

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2019

MEMORIA DEL PROYECTO Nº 24

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Nuevo diseño de tapas de registro adaptadas a los premarcos existentes considerando criterios resistentes y la normativa vigente

Investigador/a/es responsable/es: Francisco José Suárez Domínguez

Tfno: 985 182655

E-mail: paco@constru.uniovi.es

Otros investigadores: José Luis Suárez Sierra

Empresas o instituciones colaboradoras: Empresa Municipal de Aguas de Gijón S.A.

2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

2.1 Resumen ejecutivo

El resumen ejecutivo del Proyecto debe ser una síntesis clara y concisa del trabajo realizado, describiendo brevemente los motivos que justifican su realización, los beneficiarios, los objetivos específicos y su grado de consecución, la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

Extensión: un máximo de 4000 caracteres, incluidos espacios.

Este proyecto llevará a cabo una investigación sobre el diseño de tapas de registro para la Empresa Municipal de Aguas del Ayuntamiento de Gijón. En el proyecto se abordará la problemática actual de estas tapas que radica principalmente en la sustracción ilegal de las mismas. En el año 2017, la EMA estimó el valor solamente del material robado en más de 12:000 €, aunque para la empresa las pérdidas suponen un valor más elevado. Las tapas de registro son de material metálico y pueden llegar a adquirir gran valor en el mercado negro debido a su elevado peso. Algunas tapas alcanzan los 25 kg, y el valor de la chatarra fluctúa entre un cuarto y un tercio del valor del acero nuevo. Esta problemática, además de las pérdidas económicas que supone para la empresa, plantea otros riesgos importantes como por ejemplo la peligrosidad inherente a tener un registro sin tapa de manera descontrolada. La falta de las tapas de registro suponen un peligro tanto para los peatones como para los vehículos.

En este proyecto se persigue abordar una investigación en la que se diseñen nuevas tapas de registro cuyo comportamiento mecánico cumpla la normativa vigente y que, además, por su diseño, evite la problemática de sustracción. Para ello, se realizarán varios diseños que se calcularán aplicando la normativa vigente dependiendo de la localización de los registros. Concretamente, este proyecto se centrará en el Ayuntamiento de Gijón, aprovechando los pre-marcos disponibles y combinando diseño y materiales para alcanzar una solución eficiente.

La metodología de desarrollar para alcanzar los objetivos del proyecto se basa fundamentalmente en el siguiente proceso: En primer lugar, será necesaria una revisión de la normativa vigente, del estado de la técnica y de la problemática a resolver. Posteriormente, se plantearán los nuevos diseños con herramientas

paramétricas de CAD. Y una vez realizados los diseños, se emplearán herramientas de cálculo avanzadas para determinar el comportamiento mecánico de las tapas diseñadas. Los resultados del proyecto se obtendrán combinando nuevos diseños para las tapas de registro, con el uso de materiales compuestos que sustituyan el material actualmente objeto de sustracción. Finalmente, el resultado del proyecto será calculado considerando la normativa vigente.

La contribución de los resultados de este proyecto supone un beneficio directo muy significativo para la EMA, puesto que las pérdidas anuales aumentan cada año. Así como para el Ayuntamiento de Gijón y sus ciudadanos que se beneficiarán de una mayor seguridad vial y peatonal, aspecto verdaderamente relevante en las zonas más afectadas (Tremañes y Somonte).

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Este proyecto de investigación persigue diseñar y calcular nuevas tapas de registro que solucionen la problemática de los robos, que mejoren la seguridad de los ciudadanos, que sean una solución eficiente en términos de vida útil y sostenibilidad y que además, desempeñen las mismas funciones que las tapas actuales cumpliendo la normativa vigente.

El estudio de las tapas de registro que trata este trabajo se centra en primer lugar en la realización de un cálculo analítico de las tapas de registro considerándolas elementos placa. Este estudio aplicando la metodología clásica permite obtener, de manera aproximada, el estado tensional de las tapas considerando las dimensiones geométricas de cada una de ellas y las propiedades de los diferentes materiales. Este procedimiento de cálculo realiza ciertas aproximaciones que, aunque los resultados no son exactos, nos permite realizar estimaciones rápidas en base a similitudes con elementos más sencillos como son las vigas.

Existen numerosos trabajos realizados por referentes como Kirchhoff, Euler, Poisson, entre otros, en los que el análisis del estado tensión-deformación de las placas es llevado a cabo mediante procedimientos analíticos. Es decir, mediante la aplicación de fórmulas que permitan definir un estado de tensiones y deformaciones que represente de la forma más aproximada el comportamiento real de las placas a estudiar.

A partir del cálculo analítico que permitirá predimensionar las tapas de registro, se realizó un análisis empleando elementos finitos de las tapas de registro. En este caso, las tapas también se consideraron elementos tipo placa. De esta manera, se puede extraer el estado de tensión y deformación de las tapas de registro de una manera mucho más precisa.

A través de los resultados obtenidos mediante el cálculo analítico se utilizaron para validar los modelos de elementos finitos y así continuar realizando otra simulación numérica mediante elementos finitos de los ensayos a realizar según la norma. A partir de esto, se desarrolló una herramienta muy eficaz para la simulación y análisis de distintas geometrías y materiales.

2.3 Tareas realizadas

Las tareas realizadas en este proyecto son las siguientes:

En primer lugar, se realizó una revisión del estado de la técnica basado en bibliografía y en la normativa vigente.

En segundo lugar, se realizó un estudio analítico que permitió realizar un cálculo aproximado de las tapas de registro, así como un prediseño de las tapas.

En tercer lugar, se realizaron simulaciones numéricas de las tapas estudiadas siguiendo la normativa vigente hasta conseguir un diseño óptimo capaz de cumplir las especificaciones de la norma.

Ambos estudios, el analítico y el numérico, se realizan para tres geometrías diferentes de tapas de registro y varios materiales. En cada una de ellas, se obtiene la clase especificada teniendo en cuenta la Normativa actual.

2.4 Resultados obtenidos

2.4.1. Estado del arte

El estudio correspondiente a esta beca surge a partir de un Proyecto de Investigación llevado a cabo por la Empresa Municipal de Aguas de Gijón (EMA), en el cual se trata de desarrollar nuevos modelos de tapas de registro de alcantarillado apostando por el empleo de materiales alternativos al acero.

La Empresa Municipal de Aguas de Gijón es una sociedad anónima de propiedad municipal que se encarga de la gestión directa de los servicios relativos a la gestión del ciclo integral del agua en el municipio de Gijón y sus parroquias rurales (captación, potabilización y abastecimiento del agua potable, así como mantenimiento, limpieza y reparación de las instalaciones de alcantarillado, saneamiento y depuración de aguas), además de la concesión y establecimiento de acometidas para dicho servicio.

Las tapas de registro actuales son de acero y pueden llegar a adquirir gran valor en el mercado de segunda mano dado que el precio de la chatarra fluctúa entre un cuarto y un tercio del valor del acero nuevo.

La necesidad de utilizar otro tipo de componentes nace como solución al creciente aumento de robos de este tipo de tapas, lo que supone para la empresa grandes pérdidas económicas, así como la problemática añadida debido al riesgo existente, tanto para peatones como para vehículos, al haber registros sin tapas de forma descontrolada.

Ante la creciente acometida de hurtos, se manifiesta la necesidad de optar por nuevos materiales que presenten unas características mecánicas similares a las del acero y, además, cuyo valor en el mercado sea mínimo y/o nulo.

Actualmente la mayor parte de las tapas de alcantarillado están fabricadas en acero de fundición lo que les convierte en un blanco suculento para muchos, pues son fácilmente extraíbles, a pesar de que muchas pueden ser de gran tamaño y peso.

Las geometrías más comunes son la circular, cuadrada y rectangular pudiendo existir variantes en cuanto a dimensiones, pesos, acabados, modos de anclaje (atornilladas, con bisagras...)



Distintos formatos de tapas de registro

Lejos de la realidad, este problema no se cierne únicamente en la localidad de Gijón, sino que se extiende por otras localidades asturianas como Oviedo o Avilés entre otras, así como en otras provincias como Madrid, Valencia o Extremadura ya se han detectado numerosos casos.

Tipología de tapas de registro y clasificación según normativa

La norma UNE EN 124 está dividida en una serie de partes:

- Parte 1 (Norma UNE-EN 124-1:2015): Definiciones, clasificación, principios generales de diseño, requisitos de comportamiento y métodos de ensayo.
- Parte 2 (Norma UNE-EN 124-2:2015): Dispositivos de fundición.
- Parte 3 (Norma UNE-EN 124-3:2015): Dispositivos de acero o aleación de aluminio.
- Parte 4 (Norma UNE-EN 124-4:2015): Dispositivos de hormigón armado.
- Parte 5 (Norma UNE-EN 124-5:2015): Dispositivos de materiales compuestos.
- Parte 6 (Norma UNE-EN 124-6:2015): Dispositivos de Polipropileno (PP), Polietileno (PE) o policloruro de vinilo no plastificado (PVC-U).

Esta serie de normas van acompañadas de otras normas para su consulta.

- Norma EN 206:2013, Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad.
- Norma ISO 868, Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (Dureza Shore).
- Norma EN ISO 7500-1:2014, Materiales metálicos. Verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo de tracción/compresión. Verificación y calibración del sistema de medida de fuerza.

La Norma UNE EN 124-1:2015 solo es aplicable a dispositivos con una cota de paso (CP) hasta e inclusive 1000 mm. La parte 1 solo es aplicable junto, con al menos, una de las otras partes ya que como la parte 1 solo se refiere a definiciones, clasificaciones y demás principios ha de estar junto con una de las otras partes que se refieren a los materiales con los que están fabricados los dispositivos de cierre.

No se aplica a rejillas como parte de canales de drenaje prefabricados, sumideros de suelo y de tejado para edificios ni a bocas de llave.

Todas las tapas de registro han de cumplir con la norma UNE EN 124-1:2015 (*Dispositivos de cubrimiento y de cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos.*) en la que se establece una primera agrupación en el contexto del **uso al que están destinadas**.

- Grupo 1: Áreas para peatones y ciclistas.
- Grupo 2: Áreas peatonales y de estacionamiento (de uno o varios pisos) de vehículos.
- Grupo 3: Áreas de cunetas de los arcenes de carretera.
- Grupo 4: Calzadas de carreteras y áreas de aparcamiento para todo tipo de vehículos.
- Grupo 5: Áreas por las que circulan vehículos de gran tonelaje.
- Grupo 6: Áreas por las que particularmente circulan vehículos de gran tonelaje (pavimentos de aeropuertos)

Una segunda clasificación reside en la **capacidad de soporte de carga** (carga de ensayo).

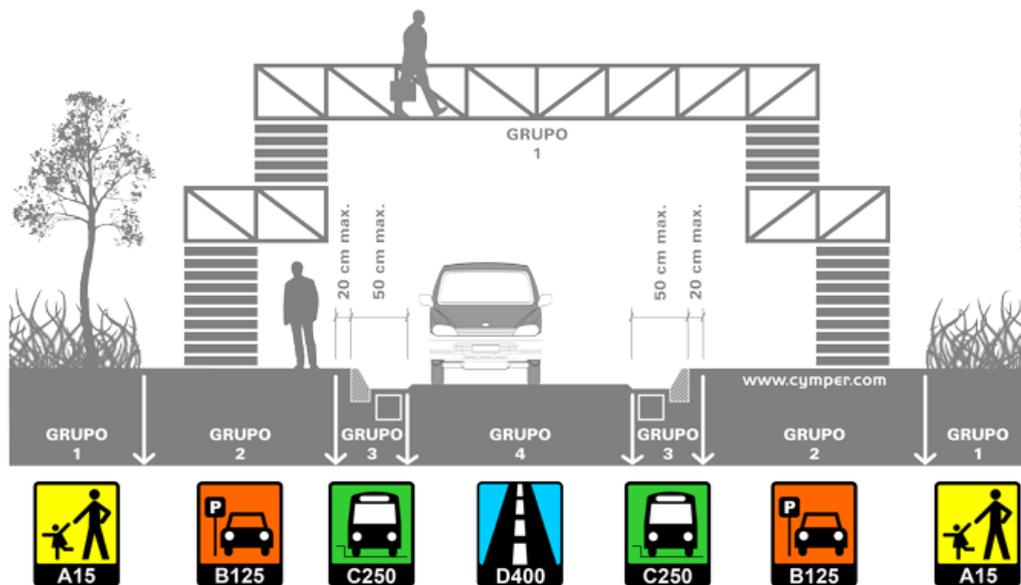
Para dispositivos de recubrimiento con una cota de paso (CP) igual o mayor a 250 mm deben de soportar una carga de acuerdo con la tabla para cada clase independientemente del material. Aquellos cuya cota de paso sea inferior al valor dado, la capacidad de carga deberá ser el valor recogido en la tabla multiplicado por CP/250, pero no debe ser menor que 0,6 veces la carga de ensayo de acuerdo con la tabla.

Se entiende por *cota de paso* (CP) al diámetro del círculo mayor que puede inscribirse en la abertura libre del marco.

| CLASE | A15 | B125 | C250 | D400 | E600 | F900 |
|------------|-----|------|------|------|------|------|
| CARGA (KN) | 15 | 125 | 250 | 400 | 600 | 900 |

Las dos agrupaciones mencionadas guardan una relación entre sí, ya que en función del lugar de instalación van a tener que soportar una u otra carga. Por tanto:

- Grupo 1: al menos Clase A15
- Grupo 2: al menos Clase B125
- Grupo 3: al menos Clase C250
- Grupo 4: al menos Clase D400
- Grupo 5: al menos Clase E600
- Grupo 6: al menos Clase F900



En cuanto a la flecha residual, es decir, la deformación máxima admisible tras la aplicación de la carga en el punto medio de la tapa, considerando el aseguramiento de la tapa de registro por su propio peso, se ha de cumplir:

| Clase | Flecha admisible (mm) |
|--------------|-----------------------|
| A 15 Y B 125 | CP/100 (a) |

| C 250 hasta F 900 | CP/300 (b) | CP/500 (c) |
|---|---------------------------------------|---|
| | Cuando se asegure con dispositivos | Cuando se asegure por su propio peso |
| (a) CP/50 para CP<450 mm con un valor máximo de 6,5mm | | |
| (b) 1,0 mm máximo cuando CP<300 mm | | |
| (c) 1,0 mm máximo cuando CP<500 mm | | |

En este trabajo se estudian tres materiales diferentes para las tapas de registro. El acero, como material convencional y habitualmente utilizado para la fabricación de estas tapas, el hormigón convencional y el hormigón ligero. Además también se estudiará una combinación de materiales como alternativas factibles a las tapas de registro de acero.

Materiales

ACERO

Según la norma UNE-EN 10020:2001, se define el acero como material en el que el hierro es el elemento predominante, el contenido en carbono es, generalmente, inferior al 2% y contiene además otros elementos.

El límite superior del 2% en el contenido de carbono (C) es el límite que separa al acero de la fundición. En general, un aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, pero como contrapartida incrementa su fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

A través de la fundición dúctil del acero se consigue una notable cantidad de propiedades mecánicas (elasticidad, resistencia, alargamiento...)

La peculiaridad más apreciada de dicha fundición es el elevado grado de deformación a que puede someterse el material antes de romper (la ductilidad) y la buena resistencia a tracción, además de su resistencia frente a golpes.

Este conjunto de características permite afirmar que la fundición dúctil de hierro fundido es el material más adecuado para tapas de alcantarilla y rejillas.

HORMIGÓN

El hormigón es un material compuesto formado esencialmente por un aglomerante (en la mayoría de las ocasiones cemento) al que se le añade partículas o fragmentos de un agregado (áridos de tamaño máximo

limitado) que cumplen ciertas condiciones respecto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas además de agua.

Una primera clasificación según la EHE (Instrucción Española de Hormigón Estructural) de este material es en función de su aplicación, de ahí se diferencian dos tipos:

Hormigón no estructural: aquellos que no se comprometen con la responsabilidad estructural de la construcción, pero sí aportan el volumen necesario para conformar la estructura o ayudan a mejorar su durabilidad.

Hormigón estructural: se emplea habitualmente para la ejecución de cualquier tipo de estructura, bien sea en obra civil o de edificación.

Los hormigones estructurales se clasifican según su densidad en:

- Ligeros: de 1.200 a 2.000 kg/m³
- Normales: de 2.000 a 2.800 kg/m³
- Pesados: más de 2.800 kg/m³

COMBINACIÓN DE MATERIALES

También cabe la posibilidad de hacer una combinación de dos o más materiales. La principal idea que se tiene para este estudio es realizar una tapa constituida por un núcleo de acero recubierto por otro material como el mortero o algún tipo de plástico como el polietileno.

Lo que se trata de hacer al añadir un núcleo de acero es aumentar la resistencia de la tapa de registro haciendo que soporte una mayor carga reduciendo por tanto la flecha y siempre tratando que su peso no sea muy elevado.

Se realizará la combinación entre un núcleo de acero y un recubrimiento de hormigón puesto que es una combinación relativamente fácil de realizar y barata.

En la siguiente tabla se recogen las propiedades necesarias para llevar a cabo este trabajo.

Algunos de los valores utilizados se muestran en la siguiente tabla:

| | ACERO | HORMIGÓN | H. LIGERO |
|-------------|----------|----------|-----------|
| E (Mpa) | 2,00E+05 | 30000 | 21600 |
| t (mm) | 15 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,3 | 0,18 | 0,18 |

Donde:

- (E): Módulo de Young
- (t): Espesor
- (V): Coeficiente de Poisson

2.4.2. Geometrías estudiadas

Además de los diferentes materiales, se estudian varias geometrías para las tapas de registro: cuadrada, circular y rectangular.

Las dimensiones de cada una de ellas son las siguientes:

CUADRADA

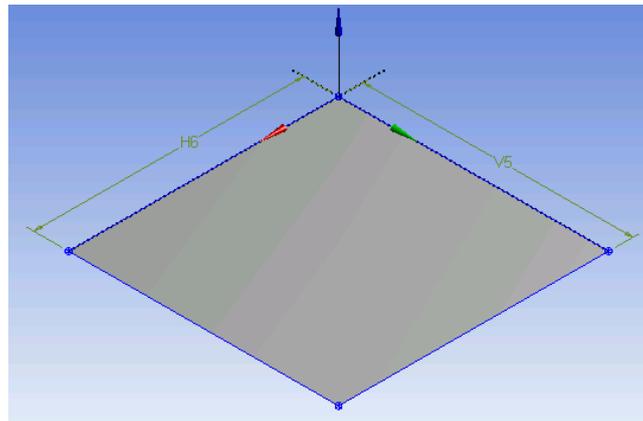
l_x (mm) 580

l_y (mm) 580

CP (mm) 580

Dimensions: 2

| | |
|-----------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> H6 | 580 mm |
| <input type="checkbox"/> V5 | 580 mm |



RECTANGULAR

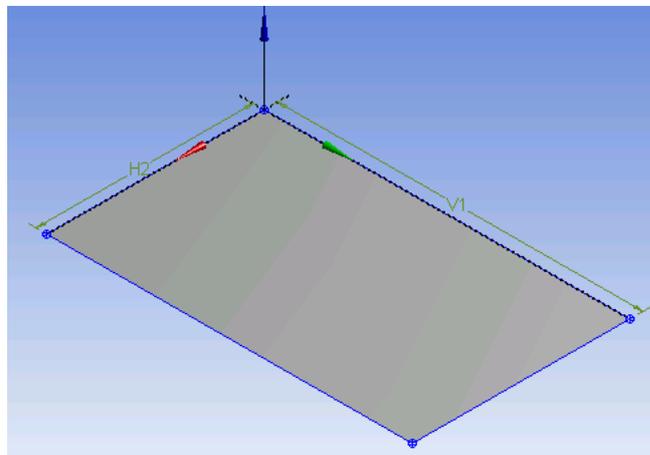
l_x (mm) 740

l_y (mm) 440

CP (mm) 440

Dimensions: 2

| | |
|-----------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> H2 | 440 mm |
| <input type="checkbox"/> V1 | 740 mm |

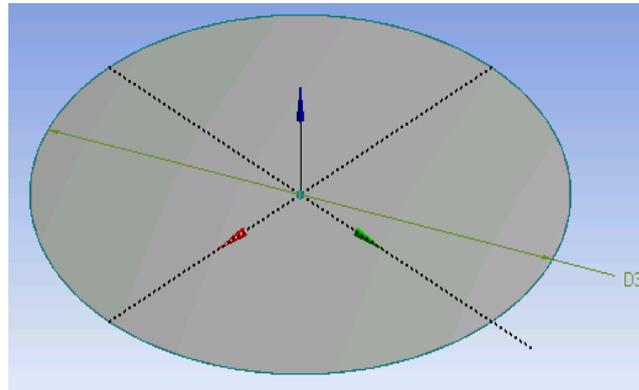


CIRCULAR

I_x (mm) 670
 I_y (mm) 670
 CP (mm) 670

Dimensions: 1

| | |
|----|--------|
| D3 | 670 mm |
|----|--------|



2.4.3. Clasificación de tapas según la normativa vigente

Se aborda el estudio de la clasificación de las tapas estudiadas en función de su clase. La clase a la que pertenecen viene especificada por la norma UNE EN 124-1:2015.

Como se explicó al inicio de este trabajo, las tapas de registro tienen un sistema de clasificación doble, en función del lugar de instalación y según la carga que éstas sean capaces de soportar.

Se define totalmente la clase a la que pertenece una tapa de registro cuando, tras el estudio de su comportamiento, tanto analítica como numéricamente, la tapa cumple con los criterios de flecha máxima residual admisible y tensión máxima admisible según la geometría y el material con el que ha sido fabricada. Si alguno de estos dos criterios no se cumple, se dice que la tapa de registro no cumple con la clase en cuestión tras la aplicación de la carga correspondiente a dicha clase.

El valor de la flecha se obtiene tras la realización del ensayo de flecha residual. De acuerdo con el *anexo A* de la Norma UNE EN 124-1:2015 después de la aplicación de $F_p = 2/3 F_T$ sin carga previa.

Por tanto, se tiene:

| Carga (kN) | Clase A | Clase B | Clase C | Clase D | Clase E | Clase F |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Hasta rotura | 15 | 125 | 250 | 400 | 600 | 900 |
| Hasta flecha | 10 | 83 | 166 | 266 | 400 | 600 |

A continuación, se muestran dos tablas en la que se establecen, de forma general para cualquier tapa a estudiar, los valores de flecha máxima admisible según la clase y los valores de tensión máxima admisible en función del material con el que se esté trabajando.

Valor máximo de flecha:

| | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D | CLASE E | CLASE F |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| P (N) | 10000 | 83000 | 166000 | 266000 | 400000 | 600000 |

| | | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|--------|--------|--------|--------|
| Flecha máx. (mm) CP<500 | 6,5 | 6,5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Flecha máx. (mm) CP>=500 | 6,5 | 6,5 | CP/500 | CP/500 | CP/500 | CP/500 |

Valor máximo de tensión:

| ACERO | HORMIGÓN | HORMIGÓN + ACERO |
|---------|----------|------------------|
| 275 MPa | 5 MPa | 5 MPa |

2.4.4. Estudio analítico

En este trabajo se realiza un estudio estructural de las tapas de registro considerando dichos elementos como una placa. El comportamiento de las tapas se corresponde, por tanto, con el de una placa, entendiendo por placa al elemento estructural plano en el que una de sus dimensiones, en este caso el espesor, es considerablemente menor que las otras dos.

Por otro lado, se define como estado de placa al sistema de cargas en el que solo actúan fuerzas exteriores normales al plano medio, definido este como aquel plano que equidista de las dos caras con mayores dimensiones, y momentos contenidos en planos perpendiculares al mismo.

Las placas presentan una estructura tridimensional, y así deberían estudiarse, sin embargo, si se considera que la variación de las variables a lo largo del espesor se mantiene invariable en el plano medio de la placa, esta podría analizarse como si se tratase de un elemento bidimensional. En este caso, el estudio se haría sobre dicho plano medio obteniendo una solución compatible para todo el sólido.

Las placas se pueden clasificar según su espesor y según sus características elasto-mecánicas.

Según su espesor se distinguen:

- Placas delgadas: el espesor es menor que la quinta parte de la menor de sus otras dos dimensiones.
- Placas gruesas: es espesor es mayor que la quinta parte de la menor de sus otras dimensiones.

Según sus características elasto-mecánicas se tiene:

- Isótropas: las características no dependen de la dirección
- Anisótropas: las características dependen de la dirección
- Ortótropas: las características dependen de la dirección presentando dos direcciones ortogonales principales.

En este trabajo, las tapas de registro se consideran como tapas delgadas e isótropas. Además, en el cálculo de placas se asumen una serie de consideraciones que facilitan la resolución de las ecuaciones y que se conocen con el nombre de hipótesis de Kirchhoff.

Estas consideraciones son:

- Material elástico-lineal
- Espesor mucho menor que las otras dos direcciones

- Se asumen pequeñas deformaciones y por tanto la flecha será pequeña en comparación con el espesor. También serán pequeños los giros del plano medio y se considerarán despreciables frente la unidad.
- Los puntos situados en el plano medio solo tienen movimientos perpendiculares a dicho plano
- Los puntos situados en una perpendicular al plano medio antes de la deformación permanecen invariables tras ella.
- La placa es incompresible a lo largo del espesor y las tensiones normales en dirección perpendicular a la placa se consideran despreciables

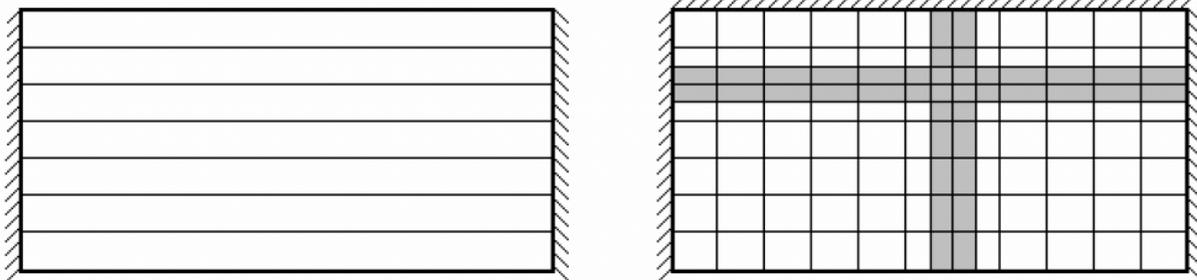
En el caso de que no se cumpliera la segunda hipótesis, se estaría hablando de placas gruesas siendo necesario estudiarlas bajo la hipótesis de Reissner (1945)- Mindlin (1951).

Así mismo, a la hora de realizar el análisis de placas se pueden plantear dos supuestos.

Si consideramos la *placa rectangular* sustentada, apoyada o empotrada en dos bordes opuestos, pero con otros dos libres o si, por el contrario, dichos bordes tuviesen restringido su movimiento.

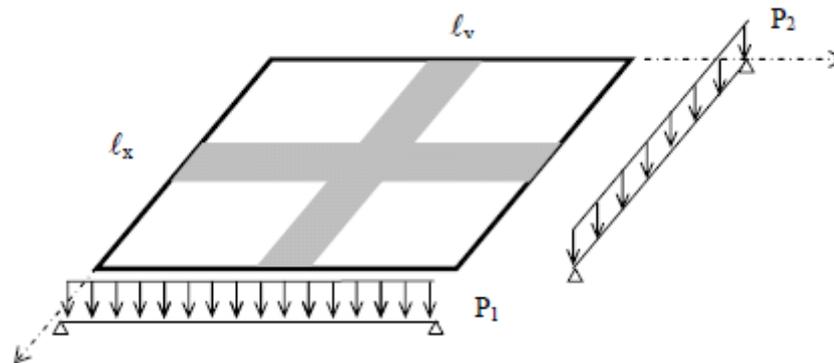
En el primer caso, para el estudio del comportamiento podríamos asimilar la estructura placa a una sola viga equivalente, pero con una rigidez mayor.

Sin embargo, si se tratase del segundo supuesto, el comportamiento se podría comparar al de dos vigas ortogonales entre sí, donde la compatibilidad de las deformaciones exige que en los puntos comunes a ambas actúen unas fuerzas dirigidas en sentido contrario que igualen los movimientos. Esto es equivalente a suponer que la carga está soportada en parte por cada una de las vigas en ambas direcciones. Por lo tanto, las tensiones y deformaciones serán menores en cada una de ellas.



Supuestos de restricciones en los bordes de las placas para el análisis de las mismas.

Siguiendo con el segundo supuesto, que es el que concierne en este estudio, si asumimos el comportamiento al de dos vigas ortogonales sobre las que actúa una carga y compatibilizando flechas según el método de Grashof.



Consideraciones aplicadas en el cálculo analítico de las placas rectangulares

El valor de flecha se obtiene tras resolver el siguiente cálculo que es función del coeficiente de rigidez, de la carga y de las dimensiones de la tapa de registro.

$$(w)_{\frac{l_x}{2}} = (w)_{\frac{l_y}{2}} = \frac{5}{384} \frac{P_1 l_x^4}{D_x} = \frac{5}{384} \frac{P_2 l_y^4}{D_y}$$

Ecuación 1: Cálculo de flecha máxima para tapas cuadradas y rectangulares

El coeficiente D es la rigidez a flexión de la placa y caracteriza a las placas desde el punto de vista resistente. Esta rigidez, viene determinada por el módulo elástico del material, el coeficiente de Poisson y el espesor de la chapa.

Así, para el cálculo del coeficiente de rigidez se aplica la fórmula que sigue:

$$D_x = D_y = EI(1 - \nu^2) = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Ecuación 2: Fórmula para el cálculo del coeficiente de rigidez

Entendiendo por fuerza superficial (p) a la fuerza aplicada por unidad de superficie, será necesario multiplicar dicha fuerza por el parámetro (K) para obtener el valor de fuerza superficial con el que se calculará la flecha máxima admisible de las tapas de registro.

$$P_1 = K p \quad P_2 = \rho p$$

Ecuación 3: Fórmula para el cálculo de la fuerza superficial

Donde (k) y (ρ) pueden adoptar diferentes valores en función del tipo de placa.

Según la consideración de *placa rectangular*:

$$\kappa = \frac{l_y^4}{l_x^4 + l_y^4} \quad \rho = 1 - \kappa$$

Ecuación 4: Variables adimensionales para cálculo de la flecha residual máxima

Para el caso de la *tapa cuadrada*, ambas variables presentan el mismo valor: 0,5 pues $l_x = l_y$.

El valor del momento máximo que permite calcular el valor límite de tensión admisible se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$M = \psi_2 \frac{p}{12} l^2$$

Ecuación 5: Fórmula para el cálculo del momento máximo

Donde (l) es la mayor dimensión de la tapa de registro y (ψ_2) es una constante obtenida mediante la tabla que se muestra a continuación

Así el valor de tensión admisible se obtiene empleando la expresión que se muestra a continuación

$$\sigma = 6 \frac{M}{h^2}$$

Ecuación 6: Fórmula para el cálculo de la tensión máxima en tapas cuadradas y rectangulares

Donde (h) es el espesor de la placa a estudio.

En el caso de las *tapas de registro circulares*, la fórmula a partir de la cual se obtiene el valore de la flecha residual admisible varía, siendo:

$$w = \frac{p}{64D} r^4$$

Ecuación 7: Fórmula para el cálculo de la flecha máxima admisible en tapas de registro circulares

Siendo (p) la carga superficial que actúa sobre la tapa y (r) el radio de la misma.

El valor de máxima tensión admisible se tiene, en este caso, con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{3}{4} \frac{p}{h^2} r^2$$

Ecuación 8: Fórmula para el cálculo de la tensión máxima en tapas de registro circulares

Así pues, en el análisis estructural es interesante disponer de cálculos rápidos y fiables que permitan obtener soluciones aproximadas que, aunque no exactas, muchas veces son suficientes para identificar si determinadas configuraciones son viables o si, por el contrario, su respuesta estructural se encuentra muy lejos de la deseada.

2.4.4.1. Resultados del cálculo analítico

En ellos se identifica, en función del valor de flecha obtenido y según la tensión máxima admisible, la clasificación de las diferentes tapas para las diferentes geometrías y materiales.

Se establece la clase a la que pertenece cada tapa de registro *sí y solo sí ambos criterios se cumplen*.

Como se ha visto en el punto anterior, una de las variables que influyen en el cálculo de la flecha es la rigidez, (D) y esta a su vez es función del módulo de Young y del coeficiente de Poisson.

- Para el acero: $D=61813186,81(\text{N}\cdot\text{mm})$

- Para el hormigón: $D= 322964034,7(N \cdot mm)$
- Para el hormigón ligero: $D=232534105 (N \cdot mm)$

A continuación, se muestran las tablas correspondientes a cada una de las geometrías y con cada uno de los materiales con los que se han estudiado las tapas de registro.

ACERO

En primer lugar, se calcula, en base a las propiedades mecánicas del material y la geometría de las tapas de registro, la flecha máxima alcanzada tras la aplicación de las cargas mínimas correspondientes a cada clase y se compara con el valor máximo admisible

| ACERO CUADRADA | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| E (MPa) | 2,00E+05 | 2,00E+05 | 2,00E+05 | 2,00E+05 |
| t (mm) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| v (Poisson) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Dx = Dy (N·mm) | 61813186,81 | 61813186,81 | 61813186,81 | 61813186,81 |
| lx (mm) | 580 | 580 | 580 | 580 |
| ly (mm) | 580 | 580 | 580 | 580 |
| k | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| ρ | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas de la tapa de acero cuadrada

Los valores de flecha obtenidos tras aplicar las *ecuaciones Ecuación 1 y Ecuación 3* son los que a continuación se muestran

| | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| q (N/mm ²) | 0,01 | 0,02 | 0,12 | 0,25 |
| flecha (mm) | 0,32 | 0,35 | 2,94 | 5,88 |
| FLECHA MAX (mm) | 5,8 | 5,8 | 1,16 | 1,16 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima admisible para tapa de acero cuadrada

Finalmente se calcula el valor de tensión máximo al que se encuentran sometidas las tapas de registro, empleando las *Ecuación 5 y Ecuación 6* una vez que ha sido aplicada la carga

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Tensión max (MPa) | 9,98 | 11,09 | 90,69 | 173,64 |
| Tensión adm (MPa) | 275 | 275 | 275 | 275 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima admisible para tapa de acero cuadrada

Este mismo procedimiento se lleva a cabo para cada una de las tapas de registro estudiadas.

| ACERO CIRCULAR | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| E (MPa) | 2,00E+05 | 2,00E+05 | 2,00E+05 | 2,00E+05 |
| t (mm) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| v (Poisson) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Dx = Dy (N·mm) | 61813186,81 | 61813186,81 | 61813186,81 | 61813186,81 |
| r(mm) | 335 | 335 | 335 | 335 |
| CP | 670 | 670 | 670 | 670 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas de la tapa de registro circular de acero

| | | | | |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| q (N/mm ²) | 0,03 | 0,03 | 0,24 | 0,47 |
| flecha (mm) | 0,08 | 0,09 | 0,75 | 1,50 |
| FLECHA MAX (mm) | 6,7 | 6,7 | 1,34 | 1,34 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro circular de acero

| | | | | |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Tensión max (MPa) | 9,55 | 10,61 | 88,07 | 176,13 |
| Tensión adm (MPa) | 275 | 275 | 275 | 275 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro circular de acero

| ACERO RECTANG. | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| E (MPa) | 2,00E+05 | 2,00E+05 | 2,00E+05 | 2,00E+05 |
| t (mm) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| v (Poisson) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Dx=Dy (N·mm) | 61813186,81 | 61813186,81 | 61813186,81 | 61813186,81 |
| lx (mm) | 740 | 740 | 740 | 740 |
| ly (mm) | 440 | 440 | 440 | 440 |
| k | 0,111105156 | 0,111105156 | 0,111105156 | 0,111105156 |
| ρ | 0,888894844 | 0,888894844 | 0,888894844 | 0,888894844 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas de la tapa de registro rectangular de acero

| | | | | |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| q (N/mm ²) | 0,003 | 0,003 | 0,03 | 0,06 |
| flecha (mm) | 0,20 | 0,22 | 1,79 | 3,58 |
| FLECHA MAX (mm) | 6,5 | 6,5 | 1 | 1 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro rectangular de acero

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tensión max (MPa) | 235,80 | 261,96 | 2154,65 | 4235,67 |
| Tensión adm (MPa) | 275 | 275 | 275 | 275 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro rectangular de acero

HORMIGÓN

| HORMIG. CUADR. | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| E (MPa) | 3,00E+04 | 3,00E+04 | 3,00E+04 | 3,00E+04 |
| t (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Dx = Dy (N·mm) | 322964034,7 | 322964034,7 | 322964034,7 | 322964034,7 |
| lx (mm) | 580 | 580 | 580 | 580 |
| ly (mm) | 580 | 580 | 580 | 580 |
| k | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| ρ | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas de la tapa de registro de hormigón cuadrada

| | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| q (N/mm²) | 0,013 | 0,015 | 0,123 | 0,247 |
| flecha (mm) | 0,06 | 0,07 | 0,56 | 1,13 |
| FLECHA MAX (mm) | 5,8 | 5,8 | 1,16 | 1,16 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para la tapa de registro de hormigón cuadrada

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tensión max (MPa) | 0,90 | 1,00 | 8,30 | 16,57 |
| Tensión adm (MPa) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para la tapa de hormigón cuadrada

| HORMIG. CIRCULAR | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| E (MPa) | 3,00E+04 | 3,00E+04 | 3,00E+04 | 3,00E+04 |
| t (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| D (N·mm) | 322964034,7 | 322964034,7 | 322964034,7 | 322964034,7 |
| r(mm) | 335 | 335 | 335 | 335 |
| CP (mm) | 670 | 670 | 670 | 670 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas de la tapa de registro de hormigón circular

| | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| q (N/mm²) | 0,03 | 0,03 | 0,24 | 0,47 |
| flecha (mm) | 0,02 | 0,017 | 0,14 | 0,29 |
| FLECHA MAX (mm) | 6,7 | 6,7 | 1,34 | 1,34 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro de hormigón circular

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tensión max (MPa) | 0,86 | 0,96 | 7,93 | 15,85 |
| Tensión adm (MPa) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro de hormigón circular

| HORMIG. RECTANG. | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| E (MPa) | 3,00E+04 | 3,00E+04 | 3,00E+04 | 3,00E+04 |
| t (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Dx=Dy (N·mm) | 322964034,7 | 322964034,7 | 322964034,7 | 322964034,7 |
| lx (mm) | 740 | 740 | 740 | 740 |
| ly (mm) | 440 | 440 | 440 | 440 |
| k | 0,111105156 | 0,111105156 | 0,111105156 | 0,111105156 |
| ρ | 0,888894844 | 0,888894844 | 0,888894844 | 0,888894844 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas de la tapa de registro de hormigón rectangular

| | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| q (N/mm²) | 0,003 | 0,003 | 0,028 | 0,057 |
| flecha (mm) | 0,04 | 0,04 | 0,34 | 0,69 |
| FLECHA MAX (mm) | 6,5 | 6,5 | 1 | 1 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro de hormigón rectangular

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| Tensión max (MPa) | 0,34 | 0,38 | 3,10 | 6,20 |
| Tensión adm (MPa) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro de hormigón rectangular

HORMIGÓN LIGERO ESTRUCTURAL

| HLE CUADRADA | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| E (MPa) | 2,16E+04 | 2,16E+04 | 2,16E+04 | 2,16E+04 |
| t (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Dx = Dy (N·mm) | 232534105 | 232534105 | 232534105 | 232534105 |
| lx (mm) | 580 | 580 | 580 | 580 |
| ly (mm) | 580 | 580 | 580 | 580 |
| k | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| ρ | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas para tapa de registro de HLE cuadrada

| | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| q (N/mm²) | 0,013376932 | 0,014863258 | 0,123365042 | 0,246730083 |
| flecha (mm) | 0,084765792 | 0,094184213 | 0,781728968 | 1,563457935 |
| FLECHA MAX (mm) | 5,8 | 5,8 | 1,16 | 1,16 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro de HLE cuadrada

| | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| tensión max (MPa) | 0,899867154 | 0,999835995 | 8,28870424 | 16,55484175 |
| tensión adm (MPa) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro de HLE cuadrada

| HLE RECTANG. | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| E (MPa) | 2,16E+04 | 2,16E+04 | 2,16E+04 | 2,16E+04 |
| t (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Dx=Dy (N·mm) | 232534105 | 232534105 | 232534105 | 232534105 |
| lx (mm) | 740 | 740 | 740 | 740 |
| ly (mm) | 440 | 440 | 440 | 440 |
| k | 0,111105156 | 0,111105156 | 0,111105156 | 0,111105156 |
| ρ | 0,888894844 | 0,888894844 | 0,888894844 | 0,888894844 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas para tapa de registro de HLE rectangular

| | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| q (N/mm²) | 0,003071088 | 0,003412321 | 0,02832226 | 0,056644521 |
| flecha (mm) | 0,051566936 | 0,057296596 | 0,475561744 | 0,951123487 |
| FLECHA MAX (mm) | 6,5 | 6,5 | 1 | 1 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro de HLE rectangular

| | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| tensión max (MPa) | 0,336315408 | 0,373680059 | 3,099285565 | 6,193436381 |
| tensión adm (MPa) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro de HLE rectangular

| HLE CIRCULAR | CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| E (MPa) | 2,16E+04 | 2,16E+04 | 2,16E+04 | 2,16E+04 |
| t (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| v (Poisson) | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| D (N·mm) | 232534105 | 232534105 | 232534105 | 232534105 |
| r (mm) | 335 | 335 | 335 | 335 |
| CP (mm) | 670 | 670 | 670 | 670 |
| P (N) | 9000 | 10000 | 83000 | 166000 |

Propiedades mecánicas y geométricas para tapa de registro de HLE circular

| | | | | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| q (N/mm ²) | 0,025527191 | 0,028363545 | 0,235417425 | 0,470834851 |
| flecha (mm) | 0,021603077 | 0,024003419 | 0,199228379 | 0,398456758 |
| FLECHA MAX (mm) | 6,7 | 6,7 | 1,34 | 1,34 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | CUMPLE CLASE C | CUMPLE CLASE D |

Criterio de flecha máxima para tapa de registro de HLE circular

| | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| tensión max (MPa) | 0,859436693 | 0,954929659 | 7,925916166 | 15,85183233 |
| tensión adm (MPa) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | CUMPLE CLASE A | CUMPLE CLASE B | NO CUMPLE CLASE C | NO CUMPLE CLASE D |

Criterio de tensión máxima para tapa de registro de HLE circular

La tapa de **acero cuadrada** es capaz de soportar un valor de carga perteneciente a clase B. Según el valor máximo de tensiones permitido podría soportar, también, valores correspondientes a las clases C y D, sin embargo, la limitación por flecha lo impide, pues se supera el valor máximo admisible.

En el caso de la **rectangular**, se clasificaría dentro de la clase B puesto que, para clases superiores, superaría el valor de flecha máxima.

Finalmente, la geometría **circular** es capaz de soportar cargas hasta clase C, no alcanzaría la clase D por superar el máximo de flecha.

Para la tapa de **hormigón cuadrada** se obtiene que cumple ambos criterios para clase B. En función del umbral de flecha sí cumpliría a clases C y D, sin embargo, la limitación de tensión máxima a tracción del hormigón lo impide.

La geometría **rectangular** soporta cargas hasta clase C, superando nuevamente la tensión máxima de tracción admisible en cargas superiores.

Por último, la tapa de hormigón **circular** se clasifica dentro de clase B. Al igual que en las dos geometrías previas, no cumple el criterio de máxima tensión admisible si se aplican cargas mayores.

Puesto que las propiedades mecánicas del **hormigón ligero** son muy parecidas a las del hormigón convencional, los resultados son similares.

Tanto la tapa cuadrada como la circular pertenece a la clase B y, como es de esperar, para clases superiores superaría el valor de tensión máxima admisible, igual que en el caso del hormigón.

Con la geometría rectangular ocurre lo mismo, soporta carga hasta clase C y clase B respectivamente, no cumpliendo del mismo modo con el criterio de resistencia a tracción del material para clases superiores.

A continuación, se muestran unas tablas resumen con la clasificación según la clase de cada una de las tapas de registro estudiadas atendiendo a ambos criterios.

| ACERO | CLASE |
|-------------|-------|
| CUADRADA | B |
| RECTANGULAR | B |
| CIRCULAR | C |

Clasificación de las tapas de acero estudiadas

| HORMIGÓN | CLASE |
|-------------|-------|
| CUADRADA | B |
| RECTANGULAR | C |
| CIRCULAR | B |

Clasificación de las tapas de hormigón estudiadas

| HORMIGÓN LIGERO | CLASE |
|-----------------|-------|
| CUADRADA | B |
| RECTANGULAR | C |
| CIRCULAR | B |

Clasificación de las tapas de hormigón ligero estructural estudiadas

2.4.5. Cálculo numérico

2.4.5.1. Introducción

La mayor parte de las estructuras en ingeniería son de naturaleza continua y para su estudio se precisa del método de elementos finitos (FEM).

El método de los elementos finitos se emplea para la resolución de problemas continuos recurriendo a la hipótesis de discretización que consiste en lo siguiente:

- El continuo es dividido por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí llamadas elementos finitos.
- Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, los nodos.
- Los desplazamientos de los nodos son las incógnitas básicas del problema y estos determinan la configuración deformada de la estructura. Solo estos desplazamientos se consideran independientes.
- El desplazamiento de un punto cualquiera viene determinado por los desplazamientos de los nodos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Estas, mediante las ecuaciones constitutivas del material, definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto, en sus bordes.
- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores que actúan sobre él.

Este proceso se lleva a cabo en tres etapas claramente diferenciadas:

- 1) **PREPROCESO**: definición de las condiciones de partida.
 - Definición del modelo matemático
 - Asignación de materiales y definición de la geometría
 - Generación de la malla de elementos finitos.
 - Definiciones de condiciones de contorno
 - Aplicación de la carga
 - Restricción de desplazamiento
 - Configuración de la resolución del análisis. Definición del método, pasos de carga, etc.
- 2) **SOLVER**: se establecen y resuelven las ecuaciones lineales y no lineales obteniendo los resultados nodales. Se define el método de resolución del problema.
- 3) **POST-PROCESO**: obtención de otros parámetros e interpretación. Se obtienen los resultados del problema considerando que las soluciones exactas son las obtenidas en los nodos.

En el presente trabajo, se aborda el análisis del comportamiento de varias tapas de registro de diferentes geometrías y materiales empleando el software comercial Ansys Workbench, versión 18.2

Los modelos numéricos se llevan a cabo siguiendo la siguiente secuencia de trabajo:

En primer lugar, se realiza la **elección del modelo matemático** dentro de la variedad de posibilidades que ofrece el programa, en función de las necesidades. En este caso concreto, se selecciona un análisis estático estructural para estudiar la carga máxima que admiten las diferentes tapas estudiadas y así, clasificarlas según la normativa vigente.

En segundo lugar, una vez establecido el tipo de análisis, se procede a la **elaboración del modelo geométrico** en el cual se especifican las dimensiones, y la definición de las **propiedades de los materiales** a utilizar en cada uno de los modelos.

En tercer lugar, se lleva a cabo el **mallado del modelo** mediante la discretización de las geometrías en elementos finitos definidos por el usuario.

En cuarto lugar, se definen las **condiciones de contorno** del problema: restricción de grados de libertad, cargas, etc. En estos modelos en particular, las condiciones de contorno definidas son la carga aplicada en la superficie de la tapa y el soporte de las mismas aplicando restricción de desplazamientos.

En quinto lugar, se realiza el **cálculo numérico** de los modelos previamente definidos. Se resuelve el problema matemático aplicando el método seleccionado.

Finalmente, se obtienen los resultados numéricos que el usuario desea analizar: desplazamientos, reacciones, deformaciones, etc. Se analizan y se interpretan los resultados obtenidos en base a la experiencia del usuario. En función de estos, es posible que sea necesario realizar modificaciones en los modelos definidos hasta llegar a un modelo definitivo cuyo comportamiento se corresponde con el efecto a simular. En este último punto, tanto la experiencia del usuario como el respaldo de ensayos experimentales con los que validar los modelos son aspectos muy importantes a la hora de seleccionar un modelo como válido y fiable.

2.4.5.2. Estudio numérico de las tapas de registro

En este apartado, se incluyen de manera detallada los modelos numéricos desarrollados, diferenciados principalmente por la geometría de cada una de las tapas de registro y los materiales empleados para cada una de las geometrías. Se incluyen tres sub-apartados en función de la geometría y en cada sub-apartado se detallan las particularidades de cada uno de los modelos por separado.

En el modelo numérico, para determinar la flecha máxima admisible y con ello, el valor límite de carga que es capaz de soportar cada una de las tapas, es necesario, al igual que se hizo con el modelo analítico, tener en cuenta las consideraciones de carga y de flecha según norma UNE 124-1:2015 así como las tensiones máximas admisibles de cada material.

Estas consideraciones afectan a tres materiales: *acero*

| CUADRADA | | CP = 580mm |
|-----------|-------|--|
| CARGA (N) | CLASE | CONSIDERACIONES |
| 10000 | A | si flecha= $CP/50 = 11,6\text{mm}$ con flecha máx = 6,5mm para CP<450mm si flecha máx= $CP/100 = 5,8\text{mm}$ para CP>450mm |
| 83000 | B | si flecha máx = 6,5mm para CP<450mm si flecha máx= $CP/100 = 5,8\text{mm}$ para CP>450mm |
| 166000 | C | si flecha $CP/500 = 1,16\text{mm}$ con flecha máx = 1 mm para CP<500 mm si flecha máx = $CP/500 = 1,16\text{mm}$ para CP>500 |

Valor de flecha según CP para las tapas de registro cuadradas

| RECTANGULAR | | CP = 440mm |
|-------------|-------|---|
| CARGA (N) | CLASE | CONSIDERACIONES |
| 10000 | A | si flecha= $CP/50 = 8,8\text{mm}$ con flecha máx = 6,5mm para CP<450mm si flecha máx= $CP/100 = 5,8\text{mm}$ para CP>450mm |
| 83000 | B | si flecha= $CP/50 = 8,8\text{mm}$ con flecha máx = 6,5mm para CP<450mm si flecha máx= $CP/100 = 5,8\text{mm}$ para CP>450mm |
| 166000 | C | si flecha $CP/500 = 0,88$ con flecha máx = 1 mm para CP<500 mm si flecha máx = $CP/500 = 1,16\text{mm}$ para CP>500 |

Valor de flecha según CP para las tapas de registro rectangulares

| CIRCULAR | | CP = 670mm |
|-----------|-------|---|
| CARGA (N) | CLASE | CONSIDERACIONES |
| 10000 | A | si flecha= $CP/50 = 13,4\text{mm}$ con flecha máx = 6,5mm para $CP < 450\text{mm}$ si flecha máx= $CP/100 = 6,7\text{mm}$ para $CP > 450\text{mm}$ |
| 83000 | B | si flecha= $CP/50 = 13,4\text{mm}$ con flecha máx = 6,5mm para $CP < 450\text{mm}$ si flecha máx= $CP/100 = 6,7\text{mm}$ para $CP > 450\text{mm}$ |
| 166000 | C | si flecha $CP/500 = 1,34\text{mm}$ con flecha máx = 1 mm para $CP < 500\text{ mm}$ si flecha máx = $CP/500 = 1,34\text{mm}$ para $CP > 500$ |

Valor de flecha según CP para las tapas de registro circulares

Para este estudio, se parte de los valores obtenidos mediante el cálculo analítico y se comprueba si ambos métodos arrojan resultados similares o si, por el contrario, hay discordancias entre ellos.

Si el análisis se ha llevado a cabo de forma correcta, con ambas metodologías se deberían obtener unos resultados similares, siendo más precisos aquellos que se alcanzan a través de los modelos numéricos, puesto que el cálculo analítico realiza simplificaciones que distancian los resultados obtenidos de los exactos.

Finalmente, se incluirán los principales resultados, así como la clasificación de las tapas de registro obtenidas en base a dichos resultados.

Tapa de registro cuadrada de acero

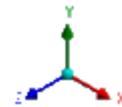
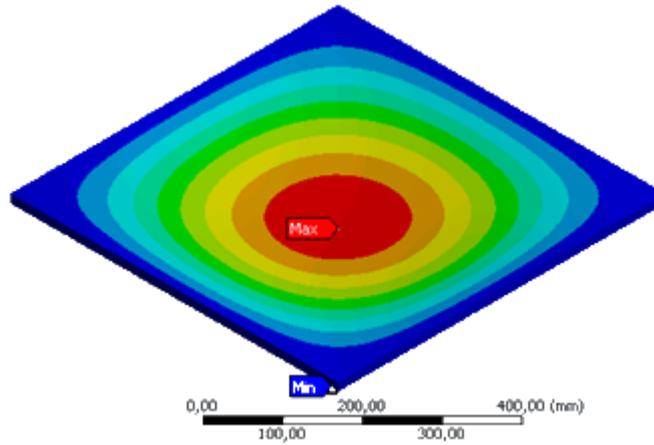
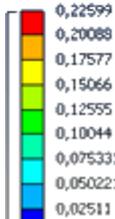
En base al estudio analítico previamente realizado, de manera aproximada se conoce que la tapa de registro cuadrada, de estas dimensiones, se clasificaría en una clase B para una carga de 10kN generando una flecha de 0,35mm y una tensión de 11MPa. No podría pertenecer a una clase C ya que, para la carga mínima correspondiente a dicha clase, 83kN, se supera el valor límite de flecha admisible impuesto en 1,16mm con un valor de 2,94mm.

Según el estudio mediante el método de los elementos finitos:

En el caso de trabajar con la carga mínima perteneciente a la clase B, se produce una flecha de 0,23mm y una tensión de 13MPa y para la carga correspondiente a clase C, 83kN, se obtienen una flecha y una tensión a tracción de 1,87mm y 107MPa, respectivamente, por lo que incumple el criterio de flecha máxima admisible para la clase C al superar el valor máximo de 1,16mm.

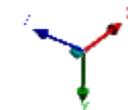
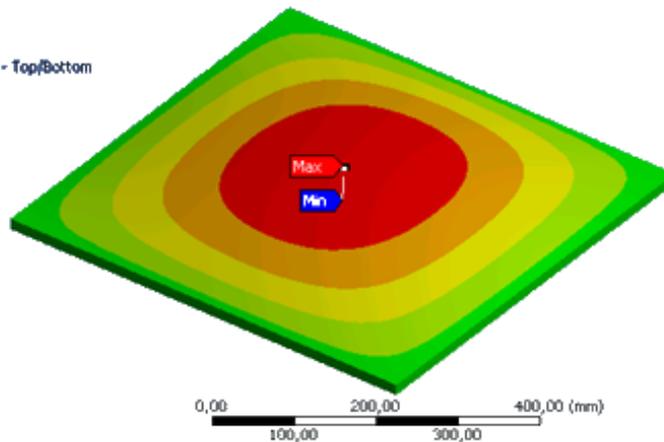
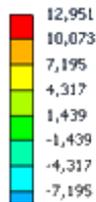
En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones obtenidas en los modelos numéricos.

D: ACERO
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
Custom
Max: 0,22599
Min: 0
23/06/2019 17:50



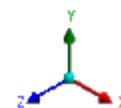
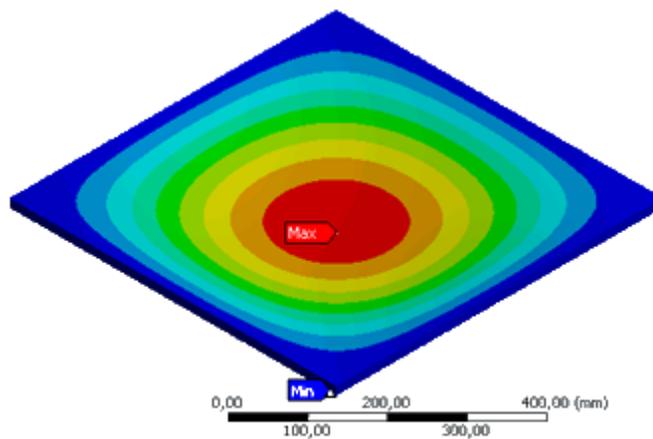
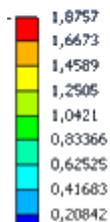
Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase B

D: ACERO
Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: 12,951
Min: -12,951
29/06/2019 18:24

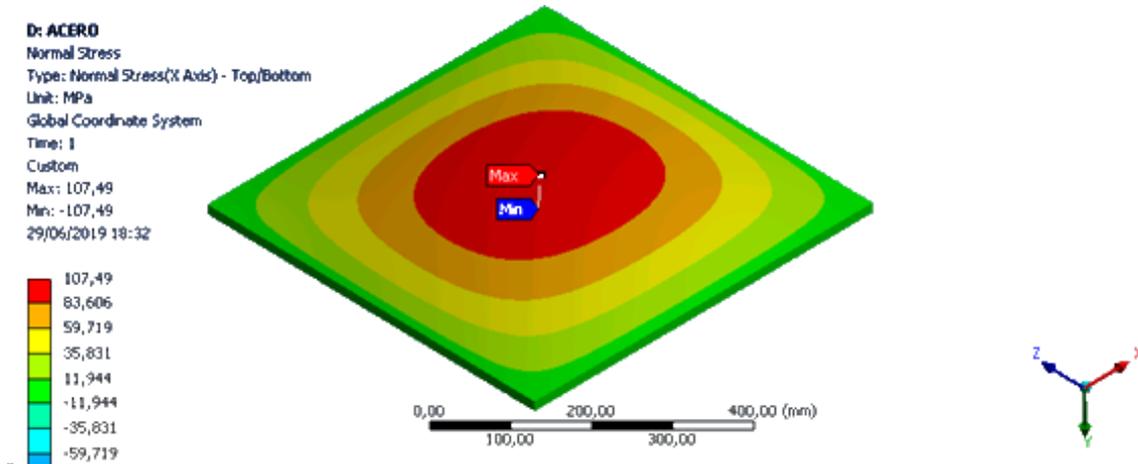


Estado de tensiones de la tapa cuadrada de acero para clase B

D: ACERO
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
Custom
Max: 1,8757
Min: 0
29/06/2019 18:31



Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase C



Estado de tensiones de tapa cuadrada de acero para clase C

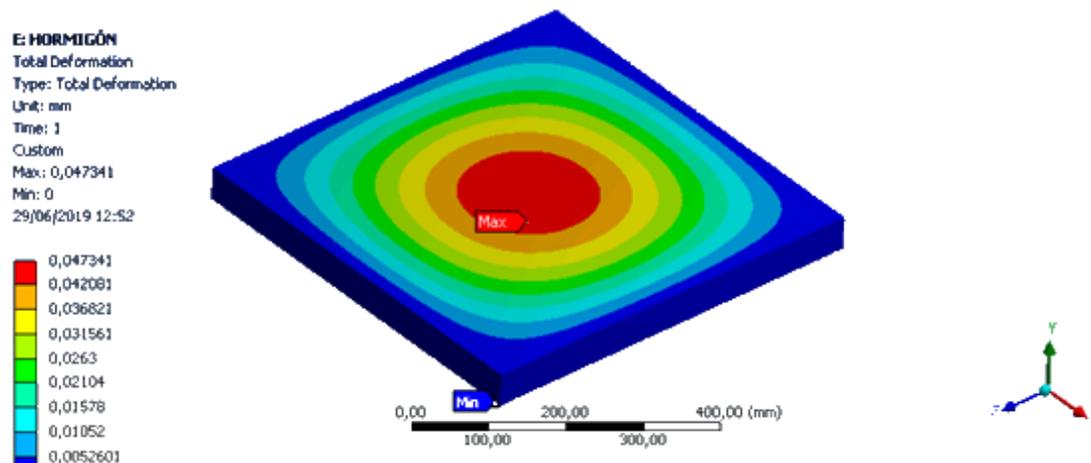
Según esto, los resultados mostrados por ambas metodologías de estudio coinciden. La tapa de registro cuadrada dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015.

Tapa de registro cuadrada de hormigón

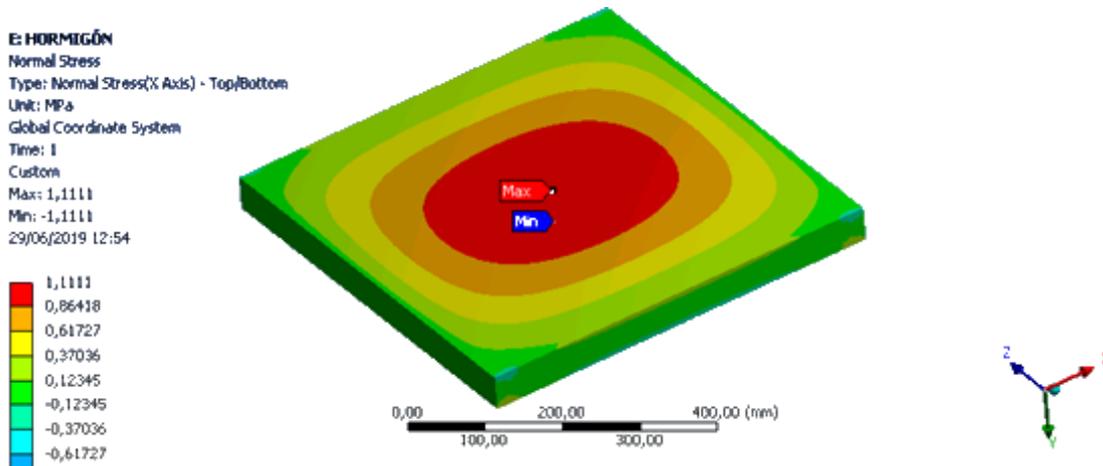
Tras el cálculo analítico se estima una clase B para esta tapa, con una carga de 10kN alcanzando una flecha de 0,068mm y una tensión de tracción de 1MPa. No cumple para la clase C ya que, aunque está dentro del valor de flecha admisible 0,56mm, supera su límite de tracción con un valor de 8,29MPa.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos mediante FEM se tiene que:

Para una carga de 10kN se produce sobre la tapa de registro una deformación con valor 0,05mm, siendo la tensión de tracción alcanzada 1,1MPa

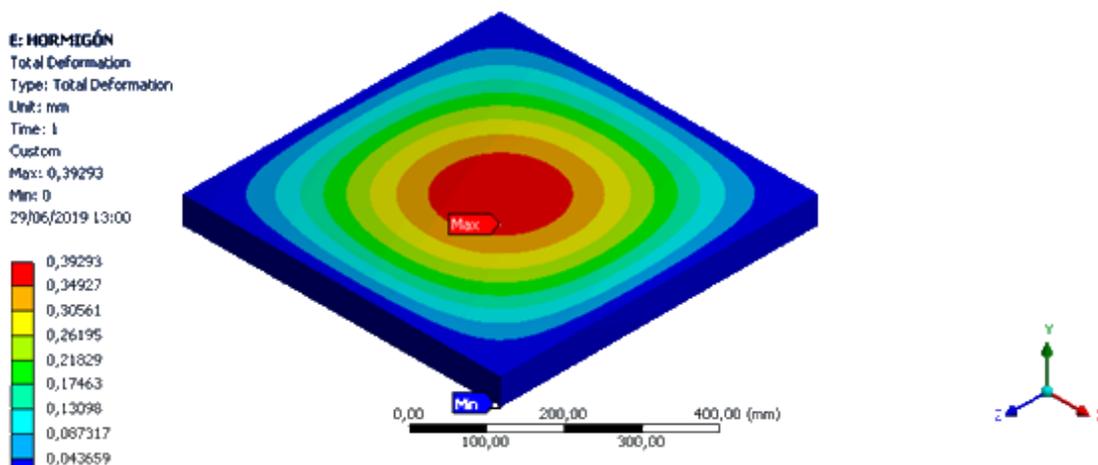


Deformación total de la tapa cuadrada de hormigón para clase B

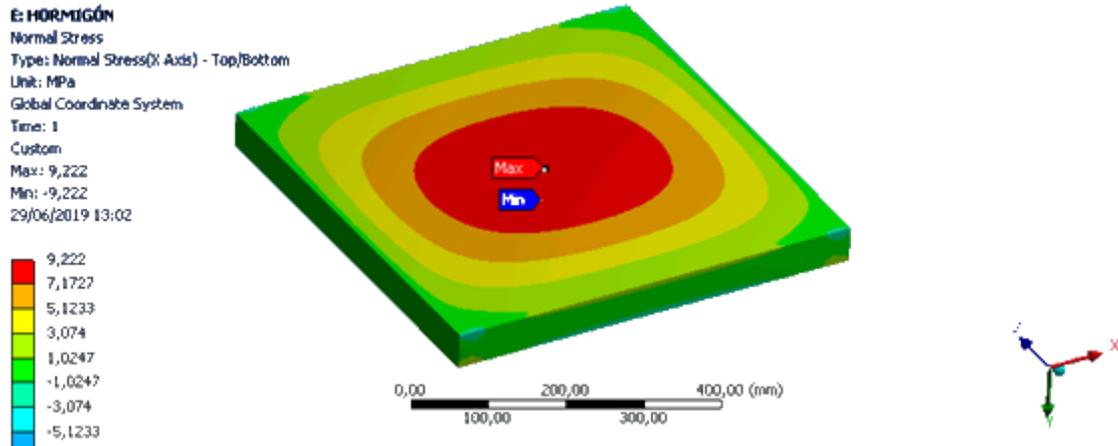


Estado de tensiones de la tapa cuadrada de hormigón para clase B

Si se comprueba si la tapa de registro es capaz de soportar la carga mínima para clase C se tiene que, para el valor mínimo de carga, 83kN, el valor de flecha alcanzado es de 0,39mm, muy por debajo de la deformación máxima permitida, para un estado de tensiones de tracción que alcanzan un valor de 9,22MPa superando el valor límite de resistencia a tracción del hormigón de 4MPa, por lo tanto, no se puede agrupar dentro de la clase C ya que no se cumplen ambos criterios



Deformación total de la tapa cuadrada de hormigón para clase C



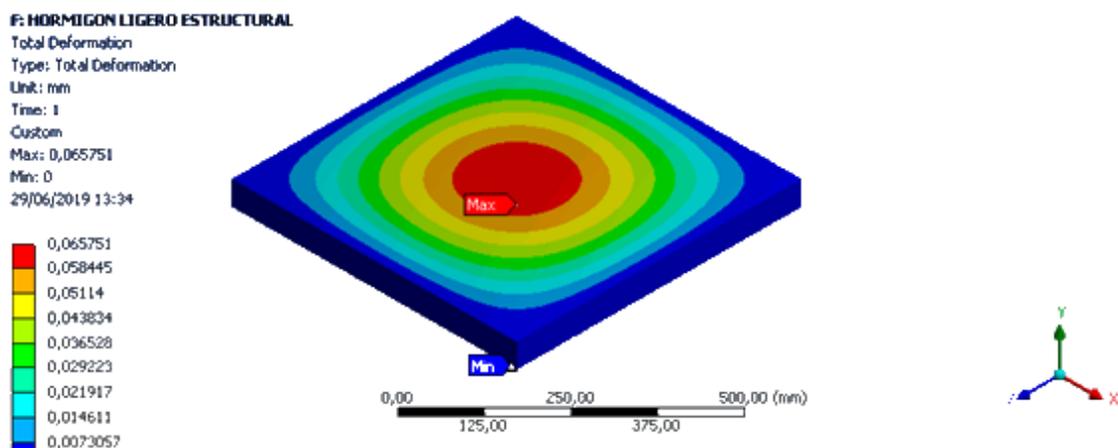
Estado de tensiones de la tapa cuadrada de hormigón para clase C

Por tanto, se puede concluir este apartado afirmando que tanto por el procedimiento analítico como por el numérico se alcanza el mismo resultado.

Tapa de registro cuadrada de hormigón ligero

Si se toman como datos de partida los resultados obtenidos mediante el procedimiento analítico, la tapa de registro pertenece a una clase B, obteniendo una flecha de 0,094mm con una tensión de 1MPa. No pertenece a la clase C por superar la resistencia a tracción del material con un valor de 8,29MPa.

Mediante el método numérico se tiene que para el valor de carga para clase B, la tapa de registro se deforma, alcanzando un valor de deformación de 0,066mm y una tensión a tracción de 1,1MPa.



Deformación total de la tapa cuadrada de hormigón ligero estructural para clase B

F: HORMIGÓN LIGERO ESTRUCTURAL

Normal Stress

Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom

Unit: MPa

Global Coordinate System

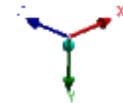
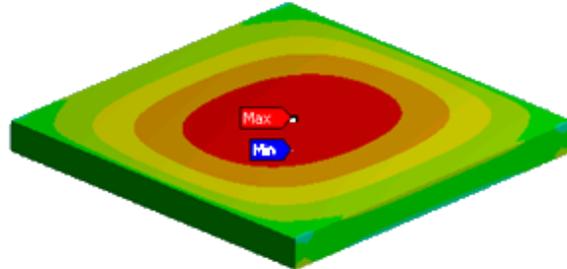
Time: 1

Custom

Max: 1,1111

Min: -1,1111

29/06/2019 13:35



Estado de tensiones de la tapa cuadrada de hormigón ligero estructural para clase B

Comprobando para clase C se obtiene un valor de flecha de 0,55mm. La tensión de tracción tras la aplicación de la carga (83kN) tiene un valor de 9,22MPa.

F: HORMIGÓN LIGERO ESTRUCTURAL

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

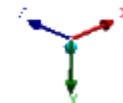
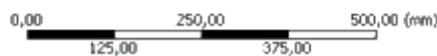
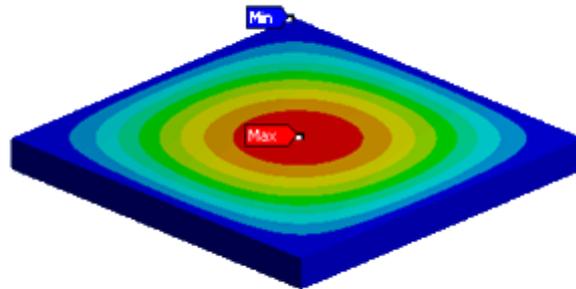
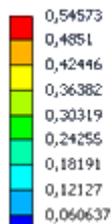
Time: 1

Custom

Max: 0,54573

Min: 0

29/06/2019 13:37



Deformación total de la tapa cuadrada de hormigón ligero estructural para clase C

F: HORMIGÓN LIGERO ESTRUCTURAL

Normal Stress

Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom

Unit: MPa

Global Coordinate System

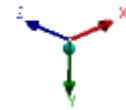
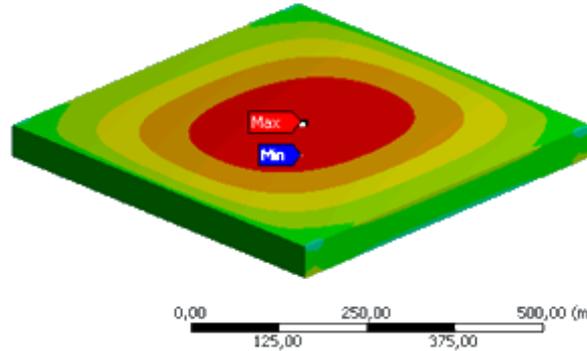
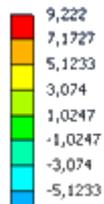
Time: 1

Custom

Max: 9,222

Min: -9,222

29/06/2019 13:59



Estado de tensiones de la tapa cuadrada de hormigón ligero estructural para clase C

Nuevamente se vuelve a conseguir el mismo resultado empleando ambas metodologías de estudio. Los resultados guardan una estrecha similitud con los del hormigón convencional, como ya se había mencionado en el estudio analítico, al tratarse de materiales con unas propiedades mecánicas tan parecidas.

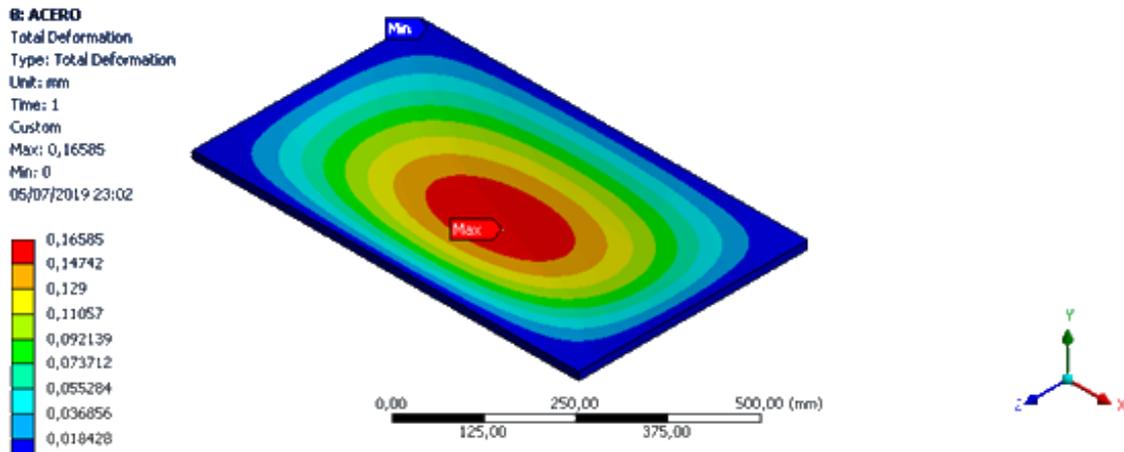
Tapa de registro rectangular de acero

Siguiendo el mismo procedimiento que para las tapas de registro cuadradas, se parte de los resultados del cálculo analítico. Según estos, y en base a la clasificación según la norma UNE 124-1:2015, la tapa de acero rectangular pertenece a la clase B generándose sobre la estructura una flecha de 0,22mm tras la aplicación de 10kN de carga con una tensión de 4,15MPa. Para la carga de 83kN, mínima para clase C, el valor de flecha aumenta a 1,79 mm superando el límite establecido. La tensión a la que se encuentra la placa tras aplicar dicha carga es de 34,1MPa.

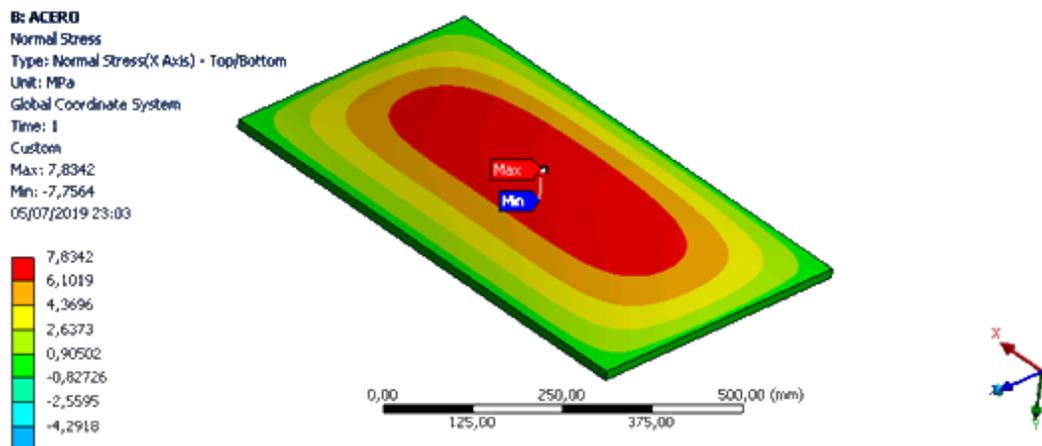
En los resultados obtenidos a partir del modelo numérico se establece que, para la carga mínima para clase B de 10kN, se produce una flecha de 0,17mm estando la placa sometida a una tensión de 7,8MPa.

Efectivamente, se comprueba que no cumple el criterio de flecha residual admisible para clase C ya que el valor de la flecha asciende a 1,36mm con un valor de tensión máxima de 34,11MPa.

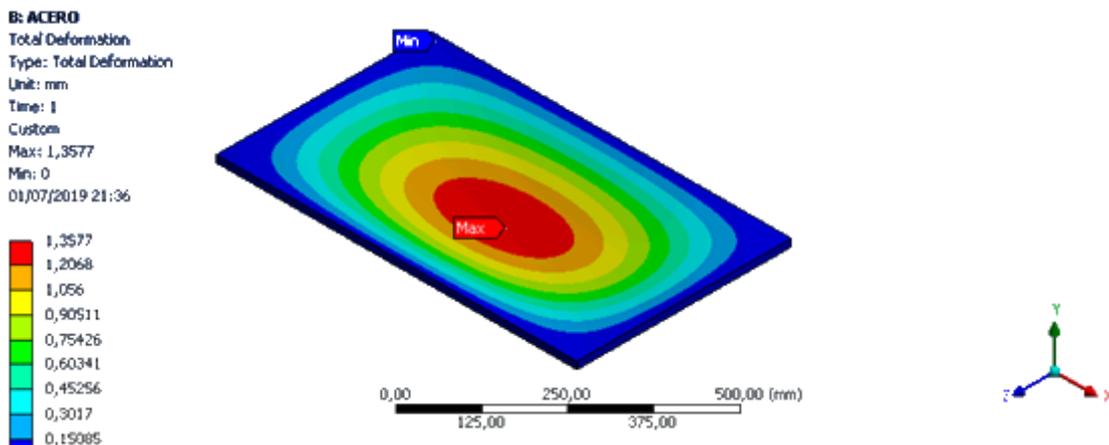
A continuación, se recoge lo explicado mediante una serie de imágenes.



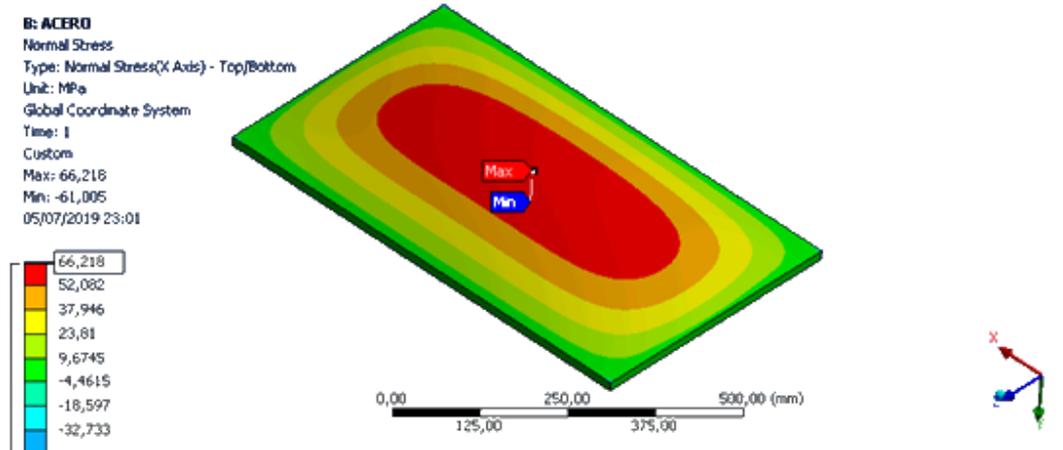
Deformación total de la placa rectangular de acero para clase B



Estado de tensiones en placa rectangular de acero para clase B



Deformación total de la placa rectangular de acero para clase B



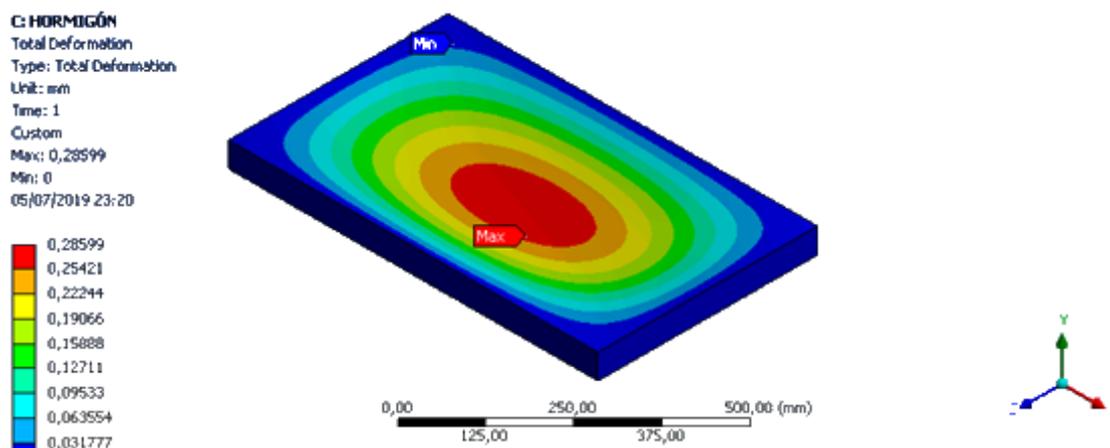
Estado de tensiones en laca rectangular de acero para clase C

Tapa de registro rectangular de hormigón

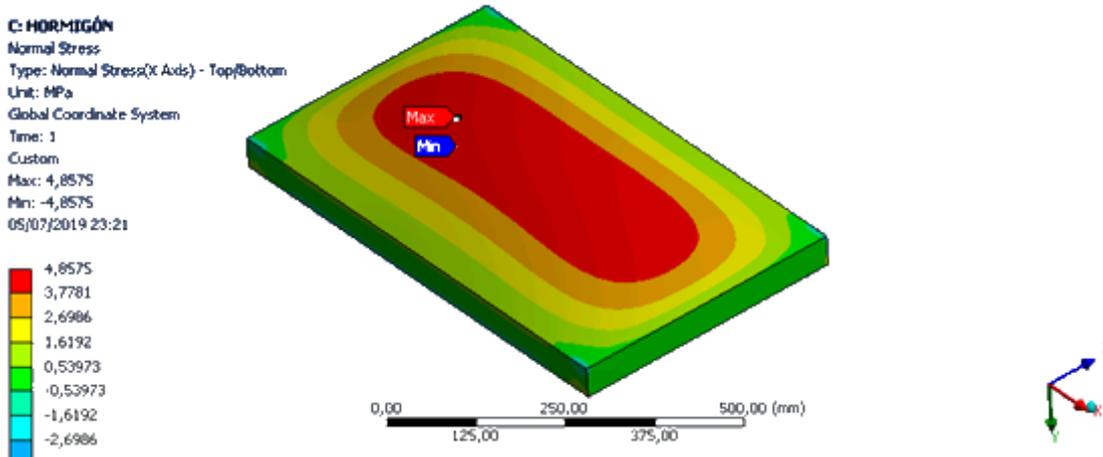
Del cálculo analítico se estima que esta tapa pertenece a una clase C, con un valor de flecha y de tensión tras la aplicación de 83kN de 0,34mm y 3,1MPa. No cumple clase D, para lo que tendría que soportar una carga de 166kN, puesto que para este valor de carga se superan los 4MPa de resistencia a tracción que presenta el material.

Los resultados que se obtiene en Ansys aplicando el método de los elementos finitos son los siguientes:

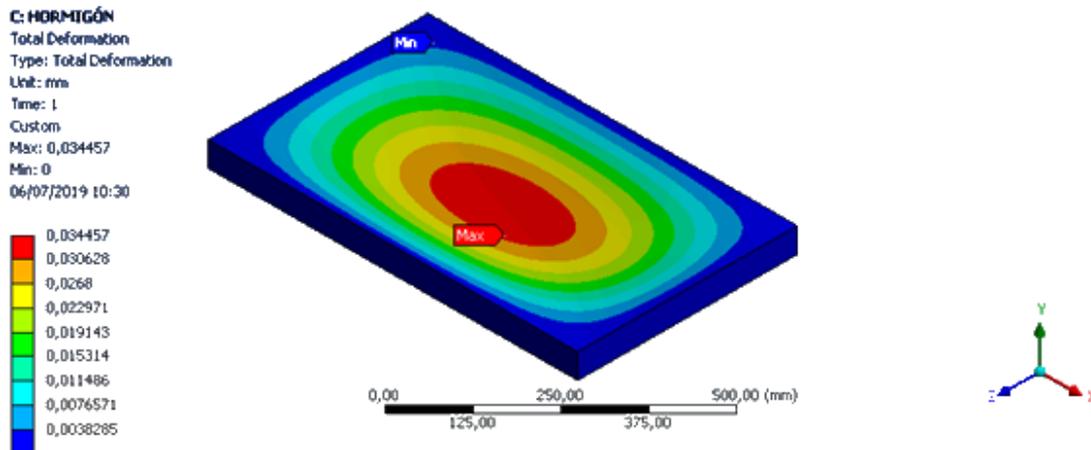
Para la carga de 83kN se da una flecha de 0,29mm y una tensión de 4,86MPa superando, por muy poco, el valor admisible. Se comprueban los valores para clase B obteniendo una flecha y una tensión de 0,034mm y 0,59MPa. Se muestran las imágenes a continuación:



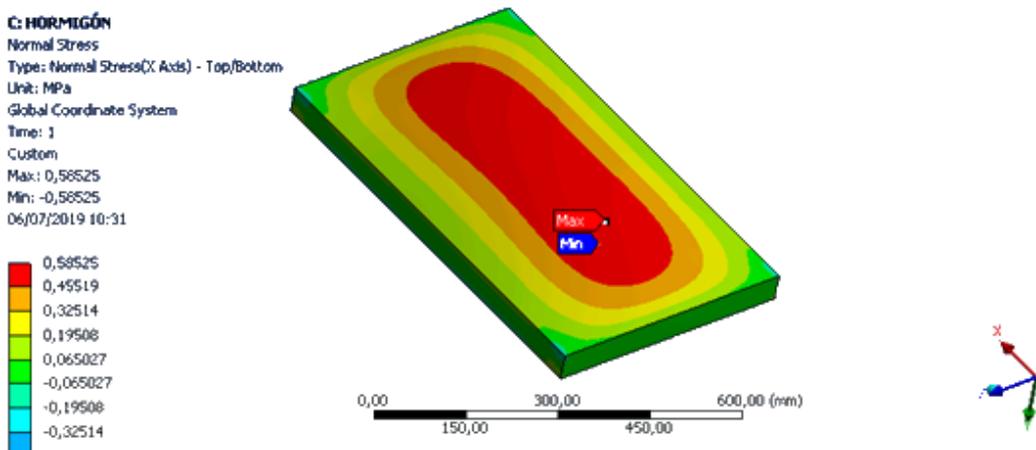
Deformación total de la placa rectangular de hormigón para clase C



Estado de tensiones en placa rectangular de hormigón para clase C



Deformación total de la placa rectangular de hormigón para clase B



Estado de tensiones en placa rectangular de hormigón para clase B

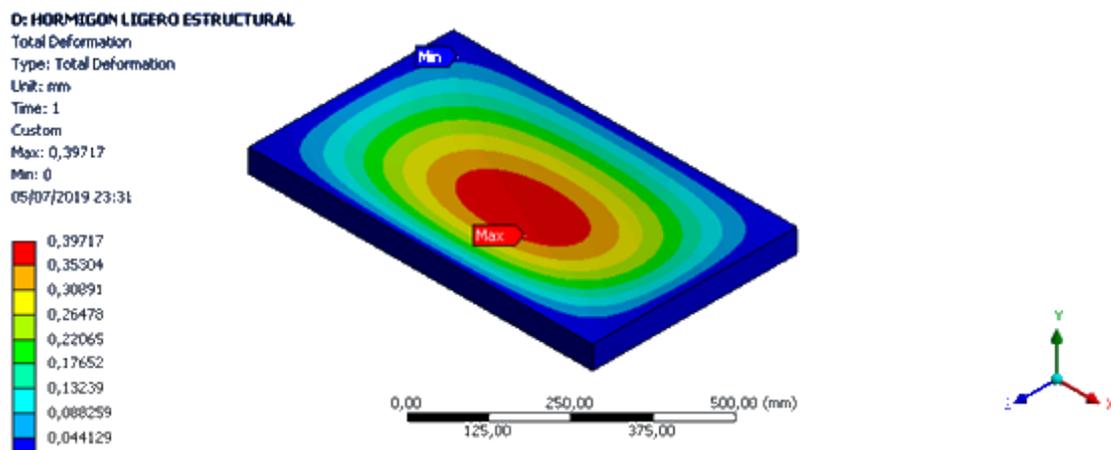
Tapa de registro rectangular de hormigón ligero

En base al estudio analítico previamente realizado, de manera aproximada se conoce que la tapa de registro cuadrada, de estas dimensiones, se clasificaría en una clase C para una carga de 83kN generando una deformación de 0,48mm y una tensión de 3,1MPa. No podría pertenecer a una clase D ya que, para la carga mínima correspondiente a dicha clase, 166kN, se supera la tensión máxima de tracción del hormigón siendo de 6,19MPa para una flecha de 0,95mm.

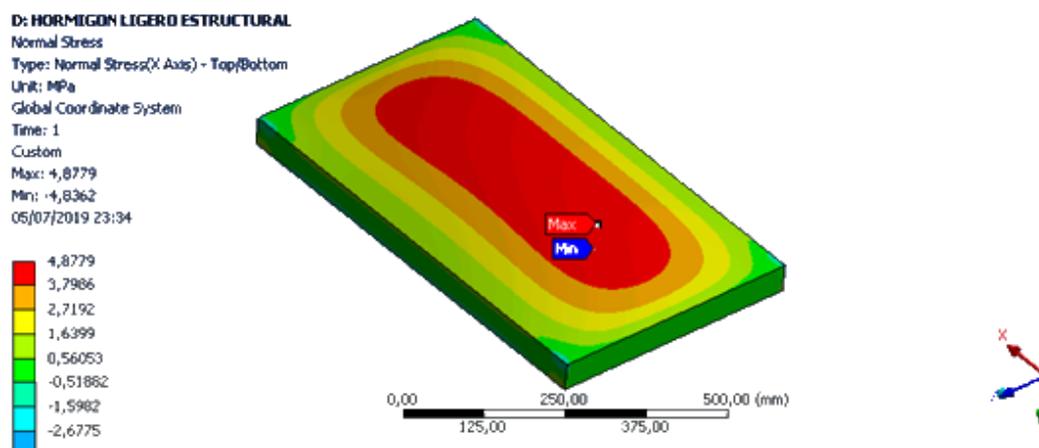
Según el estudio mediante el método de los elementos finitos:

En el caso de trabajar con la carga mínima perteneciente a la clase C, se produce una flecha de 0,4mm y una tensión de 4,88MPa que, como en el caso del hormigón convencional también supera la resistencia a tracción del material.

En las siguientes imágenes se observan las deformaciones en las placas y las tensiones obtenidas para clase C.



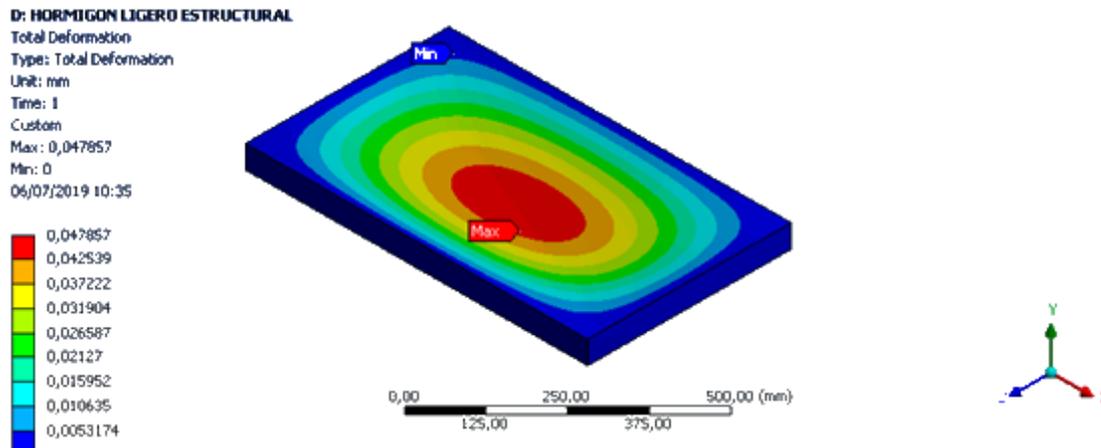
Deformación total de la placa rectangular de hormigón ligero para clase C



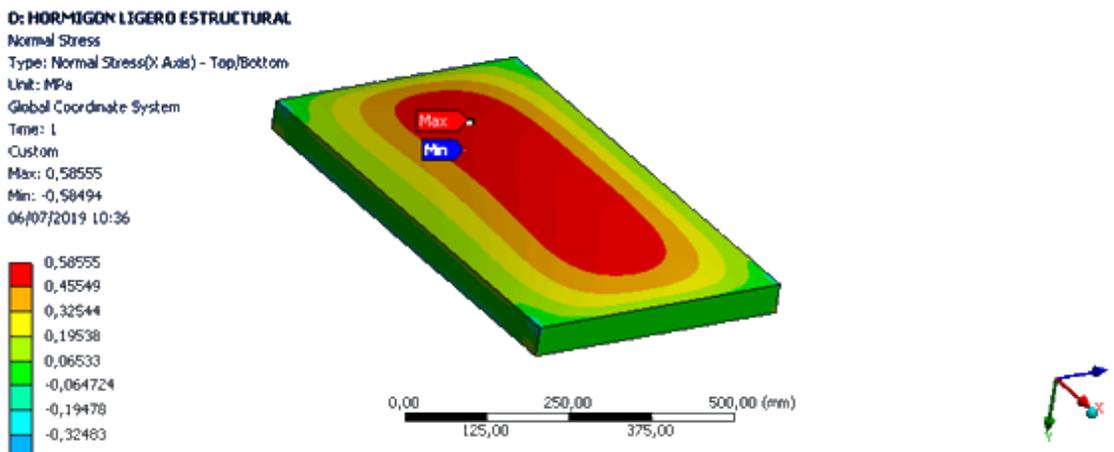
Estado de tensiones en placa rectangular de hormigón ligero para clase C

Como cabía esperar, ocurre exactamente lo mismo que en el análisis de la tapa rectangular de hormigón tradicional al presentar unas propiedades mecánicas tan similares.

Los valores de flecha y tensión tras la aplicación de la carga mínima para clase B son 0,048mm y 0,59MPa respectivamente, cumpliendo con los dos criterios.



Deformación total de la placa rectangular de hormigón ligero para clase B



Estado de tensiones en placa rectangular de hormigón ligero para clase B

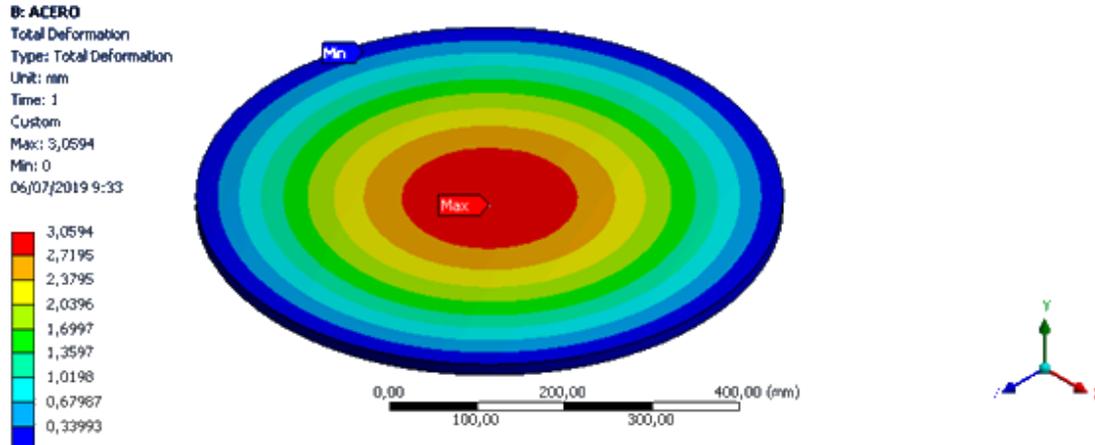
Como cabía esperar al tratarse de materiales con propiedades prácticamente idénticas, no existe semejanza en resultados al no cumplir la clase C en el estudio mediante FEM.

Tapa de registro circular de acero

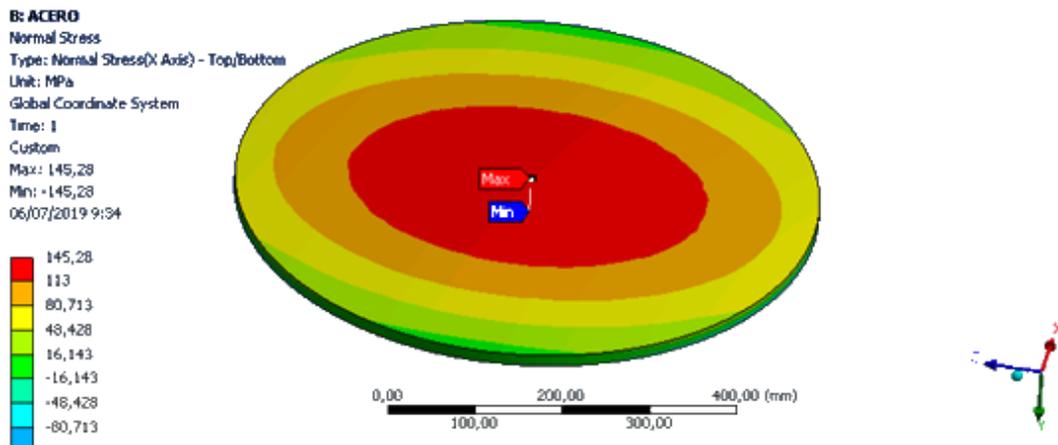
Esta tapa se clasifica dentro de la clase C pues para la carga mínima que le corresponde a esta clase 83kN se genera una flecha sobre la tapa de registro de 0,75mm y una tensión a tracción de 88,07MPa, cumpliéndose ambos criterios.

Si se atiende a los resultados obtenidos mediante FEM para la carga mencionada se genera una flecha de 3,06mm y una tensión de tracción de 145,2MPa. Según este modelo se incumple el criterio según flecha máxima admisible y, por tanto, no cumple a clase C.

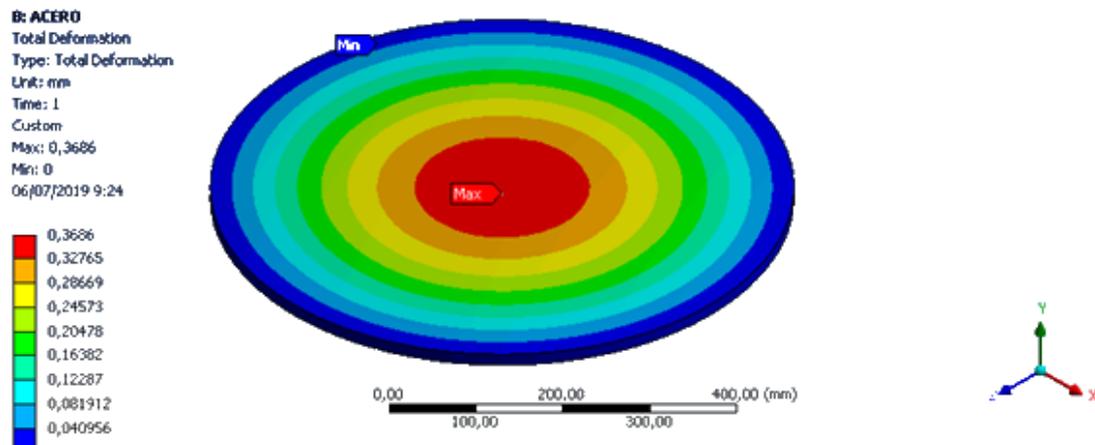
Si se comprueba el valor de flecha y tensión para clase B se obtienen unos valores de 0,37mm y 17,5MPa cumpliendo ambos requisitos para clase B.



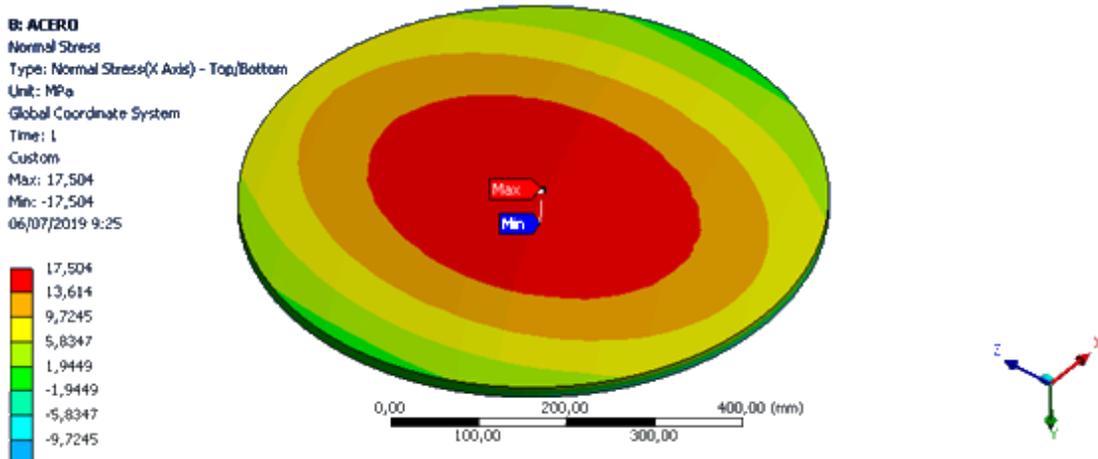
Deformación total de la placa circular de acero para clase C



Estado de tensiones en placa circular de acero para clase C



Deformación total de la placa de acero circular para clase B



Estado de tensiones en placa de acero circular para clase B

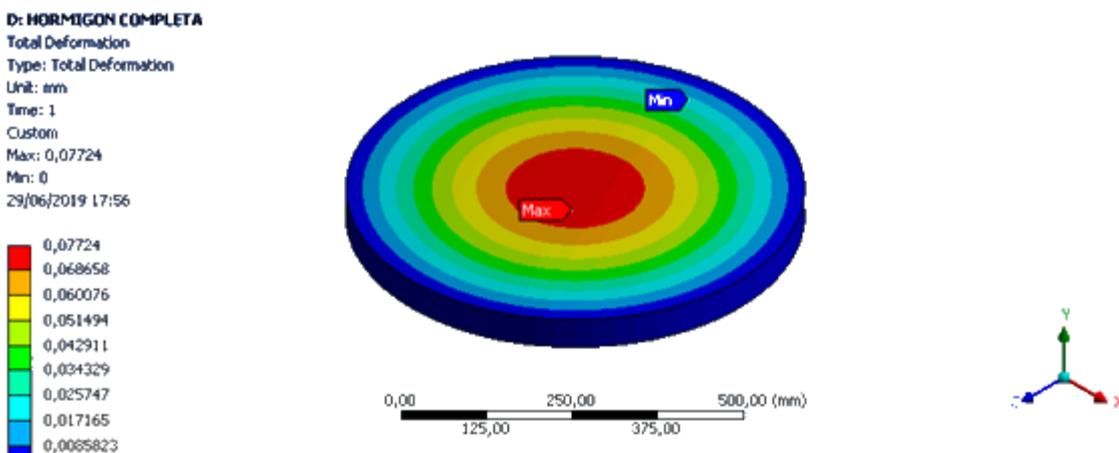
Tapa de registro circular de hormigón

Del método analítico se tiene que, la tapa circular de hormigón pertenece a una clase B pues para una carga de 10kN se genera una flecha de 0,017mm y una tensión a tracción de 0,95MPa. Ambos valores muy por debajo de sus máximos admisibles.

No podría clasificarse en la clase C pues para la carga de 83kN se superaría la resistencia a tracción del hormigón con un valor de 7,93MPa

Se comprueba si esto mismo sucede con el modelo numérico.

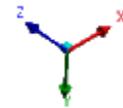
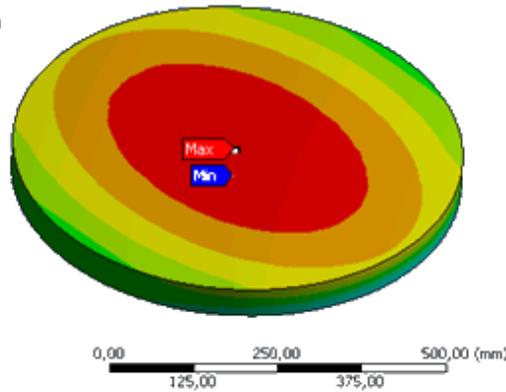
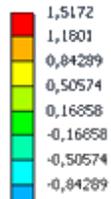
En este caso se tiene que para la carga de 10kN se produce una flecha de 0,077mm y con un valor de tensión a tracción de 1,52MPa.



Deformación total de la tapa circular de hormigón para clase B

D: HORMIGÓN COMPLETA

Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: 1,5172
Min: -1,5172
29/06/2019 17:57



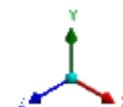
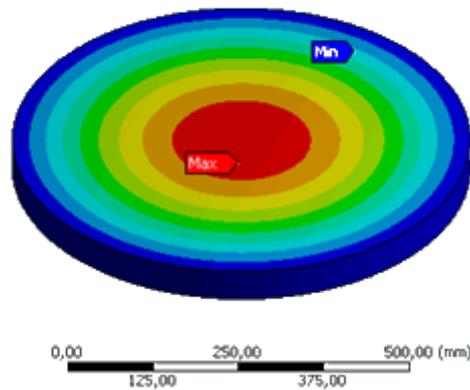
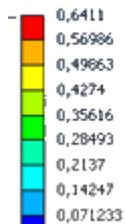
Estado de tensiones de la tapa circular de hormigón para clase B

Si se prueba con la carga mínima para clase C, 83kN, se produce un incremento de tensiones y deformaciones, alcanzando los valores de 12,59MPa y 0,64mm respectivamente, superando la resistencia tracción del hormigón.

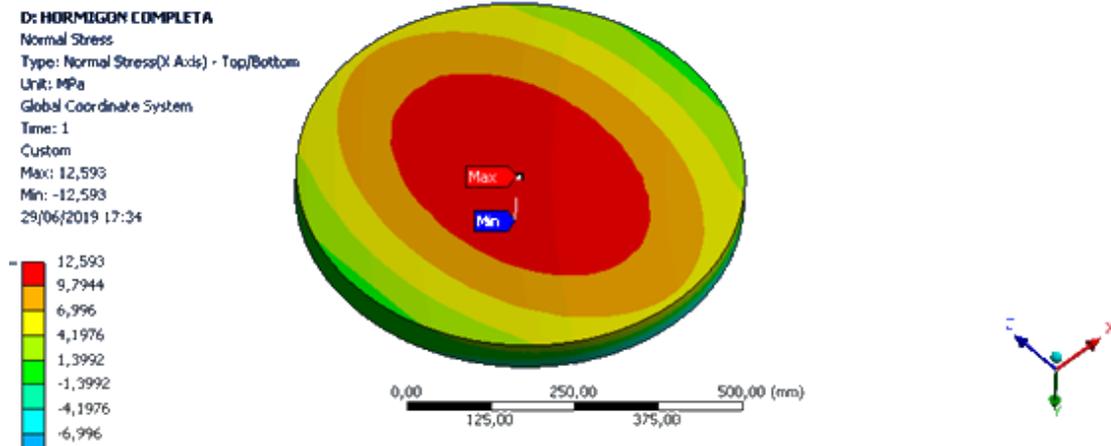
En las imágenes que siguen se muestran dichos valores

D: HORMIGÓN COMPLETA

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
Custom
Max: 0,6411
Min: 0
29/06/2019 17:33



Deformación total de la tapa circular de hormigón para clase C



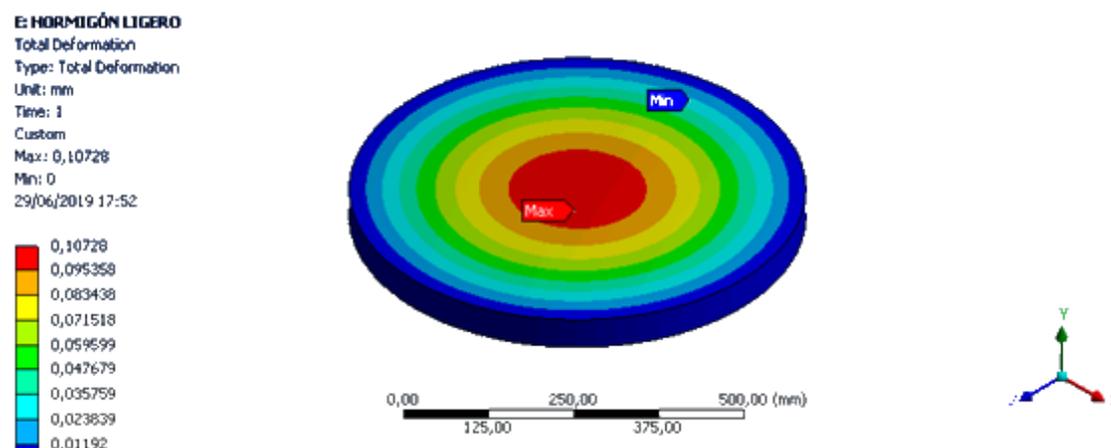
Estado de tensiones de la tapa circular de hormigón para clase C

Se concluye afirmando, en base a los resultados conseguidos, que ambas metodologías asignan la misma clase, clase B, para las tapas de registro circulares en acero estudiadas.

Tapa de registro circular de hormigón ligero

Para este caso, se establece que la tapa circular pertenece a una clase B. Tras aplicar la carga de 10kN se tiene una flecha y una tensión máxima de 0,024mm y 0,95MPa, respectivamente. No podría pertenecer a la clase C ya que se superaría la resistencia a tracción del material al igual que ocurría con el hormigón convencional.

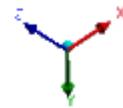
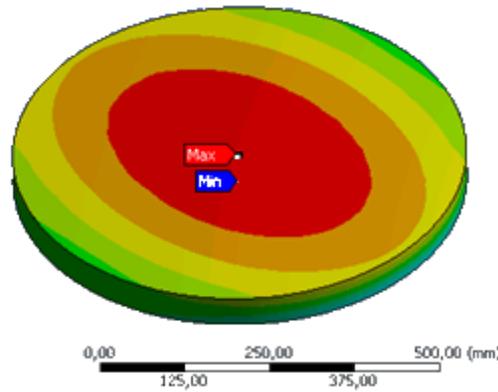
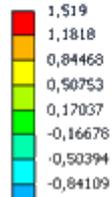
Los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos han sido, para la misma carga, una deformación de 0,11mm y una tensión de tracción de 1,52MPa como se aprecia en las siguientes imágenes.



Deformación total de la tapa circular de hormigón ligero para clase B

E: HORMIGÓN LIGERO

Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: 1,519
Min: -1,5154
29/06/2019 17:53

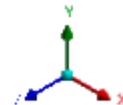
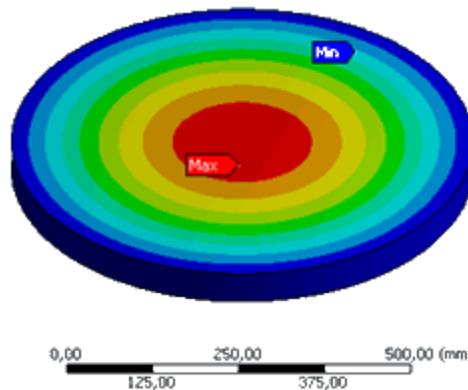
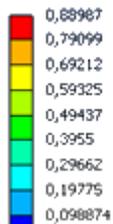


Estado de tensiones de la tapa circular de hormigón ligero para clase B

Para probar si cumple con los requisitos para una clase C, se introduce el valor de 83kN en Ansys Workbench obteniéndose una flecha y una tensión a tracción de 0,89mm y 12,71MPa tal y como se muestra. No cumple al superar su resistencia a tracción.

E: HORMIGÓN LIGERO

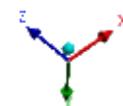
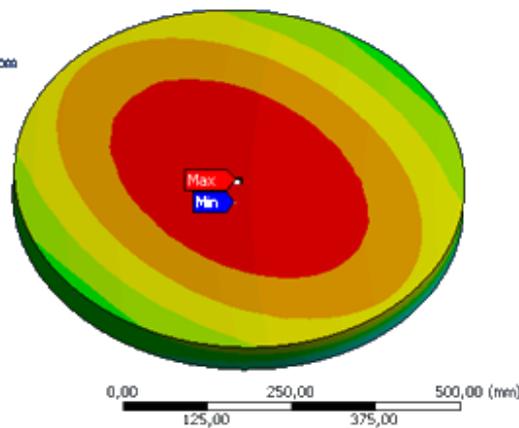
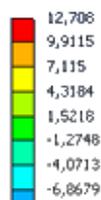
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
Custom
Max: 0,88987
Min: 0
29/06/2019 18:01



Deformación total de la tapa circular de hormigón ligero para clase C

E: HORMIGÓN LIGERO

Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: 12,708
Min: -12,461
29/06/2019 18:01



Estado de tensiones de la tapa circular de hormigón ligero para clase C

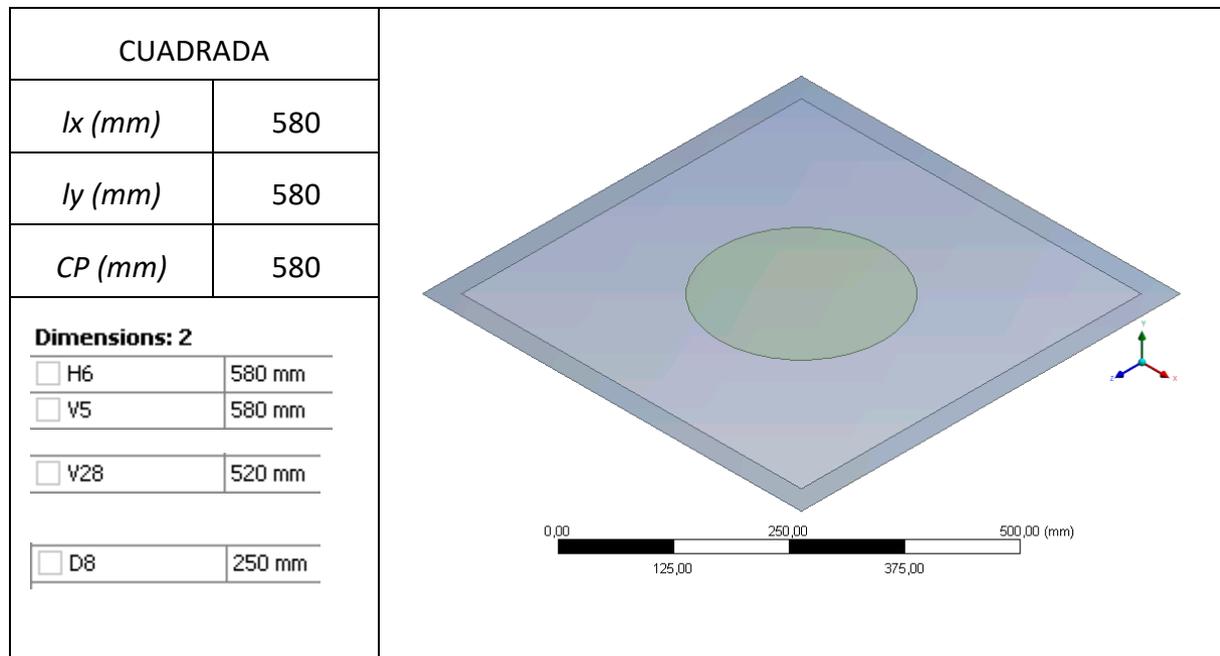
Nuevamente se consigue resultados semejantes en los cálculos realizados mediante ambas metodologías.

2.4.6. Simulación numérica de los ensayos especificados en la normativa vigente

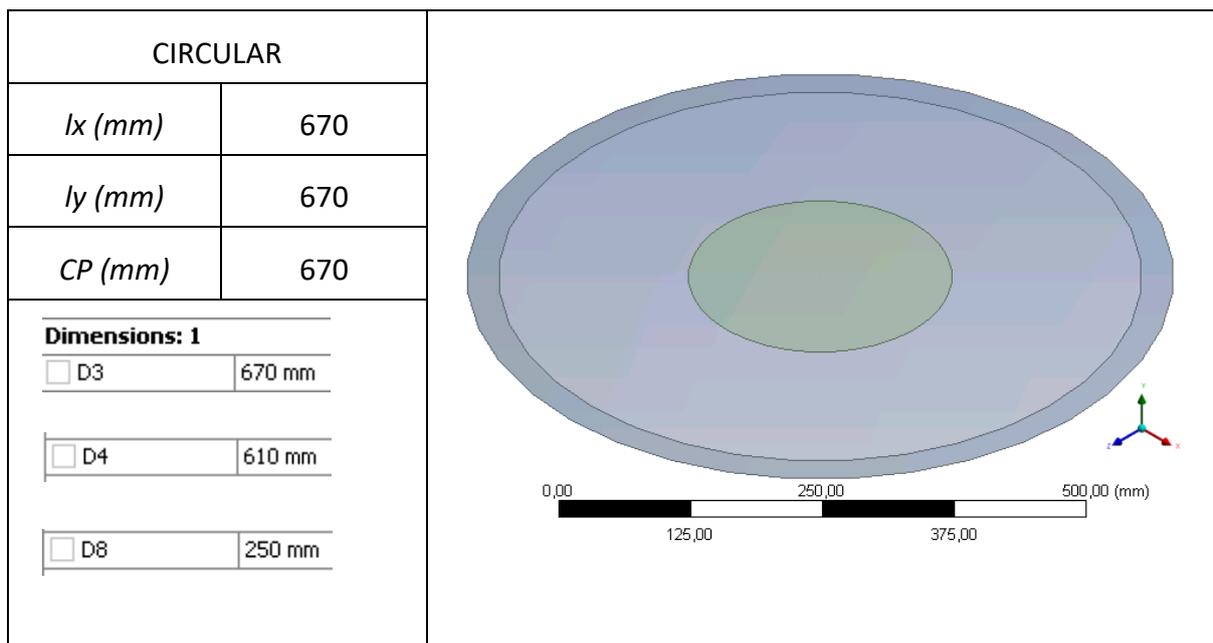
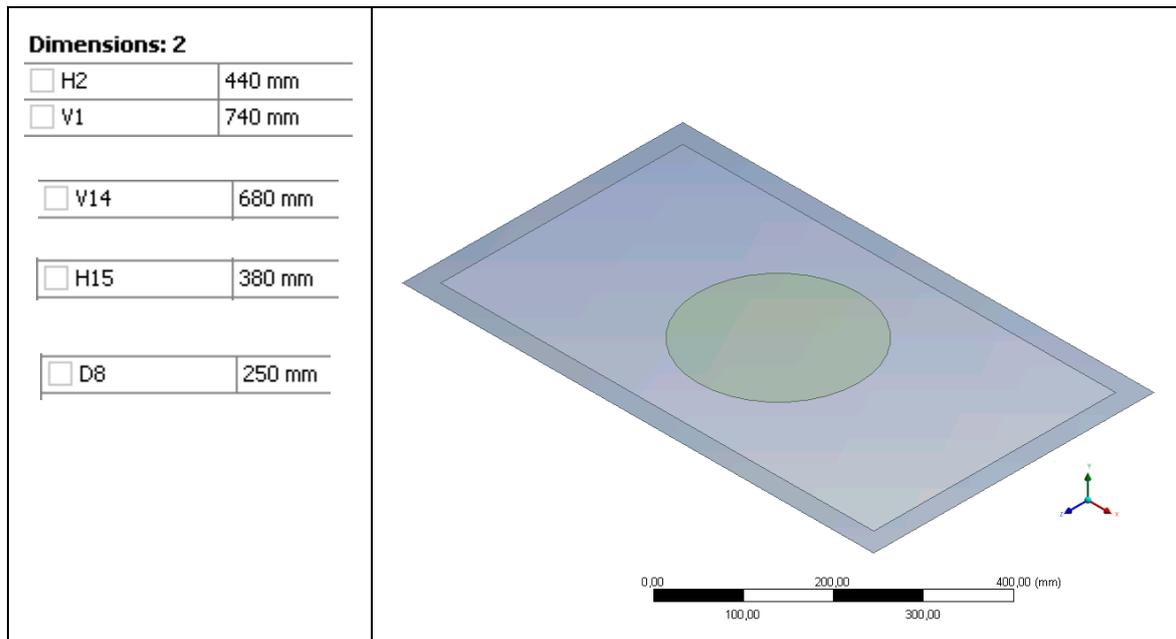
2.4.6.1. Geometrías estudiadas

Finalmente, tras obtener los resultados de la metodología analítica y utilizarlos para validar los modelos numéricos se puede dar el siguiente paso, realizar la simulación de ensayos numéricos mediante FEM obteniendo así una potente herramienta para el cálculo de las tapas de registro.

Las dimensiones de cada una de las tapas son iguales a las anteriormente mencionadas, con la salvedad de que en este caso, para simular fielmente los ensayos según norma, se ha de añadir un marco además de un bloque en el que se aplicará la carga de ensayo.



| RECTANGULAR | |
|-------------|-----|
| l_x (mm) | 740 |
| l_y (mm) | 440 |
| CP (mm) | 440 |



2.4.6.2. Descripción de los ensayos

Anexo A. Ensayo de flecha residual

Muestras de ensayo

Los dispositivos de cubrimiento y de cierre se han de ensayar como unidades completas en su posición de uso prevista, adecuadamente colocada en el marco y éste soportado de forma que replique la estructura de soporte de la instalación para la que está destinado. Los dispositivos a ensayar han de ser unidades nuevas que no hayan sido ensayadas con anterioridad y deben ser seleccionadas al azar.

Todos los dispositivos ensayados deben inspeccionarse visualmente sin aumentos.

Carga de ensayo de flecha residual

Debe aplicarse una carga de ensayo $F_p = 2/3 F_T$, 5 veces de forma consecutiva sobre la misma unidad para cada clase para todas las cotas de paso.

Equipo

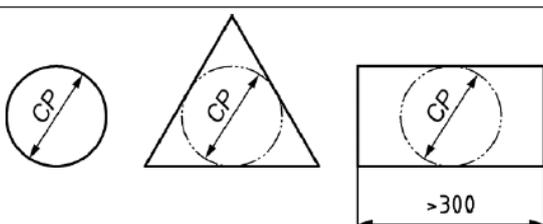
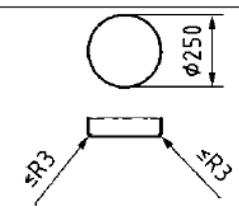
Ha de cumplir la clase 3 de la Norma EN ISO 7500-1:2004.

Preferiblemente se utilizará una prensa de ensayo hidráulico capaz de aplicar unas determinadas cargas para las distintas clases:

- Para clase A15 a clase D400 debe ser capaz de aplicar una carga un 25% superior a la F_T .
- Para clase E600 y F900 debe ser capaz de aplicar una carga un 10% superior a la F_T .

Las dimensiones de la base de la máquina deben ser mayores que el área de soporte de la unidad a ensayar.

Las dimensiones de los bloques de ensayo han de ser como se muestran en la siguiente tabla para geometrías cuyas cotas de paso estén entre 300 y 1000 mm.

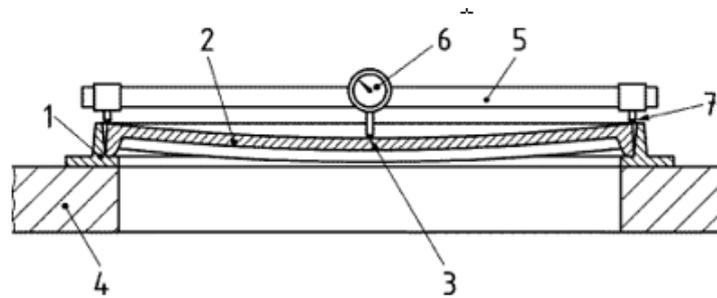
| Cota de paso | Forma del dispositivo de cubrimiento o de cierre | Medidas de los bloques de ensayo |
|------------------------|--|---|
| $300 < CP \leq 1\ 000$ |  |  |

Procedimiento

La muestra de ensayo debe colocarse sobre la máquina de ensayo y el marco debe apoyarse sobre la base de la máquina de ensayo de forma que se asegure que cuando se deforme la tapa o rejilla bajo la carga de ensayo, ésta debe permanecer no apoyada, y sin contacto con la base de la máquina de ensayo. La tapa o rejilla de la muestra de ensayo debe descansar normalmente en su marco. El bloque de ensayo debe colocarse sobre el centro geométrico de la tapa/rejilla con su eje vertical perpendicular a la superficie de la tapa o la rejilla.

La carga de ensayo debe estar uniformemente distribuida sobre la superficie total del bloque de ensayo y cualquier irregularidad debe compensarse por medio de una capa intermedia apropiada.

La medición de la flecha residual debe realizarse sobre el lado superior de la rejilla del dispositivo de cubrimiento o de la tapa del dispositivo de cierre en el mismo lugar que la carga de ensayo aplicada en la dimensión mayor que pueda inscribirse dentro de la tapa a través del punto central de la aplicación de la carga.



Leyenda

| | | | |
|---|------------------------------|---|---|
| 1 | Marco | 5 | Soporte del dispositivo de medición |
| 2 | Tapa o rejilla | 6 | Dispositivo de medición |
| 3 | Centro geométrico | 7 | Asiento del soporte del dispositivo de medición |
| 4 | Base de la máquina de ensayo | | |

La carga debe aplicarse hasta el valor de carga $F_p = 2/3 F_T$. Este procedimiento debe realizarse 5 veces sin interrupción significativa.

Se toma la lectura inicial, en el centro geométrico, antes de aplicar la primera carga y se toma también en el centro geométrico, la lectura final tras aplicar la quinta carga. Después se determina la flecha residual como la diferencia de las lecturas medidas antes de la primera y después de la quinta carga.

Anexo B. Ensayo de la capacidad de soporte de carga

Muestras de ensayo

Los dispositivos de cubrimiento y de cierre se han de ensayar como unidades completas en su condición de servicio. Se realiza inmediatamente después del ensayo de la flecha residual.

Carga de ensayo

Debe aplicarse una carga de ensayo F_T para cada clase, para todas las CP y todos los materiales.

Procedimiento

El equipo, la máquina, los bloques de ensayo, los dispositivos de medición y la aplicación de la carga de ensayo son los utilizados en el ensayo de flecha residual.

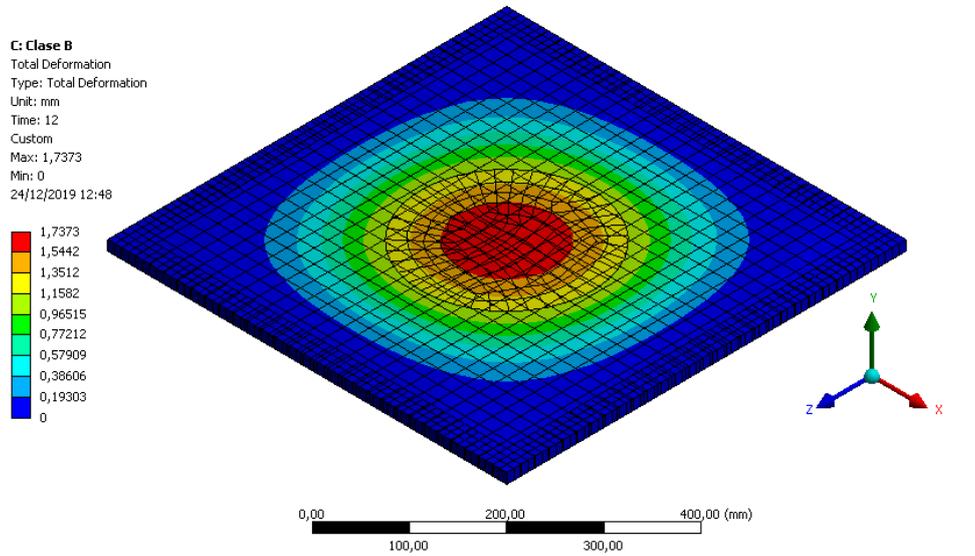
La carga de ensayo debe aplicarse igual que en el ensayo de flecha residual hasta alcanzar la carga de ensayo F_T , con la salvedad de que en este ensayo debe mantenerse aplicada la carga durante un determinado periodo de tiempo.

2.4.6.3. Resultados

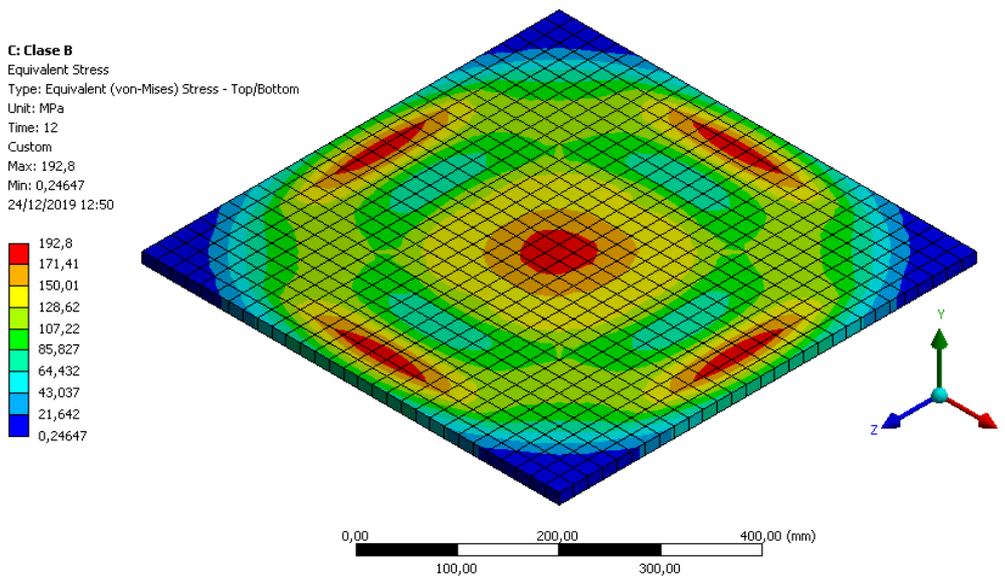
Tapas de registro de acero cuadradas

Los resultados mostrados indican que la tapa de registro cuadrada estará dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015. Para este tipo de acero no cumplirá clase C debido a que su flecha es muy elevada.

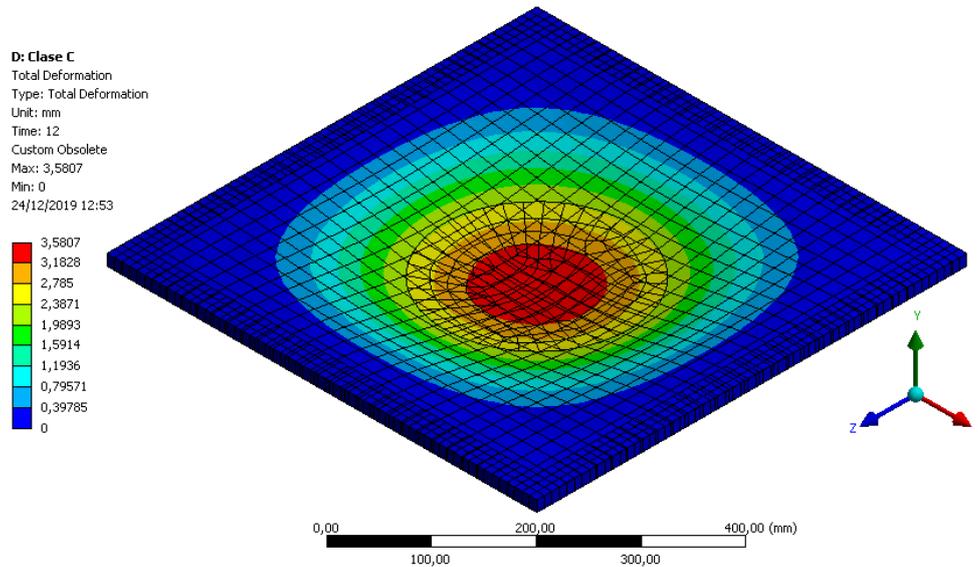
En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones obtenidas en la simulación:



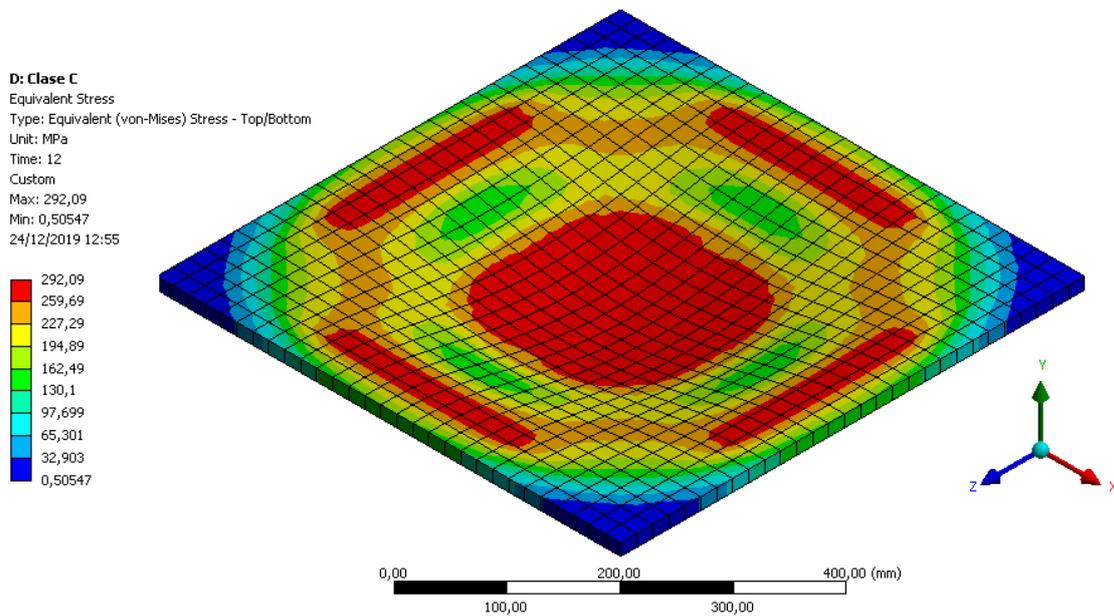
Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase B



Estado de tensiones de la tapa cuadrada de acero para clase B



Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase C

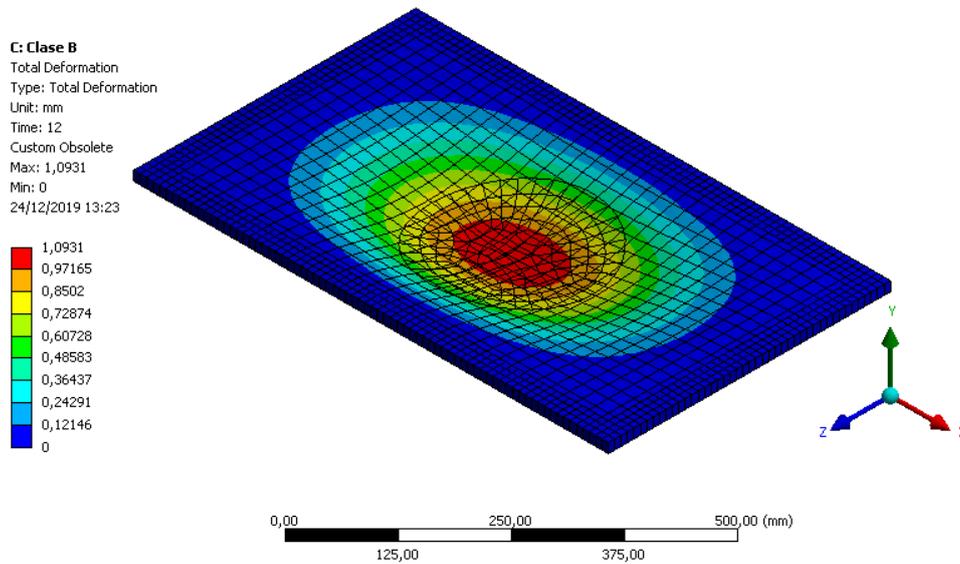


Estado de tensiones de tapa cuadrada de acero para clase C

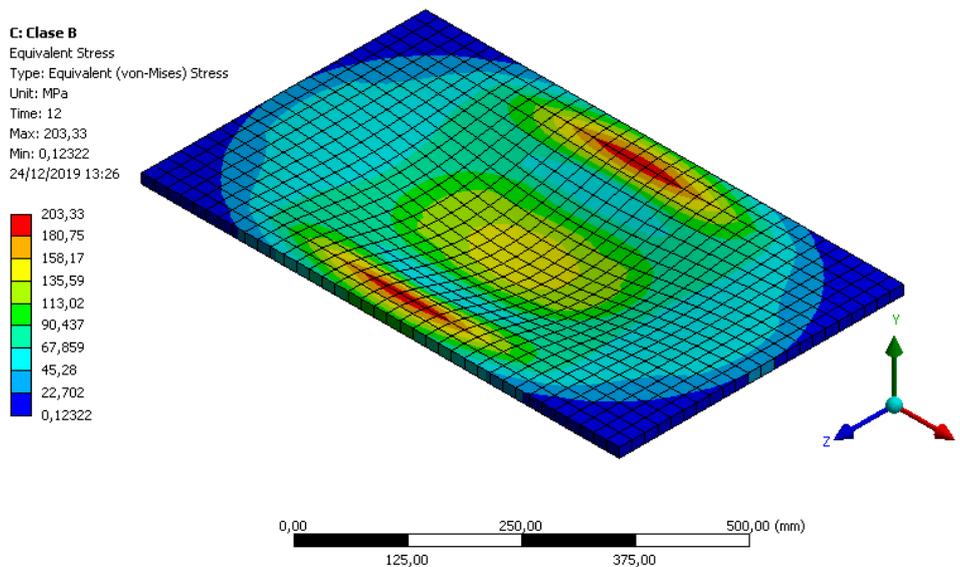
Tapas de registro de acero rectangulares

Los resultados mostrados indican que la tapa de registro rectangular estará dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015. Para este tipo de acero no cumplirá clase C debido a que su flecha es muy elevada, además su tensión también sobrepasa la tensión admisible del material.

En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones obtenidas en la simulación:



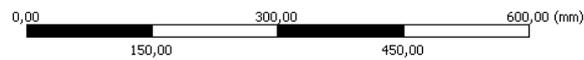
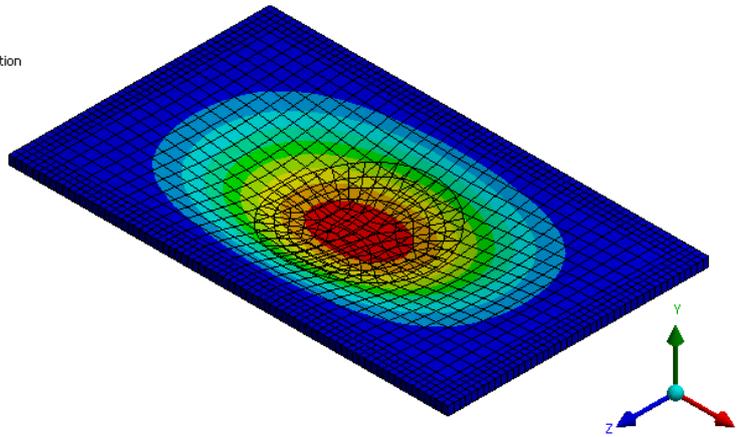
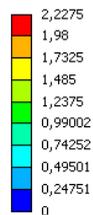
Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase B



Estado de tensiones de la tapa cuadrada de acero para clase B

D: Clase C

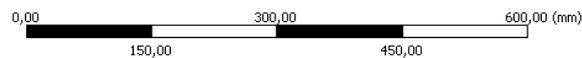
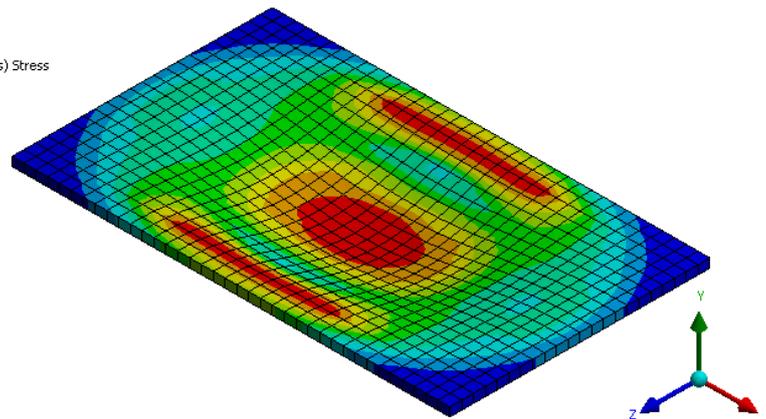
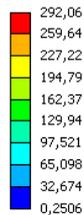
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 12
Custom Obsolete
Max: 2,2275
Min: 0
24/12/2019 13:29



Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase C

D: Clase C

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 12
Custom
Max: 292,06
Min: 0,2506
24/12/2019 13:30

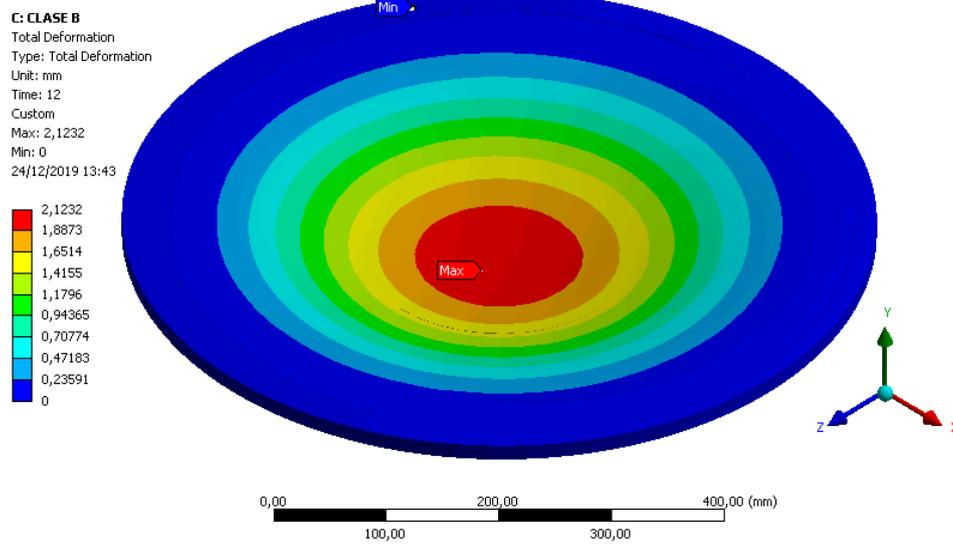


Estado de tensiones de tapa cuadrada de acero para clase C

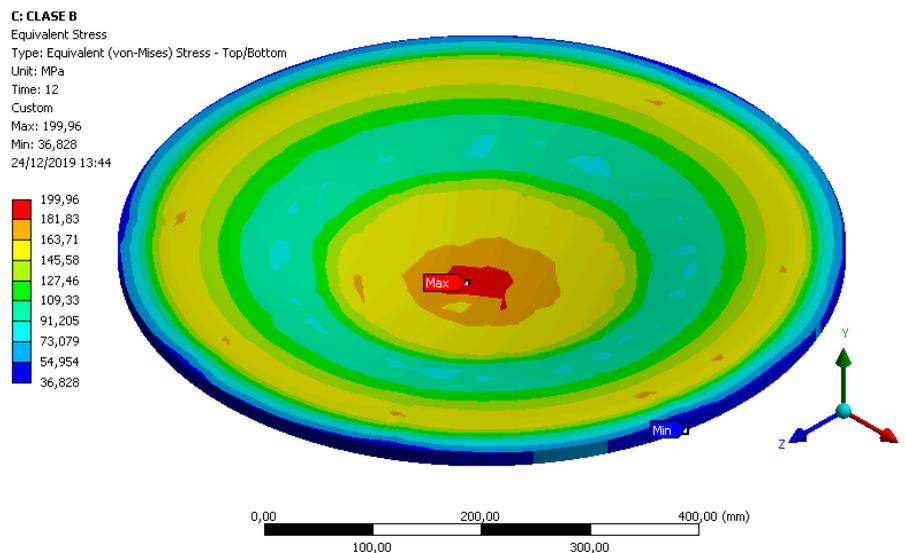
Tapas de registro de acero circulares

Los resultados mostrados indican que la tapa de registro circular estará dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015. Para este tipo de acero no cumplirá clase C debido a que su flecha es muy elevada, además su tensión también sobrepasa la tensión admisible del material.

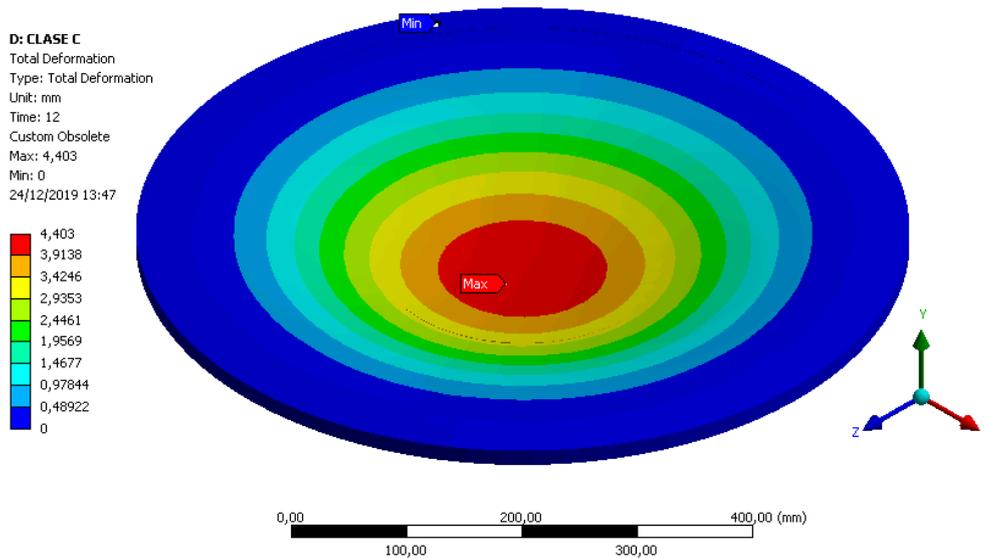
En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones obtenidas en la simulación:



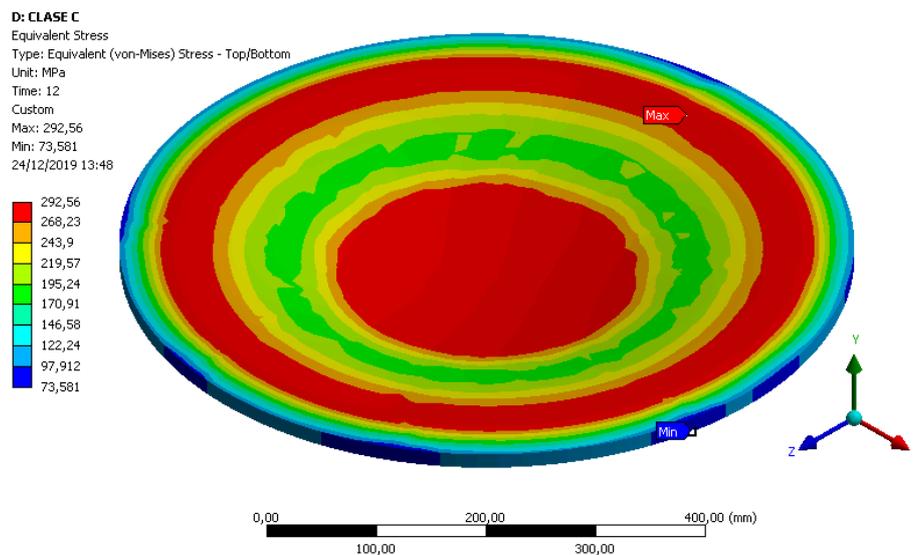
Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase B



Estado de tensiones de la tapa cuadrada de acero para clase B



Deformación total de la tapa cuadrada de acero para clase C



Estado de tensiones de tapa cuadrada de acero para clase C

Hormigón y Hormigón ligero estructural (HLE)

Se ha realizado también una simulación de las distintas geometrías de tapas de registro tanto en hormigón como en hormigón ligero estructural. Los datos obtenidos han sido muy similares entre uno y otro material puesto que sus propiedades son muy similares.

Antes de simular estos materiales ya se preveía que los resultados obtenidos no serían de mucha importancia puesto que al estar sometiendo las tapas de registro a distintas fuerzas de compresión, los esfuerzos obtenidos en determinadas zonas de la tapa serían esfuerzos de tracción muy elevados. Puesto

que los hormigones tienen unas tensiones admisibles a tracción muy bajas, en torno a los 4-5 MPa, era de esperar que las tapas no aguantasen dichos esfuerzos.

Por tanto la solución por la que se optó fue realizar unas tapas de registro con una combinación de materiales, en concreto que combinaran el acero y el hormigón.

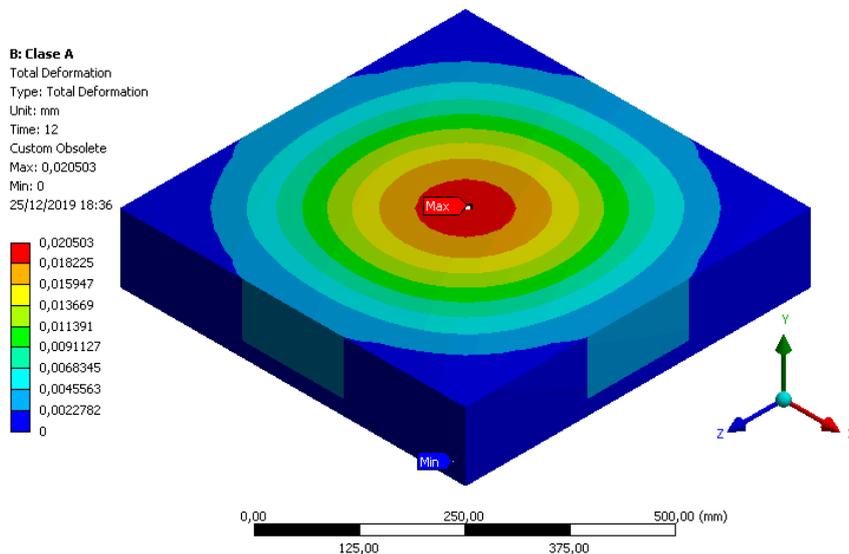
Combinación de materiales

Como se ha descrito anteriormente, se tratará de hacer una tapa que combine un núcleo de acero en su parte inferior más un recubrimiento de hormigón en la parte superior. De esta manera se hace que el acero trabaje en la zona donde habrá más esfuerzos de tracción mientras que el hormigón servirá como recubrimiento además soportará determinados esfuerzos de compresión debido a que está en la zona superior donde se producirán mayormente esfuerzos de compresión.

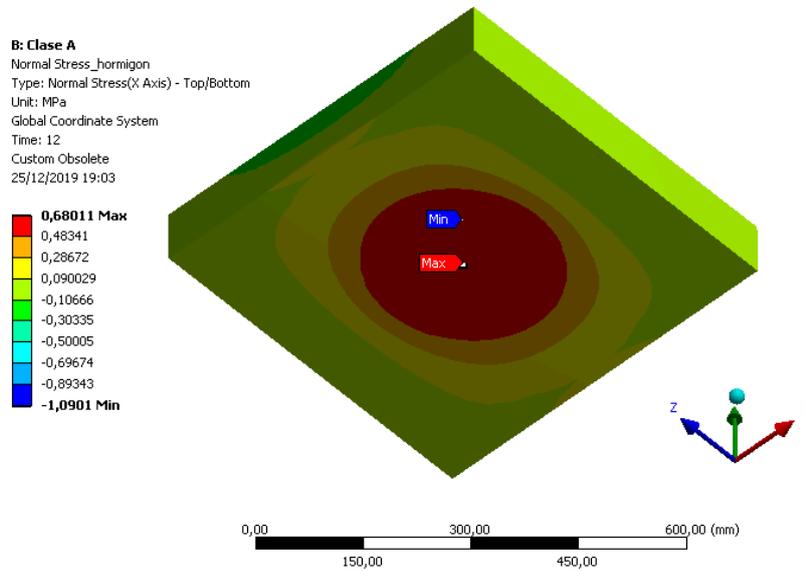
Tapas de registro cuadradas de hormigón y acero

Los resultados mostrados indican que la tapa de registro cuadrada estará dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015. Para este tipo de hormigón no cumplirá clase C debido a que su tensión es muy elevada.

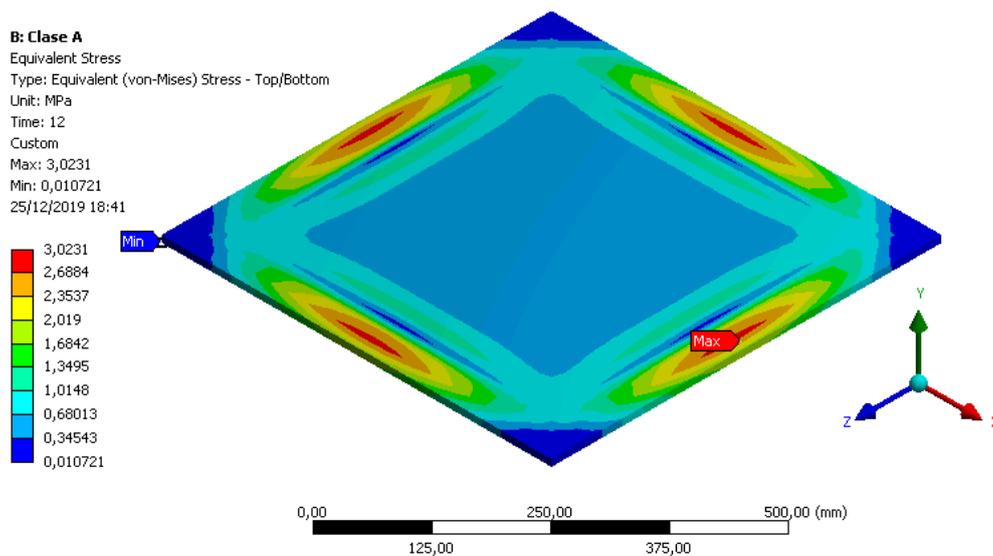
En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones (tanto en el hormigón como en acero) obtenidas en la simulación:



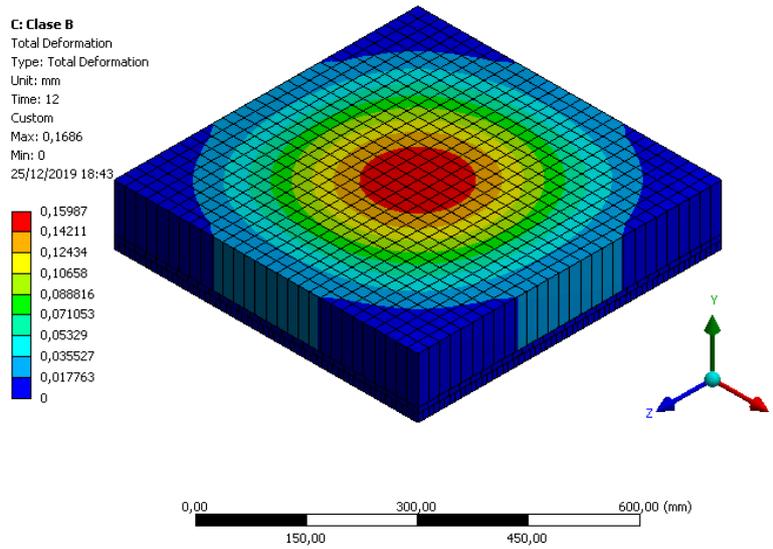
Deformación total de la tapa para clase A



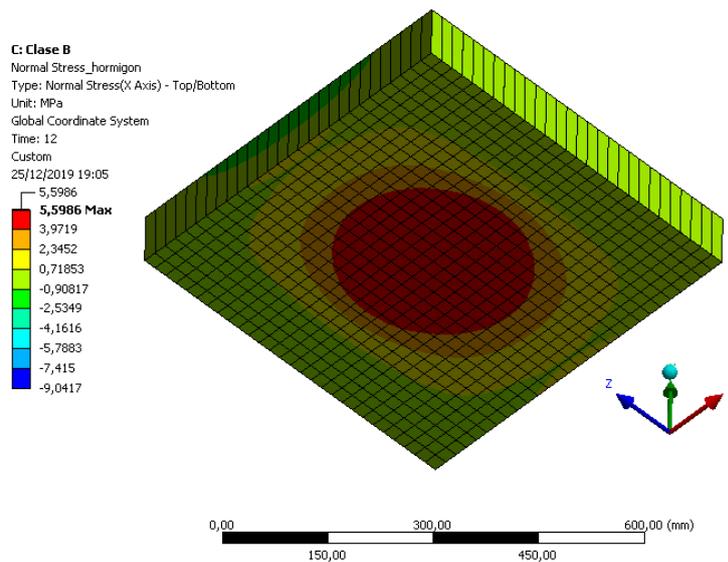
Estado de tensiones en el hormigón para clase A



Estado de tensiones en el acero para clase A



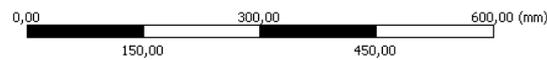
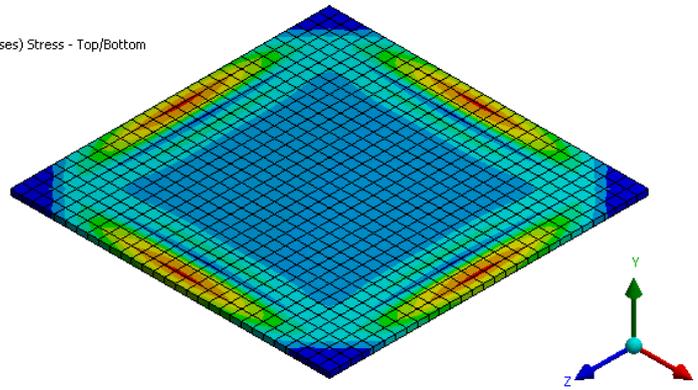
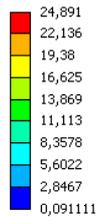
Deformación total de la tapa para clase B



Estado de tensiones en el hormigón para clase B

C: Clase B

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 12
Custom Obsolete
Max: 24,891
Min: 0,091111
25/12/2019 18:48



Estado de tensiones en el acero para clase B

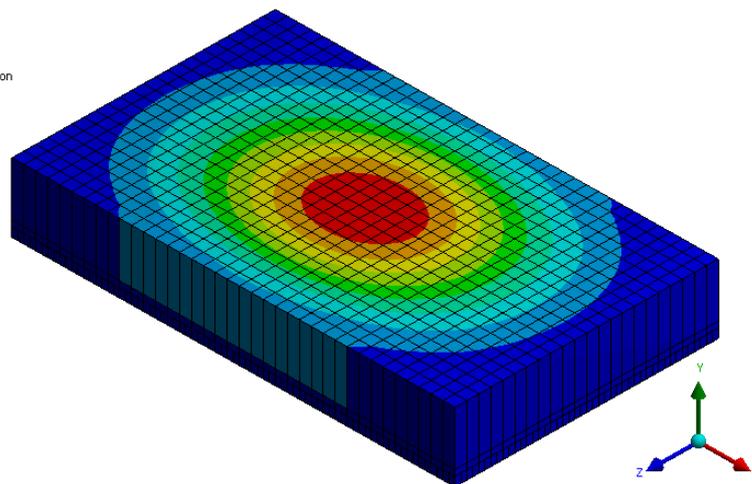
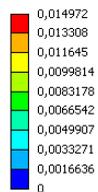
Tapas de registro rectangulares de hormigón y acero

Los resultados mostrados indican que la tapa de registro rectangular estará dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015. Para este tipo de hormigón no cumplirá clase C debido a que su tensión sobrepasa la tensión admisible del material.

En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones obtenidas en la simulación:

B: Clase A

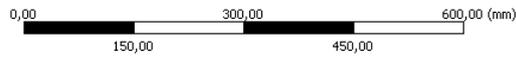
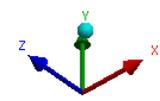
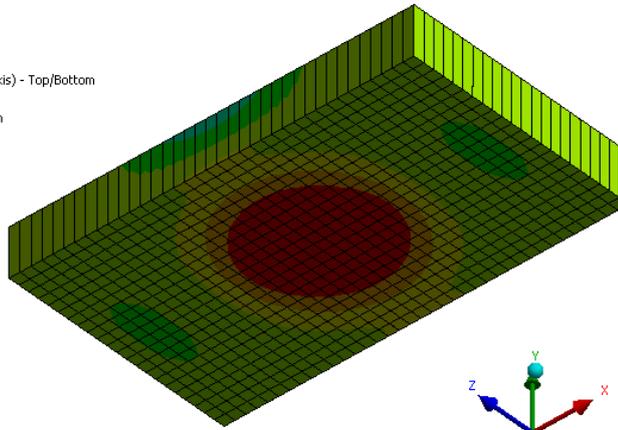
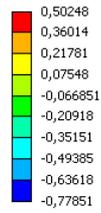
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 12
Custom
Max: 0,015999
Min: 0
25/12/2019 18:52



Deformación total de la tapa para clase A

B: Clase A

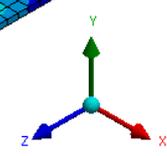
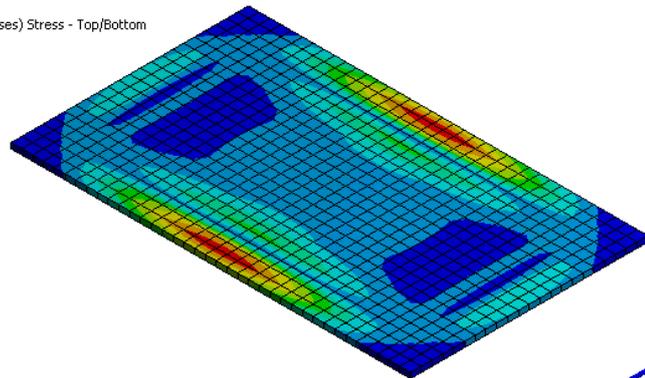
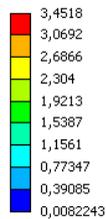
Normal Stress_hormigon
 Type: Normal Stress(X Axis) - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 12
 Custom
 Max: 0,50248
 Min: -0,77851
 25/12/2019 18:53



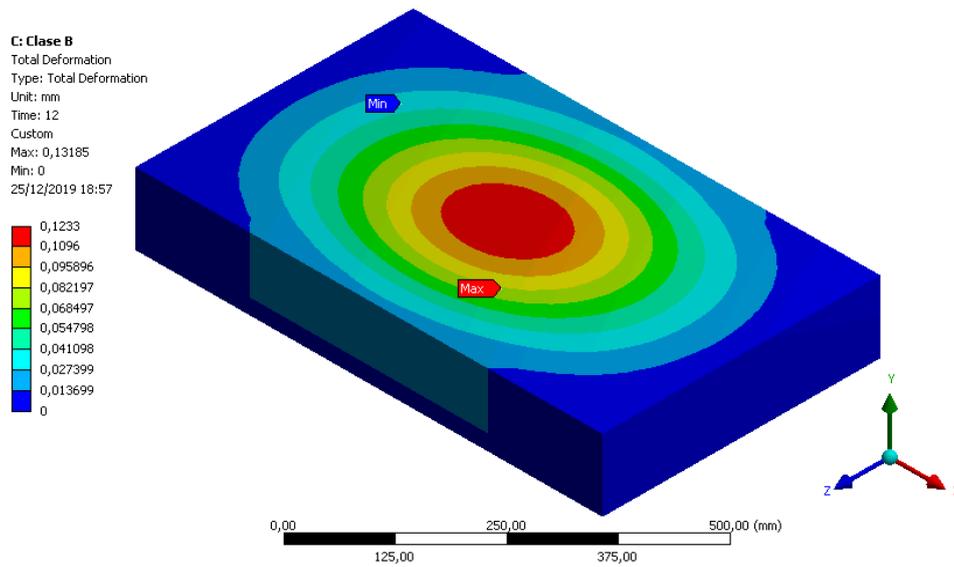
Estado de tensiones en el hormigón para clase A

B: Clase A

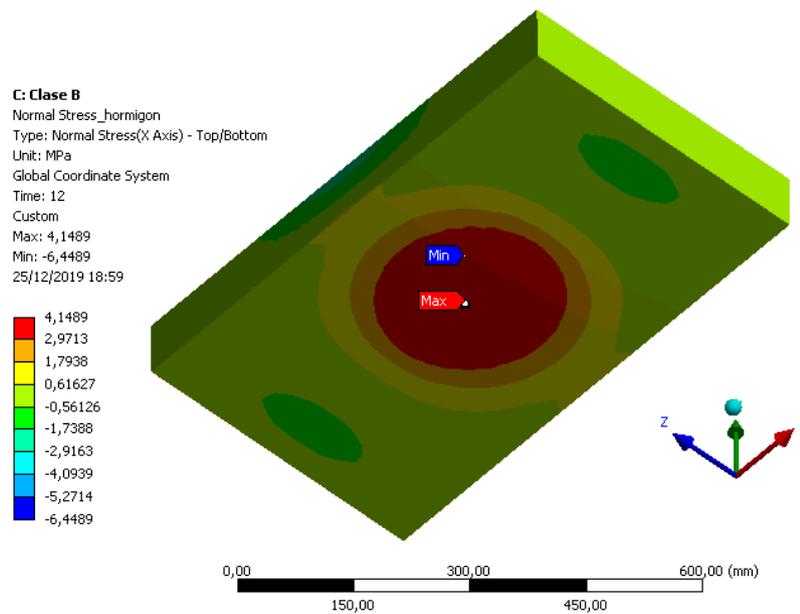
Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 12
 Custom Obsolete
 Max: 3,4518
 Min: 0,0082243
 25/12/2019 18:55



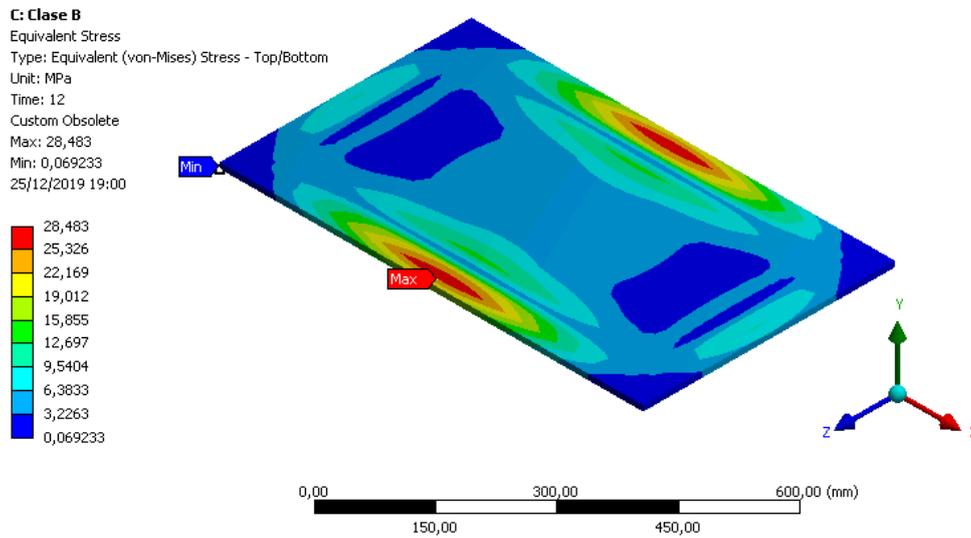
Estado de tensiones en el acero para clase A



Deformación total de la tapa para clase B



Estado de tensiones en el hormigón para clase B

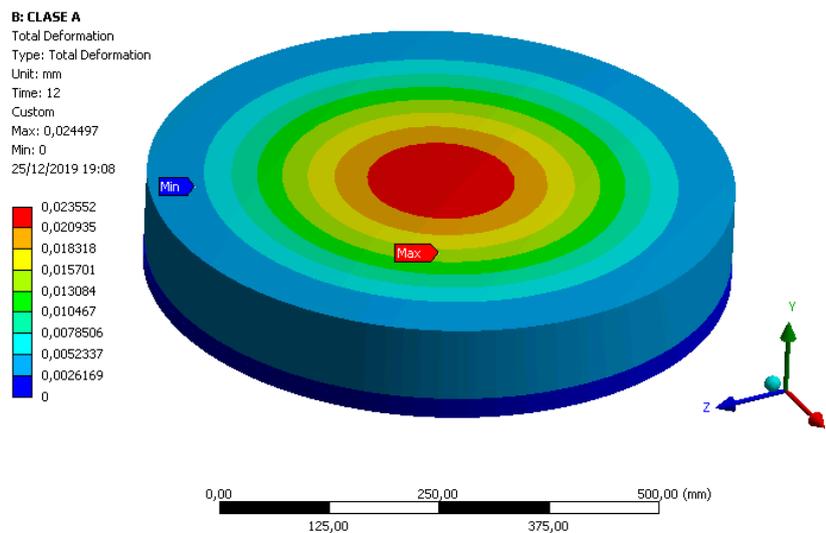


Estado de tensiones en el acero para clase B

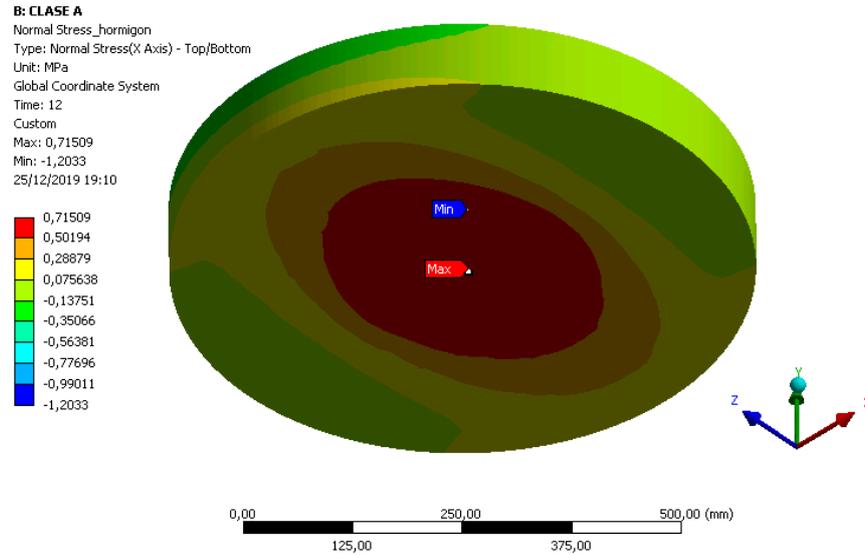
Tapas de registro circulares de hormigón y acero

Los resultados mostrados indican que la tapa de registro circular estará dentro de la clase B según la norma UNE 124-1:2015. Para este tipo de hormigón no cumplirá clase C debido su tensión sobrepasa la tensión admisible del material.

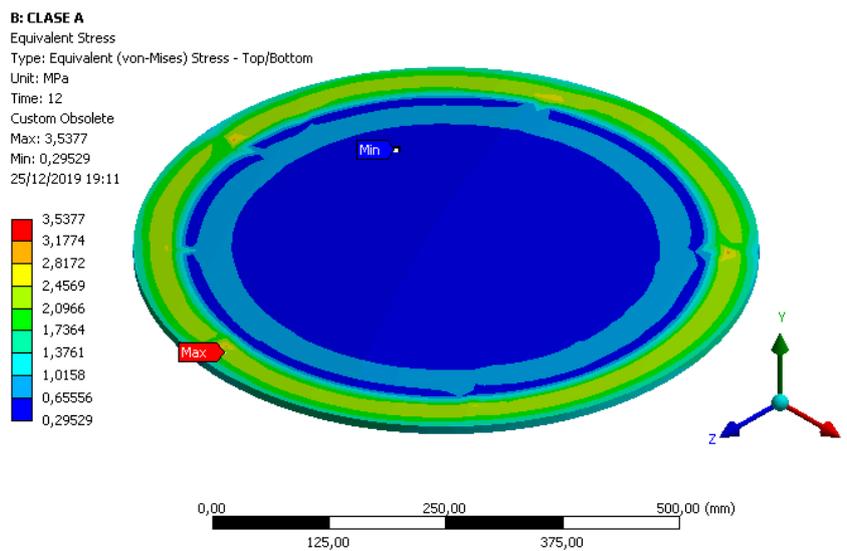
En las siguientes imágenes se observan los desplazamientos y las tensiones obtenidas en la simulación:



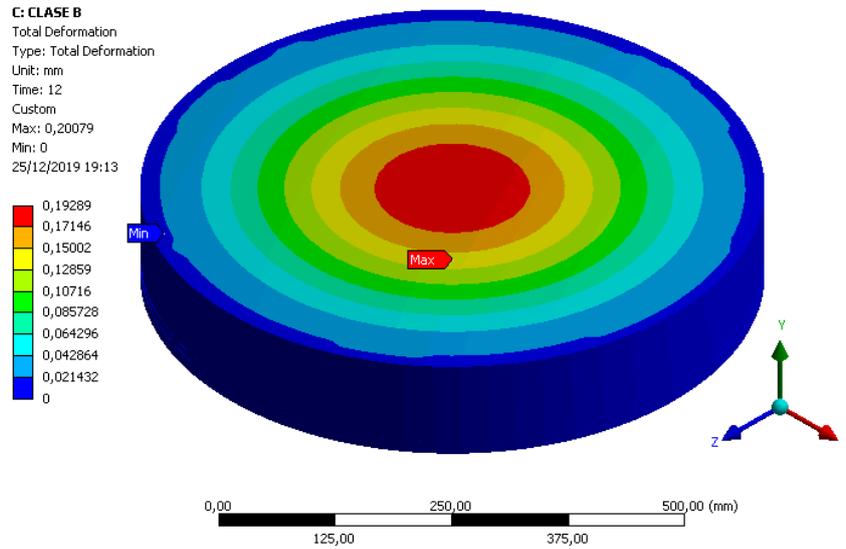
Deformación total de la tapa para clase A



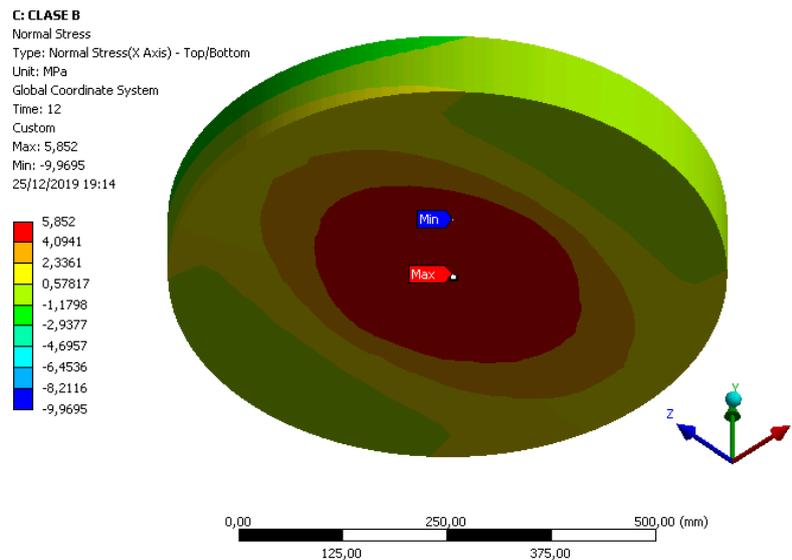
Estado de tensiones en el hormigón para clase A



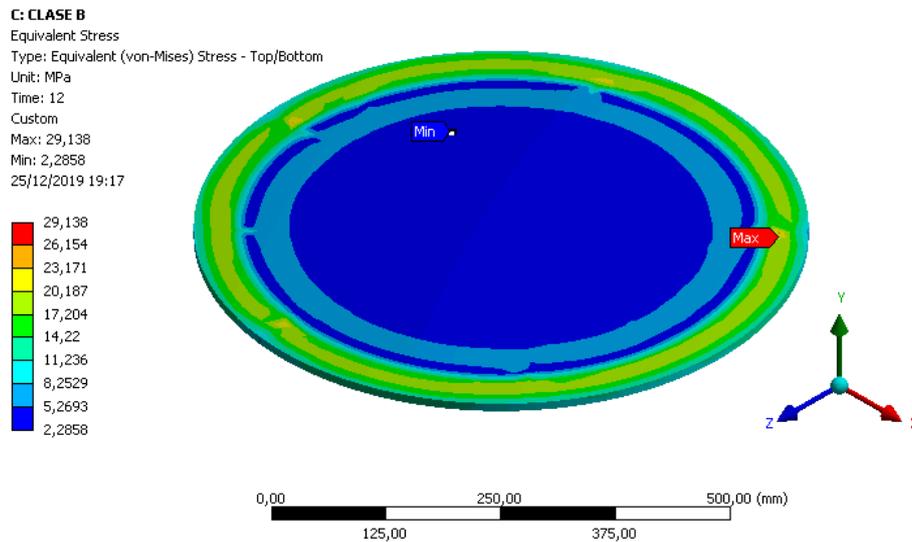
Estado de tensiones en el acero para clase A



Deformación total de la tapa para clase B



Estado de tensiones en el hormigón para clase B



Estado de tensiones en el acero para clase B

2.4.7. Conclusiones

De este trabajo se han extraído varias conclusiones relativas a la metodología más adecuada para realizar un análisis estructural de tapas de registro considerándolas placas delgadas que trabajan a flexión. Una de las principales conclusiones es que en la mayoría de los casos, los métodos analíticos simplificados permiten tener una orientación aproximada de la respuesta estructural de las tapas de registro. Sin embargo, mediante el método FEM se pueden conseguir resultados mucho más precisos. Esto es principalmente debido a las simplificaciones que se llevan a cabo en los métodos de cálculo tradicionales aplicando la teoría de placas. En estos métodos, la placa se define como dos vigas ortogonales cuya flecha central es igual y se desprecian los efectos derivados de los momentos torsores combinados presentes en las placas. Esta simplificación flexibiliza la placa y proporciona tensiones inferiores a las reales.

Esta afirmación se puede llevar a cabo tras comprobar sobre el software comercial de cálculo por elementos finitos (Ansys Workbench) que el comportamiento de las tapas de registro sigue una lógica coherente con la realidad y no se observa ningún comportamiento anómalo fuera de lo esperado.

Respecto a los cálculos realizados, se puede concluir que el fallo habitual en las tapas de registro metálicas es por flecha, mientras que el fallo más habitual en las tapas de registro de hormigón y de combinación de hormigón y acero, tanto normal como ligero, es por resistencia en la zona de tracción.

El uso de hormigón ligero estructural para la fabricación de estas tapas de registro parece una buena alternativa al acero. Estructuralmente, el comportamiento es muy semejante al del hormigón tradicional, pero se puede reducir notablemente el peso de la tapa, lo cual facilita la labor de colocación y mantenimiento. La combinación de este hormigón ligero con un pequeño refuerzo de acero da lugar a tapas resistentes de clase A y B que suponen una solución sostenible y eficiente estructuralmente.

Finalmente se puede concluir que la herramienta de simulación obtenida servirá de gran ayuda para reproducir los ensayos que se han de realizar obligatoriamente según norma sin necesidad de realizarlos in

situ en el laboratorio. Esta metodología numérica reduce notablemente los costes de la empresa en el estudio de nuevos materiales. En este proyecto, no se han probado más materiales dado que para soportar las cargas aplicadas en tapas de registro de clase B o superiores es necesario un refuerzo metálico, de acero, que mejore el comportamiento mecánica. La solución final de este proyecto es una tapa de hormigón ligero reforzada con acero. Su peso se ve ligeramente incrementado, pero muy por debajo del peso del hormigón tradicional. El hormigón ligero es un material reciclable y con un menor impacto medioambiental. El refuerzo de acero, no supone un atractivo para los hurtos puesto que además de encontrarse embebido en el hormigón lo que genera una difícil extracción, la cantidad de acero que se utiliza es mucho menor.

2.5 Trabajos o necesidades futuras

Una posible línea futura de esta investigación sería realizar un estudio de fatiga sobre los diseños óptimos.

Otra posible línea futura sería incluir en el estudio materiales más avanzados como polímeros reforzados con fibras (PRF). Estos materiales pueden llegar a tener elevada resistencia, y no son atractivos para su hurto. Son materiales ligeros y pueden llegar a tener un buen comportamiento estructural, aunque un aspecto importante que puede dificultar su uso en esta aplicación concreta es la viabilidad económica de estos materiales. Por este motivo, no se han estudiado en este proyecto ya que su elevado coste lo hacen un material poco atractivo.

Finalmente, sería interesante realizar algún ensayo experimental de los diseños combinados de acero y hormigón ligero para validar los resultados de la simulación numérica.

2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias...)

Asistencia al Congreso Rebuild 2019 en septiembre en Madrid.

3. MEMORIA ECONÓMICA

| Financiación | | Personal | Inventariable | Fungible | Otros gastos |
|---|------------------------------|---|---------------|----------|--------------|
| IUTA | SV-19-GIJÓN-24. | | | | |
| Otras fuentes | Referencia proyecto/contrato | | | | |
| Estudiante con ayuda a la investigación | Nombre | David López Fernández | | | |
| | Tareas | Simulaciones numéricas en base a la normativa vigente | | | |
| | Período | | | | |

4. OTROS PROYECTOS Y CONTRATOS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

| | |
|--------------------------------|--|
| Título del proyecto/contrato | |
| Referencia | |
| Investigador/a/es principal/es | |
| Equipo investigador | |
| Periodo de vigencia | |
| Entidad financiadora | |
| Cantidad subvencionada | |