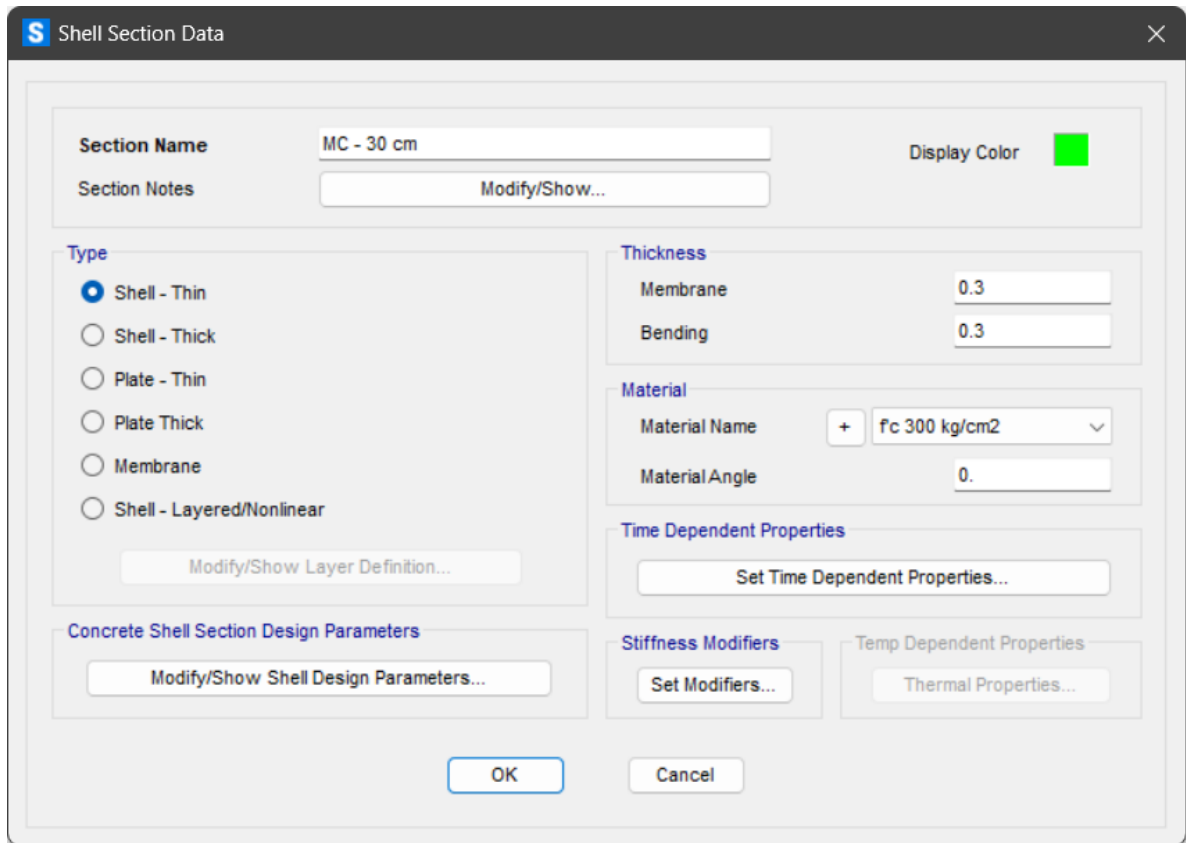


Figura 35. Definición de Shell para muro de concreto de 30 cm de espesor

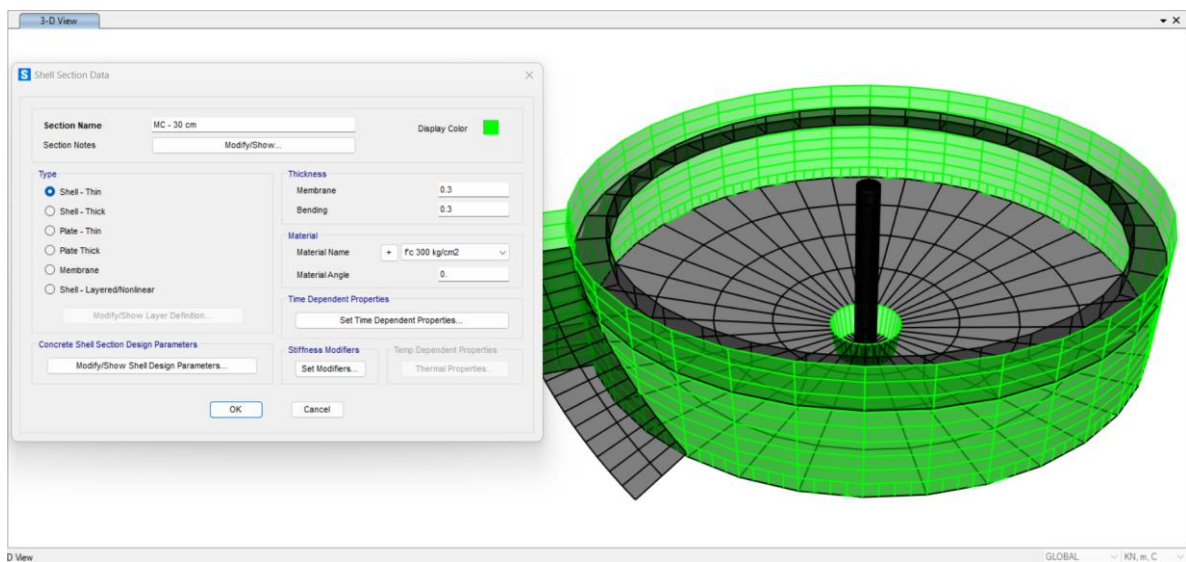


Figura 36. Asignación de propiedad para Shell de 30 cm de espesor

## Revisión general de la estructura

Al realizar el análisis de la estructura, los resultados obtenidos de acuerdo con las secciones de los elementos estructurales y propiedades de los materiales planteadas en dicho modelo fueron revisadas y comparados con la normativa correspondiente para verificar el comportamiento adecuado ante las cargas solicitadas.

Las acciones internas provocadas por las cargas externas se presentan en forma de momentos flexionantes, fuerzas cortantes y fuerzas axiales. Los momentos flexionantes producen esfuerzos axiales de tensión y compresión que producen el par de fuerzas capaz de resistir los momentos exteriores. Las fuerzas cortantes producen tensiones tangenciales en las fibras de los elementos, y las fuerzas axiales producen esfuerzos de tensión o compresión en la sección transversal de los elementos. Estos esfuerzos deben ser resistidos por los elementos estructurales.

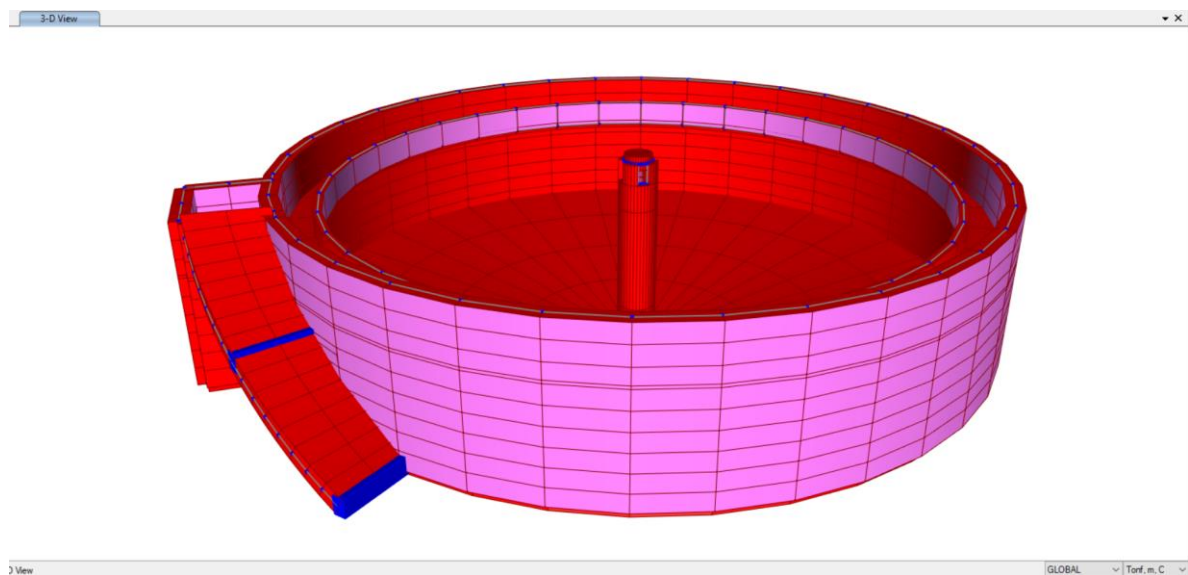


Figura 37. Modelo matemático de clarificador primario con base flexible

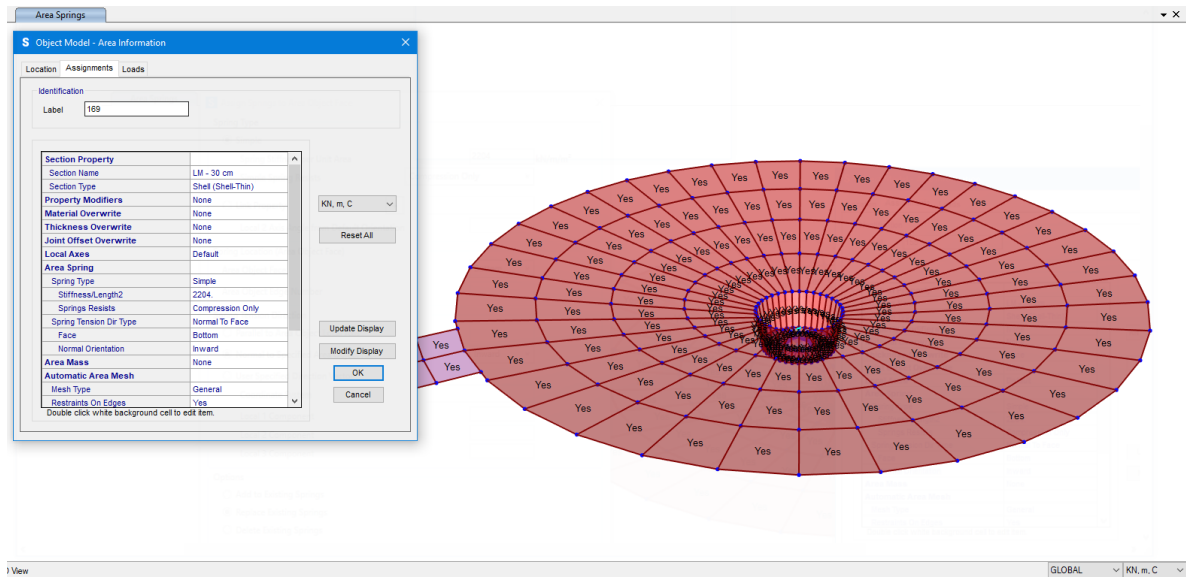


Figura 38. Aplicación de módulos de reacción en losa de fondo (2204 kN/m<sup>2</sup>/m)

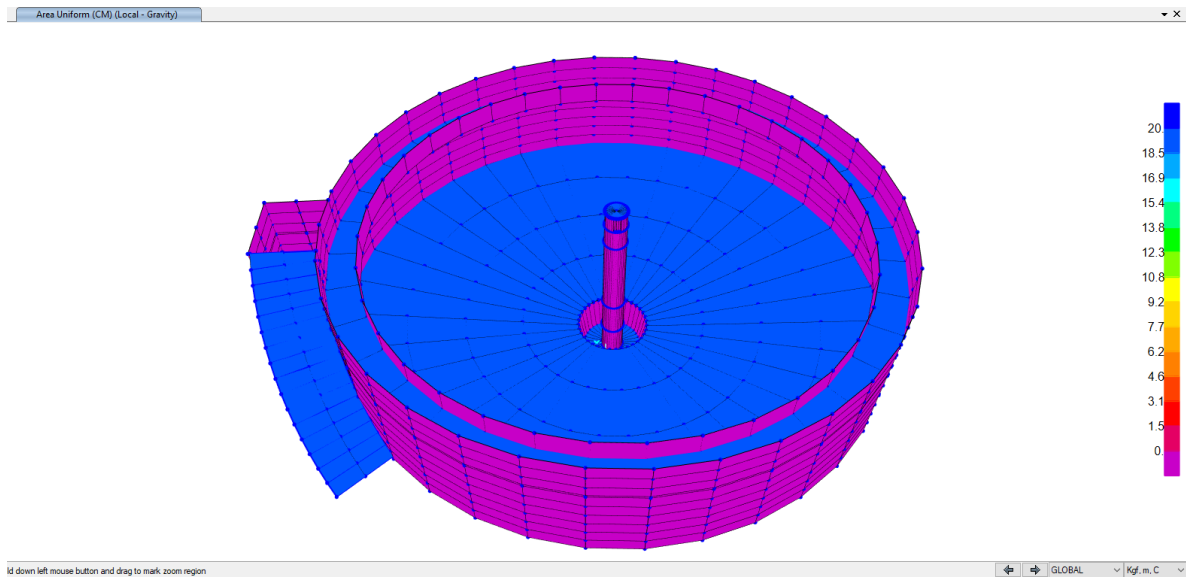


Figura 39. Aplicación de cargas muertas en escalera y losa de fondo (kg/m<sup>2</sup>)

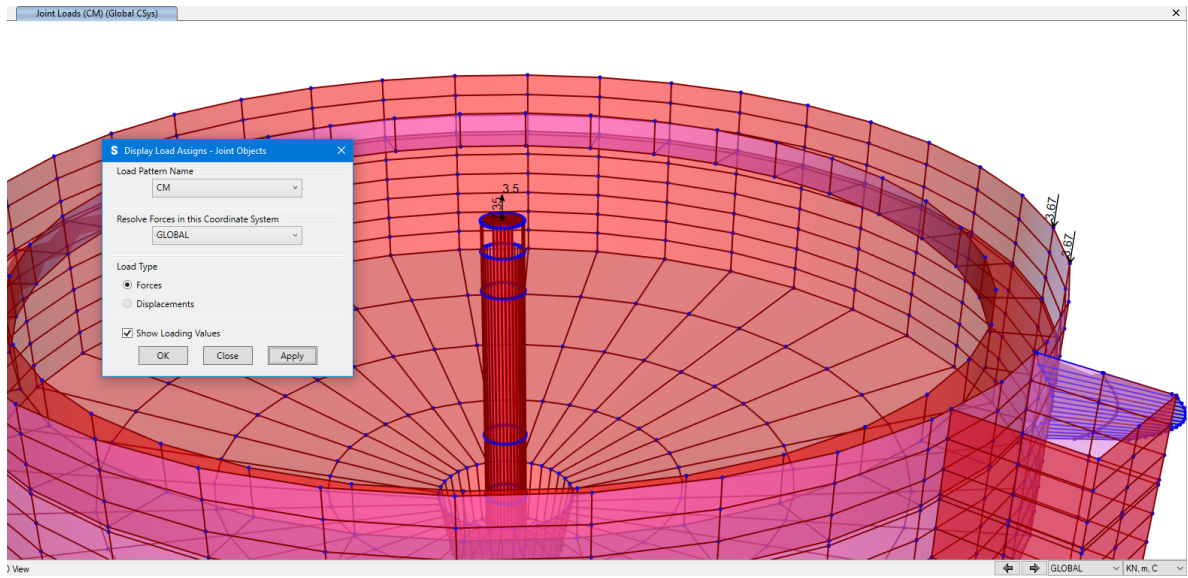


Figura 40. Aplicación de peso propio de plataforma

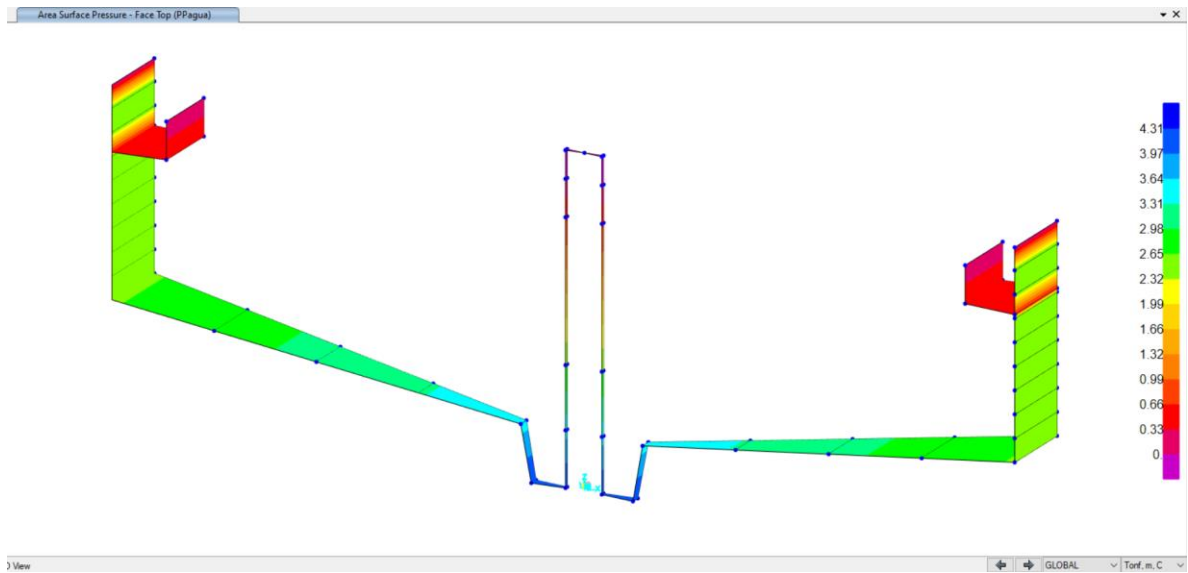


Figura 41. Aplicación de empujes hidrostáticos de líquidos (kg/m<sup>2</sup>)

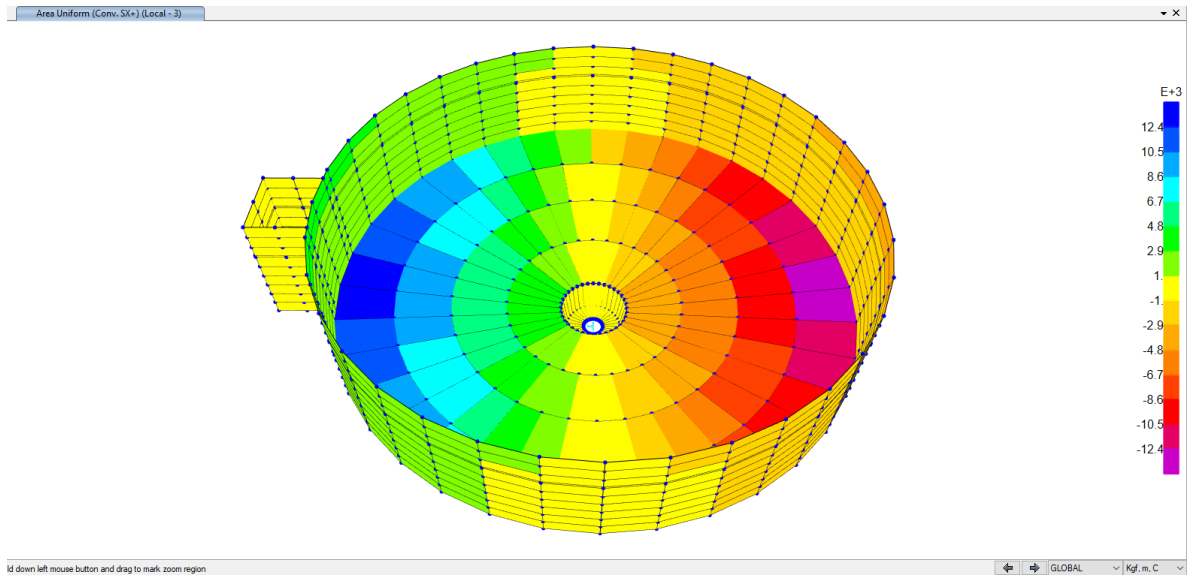


Figura 42. Aplicación de empujes convectivos en dirección X (kg/m)

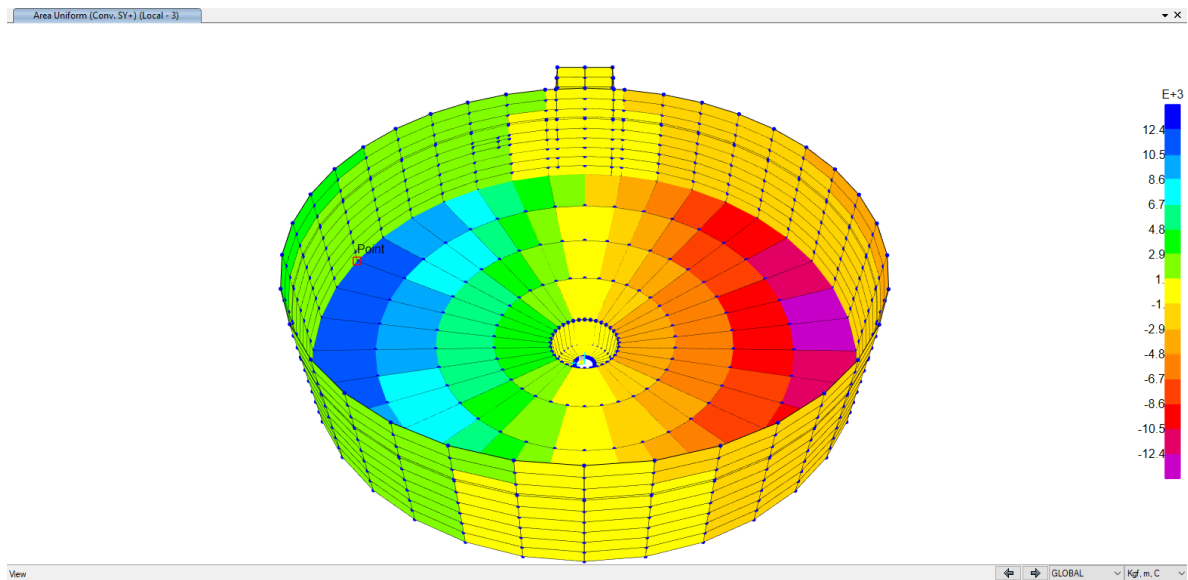


Figura 43. Aplicación de empujes convectivos en dirección Y (kg/m)

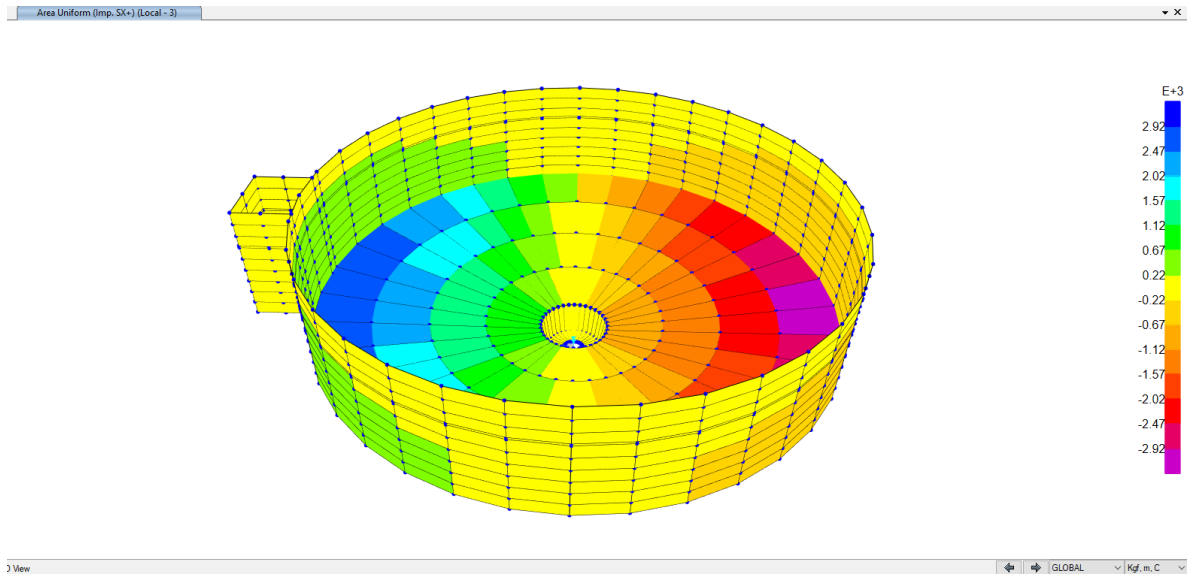


Figura 44. Aplicación de empujes impulsivos en dirección X (kg/m)

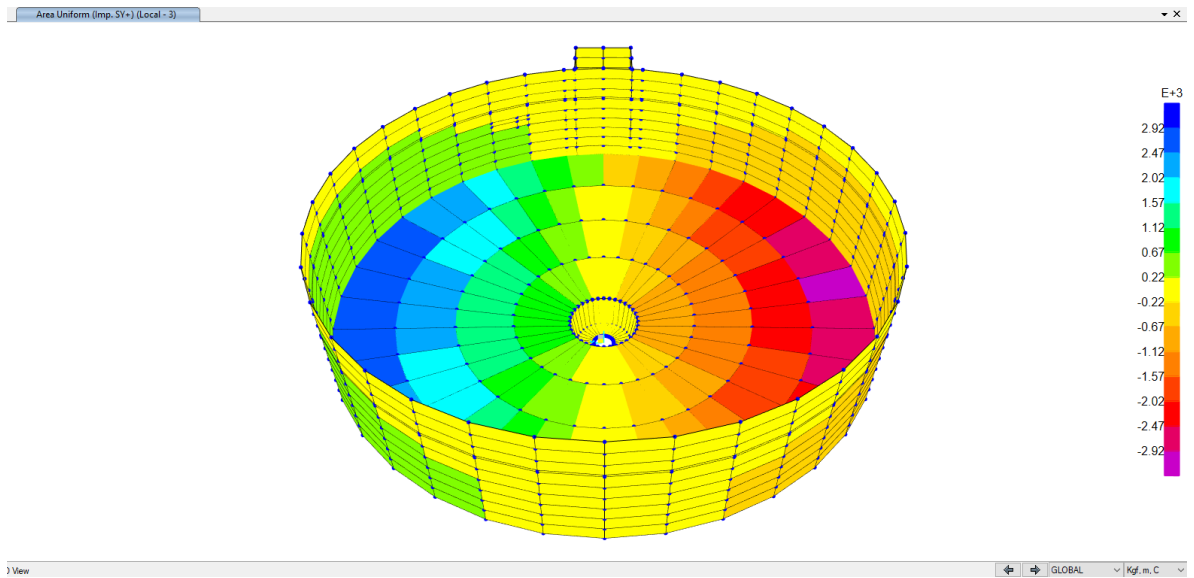


Figura 45. Aplicación de empujes impulsivos en dirección Y (kg/m)

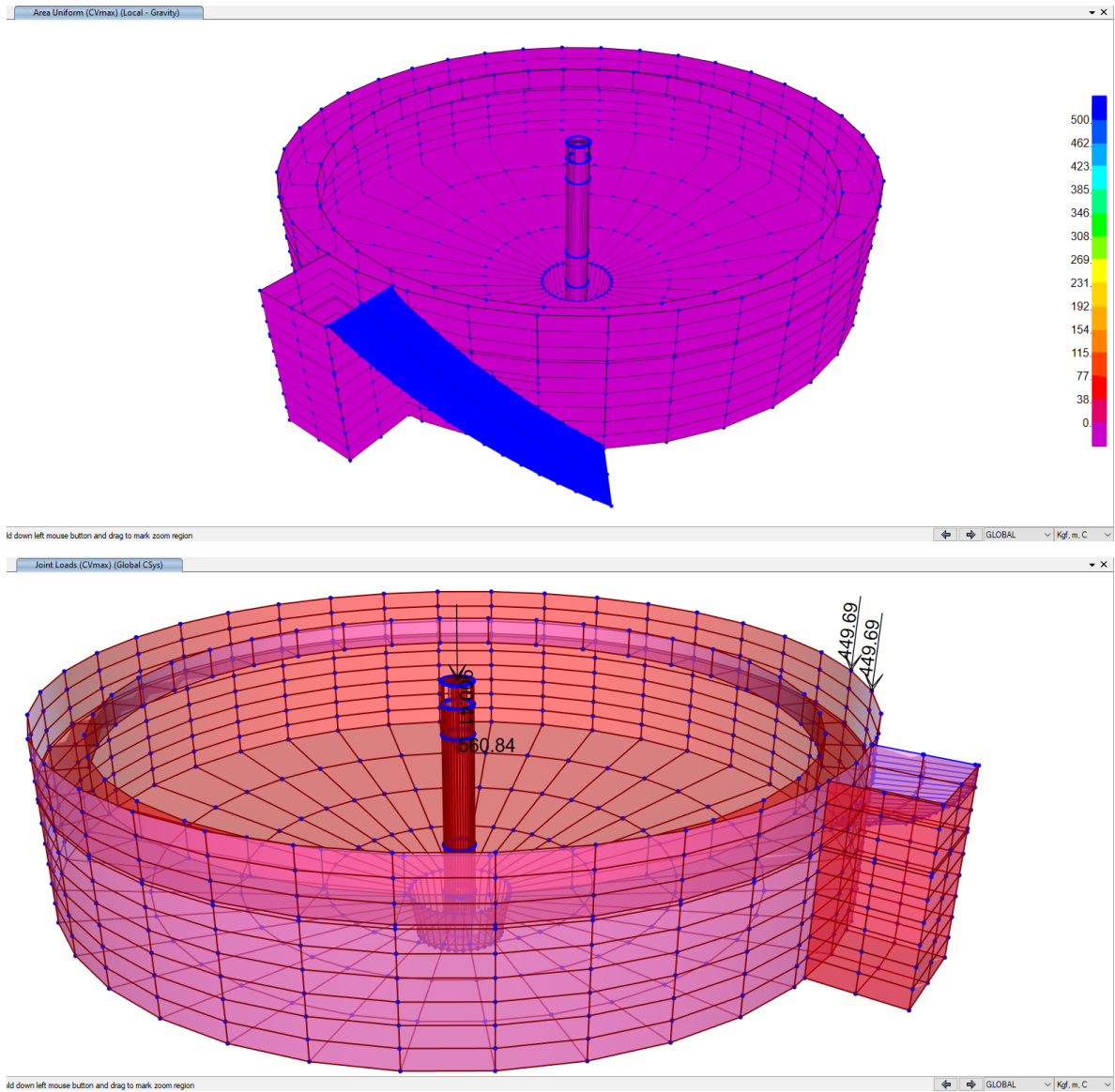


Figura 46. Aplicación de carga viva máxima (CVmax = 500 kg/m<sup>2</sup>)

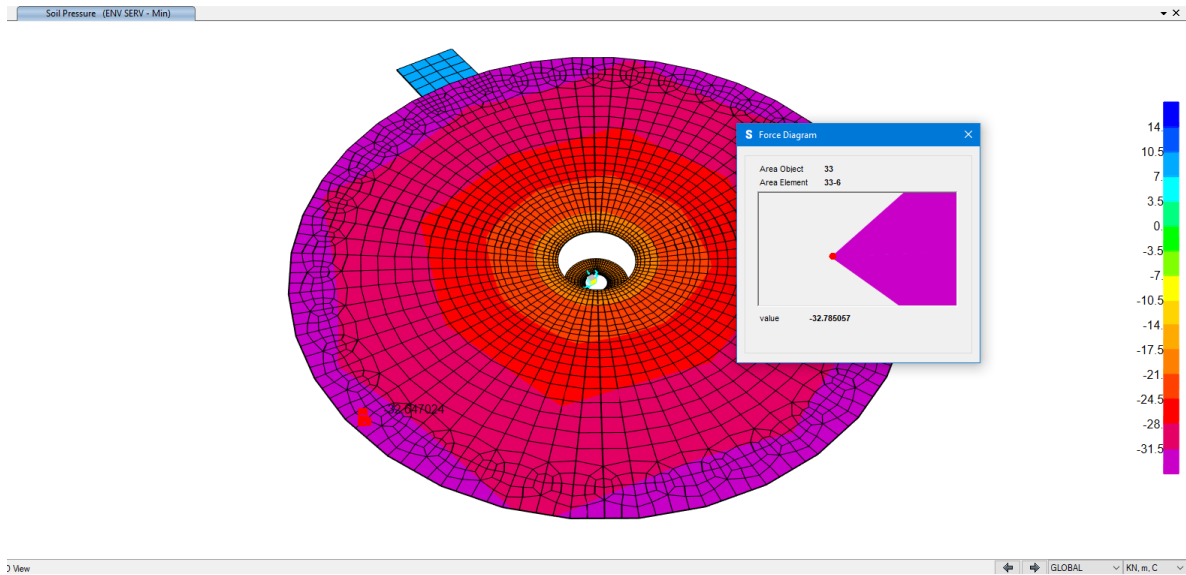


Figura 47. Presiones en el suelo (máx. = 32.78 kN/m<sup>2</sup>)

### Resultados del análisis

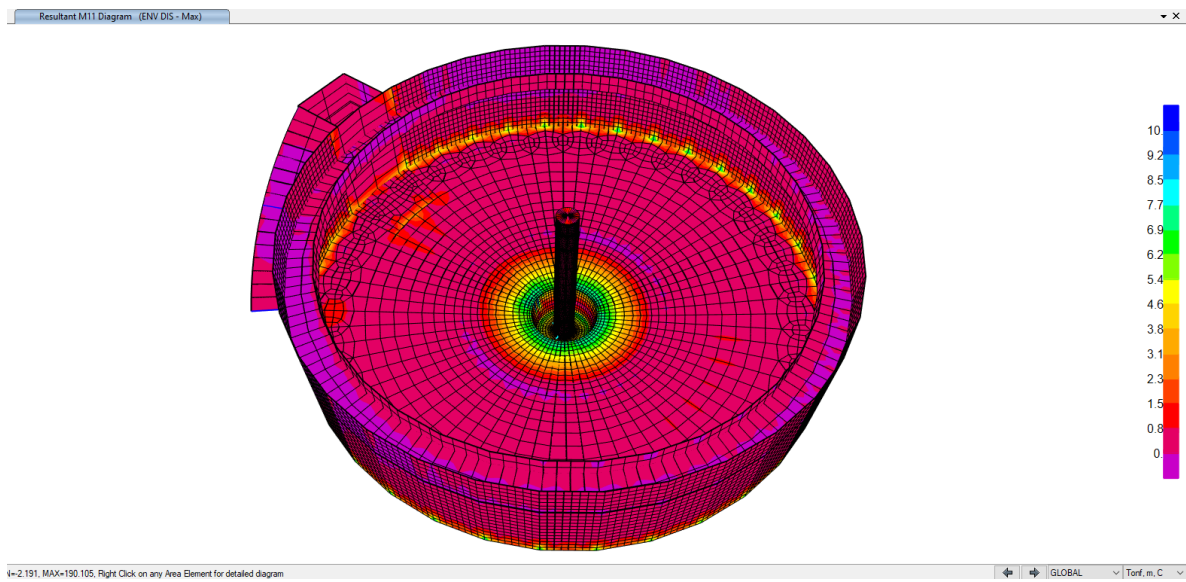


Figura 48. Diagramas de momentos flexionantes M11 positivos (Tonf-m/m)

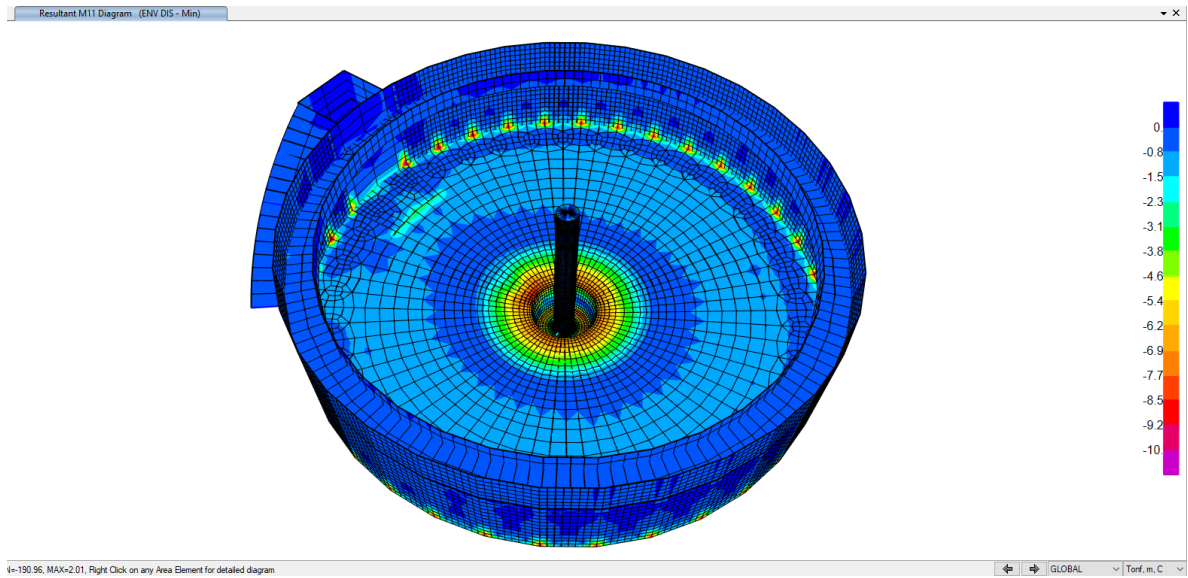


Figura 49. Diagramas de momentos flexionantes M11 negativos (Tonf-m/m)

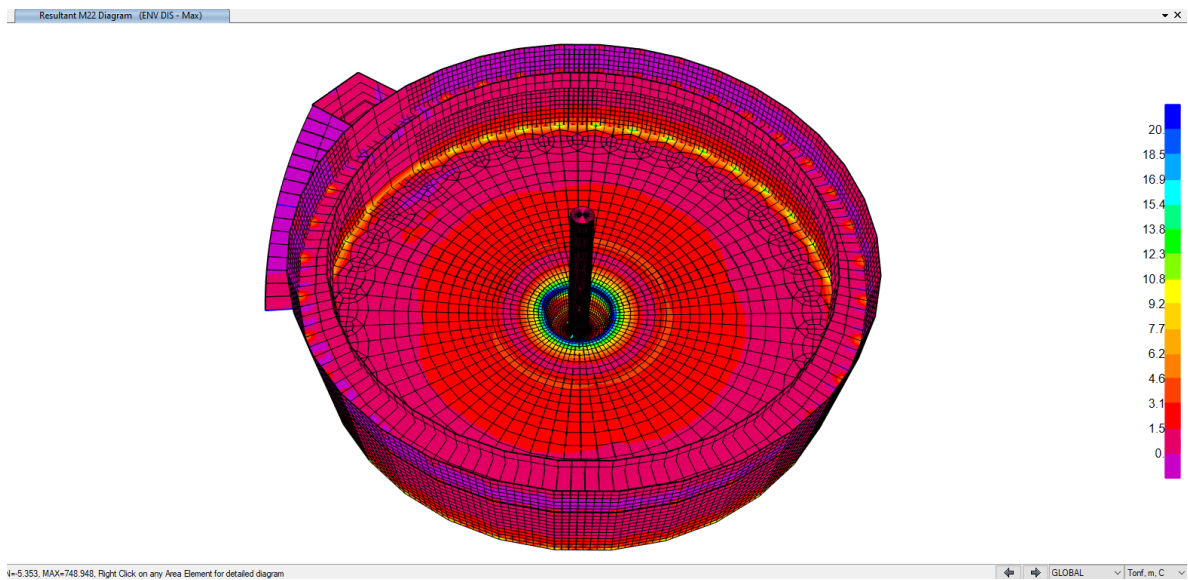


Figura 50. Diagramas de momentos flexionantes M22 positivos (Tonf-m/m)

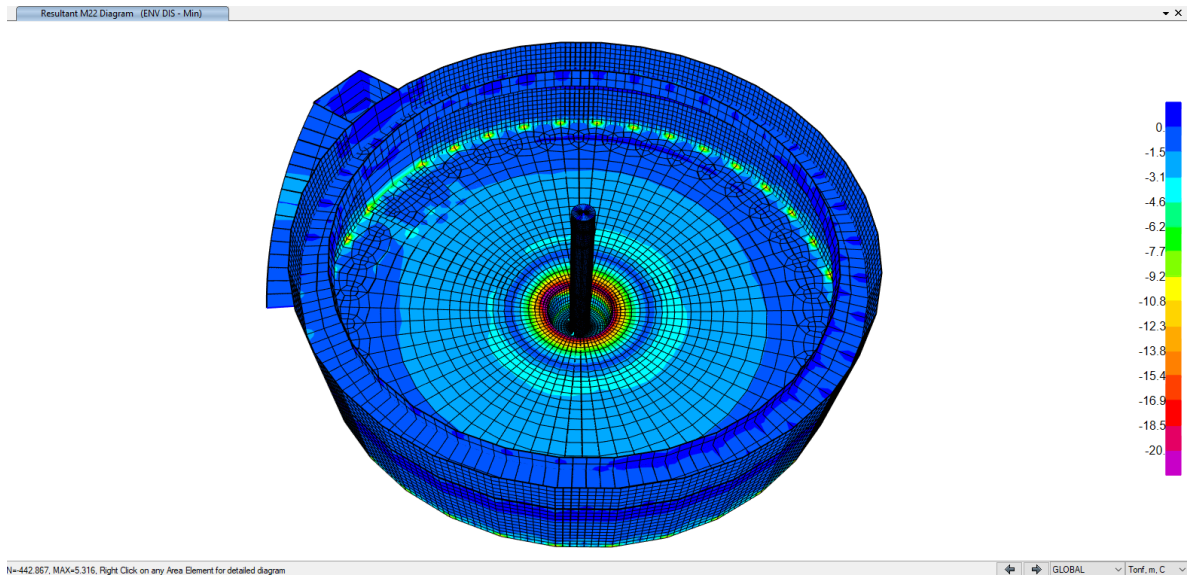


Figura 51. Diagramas de momentos flexionantes M22 negativos (Tonf-m/m)

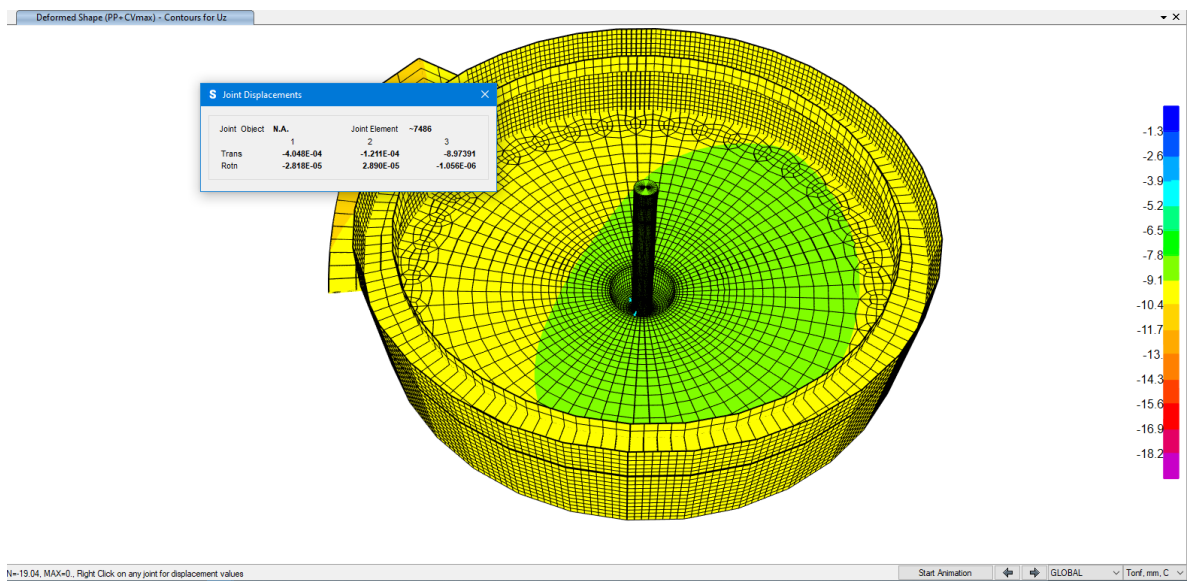


Figura 52. Asentamientos por cargas de servicio (Max = 8.97 mm)

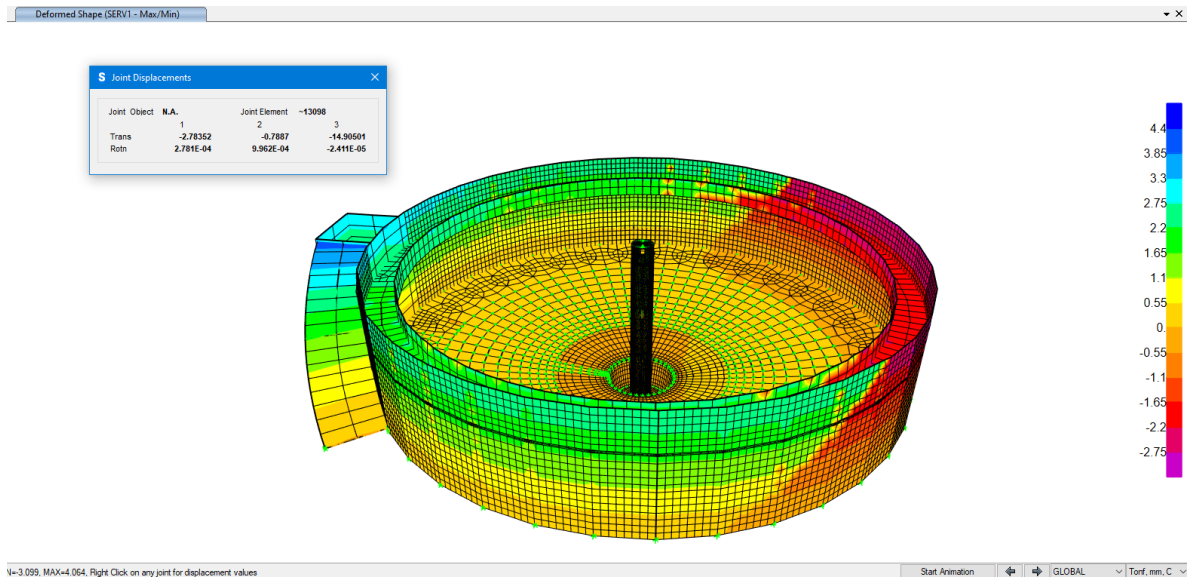


Figura 53. Desplazamientos laterales en dirección X (Max = 2.784 mm)

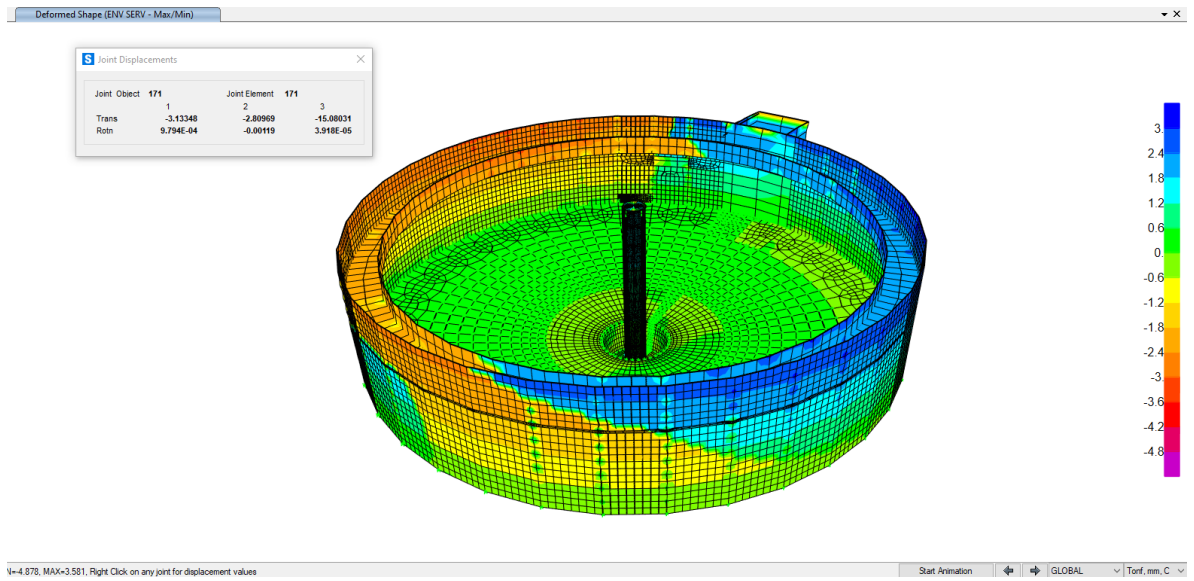


Figura 54. Desplazamientos laterales en dirección Y (Max = 3.133 mm)

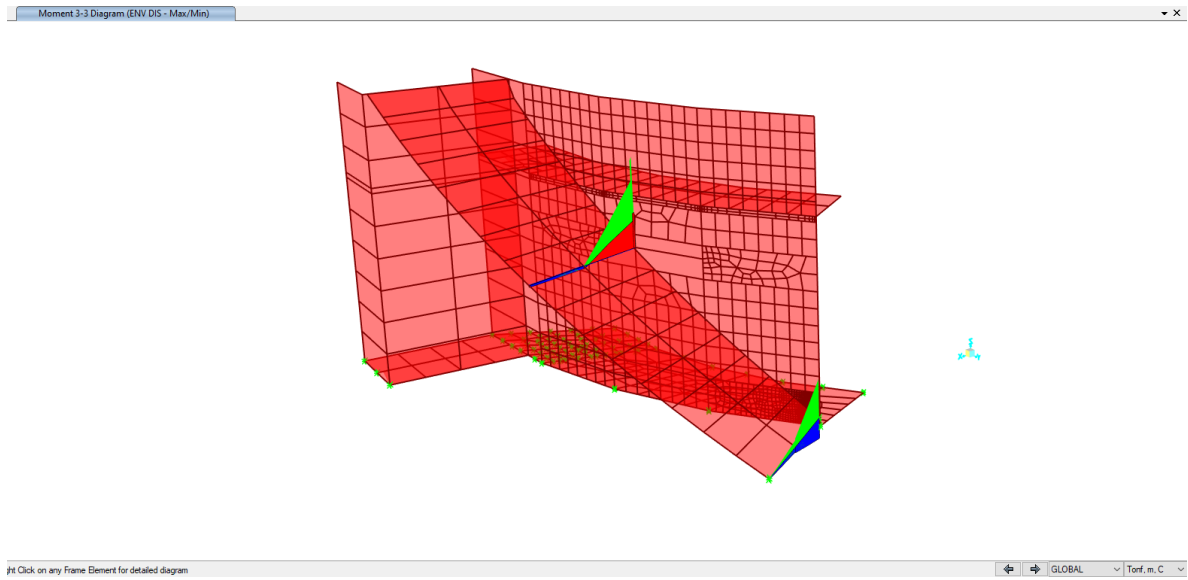


Figura 55. Envolverte de momentos de diseño en traves auxiliares (tonf-m)

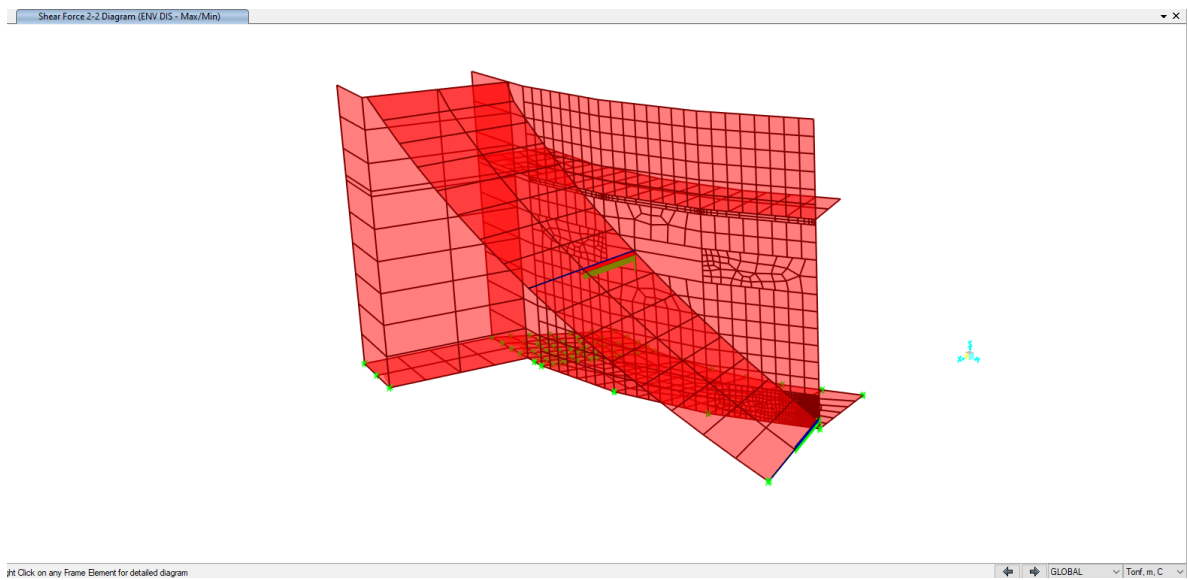


Figura 56. Envolverte de fuerzas cortantes de diseño en traves auxiliares (tonf)

Del análisis mediante el software se obtuvo que los elementos de concreto que conforman a la estructura tienen un comportamiento estructural adecuado, además, la resistencia y rigidez de la estructura son suficientes para soportar las acciones y solicitaciones a las que estará sometida por las acciones calculadas.

### **Revisión de desplazamientos laterales máximos**

Para la revisión de los desplazamientos laterales hacemos referencia a los parámetros normativos de flechas permitidas para lo cual se tomaron los claros más representativos de la estructura al revisar esta condición. Así mismo, para la medición de los desplazamientos laterales se consideran todas las cargas permanentes y los empujes de terreno.

Se revisó el caso más desfavorable encontrado en la estructura, este se presenta en el centro de los muros más extensos, donde, debido a la amplitud del muro y las condiciones de apoyo, se presentan mayores desplazamientos laterales hacia el exterior del tanque.

Para considerar los desplazamientos finales en los muros de concreto se consideran los efectos del agrietamiento y el flujo plástico del concreto a largo plazo.

Para el caso del tipo de estructura que estamos analizando, los desplazamientos admisibles estarán determinados por la expresión:

$$\Delta_{adm} = \frac{L}{240}$$

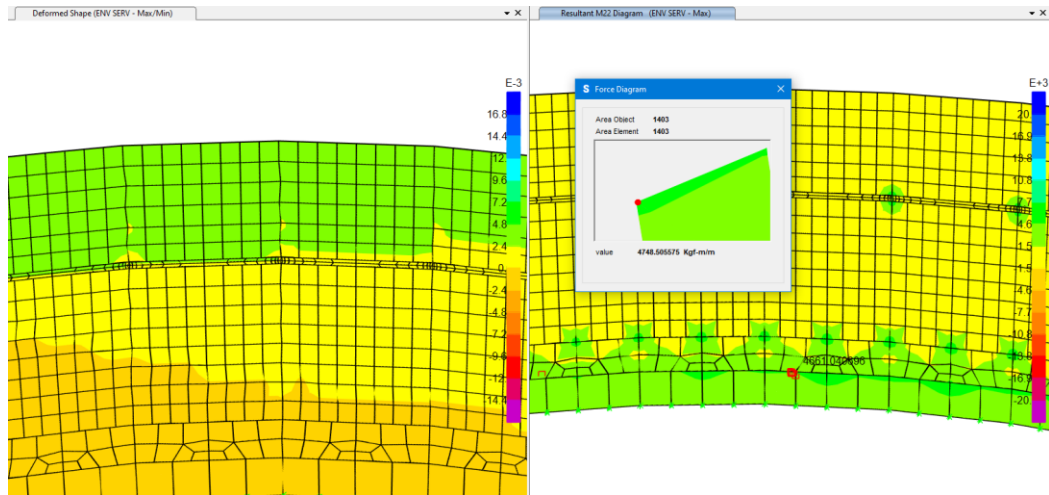


Figura 57. Vista deformada de muro y momento de flexión en la base

TABLA DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN MUROS DE CONCRETO															
ID	Dimensiones			Materiales		Refuerzo		Acciones		Desplazamientos					
	b	h	claro	$f'c$	$F_y$	$A_s$	$A_s'$	Mu	$\Delta_{\text{análisis}}$	$\Delta_{\text{inmediato}}$	$\Delta_{\text{diferido}}$	contra flecha	$\Delta_{\text{final}}$	L/240	
Muro	cm	cm	cm	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	kg-m	cm	cm	cm	cm	cm	cm	
muro periferico	100	30	280.0	300	4200	14.25	14.25	4,748	0.264	0.264	0.411	0.000	0.675	1.167	PASA

Figura 58. Tabla. Desplazamientos laterales máximos y revisión

Se observa de la Tabla que los desplazamientos laterales obtenidos del análisis estructural cumplen con los establecidos en la normativa vigente.

### Revisión por sismo de elementos de concreto

Se realizó un modelo tridimensional de la estructura mediante un software especializado para realizar el análisis sísmico y posteriormente se revisó la resistencia de los elementos de concreto que conforman a la estructura.

Se diseñó, dimensionó y analizó cada elemento estructural del proyecto, con base en un criterio de modelado matemático tridimensional que toma en

cuenta la interacción de los elementos estructurales en ambas direcciones principales ortogonales.

Los elementos estructurales fueron modelados bajo un criterio de apoyos empotrado-empotrado, por lo que se recomienda al constructor, un proceso constructivo afín a esta consideración que cumpla satisfactoriamente con el comportamiento establecido en el proceso de diseño.

El detalle de armados y secciones de los elementos antes mencionados se encuentran referenciados gráficamente en los planos estructurales dentro de los anexos.

Para la revisión y diseño de los elementos que forman la estructura se emplearon los criterios de diseño del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus respectivas Normas Técnicas Complementarias del 2017. (Normas Técnicas Complementarias de a Ciudad de México, 2017)

Para el diseño de elementos de concreto se calculó la resistencia de una franja unitaria de los Shell con el refuerzo uniformemente repartido de tal manera que se pueda comparar el momento resistente con las acciones resultantes extraídas en los diagramas de momentos flexionantes. Este procedimiento se realizó para cada elemento de espesor diferente.

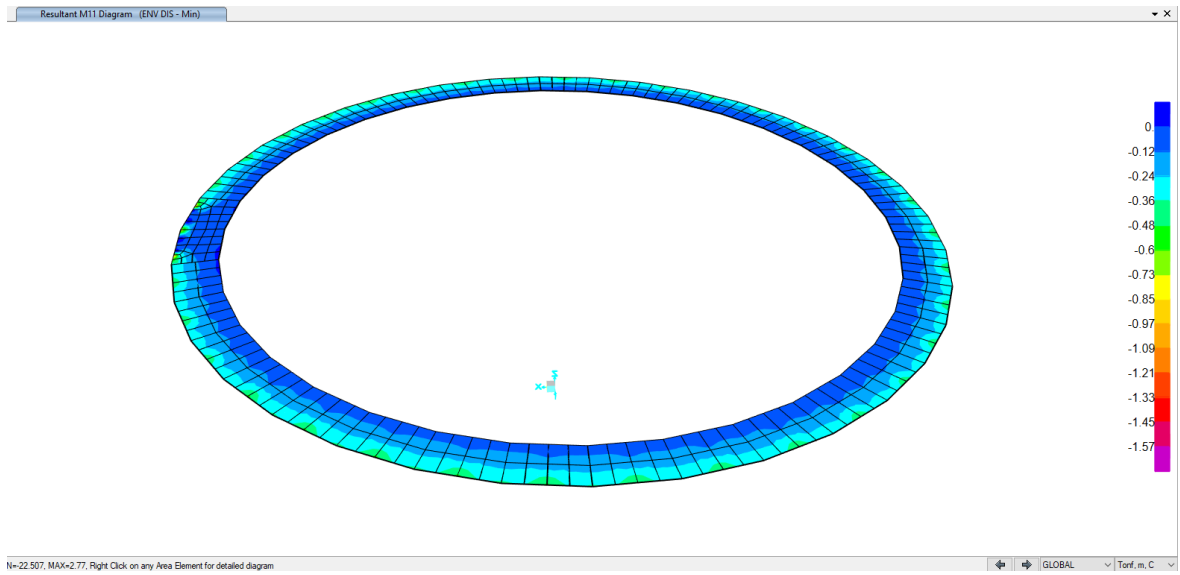


Figura 59. Momento máximo negativo en losas de 15 cm de espesor (Max = 0.9066 tonf-cm/cm)

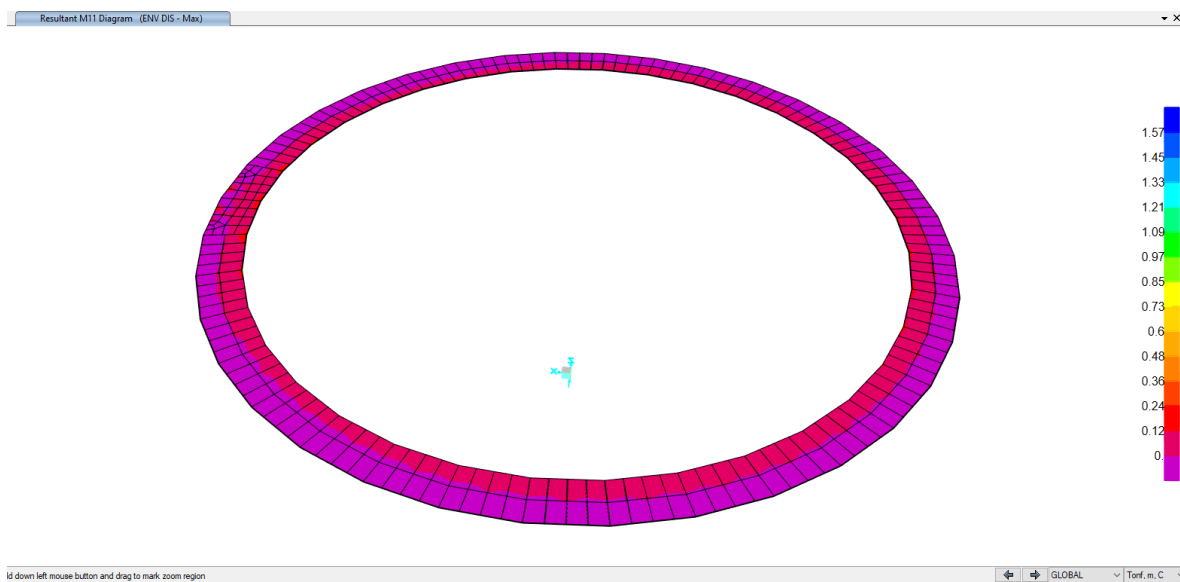


Figura 60. Momento máximo positivo en losas de 15 cm de espesor (Max = 0.1635 tonf-cm/cm)

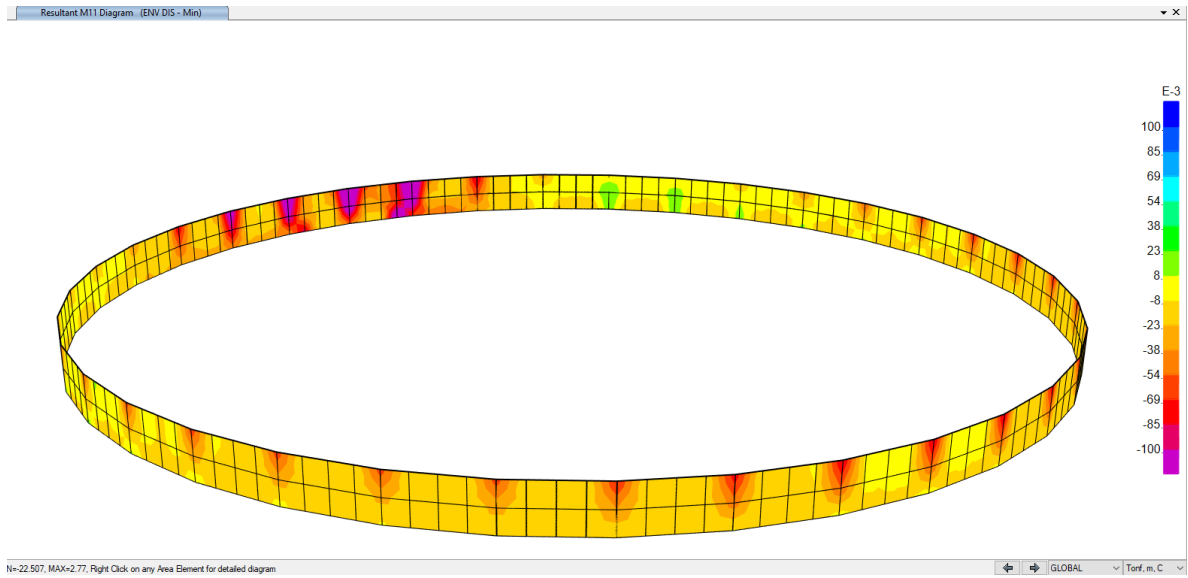


Figura 61. Momento máximo negativo muros de 15 cm de espesor (Max = 0.1698 tonf-cm/cm)

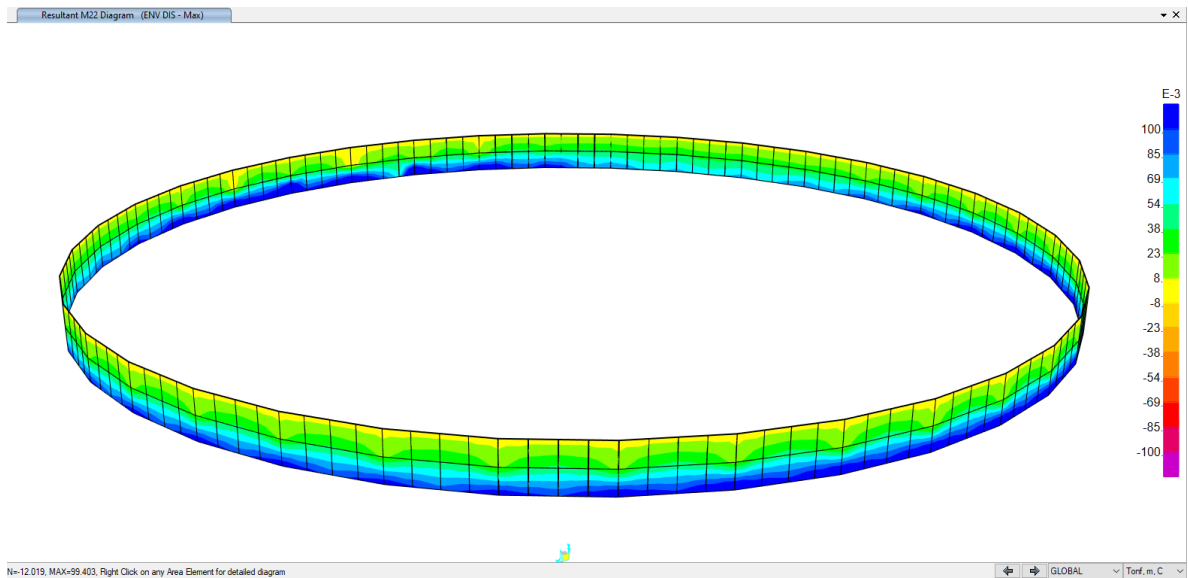


Figura 62. Momento máximo positivo en muros de 15 cm de espesor (Max = 0.1788 tonf-cm/cm)

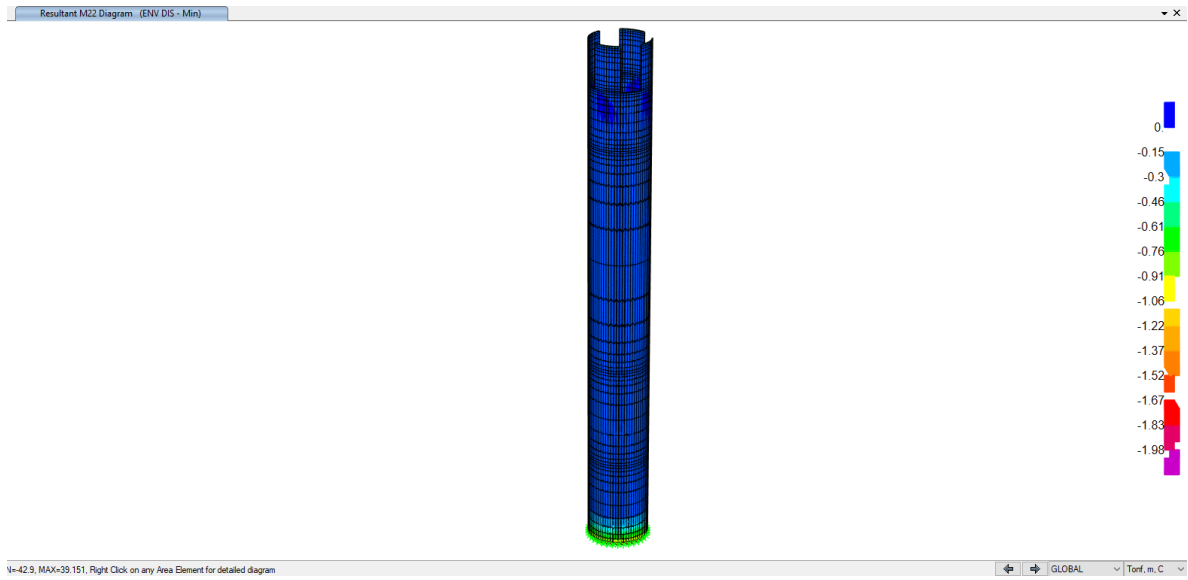


Figura 63. Momento máximo negativo muros de 20 cm de espesor (Max = 1.400 tonf-cm/cm)



Figura 64. Momento máximo positivo en muros de 20 cm de espesor (Max = 2.3945 tonf-cm/cm)

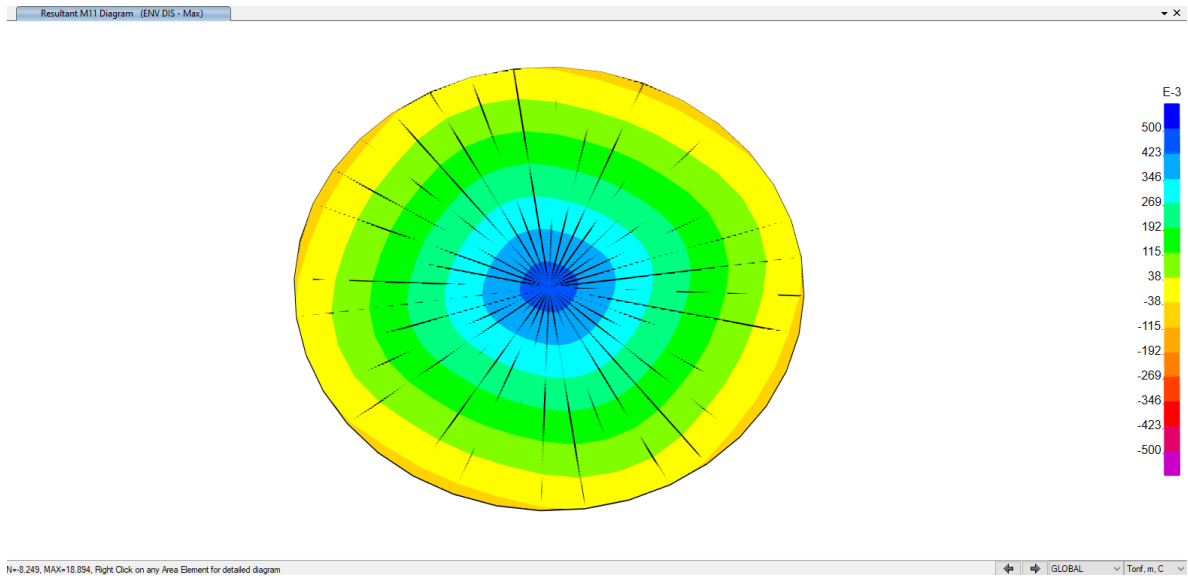


Figura 65. Momento máximo negativo losas de 25 cm de espesor (Max = 0.4829 tonf-cm/cm)

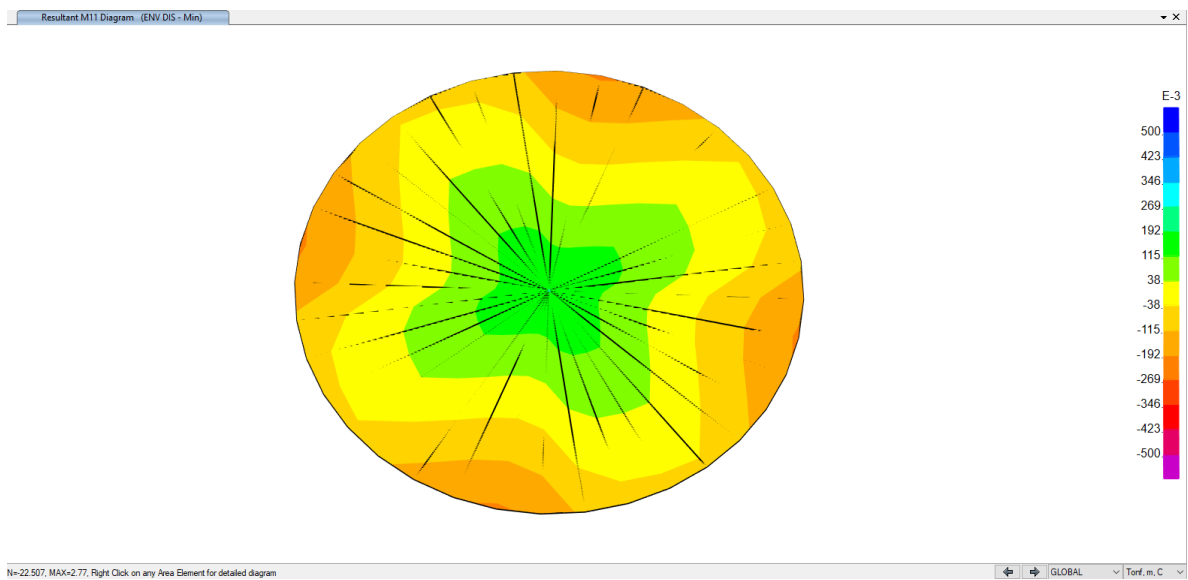


Figura 66. Momento máximo positivo en losas de 25 cm de espesor (Max = 0.2012 tonf-cm/cm)

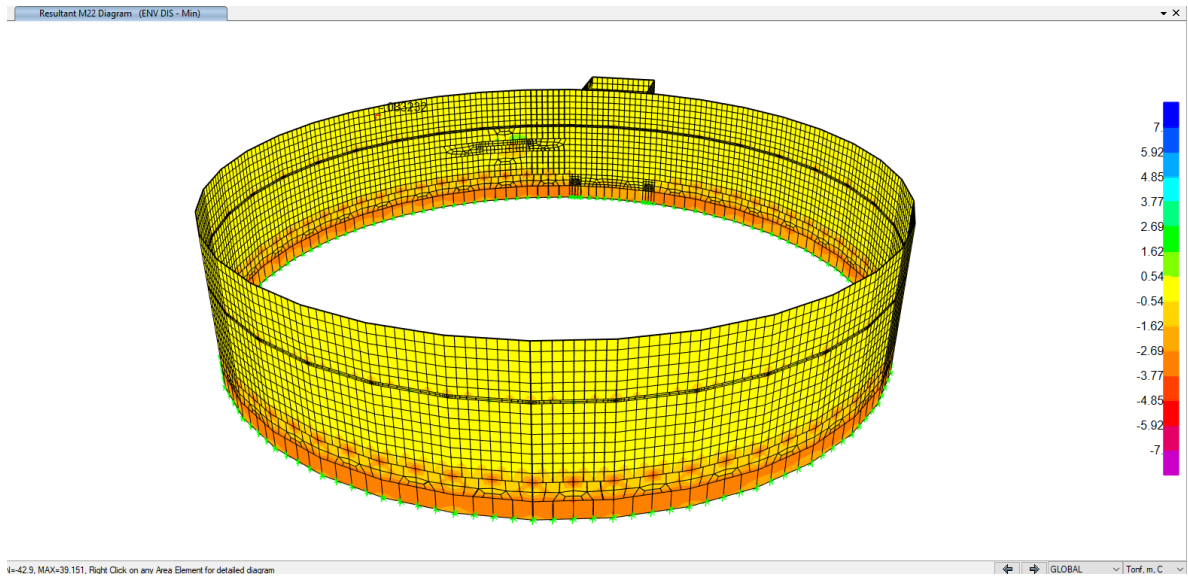


Figura 67. Momento máximo negativo muros de 30 cm de espesor (Max =5.1768 tonf-cm/cm)

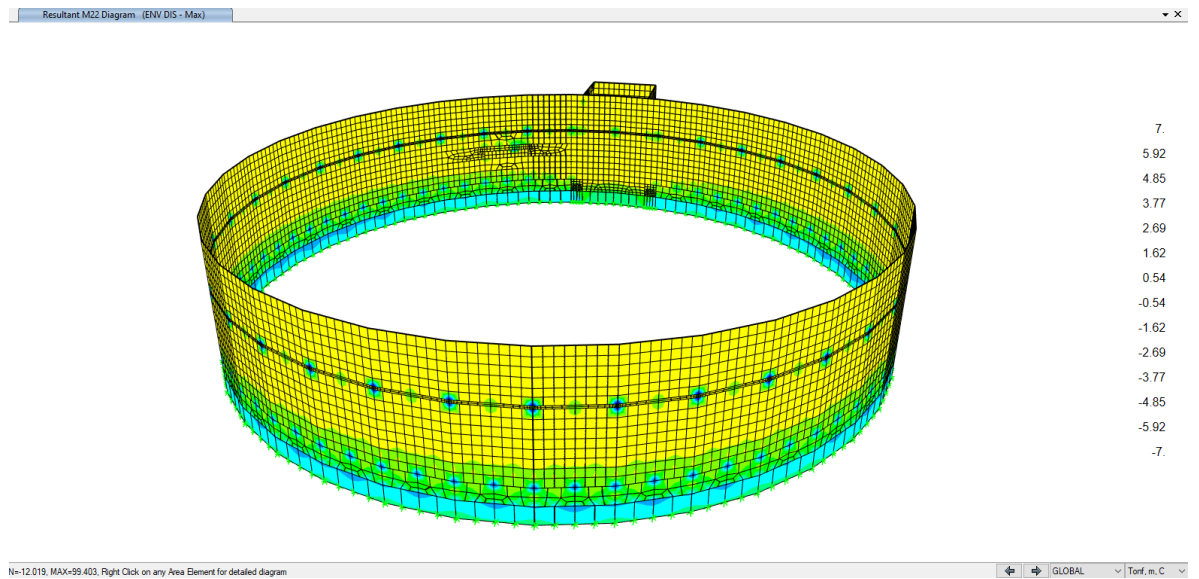


Figura 68. Momento máximo positivo muros de 30 cm de espesor (Max = 8.5228 tonf-cm/cm)

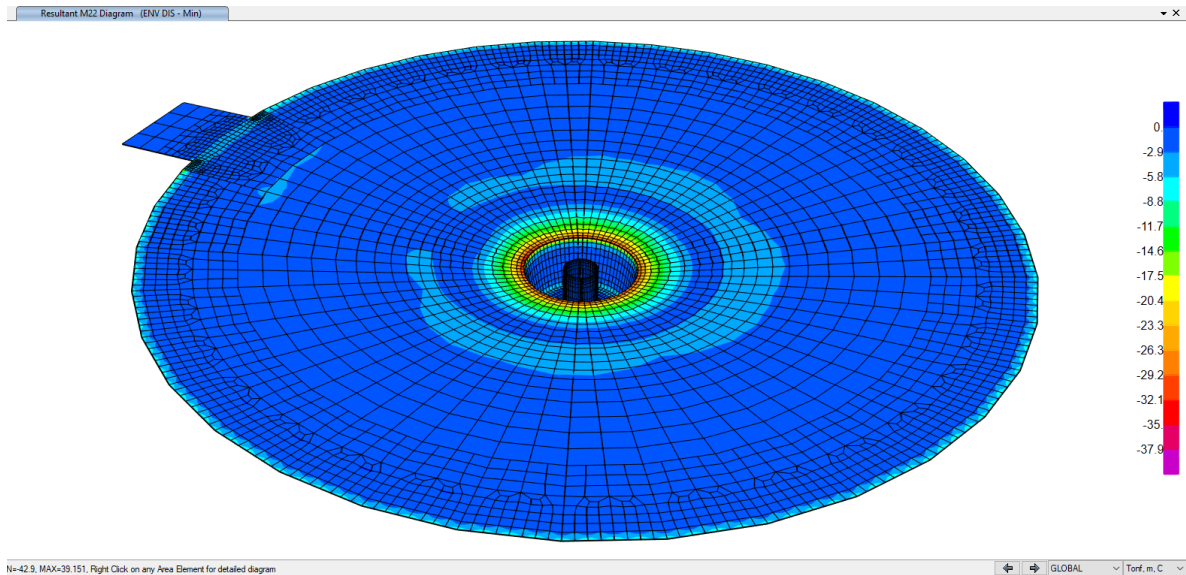


Figura 69. Momento máximo negativo en losa de cimentación (Max = 36.8946 tonf-cm/cm)

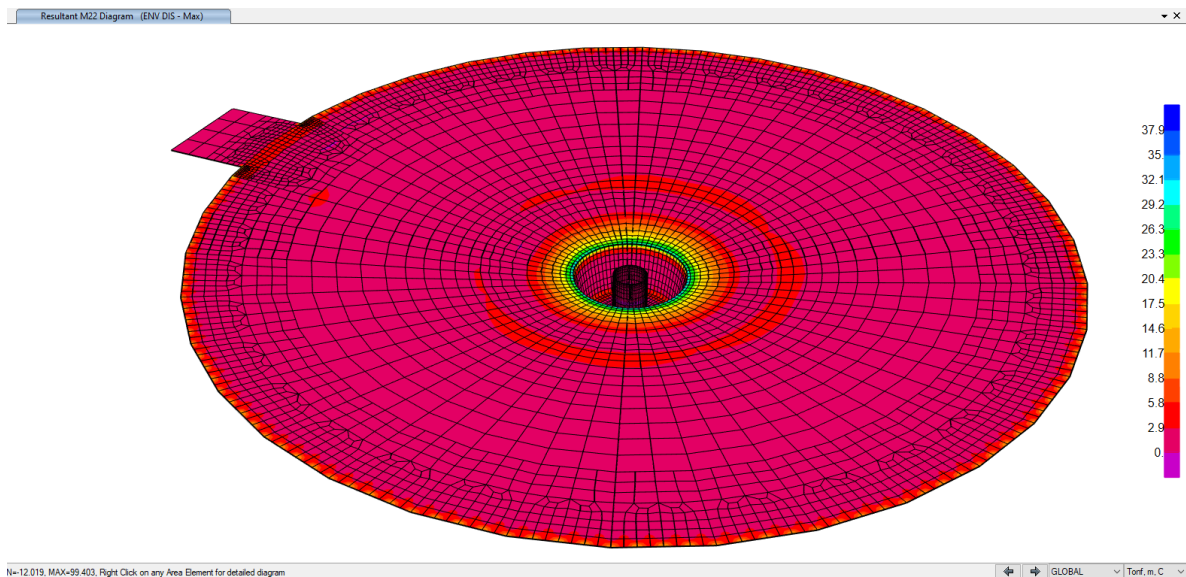


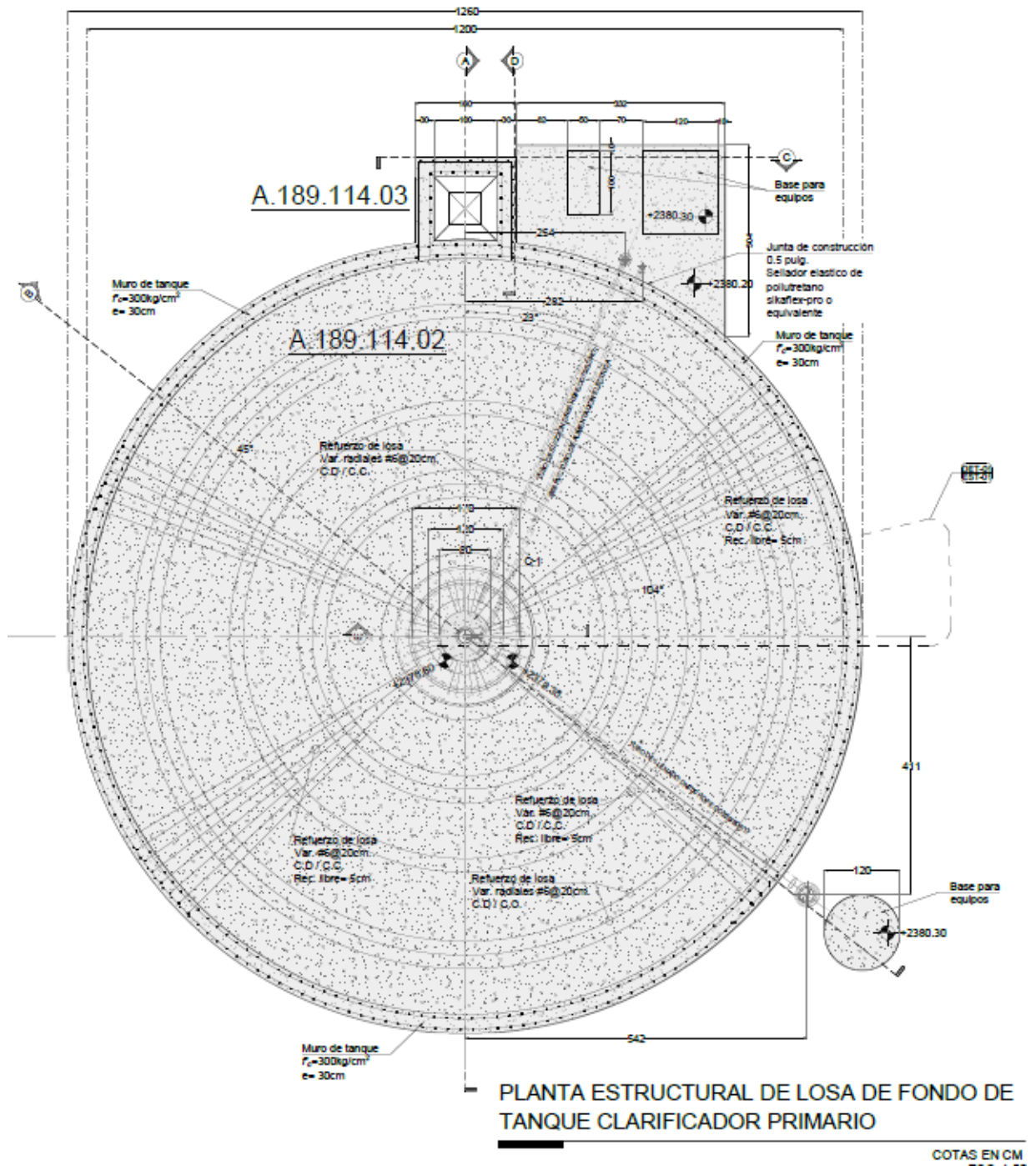
Figura 70. Momento máximo positivo en losa de cimentación (Max = 33.7433 tonf-cm/cm)

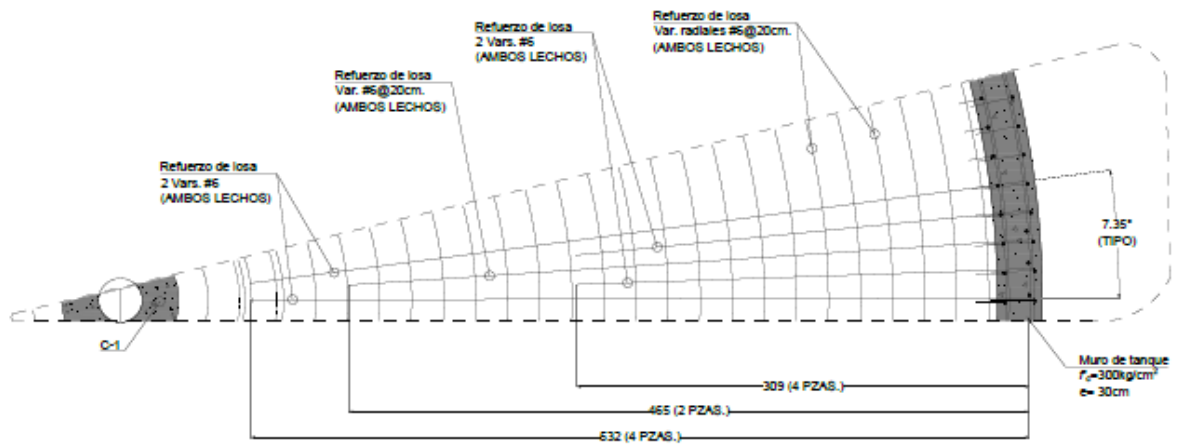
De las figuras anteriores se puede deducir que, las demandas de momentos en los elementos tipo Shell no superan los momentos resistentes calculados para cada tipo, espesor y acero colocado.

Resumen de diseño de elementos tipo shell							
Elemento	Espesor	Ubicación de acero	$M_u$ tonf-cm/cm	$A_{s_{req}}$ cm <sup>2</sup> /cm	$A_{s_{colocado}}$ cm <sup>2</sup> /cm	$M_R$ tonf-cm/cm	Revisión
Losa	15	Superior	0.907	0.0253	0.0355	1.571	Cumple
Losa	15	Inferior	0.164	0.0045	0.0355	1.571	Cumple
Muro	15	exterior	0.170	0.0047	0.0355	1.571	Cumple
Muro	15	interior	0.179	0.0049	0.0355	1.571	Cumple
Muro	20	exterior	1.400	0.0259	0.0635	3.955	Cumple
Muro	20	interior	2.395	0.0447	0.0635	3.955	Cumple
Losa	25	Superior	0.483	0.0722	0.0847	6.498	Cumple
Losa	25	Inferior	0.201	0.0722	0.0847	6.498	Cumple
Muro	30	exterior	5.177	0.0866	0.1425	13.911	Cumple
Muro	30	interior	8.523	0.0953	0.1425	13.911	Cumple
Losa	30	Superior	36.895	0.4137	0.4275	37.942	Cumple
Losa	30	Inferior	33.743	0.3731	0.4275	37.942	Cumple

Figura 71. Tabla: Resumen de diseño de elementos tipo shell

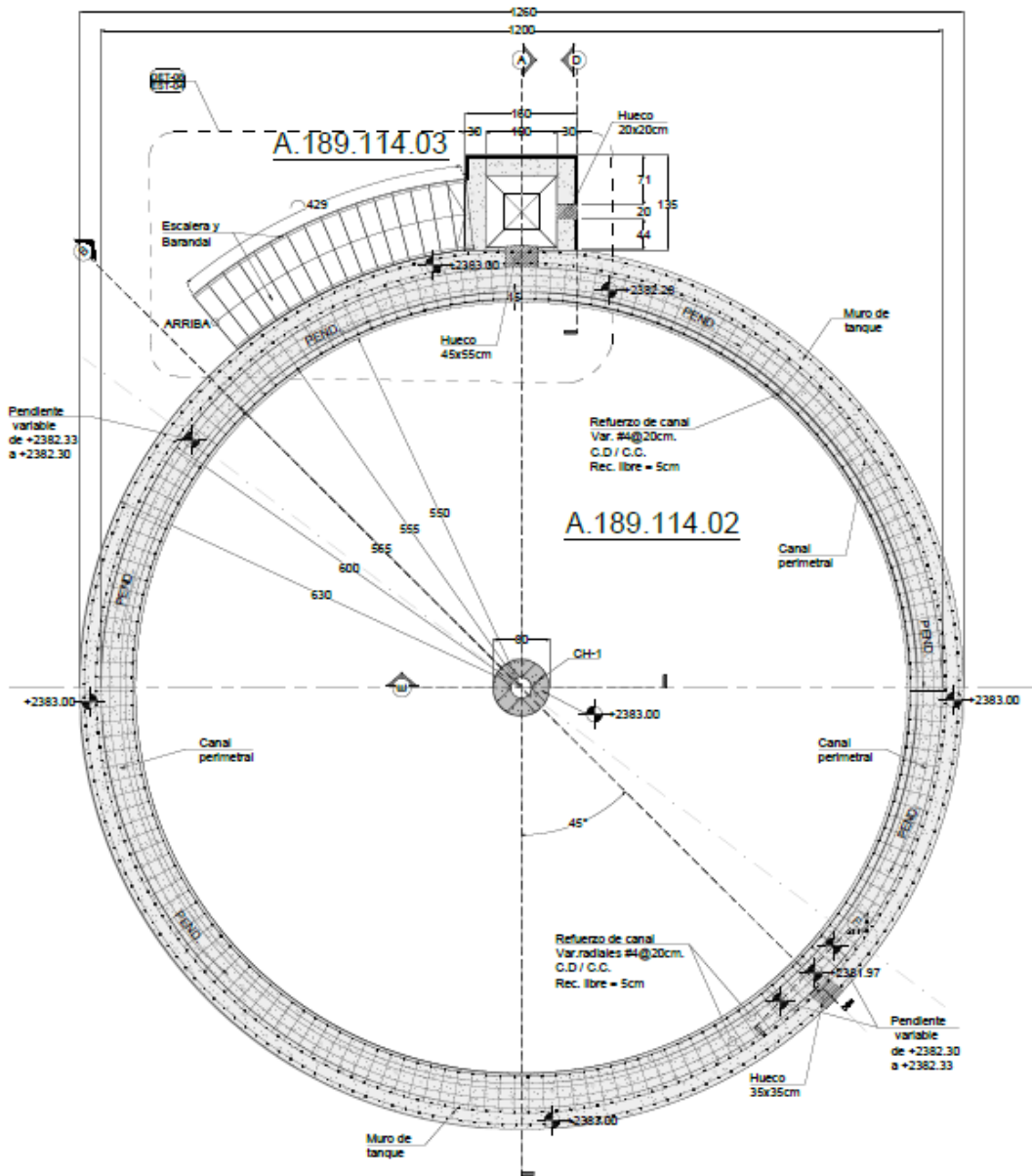
# Diseño de elementos estructurales





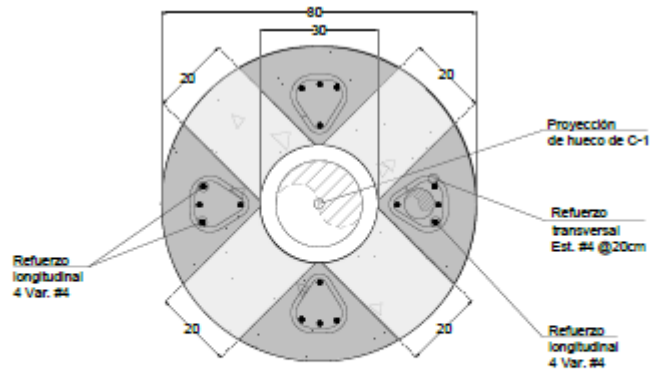
**DETALLE 1**  
**DISTRIBUCIÓN DE VARILLAS EN LOSA FONDO**

COTAS EN CM



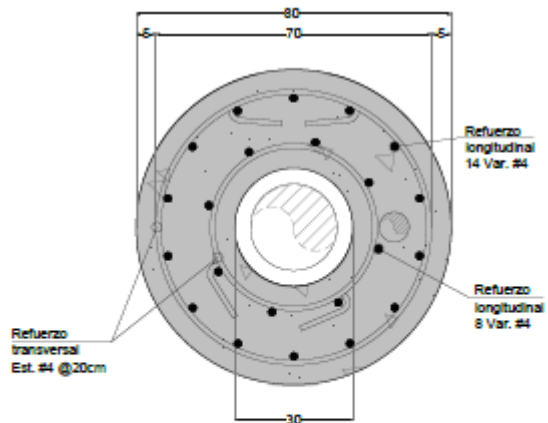
PLANTA ESTRUCTURAL DE  
TANQUE CLARIFICADOR PRIMARIO NIV. +2383.00

COTAS EN CM



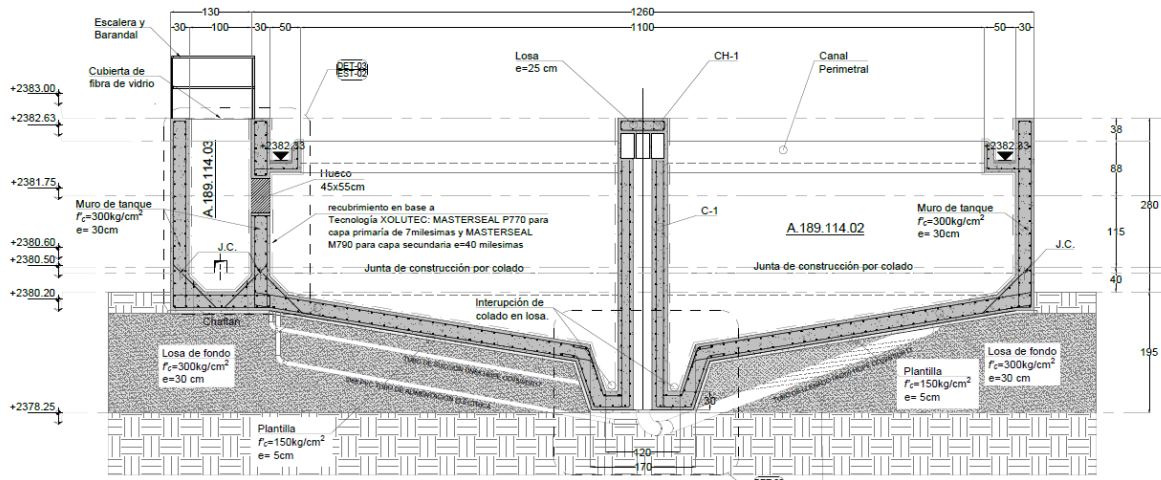
SECCIÓN TIPO  
COLUMNA CH-1  
D= 80cm

COTAS EN CM



SECCIÓN TIPO  
COLUMNA C-1  
D= 80cm

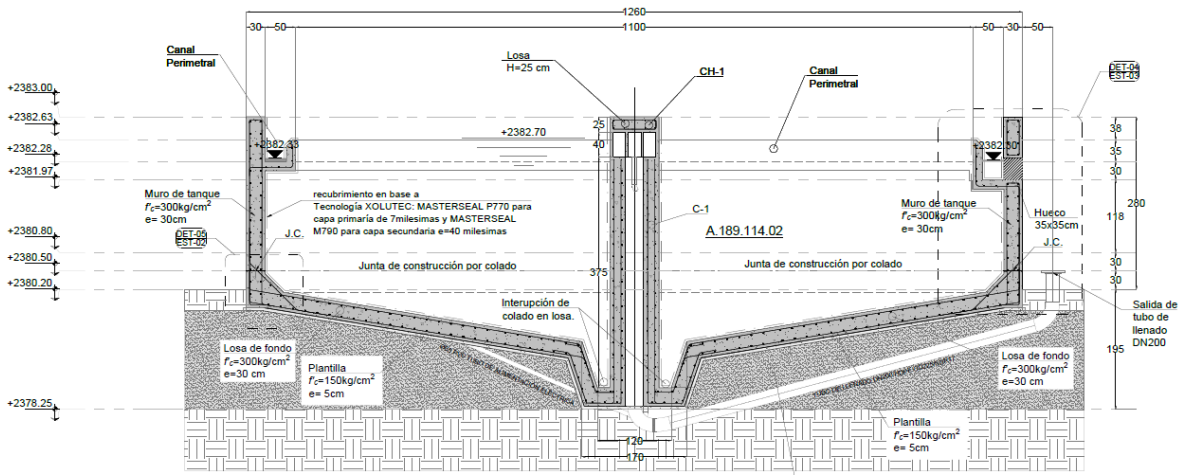
COTAS EN CM



**TANQUE CLARIFICADOR PRIMARIO  
SECCIÓN ESTRUCTURAL A**

COTAS EN CM

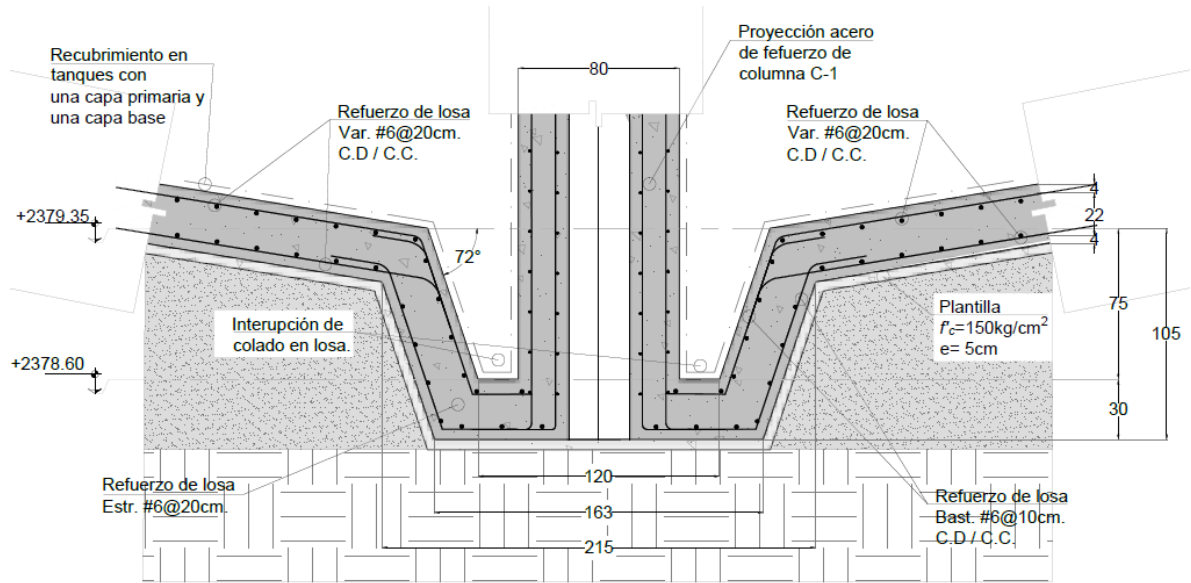
Suelo cemento en proporción 5% conformado con material de banco la cual debera de cumplir con las especificaciones de calidad de la sct, compactado al 100% de su psvm referido a la prueba ashtto modificada.



**TANQUE CLARIFICADOR PRIMARIO  
SECCIÓN ESTRUCTURAL B**

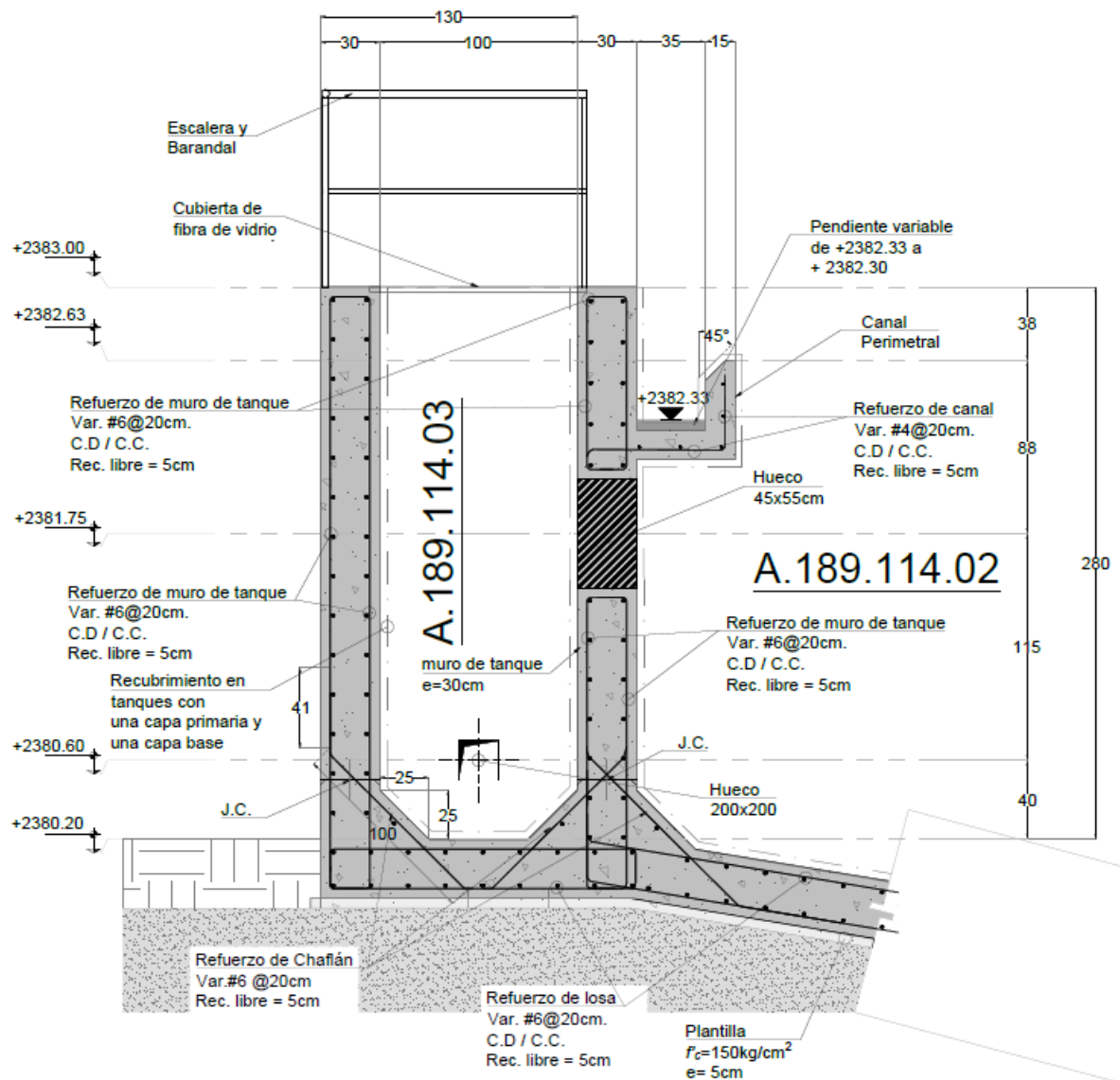
COTAS EN CM

Suelo cemento en proporción 5% conformado con material de banco la cual debera de cumplir con las especificaciones de calidad de la sct, compactado al 100% de su psvm referido a la prueba ashtto modificada.



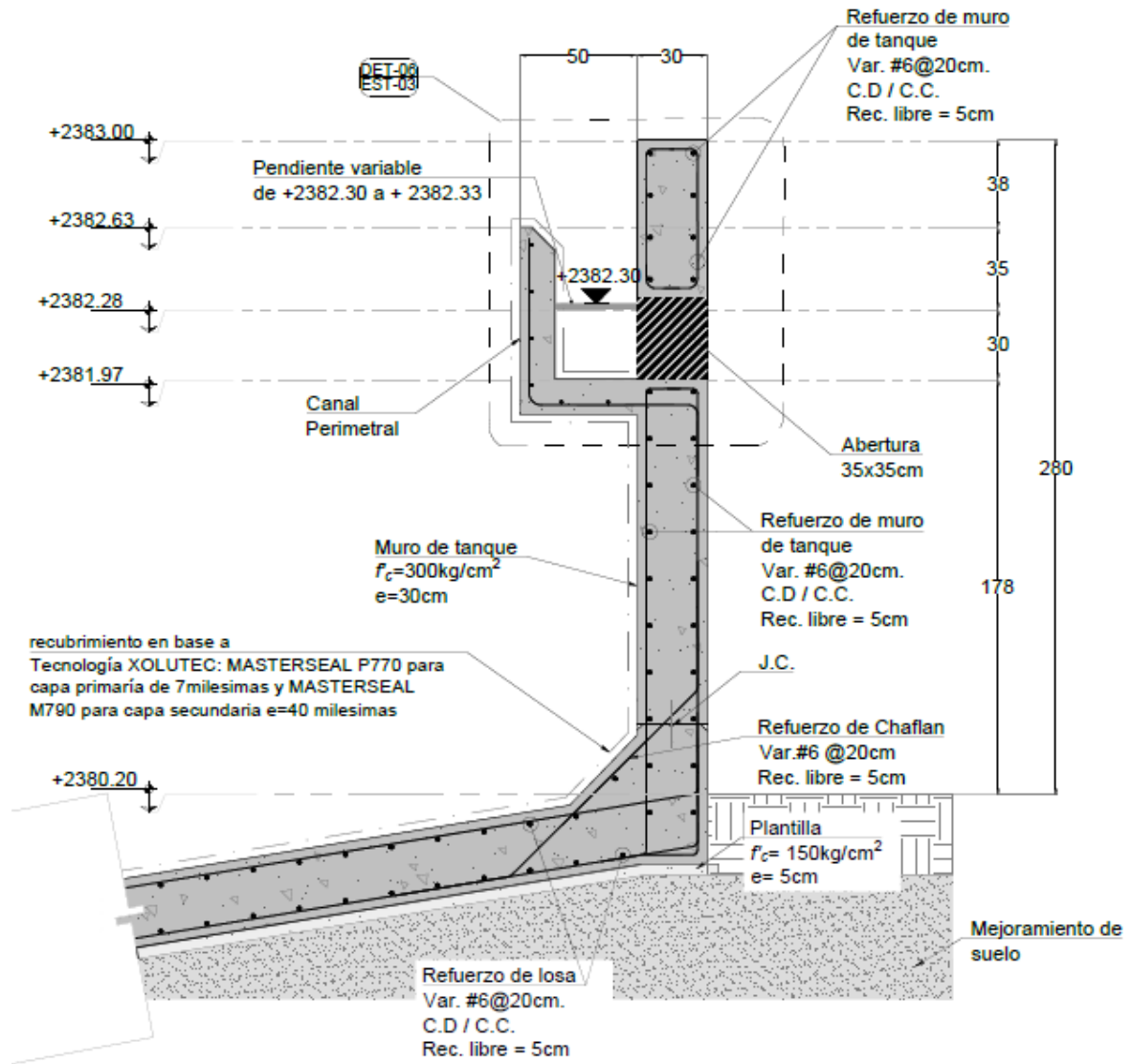
## DETALLE 2 REFUERZO DE LOSA FONDO Y CILINDRO CENTRAL

COTAS EN CM



**DETALLE 3**  
**REFUERZO EN MUROS DE TANQUE A.189.114.02**  
**Y TANQUE A.189.114.03**

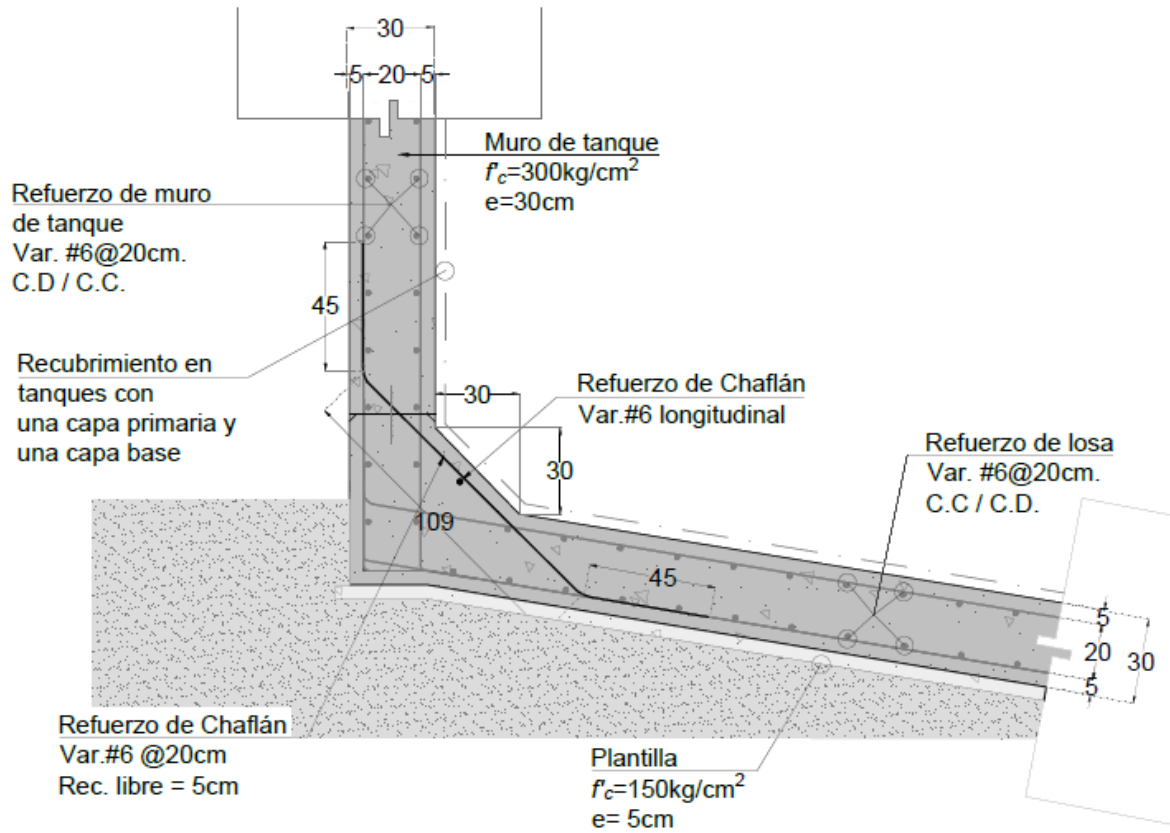
COTAS EN CM



## DETALLE 4 REFUERZO DE MURO PARA ABERTURA

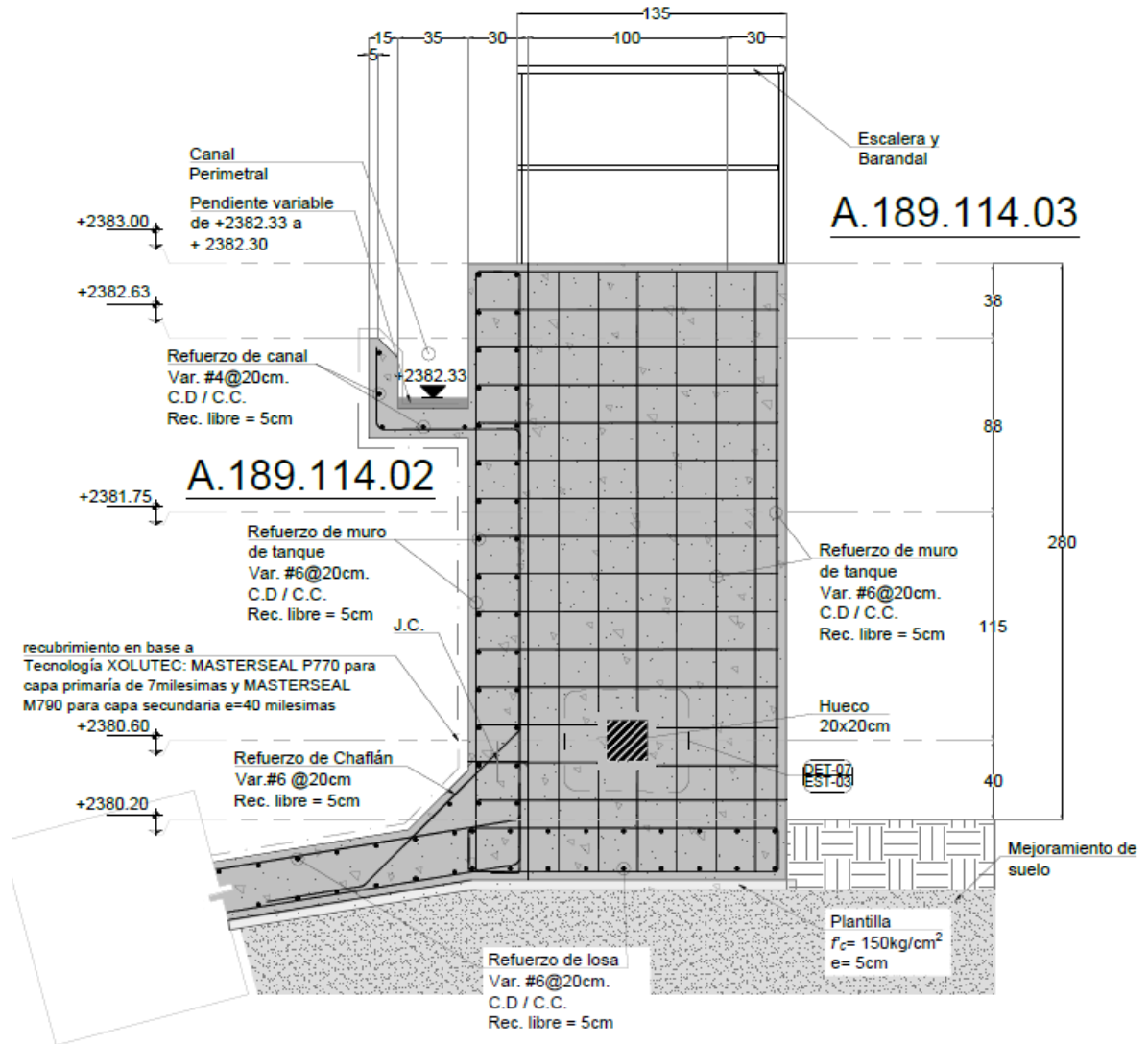
COTAS EN CM





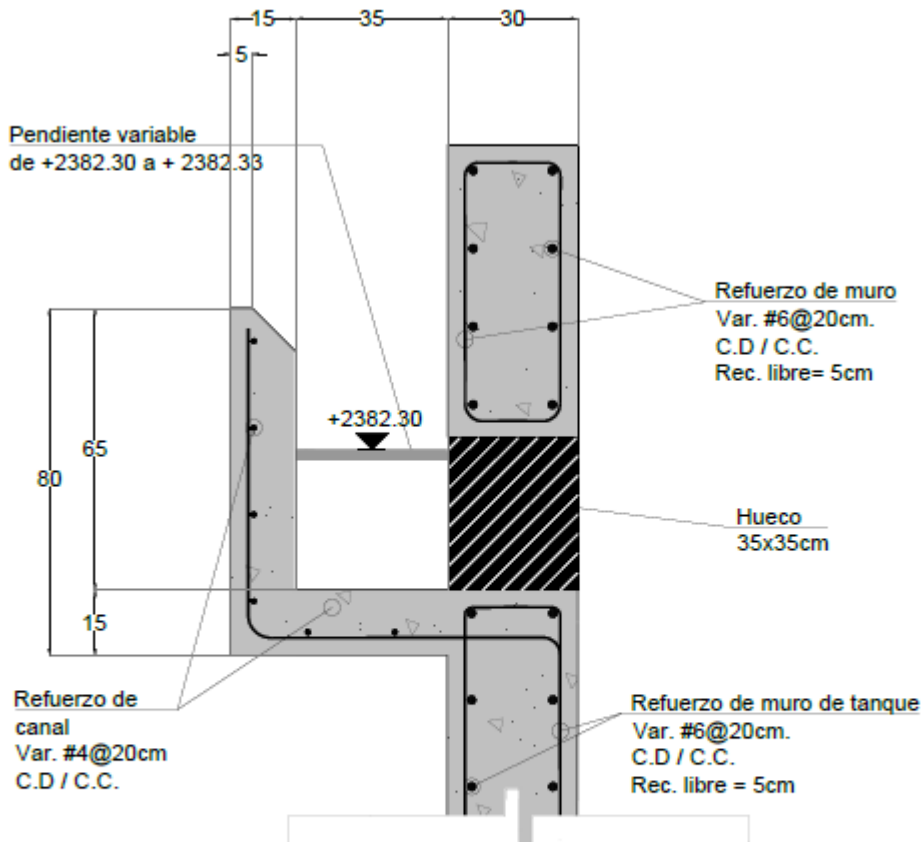
## DETALLE 5 REFUERZO DE CHAFLÁN

COTAS EN CM



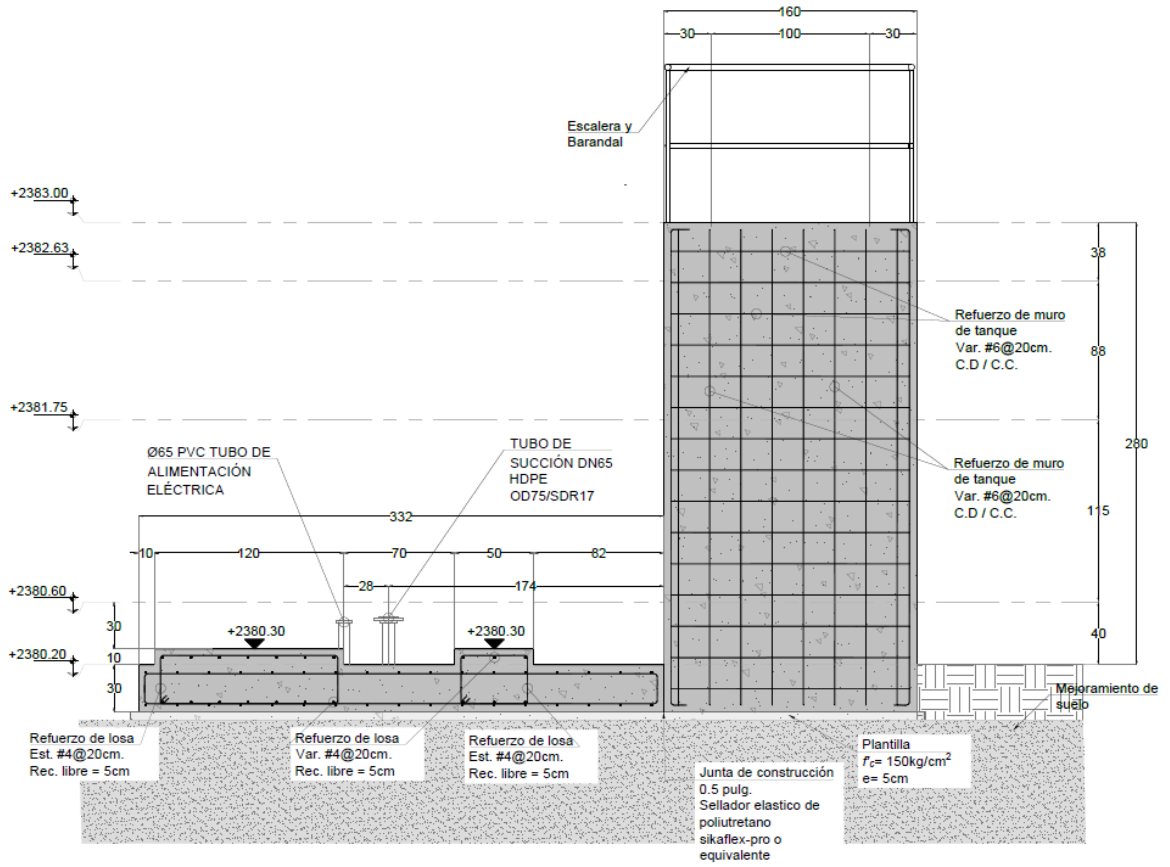
REFUERZO Y UNIÓN DE MUROS DE TANQUE  
A.189.114.03 Y A.189.114.02  
SECCIÓN ESTRUCTURAL D

COTAS EN CM



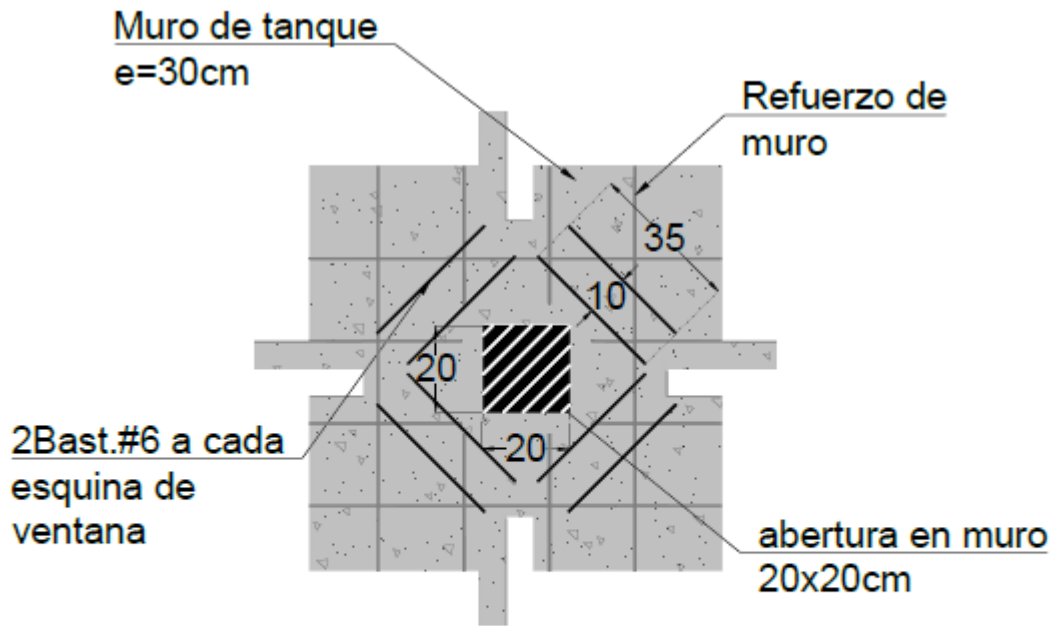
## DETALLE 6 REFUERZO DE CANAL PERIMETRAL PARA ABERTURA

COTAS EN CM



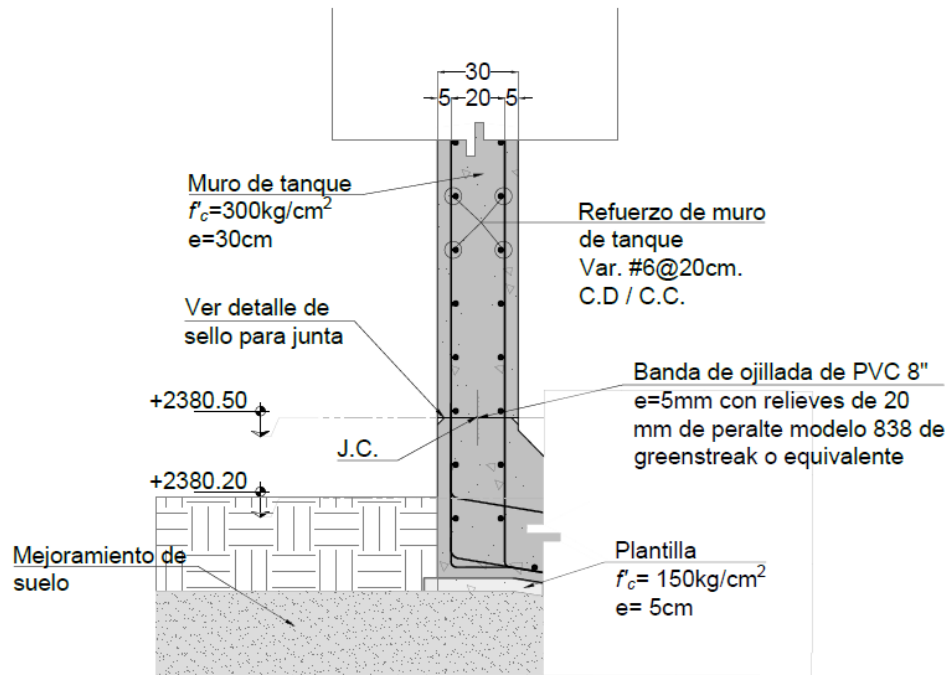
**REFUERZO DE BASE DE EQUIPOS Y TANQUE A.189.114.03**  
**SECCIÓN ESTRUCTURAL C**

COTAS ENCM



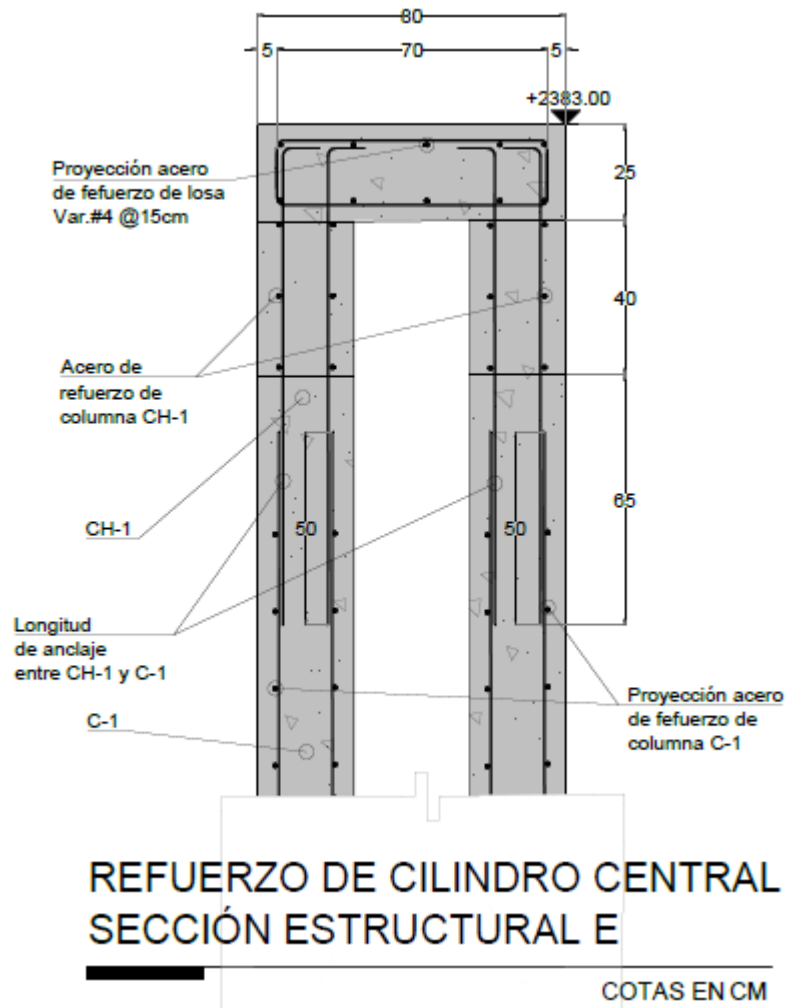
DETALLE 7  
REFUERZO ADICIONAL PARA  
ABERTURAS EN MURO

COTAS EN CM

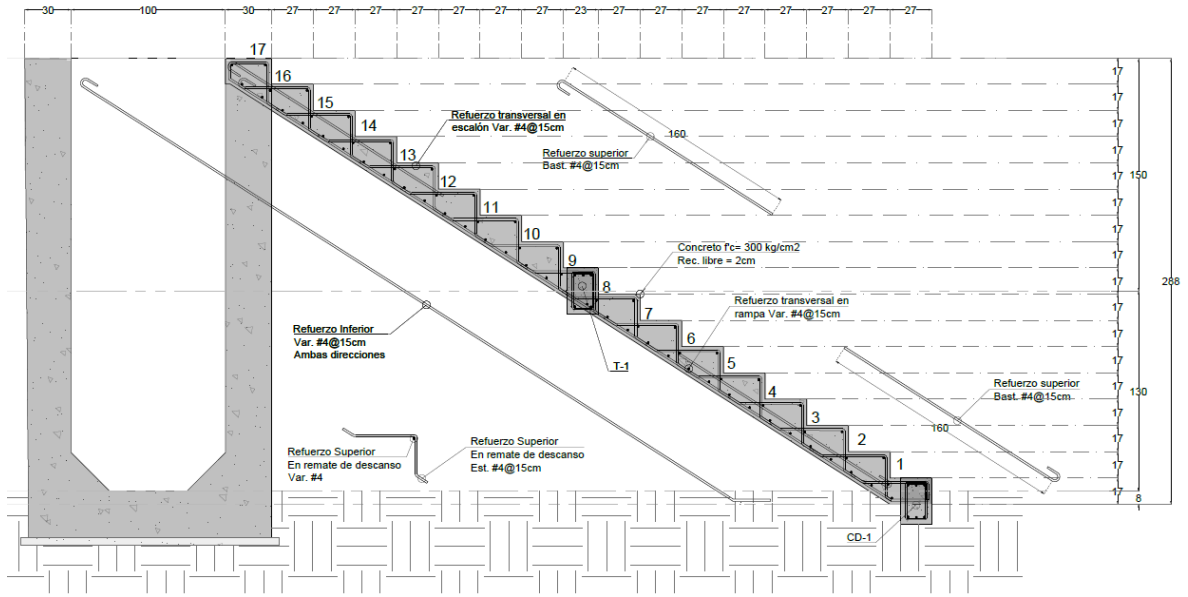


## DETALLE TIPO PARA COLOCACIÓN DE BANDA OJILLADA EN JUNTA DE CONSTRUCCIÓN

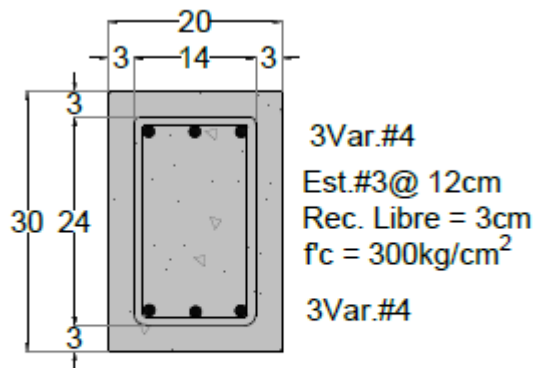
COTAS EN CM





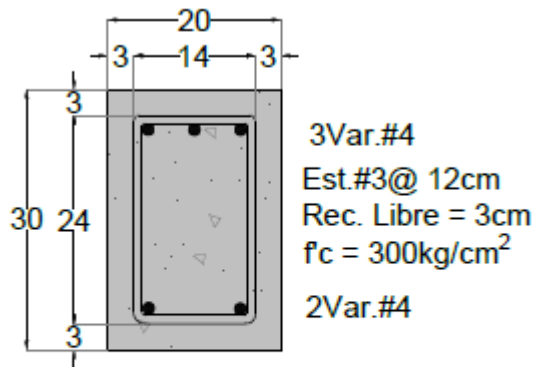


DETALLE 8 - SECCIÓN G  
 REFUERZO DE ESCALERA  
 PARA ACCESO A TANQUE  
 COTAR EN CM



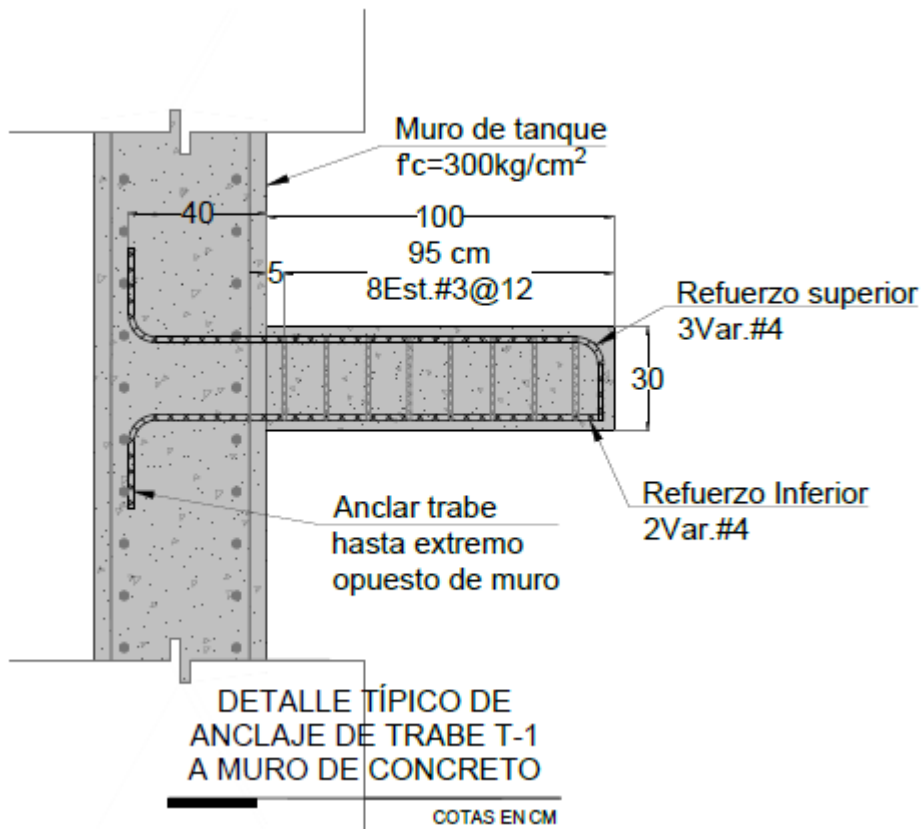
Sección tipo  
CADENA DE DESPLANTE CD-1  
20 x 30cm.

COTAS EN CM



Sección tipo  
TRABE T-1  
20 x 30cm.

COTAS EN CM



## ***Conclusiones/recomendaciones/propuesta***

Los tanques de almacenamiento cumplen con una gran variedad de aplicaciones, los tanques de concreto empleados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales son durables, funcionales, resistentes y de fácil colocación, por lo que desempeñan un papel primordial en las obras de ingeniería.

La configuración más conveniente para un depósito es aquella que para una altura y volumen dados, se tenga un perímetro mínimo, lo que implica una geometría cilíndrica. La geometría también depende de los materiales con los cuales se construirá el depósito.

Para el desarrollo de este trabajo se contó con la información de un proyecto previo, por lo que toda la metodología se aplica a una estructura cuyas dimensiones y especificaciones son determinadas por el mismo.

Para el diseño de tanques circulares de concreto reforzado se deben tomar en cuenta los efectos de las cargas y las propiedades de los materiales propuestos y las secciones de los elementos que aportan rigidez al conjunto. Para tal efecto, es necesario apearse a las Normas, Manuales aplicables, así como a la reglamentación correspondiente, que para este caso fueron: las NTC-CDMX-2017, las recomendaciones del ACI 350.6 y del MDOC-2015 para tanques superficiales.

El análisis sísmico se realizó siguiendo las recomendaciones establecidas en las normas técnicas de diseño por sismo NTC-CDMX-2017, el Manual de Obras Civiles (MDOC-2015) y el ACI 350.3.

Se realizó la modelación del tanque circular con un programa de cómputo especializado que utiliza el método de elementos tipo Shell. Gracias a este

método, se puede aseverar que los resultados obtenidos son los adecuados. Así mismo, al utilizar este método, se verifica que el espesor de las paredes del tanque propuesto en el proyecto es el adecuado al comparar las fuerzas que actúan con la resistencia de los materiales utilizados.

## **Bibliografía**

- ACI. (2007). *Diseño Sísmico de Estructuras Contenedoras de Líquidos (ACI 350.3-01) y Comentarios ((350.3R-01)*.
- Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo*. México.
- CONAGUA. (2009). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, "Estudios Técnicos para Proyectos de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño Estructural"*. México.
- DICIMISA, EMS-CCMH-22-16. (2022). *Estudio de Mecánica de Suelos para el proyecto de rehabilitación de la PTAR en la Planta de Malta Grajales*.
- Henry, P. E. (2022). *Calibración Modelo Dinámico de Housner - ACI 350.3R-20*. CEINTPERU.
- Ingeniería y Construcciones Ambientales S.A. de C.V. (septiembre de 2022). *Alcance Obras Civiles para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Grajales, Puebla - México*. Puebla, México.
- Normas Técnicas Complementarias de a Ciudad de México. (2017). *NTC*.
- Pavón Rodríguez, V. M. (Octubre de 2001). *Diseño y construcción de estructuras de concreto para contener líquidos*. México: Fundación ICA.
- PCA. (2002). *Design of liquid-containing concrete structures for earthquake forces*.
- Reglamento de Construcción de la Ciudad de México*. (2017).

## Anexos



Puebla, Pue. A 24 de noviembre de 2023

A Quien Corresponda:

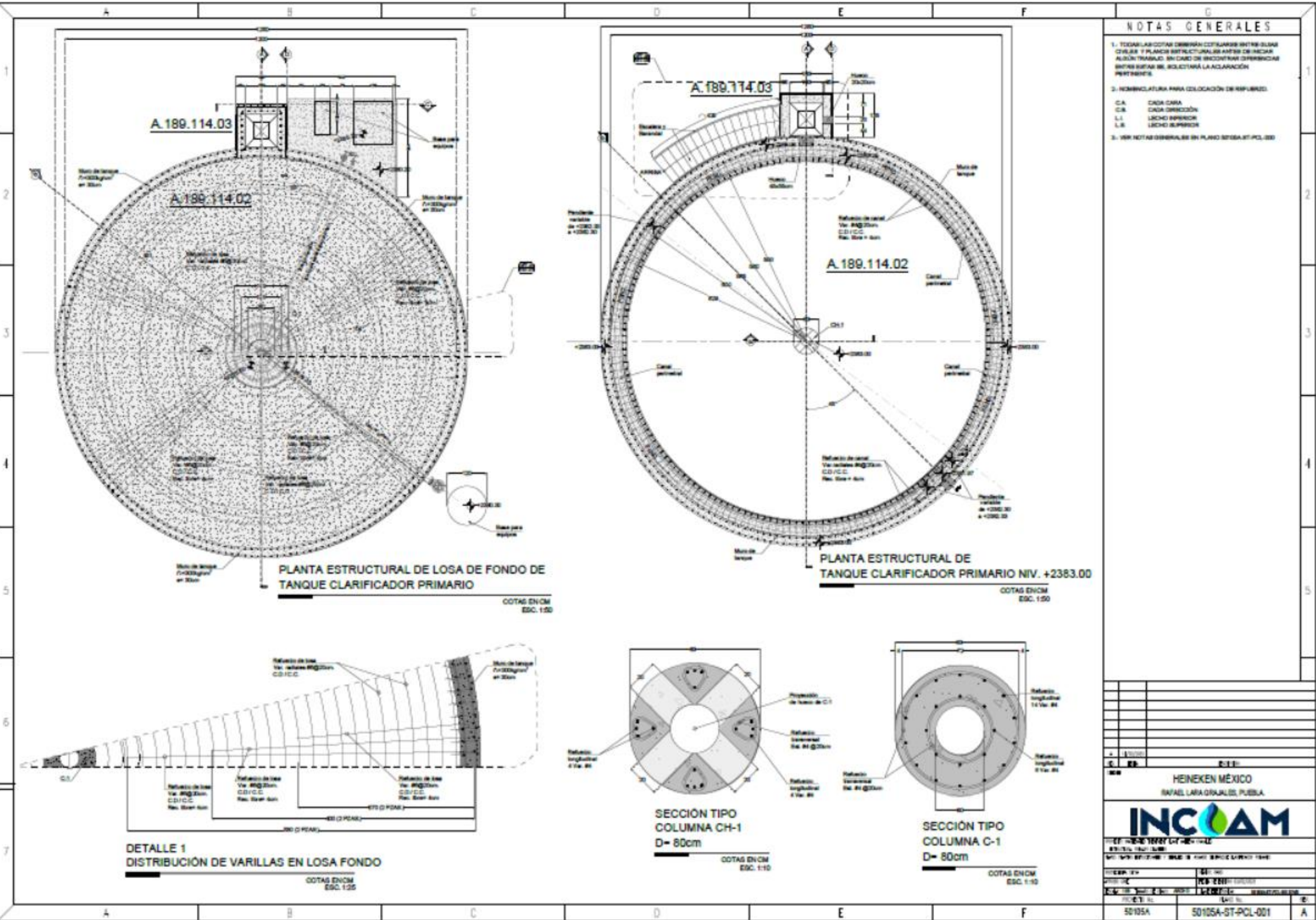
Por medio de la presente, autorizo que toda información con relación al "Diseño Estructural del Tanque Circular de Concreto Reforzado para la PTAR de la planta de Malta de la empresa Heineken en Grajales, Puebla. Se encuentra contenida en la Tesina de la Srta. Bárbara Esther González López para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Estructural.

Agradeciendo de antemano la atención y facilidades que le puedan brindar, se extiende la presente para los fines académicos que a la interesada convengan.

Atentamente.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'José Fernando Vélez Lastra', is written over a large, faint, circular graphic that resembles a water drop with a leaf inside.

Arq. José Fernando Vélez Lastra  
Director General



**NOTAS GENERALES**

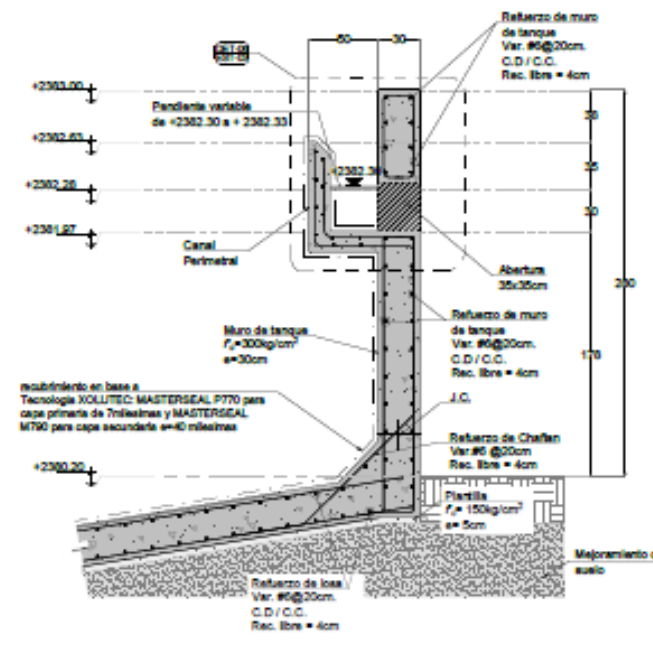
1. TODAS LAS COTAS DEBEN COLOCARSE ENTRE ELIMINAR CIVILES Y PLANOS ESTRUCTURALES ANTES DE INICIAR ALGUN TRABAJO. EN CASO DE ENCONTRAR DIFERENCIAS ENTRE ESTOS, SELECTAR LA ACLARACIÓN PERTINENTE.
2. NOMENCLATURA PARA COLOCACIÓN DE REFUERZO:
  - C.A. CADA CARA
  - C.B. CADA DIRECCIÓN
  - L.I. LECHO INFERIOR
  - L.S. LECHO SUPERIOR
3. VER NOTAS GENERALES EN PLANO 50105A-ST-PCL-000

HEINEKEN MÉXICO	
RAFAEL LARA ORJUELOS, PUEBLA.	
<b>INCOAM</b>	
PROYECTO: 50105A-ST-PCL-001	
FECHA: 20/03/2017	
DISEÑO: [Nombre]	
VERIFICACIÓN: [Nombre]	
AUTORIZACIÓN: [Nombre]	
50105A	50105A-ST-PCL-001

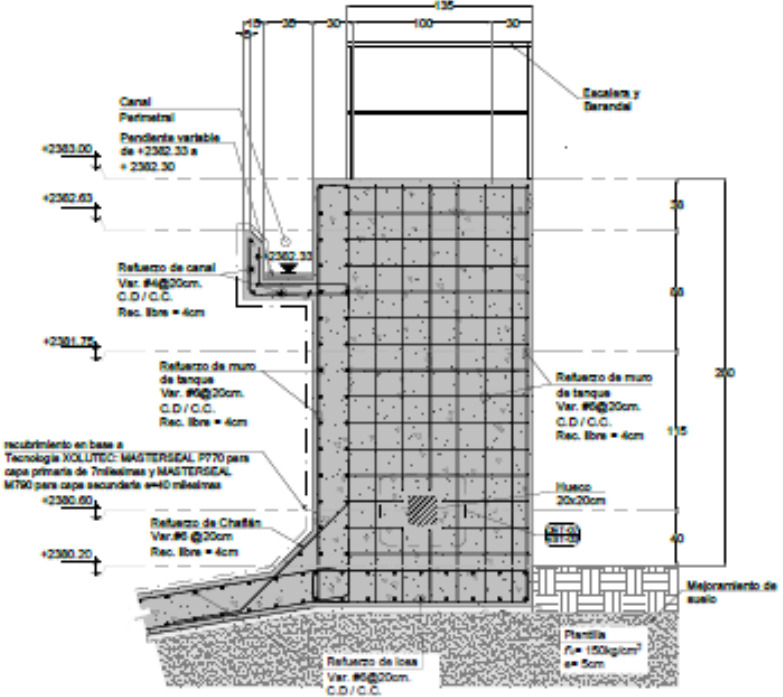


NOTAS GENERALES

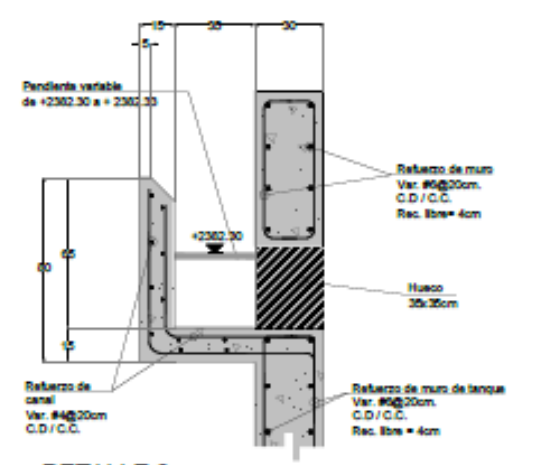
- 1- TODAS LAS COTAS DEBERÁN COTEJARSE ENTRE GUÍAS CIVILES Y PLANOS ESTRUCTURALES ANTES DE INICIAR ALGÚN TRABAJO. EN CASO DE ENCONTRAR DIFERENCIAS ENTRE ESTAS SE, SOLICITARÁ LA ACLARACIÓN PERTINENTE.
- 2- NOMENCLATURA PARA COLOCACIÓN DE REFUERZO:  
C.A. CADA CARA  
C.B. CADA DIRECCIÓN  
L.I. LECHO INFERIOR  
L.S. LECHO SUPERIOR
- 3- VER NOTAS GENERALES EN PLANO 50105A-ST-PCL-003



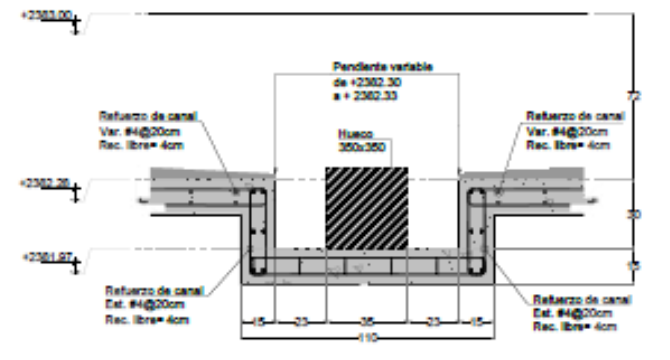
**DETALLE 4**  
**REFUERZO DE MURO PARA ABERTURA**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:25



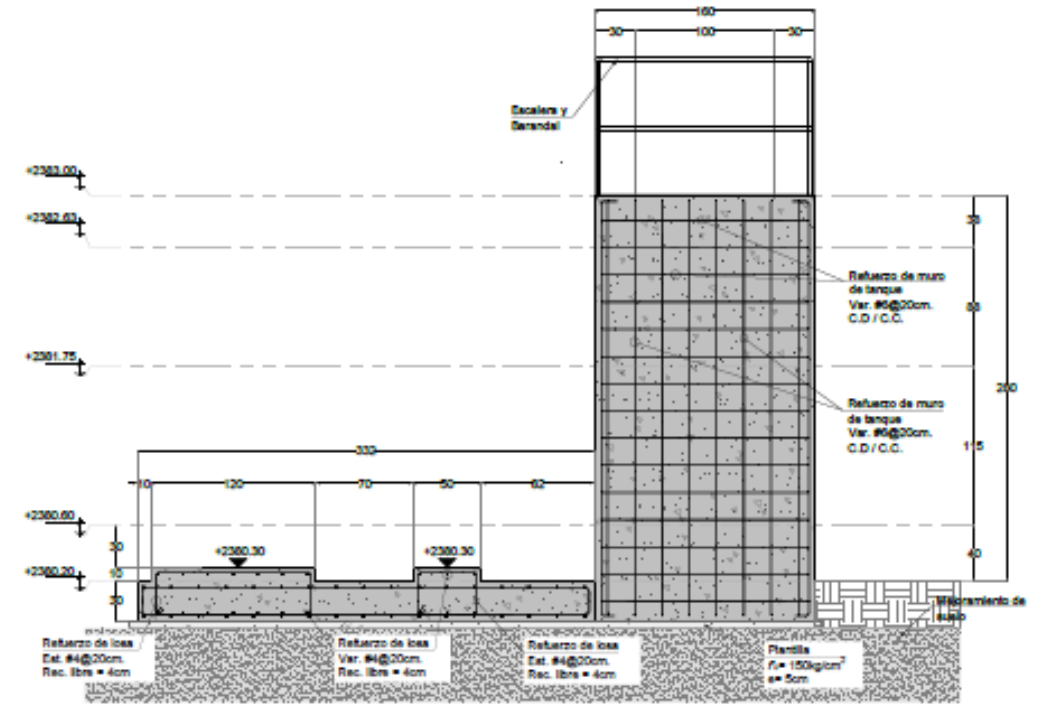
**REFUERZO DE TANQUE A.189.114.03**  
**SECCIÓN ESTRUCTURAL D**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:25



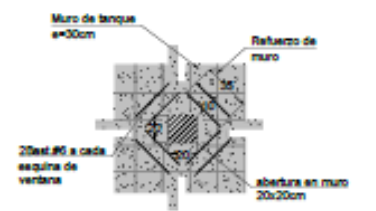
**DETALLE 6**  
**REFUERZO DE CANAL PERIMETRAL PARA ABERTURA**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:15



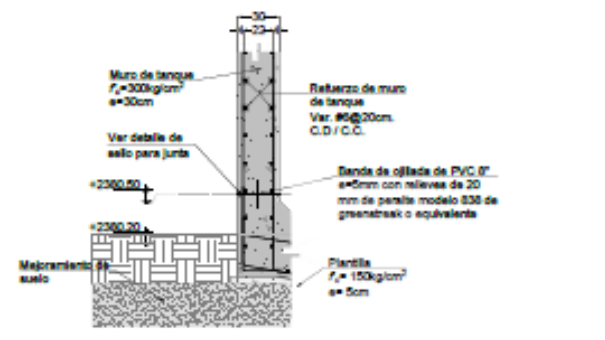
**REFUERZO DE CANAL PERIMETRAL PARA ABERTURA**  
**SECCIÓN ESTRUCTURAL F**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:15



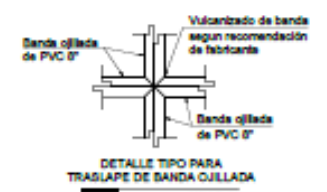
**REFUERZO DE BASE DE EQUIPOS Y TANQUE A.189.114.03**  
**SECCIÓN ESTRUCTURAL C**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:25



**DETALLE 7**  
**REFUERZO ADICIONAL PARA ABERTURAS EN MURO**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:25

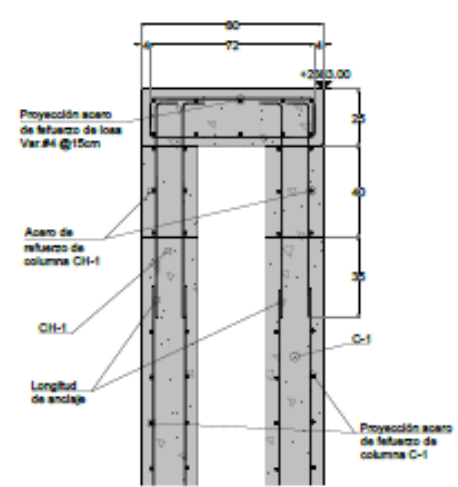


**DETALLE TIPO PARA COLOCACIÓN DE BANDA OJILLADA EN JUNTA DE CONSTRUCCIÓN**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:25



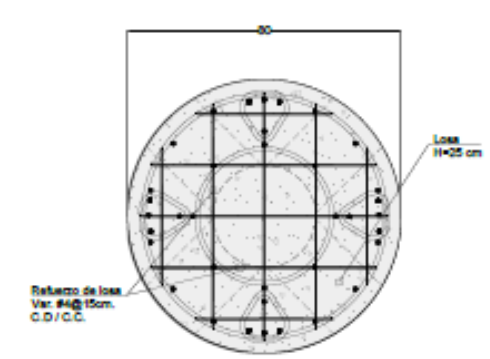
**DETALLE TIPO PARA COLOCACIÓN DE SELLO EN JUNTA DE CONSTRUCCIÓN**  
COTAS EN CM  
ESC. 1:25

PROYECTO	50105A	PLANO No.	50105A-ST-PCL-003
FECHA	11/07/2023	ESCALA	VER
<b>HEINEKEN MÉXICO</b> RAFAEL LARA GRAJALES, PUEBLA  INCOAM			
PROYECTISTA	ING. RAFAEL LARA GRAJALES	REVISOR	ING. RAFAEL LARA GRAJALES
PROYECTO No.	50105A	PLANO No.	50105A-ST-PCL-003
FECHA	11/07/2023	ESCALA	VER



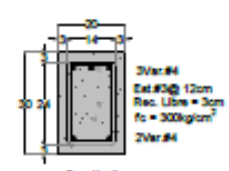
**REFUERZO DE CILINDRO CENTRAL SECCIÓN ESTRUCTURAL E**

COTAS EN CM ESC. 1:15

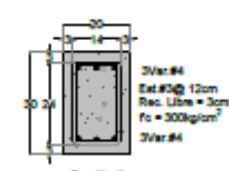


**SECCIÓN TIPO DISTRIBUCIÓN DE VARILLAS EN LOSA DE COLUMNA**

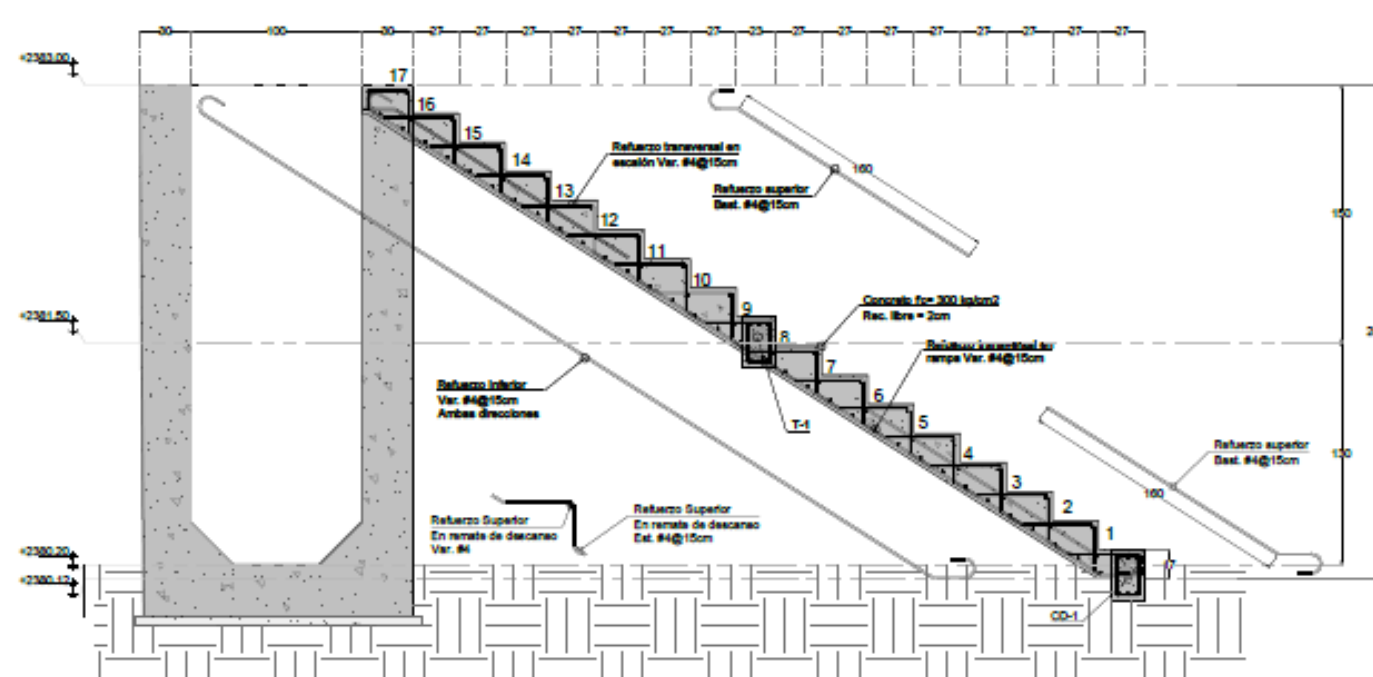
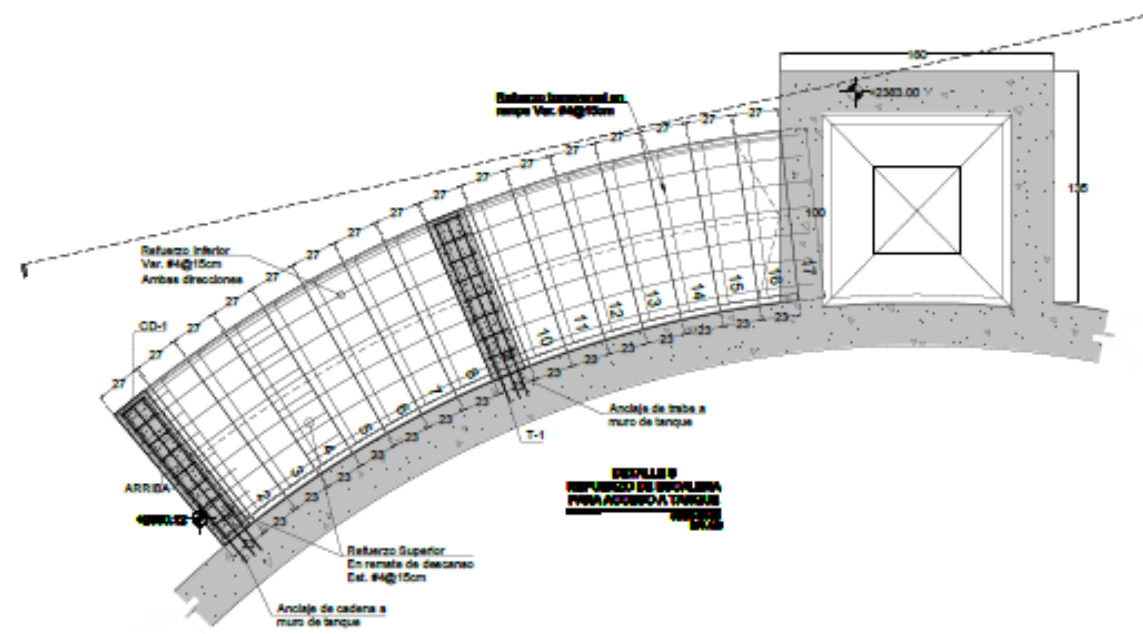
COTAS EN CM ESC. 1:10



Sección tipo TRABE T-1 20 x 30cm



Sección tipo CADENA DE DESPLANTE CD-1 20 x 30cm



**DETALLE B - SECCIÓN G REFUERZO DE ESCALERA PARA ACCESO A TANGUE**

**NOTAS GENERALES**

- 1.- TODAS LAS COTAS DEBERÁN COTEJARSE ENTRE GUÍAS CIVILES Y PLANOS ESTRUCTURALES ANTES DE INICIAR ALGÚN TRABAJO. EN CASO DE ENCONTRAR DIFERENCIAS ENTRE ESTAS SE, SOLICITARÁ LA ACLARACIÓN PERTINENTE.
- 2.- NOMENCLATURA PARA COLOCACIÓN DE REFUERZO:  
C.A. CADA CARA  
C.B. CADA DIRECCIÓN  
L.I. LECHO INFERIOR  
L.S. LECHO SUPERIOR
- 3.- VER NOTAS GENERALES EN PLANO 50105A-ST-PCL-000

PROYECTO: 50105A		FECHA: 14/05/2023	
PROYECTANTE: INCOAM		DISEÑADOR: RAFAEL LARA GRAJALES	
PROYECTO: 50105A		FECHA: 14/05/2023	
PROYECTANTE: INCOAM		DISEÑADOR: RAFAEL LARA GRAJALES	
PROYECTO No.:	50105A	PLANO No.:	50105A-ST-PCL-004
		Escala: A	