

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO ESTRUCTURAL EN CONCRETO ARMADO DE  
UN RESERVORIO CIRCULAR DE  
ALMACENAMIENTO DE AGUA POTABLE DE 2700 M<sup>3</sup>  
UBICADO EN LA CIUDAD DE LIMA**

**Trabajo de suficiencia profesional para obtener el título profesional de  
Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Renzo Adolfo Montenegro Carrillo

**ASESOR:**

Ing. Diego Villagómez Molero


Lima, octubre, 2022

## Declaración jurada de autenticidad

Yo, Diego Villagómez Molero, docente de la Facultad de Ciencias de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado "**DISEÑO ESTRUCTURAL EN CONCRETO ARMADO DE UN RESERVORIO CIRCULAR DE ALMACENAMIENTO DE AGUAPOTABLE DE 2700 M3 UBICADO EN LA CIUDAD DE LIMA**" del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) MONTENEGRO CARRILLO, RENZO RODOLFO dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene **un índice de puntuación de similitud de 26 %**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 08/10/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y confirmo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio alguno.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: 19 DE ENERO DEL 2023

<b>Apellidos y nombres del asesor / de la asesora:</b> Diego Villagómez Molero	
<b>DNI: 40746149</b>	<b>Firma:</b> 
<b>ORCID: 0000-0002-5439-5058</b>	

## RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia profesional tiene como objetivo general presentar el predimensionamiento, el análisis por cargas de gravedad y sísmicas, y el diseño estructural en concreto armado de un reservorio circular de almacenamiento de agua potable ubicado en la ciudad de Lima. Dicho reservorio tiene una capacidad de 2700 m<sup>3</sup>, 25 m de diámetro y una altura de 6.50 m.

El sistema de concreto para contención de líquidos consta de una losa de fondo, paredes cilíndricas, una cúpula esférica en la parte superior y una viga tipo anillo que une la cúpula con las paredes. Asimismo, toda la base de este reservorio está apoyada en un suelo de perfil tipo S1 con un módulo de balasto de 2.0 kg/cm<sup>3</sup>.

Con respecto a las consideraciones especiales en el diseño en concreto armado de reservorios tal como la calidad del concreto, el factor de durabilidad y fisuración, se siguen las estipulaciones de la ACI 350-06 referente al *Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures*.

Por otro lado, para el análisis de cargas de gravedad y sísmico, así como el diseño estructural del reservorio, se consideran tanto normas peruanas como internacionales, específicamente, la Norma Técnica Peruana E.020 Cargas, E0.30 Diseño Sismoresistente, E.060 Concreto Armado y el ACI 350.3-06 correspondiente al *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures* y, además, las ecuaciones provenientes del sistema mecánico equivalente simplificado (Housner, 1963).

Como resultado de diseño de los elementos estructurales del reservorio, se obtiene un espesor tanto para las paredes cilíndricas como del fondo de losa de 40cm. La cúpula fue diseñada con un espesor de 7cm y una flecha de 2.50m y el anillo con una sección de 60x40 cm. Por último, ya concluido el diseño del reservorio, se realiza el control de fisuración por flexión y tracción directa según los parámetros estipulados en la norma ACI 350.3-06.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b><i>i</i></b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b><i>iv</i></b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b><i>v</i></b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b><i>1</i></b>
1.1. Objetivos .....	<b><i>1</i></b>
1.2. Descripción del Proyecto .....	<b><i>1</i></b>
1.3. Alcance .....	<b><i>1</i></b>
1.4. Reglamento empleado.....	<b><i>1</i></b>
<b>2. Definiciones</b> .....	<b><i>2</i></b>
2.1. Materiales .....	<b><i>2</i></b>
2.1.1. Concreto armado.....	<b><i>2</i></b>
2.1.2. Acero de refuerzo .....	<b><i>3</i></b>
<b>3. Predimensionamiento</b> .....	<b><i>3</i></b>
3.1. Predimensionamiento cúpula esférica y anillo superior .....	<b><i>3</i></b>
3.2. Predimensionamiento de paredes cilíndricas .....	<b><i>5</i></b>
<b>4. Modelo Computacional</b> .....	<b><i>7</i></b>
<b>5. Análisis de cargas de gravedad</b> .....	<b><i>8</i></b>
5.1. Carga muerta y carga viva.....	<b><i>8</i></b>
5.2. Presión de Líquidos.....	<b><i>8</i></b>
5.3. Análisis por cargas de gravedad .....	<b><i>8</i></b>
5.3.1. Tracción anular .....	<b><i>8</i></b>
5.3.2. Flexión en el eje vertical.....	<b><i>9</i></b>
5.3.3. Fuerza cortante perpendicular al plano .....	<b><i>10</i></b>
<b>6. Análisis sísmico estático</b> .....	<b><i>11</i></b>
6.1. Cálculo de las Masas Convectiva e Impulsiva .....	<b><i>11</i></b>
6.2. Cálculo de la Ubicación de Masas Convectiva e Impulsiva.....	<b><i>11</i></b>
6.3. Cálculo de los Períodos Convectivo e Impulsivo .....	<b><i>12</i></b>
6.4. Representación de las Solicitaciones Sísmicas .....	<b><i>12</i></b>
6.5. Cálculo de las Fuerzas Sísmicas por Inercia.....	<b><i>13</i></b>
6.6. Cálculo de las Fuerzas Sísmicas Convectiva e Impulsiva .....	<b><i>15</i></b>
6.7. Cálculo de fuerzas convectiva e impulsiva por unidad de longitud vertical.....	<b><i>15</i></b>

6.8.	Cálculo de distribución de presiones convectiva e impulsiva en planta.....	16
7.	<i>Análisis sísmico dinámico</i> .....	18
7.1.	Cálculo de espectro de aceleración .....	18
7.2.	Cálculo de masa y rigidez.....	19
7.3.	Distribución de masa impulsiva.....	19
7.4.	Distribución de masa convectiva.....	19
7.5.	Período Convectivo de la Estructura.....	21
7.6.	Combinación de cargas.....	22
7.7.	Factores de durabilidad.....	22
8.	<i>Análisis de fuerzas internas</i> .....	23
9.	<i>Diseño Estructural del Reservorio</i> .....	24
9.1.	Diseño de la Cúpula Esférica .....	24
9.1.1.	Por Flexión.....	24
9.1.2.	Por Tracción Anular .....	25
9.1.3.	Por Cortante .....	26
9.1.4.	Diseño Final .....	27
9.2.	Diseño del Anillo.....	27
9.3.	Diseño de las Paredes Cilíndricas .....	29
9.3.1.	Por Flexión.....	30
9.3.2.	Por Tracción Anular .....	31
9.3.3.	Diseño Final .....	33
9.4.	Diseño del Fondo de Reservorio.....	33
9.4.1.	Por Flexión.....	33
9.4.2.	Por Cortante .....	35
9.4.3.	Diseño Final .....	37
9.5.	Resumen de diseño .....	37
10.	<i>Control de fisuración</i> .....	38
10.1.	Por Flexión.....	38
10.2.	Por tracción .....	40
11.	<i>Conclusiones, comentarios y/o recomendaciones</i> .....	43
12.	<i>Bibliografía</i> .....	45
13.	<i>Anexos</i> .....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resistencia a la compresión de los Requisitos para condiciones de exposición especial. .	2
<b>Tabla 2.</b> Expresiones para el cálculo de masas convectiva e impulsiva.....	11
<b>Tabla 3.</b> Masas impulsiva y convectiva obtenidas. ....	11
<b>Tabla 4.</b> Expresiones para el cálculo de la ubicación de las masas.....	11
<b>Tabla 5.</b> Ubicación de las masas. ....	12
<b>Tabla 6.</b> Expresiones para el cálculo de los periodos. ....	12
<b>Tabla 7.</b> Período convectivo e impulsivo. ....	12
<b>Tabla 8.</b> Factores que representan las sollicitaciones sísmicas. ....	12
<b>Tabla 9.</b> Valores de R para la masa impulsiva y convectiva. ....	13
<b>Tabla 10.</b> Factores de reducción sísmica. ....	13
<b>Tabla 11.</b> Expresiones para el cálculo de C. ....	13
<b>Tabla 12.</b> Factores de amplificación C.....	13
<b>Tabla 13.</b> Expresiones para el cálculo de $\varepsilon$ . ....	14
<b>Tabla 14.</b> Valor del coeficiente de masa efectiva $\varepsilon$ .....	14
<b>Tabla 15.</b> Expresiones para el cálculo de la fuerza inercia lateral de la aceleración del muro. ....	14
<b>Tabla 16.</b> Fuerza de inercia lateral del muro distribuido.....	14
<b>Tabla 17.</b> Fuerza de inercia lateral del techo distribuido por nudo. ....	14
<b>Tabla 18.</b> Fuerza total lateral impulsiva y convectiva asociada a $W_c$ .....	15
<b>Tabla 19.</b> Fuerza total lateral impulsiva y convectiva asociada a $W_c$ .....	15
<b>Tabla 20.</b> Fuerzas convectivas por unidad de altura del muro del estanque. ....	15
<b>Tabla 21.</b> Fuerzas impulsivas por unidad de altura del muro del estanque.....	15
<b>Tabla 22.</b> Distribución de presiones dinámicas unitarias convectiva e impulsiva distribuida horizontalmente al nivel y del líquido.....	16
<b>Tabla 23.</b> Parámetros sísmicos. ....	18
<b>Tabla 24.</b> Variación del parámetro $C_i$ y $C_c$ de acuerdo al periodo. ....	18
<b>Tabla 25.</b> Cálculo de masas y rigidez.....	19
<b>Tabla 26.</b> Resumen de fuerzas obtenidas en los elementos estructurales.....	23
<b>Tabla 27.</b> Cuantías mínimas de acero de refuerzo por contracción y temperatura.....	29
<b>Tabla 28.</b> Distribución de refuerzo en los elementos estructurales. ....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Gráfico para el cálculo de las dimensiones óptimas de una cúpula.....	4
<b>Figura 2.</b> Fuerzas generadas por cúpula esférica. ....	5
<b>Figura 3.</b> Predimensionamiento terminado del reservorio de base circular en metros. ....	6
<b>Figura 4.</b> Sección transversal del anillo 60x40 cm. ....	6
<b>Figura 5.</b> Modelo de elementos finitos del reservorio circular. ....	7
<b>Figura 6.</b> Presión de agua aplicada a los nudos.....	8
<b>Figura 7.</b> Tracción anular en servicio ton/m (Fuente: Propia) .....	9
<b>Figura 8.</b> Momentos de flexión en el eje vertical ton.m/m. ....	10
<b>Figura 9.</b> Fuerzas cortantes en ton/m (Fuente propia).....	10
<b>Figura 10.</b> Distribución de Presiones convectivas. ....	16
<b>Figura 11.</b> Distribución de presiones impulsivas. ....	17
<b>Figura 12.</b> Espectro de aceleraciones ZUCSg/R vs T (s).....	18
<b>Figura 13.</b> Expresión para calcular la rigidez convectiva. ....	19
<b>Figura 14.</b> Frames que actúan como resortes en el modelo. ....	20
<b>Figura 15.</b> Resortes convectivos asignados en el modelo. ....	21
<b>Figura 16.</b> Período convectivo de la estructura (primer modo). ....	21
<b>Figura 17.</b> Fuerzas internas en la cúpula y la pared cilíndrica. ....	23
<b>Figura 18.</b> Diagrama de momentos M22 en la cúpula esférica.....	25
<b>Figura 19.</b> Diagrama de fuerzas de tracción F11 en la cúpula esférica.....	26
<b>Figura 20.</b> Diagrama de fuerzas cortante V23 en la cúpula esférica.....	27
<b>Figura 21.</b> Fuerzas axiales en el anillo.....	28
<b>Figura 22.</b> Diseño final del anillo. ....	29
<b>Figura 23.</b> Diagrama de momentos M22 en las paredes del reservorio. ....	30
<b>Figura 24.</b> Diagrama de fuerzas de tracción anular en las paredes del reservorio. ....	32
<b>Figura 25.</b> Diseño final de la pared cilíndrica. ....	33
<b>Figura 26.</b> Diagrama de momentos M11 en el fondo del reservorio. ....	34
<b>Figura 27.</b> Diagrama de momentos M22 en el fondo del reservorio. ....	35
<b>Figura 28.</b> Diagrama de fuerzas cortante V13 en el fondo del reservorio. ....	36

<b>Figura 29.</b> Diagrama de fuerzas cortante V23 en el fondo del reservorio. ....	36
<b>Figura 30.</b> Diagrama de momentos M22 en servicio en las paredes. ....	38
<b>Figura 31.</b> Análisis de la sección fisurada. ....	39
<b>Figura 32.</b> fs permisible en flexión. ....	40
<b>Figura 33.</b> Diagrama de fuerzas de tracción F11 en servicio en las paredes. ....	41





## **1. Introducción**

### **1.1. Objetivos**

El objetivo general del presente documento es realizar el predimensionamiento, el análisis por cargas de gravedad y sísmicas, y el diseño estructural en concreto armado de un reservorio circular de almacenamiento de agua potable ubicado en la ciudad de Lima.

### **1.2. Descripción del Proyecto**

El reservorio circular de almacenamiento de agua potable, ubicado en la ciudad de Lima, tiene una capacidad de 2700 m<sup>3</sup>, 25 m de diámetro y una altura de 6.50 m. Este sistema de concreto para contención de líquidos consta de una losa de fondo, paredes cilíndricas, una cúpula esférica en la parte superior y una viga tipo anillo que une la cúpula con las paredes.

Asimismo, toda la base de este reservorio está apoyada en un suelo de perfil tipo S1 con un módulo de balasto de 2.0 kg/cm<sup>3</sup>.

### **1.3. Alcance**

Se detalla el análisis debido a sollicitaciones de gravedad y sísmicas del reservorio, y el diseño en concreto armado de la cúpula esférica, las paredes cilíndricas y el anillo superior.

### **1.4. Reglamento empleado**

Para el análisis y diseño en concreto armado, fueron utilizadas las siguientes secciones vigentes del reglamento ACI:

- ✓ ACI 350 – 06: *Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary*
- ✓ ACI 350.3 – 06: *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures*

Asimismo, los cálculos siguen los lineamientos de las siguientes normas vigentes del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE):

- ✓ E 0.20 Cargas
- ✓ E 0.30 Diseño Sismorresistente
- ✓ E 0.60 Concreto Armado

## 2. Definiciones

### 2.1. Materiales

Se detalla a continuación los principales materiales a utilizar en el proyecto.

#### 2.1.1. Concreto armado

El material principal usado es el concreto armado que está regido bajo la Norma E0.60. Las principales características de este material son las siguientes:

$$\checkmark \text{ Resistencia nominal a compresión } f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Módulo de elasticidad } E_c = 15000 \times \sqrt{210} = 217371 \text{ kg/cm}^2$$

$$\checkmark \text{ Resistencia nominal a compresión } f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Módulo de elasticidad } E_c = 15000 \times \sqrt{280} = 250998 \text{ kg/cm}^2$$

Considerando que el reservorio ante cargas de servicio estará permanentemente en contacto con agua potable, se eligió concreto  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  para la base y las paredes cilíndricas, según la tabla “Requisitos para condiciones de exposición especiales”, ACI 350-06. Por otro lado, para la cúpula esférica de la parte superior se eligió concreto  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  debido a que no está en contacto con el líquido. Finalmente, con respecto al anillo superior que une las paredes con la cúpula cilíndrica, se eligió concreto  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  por un tema netamente de proceso constructivo en obra sin importar que no esté en contacto con el líquido.

Condición a la que está expuesta el concreto	Máxima relación Agua/Cemento	Resistencia a la compresión $f'c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Concreto que se pretende tenga baja permeabilidad en exposición al agua, aguas residuales y gases corrosivos	0.45	280
Concreto expuesto al congelamiento y deshielo en condición húmeda ó a productos químicos descongelantes	0.42	315
Para proteger el refuerzo en el concreto de la corrosión cuando está expuesto a cloruros de sales descongelantes, sal, agua salobre o salpicaduras del mismo origen	0.40	350

**Tabla 1.** Resistencia a la compresión de los Requisitos para condiciones de exposición especial.

Tomado de ACI 350-06, tabla 4.2.2, por American Concrete Institute (USA), 2006.

### 2.1.2. Acero de refuerzo

El tipo de acero estructural corrugado que se utiliza dentro de la estructuración es la ASTM A615 - Grado 60 con una sección circular recta, con resaltes Hi-bond. Este tipo de acero de refuerzo es utilizado debido a la alta adherencia con el concreto. Además, presenta las siguientes características:

- Esfuerzo de fluencia  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad  $E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$
- Deformación al inicio de la fluencia  $\epsilon_y = 0.0021$

### 3. Predimensionamiento

En base a las consideraciones del proyecto, se realizó el predimensionamiento tomando en cuenta las especificaciones de durabilidad que debe tener la estructura y el tipo de solicitaciones a las que estará sometida.

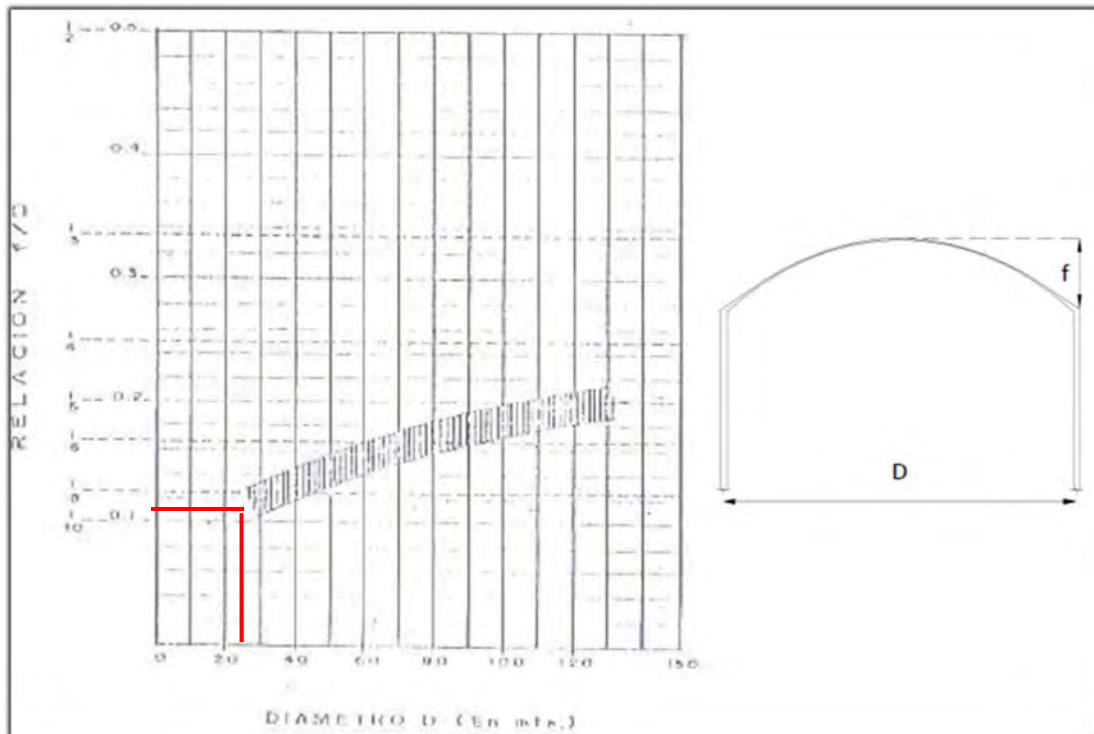
Las condiciones iniciales y consideraciones del proyecto que fueron utilizadas en el predimensionamiento son las siguientes:

- ✓ Capacidad máxima de líquido de 2700 m<sup>3</sup>.
- ✓ Altura (H) desde la base hasta el fin de las paredes cilíndricas verticales de 6.5 m.
- ✓ Diámetro (D) a ejes de muros del reservorio de 25 m.
- ✓ Cargas adicionales en la cúpula: 100 kg/m<sup>2</sup> de piso terminado y 50 kg/m<sup>2</sup> de carga viva para techos curvos (Norma de Cargas E.020).
- ✓ Fue asumido razonablemente un espesor de 7 cm para la cúpula esférica superior. Esta solo será diseñada con una malla de acero, por lo que no tendrá problemas de recubrimiento por el reducido espesor.

A continuación, se realiza y presenta el predimensionamiento de la cúpula esférica, paredes cilíndricas y del anillo superior.

#### 3.1. Predimensionamiento cúpula esférica y anillo superior

En primer lugar, se calcula la flecha de la cúpula en función del diámetro del reservorio según el gráfico de dimensionamiento planteado en el ACI SP-28 presentado a continuación.



**Figura 1.** Gráfico para el cálculo de las dimensiones óptimas de una cúpula.

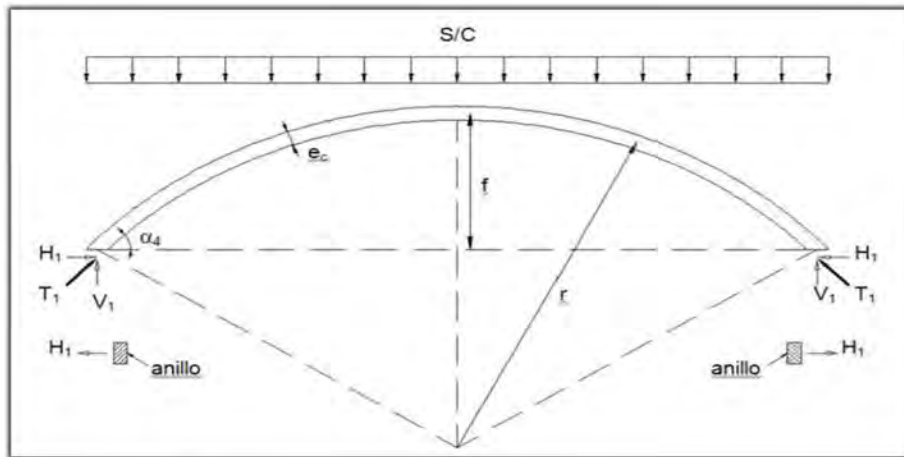
Tomado del ACI SP-28. por American Concrete Institute (USA), 1971.

Del gráfico anterior, para  $D = 25\text{m}$ , se obtiene un valor de  $f/D$  entre  $1/10$  y  $1/9$ , por lo que se eligió una relación de  $1/10$ .

Por lo tanto, tenemos:

- ✓ Flecha:  $f = 2.50\text{ m}$
- ✓ Espesor de la cúpula:  $e_c = 0.07\text{ m}$
- ✓ Radio de la cúpula:  $r = \frac{(f^2 + \frac{D^2}{4})}{2 \times f} = 32.50\text{ m}$
- ✓  $\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{D}{2}}{r-f} \right) = 22.62^\circ$

A continuación, se procede a calcular las fuerzas generadas por el peso propio de la cúpula, las cuales son mostradas en la siguiente figura.



**Figura 2.** Fuerzas generadas por cúpula esférica.

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

Considerando una s/c de piso terminado de 0.10 ton y de 0.05 por carga viva para techos curvos de acuerdo a la norma E.020 “Cargas”, se obtienen los siguientes resultados.

$$✓ P1 = (2.4 \times e_c + 0.10 + 0.05) \times 2 \times \pi \times r \times f = 162.34 \text{ ton}$$

$$✓ V1 = \frac{P1}{\pi \times D} = 2.07 \text{ ton/m}$$

$$✓ T1 = \frac{V1}{\text{sen}(\alpha)} = 5.38 \text{ ton/m}$$

$$✓ H1 = T1 \times \text{cos}(\alpha) = 4.96 \text{ ton/m}$$

Posteriormente, se verifica el espesor de la cúpula en el cual se debe cumplir la siguiente desigualdad.

$$✓ \frac{T1}{e_c} = 7.68 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq 0.45 \times f'c = 94.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}, \text{ por ende, el espesor asumido es aceptable}$$

Por último, se calcula el área transversal del anillo mediante la siguiente expresión.

$$✓ Aa1 = \frac{H1 \times (\frac{D}{2})}{f_t}, \text{ donde } f_t = \text{esfuerzo admisible en tracción (10\% de } f'c)$$

$$✓ Aa1 = \frac{H1 \times (\frac{D}{2})}{0.10 \times 280} = 2215.80 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, se escoge por ahora una sección de 0.50 x 0.50 m.

### 3.2. Predimensionamiento de paredes cilíndricas

En primer lugar, se supone que las paredes cilíndricas tienen un comportamiento tipo membrana. Asimismo, se considera que  $H = H_L$  y se calcula la fuerza de tracción y el espesor de las paredes cilíndricas mediante las siguientes expresiones.

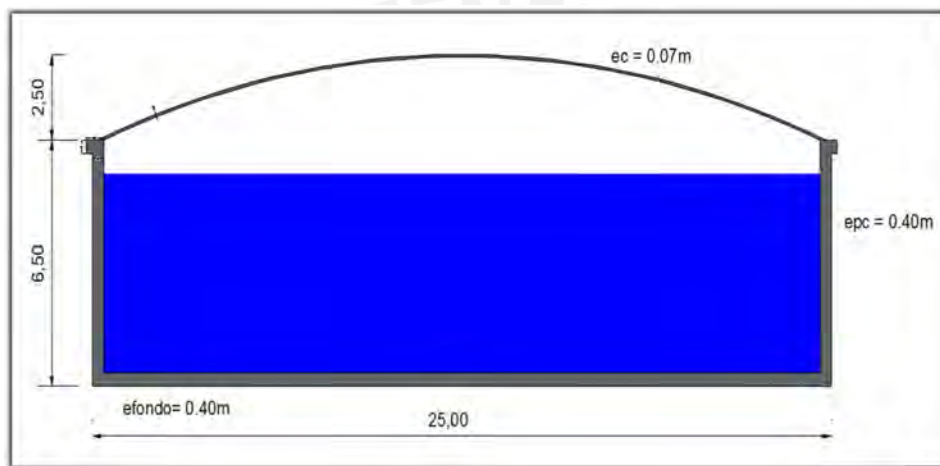
$$✓ Ta = \gamma \times H \times (\frac{D}{2}) = 81.25 \text{ ton}$$

$$✓ e_{pc} = \frac{Ta}{100f_t} = 29 \text{ cm}$$

Dado que en el proceso del predimensionamiento no se tiene cómo incluir las condiciones sísmicas, pues solo considera las presiones hidrostáticas en servicio, se sugiere aumentar el espesor de 10 a 15 cm debido a los esfuerzos últimos por cargas de sismo y gravedad. Por ende, para este caso, se aumentará 10 cm obteniendo un  $e_{pc} = 0.40$  m.

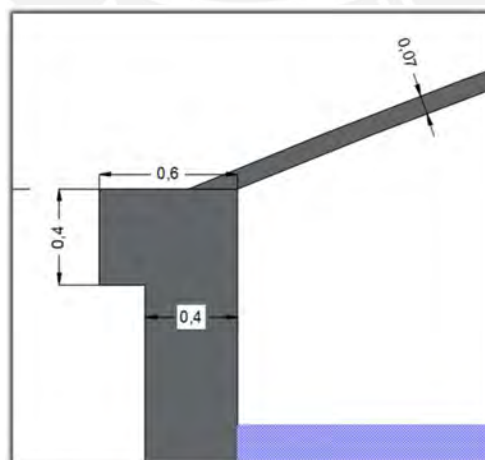
A fin de mantener una correcta proporción estructural, es razonable que el ancho del anillo superior sea mayor al espesor de las paredes cilíndricas. Por lo tanto, para que el anillo cumpla su función de tomar la tracción de la cúpula y proporcionarle más rigidez, se opta por cambiar la sección del anillo anteriormente escogida a  $0.60 \times 0.40$  m cumpliendo el  $A_{a1} (2400 \text{ cm}^2 \geq 2142.90 \text{ cm}^2)$ .

A continuación, se muestra un esquema del predimensionamiento completo.



**Figura 3.** Predimensionamiento terminado del reservorio de base circular en metros.

Fuente: Propia

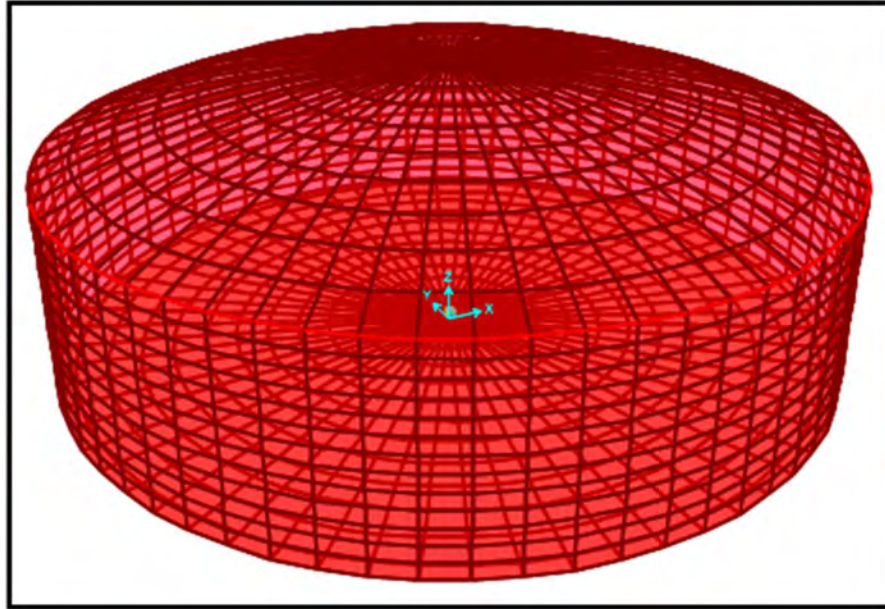


**Figura 4.** Sección transversal del anillo 60x40 cm.

Fuente: Propia

#### 4. Modelo Computacional

Para realizar el análisis, el reservorio circular fue modelado en elementos finitos en el programa computacional SAP2000. A continuación, se presenta el modelo mediante el programa en mención.



**Figura 5.** Modelo de elementos finitos del reservorio circular.

Fuente: Propia

A continuación, se presentan algunos datos importantes considerados en el modelo computacional.

- ✓ El cilindro fue dividido en altura en 13 divisiones con la finalidad de que cada elemento de la malla tenga 0.50 m de altura (6.50 m totales). En planta, fue dividido en 64 segmentos para que cada elemento finito de la pared cilíndrica.
- ✓ Con respecto a la cúpula esférica, esta fue dividida en planta similarmente en 160 segmentos para que los nudos de los elementos finitos coincidan con los de las paredes cilíndricas.
- ✓ Con respecto a la interacción suelo – estructura, fueron considerados resortes en toda la base del reservorio con el coeficiente de balasto proporcionado de 2.00 kg/m<sup>3</sup>.
- ✓ Considerando que la estructura será analizada sísmicamente solo en la dirección X lo cual es coherente ya que es simétrica, fue restringido el desplazamiento (en X y en Y) de los puntos extremos del eje Y en la base para representar a la fuerza de fricción.

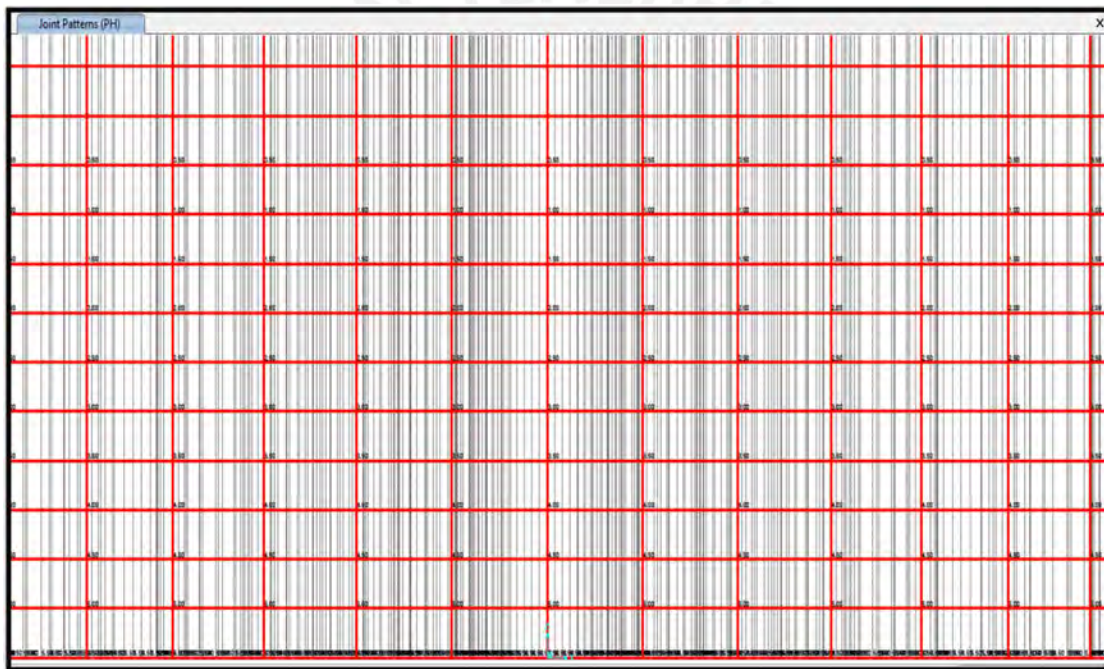
## 5. Análisis de cargas de gravedad

### 5.1. Carga muerta y carga viva

Además de las cargas existentes por peso propio, se ha considerado para la cúpula 100 kg/m<sup>2</sup> de piso terminado y 50 kg/m<sup>2</sup> de carga viva para techos curvos de acuerdo a la Norma E.020 “Cargas”.

### 5.2. Presión de Líquidos

La mayor carga aplicada en servicio corresponde a la generada por la presión del líquido almacenado. Esta depende de la altura de agua a la que se encuentre y fue aplicada a los nudos por medio de la herramienta *Joint Patterns*.



**Figura 6.** Presión de agua aplicada a los nudos.

Fuente: Propia

Como se sabe, la presión en cada nudo equivale a  $P = \gamma H$  en ton/m<sup>2</sup>. Asimismo, se agregó un peso en la losa de fondo del reservorio equivalente al peso del agua que soporta.

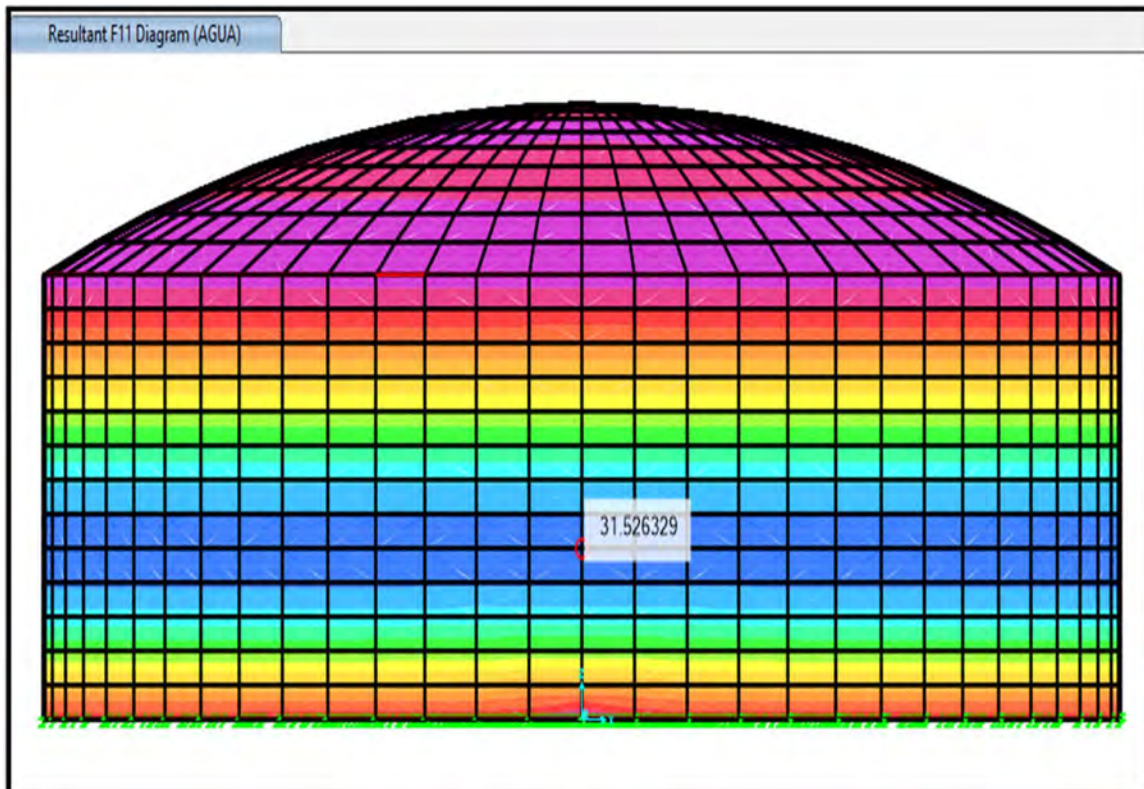
### 5.3. Análisis por cargas de gravedad

#### 5.3.1. Tracción anular

La tracción anular máxima generada en las paredes cilíndricas por cargas de servicio fue de 31.52 ton/m y está ubicada aproximadamente a 2.5m de la base de la estructura. En el tramo



inferior se observa que la presión decrece, esto se debe a la restricción de deformación que se tiene debido a la losa de fondo. Por ende, si no se tuviera losa de fondo, la tracción seguiría aumentando a medida que se va bajando.



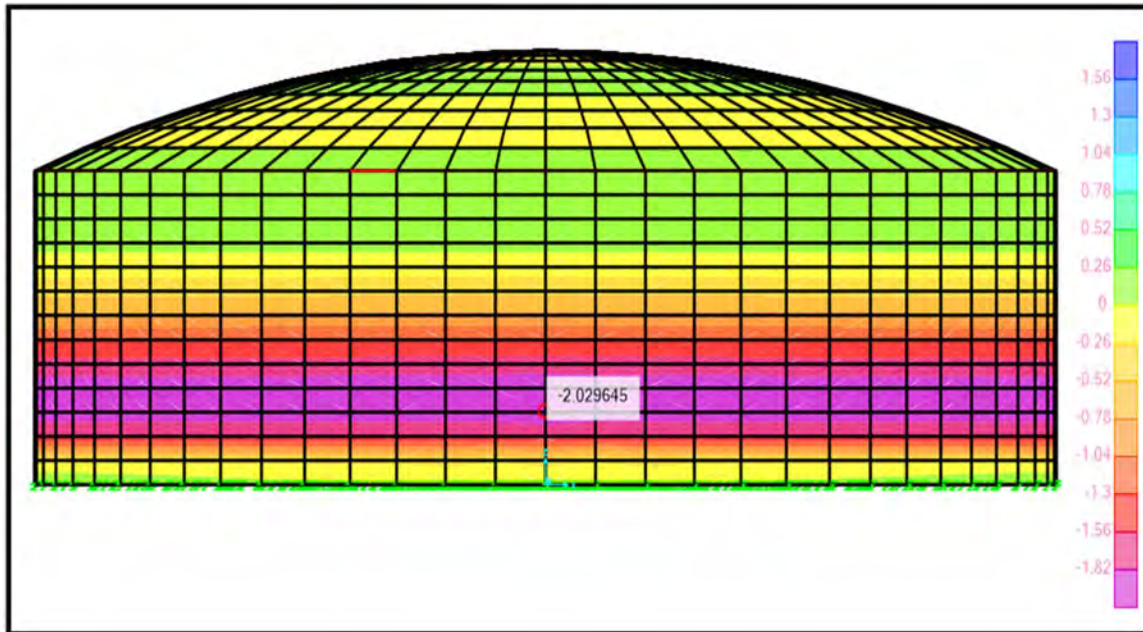
**Figura 7.** Tracción anular en servicio ton/m (Fuente: Propia)

Fuente: Propia

### 5.3.2. Flexión en el eje vertical

La flexión en el eje vertical alcanza un momento máximo positivo de 0.16 ton.m/m cerca al anillo y un máximo momento negativo de 2.02 ton.m/m cerca a la base del reservorio.

En la figura mostrada a continuación, se presentan los momentos por metro de ancho generados en esta dirección por cargas de servicio. Con dichos momentos, se realizará el control de fisuración el cual será detallado más adelante.

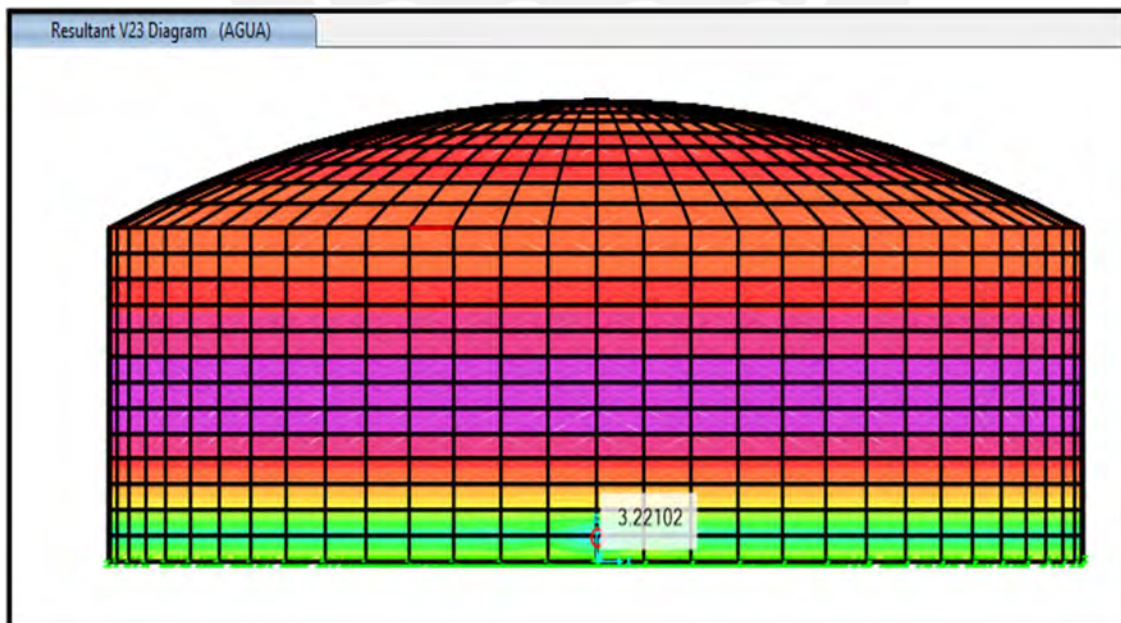


**Figura 8.** Momentos de flexión en el eje vertical ton.m/m.

Fuente: Propia

### 5.3.3. Fuerza cortante perpendicular al plano

La mayor fuerza cortante generada por las cargas de servicio se encuentra cerca a la base y tiene un valor máximo de 3.22 ton/m. Con dicho valor se verifica que el espesor sea capaz de resistirla.



**Figura 9.** Fuerzas cortantes en ton/m (Fuente propia)

Fuente: Propia

## 6. Análisis sísmico estático

### 6.1. Cálculo de las Masas Convectiva e Impulsiva

Teniendo una carga de agua de 2700 ton, calculamos la masa convectiva e impulsiva mediante las expresiones para reservorios circulares tal como se muestra en la tabla 2 conociendo que el diámetro del reservorio es de 25 metros y el tirante de agua posee 5.5 metros:

**Tabla 2.** Expresiones para el cálculo de masas convectiva e impulsiva.

	Reservorios rectangulares	Reservorios circulares
$\frac{M_i}{M_L} = \frac{W_i}{W_L}$	$\frac{\tanh\left(0.866\left(\frac{L}{H_L}\right)\right)}{0.866\left(\frac{L}{H_L}\right)}$	$\frac{\tanh\left(0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right)}{0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)}$
$\frac{M_c}{M_L} = \frac{W_c}{W_L}$	$0.264\left(\frac{L}{H_L}\right) \cdot \tanh\left(3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right)$	$0.23\left(\frac{D}{H_L}\right) \cdot \tanh\left(3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right)$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021

**Tabla 3.** Masas impulsiva y convectiva obtenidas.

Wi (impulsiva) (ton)	685.4
Wc (convectiva) (ton)	1889.5

Fuente: Propia

### 6.2. Cálculo de la Ubicación de Masas Convectiva e Impulsiva

Con las masas obtenidas y considerando solo presión en las paredes, calculamos sus respectivas ubicaciones con las siguientes expresiones para reservorios circulares y para la relación D/H<sub>L</sub> > 1.333 mostradas en la tabla 4.

**Tabla 4.** Expresiones para el cálculo de la ubicación de las masas.

	Reservorios rectangulares		Reservorios circulares	
	L / H <sub>L</sub> < 1.333	L / H <sub>L</sub> ≥ 1.333	D / H <sub>L</sub> < 1.333	D / H <sub>L</sub> ≥ 1.333
$\frac{h_i}{H_L}$	$0.5 - 0.09375\left(\frac{L}{H_L}\right)$	0.375	$0.5 - 0.09375\left(\frac{D}{H_L}\right)$	0.375
$\frac{h_c}{H_L}$	$1 - \frac{\cosh\left(3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right) - 1}{3.16\left(\frac{H_L}{L}\right) \cdot \sinh\left(3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right)}$		$1 - \frac{\cosh\left(3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right) - 1}{3.68\left(\frac{H_L}{D}\right) \cdot \sinh\left(3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right)}$	

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021

**Tabla 5.** Ubicación de las masas.

hi (m)	2.06
hc (m)	2.89

Fuente: Propia

### 6.3. Cálculo de los Períodos Convectivo e Impulsivo

Luego, determinamos los periodos convectivo  $T_c$  e impulsivo  $T_i$ . El periodo impulsivo corresponde al período de la estructura la cual fue obtenido del primer modo calculado en SAP2000.

**Tabla 6.** Expresiones para el cálculo de los periodos.

	Reservorios rectangulares	Reservorios circulares
$T_c$	$2\pi \cdot \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{3.16 \cdot g \cdot \tanh\left(3.16 \left(\frac{H_L}{L}\right)\right)}}$	$2\pi \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{3.68 \cdot g \cdot \tanh\left(3.68 \left(\frac{H_L}{D}\right)\right)}}$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

**Tabla 7.** Período convectivo e impulsivo.

$T_c$ (s)	6.39
$T_i$ (s)	0.13

Fuente: Propia

### 6.4. Representación de las Solicitaciones Sísmicas

De acuerdo a la norma E.030 de Diseño Sismorresistente, la sismicidad es representada mediante los factores Z, S, U, C y R. El factor de reducción sísmica R usado es el propuesto por el ACI 350.3-06:

**Tabla 8.** Factores que representan las solicitaciones sísmicas.

Z4	0.45g
S1	1.00
$T_p$	0.40s
$T_l$	2.50s
U	1.50

Fuente: Propia

**Tabla 9.** Valores de R para la masa impulsiva y convectiva.

Tipo de Estructura	Ri		Rc
	Sobre el terreno	Enterrado*	
Tanques con base flexible y anclados a ella	3.25	3.25	1.0
Tanques monolíticos o empotrados a la base	2.0	3.0	1.0
Tanques con base flexible y anclados a ella**	1.5	2.0	1.0
Reservorios Elevados	2.0	-	1.0

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

**Tabla 10.** Factores de reducción sísmica.

Rc	1
Ri	2

Fuente: Propia

De la misma manera, calculamos el factor de amplificación C con las expresiones propuestas:

**Tabla 11.** Expresiones para el cálculo de C.

	C <sub>i</sub>	C <sub>c</sub>
$T < T_p$	2.5	<b>3.75</b>
$T_p < T < T_L$	$2.5 \times T_p / T_i$	$1.5 \times 2.5 \times T_p / T_c$
$T > T_L$	$2.5 \times (T_p \times T_L) / T_i^2$	$1.5 \times 2.5 \times (T_p \times T_L) / T_c^2$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

Como  $T_i \leq T_p = 0.4s$  y  $T_c = 6.39s > T_L = 2.50s$ , entonces los valores de C<sub>i</sub> y C<sub>c</sub> son:

**Tabla 12.** Factores de amplificación C.

C <sub>i</sub>	2.5
C <sub>c</sub>	0.092

Fuente: Propia

### 6.5. Cálculo de las Fuerzas Sísmicas por Inercia

Primero, se calcula el valor del coeficiente de masa efectiva  $\epsilon$  mediante la siguiente expresión para reservorios circulares:

**Tabla 13.** Expresiones para el cálculo de  $\varepsilon$ .

	Reservorios circulares	Reservorios rectangulares
$\varepsilon$	$\left(0.0151\left(\frac{D}{H_L}\right)^2 - 0.1908\left(\frac{D}{H_L}\right) + 1.021\right) \leq 1$	$\left(0.0151\left(\frac{L}{H_L}\right)^2 - 0.1908\left(\frac{L}{H_L}\right) + 1.021\right) \leq 1$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

**Tabla 14.** Valor del coeficiente de masa efectiva  $\varepsilon$ .

$\varepsilon$	0.466
---------------	-------

Fuente: Propia

Luego, se calcula el peso del muro y determinamos la fuerza de inercia lateral de la aceleración del muro:

**Tabla 15.** Expresiones para el cálculo de la fuerza inercia lateral de la aceleración del muro.

Reservorios circulares	Reservorios rectangulares
$P_w = ZUC_i S \times \frac{\varepsilon W_w}{R_i}$	$P_w' = ZUC_i S \times \frac{\varepsilon W_w'}{R_i}$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

Distribuimos la fuerza de inercia de la aceleración del muro en planta y en altura:

**Tabla 16.** Fuerza de inercia lateral del muro distribuido.

Peso del muro: $W_w$ (ton)	490.10
Fuerza inercial del muro: $P_w$ (ton)	192.58
Fza. inercial del muro distribuido en altura: $P_{wy}$ (ton/m)	14.81
Fza. inercial del muro distribuido en el área: $p_{wy}$ (ton/m <sup>2</sup> )	0.38

Fuente: Propia

Calculamos el peso del techo considerando una sección esférica. La fuerza sísmica fue obtenida con la expresión anterior. El techo o cúpula, que resulta ser un casquete esférico, se modeló considerando 64 divisiones, por lo que además se muestra la fuerza para cada división:

**Tabla 17.** Fuerza de inercia lateral del techo distribuido por nudo.

Peso del techo: $W_r$ (ton)	85.77
Fuerza inercial del techo: $P_r$ (ton)	72.36
Fuerza inercial del techo por nudo (ton)	1.13

Fuente: Propia

### 6.6. Cálculo de las Fuerzas Sísmicas Convectiva e Impulsiva

Calculamos la fuerza sísmica para la masa convectiva e impulsiva con las siguientes expresiones:

**Tabla 18.** Fuerza total lateral impulsiva y convectiva asociada a  $W_c$ .

Fuerza Sísmica Impulsiva	Fuerza Sísmica Convectiva
$P_i = ZUC_i S \times \frac{W_i}{R_i}$	$P_c = ZUC_c S \times \frac{W_c}{R_i}$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

**Tabla 19.** Fuerza total lateral impulsiva y convectiva asociada a  $W_c$ .

Fuerza sísmica impulsiva $P_i$ (ton)	578.3
Fuerza sísmica convectiva $P_c$ (ton)	117.1

Fuente: Propia

### 6.7. Cálculo de fuerzas convectiva e impulsiva por unidad de longitud vertical

Distribuimos las fuerzas verticalmente sobre los muros. Dividimos la altura de 5.5 metros del tirante en 4 sectores de 1.50, 1.50, 1.50 y 1.0 metros. Para cada sector, se calcularon las fuerzas correspondientes aplicadas en su centroide.

**Tabla 20.** Fuerzas convectivas por unidad de altura del muro del estanque.

$y = 5\text{m}$	$P_{cy} = 11.98 \text{ ton/m}$
$y = 3.75\text{m}$	$P_{cy} = 11.24 \text{ ton/m}$
$y = 2.25\text{m}$	$P_{cy} = 10.35 \text{ ton/m}$
$y = 0.75\text{m}$	$P_{cy} = 9.45 \text{ ton/m}$

Fuente: Propia

**Tabla 21.** Fuerzas impulsivas por unidad de altura del muro del estanque.

$y = 5\text{m}$	$P_{iy} = 20.31 \text{ ton/m}$
$y = 3.75\text{m}$	$P_{iy} = 38.23 \text{ ton/m}$
$y = 2.25\text{m}$	$P_{iy} = 59.74 \text{ ton/m}$
$y = 0.75\text{m}$	$P_{iy} = 81.25 \text{ ton/m}$

Fuente: Propia

### 6.8. Cálculo de distribución de presiones convectiva e impulsiva en planta

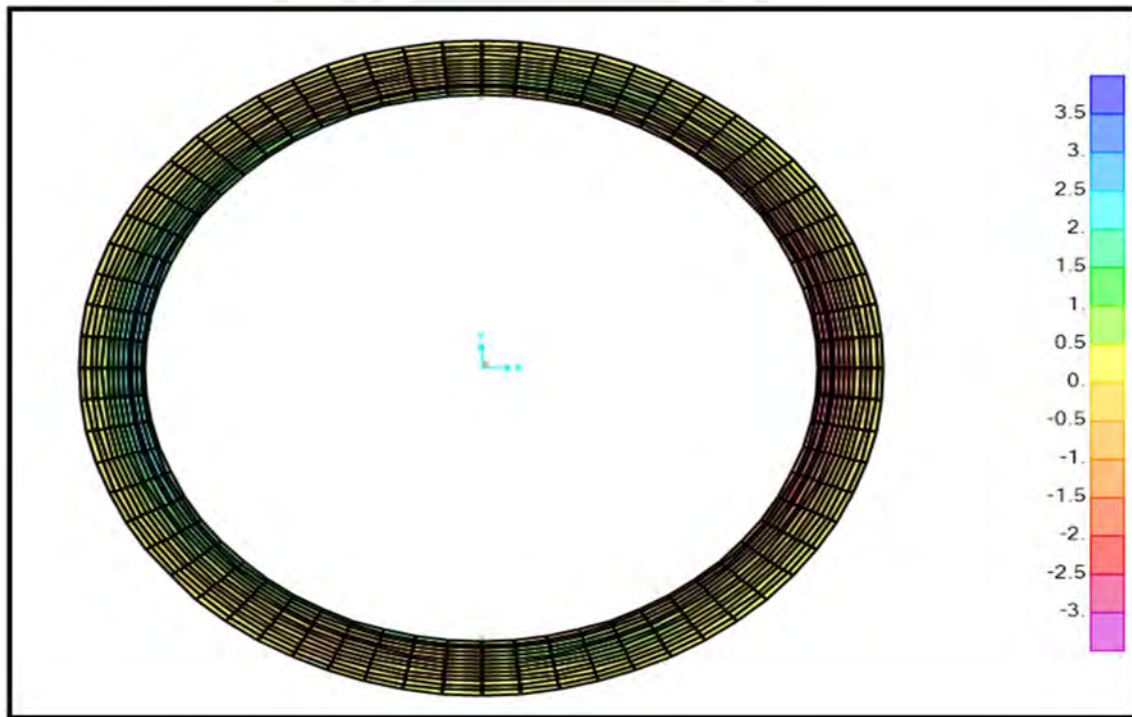
En planta, distribuimos para cada sector dividido en 4 partes por cuadrantes con ángulos promedios de 11.25°, 33.75°, 56.25° y 78.75°.

**Tabla 22.** Distribución de presiones dinámicas unitarias convectiva e impulsiva distribuida horizontalmente al nivel y del líquido.

Distribución de presiones en planta											
y=0.75 m			y=2.25 m			y=3.75 m			y=5.00 m		
$\beta$	piy (ton/m <sup>2</sup> )	pcy (ton/m <sup>2</sup> )	$\beta$	piy (ton/m <sup>2</sup> )	pcy (ton/m <sup>2</sup> )	$\beta$	piy (ton/m <sup>2</sup> )	pcy (ton/m <sup>2</sup> )	$\beta$	piy (ton/m <sup>2</sup> )	pcy (ton/m <sup>2</sup> )
11.25°	4.06	0.42	11.25°	2.98	0.46	11.25°	1.91	0.50	11.25°	1.01	0.53
33.75°	3.44	0.36	33.75°	2.53	0.39	33.75°	1.62	0.42	33.75°	0.86	0.45
56.25°	2.30	0.24	56.25°	1.69	0.26	56.25°	1.08	0.28	56.25°	0.57	0.30
78.75°	0.81	0.08	78.75°	0.59	0.09	78.75°	0.38	0.10	78.75°	0.20	0.11

Fuente: Propia

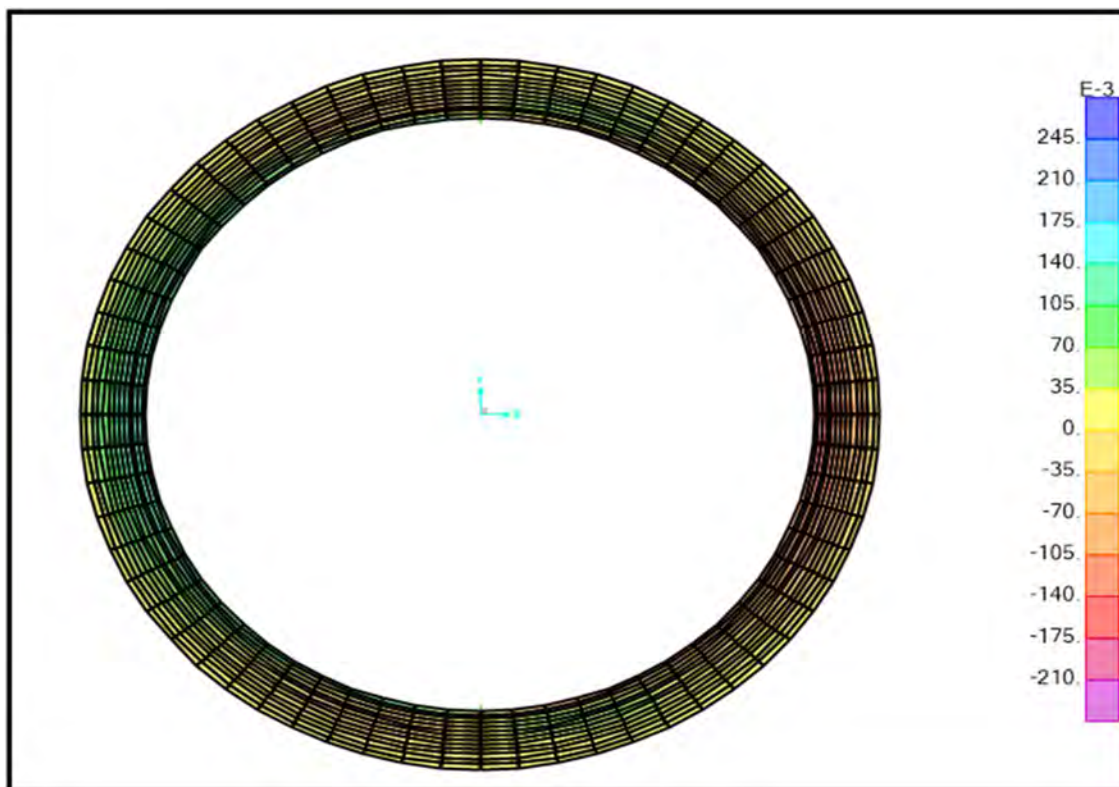
Finalmente, introducimos todas las cargas obtenidas al modelo para realizar el análisis.



**Figura 10.** Distribución de Presiones convectivas.

Fuente: Propia





**Figura 11.** Distribución de presiones impulsivas.

Fuente: Propia

## 7. Análisis sísmico dinámico

### 7.1. Cálculo de espectro de aceleración

De acuerdo con los parámetros sísmicos hallados en el análisis estático se realiza el espectro de aceleraciones. Se considera una zona impulsiva y una zona convectiva y se realiza el cambio en un periodo promedio entre  $T_i$  y  $T_c$ .

**Tabla 23.** Parámetros sísmicos.

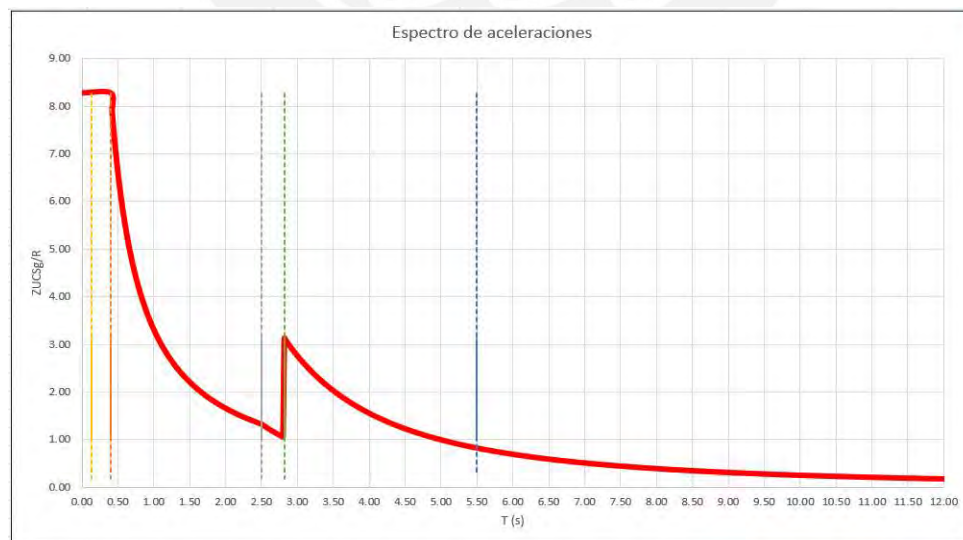
Parámetros sísmicos	
Z	0.45
U	1.5
S	1.00
$T_p$	0.40 s
$T_l$	2.50 s
$R_i$	2
$R_c$	1
$T_i$	0.14 s
$T_c$	5.50 s
T de cambio	2.82 s

Fuente: Propia

**Tabla 24.** Variación del parámetro  $C_i$  y  $C_c$  de acuerdo al periodo.

	$C_i$	$C_c$
$T < T_p$	2.5	<b>3.75</b>
$T_p < T < T_l$	$2.5 \times T_p / T_i$	$1.5 \times 2.5 \times T_p / T_c$
$T > T_l$	$2.5 \times (T_p \times T_i) / T^2$	$1.5 \times 2.5 \times (T_p \times T_i) / T_c^2$

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.



**Figura 12.** Espectro de aceleraciones ZUCSg/R vs T (s).

Fuente: Propia

## 7.2. Cálculo de masa y rigidez

De acuerdo con los pesos impulsivos y convectivos hallados en el análisis estático se halla la rigidez convectiva. Esta se colocará en el modelo para representar los resortes convectivos.

$$k_c = M_c \cdot \left( \frac{2\pi}{T_c} \right)^2$$

**Figura 13.** Expresión para calcular la rigidez convectiva.

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

**Tabla 25.** Cálculo de masas y rigidez.

Cálculo de Masas y Rigidez		
Wi	685.4	ton
Wc	1889.4	ton
Mi	69.86	ton.s <sup>2</sup> /m
Mc	192.60	ton.s <sup>2</sup> /m
Kc	186.14	ton/m

Fuente: Propia

## 7.3. Distribución de masa impulsiva

Se asigna la masa impulsiva al modelo. Para esto se estima el área de aplicación de esta masa en el modelo.

Dado que se tiene un  $h_i = 2.06$  m el cual es casi 2.0 m por lo que se considera que actúa justo en el cambio de elementos finitos. Por ende, se elige una altura de aplicación de 2.0 m que se distribuyen en todo el perímetro. Por tanto, se tiene lo siguiente:

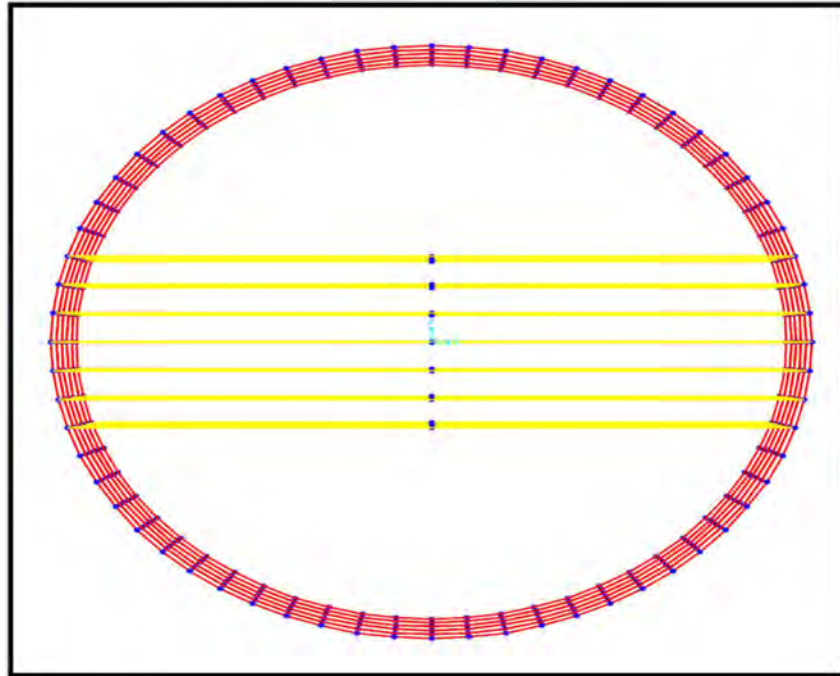
$$A_{sup} = \pi \times D \times h_i = \pi \times 25 \times 2.0 = 157.08 \text{ m}^2$$

Por tanto, se distribuye la masa impulsiva entre el área de aplicación

$$\frac{M_i}{m^2} = 0.446 \text{ ton} \cdot \frac{s^2}{m^3}$$

## 7.4. Distribución de masa convectiva

A la altura de  $h_c = 2.89$  m se considera dos elementos por encima y dos por debajo. Por lo tanto, se considera una altura de 5 elementos finitos (2.5 metros). Se consideran 14 nodos en planta (1 al centro, 3 arriba y 3 abajo en ambas caras) para representar la masa convectiva por lo que resultarían 84 resortes en total distribuida en toda la altura.



**Figura 14.** Frames que actúan como resortes en el modelo.

Fuente: Propia

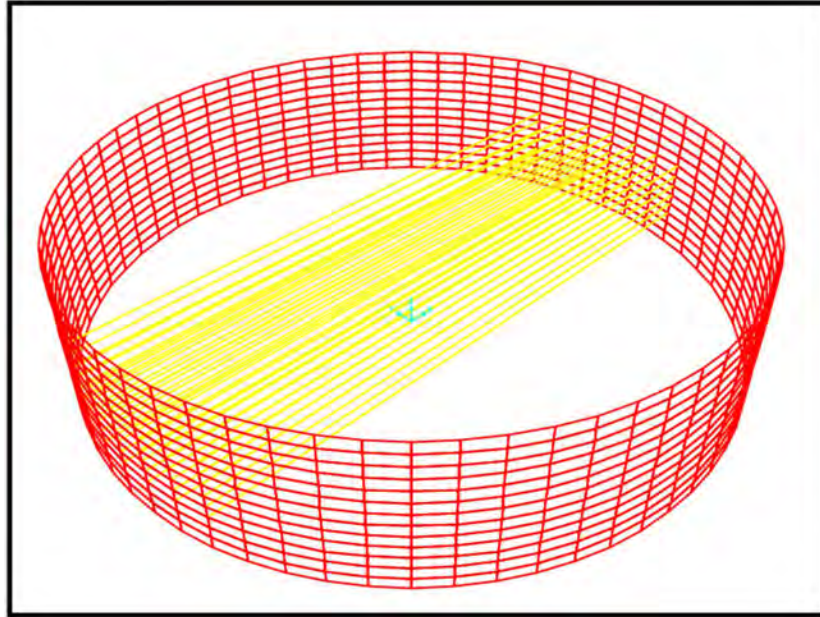
Dado que se tienen 5 elementos finitos y 7 frames se tiene 42 frames en total. Así se divide la masa convectiva  $M_c = 192.6$  (ton.s<sup>2</sup>/m) entre 42 nodos lo que es igual a  $M_c/\text{nodo} = 4.59$  (ton.s<sup>2</sup>/m).

Por otro lado, dado que se tienen 42 frames al dividir cada uno entre dos se tienen 84 resortes. Así dividimos la rigidez entre los 84 resortes y obtenemos una rigidez de 2.22 ton/m en cada resorte. Para efectos del modelo, se representarán los resortes como barras con un área equivalente para esas rigideces. Para calcular dicha área equivalente en cada frame, se utilizará la siguiente expresión:

$$k_c = \frac{E \times A}{L} \rightarrow A = \frac{k_c \times L}{E_c}$$

Reemplazando los valores en la expresión mostrada, se tiene un área cuadrada de lado igual 3.52 mm.

Así se asignan los resortes y las masas convectivas tal como se muestra en la imagen a continuación:

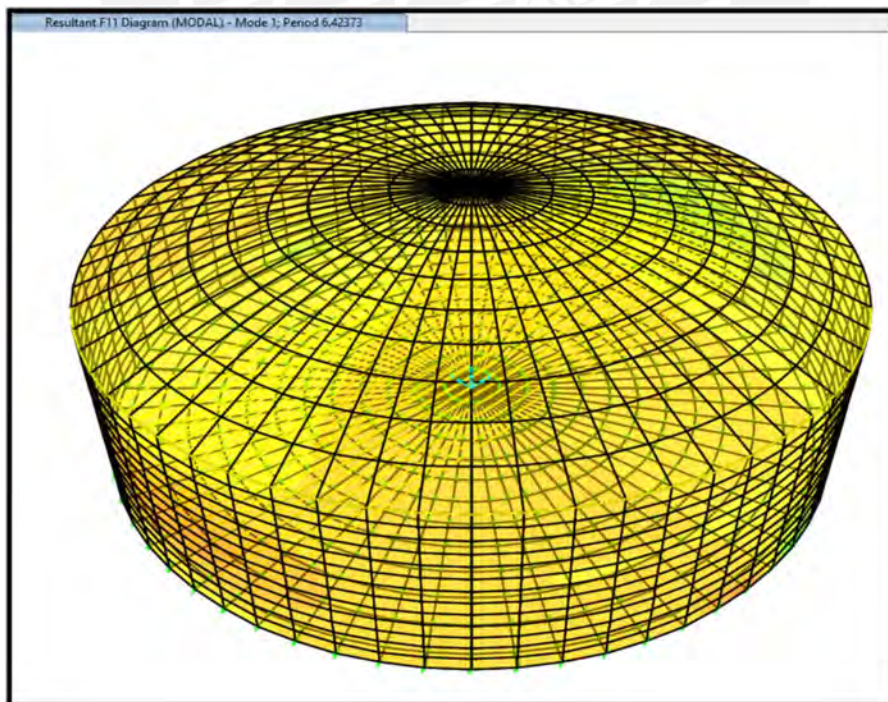


**Figura 15.** Resortes convectivos asignados en el modelo.

Fuente: Propia

### 7.5. Período Convectivo de la Estructura

Se procede a realizar el modelo y se obtiene el período convectivo, el cual es el primer modo de la estructura tal y como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 16.** Período convectivo de la estructura (primer modo).

Fuente: Propia

El período convectivo ( $T_c$ ) obtenido por las ecuaciones de Housner  $T_c = 6.39s$  es muy similar al obtenido por el modelo  $T_c = 6.42s$  por el cual se concluye que la asignación de la rigidez convectiva ( $K_c$ ) asignada al modelo es válida.

### 7.6. Combinación de cargas

Se consideraron las siguientes combinaciones de cargas especificadas las cuales fueron puestas en el modelo para realizar el diseño estructural del reservorio

- ✓  $MV = 1.4 CM + 1.7 CV + 1.4 AGUA$
- ✓  $COMB1 = IMPULSIVA + INERCIA$
- ✓  $SISMO = SRSS [COMB1 + IMPULSIVA]$
- ✓  $MSP = 0.90 CM + 0.90 AGUA + 1.0 SISMO$
- ✓  $MSN = 0.90 CM + 0.90 AGUA - 1.0 SISMO$
- ✓  $MVSP = 1.25 CM + 1.25 CV + 1.25 AGUA + 1.0 SISMO$
- ✓  $MVSN = 1.25 CM + 1.25 CV + 1.25 AGUA - 1.0 SISMO$

### 7.7. Factores de durabilidad

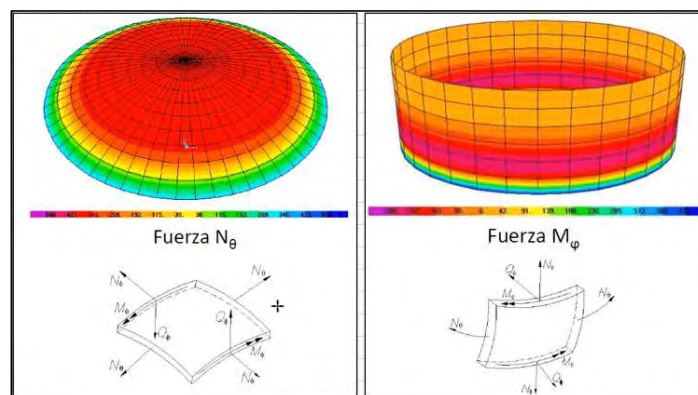
Los factores de durabilidad amplifican las cargas a las cuales se somete la estructura a fin de aumentar el refuerzo necesario en la estructura. El objetivo de ello es reducir la fisuración en los elementos estructurales para evitar problemas de filtraciones y/o permeabilidad.

Estos factores propuestos por el ACI 350-01 de acuerdo al tipo de esfuerzo son los siguientes:

- ✓ Compresión:  $S_d = 1.00$
- ✓ Flexión:  $S_d = 1.30$
- ✓ Corte:  $S_d = 1.0$
- ✓ Tracción:  $S_d = 1.65$

## 8. Análisis de fuerzas internas

Se extrajeron las fuerzas internas del modelo, se consideran las fuerzas internas como se muestra en la figura 17 y la fuerza axial en el anillo.



**Figura 17.** Fuerzas internas en la cúpula y la pared cilíndrica.

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

**Tabla 26.** Resumen de fuerzas obtenidas en los elementos estructurales.

Fuerzas internas							
Método estático				Método dinámico			
Cúpula	Positivo	Negativo	Unidad	Cúpula	Positivo	Negativo	Unidad
$N\Theta = F11 =$	4.90	4.00	ton/m	$N\Theta = F11 =$	5.50	3.40	ton/m
$N\Phi = F22 =$	0	4.20	ton/m	$N\Phi = F22 =$	0	4.00	ton/m
$M\Phi = M22 =$	0.04	0.11	ton.m/m	$M\Phi = M22 =$	0.06	0.10	ton.m/m
$Q\Phi = V23 =$	0.18	0.10	ton/m	$Q\Phi = V23 =$	0.06	0.13	ton/m
Anillo	Tracción			Anillo	Tracción		
F axial =	34.61		ton	F axial =	53.09		ton
Pared cilíndrica	Positivo	Negativo		Pared cilíndrica	Positivo	Negativo	
$N\Theta = F11 =$	154	97	ton/m	$N\Theta = F11 =$	168	111	ton/m
$N\Phi = F22 =$	71	12	ton/m	$N\Phi = F22 =$	83	9.50	ton/m
$M\Phi = M22 =$	2.80	17.37	ton.m/m	$M\Phi = M22 =$	3.44	15.26	ton.m/m
$Q\Phi = V23 =$	3.10	2.12	ton/m	$Q\Phi = V23 =$	4.95	2.05	ton/m
Fondo	Positivo	Negativo	Unidad	Fondo	Positivo	Negativo	Unidad
$M\Theta = M11 =$	13.28	1.00	ton/m	$M\Theta = M11 =$	15.22	1.50	ton/m
$M\Phi = M22 =$	6.50	6.20	ton.m/m	$M\Phi = M22 =$	7.90	7.19	ton.m/m
$Q\Theta = V13 =$	12.51	3.23	ton/m	$Q\Theta = V13 =$	15.75	2.20	ton/m
$Q\Phi = V23 =$	16.66	5.26	ton/m	$Q\Phi = V23 =$	18.21	4.10	ton/m

Fuente: Propia

Las fuerzas y momentos relativos a las paredes cilíndricas fueron amplificadas por el factor de durabilidad recomendado por el ACI 350 – 01. (Compresión 1.0 / Tracción 1.65 / Flexión-Cortante 1.3).

## 9. Diseño Estructural del Reservorio

En esta sección, se diseñarán todos los elementos estructurales del reservorio: cúpula esférica, anillo, paredes cilíndricas y el fondo del reservorio. La distribución del acero vertical de la cúpula y pared cilíndrica serán calculados con los momentos de flexión, mientras que el acero horizontal de estos elementos, serán calculados con las fuerzas de tracción anular. Por otro lado, el acero en el anillo será calculado de acuerdo a la fuerza última de tracción. El diseño se realizará en base a las cargas del análisis estático.

### 9.1. Diseño de la Cúpula Esférica

Debido a que la cúpula no está en contacto con el agua, no se necesita amplificar por el factor de durabilidad.

#### 9.1.1. Por Flexión

Se calcula el acero mínimo para la cúpula esférica y, asimismo, la resistencia a momentos para compararlos con los resultados del análisis.

- ✓  $\rho_{min} = 0.18\%$
- ✓  $e_c = 7 \text{ cm}$
- ✓  $As_{min} = 0.0018 \times b \times e_c = 0.0018 \times 100 \times 7 = 1.26 \text{ cm}^2$

Por lo tanto, se instalará malla  $\Phi 3/8'' @ 30\text{cm}$  obteniendo el  $As$  instalado de la siguiente manera:

$$As_{instalado} = 0.713 \times \frac{100}{30} = 2.38 \text{ cm}^2/m$$

A continuación, se calcula el momento nominal instalado mediante la siguiente fórmula donde  $d = e_c - 3 = 4 \text{ cm}$ .

$$Mn_{instalado} = As \times fy \left( d - \frac{As \times fy}{2 \times 0.85 \times f'c \times b} \right)$$

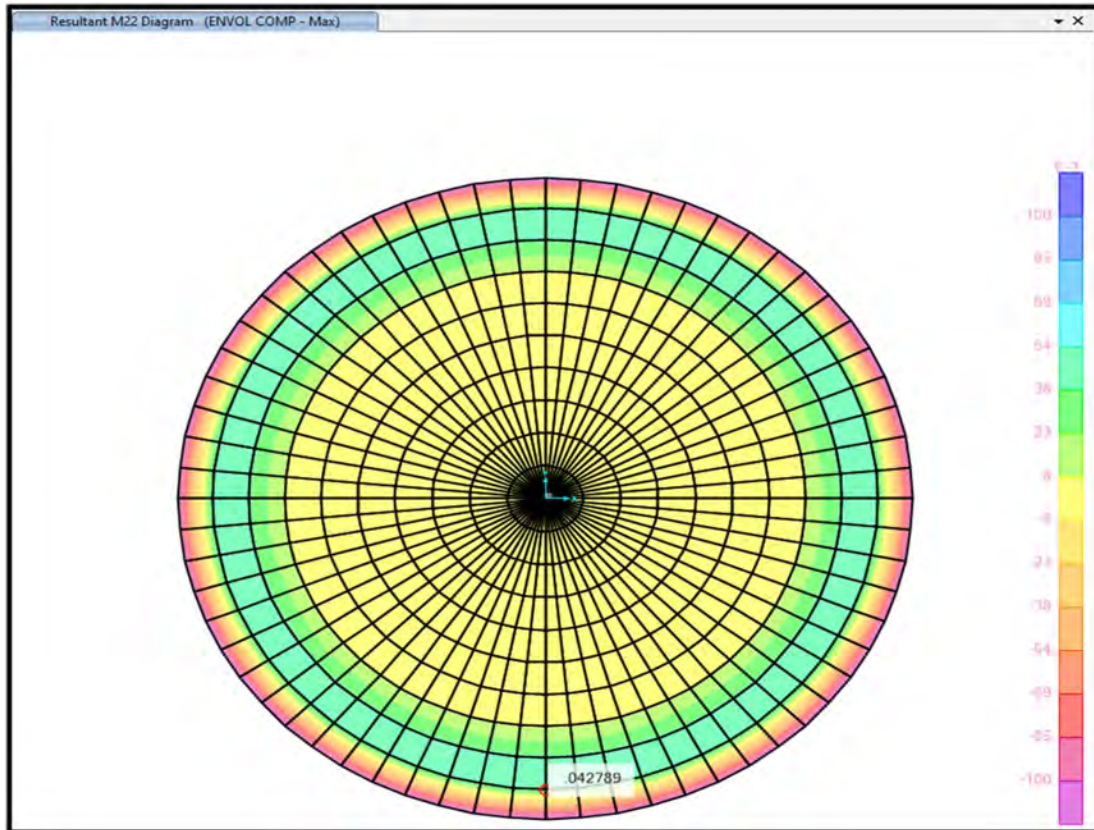
$$Mn_{instalado} = 2.38 \times 4200 \left( 4 - \frac{2.38 \times 4200}{2 \times 0.85 \times 210 \times 100} \right) / 10^5$$

$$Mn_{instalado} = 0.37 \text{ ton.m}$$

$$\Phi Mn_{instalado} = 0.33 \text{ ton.m}$$

Tal y como se muestra en la figura 18, los momentos del análisis en la cúpula son mucho menor al momento nominal calculado previamente.





**Figura 18.** Diagrama de momentos M22 en la cúpula esférica.

Fuente: Propia

Se considera un espaciamiento máximo de 3 veces el espesor de la cáscara para la cuantía mínima, es decir, 20 cm.

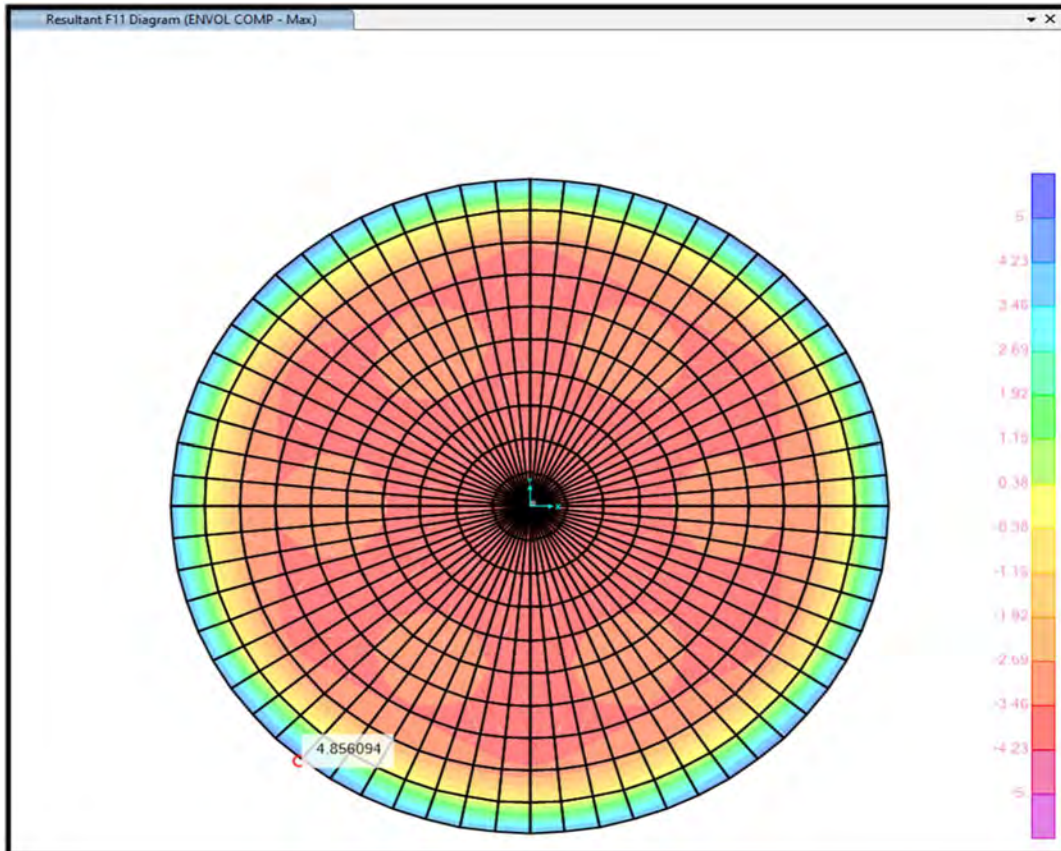
### 9.1.2. Por Tracción Anular

Se calculará la resistencia a la tracción con la cuantía mínima calculada anteriormente y se verificará que sea mayor a las demandas de tracción en la cúpula.

$$A_{s_{instalado}} = 2.38 \text{ cm}^2/m$$

$$\Phi T_{n_{instalado}} = \Phi \times A_s \times f_y = 0.90 \times 2.38 \times 4.2 = 9.00 \text{ ton} > 4.85 \text{ ton}$$

Tal y como se aprecia en la figura 19, las fuerzas de tracción solicitadas en la cúpula son menores a la resistencia nominal por cortante calculada previamente.



**Figura 19.** Diagrama de fuerzas de tracción F11 en la cúpula esférica.

Fuente: Propia

### 9.1.3. Por Cortante

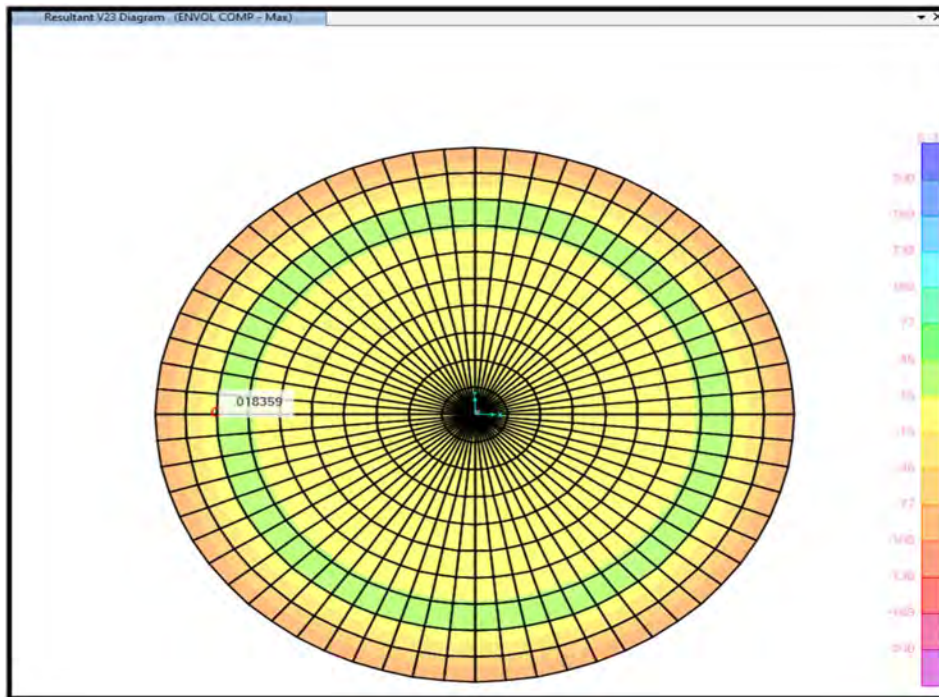
Se verificará la resistencia al esfuerzo cortante con el espesor elegido de la cúpula mediante la siguiente fórmula conocida:

$$\Phi V_c = 0.85 \times 0.53 \times \sqrt{f'_c} \times bw \times d$$

$$\Phi V_c = 0.85 \times 0.53 \times \sqrt{210} \times 100 \times 4$$

$$\Phi V_c = 2.61 \text{ ton} > 0.18 \text{ ton}$$

Tal y como se muestra en la figura 20, las fuerzas demandadas por cortante en la cúpula son menores a la resistencia nominal a la tracción calculada previamente. Por lo tanto, el espesor de la cúpula es suficiente.



**Figura 20.** Diagrama de fuerzas cortante V23 en la cúpula esférica.

Fuente: Propia

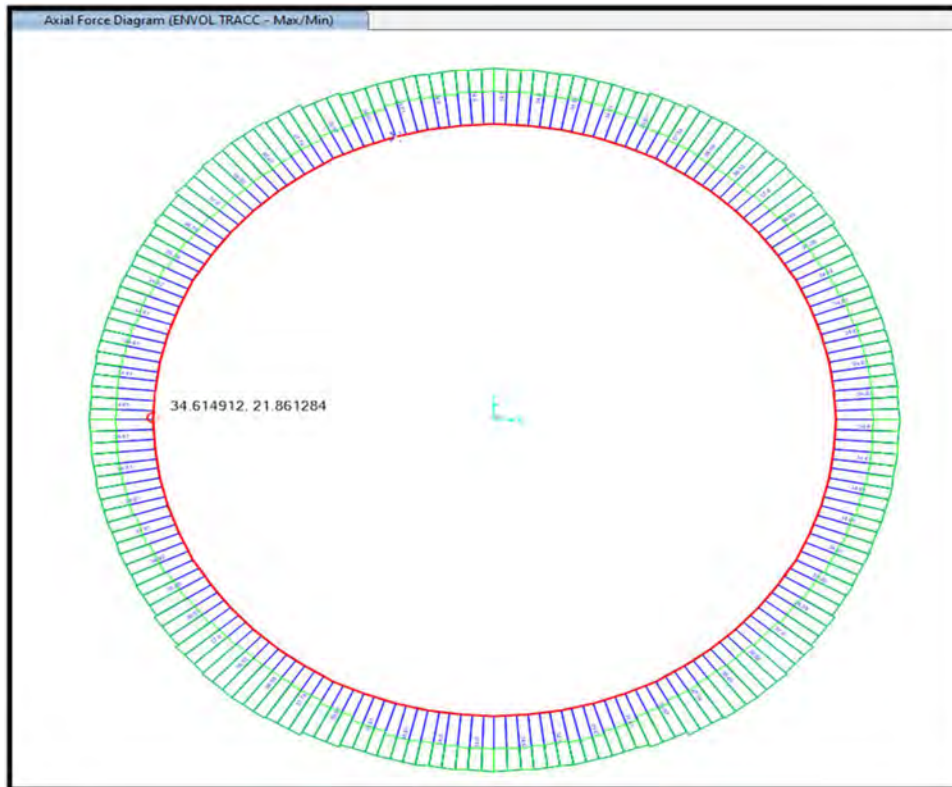
#### **9.1.4. Diseño Final**

En los anexos del presente documento, se presenta la distribución del armado en la cúpula esférica con mayor detalle en los planos de estructuras E-02.

#### **9.2. Diseño del Anillo**

Para el diseño del anillo, las cargas serán amplificadas por el factor de durabilidad correspondiente a tracción (1.65).

A continuación, la figura 21 muestra los resultados del análisis correspondiente a las fuerzas axiales en el anillo. Con dicha fuerza obtenida de 34.62 ton, se calcula el refuerzo a instalar.



**Figura 21.** Fuerzas axiales en el anillo.

Fuente: Propia

$$Tu = 34.62 \text{ ton}$$

$$As = \frac{Tu}{\Phi \times fy} = \frac{34.62}{0.9 \times 4.2} = 9.16 \text{ cm}^2$$

$$\Phi Vc = 2.61 \text{ ton} > 0.18 \text{ ton}$$

Por lo tanto, se instalará  $5\Phi 3/4''$  obteniendo un  $As$  instalado de la siguiente manera:

$$As_{instalado} = 5 \times 2.00 = 10.00 \text{ cm}^2$$

Con respecto a los estribos, se colocarán de  $3/8''$  cada 25 cm a fin de facilitar el montaje. A continuación, se muestra el diseño final del anillo en la figura 22.

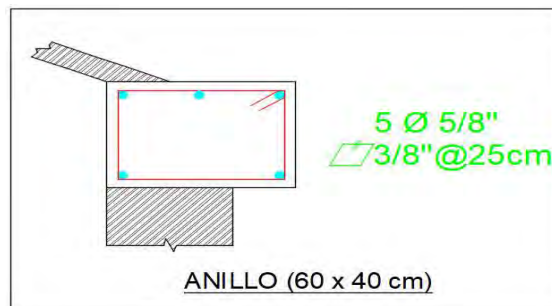


Figura 22. Diseño final del anillo.

Fuente: Propia

### 9.3. Diseño de las Paredes Cilíndricas

En primer lugar, se define la cuantía mínima de acero de acuerdo a la longitud entre juntas tal y como se muestra en la tabla 27 extraída del ACI 350.

Tabla 27. Cuantías mínimas de acero de refuerzo por contracción y temperatura.

Longitud entre juntas (m)	Cuantía mínima de acero de refuerzo por contracción y temperatura	
	Grado 40	Grado 60
Menos de 6	0.003	0.003
Entre 6 y 9	0.004	0.003
Entre 9 y 12	0.005	0.004
Más de 12	0.006*	0.005*

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

Considerando longitud entre juntas menores a 6m, se obtiene lo siguiente:

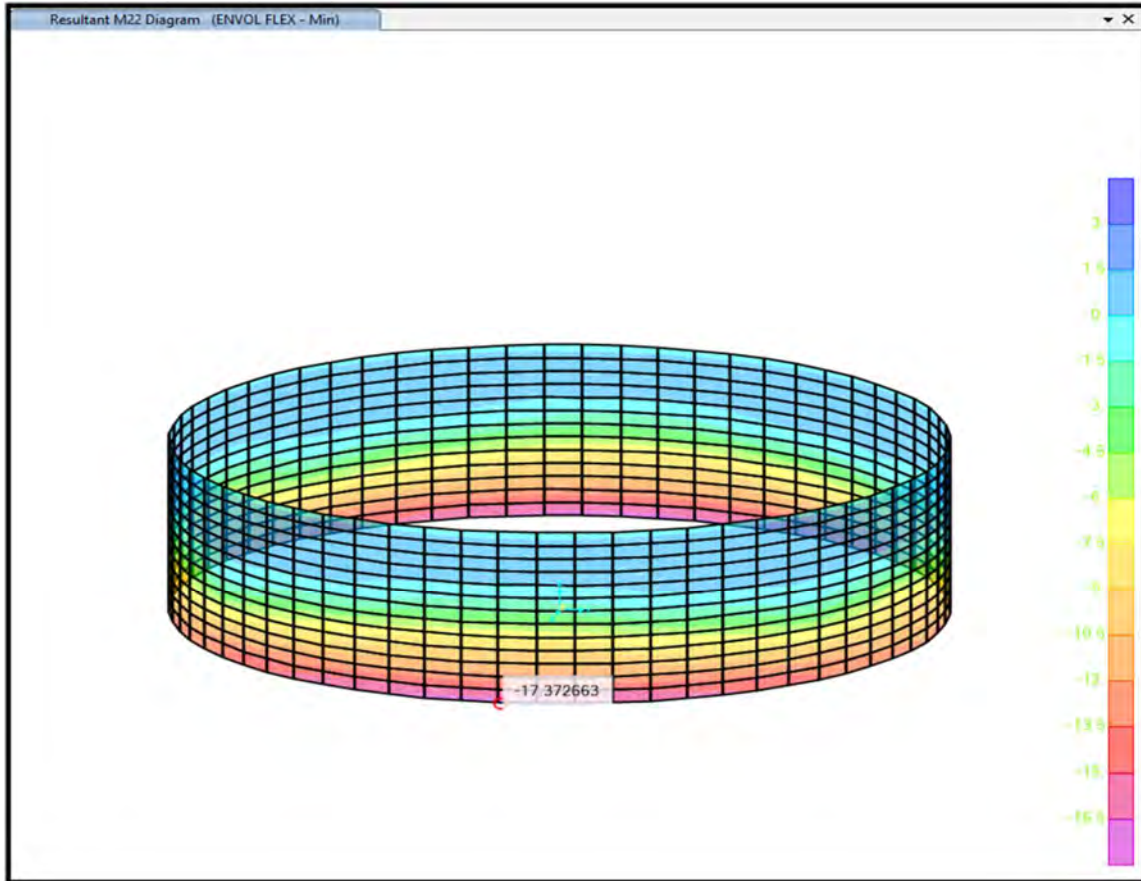
- ✓  $\rho_{min} = 0.003$
- ✓  $e_{pc} = 40 \text{ cm}$
- ✓  $As_{min} = 0.003 \times b \times e_{pc} = 0.003 \times 100 \times 40 = 12.00 \text{ cm}^2$

Por lo tanto, se instalará doble malla  $\Phi 1/2'' @ 20\text{cm}$  obteniendo el  $As$  mínimo instalado de la siguiente manera:

$$As_{min(vert-horiz)} = 2 \times 1.29 \times \frac{100}{20} = 12.90 \text{ cm}^2/m$$

### 9.3.1. Por Flexión

Para el diseño por flexión, las cargas serán amplificadas por el factor de durabilidad correspondiente a flexión (1.30). Como se observa en la figura 23, existen mayores esfuerzos por flexión en la parte inferior.



**Figura 23.** Diagrama de momentos M22 en las paredes del reservorio.

Fuente: Propia

Se calcula el  $A_s$  vertical requerido de acuerdo al  $M_u$  obtenido de la figura 23. Para el diseño por flexión, se considera los siguientes datos de la sección:

- ✓  $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$
- ✓  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- ✓  $b = 100 \text{ cm}$
- ✓  $h = 40 \text{ cm}$ , entonces  $d = 34 \text{ cm}$

$$M_n = \frac{M_u}{\Phi} = \frac{17.40}{0.90} = 19.34 \text{ ton.m}$$

$$M_n = A_s \times f_y \left( d - \frac{A_s \times f_y}{2 \times 0.85 \times f'_c \times b} \right)$$

$$19.34 \times 10^5 = A_s \times 4200 \left( 34 - \frac{A_s \times 4200}{2 \times 0.85 \times 280 \times 100} \right)$$

$$A_{s_{vert}} = 14.06 \text{ cm}^2$$

Como el acero mínimo calculado anteriormente es menor al solicitado por flexión, el acero instalado verticalmente será  $2\Phi 1/2'' @ 20\text{cm} + 1 \Phi 1/2'' @ 30\text{cm}$  (bastón) desde la base hasta el punto de corte.

$$A_{s_{vert \text{ instalado}}} = 2 \times 1.29 \times \frac{100}{20} + 1 \times 1.29 \times \frac{100}{30} = 19.35 \text{ cm}^2$$

Para hallar el punto de corte, se trabajará con el  $A_{s_{mín}} = 12.00 \text{ cm}^2$  mediante la siguiente expresión conocida:

$$Mn = A_s \times f_y \left( d - \frac{A_s \times f_y}{2 \times 0.85 \times f'_c \times b} \right)$$

$$Mn \times 10^5 = 12 \times 4200 \left( 34 - \frac{12 \times 4200}{2 \times 0.85 \times 280 \times 100} \right)$$

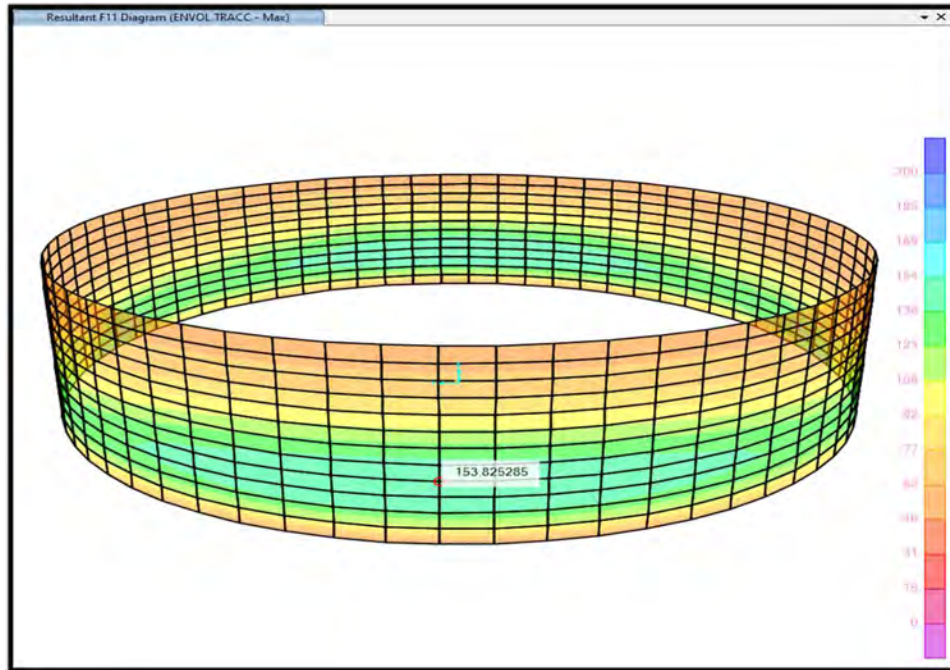
$$Mn = 16.60 \text{ ton.m}$$

$$Mu = 0.90 \times 16.60 \approx 15 \text{ ton.m}$$

Por lo tanto, de acuerdo a la figura 23, el punto de corte se realizará a la altura de 2.00 m dado que en dicho punto se aproxima el valor de momento de 15 ton.m.

### 9.3.2. Por Tracción Anular

Para el diseño por tracción, las cargas serán amplificadas por el factor de durabilidad correspondiente a tracción (1.65). Asimismo, se observa que las zonas más esforzadas están en la parte inferior del tanque tal como se muestra en la figura 24 por lo que se disminuirá el refuerzo en las zonas superiores de la pared.



**Figura 24.** Diagrama de fuerzas de tracción anular en las paredes del reservorio.

Fuente: Propia

Debido a que las fuerzas de tracción aumentan artificialmente en la zona próxima del fondo de losa (inferior), se escogió una fuerza característica de 153.83 ton ubicada a 2m de altura.

$$Tu = 153.83 \text{ ton}$$

$$As = \frac{Tu}{\Phi \times fy} = \frac{153.83}{0.9 \times 4.2} = 40.70 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, se instalará horizontalmente  $2\Phi 1''@25\text{cm}$  obteniendo el  $As$  instalado de la siguiente manera:

$$As_{horiz} = 2 \times 5.067 \times \frac{100}{25} = 40.53 \text{ cm}^2$$

Para los sectores superiores menos esforzados, se eligió una fuerza característica de 85 ton ubicado a 4.00m de altura.

$$Tu = 85 \text{ ton}$$

$$As = \frac{Tu}{\Phi \times fy} = \frac{85}{0.9 \times 4.2} = 22.49 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, se instalará horizontalmente  $2\Phi 3/4''@25\text{cm}$  obteniendo el  $As$  instalado de la siguiente manera:

$$As_{horiz} = 2 \times 2.85 \times \frac{100}{25} = 22.80 \text{ cm}^2$$



### 9.3.3. Diseño Final

A continuación, se presenta la distribución del armado en las paredes cilíndricas del reservorio en la figura 25, mostrado también en los planos adjuntos con mayor detalle.

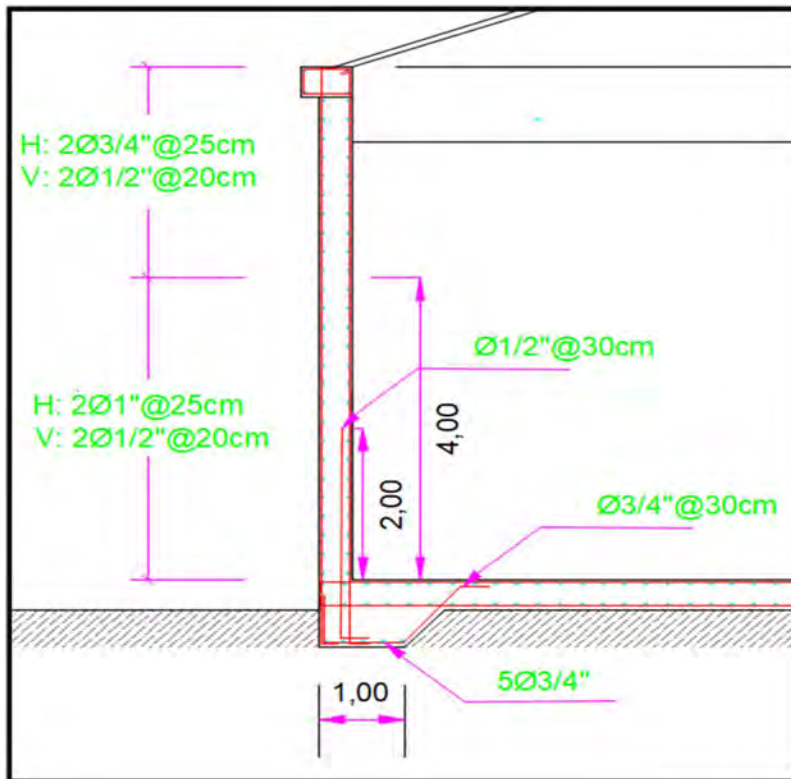


Figura 25. Diseño final de la pared cilíndrica.

Fuente: Propia

## 9.4. Diseño del Fondo de Reservorio

Debido a que la cúpula está en contacto con el agua, las cargas serán amplificadas por el factor de durabilidad correspondiente.

### 9.4.1. Por Flexión

Primero, se define la cuantía mínima de acero de acuerdo a la longitud entre juntas igual al elegido para las paredes cilíndricas (longitud entre juntas menores a 6m), por lo que se obtiene lo siguiente:

$$✓ \rho_{min} = 0.003$$

$$✓ e_f = 40 \text{ cm}$$

$$✓ A_{s_{min}} = 0.003 \times b \times e_{pc} = 0.003 \times 100 \times 40 = 12.00 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, se instalará doble malla  $\Phi 5/8''@25\text{cm}$  obteniendo el  $A_s$  instalado de la siguiente manera:

$$A_{s_{instalado}} = 2 \times 1.98 \times \frac{100}{25} = 15.84 \text{ cm}^2/m$$

A continuación, se calcula el momento nominal instalado mediante la siguiente fórmula donde  $d = e_f - 6 = 34 \text{ cm}$ .

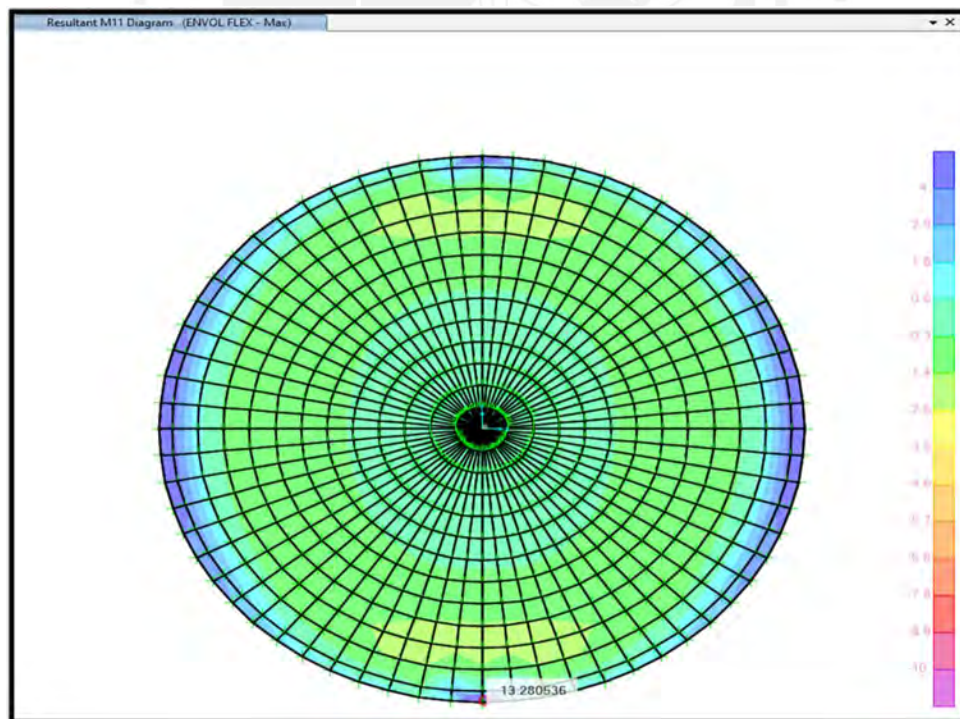
$$Mn_{instalado} = A_s \times f_y \left( d - \frac{A_s \times f_y}{2 \times 0.85 \times f'_c \times b} \right)$$

$$Mn_{iinstalado} = 15.84 \times 4200 \left( 34 - \frac{15.84 \times 4200}{2 \times 0.85 \times 280 \times 100} \right) / 10^5$$

$$Mn_{iinstalado} = 21.69 \text{ ton.m}$$

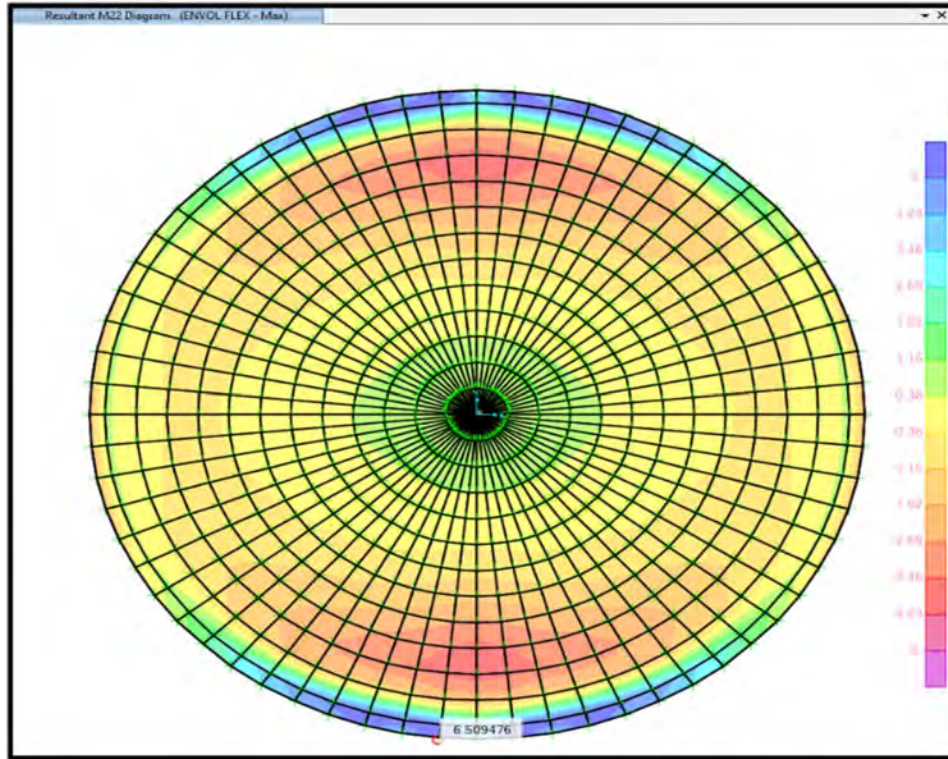
$$\Phi Mn_{iinstalado} = 19.52 \text{ ton.m}$$

Tal y como se muestra en la figura 26 y 27, los momentos del análisis M11 y M22, respectivamente en el fondo de reservorio son menores al momento nominal calculado previamente. Por ende, se diseña el fondo del reservorio con la cuantía mínima calculada (doble malla  $\Phi 5/8'' @ 25 \text{ cm}$ ).



**Figura 26.** Diagrama de momentos M11 en el fondo del reservorio.

Fuente: Propia



**Figura 27.** Diagrama de momentos M22 en el fondo del reservorio.

Fuente: Propia

#### 9.4.2. Por Cortante

Se verificará la resistencia al esfuerzo cortante con el espesor elegido de la cúpula mediante la siguiente fórmula conocida:

$$\Phi V_c = 0.85 \times 0.53 \times \sqrt{f'_c} \times bw \times d$$

$$\Phi V_c = 0.85 \times 0.53 \times \sqrt{280} \times 100 \times 34$$

$$\Phi V_c = 25.63 \text{ ton}$$

Tal y como se muestra en la figura 28 y 29, las fuerzas demandadas por cortante V13 y V23 en la cúpula son menores a la resistencia nominal a la tracción calculada previamente. Por lo tanto, el espesor de la cúpula es suficiente.

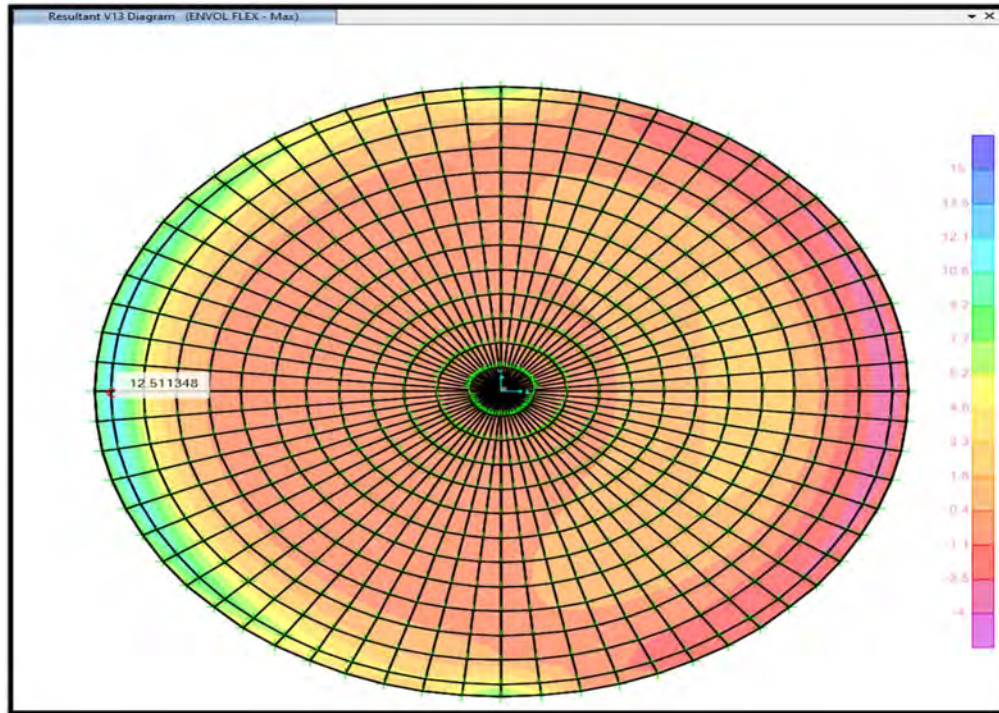


Figura 28. Diagrama de fuerzas cortante V13 en el fondo del reservorio.

Fuente: Propia

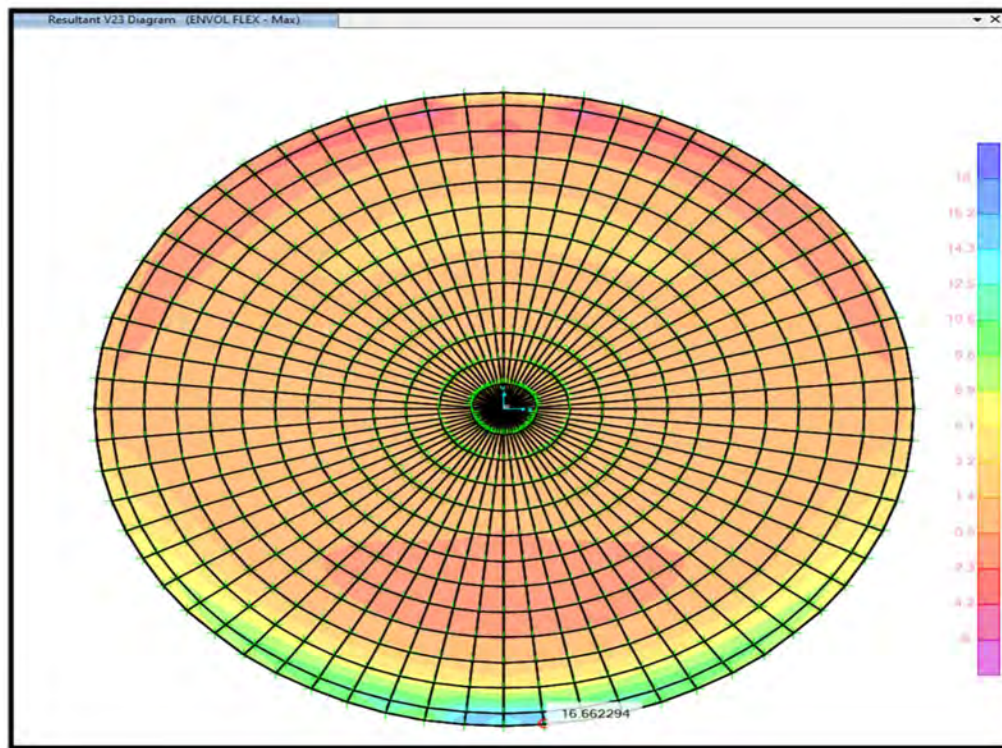


Figura 29. Diagrama de fuerzas cortante V23 en el fondo del reservorio.

Fuente: Propia

### 9.4.3. Diseño Final

En los anexos del presente documento, se presenta la distribución del armado del fondo de losa del reservorio con mayor detalle en los planos de estructuras E-02.

### 9.5. Resumen de diseño

A continuación, la siguiente tabla muestra el resumen de la distribución de acero de los elementos estructurales del reservorio calculados previamente.

**Tabla 28.** Distribución de refuerzo en los elementos estructurales.

<b>Cúpula</b>			
Dirección	Capas	Acero	
Angular	1	3/8'' @ 30cm	
Radial	1	3/8 ''@ 30cm	
<b>Pared cilíndrica</b>			
Dirección	Capas	Acero	
Vertical	2	Φ1/2''@ 20cm con bastón 1/2''@ 30cm	
Horizontal/Angular	2	Φ1''@ 25cm hasta 4.0 metro, y Φ 3/4''@ 25cm el resto	
<b>Anillo</b>			
Dirección	Sección	Acero	Comentarios
Angular	60 x 40 cm	5Φ5/8"	Estribos de montaje 3/8''@ 25cm
<b>Fondo de Losa</b>			
Dirección	Capas	Acero	
Angular	2	5/8 ''@ 25cm	
Radial	2	5/8 ''@ 25cm	

Fuente: Propia

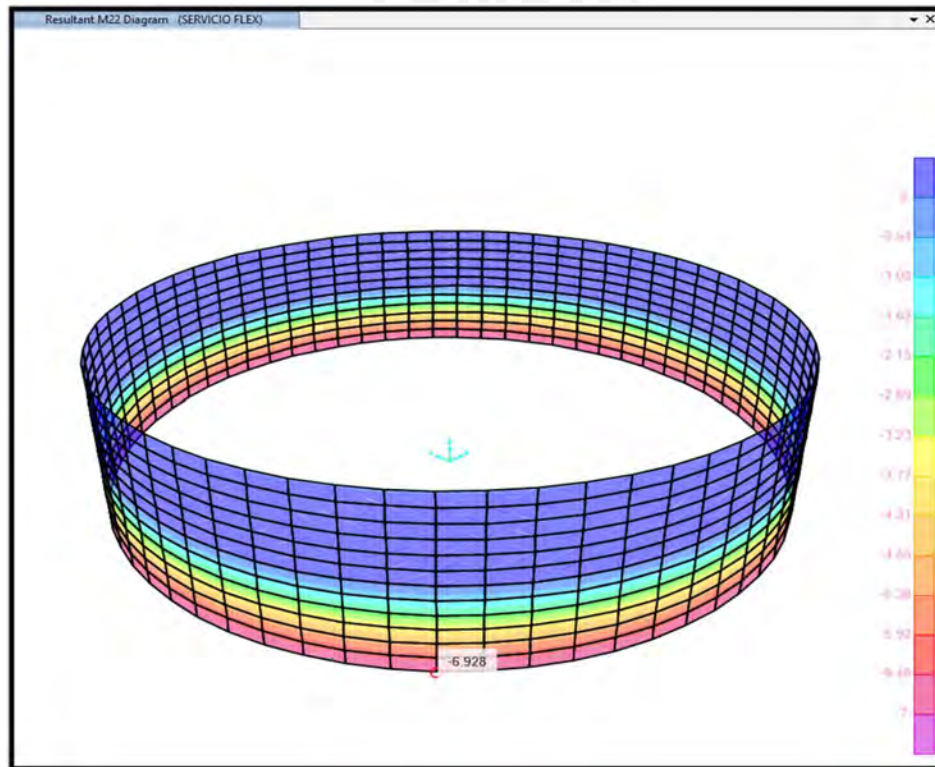
## 10. Control de fisuración

Es necesario realizar un análisis de esfuerzos de los elementos estructurales en contacto con líquido por cargas de servicio para evitar su fisuración. Estas verificaciones se hacen por tracción y por flexión.

Es razonable que estas verificaciones sean cumplidas, pues la estructura fue diseñada en condiciones últimas incluyendo el factor de durabilidad, lo cual indirectamente hace que sea más fácil cumplir con estos requerimientos.

### 10.1. Por Flexión

Se considera las combinaciones en servicio multiplicadas por el factor de durabilidad en flexión para la verificación de los esfuerzos de flexión.



**Figura 30.** Diagrama de momentos M22 en servicio en las paredes.

Fuente: Propia

De la figura 30, se obtiene el momento en servicio amplificada por el factor de durabilidad correspondiente. Se procede a calcular el esfuerzo en el acero.

Se consideran los siguientes datos para el cálculo:

- ✓  $M_s = 7 \text{ ton.m}$
- ✓  $A_s = 15.84 \text{ cm}^2$

- ✓  $b = 100 \text{ cm}$
- ✓  $d = 40 - 6 = 34 \text{ cm}$

Se calcula la relación entre módulos de elasticidad:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2 \times 10^6}{15000 \times \sqrt{280}} = 7.97 \approx 8.00$$

Luego, se obtiene el eje neutro de la sección mediante la siguiente fórmula extraída a partir de la figura 31.

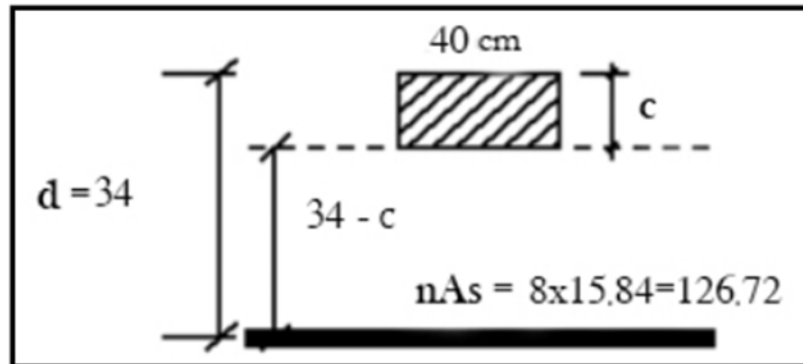


Figura 31. Análisis de la sección fisurada.

Fuente: Propia

$$b \times c \times \frac{c}{2} = n \times A_s \times (d - c)$$

$$100 \times c \times \frac{c}{2} = 8 \times 15.84 \times (34 - c)$$

$$c = 8.10 \text{ cm}$$

Posteriormente, se calcula el momento de inercia de la sección fisurada mediante la siguiente expresión:

$$I_{cr} = \frac{b \times c^3}{3} + n \times A_s \times (d - c)^2$$

$$I_{cr} = \frac{100 \times 8.10^3}{3} + 8 \times 15.84 \times (34 - 8.10)^2$$

$$I_{cr} = 102505 \text{ cm}^4$$

Se calcula el esfuerzo en el acero a partir de la siguiente ecuación:

$$f_s = \frac{n \times M_s \times (d - c)}{I_{cr}}$$

$$f_s = \frac{8 \times 7 \times 10^5 \times (34 - 8.10)}{102505}$$

$$f_s = 1414.96 \text{ kg/cm}^2$$

Por último, se realiza la comparación con el máximo esfuerzo en el acero permisible por flexión según la siguiente ecuación recomendada por el ACI 350-06:

	<b>fs permisible (psi)</b>
Flexión (cond. normales)	$\frac{320}{\beta\sqrt{s^2+4(2+d_b/2)^2}}$
Flexión (cond. severas)	$\frac{260}{\beta\sqrt{s^2+4(2+d_b/2)^2}}$

**Figura 32.** fs permisible en flexión.

Tomado de la diapositiva del curso Diseño de Sistemas de Contención de Líquidos, 2021.

De la figura 32, se utilizará la expresión para condiciones normales:

$$f_{s_{permisible}} = \frac{320}{\beta\sqrt{s^2 + 4(2 + d_b/2)^2}}$$

Donde:

$$\checkmark \beta = \frac{h-c}{d-c} = \frac{40-8.10}{34-8.10} = 1.23$$

$$\checkmark s = 25 \text{ cm} = 9.84 \text{ in}$$

$$\checkmark d_b = \frac{5}{8} \text{ in}$$

Reemplazando en la ecuación, se obtiene lo siguiente:

$$f_{s_{permisible}} = \frac{320}{1.23\sqrt{9.84^2 + 4(2 + 5/16)^2}}$$

$$f_{s_{permisible}} = 23.93 \text{ ksi}$$

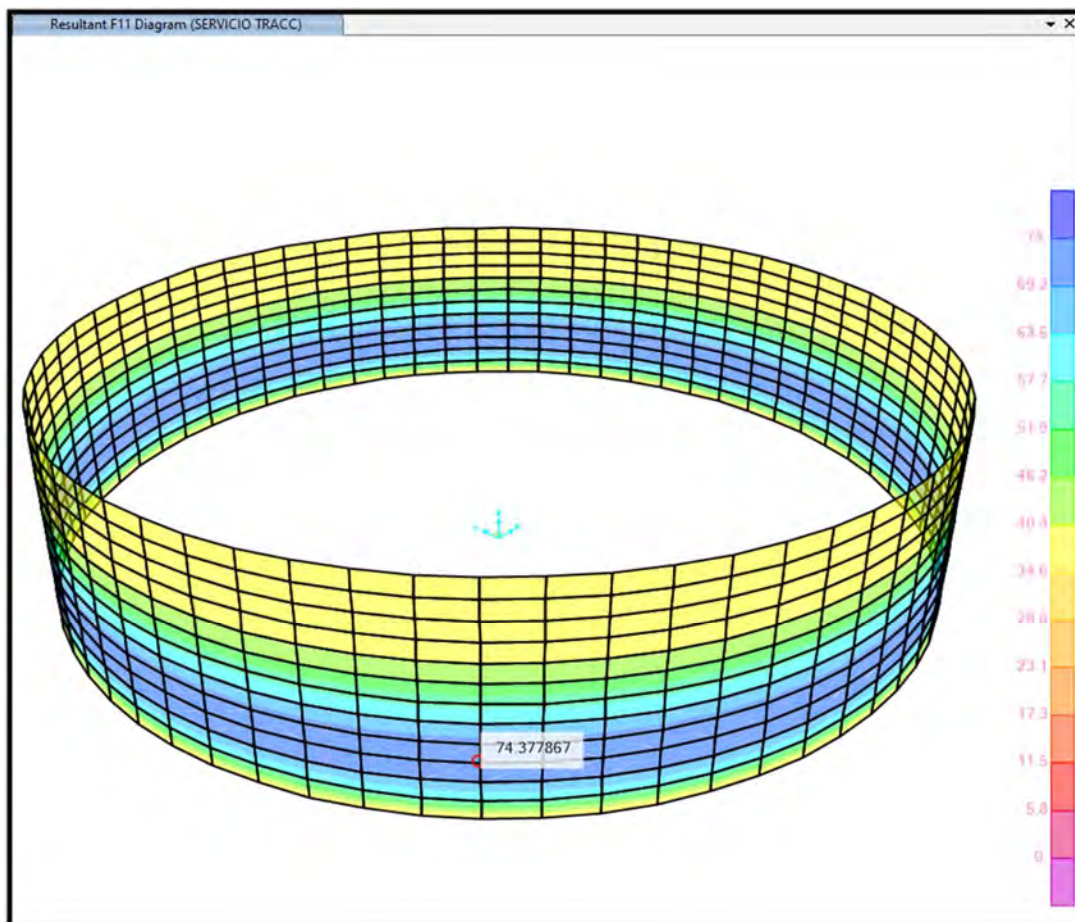
$$f_{s_{permisible}} = 1680.34 \text{ kg/cm}^2 > f_s = 1414.96 \text{ kg/cm}^2$$

Finalmente, se observa que el esfuerzo en el acero en condiciones de servicio se encuentra por debajo del máximo permisible, por lo tanto, se cumple la verificación de fisuración por tracción.

## 10.2. Por tracción

Se considera las combinaciones en servicio multiplicadas por el factor de durabilidad en tracción para la verificación de los esfuerzos de tracción.





**Figura 33.** Diagrama de fuerzas de tracción F11 en servicio en las paredes.

Fuente: Propia

De la figura 33, se obtiene la tracción en servicio amplificada por el factor de durabilidad correspondiente.

$$T_s = 75 \text{ ton}$$

Tomando este valor, se calcula el esfuerzo de tracción según la expresión recomendada por la PCA (*Portland Cement Association*).

$$f_t = \frac{T \times (E_s \times \varepsilon + f_s)}{A_g \times f_s + (n - 1)T} \leq 0.1 \times f'_c$$

Donde:

- ✓  $T = 75000 \text{ kg}$  (fuerza normal de tracción bajo cargas de servicio)
- ✓  $E_s = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  (módulo de elasticidad del acero)
- ✓  $\varepsilon = 0.0003$  (deformación unitaria del concreto por contracción de fragua)

- ✓  $f_s = 1400 \text{ kg/cm}^2$  (máximo esfuerzo de tracción del acero permisible en condiciones normales)
- ✓  $A_g = 100 \times 40 \text{ cm}^2$  (área de la sección bruta de concreto)
- ✓  $n = 8$  (relación de los módulos de elasticidad del acero y del concreto)
- ✓  $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$  (resistencia a compresión del concreto)

$$f_t = \frac{75000 \times (2 \times 10^6 \times 10^6 \times 0.0003 + 1400)}{100 \times 40 \times 1400 + (8 - 1) \times 75000} < 0.1 \times 280$$

$$f_t = 24.50 \text{ kg/cm}^2 < 28 \text{ kg/cm}^2$$

Finalmente, se observa que este valor se encuentra por debajo del máximo permisible, por lo tanto, se cumple la verificación de fisuración por tracción.



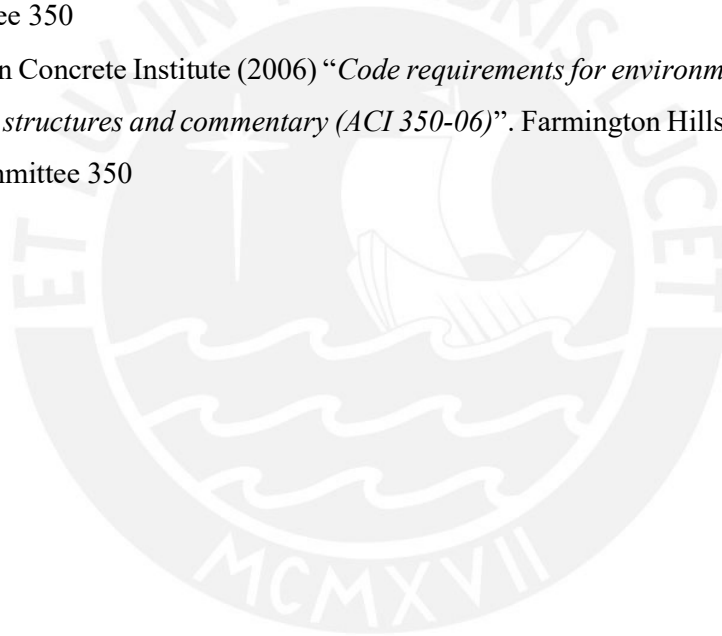
## 11. Conclusiones, comentarios y/o recomendaciones

- La construcción de los reservorios circulares apoyados resulta económica y tradicional para capacidades medianas y pequeñas como es el caso de los proyectos de abastecimiento de agua potable en poblaciones rurales.
- Se realizó la modelación del reservorio circular con el programa SAP2000 el cual utiliza el método de elementos finitos tipo Shell. Gracias a este método, se puede aseverar que los resultados obtenidos son los adecuados.
- Los parámetros sísmicos obtenidos de la norma E.030-2018 no son los suficientes para lograr diseñar este tipo de estructura para la ciudad de Lima. Por ello, se complementó con el método de la norma ACI 350.3-06.
- Se recomienda incorporar todas las sollicitaciones sísmicas involucradas para el Análisis y Diseño Sísmico en Estructuras de Almacenamiento de Líquidos en la Norma Peruana E.030 de tal manera que se tenga un valor de coeficiente de reducción de fuerza sísmica “R” apropiado para estos sistemas estructurales especiales como reservorios de agua u otros líquidos.
- El método dinámico utilizado en el trabajo es el espectro de pseudo-aceleración de diseño. En base a profundizar el estudio, se recomienda que se desarrolle un análisis de tiempo-historia utilizando al menos 4 registros de aceleraciones.
- El diseño de los elementos del tanque se realizó teniendo en cuenta en análisis de cargas de gravedad y análisis sísmico estático.
- Se trabajó con un espesor de cúpula de 7 cm, que tiene resistencia suficiente para los esfuerzos que muestra el análisis estructural mostrado.
- El predimensionamiento realizado para el proyecto fue el adecuado, ya que no se tuvo que aumentar los espesores de ningún elemento del tanque, incluso es posible disminuir la dimensión del espesor de las paredes cilíndricas en la zona superior del tanque, para ahorrar costos de construcción.
- Los esfuerzos que son considerables en magnitud para el diseño de los elementos de cascara del tanque, son las de fuerzas axiales representadas por F11 y F22, los de flexión representados por M22 y los de corte representados V23, los demás se los considera ingenierilmente despreciables porque tienen valores bajos.
- Se logró verificar que el espesor de las paredes tanque era el adecuado al comparar la fuerza cortante V23 con la fuerza cortante que brindaba el concreto, esta era mucho mayor.

- Al hacer una comparación entre las solicitaciones últimas que otorgaba el análisis sísmico estático vs el análisis sísmico dinámico, se comprobó que el análisis dinámico da valores más altos tanto en la cúpula y anillo en factores mayores a 1.65 y en las paredes a 1.10 aproximadamente.
- Los esfuerzos para el diseño fueron calculados con la envolvente de las diferentes combinaciones afectado por el factor de durabilidad que, como se comprueba con los cálculos, ayudó a controlar la fisuración en los elementos del tanque.
- El acero que se distribuyó en la cúpula es de 3/8" @ 30cm que es el acero mínimo que brinda la norma E.060 de  $0.0018 \times b \times h$ , ya que las solicitaciones de esfuerzos que se aplicaban eran distribuciones más bajas.
- Las paredes cilíndricas se diseñaron por tracción anular y por flexión, se realizaron dos distribuciones distintas: acero vertical 1/2" @ 20cm con bastón de 1/2" @ 30cm hasta los 2.0m y, acero horizontal 1" @ 25cm hasta 4.0m y 3/4" @ 25cm el resto de altura.
- La viga del anillo, que rodea a las paredes cilíndricas, se diseñó por esfuerzos de tracción anular resultando instalar 5 $\Phi$ 5/8", y los estribos colocados fueron mínimos de montaje 3/8" @ 25cm, ya que la solicitación principal es la tracción.
- El acero que se distribuyó en el fondo es de 5/8" @ 25cm que es la cuantía mínima de acero de acuerdo a la longitud entre juntas igual al elegido para las paredes cilíndricas (longitud entre juntas menores a 6m), ya que las solicitaciones de esfuerzos que se aplicaban eran distribuciones más bajas
- El control de fisuración tanto por flexión como por tracción fue óptimo ya que los esfuerzos del acero que se obtuvieron, están por debajo de lo permitido por las normas de diseño, lo que evidencia que el diseño es el adecuado.
- Se obtuvo un período para la masa impulsiva de 0.13s mientras que para la masa convectiva corresponde a 6.39s obtenido por las ecuaciones de Housner (similar al obtenido por el primer modo en el modelo dinámico  $T_c = 6.42s$ ) por el cual se concluye que la asignación de la rigidez convectiva ( $K_c$ ) asignada al modelo es válida.

## 12. Bibliografía

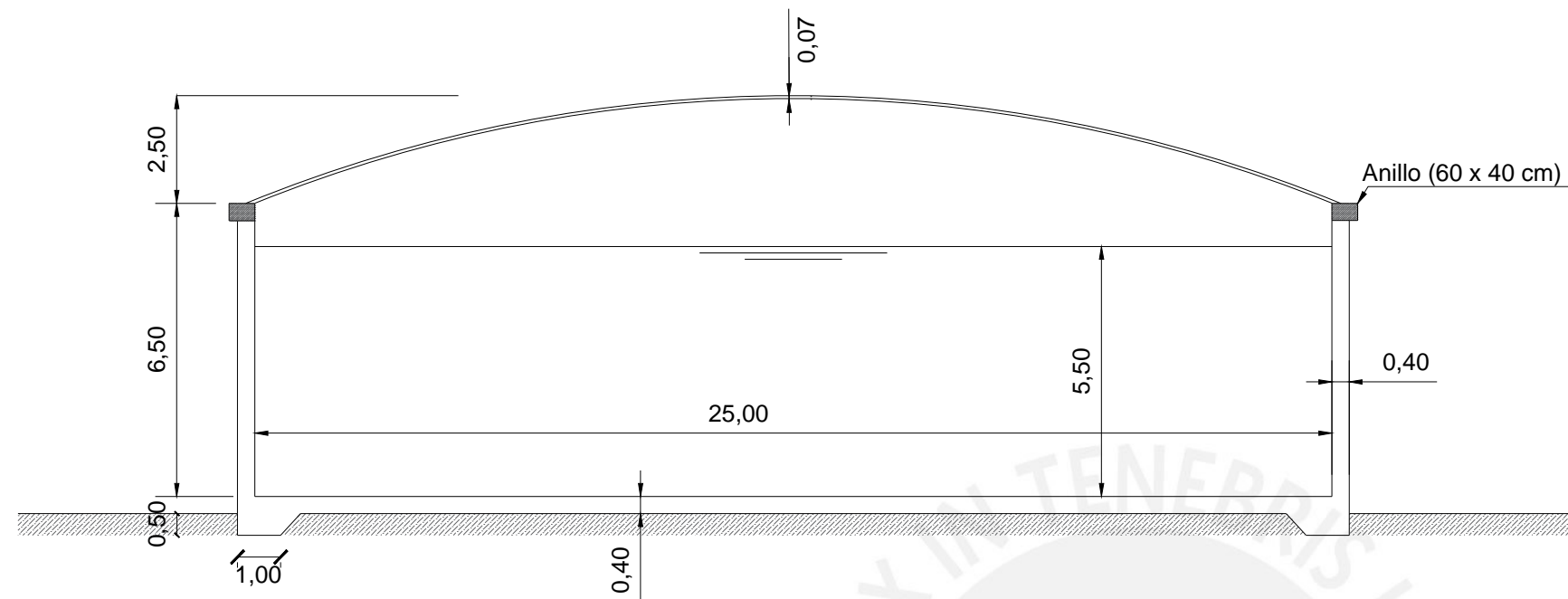
- Ministerio Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Norma E.020 Cargas*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma E.060 Concreto Armado*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Villagómez, Diego (2020) *Diseño de sistemas de concreto para contención de líquidos* [Diapositiva]. Lima, Perú: PUCP. Consulta 01 de marzo del 2022.
- American Concrete Institute (2006) “*Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI 350.3-06)*”. Farmington Hills, Michigan, USA. ACI committee 350
- American Concrete Institute (2006) “*Code requirements for environmental engineering concrete structures and commentary (ACI 350-06)*”. Farmington Hills, Michigan, USA. ACI committee 350



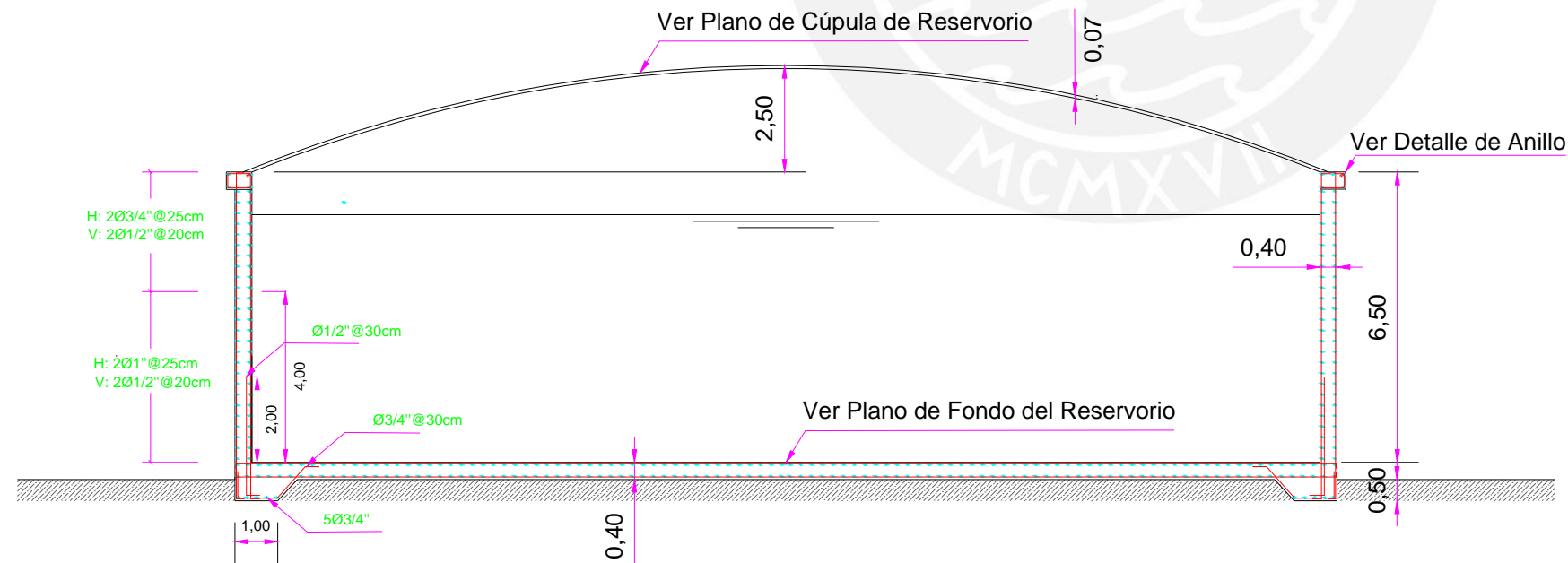
### 13. Anexos

A continuación, se presenta el plano estructural del reservorio simplemente apoyado con sus especificaciones técnicas y parámetros. En el plano E-01, se muestra el dimensionamiento y diseño de las paredes cilíndricas y el anillo mientras que en el plano E-02 se muestra el diseño de la cúpula esférica y el fondo de losa del reservorio.





**DIMENSIONAMIENTO DEL RESERVORIO**



**REFUERZO DEL RESERVORIO**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

**MATERIALES**

- A. ACERO
  - Esfuerzo de fluencia :  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$  (Grado 60 ASTM A 615).
- B. CEMENTO
  - Cemento Portland Tipo I (N.T.P. 334.009 - ASTM C 150)
  - Relación w/c = 0.45 (ACI 350-06 tabla 4.2.2)
- C. CONCRETO
  - Losa de Fondo :  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
  - Pared Cilindrica :  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
  - Anillo :  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
  - Cúpula :  $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$
- D. RECUBRIMIENTOS
  - Contra el terreno : 7.50 cm
  - Muros : 5.00 cm
  - Vigas : 5.00 cm
  - Cúpula : 1.50 cm

**E. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO**

PARÁMETROS DEL SUELO

Módulo de Balasto : 2.00 kg/cm<sup>3</sup>

**F. PARÁMETROS SISMORRESISTENTES**

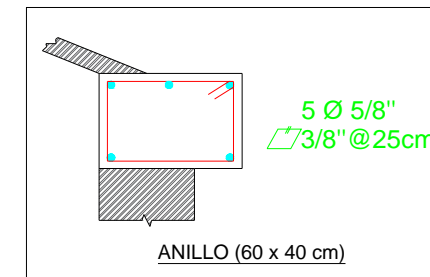
Norma E.030 Diseño Sismorresistente

- Factor de Zona (Zona 4) :  $Z = 0.45$
- Factor de Suelo (Tipo S1) :  $S = 1.00$
- Factor de Uso (Categoría C) :  $U = 1.50$

$T_p = 0.40 \text{ s}$   
 $T_L = 2.50 \text{ s}$

ACI 350.3-06

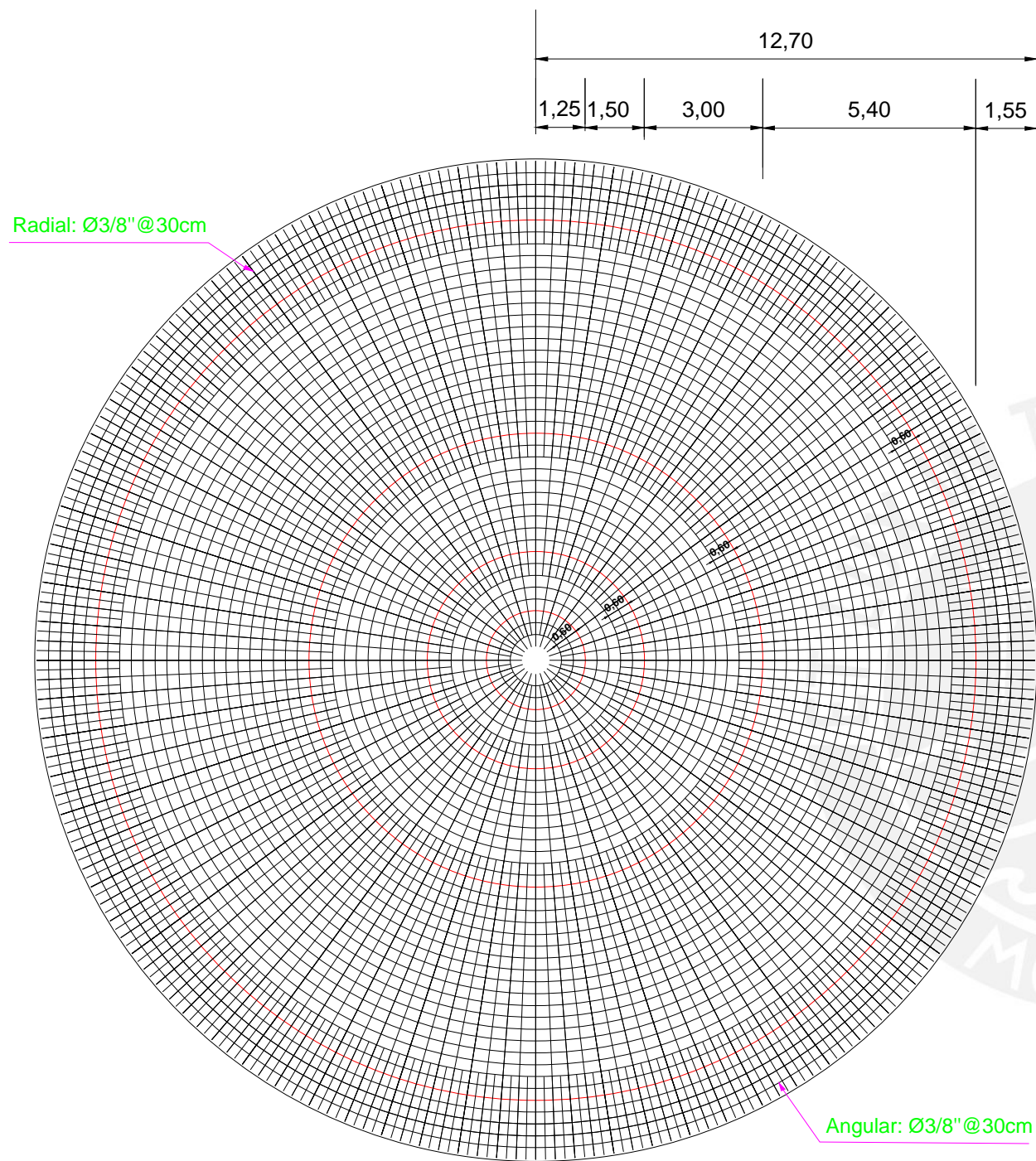
- Factor de Reducción Convectivo :  $R_c = 1.00$
- Factor de Reducción Impulsivo :  $R_i = 2.00$



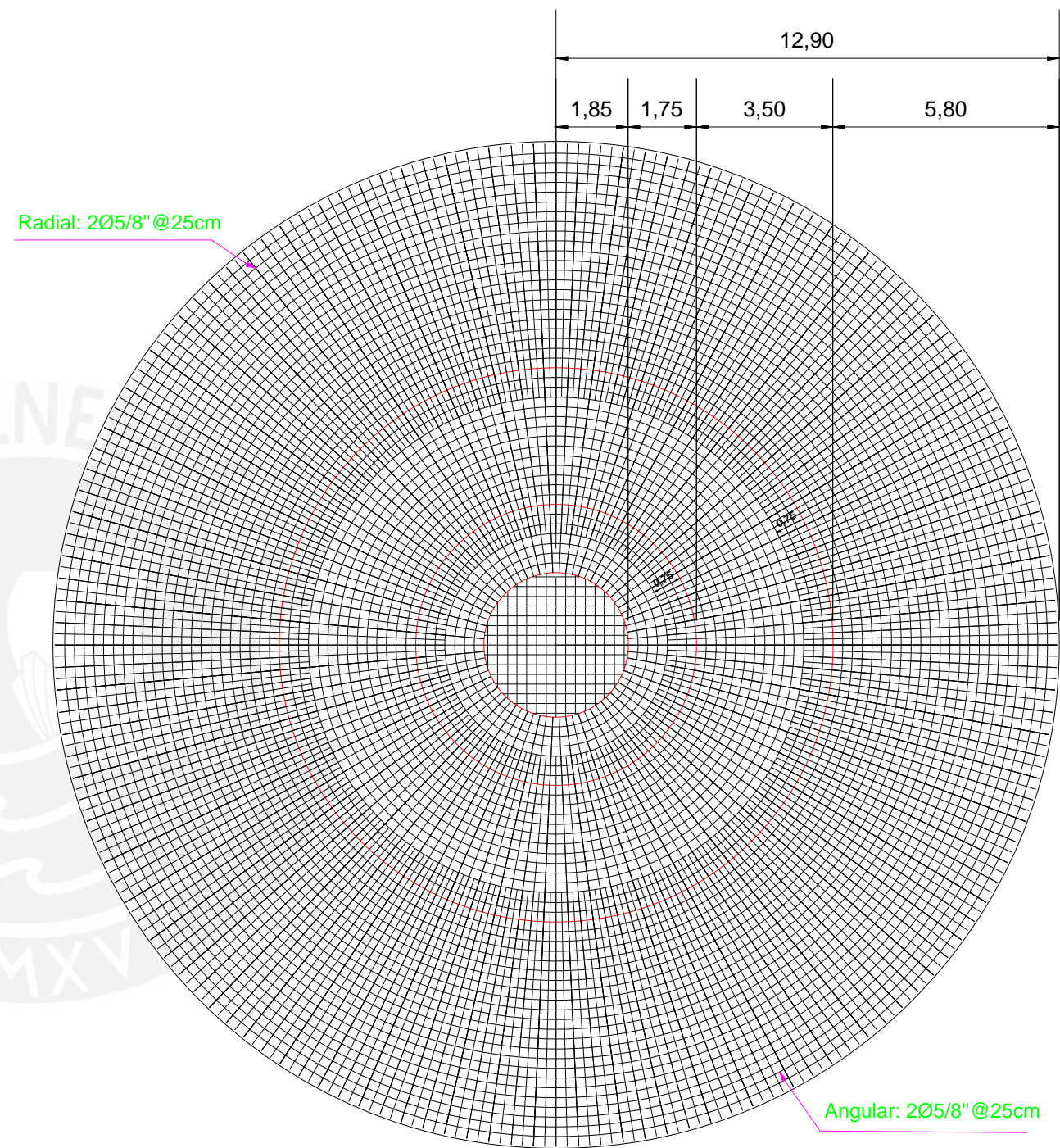
ANILLO (60 x 40 cm)

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 2021-3

Proyecto:	RESERVORIO CIRCULAR DE 2700 M3	Plano N°:	<b>E-01</b>
Plano:	DIMENSIONAMIENTO Y REFUERZO DEL RESERVORIO		
Especialidad:	ESTRUCTURAS		
Diseño:	B.Sc. RENZO ADOLFO MONTENEGRO CARRILLO.	Dib.: RMC Escala: 1/50 Fecha: 05-10-2022	



CÚPULA ESFÉRICA DEL RESERVORIO



LOSA DE FONDO DEL RESERVORIO

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 2021-3			
Proyecto:	RESERVORIO CIRCULAR DE 2700 M3	Plano N°:	E-02
Plano:	CÚPULA ESFÉRICA Y FONDO DE LOSA		
Especialidad:	ESTRUCTURAS		
Diseño:	B.Sc. RENZO ADOLFO MONTENEGRO CARRILLO.	Dib.: RMC	Escala: 1/50
			Fecha: 05-10-2022