

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Diseño y optimización de cimentaciones profundas
para depósitos de base circular.

Autor: Pablo José Padilla Sánchez

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Diseño y optimización de cimentaciones profundas para depósitos de base circular.

Autor:

Pablo José Padilla Sánchez

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor titular

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Diseño y optimización de cimentaciones profundas para depósitos de base circular.

Autor: Pablo José Padilla Sánchez

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mis padres Teresa y Antonio

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis padres la oportunidad de formarme en lo que quise y por el apoyo incondicional que me han brindado desde el principio. Os estaré eternamente agradecido. A Sara, por animarme y aportarme esa parte de alegría y despeje que necesitaba en muchos momentos.

Gracias a todos los compañeros y amigos que me llevo de esta etapa, desde primero hasta cuarto, por amenizar el día a día y hacer que todo sea más llevadero.

Por último, dar las gracias a mis profesores y en especial a Antonio Martínez de la Concha por su buen trato, tiempo, dedicación y enseñanzas.

Resumen

El objetivo de este trabajo es la optimización de la distribución en planta de la cimentación mediante pilotes en los depósitos de base circular. Para ello se crea un código en el lenguaje de programación VBA, el cual a través de su conexión con SAP2000 genera la distribución óptima de los pilotes en la losa circular que sustenta el depósito.

En primer lugar, es necesario conocer el comportamiento y la forma de trabajar que tendrán los pilotes. Estos trabajarán y serán analizados desde un punto de vista estructural a través de su tope estructural, no considerando así su comportamiento geotécnico.

Una vez que se conozca esto, se pasa a la creación del modelo de cálculo y a la definición del proceso seguido para conseguir la optimización haciendo que las reacciones obtenidas en cada pilote se encuentren entre un rango definido por el tope estructural de los mismos.

Por último, se comprueba el correcto funcionamiento del proceso de optimización con un ejemplo práctico.

Abstract

The aim of this work is to optimise the plant layout of the pile foundations in circular base tanks. For this purpose, a code is created in the VBA programming language, which through its connection with SAP2000 generates the optimal distribution of the piles in the circular slab that supports the tank.

First of all, it is necessary to know the behaviour and the way the piles will work. These will work and will be analysed from a structural point of view through their structural top, not considering their geotechnical behaviour.

Once this is known, the calculation model is created and the process followed to achieve the optimisation is defined so that the reactions obtained in each pile are within a range defined by the structural top of the piles.

Finally, the correct functioning of the optimisation process is checked with a practical example.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xii
Abstract	xiv
Índice	xvii
Índice de Tablas	xxi
Índice de Figuras	xxiii
Notación	xxvii
1 Introducción	1
2 Objetivos del trabajo	3
3 Herramientas utilizadas	5
3.1 SAP2000	5
3.2 API de SAP2000	5
3.3 Excel	6
3.4 Visual Basic Application (VBA)	6
4 Cimentaciones Profundas	7
5 Modelo de Cálculo	9
5.1 Geometría de la estructura y del modelo	9
5.2 Materiales	11
5.2.1 Hormigón	11
5.2.2 Acero estructural	11
5.2.3 Acero de armado	11
5.3 Modelización de los elementos estructurales	12
5.3.1 Pared lateral del depósito	12
5.3.2 Losa	13
5.3.3 Encuentro rígido	14
5.4 Condiciones de contorno	15
5.5 Cargas	16
5.6 Combinación de cargas	16
5.6.1 Estado Límite Último	16
5.6.2 Estado Límite de Servicio	17
6 Optimización Distribución de Pilotes	19
6.1 Introducción a la Optimización	19
6.1.1 Datos iniciales	19
6.1.2 Condiciones a cumplir	20
6.2 Analogía Losa Circular-Barra	20
6.2.1 Barra simplemente apoyada sin voladizo y misma luz	20
6.2.2 Barra simplemente apoyada con voladizo y misma luz	21

6.2.3	Barra simplemente apoyada sin voladizo y luz variable	22
6.2.4	Barra simplemente apoyada con voladizo y luz variable	22
6.2.5	Conclusión	23
6.3	<i>Proceso de Optimización</i>	23
6.3.1	Predimensionamiento de número de pilotes	24
6.3.2	Definición de anillos	24
6.3.3	Definición de pilotes en anillos	26
6.3.4	Desfase angular entre anillos	27
6.3.5	Postproceso iterativo	28
7	Ejemplo Práctico	31
7.1	<i>Datos iniciales</i>	31
7.2	<i>Resultados por cada iteración</i>	32
7.2.1	Iteración 1	32
7.2.2	Iteración 2	39
7.2.3	Iteración 3	44
7.2.4	Iteración 4	49
7.2.5	Iteración 5	54
7.3	<i>Comparación de resultados</i>	59
8	Aplicación API SAP2000	61
8.1	<i>API de SAP2000</i>	61
8.2	<i>Estructura del Código VBA</i>	61
9	Conclusiones	63
	Referencias	66
	Anexo 1: Reacciones de cada Iteración	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4–1. Tensión de pilotes según tipo y procedimiento de construcción.	8
Tabla 5–1. Coeficientes parciales de seguridad para materiales.	12
Tabla 6–1. Geometría barras analogía Losa circular-Barras.	20
Tabla 7–1. Datos ejemplo práctico.	31
Tabla 7–2. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 1.	32
Tabla 7–3. Cálculo número de pilotes predimensionamiento.	32
Tabla 7–4. Iteración 1 cálculo número de anillos.	33
Tabla 7–5. Iteración 2 cálculo número de anillos.	33
Tabla 7–6. Iteración 3 cálculo número de anillos.	34
Tabla 7–7. Iteración 4 cálculo número de anillos.	34
Tabla 7–8. Resumen cálculo número de anillos.	34
Tabla 7–9. Distribución número de pilotes por anillo en iteración 1.	35
Tabla 7–10. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 1.	35
Tabla 7–11. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 2.	39
Tabla 7–12. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 2.	40
Tabla 7–13. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 2.	40
Tabla 7–14. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 3.	44
Tabla 7–15. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 3.	45
Tabla 7–16. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 3.	45
Tabla 7–17. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 4.	49
Tabla 7–18. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 4.	50
Tabla 7–19. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 4.	50
Tabla 7–20. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 5.	54
Tabla 7–21. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 5.	55
Tabla 7–22. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 5.	55
Tabla 7–23. Resumen del número de pilotes en cada iteración.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Software SAP2000.	5
Figura 3-2. Programa Microsoft Excel.	6
Figura 5-1. Depósito de base circular en la realidad.	9
Figura 5-2. Croquis de planta y perfil de depósito de base circular.	10
Figura 5-3. Modelo de depósito de base circular en SAP2000.	10
Figura 5-4. Nomenclatura y ejes de elemento Shell cuadrado.	13
Figura 5-5. Esfuerzos flectores y torsos en elemento Shell.	14
Figura 5-6. Modelización de encuentro rígido.	15
Figura 5-7. Condiciones de contorno sobre la losa en modelo de cálculo SAP2000.	16
Figura 6-1. Modelo de barra simplemente apoyada sin voladizo y misma luz.	21
Figura 6-2. Momento flector de barra simplemente apoyada sin voladizo y misma luz.	21
Figura 6-3. Modelo de barra simplemente apoyada con voladizo y misma luz.	21
Figura 6-4. Momento flector de barra simplemente apoyada con voladizo y misma luz.	22
Figura 6-5. Modelo de barra simplemente apoyada sin voladizo y luz variable.	22
Figura 6-6. Momento flector de barra simplemente apoyada sin voladizo y luz variable.	22
Figura 6-7. Modelo de barra simplemente apoyada con voladizo y luz variable.	23
Figura 6-8. Momento flector de barra simplemente apoyada con voladizo y luz variable.	23
Figura 6-9. Nomenclatura anillos y radios.	25
Figura 6-10. Definición número de pilotes en anillo.	26
Figura 6-11. Diferencia entre pilotes alineados y no alineados en losa.	28
Figura 7-1. Momento flector M11 en la iteración 1.	36
Figura 7-2. Momento flector M22 en la iteración 1.	37
Figura 7-3. Momento torsor M12 en la iteración 1.	38
Figura 7-4. Deformada en la iteración 1.	39
Figura 7-5. Momento flector M11 en la iteración 2.	41
Figura 7-6. Momento flector M22 en la iteración 2.	42
Figura 7-7. Momento torsor M12 en la iteración 2.	43
Figura 7-8. Deformada en la iteración 2.	44
Figura 7-9. Momento flector M11 en la iteración 3.	46
Figura 7-10. Momento flector M22 en la iteración 3.	47
Figura 7-11. Momento torsor M12 en la iteración 3.	48
Figura 7-12. Deformada en la iteración 3.	49

Figura 7-13. Momento flector M11 en la iteración 4.	51
Figura 7-14. Momento flector M22 en la iteración 4.	52
Figura 7-15. Momento torsor M12 en la iteración 4.	53
Figura 7-16. Deformada en la iteración 4.	54
Figura 7-17. Momento flector M11 en la iteración 5.	56
Figura 7-18. Momento flector M22 en la iteración 5.	57
Figura 7-19. Momento torsor M12 en la iteración 5.	58
Figura 7-20. Deformada en la iteración 5.	59

Notación

F3	Reacción vertical
M11	Momento flector en la dirección 11
M22	Momento flector en la dirección 22
M12	Momento torsor

1 INTRODUCCIÓN

El técnico necesita poseer unas condiciones propias, innatas y perfeccionadas a lo largo de su formación humana, unos conocimientos técnicos y una educación profesional adaptadas a su misión.

- Eduardo Torroja Miret -

En los tiempos en los que vivimos y los últimos años atrás son conocidos como la era de la información y tiene su explicación en el gran desarrollo tecnológico que se ha llevado a cabo.

En el campo de la ingeniería este desarrollo ha traído muchos avances y facilidades para el diseño y cálculo de infraestructuras. El principal progreso ha sido desde un punto de vista computacional, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y trabajo a la hora de realizar sucesivos cálculos que hace unos años eran impensables. Podemos crear un modelo en cualquiera de los softwares del mercado, dejar que calcule y ocupar ese tiempo haciendo otros quehaceres.

Esta ventaja computacional también se puede reflejar en un ahorro de dinero que, aunque no es lo más importante cuando estamos diseñando y calculando una obra civil, sí que es una de las cuestiones más determinantes. De este modo podemos ahorrar dinero realizando varios modelos con tipologías y soluciones diferentes, para posteriormente realizar un análisis comparativo y quedarnos con el que mejor relación calidad-precio presente.

Todo lo anterior se puede resumir en una palabra y es OPTIMIZACIÓN. Según la RAE, optimizar es “*Buscar la mejor manera de realizar una actividad*”. Desde un enfoque ingenieril, esto se podría resumir en buscar la mejor solución para el problema planteado con el menor precio y trabajo posible.

El presente trabajo fin de grado busca justo eso, la optimización de la cimentación mediante pilotes de depósitos de base circular. Esto se realizará con las siguientes herramientas: SAP2000, EXCEL y VBA.

Esta optimización puede relacionarse con otro concepto muy de moda hoy en día y más aún de cara al futuro que es la sostenibilidad. Las infraestructuras que se proyectan están en constante interacción con el ambiente que las rodea y muchas de ellas provocan cambios en ese ambiente. No todos estos cambios que pueden darse son directamente dañinos, sino que hay otros aspectos como el impacto visual o la integración de estas obras en el paisaje que presentan una importancia elevada. En el caso que nos ocupa, una optimización de los pilotes lleva a colocar el menor número de ellos, lo que reduce el impacto que se genera con la fabricación de estos y su colocación.

Otro aspecto importante a comentar y que viene en relación con el desarrollo tecnológico es el tema de la programación, que ha sido la herramienta usada para conseguir la optimización. La ingeniería civil y la programación parecen no ser dos ámbitos de conocimiento que puedan llegar a estar unidos, pero en los últimos años ha cambiado. Esto se pone de manifiesto con la llegada del Building Information Modeling (BIM) en el cuál la programación es una de las corrientes tratadas actualmente para tratar la información.

La utilización de programas informáticos y la programación ayudan a automatizar cálculos y procesos, por lo que el esfuerzo que conlleva la creación de un programa que realice una determinada función es rentable si esta es realizada con cierta periodicidad.

Como es lógico pensar, nunca habrá dos proyectos iguales. Aquí entra en juego otro aspecto importante y es la adaptabilidad del modelo de cálculo y programa para que estos se puedan usar en proyectos semejantes. El tener programado el cálculo y diseño del modelo hace que adaptar un proyecto con otro semejante sea relativamente sencillo.

El presente trabajo fin de grado se estructura de la siguiente forma:

- Apartado 1: Introducción y contexto del trabajo.
- Apartado 2: Se expondrán los objetivos que se quieren alcanzar con la realización del trabajo.
- Apartado 3: Se describirán los programas, softwares y herramientas informáticas que se han utilizado.
- Apartado 4: Se explicarán los tipos de cimentaciones profundas existentes y se tratarán con más detalle la realizada mediante pilotes.
- Apartado 5: Se explicará el modelo de cálculo empleado.
- Apartado 6: Explicación del proceso seguido para la optimización de la cimentación desde el punto de vista estructural de las reacciones.
- Apartado 7: Se exponen los resultados obtenidos para un ejemplo de aplicación y se realizará un análisis comparativo de cada iteración.
- Apartado 8: Se explica el uso de la API de SAP2000 y la estructura del código usado.
- Apartado 9: Se exponen las conclusiones a las que se han llegado con todo lo expuesto.

2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo principal de este tipo de construcciones es contener los empujes del líquido, gas o sólido que almacenará. Para ello deben asegurar una función resistente, la cual hace referencia no solo a que su resistencia se aleje del peligro de rotura si no que la construcción se mantenga estable e inmóvil total o parcialmente. Una vez se aseguren estos aspectos, se puede pasar a la optimización.

En muchas ocasiones es difícil expresar numéricamente la idea de rebajar el costo de la obra ya que en esta intervienen factores muy variados. Recogiendo esta idea de conseguir un ahorro en la obra, de forma que pueda ser cuantificado numéricamente y técnicamente viable surge el objetivo de este trabajo.

Como se ha explicado en el apartado anterior, la optimización se puede abordar desde muchos puntos de vista según la o las características que se quieran mejorar.

El presente trabajo se centra en la optimización de la distribución en planta de una cimentación por pilotes bajo un depósito de base circular, quedando fuera del alcance del mismo el cálculo de la losa y del depósito.

La partida correspondiente a los pilotes es una de las que más peso tiene dentro del presupuesto final de este tipo de construcciones, la cual está asociada: al coste del material, mano de obra, duración, etc. Por lo que prestar una especial atención a la optimización de los mismos tiene bastante importancia.

Los pilotes se tratarán desde un punto de vista meramente estructural, comprobando si rompen o no debido a su tope estructural. En el apartado 4. *Cimentaciones Profundas* se tratarán con más detalle estos aspectos.

Una vez se terminen los cálculos se tendrá una distribución de los pilotes sobre la losa de forma que sea una cimentación funcional, resistente y óptima desde el punto de vista estructural de las reacciones.

Una ventaja extra de optimizar la cimentación por pilotes es que se consigue la optimización de la losa, la cual trabaja a flexión en función de las luces entre los mismos.

La optimización se realizará automatizando cálculos con el lenguaje de programación VBA y los softwares SAP2000 y Excel.

A pesar de que la programación no es el objetivo principal del presente trabajo, sino más bien un método de realizar la optimización, se explicará la estructura del programa realizado, así como la implementación de la optimización.

3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Hoy en día, la ingeniería se apoya en una gran variedad de programas de análisis y diseño, que han permitido realizar importantes avances en la comprensión y optimización de los diferentes proyectos realizados. Esta tecnología ha permitido la automatización de procedimientos computacionales que hace veinte años tomó meses completar y hace cincuenta años ni siquiera era posible lograr con un tiempo y costo aceptable para cualquier proyecto de tamaño medio.

Para el presente trabajo se han hecho uso de las herramientas informáticas que se exponen a continuación.

3.1 SAP2000

SAP2000 es un programa de elementos finitos de la compañía Computers and Structures (CSI) para realizar la modelización, dimensionamiento y análisis, estático y dinámico, de todo tipo de problemas de ingeniería de estructuras. Desde un análisis 2D de modelos estáticos simples hasta los grandes modelos sofisticados que requieren análisis no lineal.

Además de su poder de análisis tiene una interfaz gráfica de usuario muy intuitiva y fácil de manejar.

Se ha hecho uso de la versión 14, con la cual se instala una Application Programming Interface (API) que se explicará en el apartado siguiente.



Figura 3-1. Software SAP2000.

3.2 API de SAP2000

La Application Programming Interface (API) de SAP2000 es una potente herramienta que permite a los usuarios automatizar muchos de los procesos necesarios para construir, analizar y diseñar modelos y obtener resultados de análisis y diseño personalizados. También permite a los usuarios vincular SAP2000 con software de terceros, proporcionando una vía para el intercambio bidireccional de información del modelo con otros programas.

La mayoría de los lenguajes de programación pueden utilizarse para acceder a SAP2000 a través de la API.

Esto incluye Visual Basic para Aplicaciones (VBA), que se incluye en programas como Microsoft Excel.

3.3 Excel

Microsoft Excel es una hoja de cálculo desarrollada por Microsoft para la manipulación en forma de tablas de datos numéricos y de texto. Dentro de los programas ofimáticos, Excel permite organizar datos y realizar cálculos básicos o aplicar funciones matemáticas de mayor complejidad. Un punto fuerte donde destaca Excel, son los casos donde se necesitan hacer cálculos repetitivos.

Otras de las ventajas que presenta es que facilita la generación de gráficas, tablas y reportes para la presentación de resultados.

Además de todo lo anterior, cuenta con un lenguaje de programación para realizar macros llamado VBA y el cual se tratará en el siguiente subapartado.



Figura 3-2. Programa Microsoft Excel.

3.4 Visual Basic Application (VBA)

Visual Basic for Applications (VBA) es un lenguaje de programación simple para desarrollar aplicaciones y crear macros, con el cual producir programas que resuelvan problemas. Las aplicaciones se utilizan para realizar una tarea específica. VBA es el lenguaje propio del paquete Office para desarrollar macros. Dentro de una aplicación, un macro facilita la manipulación, almacenamiento y obtención de datos directamente de las aplicaciones en uso.

Dicho lo anterior, podemos concluir que si VBA y Excel se uniesen sería posible el desarrollo de programas útiles para procesar datos tabulados con un abanico de opciones mayor que el disponible con Excel únicamente.

Como se mencionó anteriormente, un macro en VBA debe estar vinculado a una aplicación conocida como Host Application. En nuestro caso, Excel será la aplicación con la cual se crearán y ejecutarán los macros, es decir, será el host.

4 CIMENTACIONES PROFUNDAS

A la hora de enfrentarnos ante el problema de cimentar una estructura, lo primero que hay que elegir es que tipo se ajusta mejor a los requerimientos de mi problema. En este sentido hay dos opciones: directa o profunda. La cimentación directa es aquella que reparte las cargas de la estructura sobre un plano de apoyo horizontal cercano a la superficie y la profunda es aquella en la que su extremo inferior, apoyado en el terreno, está a una profundidad superior a 8 veces su diámetro o ancho.

El presente trabajo fin de grado se centrará en la cimentación de un depósito de base circular a través de cimentación profunda. Estas cimentaciones se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- **Pilote aislado:** Suelen ser elementos de gran capacidad portante que prolongan la estructura de la pila de apoyo dentro del terreno hasta la profundidad requerida, estando una distancia suficientemente alejada de otros pilotes como para que no tenga interacción geotécnica.
- **Grupo de pilotes:** son aquellos que por su proximidad interaccionan entre sí y se considera que trabajan conjuntamente.
- **Zonas pilotadas:** son amplias zonas con grupos de pilotes repartidos, donde se busca reducir asientos o el riesgo de hundimiento. Suelen ser pilotes de escasa capacidad portante individual y están regularmente espaciados o situados en puntos estratégicos.
- **Micropilotes:** son aquellos compuestos por armadura metálica formada por tubos, barras o perfiles introducidos en un taladro de pequeño diámetro, a veces inyectado con lechada de mortero a presión.

Se usarán pilotes aislados ya que se dispondrá distancia entre ellos como para no tener en cuenta el efecto grupo. También se construirá una losa a modo de encepado que es un elemento masivo que une el conjunto de pilotes dispuestos para conformar la cimentación.

Desde el punto de vista del procedimiento constructivo se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- **Pilotes prefabricados hincados:** son aquellos que se introducen el terreno sin hacer una excavación previa. Se hincan por vibración o percusión con golpes de maza.
Una ventaja de este tipo de pilotes es que poseen una elevada carga de trabajo debido a la resistencia del hormigón.
- **Pilotes hormigonados in situ:** son aquellos en los que se realiza una perforación previa en el terreno hasta la profundidad deseada y posteriormente se rellena con hormigón. Dependiendo del tipo de terreno se ejecutarán en seco, excavados con lodos, con entubación recuperable o perdida y de barrena continua.

Una decisión muy acertada es usar pilotes prefabricados de hormigón hincados. Estos pilotes se usan por su rápida ejecución, lo cual es un factor clave en las industrias que necesitan arrancar la producción cuanto antes y por sus elevadas cargas de trabajo.

Cabe destacar que no se realizará un cálculo geotécnico de los pilotes, sino que se realizará el cálculo fijándonos únicamente en su agotamiento por tope estructural.

El tope estructural o carga nominal es el valor nominal de la carga vertical de servicio máxima para la que se debe usar un elemento de cimentación profunda. No sería comprensible usar pilotes para soportar cargas que estén muy por debajo de su tope estructural, ya que se estará desaprovechando el pilote y malgastando dinero.

Esto podría darse de forma justificada si tenemos grandes cargas horizontales actuando sobre la cimentación.

Para calcular el tope estructural de un pilote es necesario conocer el procedimiento constructivo seguido para la ejecución de estos, el material con el que se van a ejecutar, la sección transversal del pilote y el terreno en el que se ubicará.

Una vez conocidos estos datos se seguirá la siguiente formulación:

$$Q_{\text{tope estructural}} = \sigma \times A$$

Siendo:

A: área de la sección transversal.

σ : tensión del pilote.

La tensión del pilote se puede obtener de la siguiente tabla:

Procedimiento	Tipo de pilote	Valores de σ (Mpa)	
		Suelo firme	Roca
Hincados	Hormigón pretensado o postesado	0,30 ($f_{ck} - 0,9 f_p$)	
	Hormigón armado	0,30 f_{ck}	
	Metálicos	0,30 f_{yk}	
	Madera	5	
Perforados ⁽¹⁾	Entubados	5	6
	Lodos	4	5
	En seco	4	5
	Barrenados sin control de parámetros	3,5	-
	Barrenados con control de parámetros	4	-

⁽¹⁾ Con un control adecuado de la integridad, los pilotes perforados podrán ser utilizados con toques estructurales un 25% mayores.

Tabla 4-1. Tensión de pilotes según tipo y procedimiento de construcción.

Una vez se conoce cuál es el tope estructural de los pilotes se deberá comprobar que las cargas verticales sobre cada pilote no superan este valor, en nuestro caso nos fijaremos en las reacciones obtenidas.

5 MODELO DE CÁLCULO

Antes de ahondar en la optimización de la distribución en planta de los pilotes es necesario explicar qué tipo de estructuras estamos diseñando y definir un modelo que refleje lo mejor posible el comportamiento de la estructura conjunta.

A continuación, se explicará la estructura que se pretende diseñar y el modelo de cálculo que se ha empleado para realizar los cálculos y poder comprender de una mejor forma el comportamiento de la misma. El modelo se ha realizado mediante la herramienta informática SAP2000.

5.1 Geometría de la estructura y del modelo

La estructura objeto de estudio es un depósito de base circular, el cual se apoya sobre una losa de mayor diámetro, por lo que tendrá una parte en voladizo, la cual actúa a modo de encepado para la cimentación mediante pilotes que se efectuará. Este tipo de estructuras es muy común en muchas plantas industriales, en las cuales se requieren almacenar grandes cantidades de materiales o líquidos y en ocasiones peligrosos. En la siguiente imagen puede apreciarse el tipo de estructura estudiada.



Figura 5-1. Depósito de base circular en la realidad.

El factor que limita geoméricamente el dimensionamiento de la estructura es el volumen de material o líquido que debe poseer el depósito para cumplir con la demanda del cliente. Este volumen se convierte en un área por

una altura y el área a su vez se convierte en un radio, al ser en este caso un depósito con base circular. En cuanto a la altura obtenida hay que tener en cuenta que debemos dejar un resguardo, ya que no se puede llenar el depósito al máximo por motivos de seguridad.

Con todo esto para definir la estructura geoméricamente bastaría con dar por parte del depósito la altura, el diámetro interior y el espesor de la pared lateral y por parte de la losa el diámetro y el espesor. De esta manera la optimización se podría realizar en depósitos que cambien estos parámetros. En la imagen adjunta se observa un croquis con las medidas mencionadas.

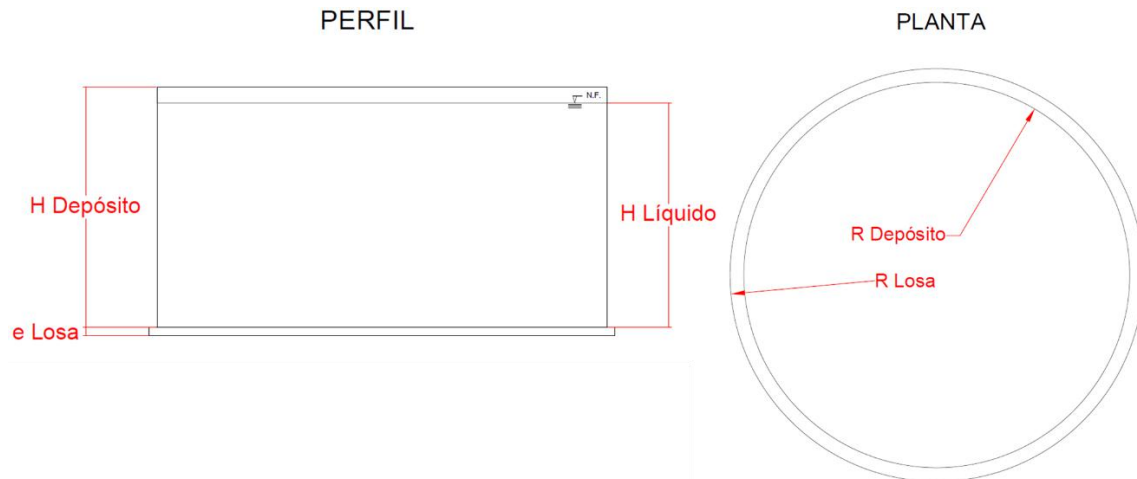


Figura 5-2. Croquis de planta y perfil de depósito de base circular.

Tras la obtención de estos datos, se puede realizar un modelo representativo de la estructura real en algunos de los softwares de cálculo estructural que ofrece el mercado. En la imagen que se muestra a continuación se puede observar el modelo de cálculo realizado en SAP2000.

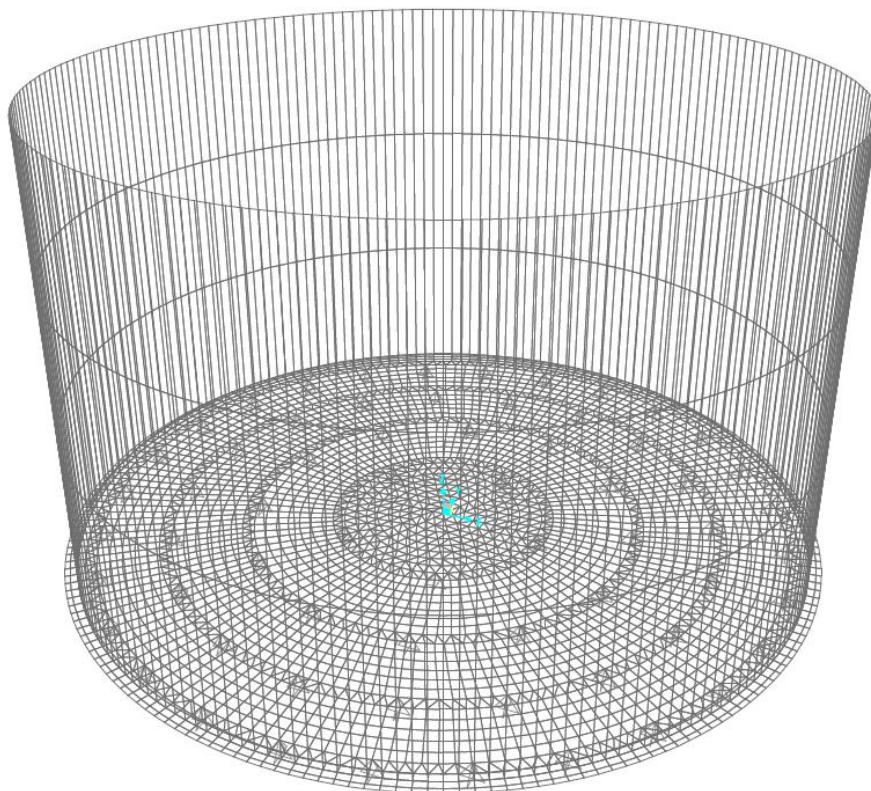


Figura 5-3. Modelo de depósito de base circular en SAP2000.

5.2 Materiales

5.2.1 Hormigón

El hormigón que puede usarse para la construcción del depósito y la losa dependerá de la agresividad del material que almacene y de la clase de exposición a la que vaya a estar sometida la estructura. Esta clase de exposición se deduce de la tabla 27.1.a del Código Estructural según el tipo de ambiente donde se ubique.

La resistencia característica a compresión simple mínima del hormigón a emplear depende de esta clase de exposición y se puede encontrar en la tabla A19.E.1 del Código Estructural.

Para precisar el hormigón con el que se construiría la estructura real bastaría con designar el hormigón según se ha mencionado, esto es fijando su resistencia característica a compresión.

Para definir el hormigón en el modelo de cálculo se deben introducir otros parámetros y características del mismo, los cuales son necesarios en la realización de los cálculos pertinentes.

Las características adicionales del hormigón incorporadas al modelo serán:

- Densidad del hormigón armado se toma 2500 kg/m³
- Coeficiente de poisson de 0,2
- Coeficiente de dilatación térmica de $10 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

5.2.2 Acero estructural

El depósito también puede ser construido con acero estructural y el tipo de este es una decisión del proyectista. En la Tabla A22.3.1 del Código Estructural se recogen los límites elásticos y tensiones de rotura dependiendo del tipo de acero y el espesor de chapa empleado.

Para conocer el acero con el que se construiría la estructura real bastaría con nombrar el acero según se ha expuesto, esto es fijando su límite elástico.

Al igual que ocurría con el hormigón, para definir el acero estructural en el modelo de cálculo es necesario otorgar otros parámetros y características.

Las características adicionales del acero estructural incorporadas al modelo serán:

- Densidad del acero estructural se toma 7850 kg/m³
- Coeficiente de poisson de 0,3
- Coeficiente de dilatación térmica de $12 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

5.2.3 Acero de armado

El acero de armar usado será elección del proyectista entre B400S o B500S. Ambos tienen precios parecidos por lo que normalmente se usa B500S ya que por el mismo precio tengo mayor límite elástico.

A las características que definen a los materiales, esto es: la resistencia característica a compresión en el hormigón y el límite elástico en el acero estructural y de armar, se les aplica unos coeficientes parciales de seguridad que reducen su resistencia. Estos coeficientes se definen de cara al modelo de cálculo utilizado para dimensionar y comprobar la estructura.

Los coeficientes parciales de seguridad para los materiales serán los siguientes, obtenidos de la Tabla A19.2.1 del Código Estructural.

Situación de cálculo	γ_c hormigón	γ_s armaduras pasivas	γ_s armaduras activas
Permanente o Transitoria	1,5	1,15	1,15
Accidental	1,3	1,0	1,0

Tabla 5–1. Coeficientes parciales de seguridad para materiales.

5.3 Modelización de los elementos estructurales

A continuación, se describirán los elementos usados para la modelización de la estructura, así como las formulaciones que siguen, ejes, esfuerzos, etc. Se diferenciará entre la pared lateral del depósito y la losa.

5.3.1 Pared lateral del depósito

Para la modelización de la pared lateral del depósito se han empleado elementos SHELL, que es una formulación de tres o cuatro nodos que combina el comportamiento separado de la membrana y la flexión de la placa. El comportamiento de la membrana utiliza una formulación isoparamétrica que incluye componentes de rigidez traslacional en el plano y una componente de rigidez rotacional en la dirección normal al plano del elemento. El comportamiento de flexión de la placa incluye componentes de rigidez rotacional de la placa en dos sentidos, fuera del plano, y una componente de rigidez de traslación en la dirección normal al plano del elemento.

Los elementos SHELL son muy apropiados para estructuras en las cuales la carga se aplica perpendicularmente al plano medio de la sección y por lo tanto trabajan principalmente a flexión. Este elemento estructural estará sometido a la presión hidrostática que genera el líquido almacenado en su interior, la cual se aplicará de forma perpendicular a la misma, por lo que es apropiado usar este elemento.

Dentro de este tipo de elementos se emplearán los elementos SHELL THIN que siguen la formulación de Kirchoff, la cual no tiene en cuenta las deformaciones por cortante. Estas deformaciones tienen a ser importantes cuando el espesor es superior a una décima o quinta parte de la luz. Se han empleado este tipo de elementos debido a la elevada esbeltez del elemento estructural en cuestión (relación altura espesor).

Para definir estos elementos bastaría con asignarle un espesor, una altura y una anchura. Como se ha comentado anteriormente, el dimensionamiento y cálculo de este elemento estructural no es objeto del presente trabajo por lo que los elementos tendrán el espesor definido, una base igual a 0,5 m y una altura igual a un tercio de la altura total del depósito. Esto es así ya que discretizar en gran cantidad un elemento que no se va a analizar sería una pérdida de capacidad computacional.

Cada elemento SHELL tendrá su propio sistema local de coordenadas para definir las propiedades de los materiales y las cargas y para interpretar los resultados obtenidos. En este caso los ejes 1 y 2 se definirán de tal manera que el eje perpendicular al elemento esté orientado hacia el centro del depósito. En la imagen siguiente puede verse la distribución de los ejes locales de un elemento SHELL.

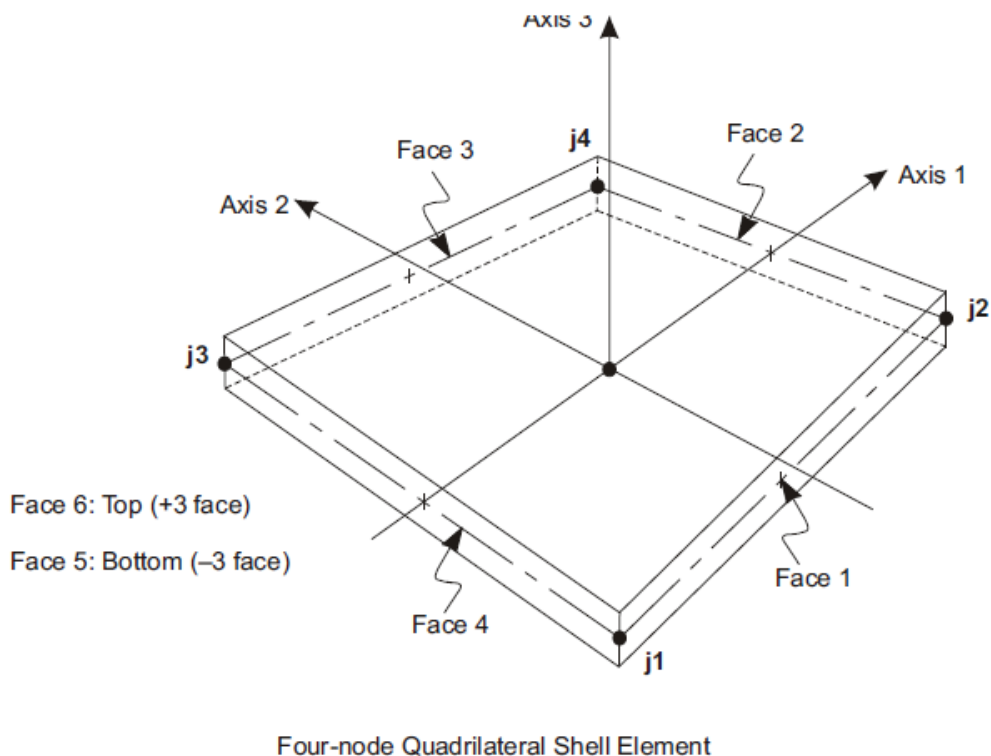


Figura 5-4. Nomenclatura y ejes de elemento Shell cuadrado.

5.3.2 Losa

Para la modelización de la losa se usarán elementos SHELL THIN, al igual que en el apartado anterior, ya que esta se encontrará sometida principalmente a cargas gravitatorias que se aplicarán de forma perpendicular a la misma (trabaja principalmente a flexión) y cuenta con una elevada esbeltez (ancho losa-espesor).

Para definir estos elementos bastaría con asignarles un espesor, un ancho y un largo. A diferencia del apartado anterior, este elemento estructural se discretizará con más detalle siendo el espesor el asignado, la base de cada elemento de 0,5 m y el largo de 0,5 m. Esto es así debido a la importancia que cobra la losa en el estudio de la cimentación, por lo que conviene conocer su comportamiento de forma fiable de cara al proceso de optimización de la cimentación. Al fin y al cabo, este elemento estructural se optimizará indirectamente.

Al igual que en el apartado anterior, cada elemento tendrá su propio sistema local de coordenadas. En este caso los ejes 1 y 2 se definirán de tal manera que el eje perpendicular al elemento se oriente hacia arriba.

Una vez se realicen los cálculos, al tener cada elemento un sistema local de coordenadas, se obtendrán resultados expresados en estos sistemas locales de coordenadas. Es conveniente definir a que hace referencia cada esfuerzo que se obtiene. En la siguiente imagen se designan estos esfuerzos.

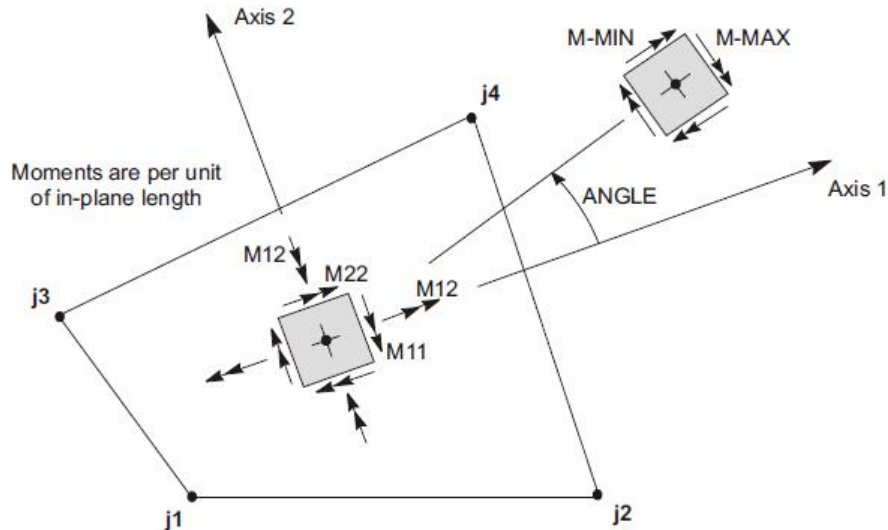


Figura 5-5. Esfuerzos flectores y torsores en elemento Shell.

Puesto que la losa trabaja principalmente a flexión, nos centraremos en:

- Momentos de flexión de la placa: $M11$ y $M22$.
- Momento de torsión de la placa: $M12$.

Es importante saber la idoneidad y la precisión de la malla propuesta. Para comprobarlo, se puede estimar un error aproximado en las tensiones o fuerzas internas del elemento a partir de la diferencia en los valores calculados de diferentes elementos unidos a una junta común. Esto dará una indicación de la precisión de una determinada aproximación de elementos finitos y puede utilizarse como base para la selección de una nueva malla de elementos finitos más precisa.

5.3.3 Encuentro rígido

Con la idea de obtener un buen modelo de cálculo se define un material específico para el encuentro entre la pared lateral del depósito y la losa. Esta zona es una región de discontinuidad donde la hipótesis de Bernoulli, la cual establece que la sección permanece aproximadamente plana antes y después de aplicar la carga, no es válida. Conviene estudiarla bien para evitar posibles fallos.

Para tratar este problema, el material contará con un módulo de deformación mil veces superior al usado para la construcción de la estructura. Esto se traduce en que será un material con una rigidez mucho más elevada que el definido para la estructura. Introducir esta rigidez es importante ya que puede tener un gran efecto tanto en las fuerzas internas como en la deformación de la estructura.

Posteriormente habrá que limitar la rigidez a flexión haciendo que el momento torsor ($M12$) producido en estos elementos sea un 0,1% de su valor correspondiente, para evitar problemas numéricos debidos a las grandes diferencias de rigidez del sistema.

En la siguiente imagen puede observarse un esquema del problema tratado.

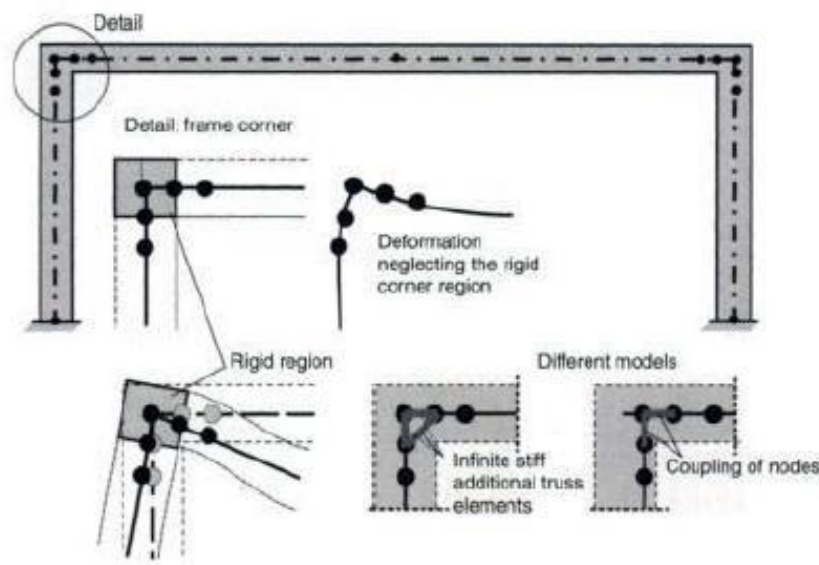


Figura 5-6. Modelización de encuentro rígido.

5.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno a fijar corresponderán con los pilotes a disponer en la losa. La condición de contorno real es que la losa se apoya sobre unos pilotes los cuales no impiden el desplazamiento vertical de forma rígida, sino como lo haría un muelle.

$$\frac{E \times A}{L}(\text{estructura}) + K(\text{terreno})$$

Desde el punto de vista de la optimización no hay diferencias entre ambas formas de impedir el desplazamiento, siempre que al final se llegue a una situación en la que las cargas sobre los pilotes sean parecidas.

En definitiva, la condición de contorno real se traduce en que estos puntos de apoyo no permiten el desplazamiento vertical de la misma.

Si solo se aplicase esta condición de contorno no se restringiría el movimiento como sólido rígido de la losa y de cada pilote por lo que también se impiden los desplazamientos horizontales.

Cabe destacar que se considerará a la losa mucho más rígida a flexión que los pilotes, asumiendo que estos no suponen restricciones al giro de los nodos de la losa.

Las condiciones de contorno se dispondrán formando anillos de distintos diámetros; este aspecto se tratará con más detalle en el apartado 6. *Optimización Distribución de Pilotes* donde se explicará la optimización de la colocación de los pilotes. En la siguiente imagen se puede observar un ejemplo de la distribución de las condiciones de contorno en la losa.

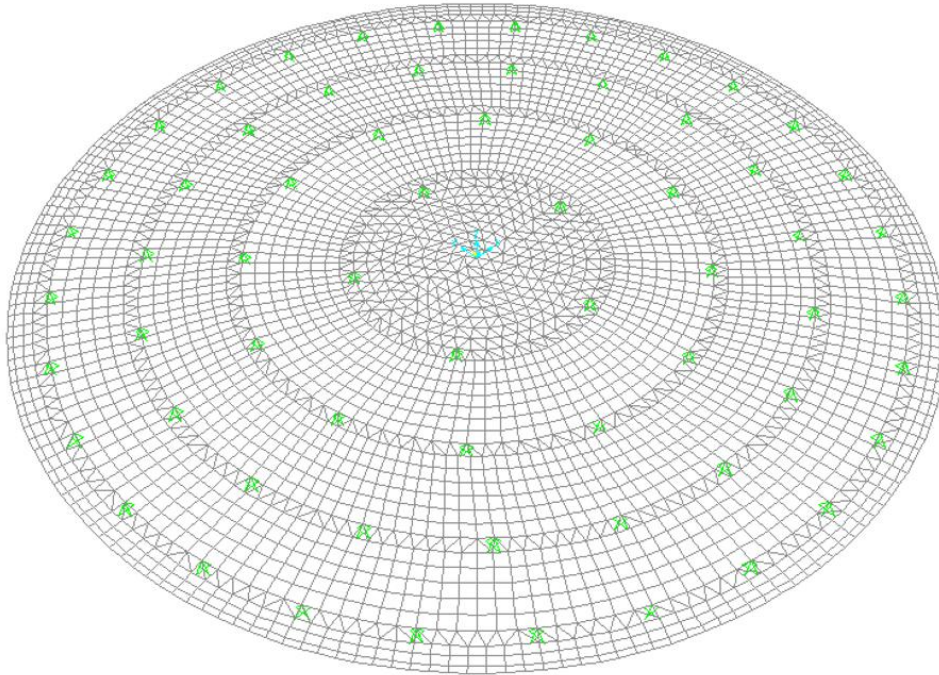


Figura 5-7. Condiciones de contorno sobre la losa en modelo de cálculo SAP2000.

5.5 Cargas

Una vez definida la geometría y las condiciones de contorno es el turno de definir las cargas actuantes en el problema en cuestión. En este tipo de construcciones las cargas más significativas son las gravitatorias, que consisten en una presión en la cara superior de la losa y una presión hidrostática en las paredes de los muros del depósito, pero también pueden adquirir cierta relevancia las acciones hidrodinámicas debidas al sismo, que no sólo afectan a la pared del depósito, sino a los pilotes que deberán soportar por cortante la acción horizontal correspondiente.

No obstante, en este trabajo se aborda la optimización desde el punto de vista del tope estructural, y la acción sísmica en esa circunstancia no es relevante, salvo en zonas de fuerte sismicidad.

Para definir las cargas gravitatorias correspondientes al líquido habrá que conocer el material que se va a almacenar con el fin de saber su densidad. Otro parámetro significativo es la altura que alcanza el mismo en el depósito, ya que habrá que dejar un resguardo de seguridad respecto a la altura total del depósito.

En cuanto a las generadas por el propio depósito, se obtendrán sabiendo su geometría y el material con el que se construirá.

5.6 Combinación de cargas

5.6.1 Estado Límite Último

El Estado Límite Último consiste en hacer una serie de comprobaciones relacionadas con la seguridad en rotura de la estructura en cuestión.

Los coeficientes parciales son igual a 1,35 para cargas permanentes y 1,5 para cargas variables.

Los ELU no se utilizarán en el caso tratado.

5.6.2 Estado Límite de Servicio

El Estado Límite de Servicio consiste en hacer una serie de comprobaciones relacionadas con la funcionalidad, aspecto y confort de la estructura en cuestión.

Para ELS encontramos tres combinaciones a realizar:

- Característica: se utiliza para estados límite irreversibles.
- Frecuente: se utiliza para estados límite reversibles.
- Cuasi-permanente: se utiliza para efectos a largo plazo y para el aspecto de la estructura.

Los coeficientes parciales son igual a uno para ELS sea cual sea la carga que se trata. Además, como solo se tendrán en cuenta las cargas de peso propio los factores de simultaneidad no intervendrán.

Atendiendo al Código Técnico de Edificación, la sollicitación a axil con la que comparar el tope estructural para situaciones persistentes y transitorias, se considerará como el valor de cálculo de los efectos de las acciones sobre la cimentación al recogido en la siguiente expresión.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Esto corresponde a efectuar una comprobación de ELS característico ya que si los pilotes no son capaces de soportar las cargas a las que están sometidos se produce una situación irreversible donde se pierde la funcionalidad de la cimentación.

Tras ejecutar el análisis tendremos que fijarnos en las reacciones verticales que se producen en la losa en la situación de ELS y compararlas con el tope estructural de los pilotes dispuestos. Esto es así por la propia definición de tope estructural, el cual es una carga vertical en servicio.

6 OPTIMIZACIÓN DISTRIBUCIÓN DE PILOTES

El objetivo principal del presente apartado es describir el proceso de optimización de la colocación de pilotes en planta que se ha llevado a cabo, explicando las decisiones que se han ido tomando para ello. Otro aspecto que se tratará será la explicación de una analogía del comportamiento a flexión de la losa circular con varias barras, en las cuales se van modificando la distribución de las condiciones de contorno.

6.1 Introducción a la Optimización

Antes de entrar en la explicación de como se ha realizado la optimización de la distribución de los pilotes es conveniente saber los datos de partida necesarios y las condiciones que deben cumplir los pilotes calculados para darlos como válidos.

El presente trabajo se ha enfocado en los depósitos de base circular, los cuales son definidos por el volumen que pueden albergar, ya sea de: líquido, gas o sólido. En este caso serán depósitos de almacenamiento de líquido por lo que conviene conocer las propiedades del líquido en cuestión ya que es un factor determinante en el dimensionamiento y cálculo de la cimentación. Por último, se debe definir bien los elementos de cimentación empleados.

6.1.1 Datos iniciales

Como datos de partida debemos tener toda la información referente a la geometría del depósito y losa. Por lo que tenemos que saber:

- Diámetro interior del depósito.
- Espesor de la pared del depósito.
- Altura de la pared del depósito.
- Espesor de la losa inferior.
- Vuelo de la losa inferior.
- Material con el que se va a ejecutar.
- Densidad del material con el que se va a ejecutar.

Otros datos a tener en cuenta son los relacionados al líquido que se almacenará en el depósito:

- Altura que alcanza el líquido en el depósito.
- Densidad del líquido.

Para terminar, se necesitarán datos sobre los pilotes usados:

- Sección transversal.
- Material con el que están fabricados.
- Procedimiento constructivo que se llevará a cabo.
- Terreno en el que se ubicarán.

6.1.2 Condiciones a cumplir

Como se mencionó anteriormente el procedimiento de optimización propuesto está realizado desde un punto de vista estructural, por lo que para el diseño se va a trabajar con el tope estructural de los pilotes.

Para definir si un pilote es o no válido desde el punto de vista funcional la carga vertical de servicio que soporta debe ser menor que su tope estructural y mayor que el 90% de su tope estructural.

La explicación es muy simple, debe ser menor que su tope estructural, ya que de no ser así se produciría el agotamiento estructural del pilote y mayor que el 90% de este tope estructural para poder aprovechar la capacidad resistente de cada pilote de forma óptima.

6.2 Analogía Losa Circular-Barra

Antes de proceder a la modelización de la distribución y cálculo de los pilotes en la losa circular, conviene tener una idea inicial de cómo se va a comportar la losa dependiendo de la colocación de los pilotes.

Esto se podría realizar de una forma rápida asemejando el comportamiento de la losa al de una barra. Evidentemente una barra no reflejará el comportamiento real de la losa ya que en las barras la carga aplicada es uniforme y en la losa circular no sería así ya que esta aumentaría con la distancia al centro.

Aun sabiendo esto, este estudio previo servirá para guiarnos sobre qué distribución de las condiciones de contorno es más favorable. Las condiciones de contorno en la losa corresponderán con los pilotes.

Las barras estudiadas tienen una longitud de 20 m, una sección cuadrada de 30x30 cm y el material usado para su fabricación es un HA25. Esta barra solo se va a ver sometida a su peso propio.

Se realizarán cuatro estudios: barra sin voladizo y con luces iguales, barra con voladizo y con luces iguales, barra sin voladizo y con luces distintas y barra con voladizo y con luces distintas.

La geometría de las barras usadas en cada una de las analogías se recoge en la siguiente tabla:

	X (m)			
	BARRA 1	BARRA 2	BARRA 3	BARRA 4
A'	-	0,00	-	0,00
A	0,00	1,67	0,00	1,33
B	6,67	7,22	6,15	6,67
C	13,33	12,78	13,85	13,33
D	20,00	18,33	20,00	18,67
D'	-	20,00	-	20,00

Tabla 6-1. Geometría barras analogía Losa circular-Barras.

6.2.1 Barra simplemente apoyada sin voladizo y misma luz

En este primer caso de estudio tenemos una barra simplemente apoyada sin voladizo y la distancia entre apoyos es la misma para cada vano.

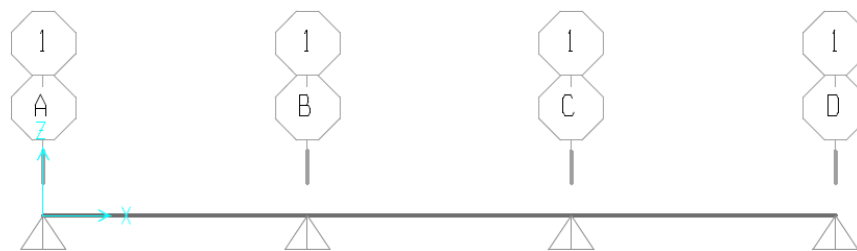


Figura 6-1. Modelo de barra simplemente apoyada sin voladizo y misma luz.

Observando los momentos flectores de la barra podemos obtener la siguiente información:

- El momento flector positivo en los vanos laterales es bastante mayor que en el vano central, en torno al triple.
- Se alcanza un momento flector negativo en los dos apoyos centrales del orden del cuádruple del momento positivo del vano central y un poco mayor que los positivos de los vanos laterales.
- Los momentos negativos en los extremos son nulos.

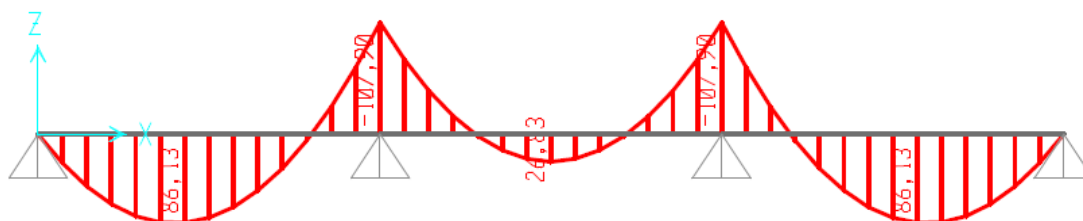


Figura 6-2. Momento flector de barra simplemente apoyada sin voladizo y misma luz.

6.2.2 Barra simplemente apoyada con voladizo y misma luz

En este segundo caso de estudio tenemos una barra simplemente apoyada con voladizo. La distancia entre apoyos es la misma para cada vano y los voladizos se prolongan una longitud igual a un cuarto de la luz de los vanos extremos.



Figura 6-3. Modelo de barra simplemente apoyada con voladizo y misma luz.

Observando los momentos flectores de la barra podemos obtener la siguiente información:

- El momento flector positivo en los vanos extremos es mayor que el del vano central, del orden del doble.
- Los momentos flectores negativos que se dan en los apoyos centrales son mayores que el de los apoyos laterales, en torno al doble.
- Los momentos negativos de los apoyos centrales son del orden del doble de los momentos positivos de los vanos laterales.

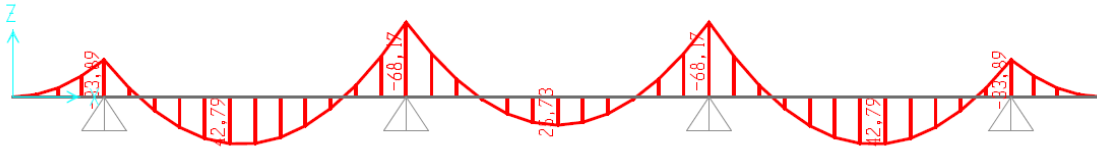


Figura 6-4. Momento flector de barra simplemente apoyada con voladizo y misma luz.

6.2.3 Barra simplemente apoyada sin voladizo y luz variable

En este tercer caso de estudio tenemos una barra simplemente apoyada sin voladizo. La distancia entre apoyos ya no es igual para cada vano, de tal manera que los vanos extremos son un 81,667% del vano central con el objetivo de que en todos los vanos se obtenga un momento flector igual o parecido, tal y como queda recogido en “PUENTES: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción” de Javier Manterola.

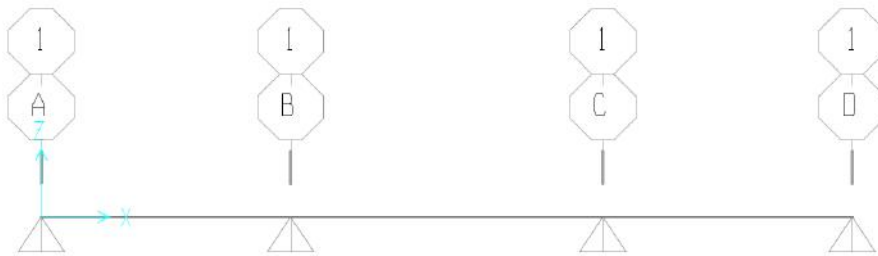


Figura 6-5. Modelo de barra simplemente apoyada sin voladizo y luz variable.

Observando los momentos flectores de la barra podemos obtener la siguiente información:

- Los momentos positivos son parecidos en los tres vanos.
- Los momentos negativos de los apoyos centrales son mayores que los positivos, del orden del doble.
- Los momentos negativos en los extremos son nulos.

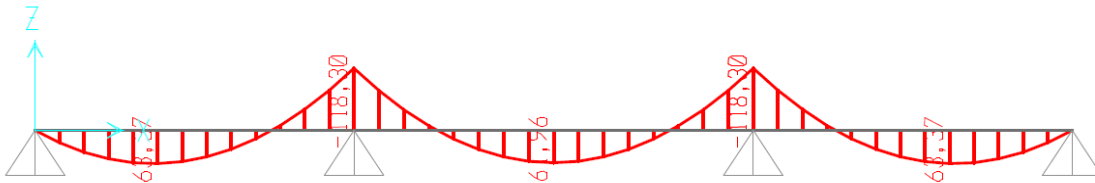


Figura 6-6. Momento flector de barra simplemente apoyada sin voladizo y luz variable.

6.2.4 Barra simplemente apoyada con voladizo y luz variable

En este último caso de estudio tenemos una barra simplemente apoyada con voladizo. La distancia entre apoyos no es igual para cada vano, de forma que los vanos extremos son un 81,667% de la longitud del vano central (al igual que en el apartado anterior) y los voladizos se prolongan una longitud igual a un cuarto de la luz de los vanos extremos.



Figura 6-7. Modelo de barra simplemente apoyada con voladizo y luz variable.

Observando los momentos flectores de la barra podemos obtener la siguiente información:

- Los momentos positivos máximos de los vanos extremos son muy parecidos a los que se logran en el vano central.
- Los momentos negativos de los apoyos centrales son mayores que los que se obtienen en los apoyos laterales, del orden del cuádruple.
- El momento flector negativo de los apoyos centrales es mayor que los momentos flectores positivos, del orden del doble.

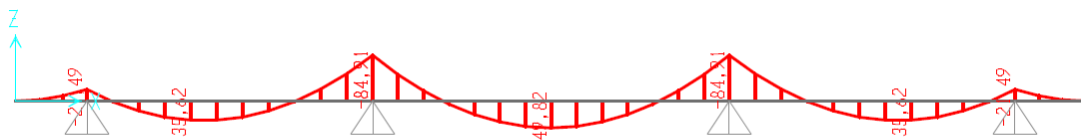


Figura 6-8. Momento flector de barra simplemente apoyada con voladizo y luz variable.

6.2.5 Conclusión

Tras analizar las diferentes analogías se puede comprobar que en las barras con voladizos los momentos flectores que se alcanzan son menores que las barras que no cuentan con ellos, esto es debido a que en los voladizos se obtienen unos momentos flectores negativos que compensan los momentos flectores positivos que se logran en los vanos extremos.

Otra conclusión que podemos extraer de los estudios es que en las barras con distintas luces entre vanos los momentos flectores negativos se van volviendo muy parecidos tanto los centrales como los extremos.

Por lo tanto, se concluye, que la losa contará con voladizo para obtener menores momentos y la distancia entre apoyos será distinta, siendo esta menor conforme más se separen del centro.

6.3 Proceso de Optimización

En este apartado se describirá el procedimiento seguido para alcanzar la distribución óptima de pilotes en planta en la losa.

En este punto es conveniente recordar las conclusiones que se obtuvieron del estudio de las distintas barras, por los cuales los pilotes se colocarán de forma que dejen un voladizo en la losa igual a un cuarto de la longitud entre apoyos del vano más extremo y la luz entre pilotes irá disminuyendo conforme se alejan del centro de la losa.

Esta última conclusión se acentuará en las losas circulares ya que en ellas las cargas verticales permanentes como el peso propio o las cargas muertas no son constantes, si no que crecen de forma lineal conforme se alejan del centro.

6.3.1 Predimensionamiento de número de pilotes

De cara al proceso de optimización de la distribución de los pilotes en la losa, lo primero que se debe determinar es un primer número de pilotes a disponer. En este punto no se tratará la colocación de estos pilotes si no la determinación de un primer número de pilotes que harán falta para aguantar las cargas sin más.

Para predimensionar el número óptimo de pilotes debemos conocer las características geométricas y los materiales usados para el depósito y las características de los pilotes usados.

Lo primero sería calcular el tope estructural de los pilotes según se ha explicado en el apartado 4. *Cimentaciones Profundas*. Una vez que conocemos este dato pasamos a definir las cargas actuantes, las cuales serán los pesos propios del depósito, la losa y el líquido que contiene. Estos pesos no tienen complicación alguna en su cálculo y se obtienen de forma sencilla como densidad multiplicada por volumen y por gravedad.

Para obtener el primer número de pilotes necesarios se dividirá la suma de los pesos anteriores entre el tope estructural y se tomará el valor entero directamente superior.

Antes de empezar a distribuir los pilotes en la losa es conveniente explicar la forma en la que se llevará esto a cabo.

Como se mencionó anteriormente en el apartado 5. *Modelo de Cálculo* solo se tendrán en cuenta las cargas de peso propio ya que el presente trabajo se centra en el diseño y cálculo de la cimentación. De esta manera si solo se tuviera esto en cuenta, bastaría con colocar el número de pilotes que se obtenga en el borde de la losa, es decir a una distancia igual al radio interior del depósito desde el centro de la losa. Con esta distribución se podrían soportar las cargas axiales de una forma óptima.

Esto realmente no es así ya que en el cálculo del depósito intervienen muchas más cargas y acciones que se deberían tener en cuenta y las cuales originan que los elementos estructurales trabajen principalmente a flexión. Debido a esto si solo se colocasen pilotes en el diámetro interior del depósito, estos no resistirían los grandes esfuerzos de flexión que se generan. Esto también se vería reflejado en el comportamiento de la losa la cual trabaja predominantemente a flexión.

Para solucionar este problema los pilotes se distribuirán formando anillos concéntricos con distintos radios y número de pilotes. De esta forma se conseguirá un mejor comportamiento de la losa que, aunque no es el objetivo principal de este trabajo, se verá optimizada indirectamente con la mejor distribución de los pilotes.

6.3.2 Definición de anillos

Una vez que obtenemos un primer número de los pilotes a disponer y que se colocarán formando anillos concéntricos, es hora de definir el número de anillos necesarios y los radios de estos.

Antes de comenzar a detallar el proceso es conveniente aclarar la nomenclatura que se va a seguir en la definición de los anillos.

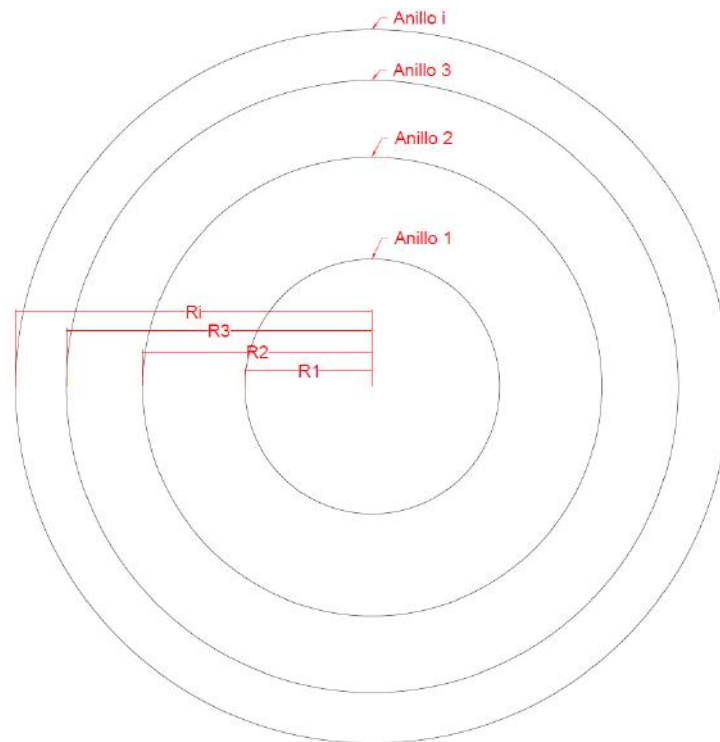


Figura 6-9. Nomenclatura anillos y radios.

En este punto de la optimización se debe tener en cuenta las conclusiones sacadas de la analogía del comportamiento losa-barra:

- Se dejará un voladizo igual a un cuarto de la diferencia de radios entre los dos anillos más externos.
- El radio del anillo más próximo al centro del depósito se obtendrá de la siguiente formulación:

$$R_1 = \frac{R_{Ext.Depósito}}{1 + \frac{1 - 0,1(n - 1)}{4} + \sum_1^{n-1} (1 - 0,1i)} \quad \text{donde,}$$

- R_1 : Radio del anillo más próximo al centro.
- $R_{Ext.Depósito}$: Radio exterior del depósito.
- n : Número de anillos a disponer.

- Los radios de los anillos irán aumentando a razón de la siguiente expresión:

$$R_i = R_{i-1} + R_1(1 - 0,1i) \quad \text{donde,}$$

- R_i : Radio del anillo número i .
- R_1 : Radio del anillo más próximo al centro.

El coeficiente 0,1 que va multiplicando al número de anillo i se utiliza para controlar la proporción de luz entre anillos. Cada anillo tendrá un radio tal que la luz entre ese anillo y el contiguo internamente a este será un tanto por ciento menor que la luz del anillo más próximo al centro.

Esta luz entre anillos irá disminuyendo conforme nos alejamos del centro de la losa, de forma que los anillos más externos estarán más próximos unos de otros que los internos.

Esta conformación de los radios de los anillos y la luz entre ellos se ha realizado de acuerdo con las conclusiones obtenidas en el apartado 6.2. *Analogía Losa Circular-Barra*.

Otra idea clave a concretar es la condición para pasar de un anillo a otro, es decir cuando pasamos de necesitar un anillo a necesitar dos y sucesivamente. Esto está muy relacionado con el número de pilotes que se disponen en cada anillo, por lo que primero habrá que detallar ese apartado.

6.3.3 Definición de pilotes en anillos

Para determinar el número de pilotes que se colocan en cada anillo, lo cual nos aporta el número de anillos a su vez, se ha fijado la siguiente condición:

$$\frac{2\pi R_i}{N_i} > R_i - R_{i-1} \quad \text{donde,}$$

- R_i : Radio del anillo número i .
- N_i : Número de pilotes del anillo i .
- R_{i+1} : Radio del anillo número $i+1$.

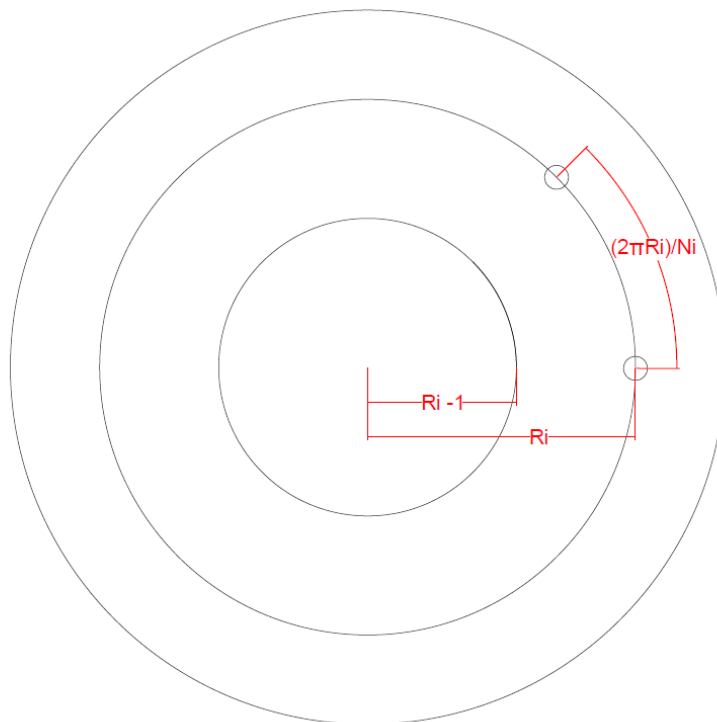


Figura 6-10. Definición número de pilotes en anillo.

La expresión anterior dice que la distancia entre los pilotes de un anillo debe ser superior a la luz entre anillos consecutivos. Conociendo los radios de los distintos anillos como se explicó anteriormente se despeja el número de pilotes de cada anillo.

Se parte como primera hipótesis con la disposición de un primer anillo de radio igual a la mitad del radio exterior del depósito (radio interior del depósito más espesor de la pared lateral del mismo). Para conocer el

número de pilotes a disponer en el mismo no es aplicable la fórmula establecida ya que solo hay un anillo y el anillo número $i-1$ no existe. En este caso, se aplicará la siguiente fórmula:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} > R_1 \longrightarrow N_1 < 2\pi \approx 6,28$$

En la situación en la que solo se dispone un anillo, se distribuirán 6 pilotes sobre la losa.

El número de anillos que a priori se deben disponer se logra conocer gracias al predimensionamiento del número de pilotes necesarios. Se colocarán anillos hasta que la suma del número de pilotes de cada anillo, explicado anteriormente, sea mayor al número de pilotes obtenidos del predimensionamiento.

El número de pilotes debe ir aumentando conforme más alejado está el anillo tratado del anillo central.

Una vez estemos en esta situación donde ya conocemos el número de anillos a disponer y el número de pilotes en cada uno de ellos encontramos un problema. El problema es que tras el predimensionamiento hemos llegado a un número de pilotes necesarios y tras el cálculo del número de anillos a disponer se alcanza un número de pilotes total que normalmente no tendremos la suerte de que coincida con el número obtenido en el predimensionamiento. Esto puede motivar que haya más pilotes o menos de los necesarios.

Para solucionar este contratiempo, y teniendo en mente que es un primer modelo de predimensionamiento para ver cómo reacciona la losa ante esta distribución, se realizará una distribución proporcional multiplicando el número de pilotes obtenidos en cada anillo por un coeficiente de distribución. Este coeficiente se calculará dividiendo el número de pilotes del predimensionamiento entre el número de pilotes dispuestos en los cuatro anillos. Si tras aplicar este procedimiento y sumar los números de pilotes obtenidos en cada anillo, se produjese algún desfase y el número de pilotes del predimensionamiento no correspondiese con esta suma, se sumaría la diferencia de ambos (pudiendo ser esta diferencia positiva o negativa) al número de pilotes del anillo más exterior como criterio tomado ya que se trata de un primer modelo orientativo.

6.3.4 Desfase angular entre anillos

Antes de explicar el desfase angular entre los pilotes de distintos anillos y la razón que hay detrás del porqué se hace, es conveniente fijar primero el desfase angular entre pilotes de un mismo anillo. Esto es una tarea sencilla y se calcula con la siguiente expresión:

$$\varphi_i = \frac{2\pi R_i}{N_i}$$

Una vez resuelto este tema pasamos a tratar el desfase angular entre pilotes de distintos anillos.

El problema surge de posicionar los pilotes de distintos anillos de forma alineada entre ellos, esto quiere decir, se comienzan a colocar los pilotes de todos los anillos a partir del mismo eje de circunferencia de la que se empieza a realizar el mallado de la losa. Se puede observar en la siguiente gráfica:

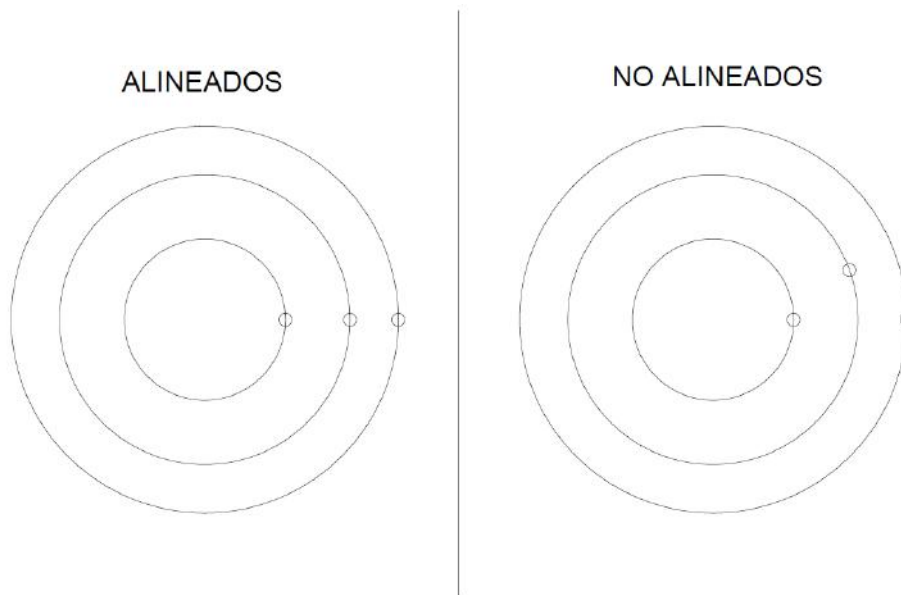


Figura 6-11. Diferencia entre pilotes alineados y no alineados en losa.

El contratiempo aparece debido a que estos pilotes alineados se entorpecen estructuralmente hablando. Esto es que a la hora de dividir la carga a resistir que le corresponde a cada pilote de los distintos anillos, también llamado área de influencia, se ve afectada por la proximidad de los demás pilotes alineados, reduciendo la carga a soportar por los pilotes alineados y sobrecargando los demás pilotes.

Como bien se ha explicado anteriormente en el apartado 6.1. *Introducción a la Optimización*, la carga vertical a resistir por cada pilote debe ser menor que su tope estructural y mayor que el 90% de su tope estructural para considerarse optimizado.

El problema anterior afectaba directamente a esta cuestión, ya que impedía que los pilotes alineados trabajasen por encima del 90% del tope estructural y al poner menos pilotes para que esto se cumpliese hacía que los pilotes no alineados trabajasen por encima de su tope estructural.

Para solucionarlo se ha propuesto otorgar a los pilotes de anillos alternativos un desfase angular para que no todos los anillos comiencen la colocación de pilotes en el mismo radio de circunferencia y así conseguir una mejor distribución de la carga.

Siguiendo con la denominación explicada en el apartado 6.3.2. *Definición de anillos*, para la definición del desfase angular entre pilotes de distintos anillos se ha optado por lo siguiente:

- Los anillos impares no tienen ningún desfase.
- Los anillos pares tienen un desfase igual a la distancia entre los pilotes del anillo en cuestión.

Con esta condición se permite a los pilotes trabajar sin estorbarse unos a otros y se da solución al problema mencionado anteriormente.

6.3.5 Postproceso iterativo

Una vez se han completado los pasos anteriores tenemos un primer número de pilotes necesarios y su distribución sobre la losa de la forma más óptima posible.

Tras esto se crea el modelo de elementos finitos del depósito y la losa, se imponen las condiciones de contorno, se aplican las cargas necesarias y se realiza la combinación de acciones. Tras todo esto se puede ejecutar un primer análisis para ver cómo reacciona el primer predimensionamiento de la cimentación.

Tras este primer análisis se comprueban si las reacciones de la losa sobre cada pilote en ELS se encuentran entre el rango definido anteriormente en el apartado 6.1. *Introducción a la Optimización*.

Si todas las reacciones cumplen con la condición impuesta esa será la cimentación óptima. Si alguna de las reacciones no cumple la condición, se realiza un proceso iterativo de optimización que se explica a continuación.

El proceso iterativo de optimización se hará individualizado por cada anillo, lo cual nos dará una optimización de la cimentación completa.

Se comienza comprobando si en el anillo tratado alguno de los pilotes no cumple con la condición de optimización. Si encontramos que se cumple para el anillo completo pues se pasa al siguiente anillo.

Si no se cumple en alguno de los pilotes del anillo se realiza la suma de todas las reacciones de los pilotes del anillo. Para obtener el nuevo número de pilotes a colocar en el anillo se dividirá esta suma entre el tope estructural de los pilotes.

Esto se realizará para cada anillo dispuesto en la losa y una vez que se haga se volverá a realizar los pasos mencionados anteriormente en este mismo apartado para el nuevo número de pilotes, con lo cual tendremos otra distribución de los mismos, incluso más o menos anillos.

En el siguiente apartado se realizará un problema a modo de ejemplo para que la explicación de la optimización de la cimentación quede más clara.

7 EJEMPLO PRÁCTICO

En el presente apartado se procederá a realizar un ejemplo de aplicación de la optimización de la cimentación aplicando las explicaciones e ideas expuestas en los apartados anteriores.

Con la realización del ejemplo se adjuntarán los resultados gráficos y numéricos obtenidos, así como una explicación del mismo desde un punto de vista estructural. Esta explicación estará enfocada en las reacciones obtenidas y su comparación con el tope estructural, al ser el aspecto a optimizar.

Por otro lado, se comentarán y compararán la distribución de momentos flectores sobre la losa, así como las deformaciones dadas en la misma.

Tras esto se hará un análisis comparativo de los resultados obtenidos en cada iteración realizada hasta llegar a la optimización de la cimentación.

7.1 Datos iniciales

Teniendo en cuenta lo que se mencionó en el apartado 6.1. INTRODUCCIÓN A LA OPTIMIZACIÓN, para el ejemplo que se va a realizar tomaremos los siguientes datos:

DEPÓSITO		
Diámetro interior depósito	29,80	m
Espesor pared depósito	0,60	m
Altura pared depósito	18,50	m
Espesor losa inferior	0,60	m
Vuelo losa inferior	0,40	m
Material construcción	HA-30	
Densidad material construcción	2500,00	kg/m ³
LÍQUIDO		
Altura líquido	18,00	m
Densidad líquido	960,00	kg/m ³
PILOTES		
Sección transversal	Cuadrada	
Longitud lado	0,40	m
Tipo de pilotes	Prefabricado hormigón	
Material pilotes	HA-50	
Tope estructural	2400	kN

Tabla 7-1. Datos ejemplo práctico.

7.2 Resultados por cada iteración

En el apartado que a continuación se desarrolla se exponen los resultados obtenidos en cada iteración de cálculo junto a una descripción de estos. Posteriormente se realizará una comparación entre los mismos.

7.2.1 Iteración 1

7.2.1.1 Distribución de pilotes

En la primera iteración de cálculo la cimentación estará compuesta por cuatro anillos los cuales tendrán unos diámetros desde el centro hasta el contorno del depósito de: 8,50 m, 16,16 m, 22,96 m y 28,91 m. El número de pilotes dispuestos en cada anillo será: 5, 12, 19 y 28 respectivamente. En la siguiente tabla se expone un resumen de la distribución de los pilotes en la losa.

RESUMEN DISTRIBUCIÓN PILOTES		
Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes
1	8,50	5
2	16,16	12
3	22,96	19
4	28,91	28

Tabla 7-2. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 1.

A continuación, se describirá como se ha llegado a estos primeros diámetros y número de pilotes siguiendo el esquema y el procedimiento explicado en el apartado 6.3. *Proceso de Optimización*.

Según la geometría de los elementos estructurales y características de los materiales utilizados, se llega al siguiente número inicial de pilotes a disponer sobre la losa.

LOSA		
Vol. Losa =	464,62	m3
Peso Losa =	11394871,8	N

DEPÓSITO		
Vol. Depósito =	1060,10	m3
Peso Depósito =	25998928,6	N

LÍQUIDO		
Vol. Líquido =	12386,98	m3
Peso Líquido =	116655605	N

PESO TOTAL		
Peso Total =	154049,41	kN

NÚMERO DE PILOTES		
Tope Estructural =	2400	kN
Nº Pilotes Predim. =	64	

Tabla 7-3. Cálculo número de pilotes predimensionamiento.

En esta primera iteración se colocarán 64 pilotes sobre la losa. Una vez sabemos el número de pilotes a disponer se procede a calcular el número de anillos necesarios y los diámetros de cada uno de ellos.

Con este dimensionamiento también se obtiene el número de pilotes dispuestos en cada anillo, ya que la condición para colocar anillos extras es que un anillo acoge un número de pilotes determinado en función de su diámetro, si este número de pilotes es menor que el número inicial de pilotes a disponer se deberá colocar un nuevo anillo.

Se empieza a iterar con la disposición de un primer anillo de radio igual a la mitad del radio exterior del depósito (radio interior del depósito más espesor de la pared lateral del mismo). El número de pilotes a colocar en esta primera iteración será de 6 según la siguiente expresión expuesta en el apartado 6.3.3 *Definición de pilotes en anillos*:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} > R_1 \longrightarrow N_1 < 2\pi \approx 6,28$$

Número de anillos	Número anillo	Diámetro (m)	Número de pilotes	Pilotes total
1	1	15,20	6	6

Tabla 7-4. Iteración 1 cálculo número de anillos.

Tras esta primera iteración se comprueba que el número total de pilotes dispuestos sobre la losa (6) es menor que el número de pilotes obtenidos en el predimensionamiento por lo que se debe colocar otro anillo.

Los radios de esta segunda iteración se obtienen aplicando la formulación recogida en el apartado 6.3.2 *Definición de anillos*, operando con los siguientes datos:

- $R_{Ext.Depósito} = 15,2$ m
- $n = 2$
- $i = [1,2]$

En cuanto al número de pilotes a colocar en cada anillo se seguirá la formulación establecida en el apartado 6.3.3 *Definición de pilotes en anillos*, teniendo en mente que los radios de los anillos son 7,15 m y 13,59 m.

Número de anillos	Número anillo	Diámetro (m)	Número de pilotes	Pilotes total
2	1	14,30	6	19
	2	27,18	13	

Tabla 7-5. Iteración 2 cálculo número de anillos.

Tras esta segunda iteración se comprueba que el número total de pilotes dispuestos sobre la losa (19) es menor que el número de pilotes obtenidos en el predimensionamiento por lo que se debe colocar otro anillo.

Respecto a los radios de esta tercera iteración, se obtendrán aplicando la misma formulación aplicada en la iteración anterior y operando con los siguientes datos:

- $R_{Ext.Depósito} = 15,2$ m
- $n = 3$
- $i = [1,2,3]$

En referencia al número de pilotes a colocar en cada anillo se seguirá la formulación aplicada en la iteración anterior, teniendo en mente que los radios de los anillos son 5,24 m, 9,96 m y 14,15 m.

Número de anillos	Número anillo	Diámetro (m)	Número de pilotes	Pilotes total
3	1	10,48	6	40
	2	19,92	13	
	3	28,30	21	

Tabla 7-6. Iteración 3 cálculo número de anillos.

Tras esta tercera iteración se comprueba que el número total de pilotes dispuestos sobre la losa (40) es menor que el número de pilotes obtenidos en el predimensionamiento por lo que se debe colocar otro anillo.

Los radios de esta cuarta iteración se obtienen aplicando la misma formulación aplicada en la iteración anterior y operando con los siguientes datos:

- $R_{Ext.Depósito} = 15,2$ m
- $n = 4$
- $i = [1,2,3,4]$

Respecto al número de pilotes a colocar en cada anillo se seguirá la formulación aplicada en la iteración anterior, teniendo en cuenta que los radios de los anillos son 4,25 m, 8,08 m, 11,48 m y 14,45 m.

Número de anillos	Número anillo	Diámetro (m)	Número de pilotes	Pilotes total
4	1	8,50	6	70
	2	16,16	13	
	3	22,96	21	
	4	28,91	30	

Tabla 7-7. Iteración 4 cálculo número de anillos.

Tras esta cuarta iteración se comprueba que el número total de pilotes dispuestos sobre la losa (70) es mayor que el número de pilotes obtenidos en el predimensionamiento por lo que la cimentación del depósito constará de cuatro anillos de pilotes con radios los obtenidos en la cuarta iteración.

En la tabla siguiente se puede observar el proceso iterativo a modo de resumen y comprobar como se van modificando los números de anillos, radios y pilotes en cada iteración.

Número de anillos	Número anillo	Diámetro (m)	Número de pilotes	Pilotes total
1	1	15,20	6	6
2	1	14,30	6	19
	2	27,18	13	
3	1	10,48	6	40
	2	19,92	13	
	3	28,30	21	
4	1	8,50	6	70
	2	16,16	13	
	3	22,96	21	
	4	28,91	30	

Tabla 7-8. Resumen cálculo número de anillos.

Surge un problema y es que el número inicial de pilotes del predimensionamiento y el número de pilotes dispuestos en los cuatro anillos no son iguales. Debemos quitar pilotes de los anillos. Tal y como se explica en el apartado 6.3.3 *Definición de pilotes en anillos*, esto se realizará de forma proporcional multiplicando el número de pilotes obtenidos en cada anillo por un coeficiente de distribución. Este coeficiente se calculará

dividiendo el número de pilotes del predimensionamiento (64) entre el número de pilotes dispuestos en los cuatro anillos (70). Si tras aplicar este procedimiento y sumar los números de pilotes obtenidos en cada anillo, se produjese algún desfase y el número de pilotes del predimensionamiento no correspondiese con esta suma, se sumaría la diferencia de ambos al número de pilotes del anillo más exterior.

$$\text{Coeficiente de distribución} = \frac{64}{70} = 0,9143$$

Número anillo	Número pilotes iteración	% Distribución	Número pilotes predim.
1	6	0,9143	5
2	13	0,9143	12
3	21	0,9143	19
4	30	0,9143	27
Total	70		63

Tabla 7–9. Distribución número de pilotes por anillo en iteración 1.

Como se puede comprobar, la suma del número de pilotes de cada anillo obtenida tras la distribución proporcional no es igual al número de pilotes del predimensionamiento. Varían en un pilote, el cual se añadirá al anillo número 4, pasando a disponer 28 pilotes en el mismo, siguiendo con el criterio expuesto anteriormente.

Con esto quedaría definida la distribución en planta de los pilotes obre la losa: diámetro de los anillos y número de pilotes a colocar en cada anillo.

7.2.1.2 Reacciones

En la siguiente tabla resumen se pueden observar las reacciones máximas que se dan en cada anillo de esta primera iteración.

REACCIONES	
Anillo	F3 (kN)
1	4775,02
2	3247,41
3	2076,98
4	2525,70

Tabla 7–10. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 1.

Como se puede comprobar ninguno de los anillos cumple con la condición de optimización del tope estructural. Si bien es verdad que los anillos más externos como son el número 3 y 4 están muy próximos de cumplir, esto no ocurre en los anillos más internos (1 y 2) los cuales se prevé que aumenten el número de pilotes dispuestos para rebajar las elevadas reacciones obtenidas.

En el *Anexo 1: Reacciones de cada Iteración*, se encuentran las reacciones de cada pilote para más información.

7.2.1.3 Momentos flectores en losa

- Momento M11

El momento M11 de la primera iteración se distribuye de forma homogénea sobre la losa, encontrando sus

máximos valores en las luces entre anillos de pilotes.

Este momento alcanza un valor máximo de 85,48 kNm/m y mínimo de -306,69 kNm/m.

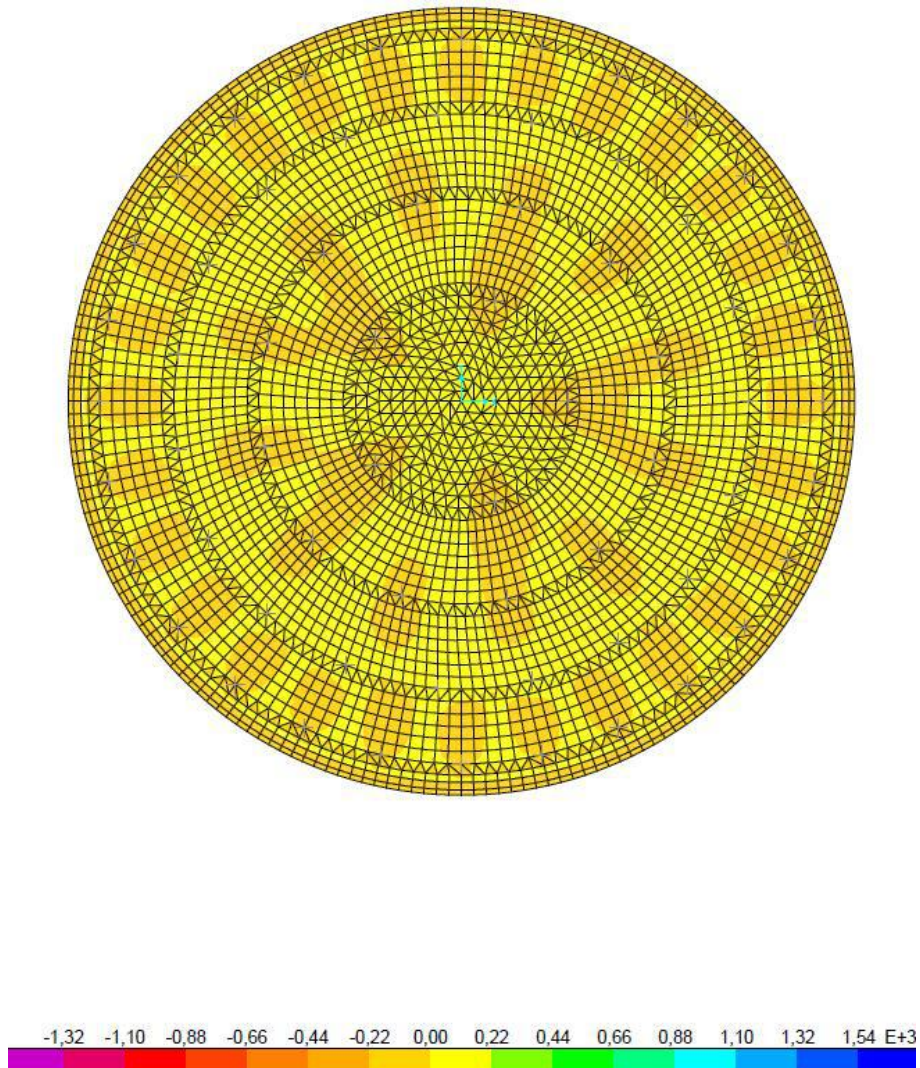


Figura 7-1. Momento flector M11 en la iteración 1.

- Momento M22

El momento M22 de la primera iteración no se distribuye de forma homogénea sobre la losa, encontrando sus máximos valores en zonas muy localizadas en el encuentro entre la pared del depósito y la losa. En las luces entre anillos de pilotes se obtienen valores en torno a un tercio del valor máximo.

Este momento alcanza un valor máximo de 272,78 kNm/m y mínimo de -349,46 kNm/m.

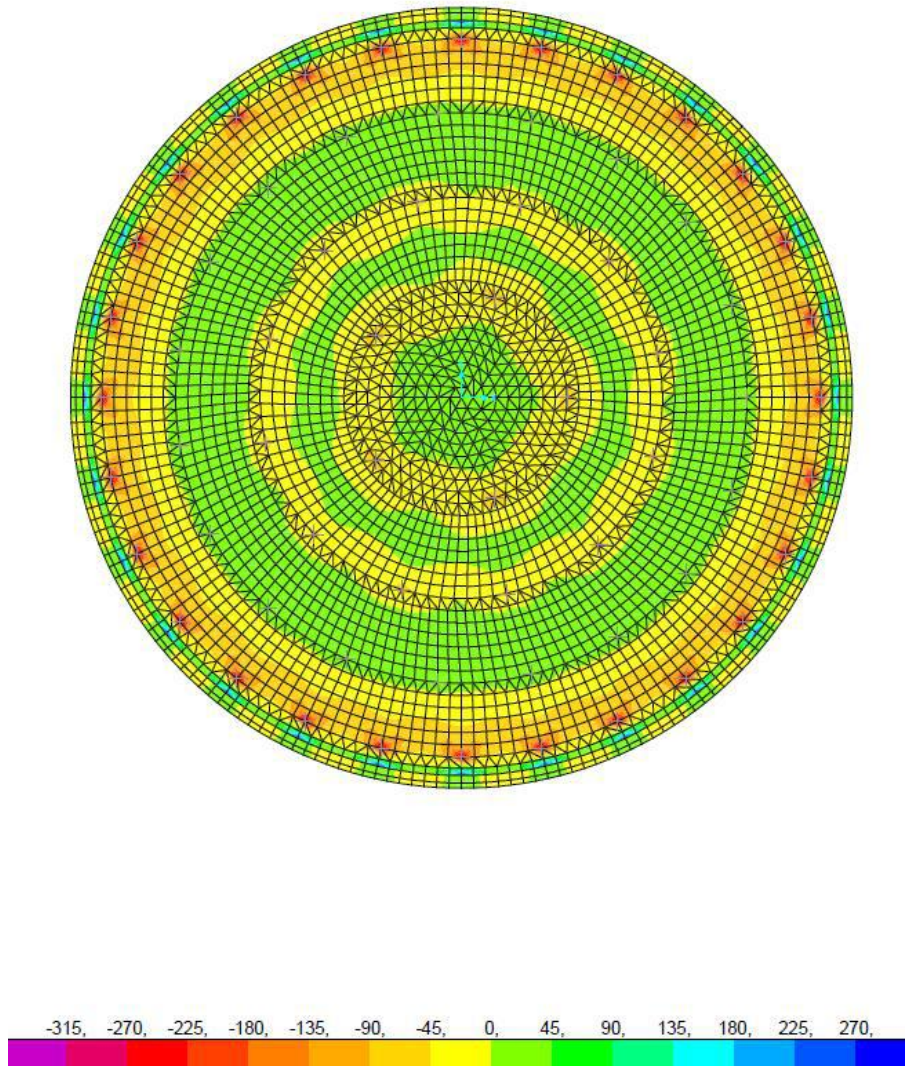


Figura 7-2. Momento flector M_{22} en la iteración 1.

- Momento M_{12}

El momento M_{12} de la primera iteración se distribuye de forma homogénea sobre la losa salvo en el contorno de unión entre la pared del depósito y la losa, encontrando sus máximos valores en esta zona.

Este momento alcanza un valor máximo de 90,03 kNm/m y mínimo de -84,18 kNm/m.

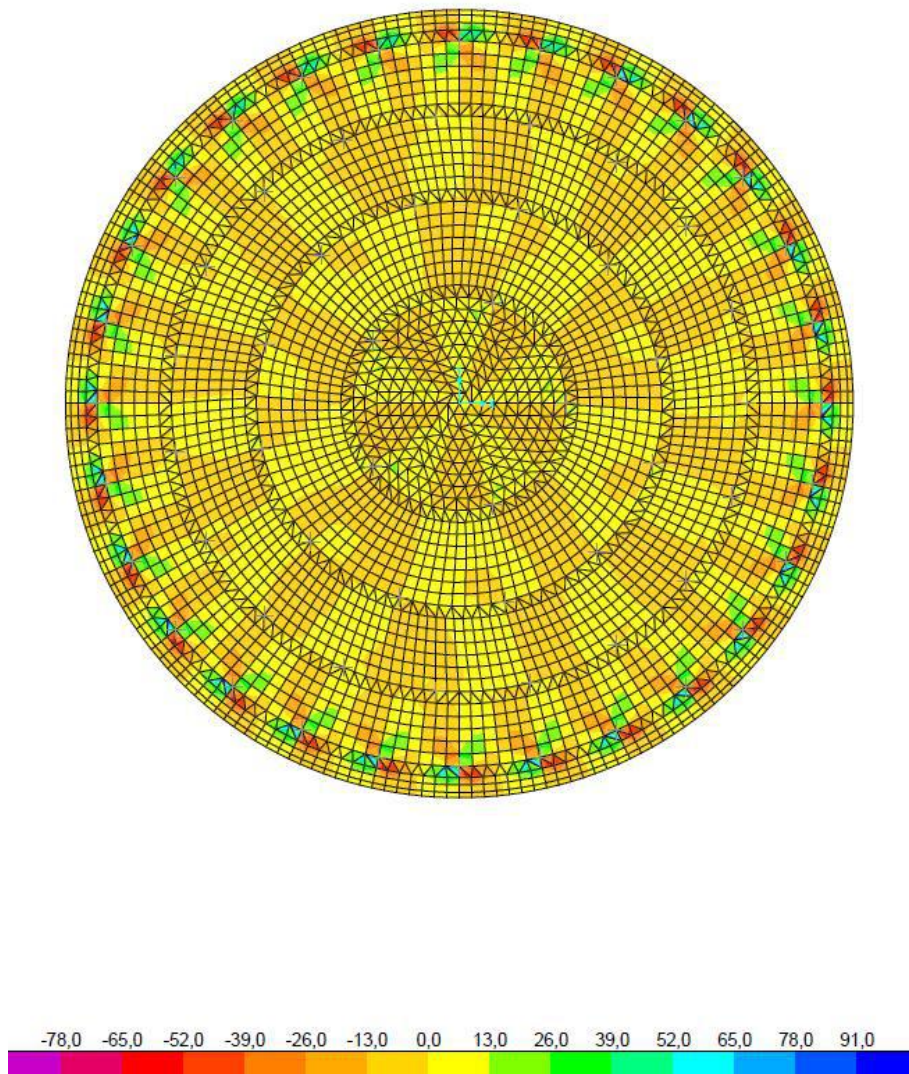


Figura 7-3. Momento torsor M12 en la iteración 1.

7.2.1.4 Deformación

En esta primera iteración se alcanza un desplazamiento máximo de 0,35 mm y se encuentra en el centro y en los voladizos de la losa.

Como se puede intuir las deformaciones aumentarán en las luces entre anillos. En los propios anillos estas se encuentran muy reducidas debido a los pilotes. Esta idea se puede comprobar en la siguiente imagen.

Esta manera de distribución de las deformaciones también se dará en las demás iteraciones.

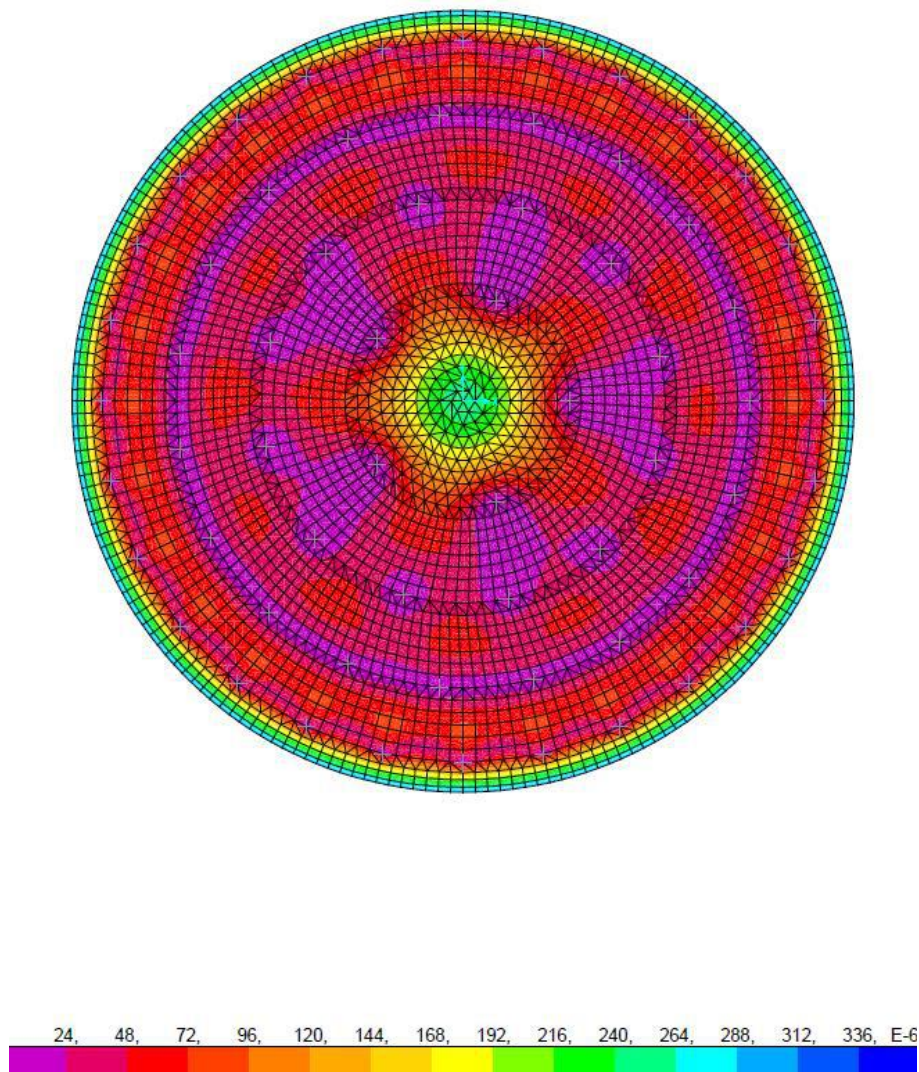


Figura 7-4. Deformada en la iteración 1.

7.2.2 Iteración 2

7.2.2.1 Distribución de pilotes

En la segunda iteración de cálculo la cimentación estará compuesta por cuatro anillos los cuales tendrán unos diámetros desde el centro hasta el contorno del depósito de: 8,50 m, 16,16 m, 22,96 m y 28,91 m. El número de pilotes dispuestos en cada anillo será: 10, 15, 17 y 29 respectivamente. En la siguiente tabla se expone un resumen de la distribución de los pilotes en la losa.

RESUMEN DISTRIBUCIÓN PILOTES		
Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes
1	8,50	10
2	16,16	15
3	22,96	17
4	28,91	29

Tabla 7-11. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 2.

Como se comentó en el apartado 7.2.1. *Iteración 1*, ningún anillo cumple ya que las reacciones máximas son mayores del tope estructural en los anillos 1,2 y 4 y menor al 90% del tope estructural en el anillo 3. Para la iteración que se trata se deben disponer más pilotes en los anillos que superan el tope estructural y quitar pilotes en los anillos que cuyos pilotes trabajan por debajo del 90% del tope estructural.

Cabe destacar que los diámetros calculados para la iteración 1 se mantendrán inalterables durante el resto del proceso de optimización.

Para determinar el nuevo número de pilotes en cada anillo se sumará las reacciones de cada pilote por anillo y el nuevo número de pilotes a disponer en cada anillo será el correspondiente a la división de la suma de cada anillo entre el tope estructural. A continuación, se adjunta una tabla con el procedimiento a seguir para la obtención de la nueva distribución de pilotes.

Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes Iter.1	Suma Reacciones Iter.1 (kN)	Número Pilotes Iter.2
1	8,50	5	23848,71	10
2	16,16	12	35588,53	15
3	22,96	19	38873,27	17
4	28,91	28	68959,21	29

Tabla 7–12. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 2.

De esta forma queda definida la distribución en planta de los pilotes sobre la losa para la segunda iteración.

7.2.2.2 Reacciones

En la siguiente tabla resumen se pueden observar las reacciones máximas que se dan en cada anillo de esta segunda iteración.

REACCIONES	
Anillo	F3 (kN)
1	2422,76
2	2365,13
3	2243,60
4	2494,87

Tabla 7–13. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 2.

Como se puede comprobar algunos de los anillos cumplen con la condición de optimización del tope estructural (2 y 3). Debido a la inclusión de más pilotes en los anillos 1 y 2 se rebajan las reacciones llegando a cumplir la optimización en el anillo 2. Los anillos 3 y 4 se predimensionaron bastante bien ya que estaban cerca de cumplir en la primera iteración, por lo que ahora han sufrido una ligera variación al alza en el caso del anillo 3 y a la baja en el caso del anillo 4.

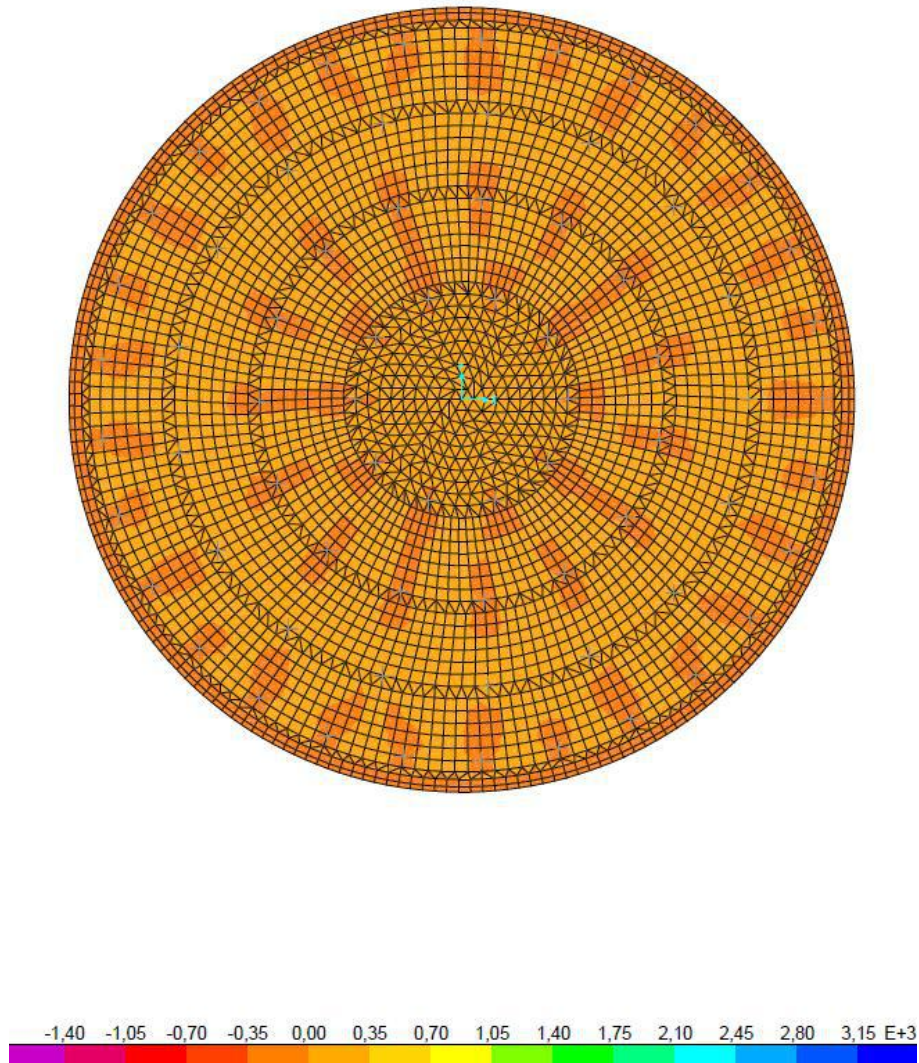
En el *Anexo 1: Reacciones de cada Iteración*, se encuentran las reacciones de cada pilote para más información.

7.2.2.3 Momentos flectores en losa

- Momento M11

El momento M11 de la segunda iteración se distribuye de forma homogénea sobre la losa (al igual que ocurría en la primera iteración), encontrando sus máximos valores en las luces entre anillos de pilotes, en zonas concentradas donde se ubica un pilote y en el voladizo de la losa.

Este momento alcanza un valor máximo de 305,07 kNm/m y mínimo de -683,65 kNm/m. Se puede observar como han aumentado considerablemente los valores en esta iteración con respecto a la anterior.



- Momento M22

El momento M22 de la segunda iteración se distribuye de forma más homogénea sobre la losa que en la primera iteración, encontrando sus máximos valores en zonas muy localizadas en el encuentro entre la pared del depósito y la losa y en el centro de esta última.

Este momento alcanza un valor máximo de 499,21 kNm/m y mínimo de -329,07 kNm/m.

Se puede apreciar que los momentos positivos aumentan en torno al doble de la iteración anterior y los negativos se mantienen más o menos estables.

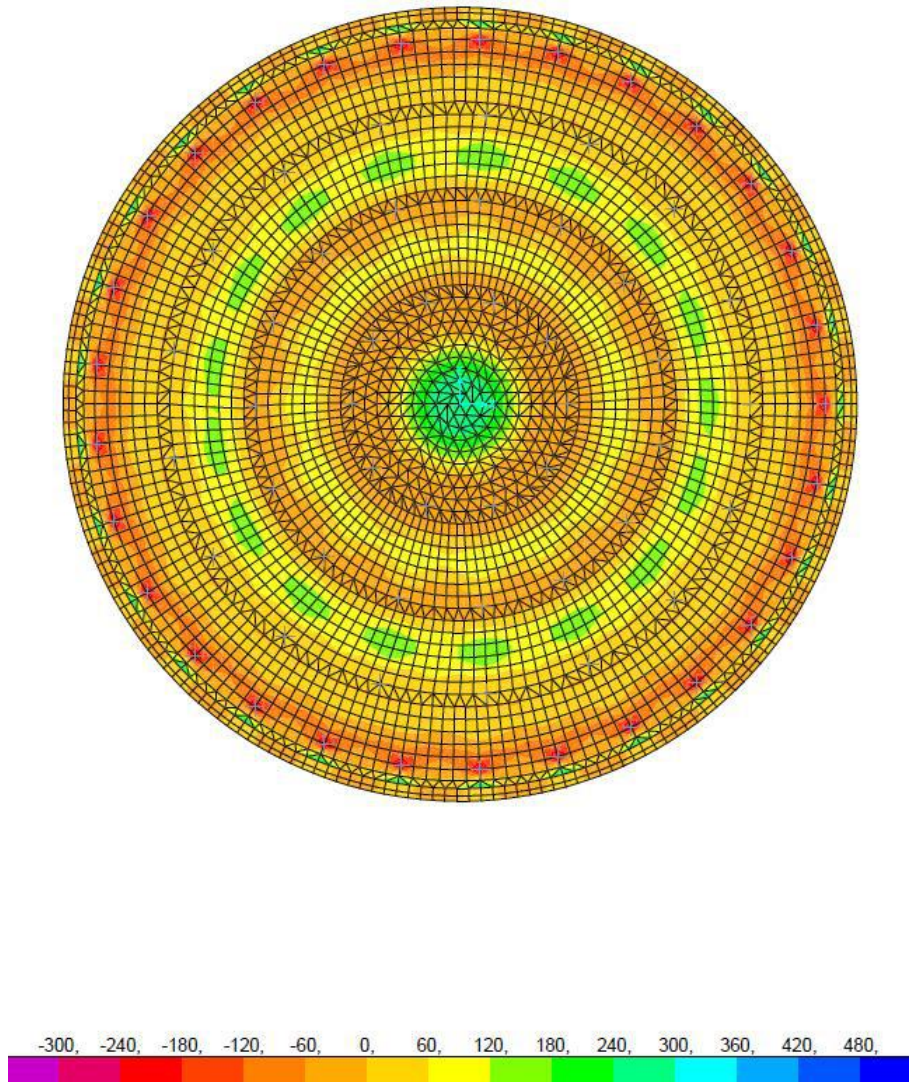


Figura 7-6. Momento flector M_{22} en la iteración 2.

- Momento M_{12}

El momento M_{12} de la segunda iteración no se distribuye de forma tan homogénea sobre la losa como ocurría en la primera iteración, los máximos se encuentran en el contorno de unión entre la pared del depósito y la losa y en las zonas de colocación pilote.

Este momento alcanza un valor máximo de 178,28 kNm/m y mínimo de -58,40 kNm/m.

Como se puede apreciar, los momentos positivos aumentan en torno al doble y los negativos descienden en menor medida.

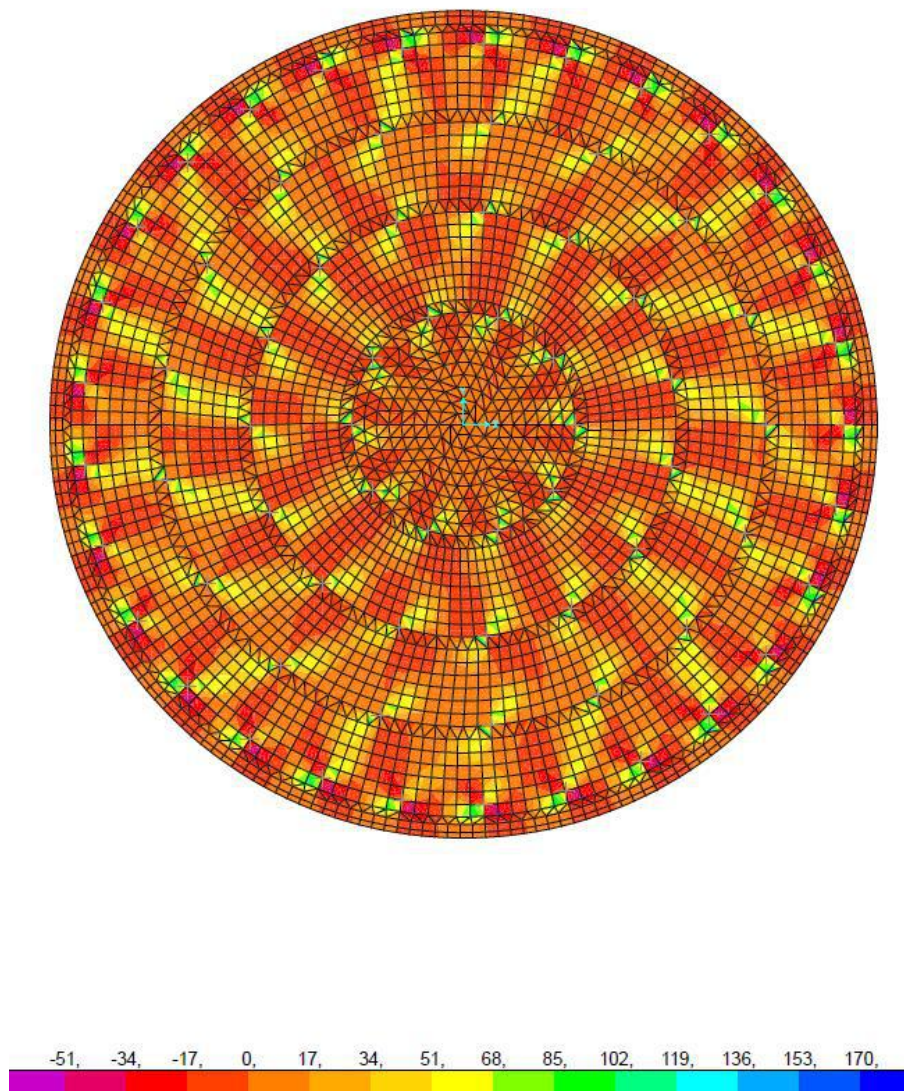


Figura 7-7. Momento torsor M12 en la iteración 2.

7.2.2.4 Deformación

En esta segunda iteración se alcanza un desplazamiento máximo de 2 mm, valor que es en torno a diez veces el valor obtenido en la primera iteración y se encuentra en el centro de la losa.

Como se comentó en la primera iteración, los desplazamientos se distribuyen de la misma forma salvo que en este caso hay mayor uniformidad en estos. Esto es debido a la mejor distribución de los pilotes en esta segunda iteración.

Se prevé que en las siguientes iteraciones se siga este modelo de distribución de desplazamientos más uniforme.

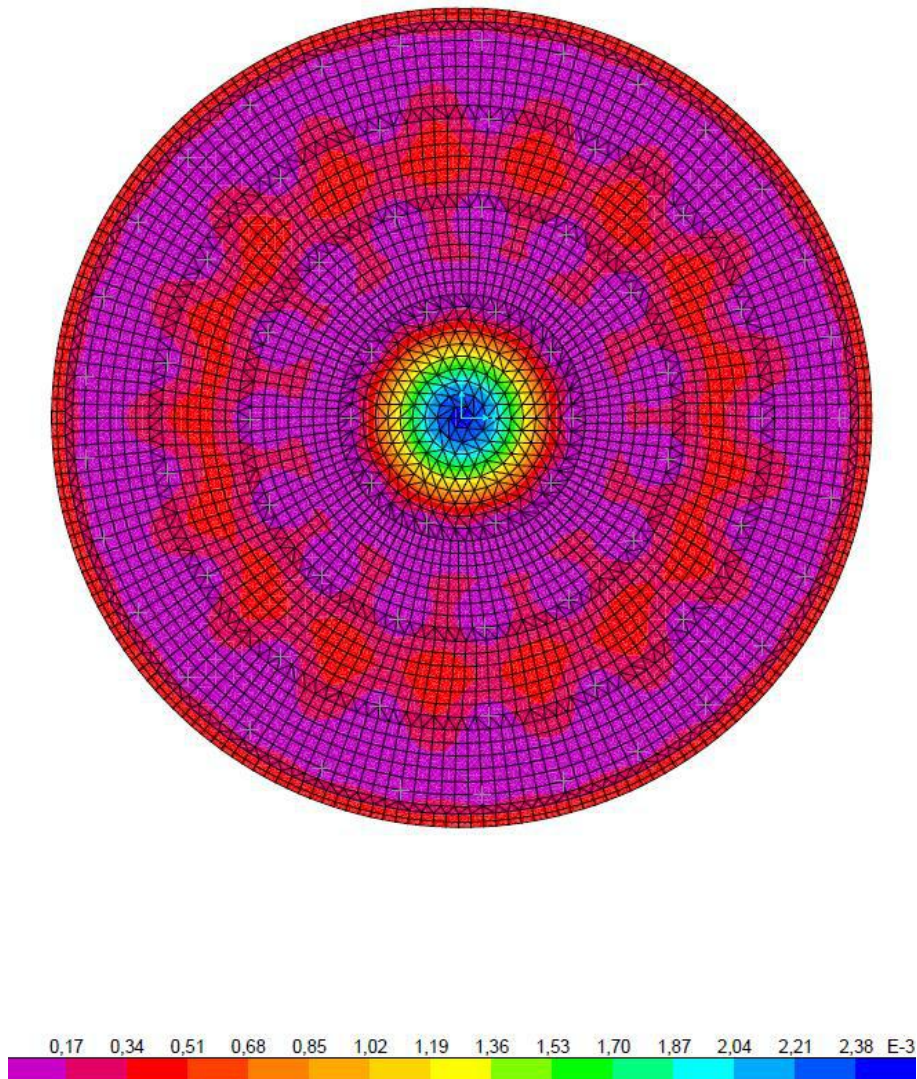


Figura 7-8. Deformada en la iteración 2.

7.2.3 Iteración 3

7.2.3.1 Distribución de pilotes

En la tercera iteración de cálculo la cimentación estará compuesta por cuatro anillos los cuales tendrán unos diámetros desde el centro hasta el contorno del depósito de: 8,50 m, 16,16 m, 22,96 m y 28,91 m. El número de pilotes dispuestos en cada anillo será: 11, 15, 16 y 29 respectivamente. En la siguiente tabla se expone un resumen de la distribución de los pilotes en la losa.

RESUMEN DISTRIBUCIÓN PILOTES		
Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes
1	8,50	11
2	16,16	15
3	22,96	16
4	28,91	29

Tabla 7-14. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 3.

Como se comentó en el apartado 7.2.2. *Iteración 2*, los anillos 1 y 4 no cumplen ya que las reacciones máximas son mayores del tope estructural. Para la iteración que se trata se deben disponer más pilotes en los anillos que superan el tope estructural.

Los anillos 2 y 3 cumplen con la condición exigida, a pesar de esto se les aplicará el mismo proceso que a los anillos que no cumplen ya que pueden ser susceptibles de optimizarse debido a la interacción de estos con las nuevas distribuciones de los anillos que no cumplen.

Para determinar el nuevo número de pilotes en cada anillo se sumará las reacciones de cada pilote por anillo y el nuevo número de pilotes a disponer en cada anillo será el correspondiente a la división de la suma de cada anillo entre el tope estructural. A continuación, se adjunta una tabla con el procedimiento a seguir para la obtención de la nueva distribución de pilotes.

Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes Iter.2	Suma Reacciones Iter.2 (kN)	Número Pilotes Iter.3
1	8,50	10	24161,14	11
2	16,16	15	35452,99	15
3	22,96	17	38057,24	16
4	28,91	29	69576,04	29

Tabla 7–15. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 3.

De esta forma queda definida la distribución en planta de los pilotes sobre la losa para la tercera iteración.

7.2.3.2 Reacciones

En la siguiente tabla resumen se pueden observar las reacciones máximas que se dan en cada anillo de esta tercera iteración.

REACCIONES	
Anillo	F3 (kN)
1	2199,59
2	2381,30
3	2356,35
4	2543,58

Tabla 7–16. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 3.

Como se puede comprobar los anillos 1 ,2 y 3 cumplen la condición de optimización del tope estructural. Al contrario de la iteración 2, en esta el anillo 1 cumple debido a la inclusión de otro pilote. El anillo 4 sigue sin cumplir, aunque está próximo a hacerlo, y se prevé que será el que sufrirá cambios en el número de pilotes en las iteraciones restantes.

Cabe destacar una situación muy ventajosa fruto de la optimización. El anillo 3 cumplía en la iteración 2 con el número de pilotes dispuesto por lo que a priori no se preveía que se modificase su cantidad de pilotes, sin embargo, esta se rebaja en una unidad y aun así sigue cumpliendo la condición de optimización.

En el *Anexo 1: Reacciones de cada Iteración*, se encuentran las reacciones de cada pilote para más información.

7.2.3.3 Momentos flectores en losa

- Momento M11

El momento M11 de la tercera iteración se distribuye de forma homogénea sobre la losa, encontrando sus máximos valores en las luces entre anillos de pilotes, en zonas concentradas donde se ubica un pilote y en el

voladizo de la losa. La distribución del momento en esta iteración es muy similar al de la iteración anterior por lo que se prevé que esta sea la distribución del momento M11 en las posteriores iteraciones.

Este momento alcanza un valor máximo de 304,57 kNm/m y mínimo de -719,13 kNm/m. Como se puede apreciar estos valores no varían significativamente con respecto a la iteración anterior, por lo que se prevé que se mantengan sobre este orden de magnitud.

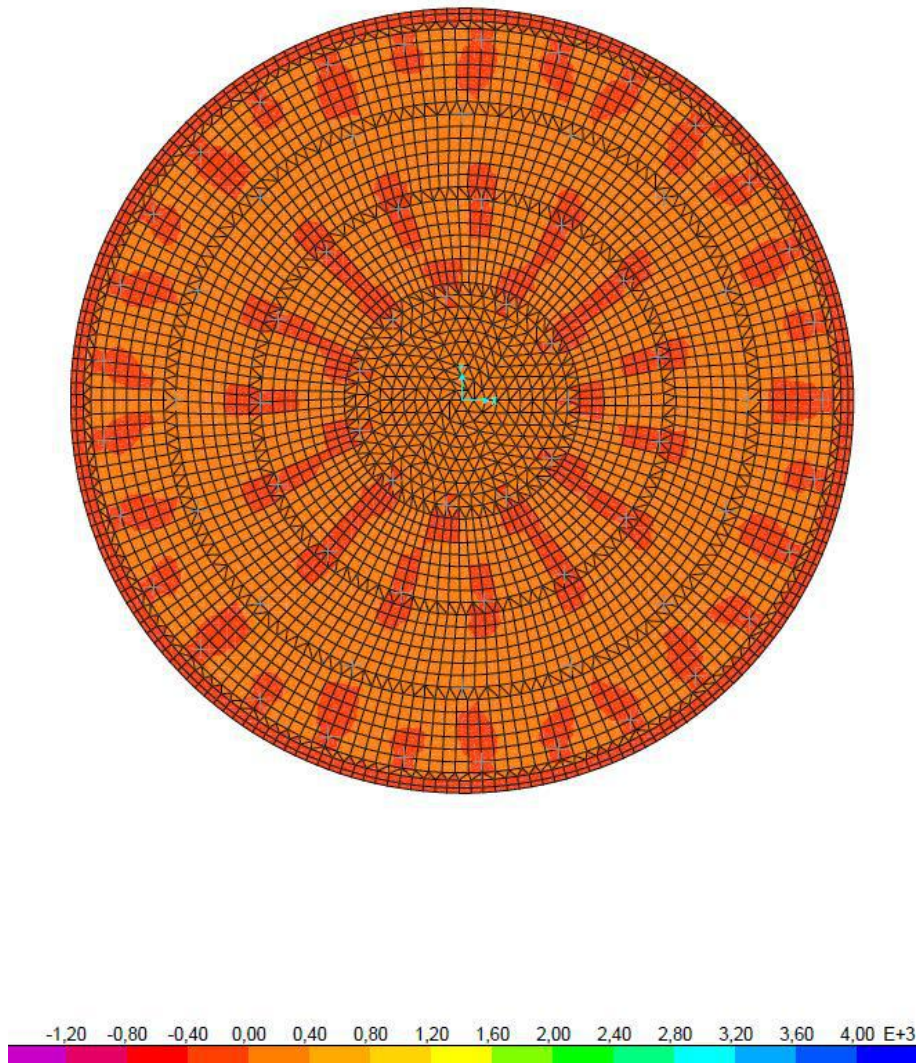


Figura 7-9. Momento flector M11 en la iteración 3.

- Momento M22

El momento M22 de la tercera iteración se distribuye de forma similar a la segunda iteración, encontrando sus máximos valores en zonas muy localizadas en el encuentro entre la pared del depósito y la losa y en el centro de esta última.

Este momento alcanza un valor máximo de 504,676 kNm/m y mínimo de -329,21 kNm/m.

Tanto los momentos negativos como los positivos se mantienen semejantes respecto a la iteración anterior, por lo que se prevé que se mantengan estos valores y esta distribución de momentos para las próximas iteraciones.

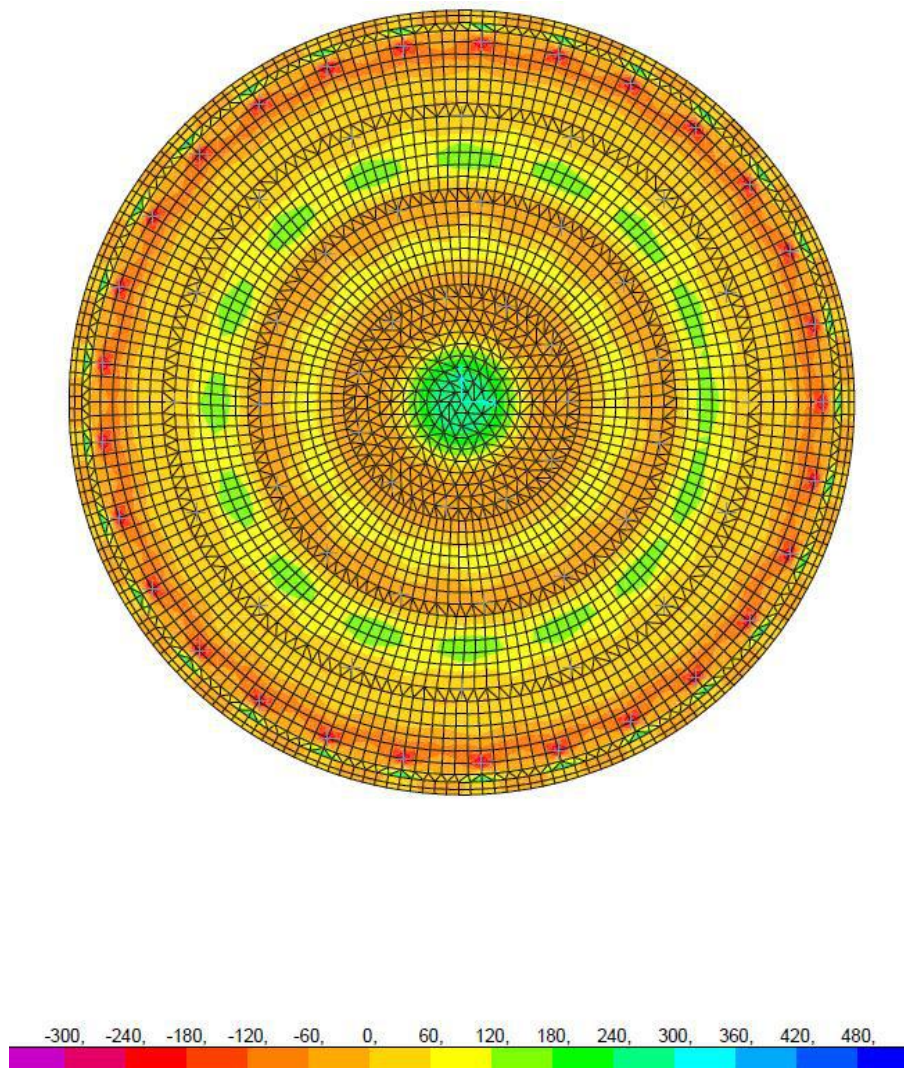


Figura 7-10. Momento flector M22 en la iteración 3

- Momento M12

El momento M12 de la tercera iteración se distribuye sobre la losa de forma similar a la iteración anterior encontrando sus máximos en el contorno de unión entre la pared del depósito y la losa y en las zonas de colocación pilote.

Este momento alcanza un valor máximo de 179,99 kNm/m y mínimo de -58,36 kNm/m.

Tanto los momentos negativos como los positivos se mantienen semejantes respecto a la iteración anterior.

Se prevé que en las próximas iteraciones esta distribución de momentos sobre la losa y los valores sean parecidos a la que se obtiene en esta iteración.

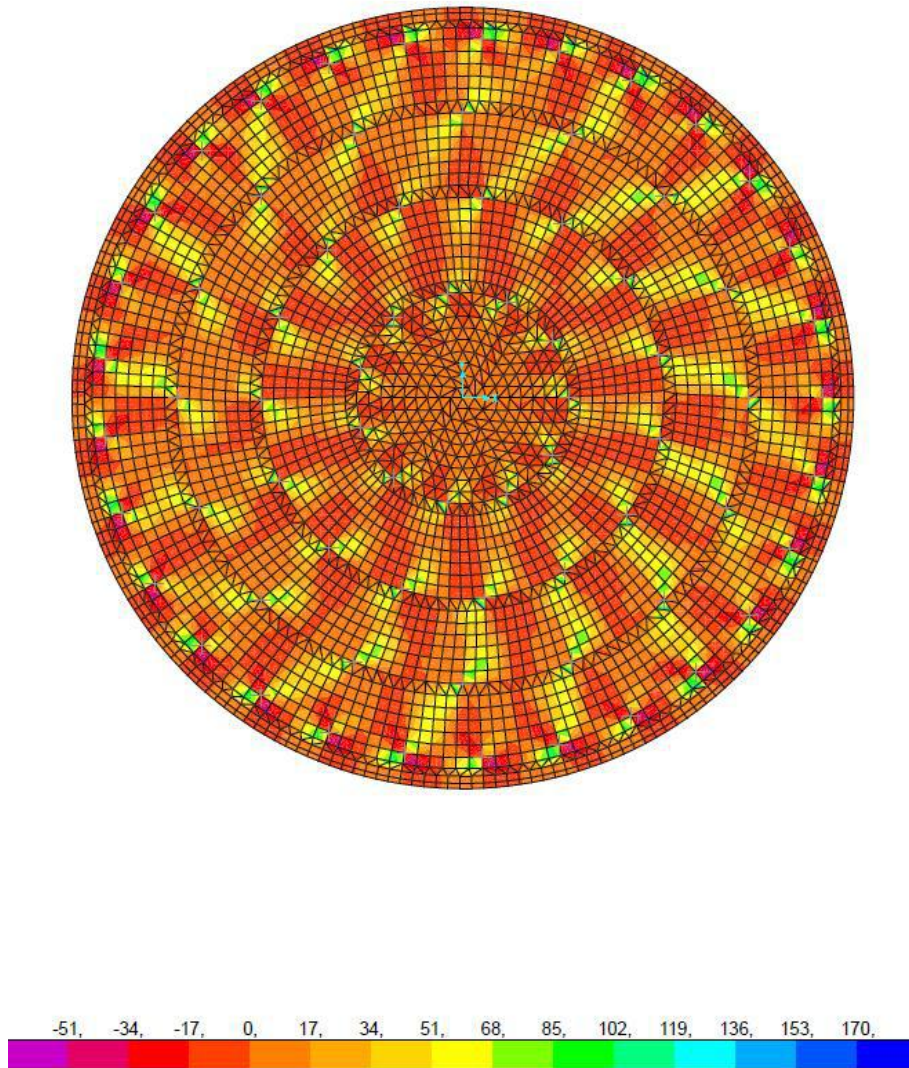


Figura 7-11. Momento torsor M_{12} en la iteración 3.

7.2.3.4 Deformación

En esta tercera iteración se alcanza un desplazamiento máximo de 2 mm, valor que es muy semejante al obtenido en la iteración segunda, y se encuentra en el centro de la losa.

Como se dijo en la iteración anterior, los desplazamientos se distribuyen de manera más uniforme.

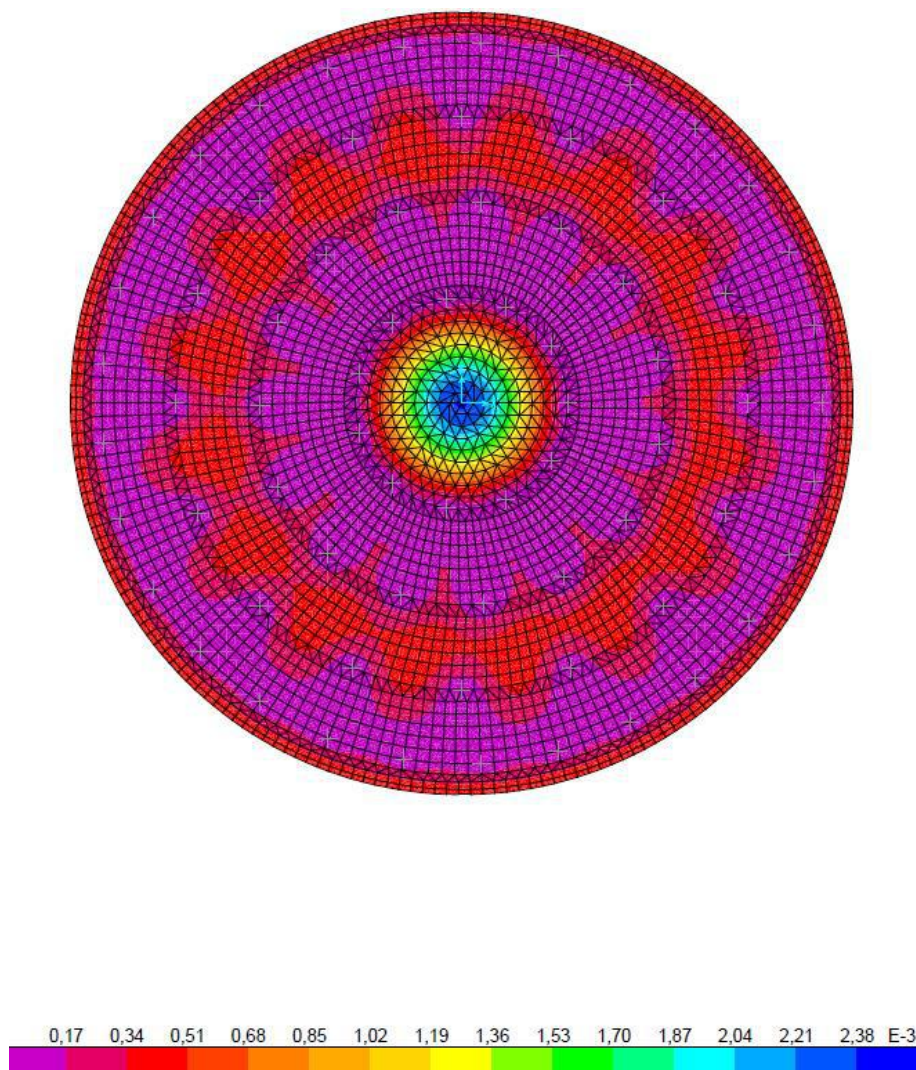


Figura 7-12. Deformada en la iteración 3.

7.2.4 Iteración 4

7.2.4.1 Distribución de pilotes

En la cuarta iteración de cálculo la cimentación estará compuesta por cuatro anillos los cuales tendrán unos diámetros desde el centro hasta el contorno del depósito de: 8,50 m, 16,16 m, 22,96 m y 28,91 m. El número de pilotes dispuestos en cada anillo será: 11, 15, 16 y 30 respectivamente. En la siguiente tabla se expone un resumen de la distribución de los pilotes en la losa.

RESUMEN DISTRIBUCIÓN PILOTES		
Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes
1	8,50	11
2	16,16	15
3	22,96	16
4	28,91	30

Tabla 7-17. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 4.

Como se comentó en el apartado 7.2.3. *Iteración 3*, el anillo 4 no cumple ya que la reacción máxima es mayor que el tope estructural. Para la iteración que se trata se deben disponer más pilotes en el anillo que supera el tope estructural.

Los anillos 1, 2 y 3 cumplen con la condición exigida, a pesar de esto se les aplicará el mismo proceso que al anillo que no cumplen ya que pueden ser susceptibles de optimizarse debido a la interacción de estos con las nuevas distribuciones de los anillos que no cumplen.

Para determinar el nuevo número de pilotes en cada anillo se sumará las reacciones de cada pilote por anillo y el nuevo número de pilotes a disponer en cada anillo será el correspondiente a la división de la suma de cada anillo entre el tope estructural. A continuación, se adjunta una tabla con el procedimiento a seguir para la obtención de la nueva distribución de pilotes.

Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes Iter.3	Suma Reacciones Iter.3 (kN)	Número Pilotes Iter.4
1	8,50	11	24130,38	11
2	16,16	15	35671,16	15
3	22,96	16	37598,00	16
4	28,91	29	69847,86	30

Tabla 7–18. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 4.

De esta forma queda definida la distribución en planta de los pilotes sobre la losa para la cuarta iteración.

7.2.4.2 Reacciones

En la siguiente tabla resumen se pueden observar las reacciones máximas que se dan en cada anillo de esta cuarta iteración.

REACCIONES	
Anillo	F3 (kN)
1	2204,11
2	2386,44
3	2367,57
4	2455,96

Tabla 7–19. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 4.

En esta iteración se comprueba que los anillos 1, 2 y 3 los que siguen cumpliendo la condición de optimización del tope estructural. El número de pilotes de los anillos mencionados no varían respecto a la iteración anterior por lo que se puede afirmar que estos anillos ya están optimizados.

El número de pilotes del anillo 4 aumenta en uno respecto a la iteración anterior, lo cual hace rebajar la reacción en este anillo. Este descenso en el valor de la reacción no es suficiente para hacer que cumple la condición de optimización por lo que se prevé que aumente el número de pilotes en este anillo en la próxima iteración.

En el *Anexo 1: Reacciones de cada Iteración*, se encuentran las reacciones de cada pilote para más información.

7.2.4.3 Momentos flectores en losa

- Momento M11

El momento M11 de la cuarta iteración se distribuye de forma homogénea sobre la losa, encontrando sus máximos valores en las luces entre anillos de pilotes, en zonas concentradas donde se ubica un pilote y en el voladizo de la losa.

Este momento alcanza un valor máximo de 304,53 kNm/m y mínimo de -709,46 kNm/m.

Como se dijo en la iteración anterior, la distribución del momento y sus valores se mantienen similares.

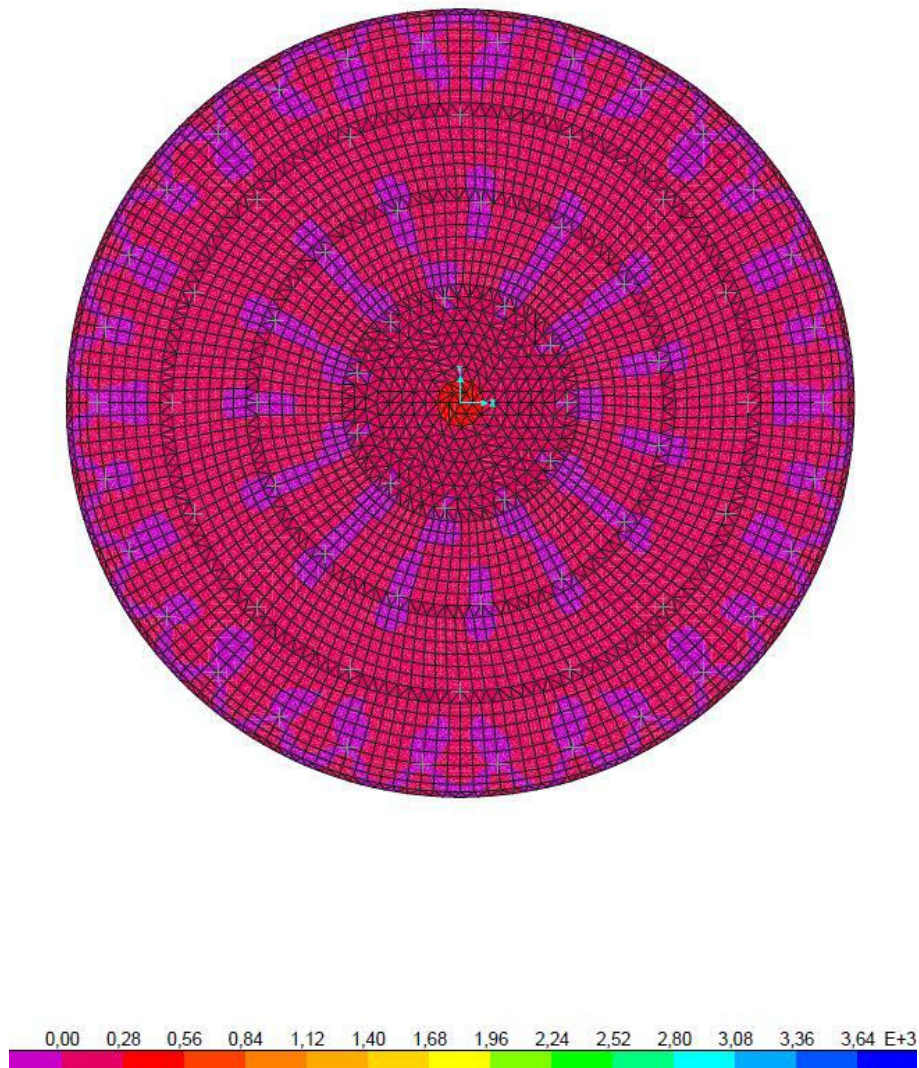


Figura 7-13. Momento flector M11 en la iteración 4.

- Momento M22

El momento M22 de la cuarta iteración se distribuye con más homogeneidad sobre la losa que en las iteraciones anteriores, encontrando sus máximos valores en zonas muy localizadas en el encuentro entre la pared del depósito y la losa y en el centro de esta última.

Este momento alcanza un valor máximo de 691,92 kNm/m y mínimo de -353,15 kNm/m.

Los momentos positivos aumentan alrededor del 50% con respecto a la iteración anterior y los negativos se mantienen similares.

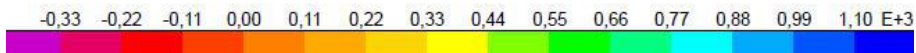
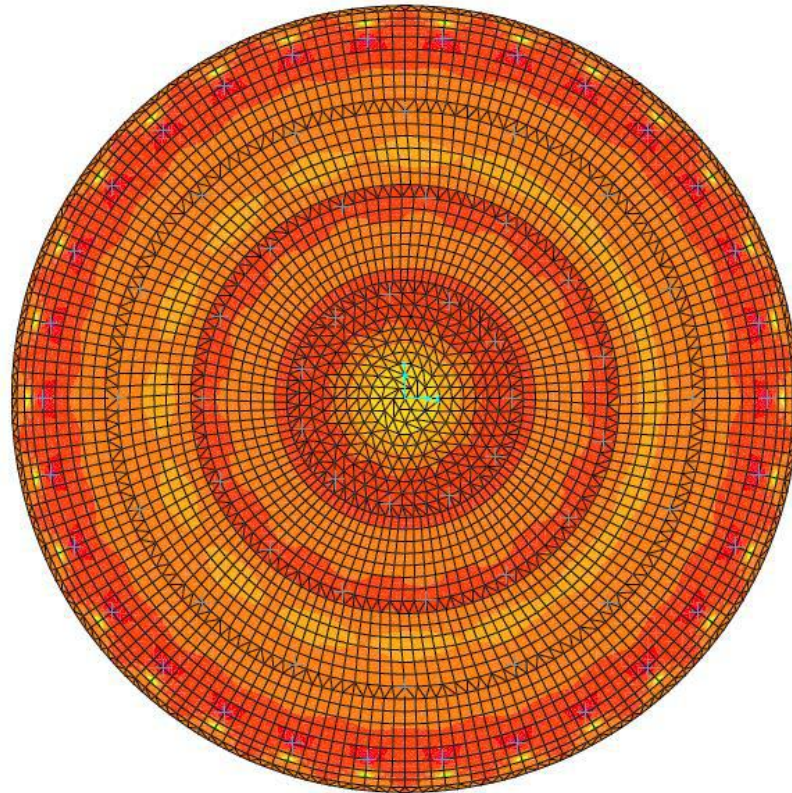


Figura 7-14. Momento flector M22 en la iteración 4.

- Momento M12

El momento M12 de la cuarta iteración se distribuye sobre la losa de forma similar a la iteración anterior y su máximo se encuentra en el contorno de unión entre la pared del depósito y la losa y en las zonas de colocación pilote.

Este momento alcanza un valor máximo de 137,77 kNm/m y mínimo de -88,32 kNm/m.

Los momentos positivos disminuyen y los negativos aumentan con respecto a la iteración anterior.

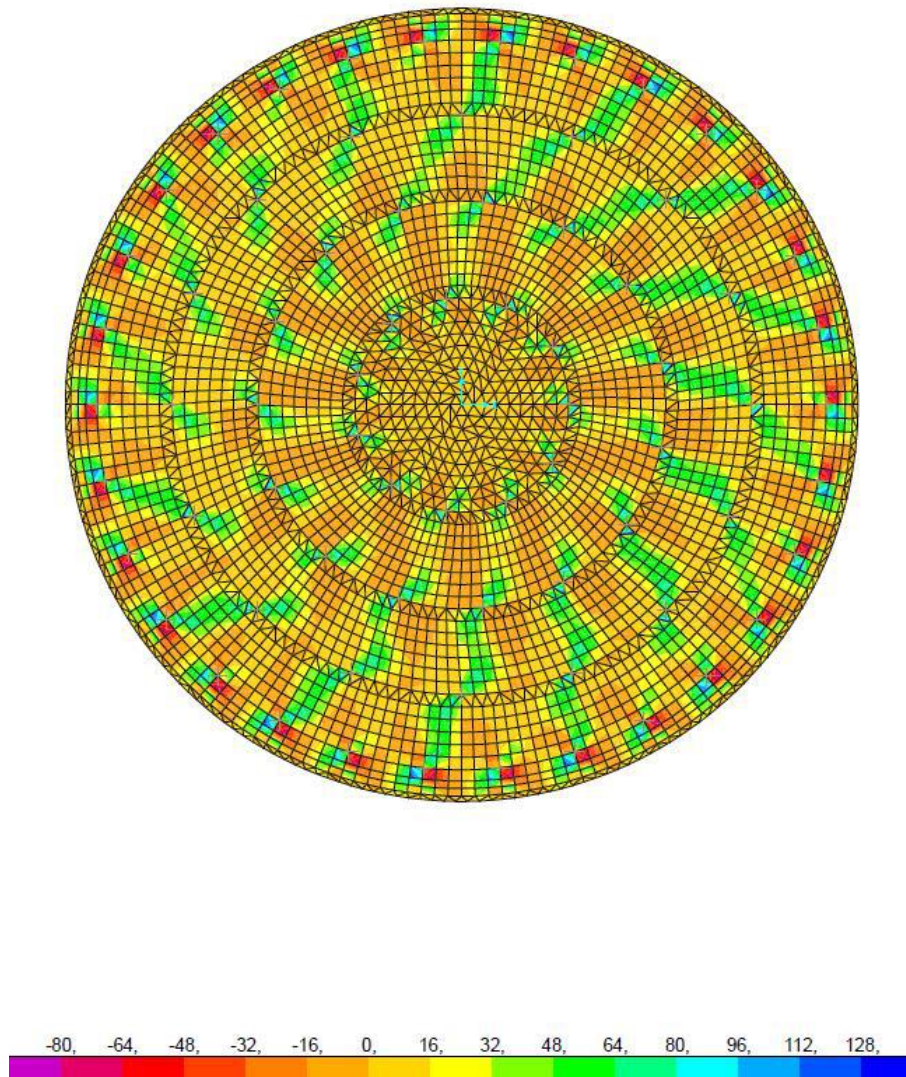


Figura 7-15. Momento torsor M_{12} en la iteración 4.

7.2.4.4 Deformación

En la cuarta iteración se alcanza un desplazamiento máximo de 2 mm, valor que es muy semejante al obtenido en las iteraciones segunda y tercera, y se encuentra en el centro de la losa.

En esta iteración también podemos comprobar como los desplazamientos se distribuyen de forma homogénea.

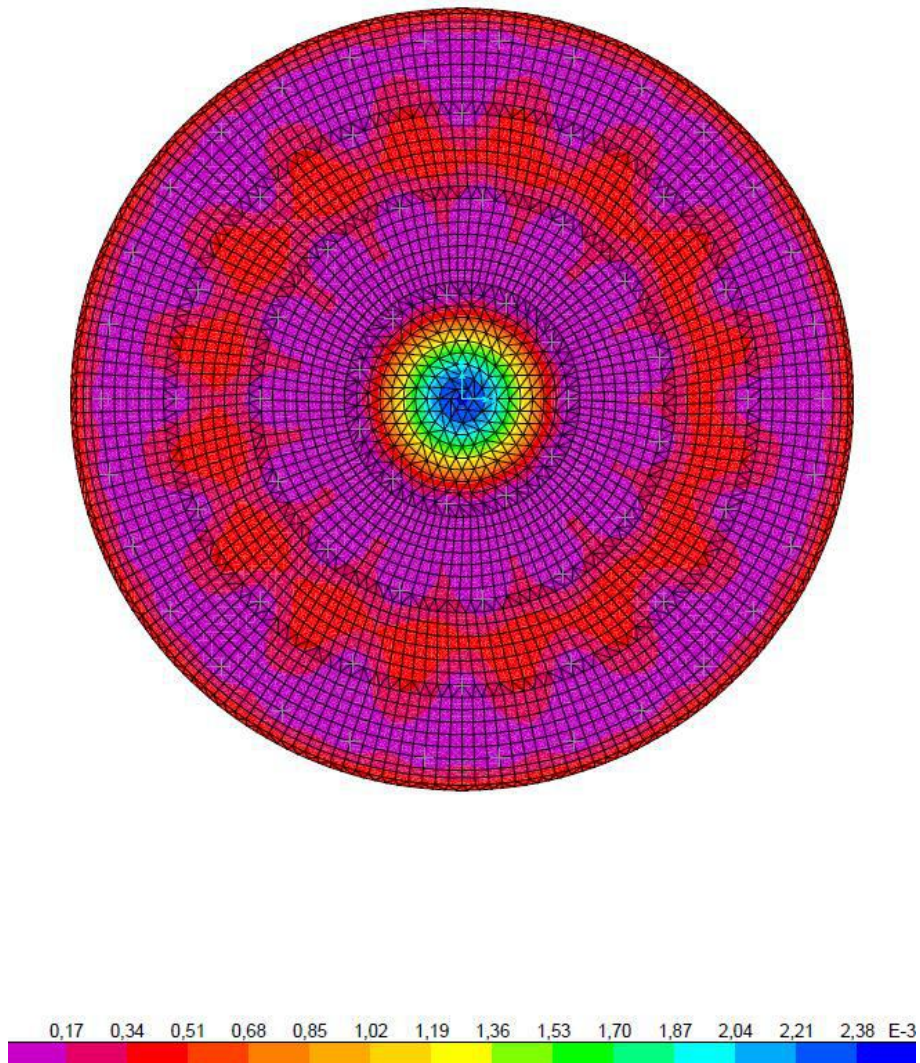


Figura 7-16. Deformada en la iteración 4.

7.2.5 Iteración 5

7.2.5.1 Distribución de pilotes

En la quinta iteración de cálculo la cimentación estará compuesta por cuatro anillos los cuales tendrán unos diámetros desde el centro hasta el contorno del depósito de: 8,50 m, 16,16 m, 22,96 m y 28,91 m. El número de pilotes dispuestos en cada anillo será: 11, 15, 16 y 31 respectivamente. En la siguiente tabla se expone un resumen de la distribución de los pilotes en la losa.

RESUMEN DISTRIBUCIÓN PILOTES		
Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes
1	8,50	11
2	16,16	15
3	22,96	16
4	28,91	31

Tabla 7-20. Distribución pilotes y radio de anillos iteración 5.

Como se comentó en el apartado 7.2.4. *Iteración 4*, el anillo 4 no cumple ya que la reacción máxima es mayor que el tope estructural. Para la iteración que se trata se deben disponer más pilotes en el anillo que supera el tope estructural.

Los anillos 1, 2 y 3 cumplen con la condición exigida, a pesar de esto se les aplicará el mismo proceso que al anillo que no cumplen ya que pueden ser susceptibles de optimizarse debido a la interacción de estos con las nuevas distribuciones de los anillos que no cumplen.

Para determinar el nuevo número de pilotes en cada anillo se sumará las reacciones de cada pilote por anillo y el nuevo número de pilotes a disponer en cada anillo será el correspondiente a la división de la suma de cada anillo entre el tope estructural. A continuación, se adjunta una tabla con el procedimiento a seguir para la obtención de la nueva distribución de pilotes.

Número anillo	Diámetro (m)	Número Pilotes Iter.4	Suma Reacciones Iter.4 (kN)	Número Pilotes Iter.5
1	8,50	11	24133,99	11
2	16,16	15	35648,66	15
3	22,96	16	37803,93	16
4	28,91	30	69687,89	31

Tabla 7–21. Cálculo número de pilotes necesarios en la iteración 5.

De esta forma queda definida la distribución en planta de los pilotes sobre la losa para la última iteración.

7.2.5.2 Reacciones

En la siguiente tabla resumen se pueden observar las reacciones máximas que se dan en cada anillo de esta quinta iteración.

REACCIONES	
Anillo	F3 (kN)
1	2201,64
2	2384,75
3	2350,62
4	2397,98

Tabla 7–22. Reacciones máximas en cada anillo en la iteración 5.

En esta última iteración se comprueba que todos los anillos cumplen la condición de optimización del tope estructural. Al igual que en la iteración anterior los anillos 1, 2 y 3 no se ven modificados. El único cambio se produce en el anillo 4, el cual aumenta en uno el número de pilotes y ello lleva a que disminuyan las reacciones producidas en él hasta hacer que cumpla la condición de optimización.

En el *Anexo 1: Reacciones de cada Iteración*, se encuentran las reacciones de cada pilote para más información.

7.2.5.3 Momentos flectores en losa

- Momento M11

El momento M11 de la última iteración se distribuye de forma homogénea sobre la losa, encontrando sus máximos valores en las luces entre anillos de pilotes, en zonas concentradas donde se ubica un pilote y en el voladizo de la losa.

Este momento alcanza un valor máximo de 304,66 kNm/m y mínimo de -700,59 kNm/m.

Como se dijo anteriormente, la distribución del momento y sus valores se mantienen semejantes.

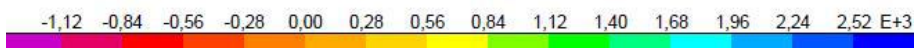
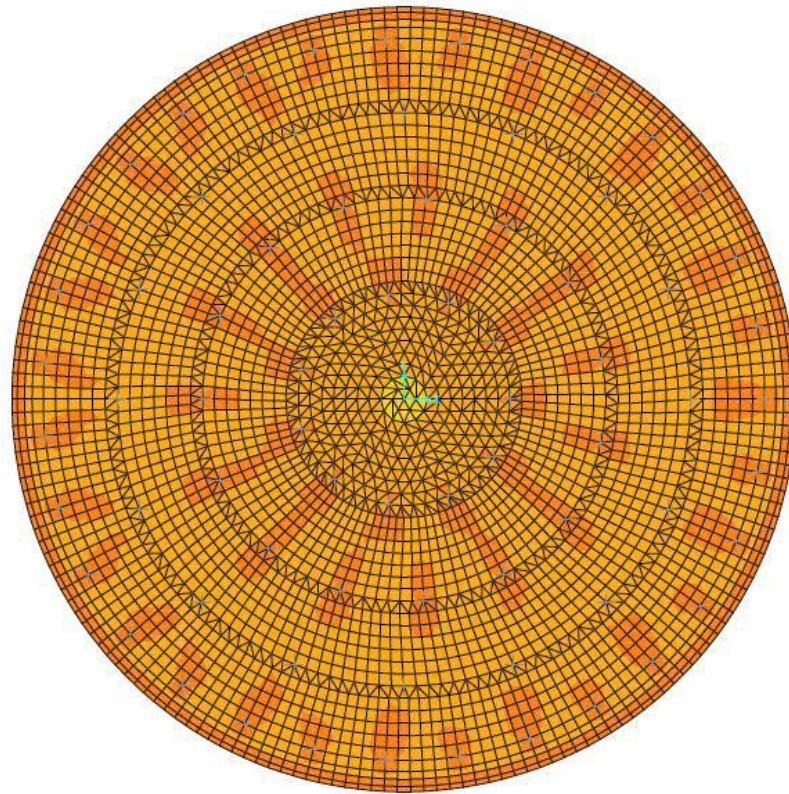


Figura 7-17. Momento flector M11 en la iteración 5.

- Momento M22

El momento M22 de la última iteración se distribuye como se previó en las iteraciones anteriores, encontrando sus máximos valores en zonas muy localizadas en el encuentro entre la pared del depósito y la losa y en el centro de esta última.

Este momento alcanza un valor máximo de 303,47 kNm/m y mínimo de -308,76 kNm/m.

Los momentos positivos descienden a la mitad del valor de la iteración anterior y los negativos en cambio se mantienen más o menos estables.

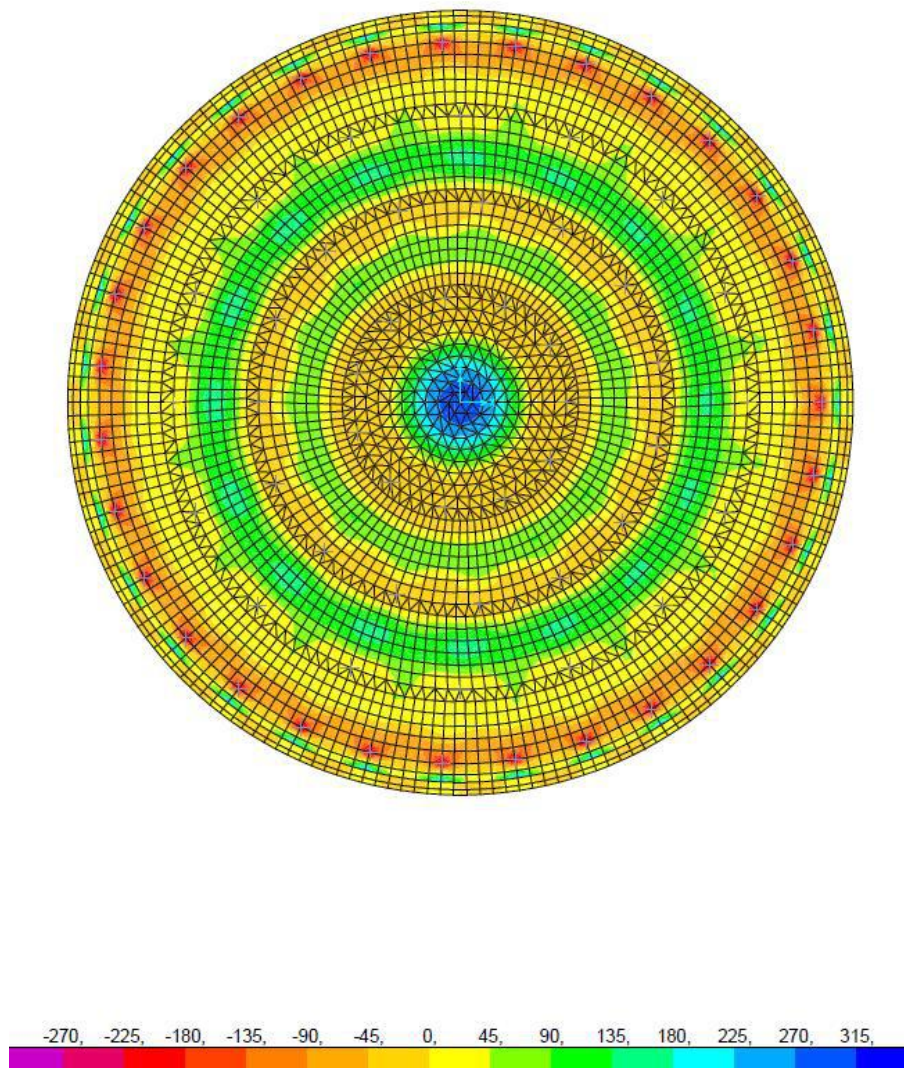


Figura 7-18. Momento flector M22 en la iteración 5.

- Momento M12

El momento M12 de la última iteración se distribuye sobre la losa de forma semejante a la iteración anterior, encontrando sus máximos en el contorno de unión entre la pared del depósito y la losa y en las zonas de colocación pilote.

Este momento alcanza un valor máximo de 139,04 kNm/m y mínimo de -52,72 kNm/m.

Los momentos positivos se mantienen estables y los negativos sufren un pequeño descenso.

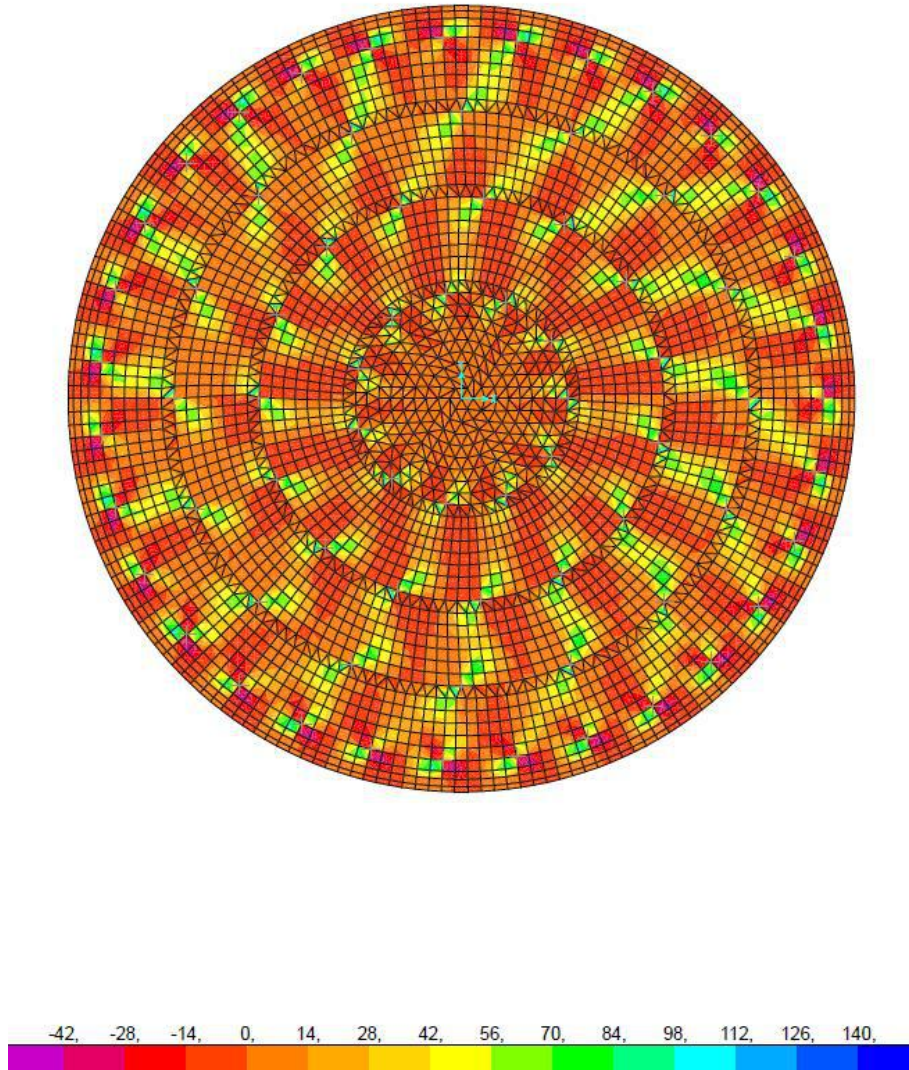


Figura 7-19. Momento torsor M_{12} en la iteración 5.

7.2.5.4 Deformación

En la última iteración se alcanza un desplazamiento máximo de 2 mm, valor que es muy semejante al obtenido en las iteraciones segunda, tercera y cuarta, y se encuentra en el centro de la losa.

En la iteración definitiva también se comprueba que la distribución de los desplazamientos es parecida a las iteraciones 2, 3 y 4.

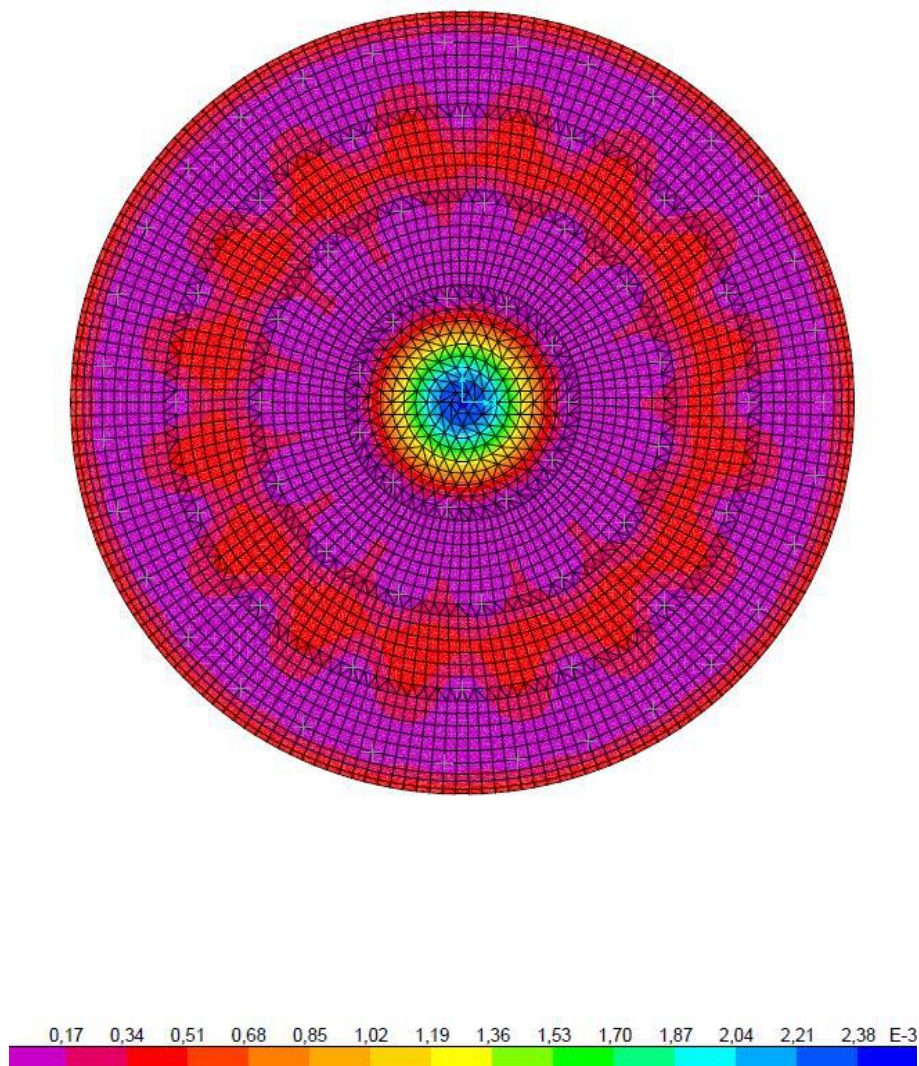


Figura 7-20. Deformada en la iteración 5.

7.3 Comparación de resultados

En este apartado se compararán los resultados expuestos en el apartado 7.2. *Resultados por cada iteración*. Se tratarán los resultados en el orden expuesto anteriormente.

En cuanto a la distribución de los pilotes podemos observar que en las cinco iteraciones obtenemos el mismo número de anillos, esto no es más que una casuística del ejemplo tratado no siendo un resultado generalizado para todos los problemas.

Respecto a los diámetros de cada anillo, no cambian de una iteración a otra, pero en contraposición al número de anillos esto si será un parámetro que se repetirá en cada iteración al ser una decisión de optimización.

El aspecto en el que si se aprecian cambios significativos es en el número de pilotes de cada anillo, los cuales varían para adaptarse lo máximo posible a las reacciones obtenidas en la iteración anterior. En la siguiente tabla se puede observar la evolución del número de pilotes en cada iteración.

NÚMERO DE PILOTES				
Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5
5	10	11	11	11
12	15	15	15	15
19	17	16	16	16
28	29	29	30	31

Tabla 7–23. Resumen del número de pilotes en cada iteración.

Analizando la tabla anterior podemos comprobar que el predimensionamiento realizado es una muy buena primera aproximación a la solución final menos por el anillo central el cual se infradimensiona.

Las reacciones que se producen en la losa con cada iteración van convergiendo hasta que todas cumplen la condición de optimización del tope estructural. Donde se necesita aumentar la reacción se quitan pilotes y donde hace falta disminuir la reacción se añaden. Esto da muestras de que los cálculos cumplen su finalidad de optimizar esta característica estructural.

Cabe mencionar que, aunque se cumpla la condición, el proceso de optimización elimina pilotes de un anillo de forma que se siga cumpliendo la condición y sea aún más óptimo.

Analizando los momentos M11 es fácil darse cuenta de que cuanto mejor se distribuyen los pilotes mayores valores se alcanzan. Partiendo de una primera iteración para poner a prueba el predimensionamiento realizado y donde se alcanzan valores del orden de entre un tercio o un medio de los obtenidos en las siguientes iteraciones donde se estabilizan estos momentos.

Observando los resultados expuestos para el momento M22, se puede apreciar que conforme se realiza una mejor distribución de los pilotes sobre la losa se obtiene una distribución más homogénea de este momento sobre la misma, encontrando sus máximos valores en zonas muy localizadas en el encuentro entre la pared del depósito y la losa. Los momentos positivos fluctúan un poco, aumentando hasta la última iteración donde bajan, y los negativos se mantienen más o menos constantes en todas las iteraciones.

El momento M12 se distribuye de forma homogénea sobre la losa desde la primera iteración hasta la última, encontrando sus máximos en el contorno de unión entre la pared del depósito y la losa y en las zonas de colocación pilote. Los valores de este momento se mantienen más o menos constantes, sufriendo los positivos pequeñas variaciones. Estos valores serán en torno a un tercio de los valores de los momentos M11 y M22 y en algunas ocasiones incluso inferiores por lo que no serán muy relevantes en el comportamiento de la losa.

En cuanto a las deformaciones, llama la atención que mientras mejor se distribuyen los pilotes sobre la losa mayor es la deformación que se produce. En la primera iteración el desplazamiento máximo es casi diez veces menor al desplazamiento de las siguientes iteraciones donde el valor se estabiliza.

Esta situación, a priori sin sentido, es debida a que en la primera iteración los desplazamientos máximos se producen en el centro y en el voladizo de la losa lo cual hace que se vayan compensando las deformaciones entre las luces de los anillos.

En las demás iteraciones los desplazamientos en la losa se estabilizan y se vuelven homogéneos, no pudiéndose compensar unas deformaciones con otras.

8 APLICACIÓN API SAP2000

En el apartado que se procede a desarrollar se tratará con mayor profundidad lo comentado anteriormente en el apartado 3. *Herramientas utilizadas*.

Para empezar, se explicará con mayor detalle la utilización de la API de SAP2000 y posteriormente se expondrá la estructura del código de VBA realizado para la ejecución del problema tratado.

8.1 API de SAP2000

Tal y como se comentó en el apartado 3.2. API de SAP2000 la API se utilizará para dar órdenes a SAP2000 con el fin de que se cree el modelo, se ejecute el análisis y se postprocese la información de cada iteración automáticamente.

En la API podemos encontrar ejemplos con sus líneas de código para las diferentes acciones a realizar a la hora de hacer un modelo en SAP2000 (Definir materiales, propiedades, elementos, cargas, etc).

El código final será una composición de las líneas de código de cada ejemplo que se requiera para la realización del modelo.

La API no solo contiene ejemplos para realizar el modelo, sino también para el postprocesado de los resultados. De este modo, cuando se ejecute el análisis se podrán leer y extraer resultados para su posterior uso.

Todo lo citado anteriormente se encuentra en el lenguaje de programación VBA de Excel. También encontramos ejemplos de código en otros lenguajes como: C, C++ o MATLAB.

Para finalizar y completar el código se añadirán órdenes para la lectura y cálculos de los parámetros necesarios para hacer el modelo. Estas órdenes serán líneas de puro lenguaje de programación sin estar contenido en la API.

8.2 Estructura del Código VBA

El modelo de elementos finitos realizado para el cálculo del problema se ha hecho usando el lenguaje de programación de VBA. El código usado para tal fin automatiza el proceso de optimización explicado en el apartado 6. *Optimización Distribución de Pilotes* y se ha estructurado de la siguiente manera:

1. Declaración de variables.
2. Lectura de variables.
3. Definición de materiales.
4. Lectura de geometría del depósito y de la losa.
5. Predimensionamiento del número de total de pilotes.

6. Cálculo del número de anillos a disponer.
7. Cálculo del número de pilotes colocados en cada anillo.
8. Cálculo y definición de los elementos Shell que formarán el modelo de elementos finitos.
9. Comandos API:
 - 9.1. Arranque de Sap2000 y creación del modelo.
 - 9.2. Creación del modelo de muro.
 - 9.3. Creación del modelo de losa.
 - 9.4. Aplicación de las condiciones de contorno.
 - 9.5. Definición de las acciones.
 - 9.6. Definición de las combinaciones.
 - 9.7. Ejecución de análisis completo.
 - 9.8. Lectura de reacciones y escritura en Excel
 - 9.9. Proceso de optimización
 - 9.10. Cierre de Sap2000

9 CONCLUSIONES

En este capítulo se realiza una síntesis de las ideas principales a las que se llegan tras lo expuesto en el presente trabajo y los resultados obtenidos.

El objetivo principal era conseguir la optimización económica de la cimentación mediante pilotes de un depósito de base circular. Esto se traduce en distribuir de la mejor manera posible el mínimo número de pilotes sobre la losa. El programa realizado, a través de un primer predimensionamiento cumple con este objetivo.

Cabe mencionar que la optimización se realiza desde el punto de vista estructural de las reacciones. Por consiguiente, puede darse que mejorando este comportamiento de la estructura se empeore otro.

Esto se refleja en el ejemplo realizado en el apartado 7. *Ejemplo Práctico*, en el cual se pone de manifiesto que con la mejora de la distribución de los pilotes, las deformaciones y esfuerzos de flexión aumentan. Estos resultados son anti-intuitivos ya que lo lógico sería pensar que cuanto mejor se distribuya la cimentación menores flechas aparecerían en la losa.

Con el proceso de optimización no solo se optimiza la cimentación en sí, sino que de forma indirecta también se optimiza el canto de la losa y la armadura de punzonamiento dispuesta en ella.

Como idea final se resalta el concepto clave sobre el que se basa el trabajo en cuestión, Optimización. Hoy en día ya no basta con dimensionar y calcular una estructura, sino que se debe optimizar lo máximo posible respecto a un comportamiento o cualidad para que sea competitiva en el mercado actual.

REFERENCIAS

- [1] MINISTERIO DE FOMENTO, Código Técnico de la Edificación. Documento básico SE-C Seguridad Estructural Cimientos. CTE-C. Madrid, 2019.
- [2] MINISTERIO DE FOMENTO, Código Estructural. Madrid, 2021.
- [3] Manterola Armisen, J. Puentes: Apuntes para su Diseño, Cálculo y Construcción, vol. 1. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2006.
- [4] Torroja Miret, E. Razón y ser de los tipos estructurales. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.
- [5] Rombach, G. A. Finite element design of concrete structures. Thomas Telford. 2009.
- [6] Excel Visual Basic para Aplicaciones (VBA). <https://docs.microsoft.com/es-es/office/vba/api/overview/excel>.
- [7] Computers and Structures. SAP2000 Basic Analysis Reference Manual. 2009.
- [8] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.5 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [2022].

ANEXO 1: REACCIONES DE CADA ITERACIÓN

REACCIONES ITERACIÓN 1			
Anillo	Nº Pilote	F3 (kN)	F3/Anillo (kN)
1	1	4775,0207	
1	2	4768,50396	
1	3	4770,02207	
1	4	4774,28978	
1	5	4760,8716	23848,7081
2	6	2957,33501	
2	7	3123,15723	
2	8	2704,68467	
2	9	3247,41337	
2	10	2727,16102	
2	11	3091,8564	
2	12	2981,77149	
2	13	2809,64282	
2	14	3217,33084	
2	15	2676,28442	
2	16	3205,14138	
2	17	2846,75248	35588,5311
3	18	2008,93243	
3	19	2066,08284	
3	20	2031,56293	
3	21	2053,2396	
3	22	2067,53366	
3	23	2008,775	
3	24	2062,19524	
3	25	2073,64421	
3	26	2001,7783	
3	27	2064,37977	
3	28	2053,9212	
3	29	2026,91267	
3	30	2068,36476	

3	31	2014,33861	
3	32	2062,90064	
3	33	2071,59425	
3	34	1999,51991	
3	35	2060,61302	
3	36	2076,97933	38873,2684
4	37	2410,8106	
4	38	2486,86618	
4	39	2508,43636	
4	40	2410,04053	
4	41	2454,91697	
4	42	2512,62476	
4	43	2428,19507	
4	44	2463,08833	
4	45	2477,53943	
4	46	2443,0172	
4	47	2466,45423	
4	48	2493,43138	
4	49	2429,9163	
4	50	2449,78188	
4	51	2525,69573	
4	52	2425,84867	
4	53	2414,30661	
4	54	2525,36842	
4	55	2466,36048	
4	56	2424,9573	
4	57	2476,77722	
4	58	2484,55641	
4	59	2440,03888	
4	60	2479,57566	
4	61	2455,31005	
4	62	2429,91687	
4	63	2510,35118	
4	64	2465,02972	68959,2124

REACCIONES ITERACIÓN 2			
Anillo	Nº Pilote	F3 (kN)	F3/Anillo (kN)
1	1	2422,75846	
1	2	2416,05136	
1	3	2415,53751	
1	4	2415,20131	
1	5	2414,47817	
1	6	2419,59793	
1	7	2413,08691	
1	8	2416,91157	
1	9	2422,34805	
1	10	2405,17357	24161,1448
2	11	2363,42385	
2	12	2360,55522	
2	13	2364,45871	
2	14	2364,04924	
2	15	2364,51079	
2	16	2365,02297	
2	17	2364,92965	
2	18	2362,31688	
2	19	2361,57633	
2	20	2363,91281	
2	21	2363,44329	
2	22	2365,12874	
2	23	2363,8587	
2	24	2360,74688	
2	25	2365,05117	35452,9852
3	26	2243,59856	
3	27	2237,64266	
3	28	2238,16952	
3	29	2236,00489	
3	30	2236,58466	
3	31	2235,98803	
3	32	2239,67442	
3	33	2237,96285	
3	34	2242,87442	
3	35	2241,29742	
3	36	2238,34768	
3	37	2233,84074	
3	38	2239,37013	

3	39	2237,31081	
3	40	2238,03609	
3	41	2240,12879	
3	42	2240,4073	38057,239
4	43	2304,22411	
4	44	2477,87402	
4	45	2353,84434	
4	46	2393,64519	
4	47	2454,6908	
4	48	2311,83486	
4	49	2494,87431	
4	50	2323,46959	
4	51	2435,73466	
4	52	2414,43383	
4	53	2338,95942	
4	54	2488,96932	
4	55	2305,38198	
4	56	2468,7897	
4	57	2375,07491	
4	58	2372,20071	
4	59	2466,51459	
4	60	2304,88852	
4	61	2488,22314	
4	62	2339,49099	
4	63	2415,5541	
4	64	2438,05988	
4	65	2320,21882	
4	66	2494,09562	
4	67	2311,55221	
4	68	2454,6669	
4	69	2393,88847	
4	70	2355,79665	
4	71	2479,08372	69576,0354

REACCIONES ITERACIÓN 3			
Anillo	Nº Pilote	F3 (kN)	F3/Anillo (kN)
1	1	2195,14664	
1	2	2194,99816	
1	3	2190,58361	
1	4	2195,72845	
1	5	2191,91544	
1	6	2199,59018	
1	7	2186,11467	
1	8	2198,71243	
1	9	2191,04699	
1	10	2196,91994	
1	11	2189,61967	24130,3762
2	12	2380,26192	
2	13	2375,32441	
2	14	2380,33694	
2	15	2377,75798	
2	16	2377,4392	
2	17	2379,30451	
2	18	2375,9606	
2	19	2381,29935	
2	20	2377,12232	
2	21	2377,81817	
2	22	2380,94335	
2	23	2376,23523	
2	24	2380,8246	
2	25	2374,90849	
2	26	2375,62651	35671,1636
3	27	2352,31467	
3	28	2349,98359	
3	29	2348,87408	
3	30	2350,18449	
3	31	2350,95634	
3	32	2348,50328	
3	33	2349,57889	
3	34	2347,28816	
3	35	2346,79611	
3	36	2349,34082	

3	37	2348,9884	
3	38	2348,89913	
3	39	2348,86489	
3	40	2349,85262	
3	41	2356,34503	
3	42	2351,23446	37598,005
4	43	2274,50357	
4	44	2534,30573	
4	45	2301,59938	
4	46	2482,83065	
4	47	2373,83249	
4	48	2400,40775	
4	49	2460,00177	
4	50	2320,00961	
4	51	2524,85351	
4	52	2275,03034	
4	53	2543,33579	
4	54	2286,31495	
4	55	2507,25057	
4	56	2345,36751	
4	57	2430,73066	
4	58	2431,74049	
4	59	2346,35765	
4	60	2508,69597	
4	61	2285,16773	
4	62	2543,58306	
4	63	2275,0439	
4	64	2525,23281	
4	65	2320,45571	
4	66	2460,38427	
4	67	2400,5886	
4	68	2374,26349	
4	69	2483,28258	
4	70	2299,36447	
4	71	2533,32469	69847,8597

REACCIONES ITERACIÓN 4			
Anillo	Nº Pilote	F3 (kN)	F3/Anillo (kN)
1	1	2204,11388	
1	2	2189,20137	
1	3	2196,5643	
1	4	2192,67925	
1	5	2193,36253	
1	6	2201,84982	
1	7	2182,46049	
1	8	2203,67874	
1	9	2186,08743	
1	10	2203,8611	
1	11	2180,13085	24133,9898
2	12	2386,44445	
2	13	2369,79724	
2	14	2375,11888	
2	15	2378,89847	
2	16	2373,39788	
2	17	2378,77871	
2	18	2374,01834	
2	19	2372,80414	
2	20	2378,3919	
2	21	2374,44374	
2	22	2379,09762	
2	23	2374,20412	
2	24	2375,09795	
2	25	2374,93499	
2	26	2383,22715	35648,6556
3	27	2367,57397	
3	28	2364,95186	
3	29	2360,53699	
3	30	2363,20013	
3	31	2360,28085	
3	32	2360,10625	
3	33	2361,71737	
3	34	2365,05977	
3	35	2359,77332	
3	36	2361,32417	

3	37	2359,18401	
3	38	2363,51913	
3	39	2362,20933	
3	40	2363,27014	
3	41	2364,6009	
3	42	2366,62075	37803,9289
4	43	2189,12723	
4	44	2451,73986	
4	45	2198,55409	
4	46	2429,907	
4	47	2233,84218	
4	48	2390,20683	
4	49	2283,67248	
4	50	2334,55772	
4	51	2337,21837	
4	52	2281,17443	
4	53	2392,19881	
4	54	2232,86493	
4	55	2433,97205	
4	56	2199,47403	
4	57	2455,79517	
4	58	2185,21128	
4	59	2455,96352	
4	60	2199,92891	
4	61	2434,12975	
4	62	2232,34688	
4	63	2392,74293	
4	64	2281,04823	
4	65	2337,4286	
4	66	2334,53108	
4	67	2283,40036	
4	68	2388,82436	
4	69	2234,34928	
4	70	2430,02815	
4	71	2200,82348	
4	72	2452,83257	69687,8946

REACCIONES ITERACIÓN 5			
Anillo	Nº Pilote	F3 (kN)	F3/Anillo (kN)
1	1	2201,64473	
1	2	2186,82098	
1	3	2199,98765	
1	4	2187,68566	
1	5	2198,07907	
1	6	2191,70123	
1	7	2189,21979	
1	8	2198,70016	
1	9	2189,01831	
1	10	2199,65449	
1	11	2185,02273	24127,5348
2	12	2378,60715	
2	13	2379,33038	
2	14	2376,81129	
2	15	2382,77171	
2	16	2377,5643	
2	17	2379,33118	
2	18	2382,82397	
2	19	2379,9	
2	20	2384,74767	
2	21	2377,73595	
2	22	2379,7849	
2	23	2381,7898	
2	24	2375,58105	
2	25	2380,459	
2	26	2377,89459	35695,133
3	27	2347,49718	
3	28	2350,61793	
3	29	2346,15371	
3	30	2344,21137	
3	31	2348,11845	
3	32	2343,63765	
3	33	2342,22703	
3	34	2341,94876	
3	35	2340,94916	
3	36	2347,32189	

3	37	2344,72206	
3	38	2344,64252	
3	39	2350,28727	
3	40	2347,72046	
3	41	2348,91342	
3	42	2348,86059	37537,8294
4	43	2109,51365	
4	44	2397,9837	
4	45	2112,79072	
4	46	2391,0271	
4	47	2119,11577	
4	48	2380,73306	
4	49	2136,18436	
4	50	2365,43814	
4	51	2155,52251	
4	52	2342,60789	
4	53	2176,77454	
4	54	2318,78664	
4	55	2205,26304	
4	56	2292,14492	
4	57	2233,17315	
4	58	2263,44168	
4	59	2263,07122	
4	60	2234,75389	
4	61	2291,39988	
4	62	2203,55575	
4	63	2316,95547	
4	64	2179,39382	
4	65	2343,80106	
4	66	2156,18052	
4	67	2363,89911	
4	68	2133,75392	
4	69	2379,75535	
4	70	2121,48187	
4	71	2391,83551	
4	72	2112,03021	
4	73	2397,26889	69889,6373