

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA SUPERIOR Y TECNICA DE INGENIERIA AGRARIA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE  
CANALES DE RIEGO DE HORMIGÓN REFORZADO  
CON FIBRA DE VIDRIO**

**TESIS DOCTORAL**

AUTOR: D. JOSE A. CASASOLA ALVAREZ. INGENIERO AGRÓNOMO

DIRECTORES: D. JOSE LUIS MELÉNDEZ FALKOWSKI. DOCTOR INGENIERO AGRÓNOMO  
D. LUIS RICOTE LÁZARO. DOCTOR INGENIERO AGRÓNOMO

2012



A la memoria de CAMINO, mi esposa

A mi niña



## AGRADECIMIENTOS

A D. José Luis Meléndez Falkowski y D. Luis Ricote Lázaro, directores de esta Tesis, por su inestimable paciencia, comprensión y apoyo.

A D. Luis Javier Campillo Llamas, Ingeniero Agrónomo, por su apoyo constante y ayuda en todo momento.

A Dña. Camino Fuertes Pertejo, por su apoyo constante y comprensión.

A Noelia y Rosalina, por su apoyo y comprensión.

A Mar y Maite, por sus ánimos.



## Índice general

- 1 INTRODUCCIÓN**
- 2 MATERIAL Y MÉTODOS**
- 3 RESULTADOS**
- 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS**
- 5 VERIFICACIÓN DEL MODELO**
- 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURAS**



# **1 INTRODUCCIÓN**

Índice

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN .....	3
1.2	ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL .....	5
1.3	OBJETIVOS.....	8
1.4	METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO .....	9

## 1.1 MOTIVACIÓN

La presente Tesis Doctoral se enmarca en el campo de los nuevos materiales, en concreto, el empleo de materiales compuestos de hormigón reforzado con fibra de vidrio en la fabricación de conducciones hidráulicas abiertas.

Significa una derivada del Proyecto de Investigación y Desarrollo, en el área de Tecnología de Materiales, financiado por el Plan Nacional de I+D (cofinanciado con Fondos Feder), denominado “Aplicaciones del hormigón reforzado con fibras de vidrio y GRC en el sector Agrario” desarrollado por el Equipo de Investigación de Ingeniería de Materiales de la Universidad de León, a través del Instituto de Investigación de Recursos Naturales, con la colaboración de las empresas Vetrotex España S.A. y Dragados.

Uno de los resultados aportados por el Proyecto de Investigación y Desarrollo, fue la concesión del registro número P200301443 (8) de Propiedad Industrial, por la Oficina Española de Patentes y Marcas, de la Patente de Invención “Sistema de conducción hidráulica abierta de mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC) aligerado”, a la Universidad de León, a quien sus autores el Prof. Dr. D. José Luis Meléndez Falkowski, el Prof. Dr. D. Luis Ricote Lázaro y el equipo de investigación, cedieron su titularidad.

La patente de invención comprende un sistema de conducción hidráulica abierta formado por tramos lineales y cualquier otra pieza habitualmente usada en este tipo de canales caracterizado por estar fabricado con laminas de mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC) dispuestas en forma de estructura aligerada tridimensional en la que los huecos pueden rellenarse de un material ligero, tipo poliestireno, poliuretano, panel de abeja, corcho, o similares, así como, un procedimiento para su fabricación en el que los elementos se fabrican por proyección de GRC sobre un molde en laminas y la inserción entre ellas de bloques de varias formas del material ligero anteriormente mencionado. La sección de las conducciones puede ser de forma trapecial, semicircular, rectangular o cualquier combinación de ellas y pueden ir reforzadas con rigidizadores exteriores transversales o longitudinales del mismo material.

El contenido de esta Tesis Doctoral pretende realizar el análisis del comportamiento mecánico de los elementos de hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC) proyectados de acuerdo con los requisitos anteriores, previa optimización de sus variables de diseño y dimensiones.

La implantación de nuevos sistemas de riego que reduzca el consumo de agua hace que cada día la superficie de riego por aspersion o goteo siga creciendo, reduciendo la superficie que utiliza la técnica de gravedad, el 31 % de la superficie. Los más de un millón de hectáreas que emplean este sistema de riego por gravedad hacen suponer que

la longitud de las canalizaciones que conducen esa agua representa miles de Km de canales. Pero también supone que la utilización de conducciones abiertas no sólo se utiliza para el abastecimiento de agua para el riego por gravedad, sino que se utiliza con otras técnicas de riego. Canales de hormigón armado o tierra son los empleados con tal fin. La utilización de canales de hormigón sufren pérdidas a lo largo de ellos, y en los canales de tierra las pérdidas de agua se multiplican. Con esta Tesis Doctoral se pretende aportar nuevos materiales para la fabricación de estas conducciones que permitan sustituir las existentes o eliminar los canales de tierra.

Esta Tesis Doctoral continúa con el estudio de mejora de las conducciones abiertas de agua actuales. El equipo de Investigación de Ingeniería de Materiales de la Universidad de León y dirigidos por el Profesor Meléndez Falkowski han investigado la situación de las conducciones de riego en la provincia de León. El estado lamentable de las conducciones hace necesario, en muchos casos, remplazarlas por otras nuevas, se sigue utilizando conducciones de tierra. Reducir las pérdidas de agua durante la conducción es fácil de llevar a cabo empleando nuevos materiales para su fabricación. Cambiar el método de riego empleando sistemas de riego que ayuden a reducir el consumo del líquido elementos, reducirían despilfarro que se hace en estos momentos. Pero hay que tener en cuenta que las mayores pérdidas se pueden producir durante la conducción hasta los lugares de consumo, no sólo agrícola.



Detalle del ensamblado de dos canales



Ejemplo del estado de algunas conducciones

Este estudio, sobre la aplicación de nuevos materiales en la fabricación de canales de riego, comenzó con la Tesis Doctoral "Análisis del comportamiento mecánico de elementos para conducciones hidráulicas abiertas en poliéster reforzado con fibra de vidrio" del Doctor Ingeniero Agrónomo D. Luis Ricote Lázaro. Continuó con el trabajo de investigación sobre "El GRC, tecnología de nuevos materiales para la fabricación de canales de riego" llevado a cabo por los Doctores D. José Luis Meléndez Falkowski y D. Luis Ricote Lázaro.

## **1.2 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL**

El Preámbulo de la Ley de Aguas 29/85 dice: "El agua como recurso escaso para la vida y para el ejercicio de la mayoría de las actividades económicas; es irremplazable no ampliable por la mera voluntad del hombre, irregular es su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos excesivos". La Ley considera que el agua es un recurso unitario, sin distinguir entre aguas continentales, superficiales y subterráneas, integrando todas en el ciclo hidrológico, y que debe estar subordinada al interés general. Por lo tanto declara el dominio público estatal de todas las aguas, pero respetando los derechos adquiridos por los particulares al amparo de la legislación anterior.

El agua constituye un factor de producción muy importante en aquellas zonas agrícolas cuya utilización se hace necesaria para racionalizar o incrementar las producciones. La demanda de agua, en general, viene determinada por el triple uso que de ella puede hacerse: para producción energética, para abastecimientos y saneamientos y para regadíos. Estos constituyen el capítulo fundamental de las demandas (90% del total). El agua constituye, en la mayor parte de los casos, el factor limitante más importante de la empresa agraria; por ser el elemento esencial de la nutrición de la planta y el compuesto más abundante en ella. Teniendo en cuenta que los cultivos corrientes consumen aproximadamente el agua equivalente a 500-600 mm de lluvia, dichas necesidades no quedan cubiertas en numerosas regiones españolas.

A parte de la importancia del agua sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas, cabe la posibilidad de su utilización con otros fines: defensa antihelada (aspersores en plantaciones frutales), regulación térmica de las plantas y el suelo, fertirrigación, tratamientos fitosanitarios, agente de limpieza.

Los cultivos de regadío disponen de una mayor gama de posibilidades de cultivo: adelanto o retraso de las siembras o recolecciones, aumento de las posibilidades de alternativas y rotación de cultivos, etc. En general, permiten un mayor escalonamiento en

todo tipo de labores culturales, con las consiguientes consecuencias técnicas y económicas para una explotación agraria.

De todo lo anteriormente expuesto se desprende la importancia del agua como factor de producción de la empresa agraria. Para un mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos es preciso corregir los dos graves defectos que presenta:

- Irregularidad en el tiempo. Se soluciona mediante la regulación de los caudales disponibles durante el año, lo que obliga a la construcción de gran número de presas, complementada con la captación de aguas subterráneas.
- Irregularidad en el espacio. La vertiente Nor-Atlántica (País Vasco, Cantabria, Asturias y Galicia) con sólo el 12% de la superficie total del país, dispone de más de la tercera parte de los recursos naturales hidráulicos, circunstancia que ha originado su denominación como la España húmeda, y la España seca constituida por el resto de la Península, Baleares y Canarias.

Habitualmente se relaciona el sistema de riego por gravedad con la utilización de conducciones abiertas para la distribución del líquido elemento. En España se riegan más de tres millones de hectáreas, de estas un 31 % son regadas por el sistema de gravedad lo que supone miles de km de canalizaciones para conducir el agua desde los lugares donde se captada hasta las zonas de riego. Pero otros sistemas emplean este tipo de conducciones para permitir la captación del agua por los agricultores.

Las canalizaciones hidráulicas son tan antiguas como la propia civilización. De las primeras canalizaciones, pasando por las obras de ingeniería hidráulica de romanos y árabes, hasta nuestros días, el desarrollo tecnológico ha permitido disponer de variedad de soluciones, para uso urbano y agrario, aunque aún puedan observarse redes de canalizaciones sin revestimiento en numerosas zonas de regadíos.

Los materiales de construcción como el acero, hormigón armado, fibrocemento, etc. se han empleado habitualmente como elementos estructurales en la ingeniería civil debido a sus características técnico-económicas favorables. Esto ha hecho que los materiales compuestos no se hayan tenido en cuenta, en lo que también ha podido influir el desconocimiento de las técnicas de cálculo y diseño empleando estos materiales. La aparición de programas de cálculo por elementos finitos nos ha permitido realizar cálculos relativamente sencillos, con una aceptable precisión, mostrándose un cierto interés por el empleo de estos materiales en estos momentos en obras de ingeniería civil.

En esta línea de investigación de nuevas aplicaciones de los materiales compuestos se enmarca esta Tesis Doctoral. Se pretende estudiar el empleo de los materiales compuestos en la fabricación de conducciones hidráulicas abiertas utilizadas

para la canalización de aguas, tales como redes de abastecimiento, de regadío, de drenaje o similares.

Habitualmente, los canales se fabrican en hormigón vibrado o armado. El hormigón es un material pesado y por ello su manipulación necesita de medios mecánicos. Además, el hormigón es un material frágil y muy sensible a las dilataciones, por tanto, en condiciones extremas de temperatura, pueden producirse daños importantes.

El hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC) está adquiriendo cada vez mayor importancia en el sector de la construcción, representando una alternativa viable a los materiales tradicionales. Su sencillo proceso de fabricación y sus propiedades le convierten en un material versátil y con numerosas aplicaciones. Se trata de un material más ligero que el hormigón y con mejores características mecánicas. Está constituido por morteros de cemento reforzado con fibras de vidrio. La fibra le confiere al material las propiedades de perdurabilidad, resistencia a la tracción, al impacto, a los agentes atmosféricos y a la corrosión, resistencia a la propagación de fisuras, menor peso propio de los elementos y aptitud para ser moldeado, propiedades que le hacen interesante. En el proceso de fabricación se reduce la formación de fisuras y grietas por contracción plástica, y en servicio por deformaciones elásticas.

“La resistencia de materiales tiene por objetivo establecer los criterios que nos permitan determinar el material más conveniente, la forma y las dimensiones más adecuadas que hay que dar a los elementos de una construcción o de una máquina para que puedan resistir la acción de las fuerzas exteriores que los solicitan, así como para obtener este resultado de la forma más económica posible”.

El objetivo de este proyecto es realizar el análisis del comportamiento mecánico de los canales de riego de hormigón reforzado con fibra de vidrio, realizar su dimensionamiento, estableciendo el sistema de cargas que lo solicitan, calcular sus dimensiones para que las tensiones o esfuerzos internos unitarios y las deformaciones que se originan no sobrepasen unos valores límites fijados de antemano. Y resolver el problema de comprobación, conocidas las sollicitaciones exteriores y hecho el dimensionamiento de la pieza, comprobar que las tensiones y deformaciones no sobrepasan los valores límites establecidos.

En el dimensionamiento y comprobación se tendrá en cuenta las cargas estáticas que solicitan el canal. Así mismo, se cuantifican las cargas dinámicas que pueden actuar sobre el mismo, golpes de los aperos durante las labores de cultivo, por ejemplo.

Todo ello persigue encontrar una sección que sea viable comercialmente. Para encontrarla, se realizará el diseño de canales con una sección tipo sándwich intercalando

entre dos capas de GRC polietileno expandido intentando con ello aumentar la resistencia sin incrementar excesivamente el peso ni el volumen del canal.

Una de las herramientas que se empleará será el Software ALGOR, programa que nos permite realizar el análisis de tensiones por elementos finitos en sistemas lineales y no lineales estáticos y dinámicos.

El método de los elementos finitos en el análisis estructural y, en particular, para los materiales compuestos, ha supuesto una herramienta de indudable utilidad durante los últimos años. A pesar de que el método de cálculo está basado en teorías sencillas, conocidas desde hace mucho tiempo, la potencia del MEF ha garantizado mejor precisión en el conocimiento de los estados de tensión y deformación de un mayor número de elementos y de los sistemas de carga. El desarrollo del tipo de elementos tridimensionales o sólidos en el método, concede mayor proximidad al comportamiento interno real de estos materiales, permitiendo análisis, con suficiente seguridad, de la concentración de tensiones, modos de rotura en fibra y matriz, cortadura normal e inter laminar, efectos hidrotérmicos y cálculo no lineal. Sin duda, también, a todo ello ha contribuido el gran desarrollo de los programas comerciales, basados en el MEF, entre los cuales la mayoría dispones de paquetes específicos para el análisis y cálculo de materiales compuestos.

Los modernos métodos de análisis y el mejor conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales compuestos, pueden permitir obtener soluciones que resulten adecuadas para ciertas aplicaciones en el ámbito de las conducciones hidráulicas abiertas.

### **1.3 OBJETIVOS**

El planteamiento inicial se concreta en los siguientes objetivos:

- Comprobar, mediante métodos de cálculo avanzado, si puede garantizarse que un adecuado diseño de elementos o piezas de hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC), cumplen la función de conducción hidráulica abierta con límites de rigidez y resistencia mecánica aceptable.
- Analizar y dimensionar canales de riego de GRC, con diferentes formas de sección, solicitados por sistemas de carga estática y dinámica.
- Determinar la configuración y constitución de las secciones mecánicamente óptimas.

- Establecer una referencia para futuros estudios de sistemas y elementos fabricados con hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC), en aplicaciones para el sector agrario.

## **1.4 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO**

La metodología consistirá en realizar el análisis completo de los estados de tensión y deformación de cada uno de los tipos de canalizaciones que previamente se diseñen.

Los modelos para analizar serán elegidos en función de criterios constructivos, hidráulicos y mecánicos, de manera que entre los parámetros que influyen en el diseño (forma y geometría de la sección, longitud de la pieza, localización y características de los apoyos, etc.), se mantendrán como valores determinados los que no incidan directamente en los objetivos planteados en la Tesis Doctoral.

El resto de los factores de diseño serán combinados, con un intervalo de variación limitado, hasta obtener un campo de resultados que pueda considerarse suficiente para evaluar los objetivos planteados.

El esquema del Plan de trabajo será el siguiente:

- Análisis previo de la situación.

Recopilación y evaluación de la información disponible acerca de conducciones fabricadas con diferentes tipos de materiales, tradicionales y compuestos.

- Definición de modelos de análisis.

La evaluación de los objetivos planteados requiere la definición previa de modelos de análisis adecuados. Para ello, se establecerán las variables de diseño y las variables del proceso de cálculo. Entre las primeras: la geometría de los modelos, las condiciones de contorno, la composición y estructura de la sección, etc. Las variables del proceso de cálculo habrán de ser: los modelos de cálculo, la discretización, los sistemas de acciones y la aplicación informática para el análisis.

- Evaluación de resultados.

Se obtendrán resultados modificando sucesivamente determinados parámetros. La evaluación de los mismos conformarán las siguientes fases en cuanto a nuevos modelos y nuevos parámetros de influencia que permitirán precisar los objetivos iniciales.

- Discusión de resultados y conclusiones.

Obtenido un conjunto de resultados de cálculo representativo, se procederá a la discusión de los mismos, a la deducción de conclusiones y a la justificación de propuestas concretas.

- Verificación del modelo seleccionado.

Una vez establecido el modelo que cumple con los objetivos planteados al comienzo de esta Tesis Doctoral y teniendo en cuenta que se ha considerado un solo elemento de estudio, se verificará el comportamiento cuando se analiza un conjunto de tres canales apoyados uno con otros. Se considerarán los resultados del canal que ocupe la posición central de la estructura sometido a una serie de variables de cálculo.

## **2 MATERIAL Y MÉTODOS**

Índice

<b>2</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>1</b>
2.1	MATERIAL Y EQUIPOS .....	3
2.1.1	<i>Equipo informático físico (HARDWARE) .....</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>Equipo informático de proceso (SOFTWARE) .....</i>	<i>3</i>
2.2	METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO .....	5
2.2.1	<i>Metodología.....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Plan de trabajo.....</i>	<i>5</i>
2.3	DEFINICIÓN DE LOS MODELOS DE ESTUDIO .....	7
2.3.1	<i>Variables de diseño .....</i>	<i>7</i>
2.3.2	<i>Estabilidad mecánica .....</i>	<i>20</i>
2.3.3	<i>Variables del proceso de cálculo .....</i>	<i>21</i>
2.3.4	<i>Resumen general de características.....</i>	<i>27</i>

## 2.1 MATERIAL Y EQUIPOS

Para la realización de esta Tesis se ha utilizado el equipamiento informático, tanto físico (hardware) como de proceso (software), que se detalla a continuación.

### 2.1.1 EQUIPO INFORMÁTICO FÍSICO (HARDWARE)

- ORDENADORES PERSONALES: con las siguientes características:
  - o Procesadores INTEL (R) PENTIUM (R) 4 3.00 GHz, PENTIUM 4 1.00 GHz y INTEL (R) CORE (TM) i 5 2.52 GHz
  - o 512 MB, 4,00 GB de memoria RAM.
  - o Discos duros de 111 Gb y 40 Gb
  - o Tarjeta VGA
  - o Monitor en color de 15" y 19"
  - o Ratón de dos botones y ruleta.
- IMPRESORAS: Hewlett Packard modelos Laserjet 1020 y Deskjet F2180

### 2.1.2 EQUIPO INFORMÁTICO DE PROCESO (SOFTWARE)

- SISTEMA OPERATIVO: Microsoft WINDOWS versiones 98, XP y 7 Home Premium,
- MS OFFICE: versión 2000, 2003 y 2007. Incluye los programas WORD, EXCEL y POWERPOINT.
- ALGOR: versión 12.16 actualizado, versión 13, versión 22 que incluye los siguientes paquetes:
  - o STRESS ANALYSIS.
  - o VIBRATION ADD-ON.
  - o COMPOSITE ELEMENS.
  - o VIZICAD.
  - o SUPERGEN.
  - o SUPERSURF.

Sus características de trabajo son las siguientes:

La modelización geométrica, a la aplicación de condiciones de contorno y la de determinadas solicitaciones se realiza mediante un paquete auxiliar de CAD que hace que el diseño y la comprobación de las características del modelo se hagan con la comodidad y rapidez propias de este tipo de programas. Cuenta con la posibilidad de importar ficheros DXF (2D y 3D), TWG (2D), NFL (2D), CDL (3D), IGS (3D) y SGX; lo que también permite realizar la modelización geométrica desde otros programas de CAD.

Posee, asimismo, un programa de generación automática de malla en 2-D que permite un modo interactivo de refino y optimización del mallado, y otro de modelización de superficies complejas.

La entrada de datos sobre características del material se agiliza gracias a la posibilidad de archivarlas en una librería y de intercambiar los laminados diseñados entre los distintos modelos geométricos, siempre que coincidan los sistemas de referencia. En el caso particular de los materiales compuestos, dispone de la posibilidad de usar un sistema de referencia local para cada elemento, con el fin de adaptar en algún caso las necesidades de orientación de cada lámina al sistema global que impone a toda la estructura la numeración automática de nodos del programa.

#### APLICACION ESPECÍFICA PARA ANALISIS DE MATERIALES COMPUESTOS

Ofrece la posibilidad de efectuar análisis lineal estático, dinámico o modal y de vibraciones aleatorias. Dispone de dos elementos específicos para materiales compuestos denominados "BRICK" o "3-D SOLID ELASTICITY" que se emplean para placas gruesas, componentes cilíndricos o esféricos gruesos, juntas gruesas, engranajes, etc. En general, se emplean para estructuras o componentes estructurales con un espesor comparable a sus otras dos dimensiones. Los elementos "BRICK" son elementos 3-D con tres grados de libertad de translación por nodo. Se puede considerar como elemento "membrana" que pueden soportar variaciones de tensión a lo largo de su espesor. La ventaja de utilizar elementos "BRICK" es que nos pueden proporcionar información de la variación 3-D de las tensiones y deformaciones dentro de los componentes. Admiten las siguientes acciones de cálculo: Peso del elemento, Fueras y Momentos nodales, presiones normales al elemento, acciones térmicas y diferencias de temperatura durante el curado. Como resultados ofrece la tensión normales en los nodos según dos direcciones ortogonales del plano de cada elemento: las tensiones cortantes en dicho plano; y los coeficientes de los siguientes criterios de rotura: Tsai-Wu, máxima

tensión y máxima deformación. Además puede calcular, según cada uno de estos criterios, las “tensión de rotura” interlaminar en una capa determinada.

## MÓDULO DE POSTPROCESO

Ofrece un postproceso gráfico en el que pueden visualizarse los resultados del cálculo en cada lado de cada lámina según un código de 16 colores personalizado para los rangos de valores deseados. También se ofrece la posibilidad de comprobar, gráficamente: los nodos coaccionados; los tipos de coacciones; las acciones aplicadas; y las orientaciones de las fibras en cada uno de los elementos del modelo.

La exportación de resultados gráficos puede hacerse a través de ficheros BTM. Dispone de salida para plotter para lo que se utilizan gráficos no “sólidos”, sino con “líneas de contorno” y de un programa accesorio, llamado PIZAZZ PLUS, que convierte los ficheros de imágenes para ser exportadas a programas como WORD; transformando la extensión BTM en IMG, TIF, BMP, JPG, PNG, PXC, TGA.

## 2.2 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

### 2.2.1 METODOLOGÍA

La metodología seguida ha consistido en el análisis completo de los estados de tensión y de deformación de cada tipo de canalizaciones diseñadas.

De acuerdo a criterios mecánicos y constructivos se ha analizado diversos modelos de canales trapeciales de 100 l/s. Parámetros como espesor de las laminas que componen la sección tipo sándwich, la relación entre la base y el lado mojado, la sección trapecial del canal, el talud de los laterales, la orientación de los refuerzos, tipo de apoyo del canal, longitud de los mismo, etc., que influyen en el diseño del canal, se han mantenido en unos valores determinados, que no influirán en el objetivo plantado de esta tesis.

### 2.2.2 PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo se concreta en los siguientes aspectos:

#### 1. Análisis de la situación previa

El punto de partida de este estudio de investigación es el trabajo previo, llevado a cabo por el Doctor Ingeniero Agrónomo D. Luis Ricote Lázaro y tutelado por el Doctor

Ingeniero Agrónomo D. José Luis Meléndez Falkowski, sobre el comportamiento mecánico de conducciones abiertas de secciones comerciales. El GRC, tecnología de nuevos materiales para la fabricación de canales de riego. Dicho trabajo estudia el comportamiento de canales de sección transversal trapecial, semicircular y rectangular de 3 metros de longitud, un espesor de la sección transversal de 1 cm.

Partiremos de un canal de 3 metros de longitud, sección transversal trapecial. En nuestro caso dicha sección transversal es del tipo sándwich, utilizando dos láminas de GRC y una lamina central de polietileno expandido.

## 2. Planteamiento inicial de objetivos

Pretendemos avanzar en el uso de materiales compuestos en la fabricación de canales de riego abiertos. Para ello desarrollaremos modelos de 5 metros de longitud y sección transversal tipo sándwich, combinando láminas de GRC con una lamina de polietileno expandido.

## 3. Elección y adaptación al equipo informático

El método de cálculo idóneo para la consecución de los objetivos es el de los elementos finitos y teniendo en cuenta el programa informático utilizado en los trabajos previos, se ha utilizado el programa de cálculo de elementos finitos Algor.

## 4. Obtención y evaluación de los resultados

Definido un primer modelo de estudio, se van obteniendo resultados variando determinados parámetros. La evaluación de estos resultados confirman o corrigen los pasos a seguir en cuanto al estudio de nuevos modelos y de nuevos parámetros de influencia.

## 5. Discusión de resultados, conclusiones y propuestas

Obteniendo un cuadro de resultados de cálculo suficientemente representativo para la evaluación de los objetivos, se procede a discutir los resultados obtenidos, elevar las conclusiones y justificar unas propuestas de actuación.

## 2.3 DEFINICIÓN DE LOS MODELOS DE ESTUDIO

Según el método propuesto, la evaluación de los objetivos planteados requiere la definición previa de unos modelos de análisis.

Los criterios que se han tenido en cuenta en la determinación de las variables analizadas, los hemos clasificado en:

- Variables de diseño:
  - o Geometría de los modelos.
  - o Composición de las láminas.
  - o Estructura del laminado.
  - o Estabilidad mecánica.
- Variables del proceso de cálculo:
  - o Método de cálculo.
  - o Programa informático.
  - o Discretización de los modelos.
  - o Acciones.

### 2.3.1 VARIABLES DE DISEÑO

#### ***Geometría de los modelos***

Para la definición geométrica del modelo se han analizado los siguientes factores:

- A) Tipo de pieza (según su función hidráulica).
- B) Sección transversal.
- C) Longitud

#### A) TIPO DE PIEZA

Cualquier tipo de conducciones hidráulica, tanto abiertas como cerradas, requieren diferentes piezas para trasladar el agua de un punto a otro sorteando más o menos dificultades topográficas.

Las piezas más numerosas son las que forman los tramos rectos, con pendiente uniforme. Pero también existen puntos singulares en los que la dirección, velocidad o

caudal varia, la corriente de agua donde se emplean piezas especiales (codos, ensanchamientos, bifurcaciones, sifones, etc.). Esta Tesis estudia los tramos rectos de las conducciones hidráulicas abiertas. Debiendo mantener la sección transversal constante al paso de la corriente, con el fin de evitar innecesarias pérdidas de energía en el transporte.



## B) SECCIÓN TRANSVERSAL

El modelo de estudio tiene una forma geométrica trapezoidal.

La sección transversal quedará definida en cada modelo, por la forma de su línea media, su espesor y sus dimensiones, pero la misma se mantendrá constante a lo largo del canal, salvo los puntos de ensamblado de canales o campana del canal.

Para la primera de estas variables se proponen dos modelos en función del ángulo que forma el talud con la horizontal:  $60^\circ$  y  $73^\circ$ . La sección con un ángulo de  $60^\circ$  se ha heredado de estudios previos llevados a cabo por el equipo del Doctor Ingeniero Agrónomo D. José Luis Meléndez Falkowski. La sección con un ángulo de  $73^\circ$  se considera porque es el ángulo de talud utilizado comercialmente, no olvidemos que el objetivo que perseguimos es el diseño de canales abiertos que puedan ser comercializados.

Otro de los parámetros definitorios de la sección transversal es su espesor. Se diseñan secciones de materiales compuestos estructurales tipo "sándwich", que se caracteriza por tener dos laminas exteriores de elevada dureza y resistencia como es el GRC, separadas por una capa intermedia de material menos denso y resistentes como es el polietileno expandido. El espesor de la sección viene dado por el espesor de cada lámina en un principio y posteriormente estableciendo un espesor de la sección constante variando el espesor de cada lámina con el objeto de conseguir un espesor comercial, a la hora de llevar a cabo la renovación de algún canal deteriorado, que permita una lámina de agua lo más uniforme posible.

Por último, hemos de hablar de las dimensiones de la sección. Con el fin de comparar el comportamiento mecánico de cada uno de los modelos planteados de una manera lo más objetiva posible, se ha tomado el criterio de hacerlas hidráulicamente

equivalentes, es decir, que lleven el mismo caudal, respetando el resguardo para una misma pendiente y velocidad del fluido. Para el cálculo del caudal se ha empleado la conocida fórmula de Manning, que considera un flujo uniforme y permanente.

$$Q = A \times V = A \times (1/n) \times R^{2/3} \times S^{1/2}$$

Donde: A = área de la sección transversal del flujo en m<sup>2</sup>.

V = velocidad media del flujo en la sección en m / seg.

n = coeficiente de rugosidad.

R = radio hidráulico en m = A / P

S = pendiente o línea piezométrica de la corriente (con la condición de movimiento supuesto, esta pendiente es la misma que la de la solera del canal).

Como datos de partida, constantes para todas las secciones, se ha tomado los siguientes:

- I = 1 / 1000. Es la pendiente que establecen las normas UNE sobre acequias para el cálculo del "caudal teórico".
- n = 0,010. Las normas UNE no indican en ninguno de sus artículos las expresiones utilizadas para el cálculo de los caudales que normalizan ni, por supuesto, referencia alguna a coeficientes de rugosidad o fricción que sean función de las características del material. Este valor es el que correspondería a un "cemento muy pulido y madera muy bien cepillada" según los datos que ofrecen algunos textos clásicos de hidráulica (GILES, 1994) y representa uno de los valores más bajos de rozamiento entre los materiales de construcción de canales más comunes.

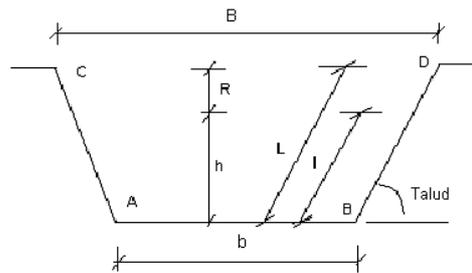
Por otra parte, basándonos en los resultados de los informes publicados por el equipo del Laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad de León y dirigidos por el Profesor Meléndez Falkowski, en lo que supone un diagnóstico de la situación actual de las canalizaciones para riego en diversas zonas de León y dado que más del 90% de la longitud total de los canales tienen caudales de 50, 100 y 150 l/s, se elige un canal de 100 l/s para este trabajo por ser el más utilizado de los tres. Así mismo, en un 100 % de la longitud total de los canales de caudal de 100 l/s tiene una sección trapezoidal

y rectangular, se elige el canal de sección TRAPEZIAL por ser el más habitual en la zona.

Fijada la pendiente, la sección TRAPEZIAL, un caudal de 100 l/s y con un valor del coeficiente de fricción, datos que nos servirán para dimensionar todos los modelos de estudio, el procedimiento a seguir, de acuerdo a la fórmula de Manning, es determinar la anchura de la base y el lado mojado del trapecio.

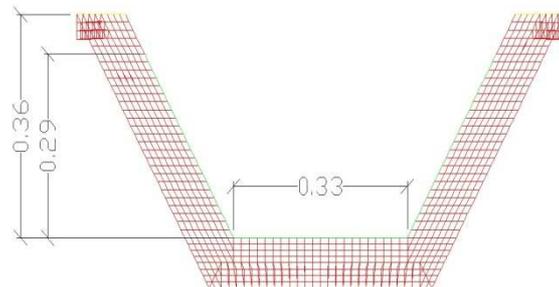
Teniendo en cuenta la utilización de dos talud para un caudal 100 l/s, las dimensiones de las paredes mojadas será diferente en cada uno de los canales. Mediante el sistema de tanteo y utilizando la formula de Manning, los estudios previos realizados para canales de 60° de talud y la base mojada de canales comerciales. Hemos de determinar la altura del agua.

Para una sección trapecial (semihexagonal) las dimensiones serán:



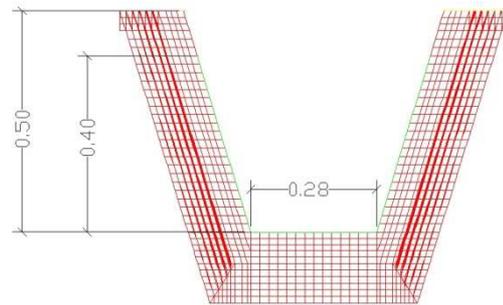
Canal con talud de 60°, las dimensiones son:

- Base mojada (b) de 0,33 m,
- Base en la superficie (B) de 0,66 m,
- Altura de agua (h) de 0,29 m,
- Resguardo (R) de 0,07 m,
- Lado mojado (l) de 0,33 m,
- Superficie de 0,14 m<sup>2</sup>.
- Caudal de agua de 104,58 l/s.



## Canal comercial con talud de 73°

- Base mojada (b) de 0,28 m,
- Base en la superficie (B) de 0,52 m,
- Altura de agua (h) de 0,40 m,
- Resguardo (R) de 0,10 m,
- Lado mojado (l) de 0,42 m,
- Superficie de 0,16 m<sup>2</sup>.
- Caudal de agua de 116,57 l/s.



## C) LONGITUD.

Las Normas UNE reglamentan una longitud de 3, 4, 5, 6, 10 y 12 m en los tramos rectos para acequias rígidas (artículo 3.2 de la Norma 53-342-78). De partida se ha considerado el tramo de 3 m por ser el empleado en los estudios preliminares, posteriormente 5 m por ser la longitud más utilizada en la zona de León.

**Composición de las láminas**

Los materiales compuestos con fibra de vidrio conocidos con el nombre de GRC están constituidos como hormigones compuestos por morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio.

La matriz del GRC es un mortero de Cemento Portland y arena silícica, amasado con una proporción controlada de agua y aditivos. La fibra de vidrio, alcalin-resistente, se agrega en las proporciones adecuadas al tipo de aplicación y a la resistencia necesaria para el elemento de GRC. Por lo tanto, los componentes usuales de un GRC son: Cemento, Arena, Agua, Fibras de Vidrio A.R. y aditivos.

Bajo la descripción general de GRC hay numerosas posibilidades de variación de las mezclas, dependiendo del uso del producto final o del método de fabricación elegido para producir una serie de material compuesto. La normalización está más enraizada en las mezclas empleadas para aplicaciones arquitectónicas y, en particular, en las mezclas utilizadas en proceso de fabricación por proyección simultánea.

La cantidad o proporción de fibra de vidrio en la mezcla depende de tres factores: el proceso de fabricación, la forma de aplicación del material y la resistencia necesaria para el GRC resultante.

Las fibras de vidrio son incorporadas en una proporción comprendida entre el 0,1% y el 5% en peso. Con baja proporción, las fibras minimizan la segregación de los materiales en su aplicación y evitan las microfisuraciones de las piezas fabricadas con cemento, aumentando la dureza y la resistencia al choque. La proporción entre el 1% y el 2% de fibras de vidrio es muy adecuada para mezclas armadas, reduciendo la densidad de productos constitutivos del mortero.

Cantidades de fibra comprendidas entre el 2% y el 3,5% configuran un refuerzo primario en productos realizados por moldeo y vibración de bajo coste. Finalmente, para aplicaciones que exigen mayor resistencia, como por ejemplo los paneles de fachada arquitectónicos que representan una de las más conocidas, se emplean proporciones del 5% en peso de mezcla del producto.

Respecto a la resistencia mecánica del producto debe añadirse que la proporción de fibra de vidrio no es únicamente el factor determinante en el resultado final sino que, además, inciden la *longitud de las fibras*, su disposición, y de manera muy especial, el *proceso de curado del GRC*, cuya realización en condiciones óptimas podrá garantizar los niveles de resistencia establecidos para el proyecto.

#### A) COMPONENTES DEL GRC Y ADITIVOS

Los componentes habituales del GRC y sus características son los siguientes:

- *Cemento*: Se emplean los Portland de alta resistencia, tipo gris (I-45A) o blanco (IIB-45A), aunque otros tipos de Cementos Pórtland pueden ser utilizados cuando las aplicaciones concretas lo requieran. Los indicados son empleados en las aplicaciones de paneles para fachadas e interiores de edificación.
- *Arena*: La arena será de gran riqueza en sílice (silícica) y ha de estar limpia y seca para su aplicación. Las características de su composición son: contenido de *Sílice* > 96%; *Humedad* < 2%; *Sales solubles* < 1%; *Pérdida al fuego* < 0,5%. La *granulometría de la arena entre 0 y 1 milímetros*, recomendándose que los elementos finos sean como máximo el 10% los que pasen el tamiz de 150  $\mu$ .
- *Agua*: En general los controles y especificaciones del agua son idénticos a los empleados en los hormigones convencionales. Un índice útil de carácter general sobre la aptitud de un agua, en la técnica del hormigón y por tanto del GRC, es su

potabilidad. Las excepciones se reducen, casi exclusivamente, a las aguas de alta montaña, cuya gran pureza les confiere carácter agresivo. Las aguas depuradas con cloro pueden también emplearse. No es conveniente emplear aguas con PH inferior a cinco, ni con contenidos de aceites, grasas o hidratos de carbono.

- *Fibras de Vidrio (álcali-resistentes):* En el vidrio álcali-resistente el componente principal es el Circonio, formando parte en proporción de 15%-17%. Los componentes de este vidrio álcali-resistente son: Oxido de Circonio  $ZrO_2$  > 15 %; Sílice  $SiO_2$  62 %; Alúmina  $Al_2O_3$  0,8%; Oxido de Sodio  $Na_2O$  14,8 %; Oxido de Calcio  $CaO$  5-6 %
- *Aditivos:* Son sustancias o productos que incorporados al hormigón o mortero antes del amasado, o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario, en proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento:
  - o *Plastificante:* En el GRC es el aditivo más empleado. Aumenta la docilidad y trabajabilidad del producto y reduce el agua de amasado del mortero en beneficio de la resistencia final.
  - o *Pigmentos:* Pueden ser utilizados en el GRC con idénticas precauciones, controles y normas que en el hormigón convencional.
  - o *Retardadores de fraguado:* No son recomendados para la fabricación de GRC. En cambio, se utilizan retardadores de fraguado *superficial* tan solo en la capa externa o cara vista de la pieza de GRC. La cara externa se ejecuta con un mortero sencillo de acabado en grava u otros elementos decorativos para la superficie exterior del panel. Con el fin de resaltar las gravas o elementos de dicha cara se procede a un lavado una vez fraguado el GRC. Los retardadores de fraguado utilizados para la cara externa, y con la finalidad expuesta, se aplican en el molde tipo imprimación.
 

Estos productos retardadores del fraguado son llamados también *decapantes* y actúan con mayor o menor profundidad en el espesor del panel, según la intensidad del retardador. La elección del decapante depende del tamaño de la grava del mortero de la superficie de acabado o superficie vista. La cara vista, en la mayoría de los casos, no es reforzada con fibras de vidrio.
  - o *Aceleradores del fraguado:* Los aceleradores de fraguado no están recomendados en la práctica del GRC.

- *Impermeabilizantes*: El GRC es impermeable frente al agua y otros líquidos, resistiendo el desgaste que los mismos pudieran producir por contacto. El GRC posee un bajo grado de permeabilidad frente al vapor de agua. Este grado de permeabilidad puede ser disminuido e incluso eliminado utilizando impermeabilizantes. Los empleados son, bien de *masa ó hidrófugos*, que añadidos a la masa del mortero aumentan, por regla general, la retracción en el fraguado, o bien, de *superficie*, que incorporados en el GRC endurecido actúan sobre un pequeño espesor del mismo y sobre la cara exterior.
- *Polímeros*: El uso de polímeros acrílicos en el GRC ha demostrado resultados satisfactorios. La empresa holandesa Forton desarrolló un polímero específico para la adición al GRC. Mediante el producto acrílico, denominado comercialmente igual que la empresa, *forton*, se ha conseguido: una mejora en resistencias iniciales, facilitar el fraguado, reduciendo el tiempo y los cuidados en el curado, y disminuir las retracciones en el fraguado. Al producto GRC con polímero se le denomina *PGRC*.
- *Metacaolín*: El GRC pierde una parte de su resistencia y ductilidad iniciales con el transcurso de largos periodos de tiempo. Esta pérdida de capacidad de deformación no se debe al ataque alcalino del cemento sobre la fibra, sino al desarrollo de cristales de Cal e Hidratos de Silicato Cálcico (HSC) alrededor y en el interior de los haces de filamentos de vidrio. La Cal (Hidróxido Cálcico  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), como subproducto de los procesos de fraguado e hidratación del cemento, está presente inicialmente como una solución acuosa. Esta solución es trasladada por acción capilar al interior del haz de la fibra y, posteriormente, cristaliza llenando los poros y bloqueando la fibra en la matriz de cemento, lo cual, impide el deslizamiento que se produce en un GRC joven. La energía absorbida por el deslizamiento de las fibras es quien proporciona al GRC sus características de dureza.

Es conocido que los materiales puzolánicos, como el *Humo de Sílice* y las *Cenizas Volátiles*, reaccionan con la *Cal* neutralizándola y creando una ligazón del cemento que mejora la resistencia de la matriz. Sin embargo, el Humo de Sílice es extremadamente fino (<0,1 micras) y se corre el riesgo de que estas pequeñas partículas penetren en el espacio interfilamental, pasándose entonces del mecanismo de deposición libre de Cal a Hidratos de Silicato Cálcico, más duros y dañinos dentro del haz de fibras. Del mismo modo otras fuentes puzolánicas conocidas son demasiado variables o no poseen el grado

de actividad adecuado. Por ello, Las investigaciones fueron dirigidas hacia el *metacaolin* de material puzolánico, un caolín calcinado producido por la activación térmica de caolín en aire a una temperatura de 750-800 °C, ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

El *metacaolin* finalmente hallado fue denominado comercialmente *Cem-Star*. Se adiciona durante la realización del mortero del GRC. Los cristales que aparecen tras las primeras etapas de hidratación son de pequeño tamaño ya que el *metacaolin* (*Cem-Star*) posee además una función secundaria que es la de facilitar el desarrollo de cristales más pequeños uniformemente dispersos, formándose preferentemente fuera de la fibra y no por encima o en el interior del haz de filamentos. Se obtiene así una matriz más homogénea que con los morteros de cemento estándar. Las partículas del aditivo, por otra parte, también son demasiado grandes para penetrar en los espacios intersticiales de la fibra. Por último, el metacaolin reduce la alcalinidad de la solución en los poros, bajando el PH normal para morteros de Cemento Portland hasta el 12,5, que, a su vez, representa una mejora considerable de las propiedades a largo plazo.

## B) PROPORCIONES DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES

Una vez descritos los materiales constitutivos del GRC, resulta necesario indicar la dosificación normalizada de los componentes, teniendo presente su posible variación o modificación en función de la procedencia de los materiales y de las características de los mismos.

Las proporciones básicas del mortero deben ser: relación Arena/Cemento (1:1); relación Agua/Cemento (0,30 – 0,35); plastificante o fluidificante (1% del peso del cemento).

La proporción de *fibra de vidrio*, ya se ha citado anteriormente, que es función del proceso de fabricación, del tipo de aplicación del producto y de la resistencia de proyecto del GRC. Y, aún siendo fundamental la proporción de fibra de vidrio, también se indicó la importancia de la *longitud de las fibras* para la obtención del grado de resistencia adecuado.

Son, por tanto, dos parámetros a considerar durante el proceso de fabricación del GRC. La *longitud de la fibra* depende en gran medida del proceso de fabricación, ya que en *procesos de premezcla*, por ejemplo, fibras de mayor longitud provocan dificultades de amasado, e incluso, puede llegar a producirse la destrucción de la fibra por abrasión en la superficie. Para estos procesos la longitud óptima, es decir, la que proporciona mayor resistencia con adecuada trabajabilidad, varía entre 6 y 24 mm., presentando sus mejores

prestaciones con fibras de 12 mm. de longitud. Para procesos de *proyección simultánea* (utilización de roving) la longitud óptima es de 30 - 45 mm.

Las dosificaciones más comunes (en Kg.) para la fabricación de GRC, incluyendo formulaciones con polímero y metacaolin, son las siguientes:

<b>PROCESOS DE PROYECCIÓN</b> (Manual o Automática)				
<b>COMPONENTE</b>	<b>GRC *</b>	<b>PGRG **</b>	<b>GRMC ***</b>	<b>PGRMC ****</b>
Cemento Pórtland (Blanco o Gris)	100	100	100	100
Arena	100	100	100	100
Agua	35	28	43	36
Metacaolin	--	--	25	25
Polímero	--	10	--	12,5
Plastificante	1,2	1	2,5	2
Fibras de vidrio AR	12,5	12,8	14,3	14,5
<b>PROCESOS DE PREMEZCLA</b> (Colado-Vibrado o proyección)				
<b>COMPONENTE</b>	<b>GRC *</b>	<b>PGRG **</b>	<b>GRMC ***</b>	<b>PGRMC ****</b>
Cemento Pórtland (Blanco o Gris)	100	100	100	100
Arena	100	100	100	100
Agua	35	25,7	41	29
Metacaolin	--	--	25	25
Polímero	--	9,8	--	12,2
Plastificante	1	1	2,5	2,5
Fibras de vidrio AR	8,6	8,65	9,75	9,75

\* Formulación para un GRC normal.

\*\* Formulación para un GRC aditivado con polímero y sin metacaolin.

\*\*\* Formulación para un GRC aditivado con metacaolin y sin polímero.

\*\*\*\* Formulación para un GRC aditivado con polímero y metacaolin.

Las dosificación para *proyección* con polímero: relación arena/cemento 1:1; fibras de vidrio 5%, del peso total de la masa de GRC ( 3.8% en volumen ), y contenido de polímero 3 - 8%, en peso del total de la masa de GRC (5 - 15% en volumen ).

## **CARACTERÍSTICAS MECANICAS Y PROPIEDADES DEL GRC**

Estableciendo como referencia elementos placa de GRC de 10 mm de espesor, que se corresponde con las dimensiones habituales en panales de edificación, transcurridos veintiocho días desde su fabricación y relación arena/cemento (0,5 - 1), los valores de las propiedades mecánicas, físicas y químicas son los siguientes:

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>	<b>PREMEZCLA</b> (Colado-Vibrado o proyección)	<b>PROYECCIÓN</b> (Manual o Automática)	<b>Unidades</b>
Fibra de vidrio (% en peso)	5	3	%
Flexión			
Modulo de rotura	20 – 30	10 - 14	Mpa
Limite elástico	7 – 11	5 - 8	Mpa

Tracción			
Modulo de rotura	8 – 11	4 - 7	Mpa
Limite elástico	5 – 7	4 - 6	Mpa
Resistencia al Esfuerzo Cortante			
Resistencia ínter laminar	3 – 5		Mpa
Resistencia en el plano	8 – 11	4 - 7	Mpa
Resistencia a Punzonamiento	25 - 45	20 - 40	Mpa
Resistencia a la Compresión	50 – 80	40 - 60	Mpa
Resistencia al Impacto	1 – 2	1 - 2	Mpa
Módulo de elasticidad	10 – 20	10 - 20	Gpa
Deformación a la rotura	0,6 – 1,2	0,1 – 0,2	%
Densidad del material	1,9 – 2,1	1,8 – 2,0	Tm./m <sup>3</sup>
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	G.R.C.		Unidades
Densidad del Material	1,7 – 2,1		Tm./m <sup>3</sup>
Pesos aproximados	16		Kp./m <sup>2</sup>
Lamina simple 12 mm de espesor	24		Kp./m <sup>2</sup>
Panel Sándwich (*)	44		Kp./m <sup>2</sup>
Retracción irreversible	0,05		%
Retracción final	0,2		%
Coefficiente de Dilatación Térmica	10 – 20 x 10 <sup>-6</sup> / °C		Mm °C
Coef. de Conductividad Térmica	0,5 – 1		W/m °C
Resistencia química	Buena		
Resistencia a los sulfatos	Se usan cementos especiales		
Ambiente marino	No afecta propiedad. mecánicas		
Hielo-Deshielo (BS4264 - DIN274)	Ningún cambio		
Permeabilidad al vapor de agua			
BS 3177 para 10 mm de GRC	< 1,3		Perms. métricos
Luz ultravioleta	No lo degrada		
Acústica - Reducción de dB			
Lamina de GRC de 10 mm espesor	30		DB
Lamina de GRC de 20 mm espesor	35		DB
Sándwich de 10 cm (núcleo Exp.)	47		DB
Aislamiento Térmico			
Lamina simple 8 mm de espesor	5,3		W/m °C
Lamina simple 12 mm de espesor	5,2		W/m °C
Panel Sándwich (*)	0,4		W/m °C

(\*) El panel sándwich, en este caso, se compone de una lámina de GRC de 10 mm de espesor, una capa de poliestireno expandido de 100 mm. y otra capa de GRC de 10 mm de espesor.

Para las características del material tomamos unos valores típicos, complementados con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales a tracción normalizados realizados en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza con GRC fabricado en Dragados y Construcciones empleando dos tipos de cemento: blanco y gris. Se resumen:

- Módulo de elasticidad lineal: 20.000 MPa
- Peso específico: 2.000 kg/m<sup>3</sup>

- Módulo de Poisson: 0,2
- Límite de proporcionalidad en tracción pura: 6,9 MPa
- Límite de rotura en tracción pura: 25,4 MPa

## **CARACTERÍSTICAS MECANICAS Y PROPIEDADES DEL POLIETILENO EXPANDIDO**

Para el polietileno expandido se toma como valores tipo los siguientes:

- Módulo de elasticidad lineal: 400 Mpa
- Peso específico: 200 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Poisson: 0,3.

### ***Estructura del laminado***

Este parámetro es el más característico y casi exclusivo del diseño de los materiales compuestos, y a su importancia relativa frente a las demás variables en la respuesta mecánica de los modelos a analizar se refiere uno de los objetivos de esta Tesis, por lo que esta definición decisiva en su evaluación. Para ello deben concretarse dos aspectos:

- a) **NÚMERO DE LÁMINAS:** Todos los modelos a analizar se diseñarán como panel sándwich, que se compone de una lámina de GRC, una capa de polietileno expandido y otra capa de GRC. Analizaremos el modelo trapecial con un laminado determinado y variando únicamente el grosor de las láminas; los resultados de los coeficientes de seguridad según los distintos criterios de rotura, y de los máximos desplazamientos en los nodos. Cuando una de las soluciones satisfaga los valores límites indicados a continuación, se tomará esa variable como punto de partida para seguir analizando otras variables.

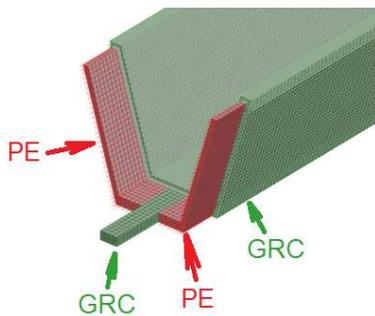
Límites de resistencia y rigidez:

- o Máxima tensión principal de tracción de 6,9 MPa.
- o Desplazamiento máximo según sus componentes vertical (dirección del calado) y horizontal no superiores al 10 % de las dimensiones de la sección según dichas direcciones.

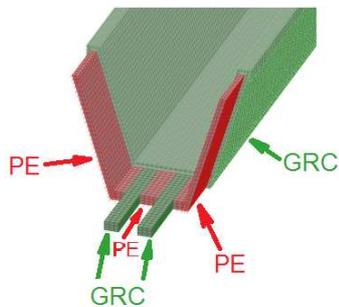
El primero de estos valores límites es el establecido por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza. La limitación a los desplazamientos es más propia de la función a la que está destinada la pieza a

analizar, sobre la que existen menos datos, por lo que se ha tomado un valor que evite pérdida de caudal por derramamiento del fluido teniendo en cuenta un resguardo que no suele ser menor del 10 % del calado.

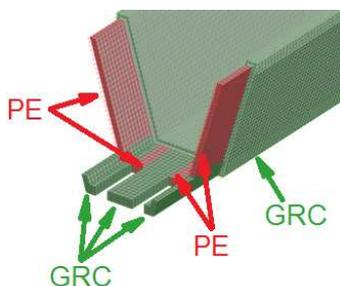
b) **REFUERZOS:** Es una variable importante en la evaluación del objetivo de reducir el peso del canal. Por si sola puede representar una gran influencia en la respuesta mecánica del modelo, especialmente en caso de estar sometido a un sollicitación compleja. En este caso se va a combinar un único refuerzo central, dos o tres equidistantes de diferente anchura una mínima repercusión en el peso del canal y máxima en la respuesta mecánica del modelo. Estos refuerzos consistirán en sustituir parte del polietileno expandido por láminas de GRC a modo de refuerzos longitudinales y transversales.



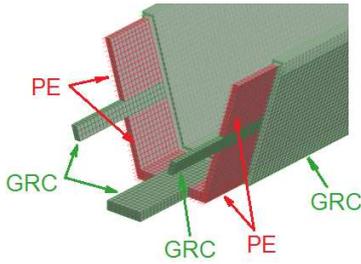
Un refuerzo longitudinal en el centro de la base.



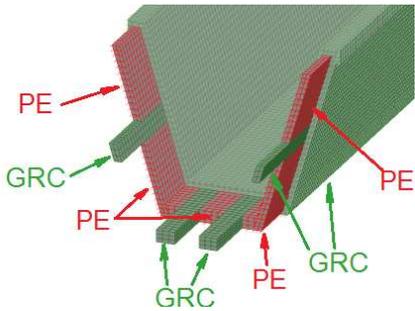
Dos refuerzos longitudinales en la base.



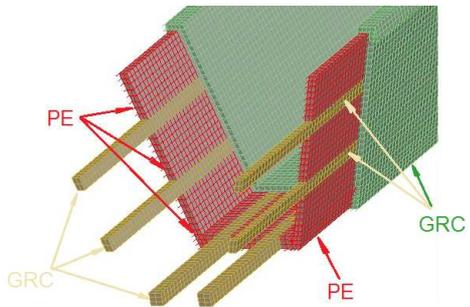
Un refuerzo longitudinal en el centro de la base y esquinas.



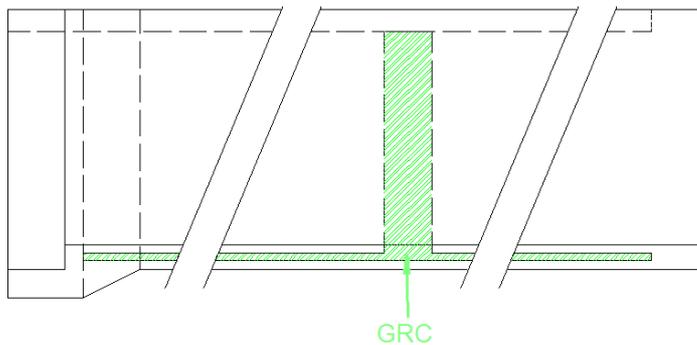
Un refuerzo longitudinal en el centro de la base y uno en las paredes.



Dos refuerzos longitudinales en la base y uno en las paredes.



Dos refuerzos longitudinales en la base y dos en las paredes.



Refuerzo longitudinal en la base y un refuerzo transversal.

### 2.3.2 ESTABILIDAD MECÁNICA

La estabilidad de los modelos a analizar ha de conseguirse coaccionando el movimiento, parcial o totalmente, de determinados puntos de cada pieza. Esa es la misión de los apoyos; piezas auxiliares imprescindibles en toda conducción que se

proyecta suspendida y en prácticamente todos los prefabricados. Esta será, por tanto, la primera decisión tomada con respecto a esa variable; la conducción se analizará considerando que se sujeta en apoyos puntuales y no en apoyo continuo como podría ser el propio terreno de base. También se considerará, en principio, que los apoyos no tienen asientos diferenciales y que sus coacciones no son elásticas ni dependientes, de la intensidad de las acciones.

Se colocan dos apoyos en los extremos del canal, por razones de facilidad en la ejecución y económicas, considerar los soportes constituidos por pilares de bloque hueco de hormigón 20 x 40 cm. Esto hace que los canales de sección trapecial mantengan una superficie de apoyo de 10 cm de longitud (medio bloque), según el eje del canal; y todo el ancho de la solera (que resulta menor de 40 cm).

Por otra parte, el tipo de coacción que representa el apoyo es objeto también de estudio. Un apoyo simple se modelizaría como coacciones verticales en un solo sentido (hacia abajo), con lo cual las distintas posibilidades de deformación del canal en la zona del apoyo dan lugar a distintas situaciones de apoyo real; así deformaciones notables por flexión longitudinal y transversal en el canal darían lugar a apoyos en, prácticamente, dos puntos solamente. Sin embargo, un apoyo del canal sobre mortero fresco extendido en la superficie del soporte (opción que, por otra parte, tiene como ventaja dotar de estabilidad a la conducción, en especial, ante acciones transversales) tendría que simularse con coacciones a la traslación, (roturas) en toda la superficie de contacto. Aún así, en este último caso, sería razonable prever daños en el mortero de unión por el paso del tiempo y por los continuos procesos de carga y descarga en el canal, con lo que se volvería a una situación similar a la anterior.

Y por último, hay que contar también con la necesidad de plantear, para el ensayo experimental, un tipo de apoyo que pueda simularse con la máxima fidelidad, para introducir el menor factor de incertidumbre posible en la contrastación de los resultados del método de cálculo.

### **2.3.3 VARIABLES DEL PROCESO DE CÁLCULO**

#### **2.3.3.1 Método de cálculo**

Las estructuras que se pretenden analizar en esta Tesis Doctoral tiene una geometría lo suficientemente compleja como para que con los métodos de cálculo basados en una aplicación directa y global de la teoría general de placas no puedan obtenerse unas distribuciones de deformaciones y tensiones con suficiente aproximación, ya que ninguno de los modelos podría considerarse una estructura no plana.

El Método de los Elementos Finitos soluciona este problema al discretizar cada pieza en un número finito de elementos planos, elementos a los que si pueden aplicarse las teorías clásicas de placas laminadas con o sin cortadura. Se consigue así obtener un campo de desplazamientos nodales y un campo de tensiones para todo el laminado o incluso para cada una de las láminas que compone la estructura. Obviamente, aún con un número reducido de elementos, la cantidad de ecuaciones y de operaciones matemáticas que plantea este método es tan elevada que no sería práctico si no se plantea informáticamente, es por ello uno de los llamados métodos generales de análisis computacional. Estos métodos avanzados de cálculo comprenden, principalmente, el método de elementos finitos, el de diferencias finitas y el llamado de elementos de contorno, que no es más que una variación del primero. Con cualquiera de ellos podrían analizarse satisfactoriamente las estructuras que se plantean en esta Tesis.

Es un método contrastado, debido a los resultados que ofrece y a que la obtención de soluciones con aproximación suficiente al campo de desplazamientos o tensiones.

Además, el análisis que requiere el modelo planteado en esta Tesis no presenta características particularmente complejas, tales como condiciones de contorno especiales, no linealidades concentradas o caóticas, singularidades, etc., como para que pueda afirmarse previamente que cualquiera de los tres métodos numéricos mencionados tenga ventajas significativas frente a los demás.

### **2.3.3.2 Programa informático**

En los primeros análisis de canalizaciones por elementos finitos que se hicieron para esta Tesis, a principios de 2003, se utilizó el programa ALGOR, utilizado en trabajos previos dirigidos por el Doctor Ingeniero Agrónomo D. José Luis Meléndez Falkowski. Los motivos que hicieron decantarse por este programa fueron:

- Contar con un paquete específico para análisis de materiales compuestos, basados en las teorías de placas laminadas y placas con cortadura.
- Contar con elementos que pudieran representar, lo más fielmente posible, las características de las estructuras reales que se pretendían calcular.
- Disponer de un módulo de preproceso que permitiese una modelización y entrada de datos lo más sencilla y ágil posible.
- Disponer de un módulo de postproceso que permitiese una explotación de resultados sencilla pero con amplias posibilidades de tratamientos gráficos y de exportación a otros programas.
- Utilizar un hardware reducido de potencia y necesidades de memoria.

Se consideró que las posibilidades del cálculo de ALGOR eran más que suficientes para cumplir los objetivos.

### 2.3.3.3 Discretización de los modelos

Es una variable fundamental en los análisis por Elementos Finitos. Básicamente es necesario definir dos aspectos:

- a) Tipo de elemento.
- b) Tipo y densidad de la capa.

#### a) Tipo de elemento

ALGOR, como todos los programas de cálculo por elementos finitos, permite que el diseño modelice con elementos triangulares o cuadrangulares. La precisión que se obtiene es mayor con estos últimos, por lo que el propio programa los recomienda siempre que la geometría de la pieza a analizar no lo desaconseje. En el caso en esta Tesis, los elementos de la malla serán cuadrangulares en su mayoría.

Con respecto a las características del elemento a utilizar, que será el denominado BRICK.

#### b) Tipo y densidad de la capa

Es sobradamente conocida la influencia que tiene esta variable en la precisión de los resultados de cualquier análisis estructural por Elementos Finitos. En general, la aproximación a la solución se consigue, ya sea de manera uniforme (convergencia monótona) o no uniforme (convergencia no monótona); aumentando el número de elementos del modelo discretizado.

Estas razones justifican la utilización de mallados lo más densos posibles; pero también existen límites:

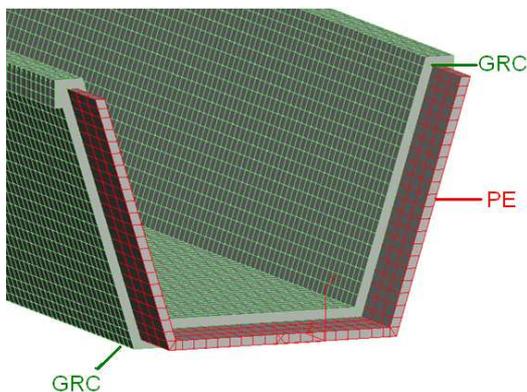
- A partir de un cierto número de elementos, en cada caso, el aumento de precisión que se consigue densificando más la malla es muy poco significativo.
- En piezas planas, la fidelidad geométrica que consigue una discretización poliédrica es total, e independiente del número de elementos.

- Existen limitaciones físicas, de orden informático, para trabajar con un número excesivamente elevado de elementos.

Una solución en la optimización de este proceso, es la generación de mallas de densidad no homogéneas. La mayoría de los llamados métodos de refinamiento de mallas, consiguen soluciones más precisas, al controlar el error de discretización, aumentando el número de elementos solamente en ciertas zonas del modelo, que coinciden con las de mayores gradientes de tensiones. Suelen ser, además, paquetes que trabajan de manera automática a partir de determinados datos de diseño.

1. Estarán formados siempre por elementos prismáticos, ya que, en ningún caso existen factores que lo hagan inviable.
2. El número de elementos será el mismo para todos los modelos, con objeto de que este factor no influya en los resultados comparativos.
3. Todos los modelos geoméricamente iguales, se discretizarán con la misma malla, por idéntico motivo.
4. Los modelos geoméricamente distintos, se discretizarán con elementos lo más parecidos posibles en cuanto a sus dimensiones.
5. Se procurará que, en cualquier caso, el elemento de la malla sea regular en sus dimensiones, con una relación de forma lo más próxima a 1 que se pueda, con objeto de no aumentar más, por este motivo, el error de discretización.
6. El número de elementos, por modelo, de acuerdo con las características del equipo de trabajo y del gran volumen de datos que suponen el análisis de los modelos a comparar, no debe ser superior a 100.000.
7. Se utilizan mallas regulares, de densidad homogénea para todos los modelos.

A continuación se resume las características del mallado que discretizará cada modelo.



Anchura (eje X): 2 cm

Altura (eje Y): en función del espesor de la lámina.

Largo (eje Z): 2 cm

#### 2.3.3.4 Acciones

Las acciones de cálculo principales son, por lo general, las que se derivan de la función a para la que se diseña la pieza. En este caso, serán, por tanto, las que se deduzcan de la circulación del flujo hidráulico con la sección llena. Suponiendo que dicho flujo sea uniforme y permanente. La acción que ejerce sobre el canal puede descomponerse en una presión gravitatoria asimilable a una situación de carga hidrostática; y en una tensión tangencial de rozamiento; que, con las características de la conducción analizada tiene unos valores, en cada punto, de un orden mil veces inferior a la presión hidrostática. Por tanto, será esta la principal acción de cálculo a considerar.

Sus valores se discretizarán de manera que cada elemento estará sometido a una presión normal a su plano y con un valor uniforme que dependerá de la cota media, con respecto a la superficie libre de la corriente. Se considerará que la sección del canal no contiene exactamente a la sección del flujo, es decir, que hay resguardo, situación normal de trabajo del mismo. Pero en algunos modelos, tendremos en cuenta la ausencia de resguardo por tratarse de la peor situación de trabajo de la conducción, por lo que la sección del canal contendrá exactamente a la sección del flujo.

Además del peso de la corriente se considerará una carga en las hombreras de  $1962 \text{ N/m}^2$ , uniformemente repartida, a modo de carga de uso que puede soportar el canal.

En toda pieza o estructura hay que considerar su propio peso. Esta carga tiene, en este caso, una importancia mayor de lo habitual por las especiales condiciones desfavorables de rigidez de la pieza.

Estas serán, por tanto, las acciones que consideramos más significativas para un primer análisis comparativo del comportamiento mecánico de los modelos definidos.

Posteriormente, con una selección de los modelos con mejor respuesta, se completará este estudio con otro más orientado hacia una comprobación de las posibilidades reales de este tipo de conducciones. Para ello se tendrán en cuenta una serie de acciones, que están recogidas en las Normas UNE, y que, a pesar de su carácter accidental, son relativamente frecuentes, tanto en el proceso de montaje como en la vida real de la conducción; como son las debidas a pesos puntuales y golpes laterales.

Para analizar el efecto de los pesos puntuales, se considerará la peor situación de las especificadas en las Normas UNE para la "Determinación de la resistencia a carga

estática” (artículo 8.3 de la 53-302-76 y 6.1 de la 53-342-78). Para ello, se someterá a los modelos seleccionados a una Fuerza puntual de 1.471 N ( $\approx$  150 Kg) aplicada en uno de los extremos de la sección equidistante a los apoyos.

Esta Fuerza se considerará actuando simultáneamente con la presión hidrostática, es decir, en la situación de conducción llena de agua.

Para evaluar el efecto de los golpes laterales, adaptaremos los artículos de las Normas UNE: “Ensayo de resistencia a un golpe lateral” (artículo 8.4 de la 53-302-76 y 6.2 de la 53-342-78) a una situación de carga estática suficientemente desfavorable. Consideraremos una Fuerza puntual lateral (en el plano de la superficie libre del fluido y perpendicular al eje de la conducción) con la misma intensidad que la anterior (1.471 N) y aplicada en el mismo punto. En este caso, la peor situación de carga se dará cuando la conducción esté vacía, por lo que no actuará simultáneamente a la presión hidrostática.

Los materiales compuestos están sometidos frecuentemente a lo que se denomina afectos higrotérmicos, residuales o de curado. Este particular tipo de acción, en el que influye el proceso de transformación que se utilice para fabricar el material, está causado por las diferencias en las condiciones de temperatura y humedad que sufre entre su fabricación y su utilización; de ahí que, por ejemplo, un preimpregnado produzca generalmente esfuerzos y deformaciones relativamente acusados con este origen.

A nivel micromecánico, las tensiones de procesado o de curado están causadas por la contracción volumétrica de la matriz, la contracción debida a la diferencia de temperatura entre la matriz y la fibra después del enfriamiento, y la consolidación o solidificación no uniforme. A nivel macromecánico o lámina, estas tensiones se generan por una contracción diferencial después del enfriamiento en láminas anisótropas y la expansión que produce después la absorción de humedad (TSAI, MIRAVETE, 1987). Estas última pueden calcularse, con relativa facilidad, con la teoría de placas laminadas, al igual que las tensiones de origen mecánico, de forma que el estado tensional y de deformación total en un laminado se calcula sumándolos efectos higrotérmicos a los de origen mecánico. A nivel micromecánico los efectos higrotérmicos son más difíciles de evaluar.

Este tipo de acciones no se van a considerar en los modelos que analiza esta Tesis por las siguientes razones:

1. En primer lugar, no disponemos de los datos de coeficientes de expansión térmica ( $\alpha$ ) ni de coeficientes de expansión debido a la humedad ( $\beta$ ) de las láminas con las que estamos trabajando.

2. Tampoco disponemos de datos sobre las diferencias de temperatura y humedad a las que estarían sometidos los laminados entre su fabricación y su utilización.
3. Por otra parte, ALGOR sólo permite el cálculo de estas acciones con datos de diferencias de temperatura y no de humedad.
4. Parece ser que en piezas cuyo trabajo implique un ambiente húmedo, como es nuestro caso, el laminado (o cuando menos, las que se encuentran en contacto con el agua) tiene una tendencia a absorber humedad y éste hecho provoca una disminución de las tensiones resultantes de una alta temperatura de curado (TSAI, MIRAVETE, 1987).

### **2.3.4 RESUMEN GENERAL DE CARACTERÍSTICAS**

Como resumen de los apartados anteriores, definimos en éste, detalladamente, los modelos a analizar. En esta definición es importante distinguir las características comunes a todos los modelos de las propias de cada uno; ya que éstas últimas son, en definitiva, las variables cuyo estudio han de dar respuesta a los objetivos planteados.

#### **2.3.4.1 Características comunes a todos los modelos**

Las podemos agrupar en:

- a) GEOMETRICAS
  - b) HIDRÁULICAS
  - c) DEL MATERIAL
  - d) DEL MÉTODO DE CÁLCULO
  - e) ACCIONES Y COACCIONES
- A) GEOMÉTRICAS: Las piezas serán prismáticas, de directriz recta, de 3 m y 5 m de longitud y de espesor constante en su sección transversal.
- B) HIDRÁULICAS: Se supondrá, en todas las piezas, que la corriente es uniforme y permanente. La pendiente del eje hidráulico (igual que la línea piezométrica y la solera del canal) será 1/1000. El caudal de todas las secciones a analizar, según Manning, será el mismo: 100 l/s con un coeficiente de fricción del material:  $n = 0,010$ . Por último, todas las secciones son las de mayor eficiencia hidráulica (menor radio hidráulico).

- C) DEL MATERIAL: Todas las piezas serán de dos laminas de GRC en los extremos y una lamina de PE en el centro del sándwich.
- D) DEL METODO DE CÁLCULO: Se calcularán con el Método de los Elementos Finitos, en análisis estático y lineal. Se utilizará el programa ALGOR y su elemento tridimensional BRICK.

#### **2.3.4.2 Variables a analizar**

- A) TIPOS DE APOYO: Se analizarán 4 tipos de apoyos: coacción a desplazamiento y rotación, coacción sólo al desplazamiento, que se modeliza como coacción verticales y horizontales y apoyo simple, modelizado como coacciones verticales en un solo sentido (hacia abajo).
- B) ESPESOR DE LAS CAPAS: se analizarán modelos con 6 espesores, con la siguiente combinación: 10-20-10 mm, 10-30-10 mm, 15-15-15 mm, 15-30-15 mm, 15-24-15 mm, 18-18-18 mm. La primera y última cifra indican el espesor del GRC y la del medio el PEE. Con el GRC se utilizarán 3 espesores: 10 mm que sería el espesor mínimo que se puede considerar de partida, 15 mm es el considerado espesor mínimo que se puede obtener en el proceso de fabricación, los 18 mm sería el espesor máximo que podríamos utilizar para conseguir un espesor homogéneo de las tres capas en un canal comercial. En el caso el polietileno expandido, utilizaremos 5 espesores: 15 mm por ser el espesor mínimo de la capa de GRC, 18 mm en el caso de capas de espesor homogéneo de canales comerciales, 24 mm sería el espesor de polietileno expandido para un canal comercial utilizando un espesor de 15 mm de GRC y los espesores de 20 mm y 30 mm han sido elegidos dos espesores intermedios.
- C) TALUD DEL CANAL: Se analizarán canales con un talud de  $60^\circ$ , utilizado en los estudios previos a esta Tesis, y un talud de  $73^\circ$ , empleado en los canales comerciales.
- D) INCREMENTO DEL ESPESOR DE LA CAPA DE GRC EXTERIOR EN EL APOYO DE LA CAMPANA: Se analizarán modelos en los que se incrementará el apoyo de la campana en 15 mm, 20 mm, 30 mm y 40 mm.
- E) INCREMENTO DE LA LONGITUD DE APOYO DE LA CAMPANA: Se analizarán dos longitudes de apoyo en la campana, 100 mm longitud mínimo que se puede considerar y 180 mm, longitud total de la campana.

- F) REFUERZOS: Se analizará refuerzos longitudinales (en la base, esquinas y paredes del canal) y transversales. Estos refuerzos consistirán en colocar en la capa de polietileno expandido unas láminas de GRC. Longitudinalmente en la base se colocarán un refuerzo central (40 mm, 80 mm, 120 mm, 160 mm, 200 mm, 240 mm) y dos equidistantes (40 mm y 60 mm); en las paredes, uno central (de 60 mm, 100 mm y 140 mm) y dos equidistante (de 40 mm y 60 mm). Transversalmente se colocarán uno central, dos y tres equidistantes (de 200 mm, 400 mm y 500 mm).
- G) CRITERIOS DE ROTURA: Se analizará la resistencia de cada modelo teniendo en cuenta los criterios de la máxima tensión y máxima deformación.



## **3 RESULTADOS**

Índice

<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>1</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	3
3.2	MODELO DE REFERENCIA.....	4
3.3	DESARROLLO DE MODELOS DE 3 M DE LONGITUD .....	8
3.3.1	<i>Sándwich de 10-30-10</i> .....	8
3.3.2	<i>Sándwich de 15-30-15</i> .....	12
3.4	DESARROLLO DE MODELOS DE 5 M DE LONGITUD .....	16
3.4.1	<i>Sándwich de 10-20-10</i> .....	16
3.4.2	<i>Sándwich de 10-30-10</i> .....	20
3.4.3	<i>Sándwich de 15-15-15</i> .....	24
3.4.4	<i>Sándwich de 15-30-15</i> .....	28
3.5	DESARROLLO DE MODELOS COMERCIALES .....	32
3.5.1	<i>Sándwich de 15-15-15</i> .....	32
3.5.2	<i>Sándwich de 18-18-18</i> .....	37
3.5.3	<i>Sándwich de 15-24-15</i> .....	41
3.6	DESARROLLO DE MODELOS MODIFICANDO LA BASE DE APOYO DE LA CAMPANA .....	45
3.6.1	<i>Incremento del espesor del apoyo</i> .....	45
3.6.2	<i>Incremento de la longitud del apoyo</i> .....	49
3.7	DESARROLLO DE MODELOS INTRODUCIENDO REFUERZOS .....	53
3.7.1	<i>Refuerzo longitudinal en la base</i> .....	53
3.7.2	<i>Refuerzo longitudinal en base y vértices</i> .....	58
3.7.3	<i>Refuerzos longitudinales en base y paredes</i> .....	62
3.7.4	<i>Refuerzo transversal</i> .....	67
3.7.5	<i>Refuerzo longitudinal en vértices y transversal</i> .....	72
3.7.6	<i>Refuerzo longitudinal y transversal</i> .....	77

### 3.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Plan de trabajo propuesto, el proceso seguido en el análisis de los distintos modelos de conducciones consta de las siguientes fases:

**DEFINICIÓN Y ESTUDIO DEL MODELO DE REFERENCIA:** Denominamos así a un primer modelo que nos servirá de referencia para establecer el grosor de las capas del canal. Como ya hemos mencionado en varias ocasiones, partimos de estudios previos realizados por el Grupo de trabajo dirigido por el Doctor Ingeniero Agrónomo D. José Luis Meléndez Falkowski y el Doctor Ingeniero Agrónomo D. Luis Ricote Lázaro: “El GRC, tecnología de nuevos materiales para la fabricación de canales de riego”. En este modelo de referencia estudiaremos el comportamiento de los diferentes apoyos que se pueden establecer en los canales.

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL GROSOR DE LAS LÁMINAS:** Basándonos en los resultados obtenidos en el modelo de referencia, se generaran nuevos modelos modificando el espesor de las diferentes laminas que forman el panel sándwich para canales de 3 m y 5 m de longitud. En todos los casos, analizando el comportamiento de los diferentes apoyos que se pueden establecer en el canal.

**REPETICIÓN DE LA SERIE DE MODELOS CON DIFERENTE TALUD:** Se trata de estudiar canales con unas características más comerciales, talud y perímetro mojado del mismo.

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS RESTANTES VARIABLES PREESTABLECIDAS:** Basándonos en los resultados obtenidos en un modelo comercial, se trata de ir generando modelos modificando las variables de análisis establecidas en el capítulo anterior, reforzando los puntos de apoyo y colocando elementos de refuerzo en la estructura.

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO ANTE OTRO TIPO DE ACCIONES:** Por último, compararemos los resultados obtenidos cuando se modifica el tipo de acción a la que se somete las conducciones analizadas a situaciones de carga puntuales, desbordamientos y golpes laterales.

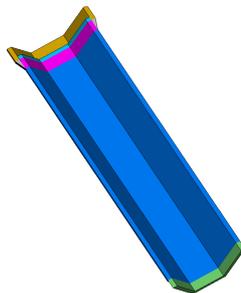
### 3.2 MODELO DE REFERENCIA

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	3,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	10 mm de GRC 20 mm de PE 10 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.



En el diseño del canal se ha tenido en cuenta los estudios de canales de 3 metros de longitud de una sola lámina de GRC previos, realizados por el equipo del Profesor Meléndez Falkowski.

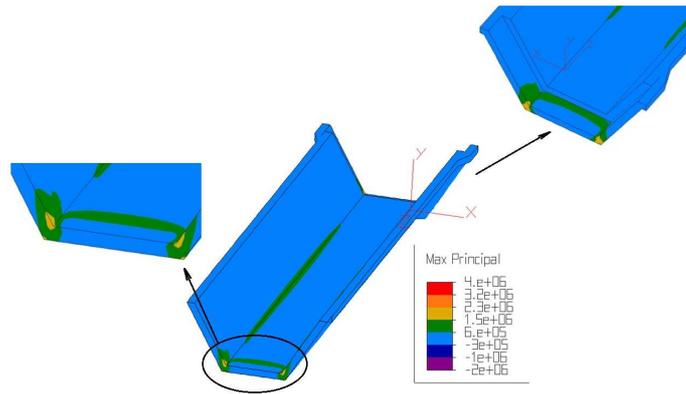
En este modelo de referencia vamos a estudiar el comportamiento del canal ante el tipo de apoyo, para ello se establecen 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

L3 10-20-10	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
001	MTxyz	MTxyz	1,26	-5,24	1,17	0,23	0,12	0,30	0,04
002	MTxyz	Txyz	1,26	-5,24	1,17	0,23	0,12	0,30	0,04
003	MTxyz	Txy	4,01	-7,29	1,77	0,30	0,12	0,30	0,08
004	MTxyz	Ty	4,04	-7,62	1,45	0,30	0,12	0,30	0,08
005	Txyz	MTxyz	1,26	-5,24	1,17	0,23	0,12	0,30	0,04
006	Txyz	Txyz	1,26	-5,24	1,17	0,23	0,12	0,30	0,04
007	Txyz	Txy	4,01	-7,29	1,77	0,30	0,12	0,30	0,08
008	Txyz	Ty	4,04	-7,62	1,45	0,30	0,11	0,30	0,08
009	Txy	MTxyz	3,17	-7,43	1,77	0,30	0,12	0,30	0,02
010	Txy	Txyz	3,17	-7,43	1,77	0,30	0,12	0,30	0,02
011	Txy	Txy	3,18	-7,35	1,78	0,30	0,12	0,30	0,12
012	Txy	Ty	3,21	-7,67	1,46	0,30	0,12	0,30	0,10
013	Ty	MTxyz	3,04	-7,47	1,78	0,30	0,12	0,30	0,02
014	Ty	Txyz	3,04	-7,47	1,78	0,30	0,12	0,30	0,02
015	Ty	Txy	3,05	-7,39	1,79	0,30	0,12	0,30	0,08
016	Ty	Ty	3,08	-7,72	1,47	0,38	0,31	0,30	0,18

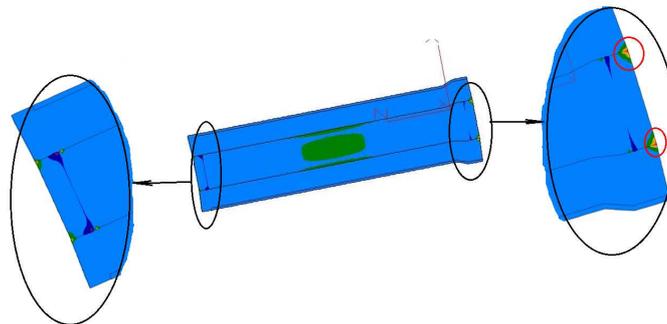
En la misma se refleja la resistencia, aplicando criterios de rotura (la tensión máxima) y el desplazamiento, tanto absoluto como los ejes x, y, z.

Según estos datos en el lado del macho del canal, los modelos con un apoyo simple, se modelizan como coacciones verticales en un solo sentido (hacia abajo), son los más desfavorables en los diferentes casos. En el lado de la campana, son los apoyos que coaccionan el movimiento de translación y rotación los más desfavorables. Aun así, cumpliría los límites impuestos en el capítulo anterior de tensión máxima (6,9 Mpa) y deformación (10 % del espesor de la sección).

Los resultados del modelo que coacciona el movimiento en el lado de la campana y apoyo en el lado del macho del canal, se considera como el sistema de apoyos más desfavorable, modelo 08, y se resumen en las siguientes figuras:



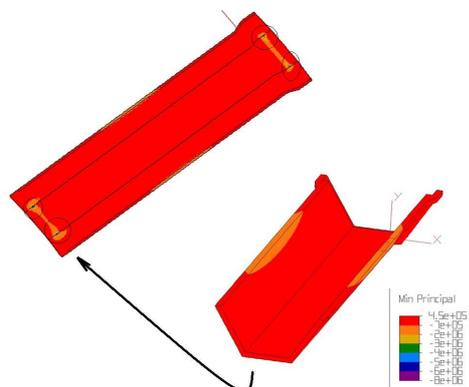
Vista superior del canal con detalles de macho y campana



Vista inferior del canal con detalles de macho y campana

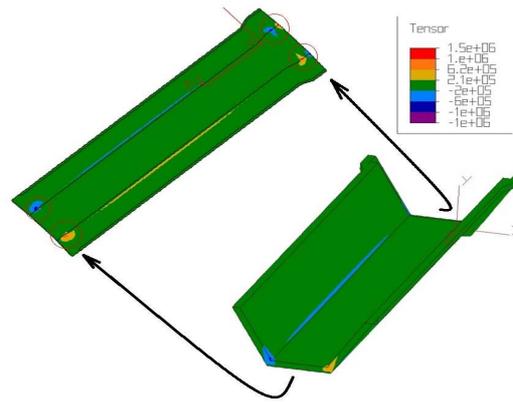
Tensión máxima

Como se observa en estas imágenes, la tensión máxima se localiza en los bordes de los apoyos, en el borde exterior de la campana. En la arista, tanto interiormente como exteriormente, la tensión es de 0,6 Mpa incrementándose a medida que nos acercamos a los extremos del canal aumenta a 1,5 Mpa. El resto del modelo soporta una tensión inferior a 0,6 Mpa.



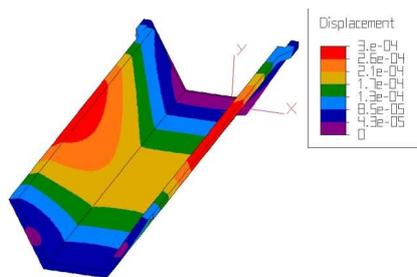
Tensión mínimos

El color rojo domina todo el modelo, es en los bordes de los apoyos donde se localiza el valor máximo de la tensión mínima (-8 Mpa). Esta tensión mínima se produce por el pandeo del canal al estar sometido a las acciones establecidas de cálculo.

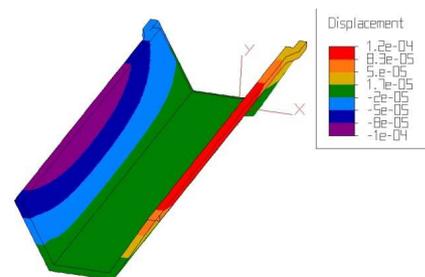


Tensión cortante

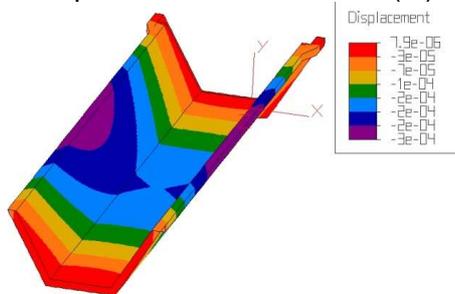
Como ha sucedido en el caso de la tensión máxima y mínima, los valores máximos se localizan en los bordes de los apoyos y en las aristas del modelo. Los valores máximos (1,5 Mpa) se producen en el interior de los apoyos debido al pandeo del canal, como puede observarse en la imagen.



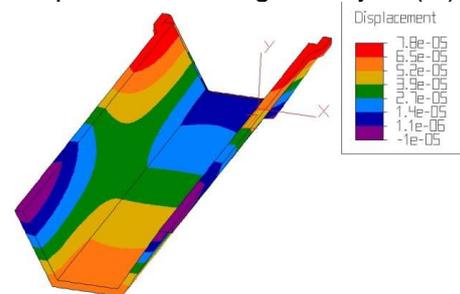
Desplazamientos absolutos (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



Desplazamiento según el eje y (m)



Desplazamiento según el eje z (m)

El mayor desplazamiento se produce en el centro del vano del canal debido al pandeo producido por la acción a la que se encuentran sometido. Es en las paredes, en concreto en el centro del vano y en la parte exterior, donde se produce el mayor desplazamiento (0,3 mm) por la acción de se ejerce sobre las mismas por parte del agua y de la carga colocada sobre las hombreras.

### 3.3 DESARROLLO DE MODELOS DE 3 M DE LONGITUD

#### 3.3.1 SÁNDWICH DE 10-30-10

La primera variable a analizar en estos modelos de 3 m de longitud es el incremento del espesor de las láminas de polietileno expandido.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	3,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	10 mm de GRC 30 mm de PE 10 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

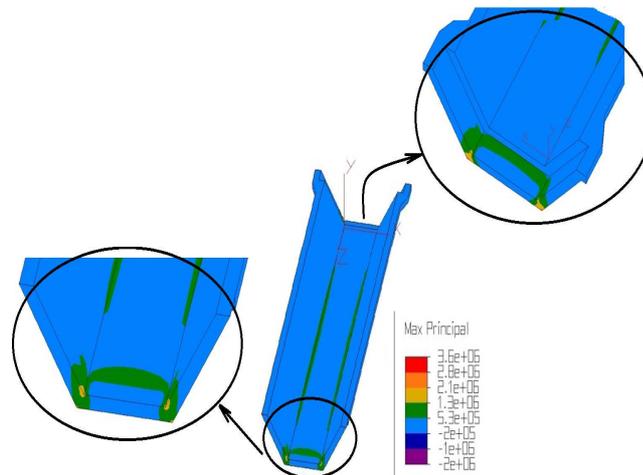
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este modelo, al igual que en el de referencia, vamos a estudiar el comportamiento del canal ante los tipos de apoyos, 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

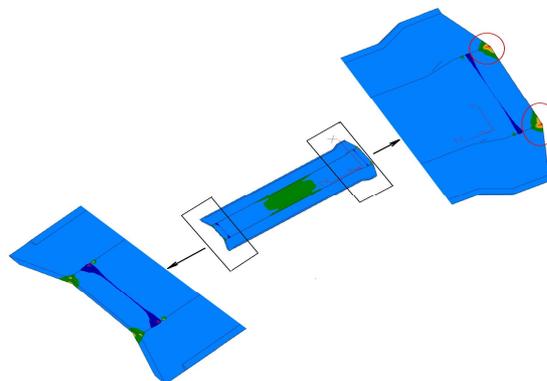
L3-10-30-10	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	1,01	-4,47	0,93	0,19	0,08	0,20	0,03
02	MTxyz	Txyz	1,01	-4,47	0,93	0,19	0,08	0,20	0,03
03	MTxyz	Txy	3,56	-6,18	1,43	0,25	0,08	0,20	0,07

04	MTxyz	Ty	3,58	-6,45	1,15	0,25	0,08	0,20	0,07
05	Txyz	MTxyz	1,01	-4,47	0,93	0,19	0,08	0,20	0,03
06	Txyz	Txyz	1,01	-4,47	0,93	0,19	0,08	0,20	0,03
07	Txyz	Txy	3,56	-6,18	1,43	0,25	0,08	0,20	0,07
08	Txyz	Ty	3,58	-6,45	1,15	0,25	0,08	0,20	0,07
09	Txy	MTxyz	2,84	-6,32	1,43	0,25	0,08	0,20	0,01
10	Txy	Txyz	2,84	-6,32	1,43	0,25	0,08	0,20	0,01
11	Txy	Txy	2,85	-6,23	1,44	0,25	0,08	0,20	0,08
12	Txy	Ty	2,87	-6,50	1,16	0,25	0,08	0,05	
13	Ty	MTxyz	2,76	-6,35	1,44	0,25	0,08	0,20	0,01
14	Ty	Txyz	2,76	-6,35	1,44	0,25	0,08	0,20	0,01
15	Ty	Txy	2,77	-6,26	1,44	0,26	0,08	0,20	0,12
16	Ty	Ty	2,79	-6,53	1,16	0,27	0,04	0,20	0,03

Según los datos, siguen siendo el apoyo simple en el lado del macho y las coacciones en la campana los más desfavorables, modelo 08. Los resultados se resumen en las siguientes figuras:



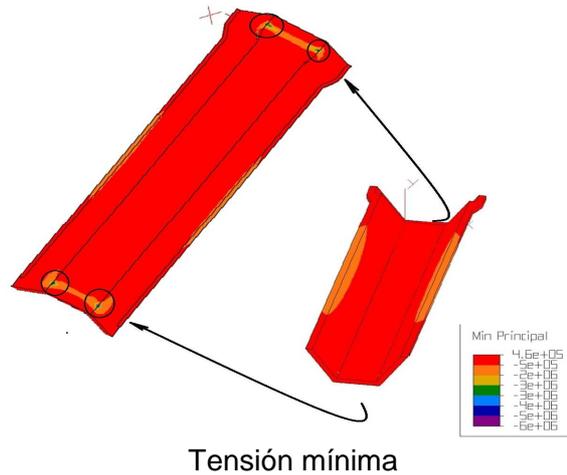
Vista superior del canal, detalle de macho y campana



Vista inferior del canal, detalle de macho y campana  
Tensión máxima

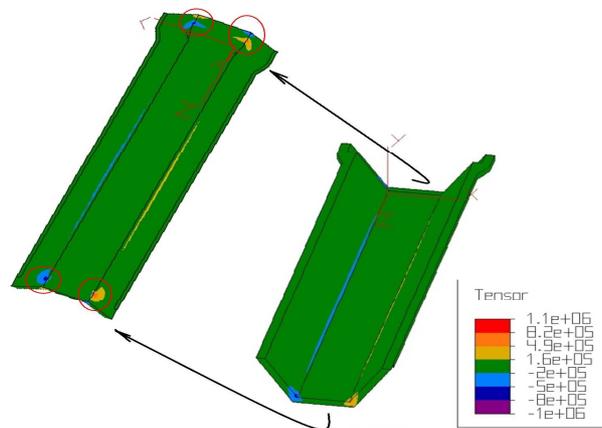
## RESULTADOS

La tensión máxima se produce en los vértices de la sección, tanto en el macho como en la campana. Los mínimos valores se dan en el borde interior de los apoyos del canal. El color azul domina el modelo que indica una tensión máxima de 0,53 Mpa. En las aristas de la sección, la tensión es 1,3 Mpa que se disipa a medida que nos acercamos a los extremos del modelo. Todos estos valores están alejados de los límites de cálculo establecidos de 6,9 Mpa.



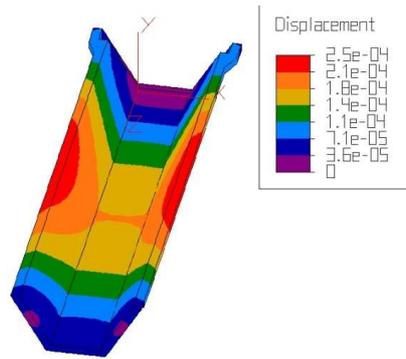
Tensión mínima

La tensión mínima se localiza en los bordes interiores de los apoyos, tanto del macho como de la campana (-6 Mpa). El color rojo (0,46 Mpa) domina el modelo, sólo en los puntos de apoyo el color cambia, como observamos en la imagen.

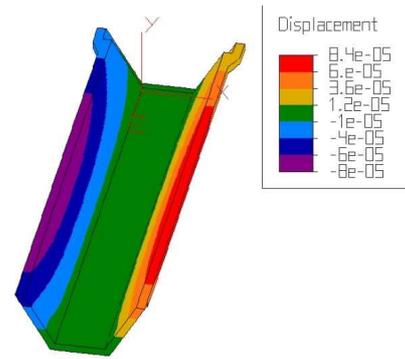


Tensión cortante

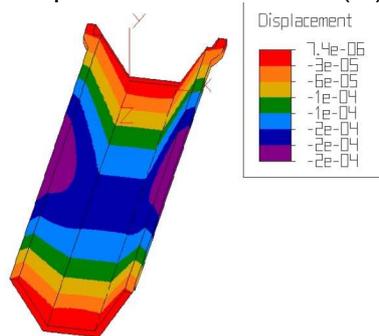
El color verde (1,6 Mpa) domina el modelo. Como se observa en la figura los valores máximos se localiza en los bordes interiores de los apoyos con una tensión de 1,1 Mpa. Esta máxima tensión cortante se produce por el pandeo del modelo debido a las cargas a que se ve sometido. En las aristas de la sección se observa una tensión de 0,5 Mpa que se disipa a medida que nos acercamos a los extremos del modelo.



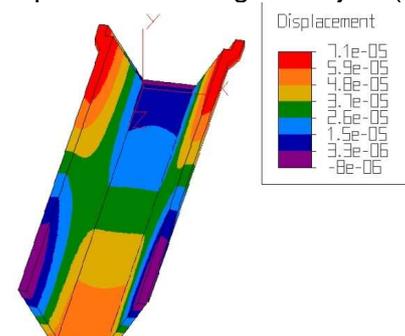
Desplazamiento absoluto (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



Desplazamiento según el eje y (m)



Desplazamiento según el eje z (m)

El desplazamiento máximo (0,25 Mpa) se localiza en los bordes superiores de las paredes debido al pandeo del modelo originado por las cargas a que se ve sometido, siendo mínimo en los apoyos. En relación a los desplazamientos según el eje “x”, este se produce en el borde libre de las paredes y a medida que nos acercamos a la arista de la base este disminuye, esto es debido a la presión del agua sobre las mismas y al ensamblado con la base. En cuanto al desplazamiento según el eje “y”, este tiene signo negativo en el centro del vano (- 0,2 mm) por la flecha que se origina y positivo en los bordes debido al pandeo que se produce por las cargas a las que se ve sometido. En cuanto al desplazamiento según el eje “z”, este se dirige hacia el centro del modelo debido al pandeo que sufre por las cargas que soporta, siendo mayor en los extremos de los bordes del modelo. Pero dentro de los límites de cálculo, 10% del espesor de la sección.

Como sucedía en el Modelo de Referencia, la zona de los apoyos es la zona más débil del canal. Aun así, cumpliría los límites impuestos en el capítulo anterior de tensión máxima y deformación.

### 3.3.2 SÁNDWICH DE 15-30-15

Otro criterio a considera es incrementar el espesor de la lamina de GRC a 15 mm. Se trata del espesor mínimo que ha de tener la lámina de GRC para una fabricación robotizada.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	3,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 30 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

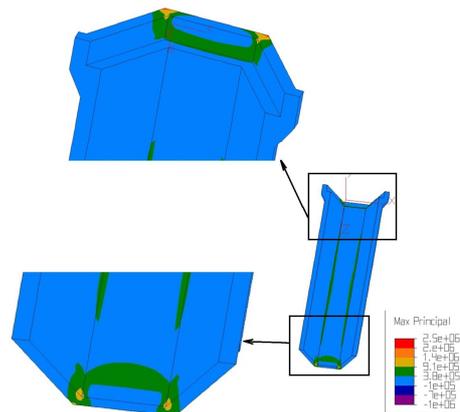
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Caga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

Como ha sucedido en los casos anteriores, en este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal a los diferentes tipos de apoyo que se establece, tenemos 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

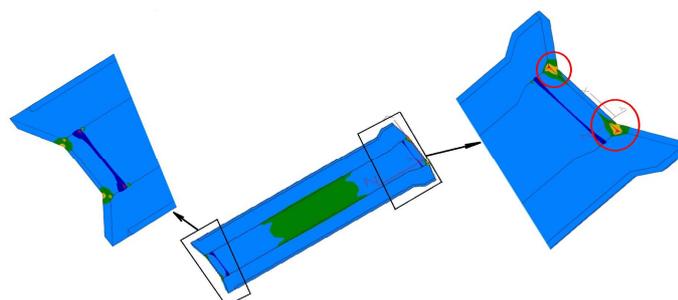
L3-15-30-15	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
001	MTxyz	MTxyz	0,76	-3,45	0,69	0,13	0,06	0,20	0,03
002	MTxyz	Txyz	0,76	-3,45	0,69	0,13	0,06	0,20	0,03
003	MTxyz	Txy	2,49	-4,71	1,03	0,19	0,06	0,20	0,06

004	MTxyz	Ty	2,50	-4,92	0,86	0,19	0,06	0,20	0,06
005	Txyz	MTxyz	0,76	-3,45	0,69	0,13	0,06	0,20	0,03
006	Txyz	Txyz	0,76	-3,45	0,69	0,13	0,06	0,20	0,03
007	Txyz	Txy	2,49	-4,71	1,03	0,19	0,06	0,20	0,06
008	Txyz	Ty	2,50	-4,92	0,86	0,19	0,06	0,20	0,06
009	Txy	MTxyz	2,01	-4,78	1,03	0,18	0,06	0,20	0,01
010	Txy	Txyz	2,01	-4,78	1,03	0,18	0,06	0,20	0,01
011	Txy	Txy	2,04	-4,76	1,04	0,00	0,05	0,20	0,00
012	Txy	Ty	2,23	-4,93	0,86	0,00	0,03	0,20	0,00
013	Ty	MTxyz	1,94	-4,80	1,03	0,19	0,06	0,20	0,01
014	Ty	Txyz	1,94	-4,80	1,03	0,19	0,06	0,20	0,00
015	Ty	Txy	2,01	-5,14	0,90	0,00	0,00	0,20	
016	Ty	Ty	2,01	-5,14	0,90	0,00	0,00	0,20	

Según estos datos, consideraríamos el modelo 08 como el más desfavorable. Los resultados se resumen en las siguientes figuras:



Vista superior del canal, detalle de macho y campana



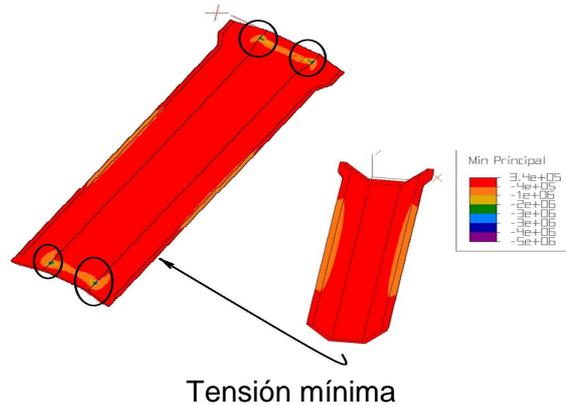
Vista inferior del canal, detalle macho y campana

Tensión máxima

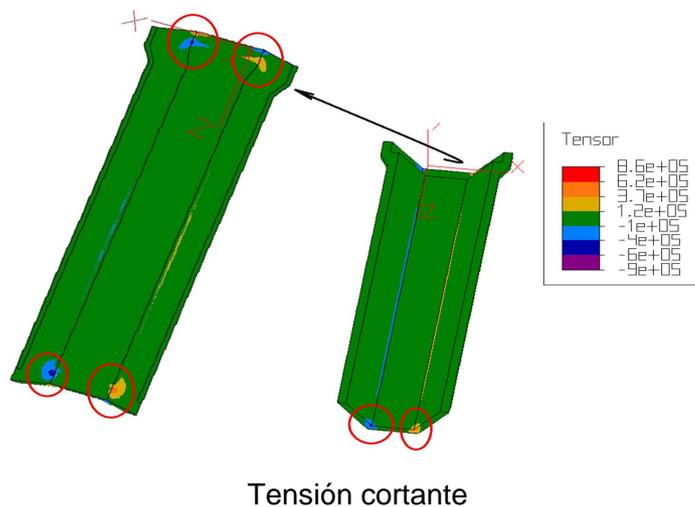
Hemos incrementado el espesor de las láminas que constituyen el sándwich y el color azul sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión de 0,38 Mpa y en las aristas de la sección esta aumenta hasta 0,91 Mpa disminuyendo desde el centro del modelo hacia los bordes del mismo. Por la parte inferior se observa una zona mayor de

## RESULTADOS

color verde debido al pandeo que experimenta el modelo por las cargas que soporta. Es en los vértices inferiores de la campana donde los valores son mayores, 2,5 Mpa debido a la coacción al desplazamiento en todos los ejes. En el borde interior de los apoyos se produce el valor más bajo de la tensión máxima debido al pandeo que experimenta el modelo con las cargas a que está sometido. Estos valores se encuentran por debajo de los límites de cálculos establecidos (6,9 Mpa).

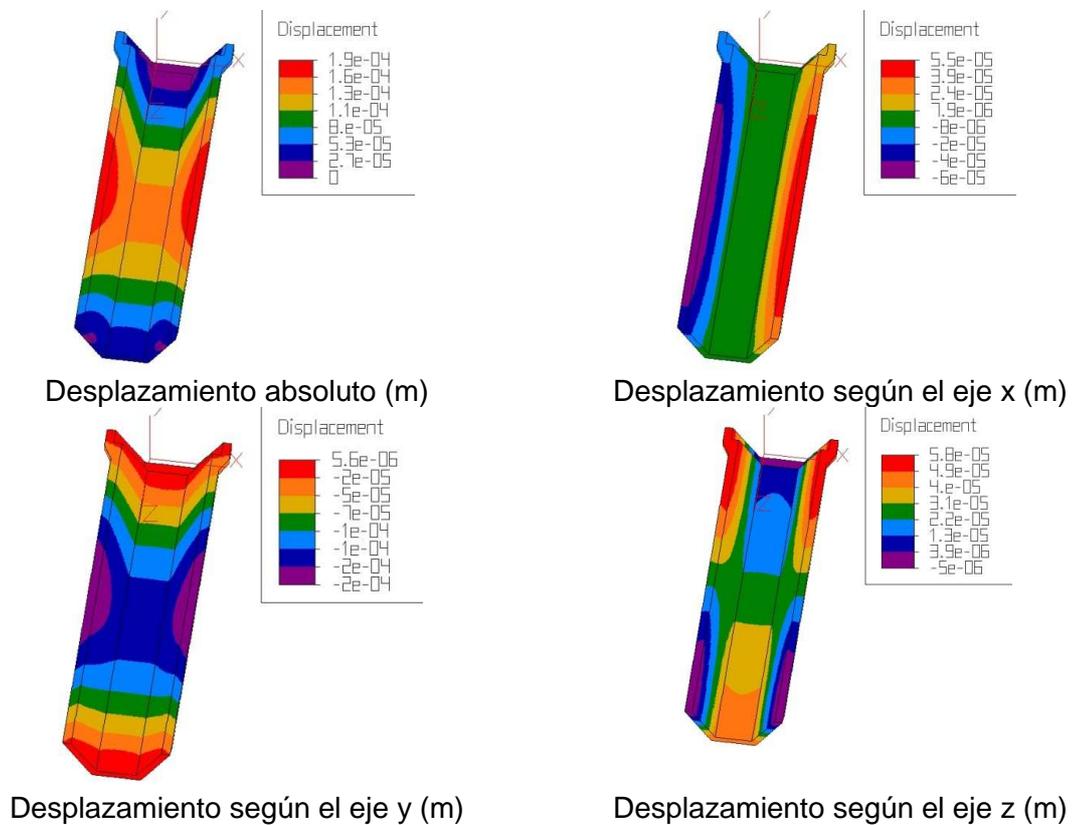


El rojo sigue dominando el modelo, la tensión mínima es homogénea en todo el modelo excepto en los bordes de los apoyos y en el borde superior de la campana. Es el borde interior del apoyo, tanto de la campana como del macho, donde la tensión mínima es mayor, con 5 Mpa. Estos resultados son debido al pandeo que se produce por las cargas a las que está sometido el modelo, pero dentro de los límites de cálculo establecidos.



En este caso, de tensión cortante, el color verde domina el modelo, lo que representa un valor de 1,2 Mpa. En las aristas de la sección, tanto por la parte superior como la inferior, la tensión cortante sube hasta los 3 - 4 Mpa y a medida que nos acercamos a los bordes exteriores del canal estos valores disminuyen. En los borde interiores de los apoyos son los puntos donde se produce la máxima tensión cortante, en torno a los 9

Mpa, por la parte inferior de la base del canal. Se produce por el pandeo que experimenta el canal por la acción de las cargas a las que se encuentra sometidos.



Teniendo en cuenta las coacciones a las que se ve sometido el modelo y a las cargas que actúan sobre él, el desplazamiento tipo que se produce es un pandeo. La arista superior de la pared sufre en máximo desplazamiento absoluto y las zonas sometidas a las coacciones no sufren ningún desplazamiento. En relación al desplazamiento según el eje "x", los máximos desplazamientos se produce hacia afuera del modelo debido al empuje del agua sobre las paredes del canal, en la parte superior. En cuanto al eje "y", el desplazamiento es negativo, hacia abajo en la zona central del vano y positiva o hacia arriba en la zona de apoyo. En el eje "z", este desplazamiento se dirige hacia el centro del modelo debido al pandeo de sufre. Como ha ocurrido hasta ahora, el desplazamiento se encuentra dentro de los límites de cálculo establecidos del 10 % del espesor de la sección (6 mm).

Aumentando el espesor de la lámina de GRC 5 mm, ha supuesto una reducción de los resultados obtenidos por lo que nos alejamos un poco más del límite de cálculo establecido tanto para la tensión máxima como para la deformación que experimenta el modelo. Resaltar que los máximos valores se siguen produciendo en los apoyos del modelo.

### 3.4 DESARROLLO DE MODELOS DE 5 M DE LONGITUD

#### 3.4.1 SÁNDWICH DE 10-20-10

Los modelos de 3 metros cumplen los márgenes de rotura y deformación por lo que pasamos a desarrollar los modelos de 5 m, longitud más empleada. Partimos de los espesores del modelo de referencia y las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	10 mm de GRC 20 mm de PE 10 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

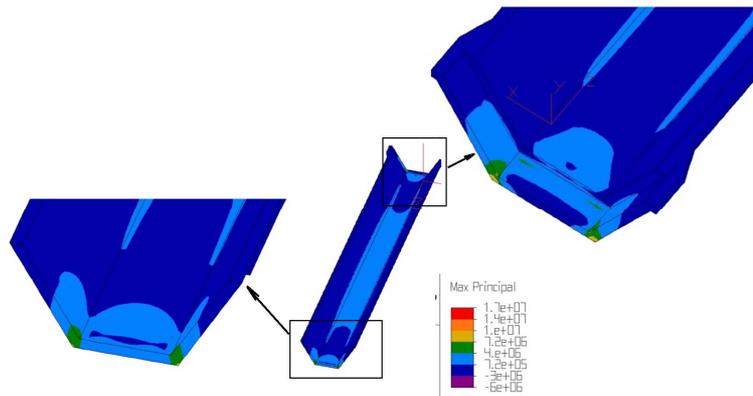
En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal al tipo de apoyo que se establece, 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

L5-10-20-10	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	6,75	-14,52	3,03	0,96	0,13	1,40	0,16
02	MTxyz	Txyz	6,75	-14,52	3,03	0,96	0,13	1,40	0,16
03	MTxyz	Txy	16,83	-22,05	5,14	1,39	0,13	1,40	0,30
04	MTxyz	Ty	17,02	-22,55	4,43	1,41	0,13	1,40	0,30

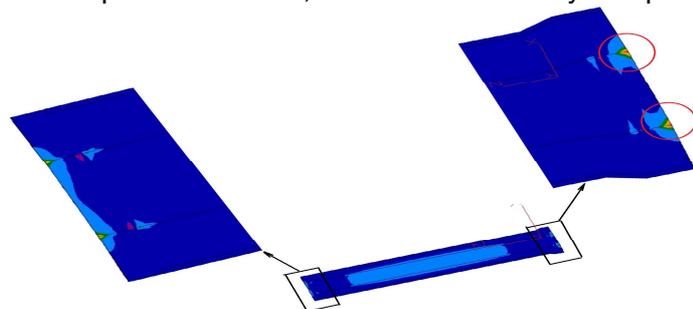
05	Txyz	MTxyz	6,75	-14,52	3,03	0,96	0,13	1,40	0,30
06	Txyz	Txyz	6,75	-14,52	3,03	0,96	0,13	1,40	0,30
07	Txyz	Txy	16,83	-22,05	5,14	1,39	0,13	1,40	0,30
08	Txyz	Ty	17,02	-22,55	4,43	1,41	0,13	1,40	0,30
09	Txy	MTxyz	14,26	-22,74	5,14	1,40	0,13	1,40	0,07
10	Txy	Txyz	14,26	-22,74	5,14	1,40	0,13	1,40	0,07
11	Txy	Txy	13,38	-22,28	5,20	1,41	0,13	1,40	0,33
12	Txy	Ty	13,53	-22,80	4,42	1,45	0,13	1,40	0,45
13	Ty	MTxyz	14,44	-22,98	5,20	1,42	0,13	1,40	0,07
14	Ty	Txyz	14,44	-22,98	5,20	1,42	0,13	1,40	0,07
15	Ty	Txy	13,05	-22,52	5,25	1,45	0,13	1,40	0,47
16	Ty	Ty	13,21	-23,04	4,21	2,82	2,36	1,40	0,98

Al igual que sucedía en el caso de los canales de 3 m, el apoyo simple en el macho del canal y las coacciones en la campana son los casos más desfavorables. En este modelo, la tensión sobrepasa 6,90 Mpa establecidos como tensión máxima que podría soportar el canal, el valor de la tensión mínima también es muy elevada. El desplazamiento se encuentra dentro de los límites establecidos como normales.

Los resultados del modelo 08, que vamos a tomar como el más desfavorable, se resumen en las siguientes figuras:



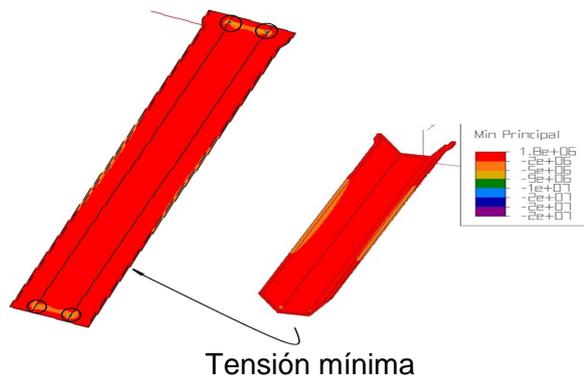
Vista superior del canal, detalles de macho y campana



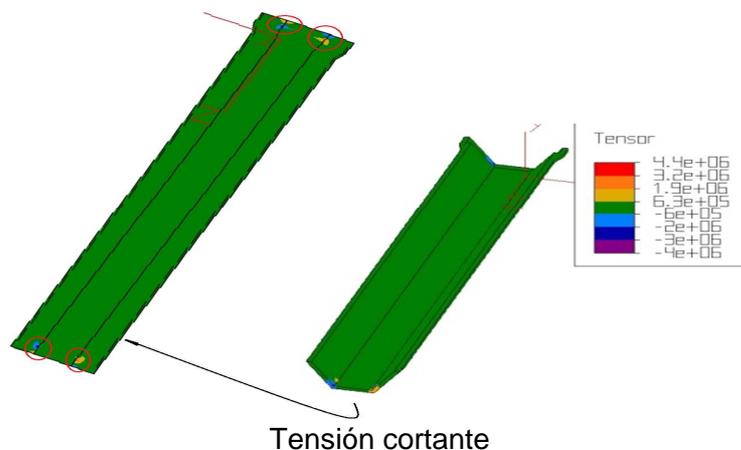
Vista inferior del canal, detalle de macho y campana  
Tensión máxima

## RESULTADOS

Como se observa en las dos imágenes, la tensión máxima se localiza en el vértice inferior de la campana pero más del doble del valor considerado como límite de cálculo, los 6,9 Mpa. En este modelo, el color dominante es el azul oscuro que representa una tensión de 0,7 Mpa, localizándose en las paredes de la sección. El azul más claro domina la base del modelo que supone una tensión de 4 Mpa, sin llegar a los bordes de la base. Pero es en los vértices inferiores de la campana donde se produce una tensión de 17 Mpa, muy alejado del límite de cálculo establecido y 14 Mpa en el macho. Como era de esperar se han rebasado este límite de cálculo porque se han incrementado la longitud del vano (5 m) por lo que produce un mayor pandeo.

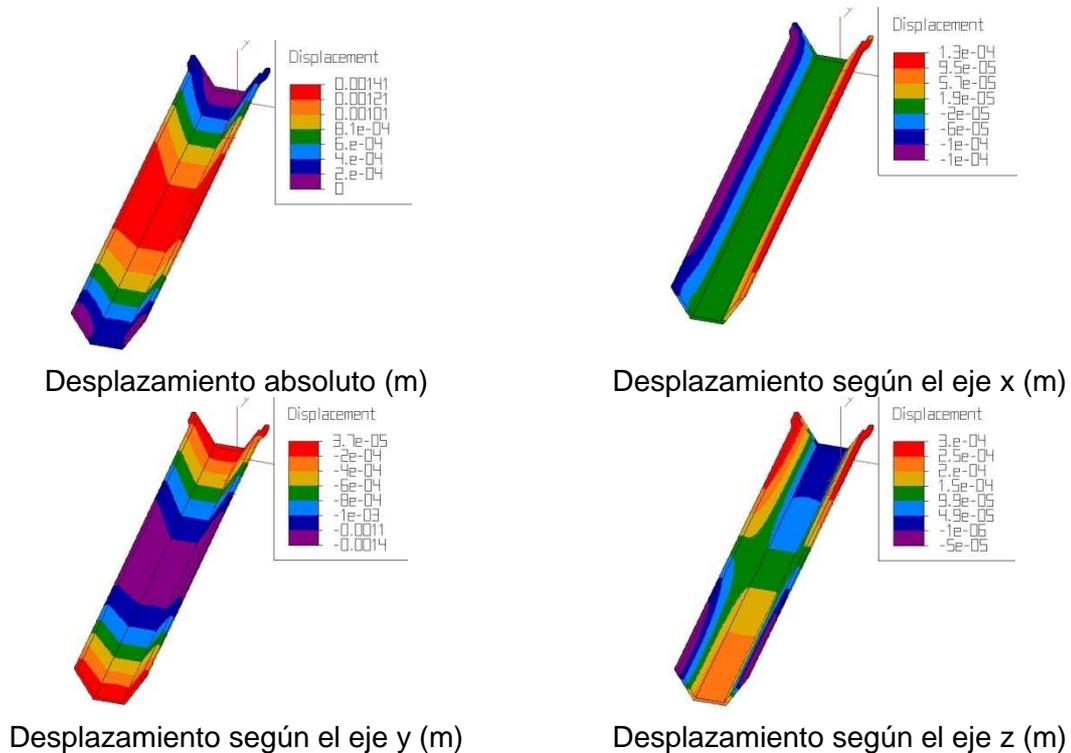


En cambio, el color rojo domina el modelo en cuanto a la tensión mínima. Al igual que ocurría en los modelos de 3 m de longitud, en el centro del borde superior de las paredes y en los apoyos este color no cambia. Es precisamente en los bordes interiores de los apoyos del modelo donde se produce los valores máximos de tensión mínima. Se trata de los puntos que sufren el pandeo al que se ve sometido el modelo debido a los efectos de las cargas a las que sometemos al modelo. Pero dentro de los límites de cálculo establecidos.



El color verde es el dominante en los resultados obtenidos para la tensión cortante del modelo a estudio. Dicho color representa una tensión de 0,63 Mpa. Es en los bordes interiores de los apoyos donde este color es diferente para indicar una tensión cortante

de 4 Mpa, probablemente debido al efecto de pandeo originado por las cargas a las que se ve sometido el modelo a estudio. Indicar que los valores máximos de tensión cortante del modelo se en cuenta dentro de los límites de cálculo establecidos.



Comparativamente con los modelos estudiados hasta este momento, una longitud de 3 m, el desplazamiento máximo se circunscribía al borde superior de las paredes del canal, en su parte central. En este caso, canales de 5 m de longitud, el desplazamiento máximo se produce en toda la sección central del modelo, incluido la base. Con un desplazamiento absoluto de 1,4 mm, nos encontramos dentro de los límites de cálculo establecidos para un espesor de la sección de 40 mm, lo que sería 4 mm. Como se observa en el desplazamiento según el eje “x”, este se produce en borde libre de las paredes debido a la acción del agua sobre las mismas. En cuanto al desplazamiento según “y”, el máximo se produce en el centro del vano por la acción de las cargas sobre el mismo y con sentido negativo según la orientación que le hemos dado a dicho eje y positivo, es decir hacía arriba en los bordes del modelo debido a el citado pandeo que se produce. En cuanto al eje “z” el desplazamiento se produce hacía el centro del modelo, longitudinalmente, por la fecha que se produce con el pandeo del modelo.

Para resumir, el estudio de este modelo, al igual que sucedía con los modelos de 3 m, los apoyos son las zonas más desfavorables, pero en este caso fuera de los límites de cálculos establecidos en tensiones (6,9 Mpa).

### 3.4.2 SÁNDWICH DE 10-30-10

Otro criterio a considera sería incrementar el espesor de la lamina de polietileno expandido a 30 mm. Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	10 mm de GRC 30 mm de PE 10 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

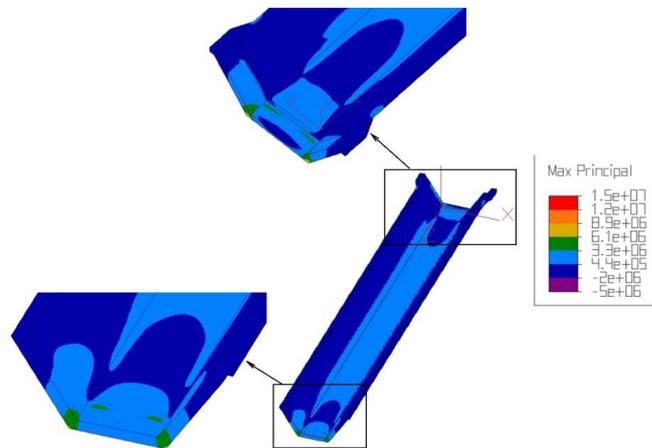
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Caga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este modelo vamos a estudiar también el comportamiento del canal al tipo de apoyo que se establece, tenemos 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

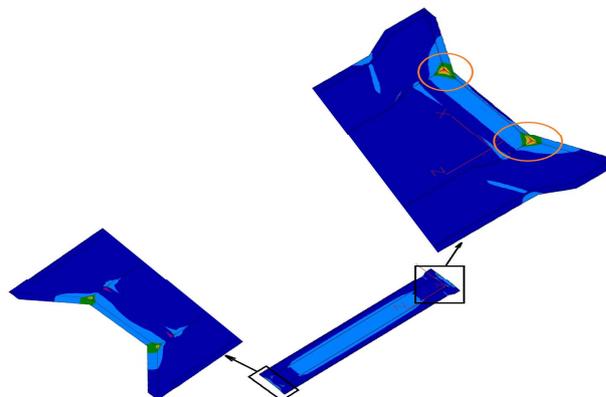
L5 10-30-10	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	5,50	-12,56	2,43	0,84	0,10	1,20	0,14
02	MTxyz	Txyz	5,50	-12,56	2,43	0,84	0,10	1,20	0,14
03	MTxyz	Txy	14,39	-18,83	4,17	1,22	0,10	1,20	0,27
04	MTxyz	Ty	14,51	-19,24	3,50	1,24	0,10	1,20	0,27
05	Txyz	MTxyz	5,50	12,56	2,43	0,84	0,10	1,20	0,14
06	Txyz	Txyz	5,50	-12,56	2,43	0,84	0,10	1,20	0,14
07	Txyz	Txy	14,39	-18,83	4,17	1,22	0,10	1,20	0,27

08	Txyz	Ty	14,51	-19,24	3,50	1,24	0,10	1,20	0,27
09	Txy	MTxyz	12,07	-19,50	4,19	1,23	0,10	1,20	0,05
10	Txy	Txyz	12,07	-19,50	4,19	1,23	0,10	1,20	0,05
11	Txy	Txy	11,54	-19,04	4,21	1,23	0,10	1,20	0,44
12	Txy	Ty	11,65	-19,45	3,50	1,56	0,10	1,20	1,08
13	Ty	MTxyz	12,20	-19,67	4,22	1,25	0,10	1,20	0,05
14	Ty	Txyz	12,20	-19,67	4,22	1,25	0,10	1,20	0,05
15	Ty	Txy	11,41	-19,21	4,25	1,40	0,10	1,20	0,77
16	Ty	Ty	11,51	-19,63	3,36	9,90	7,96	1,20	2,44

Los resultados de la tensión máxima y mínima siguen siendo elevados. El apoyo simple en el lado del macho y las coacciones en el de la campana los más desfavorables. En el caso de las coacciones en los dos apoyos se aproxima al límite de los 6,90 Mpa. Los resultados del modelo 08 los resumimos en las siguientes figuras:



Vista superior del canal, detalles de macho y campana

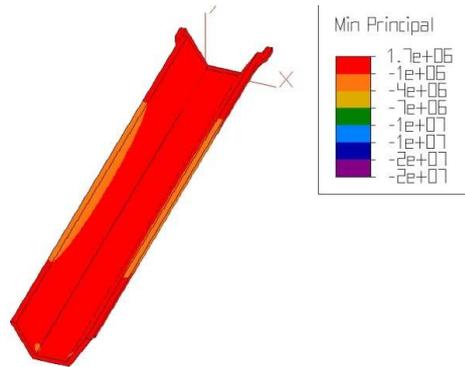


Vista inferior del canal, detalle del macho y campana  
Tensión máxima

El color azul oscuro domina las paredes del modelo, lo que representa una tensión de 0,44 MPa, aumentando dicha tensión en la base, tanto por la parte superior como por

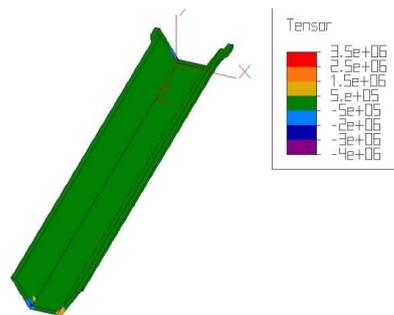
## RESULTADOS

la inferior. Pero es como ha sucedido hasta este punto, el valor máximo se produce en el vértice inferior de la campana donde alcanza los 14,51 Mpa, el doble del límite de cálculo.



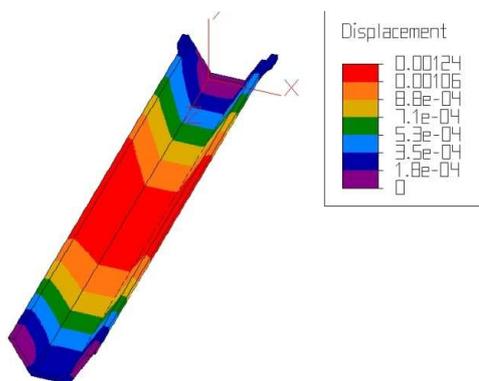
Tensión mínima

Los valores más altos se dan en los apoyos, en la parte interior de los mismos donde la tensión mínima es de 20 Mpa debido al pandeo que sufre el modelo por la acción de las cargas a que se somete el modelo. El color rojo sigue dominar el modelo, lo que representa una tensión mínima de 1,7 Mpa.

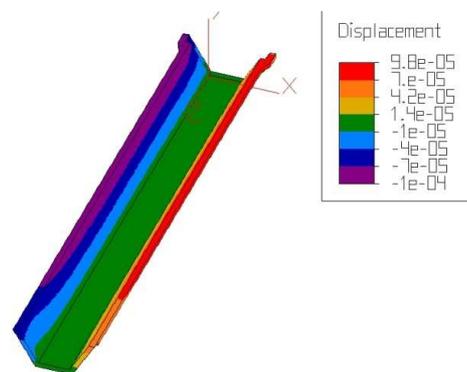


Tensión cortante

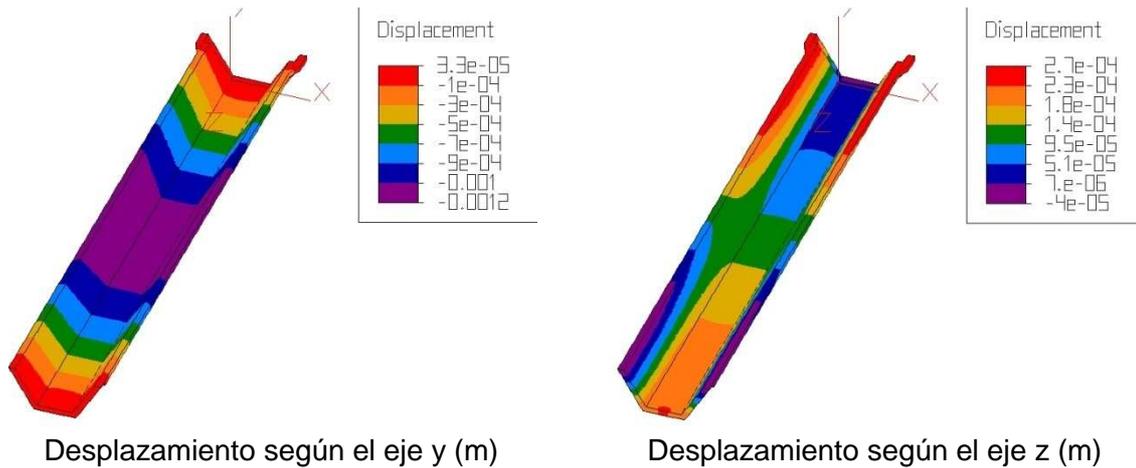
En los vértices del macho muestran los máximos valores de tensión cortante de 3,5 Mpa. El color verde, que representa 0,5 Mpa, es el que predomina en casi todo el modelo a estudio.



Desplazamiento absoluto (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



1,24 mm es el máximo desplazamiento que experimenta el modelo en el centro del vano, debido al pandeo que experimenta debido a la acción de las cargas a las que se somete el canal y las coacciones que experimenta dichas acciones en los extremos del mismo, donde el desplazamiento es cero. En cuanto al desplazamiento según los ejes se produce una apertura de las paredes del canal debido al empuje del agua sobre las mismas (0,1 mm), según el eje “x”. En relación al desplazamiento según el eje “y”, se produce un desplazamiento de signo negativo en el centro del vano (- 1,2 mm) y positivo en los extremos (0,03) debido al pandeo que sufre el modelo. En el caso del eje “z”, el desplazamiento se produce hacia el centro del modelo debido a la fuerza que se produce en el vano del canal. Indicar que estos valores estarían dentro de los límites de cálculo que se han considerado del 10 % del espesor de la sección del modelo (50 mm).

Para resumir, los apoyos siguen siendo los puntos más débiles del canal debido a las acciones que sobre ellas ocurren.

### 3.4.3 SÁNDWICH DE 15-15-15

Otro criterio a considera sería incrementar el espesor de la lamina de GRC a 15 mm por tratarse del espesor mínimo que se consideraría en la fase de fabricación.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 15 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

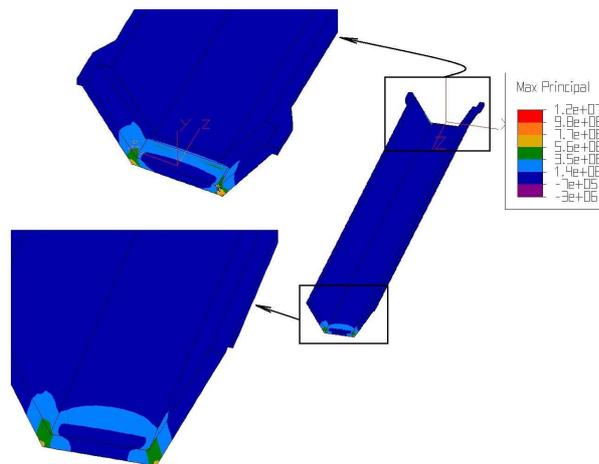
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Caga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este modelo vamos a estudiar también el comportamiento del canal al tipo de apoyo que se establece, tenemos 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

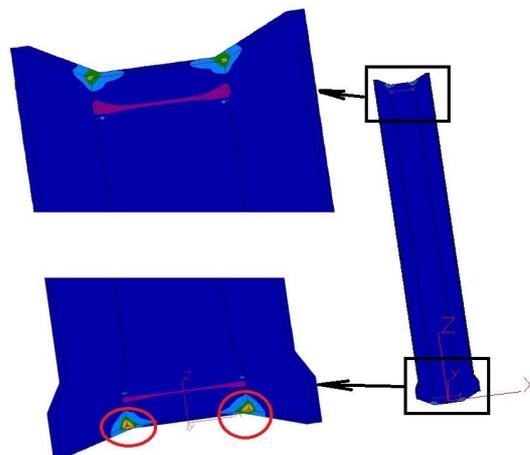
L5-15-15-15	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	3,97	-9,82	1,82	0,74	0,09	1,10	0,12
02	MTxyz	Txyz	3,97	-9,82	1,82	0,74	0,09	1,10	0,12
03	MTxyz	Txy	11,66	-15,45	3,04	1,10	0,10	1,10	0,25
04	MTxyz	Ty	11,89	-15,60	2,94	1,11	0,11	1,10	0,25
05	Txyz	MTxyz	3,97	-9,82	1,82	0,74	0,09	1,10	0,12

06	Txyz	Txyz	3,97	-9,82	1,82	0,74	0,09	1,10	0,12
07	Txyz	Txy	11,66	-15,45	3,04	1,10	0,10	1,10	0,25
08	Txyz	Ty	11,89	-15,60	2,94	1,11	0,11	1,10	0,26
09	Txy	MTxyz	9,41	-15,43	3,05	1,10	0,09	1,10	0,07
10	Txy	Txyz	9,41	-15,43	3,05	1,10	0,09	1,10	0,06
11	Txy	Txy	9,28	-15,62	3,07	1,12	0,09	1,10	0,04
12	Txy	Ty	9,46	-15,77	2,92	1,14	0,11	1,10	0,01
13	Ty	MTxyz	9,46	-15,50	3,06	1,11	0,09	1,10	0,06
14	Ty	Txyz	9,46	-15,51	3,06	1,11	0,09	1,10	0,06
15	Ty	Txy	8,57	-15,70	3,08	1,13	0,09	1,10	0,04
16	Ty	Ty	8,65	-15,86	2,37	1,23	0,42	1,10	0,23

Los resultados mejoran, pero sigue siendo el apoyo simple en el macho y la coacción en la campana los más desfavorables. La coacción en los dos apoyos ya está por debajo de los 6,90 Mpa. Los resultados del modelo 08 se resumen en las siguientes figuras:



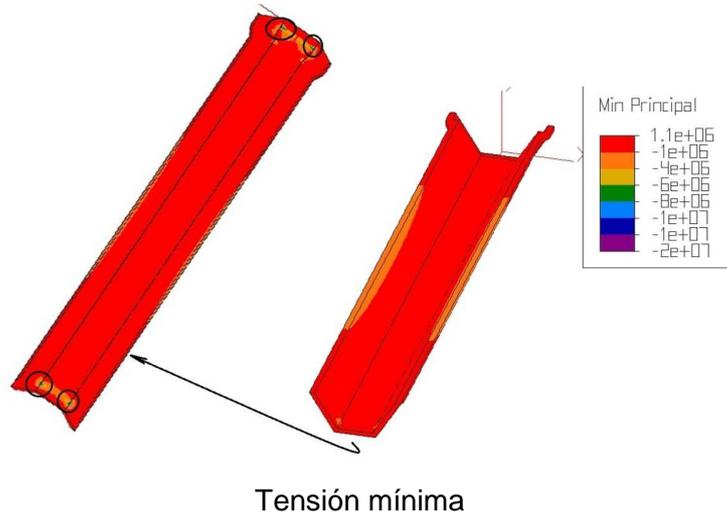
Vista superior del canal, detalle de macho y campo



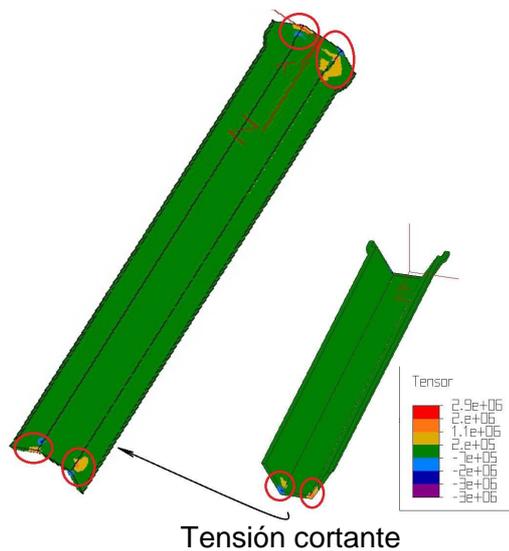
Vista superior del canal, detalle de macho y campana  
Tensión máxima

## RESULTADOS

En este modelo vemos que el color azul oscuro lo domina casi todo, lo que representa una tensión máxima de 1,4 Mpa. Es en los vértices inferiores de la campana donde se localiza la tensión máxima que soporta el modelo con 12 Mpa, un 73 % superior al límite de cálculo establecido.

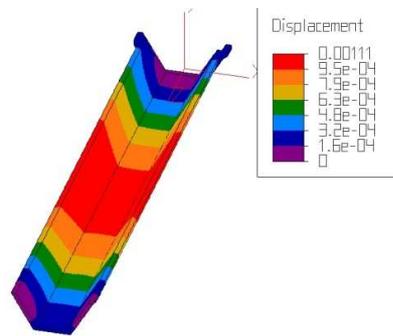


La tensión mínima se produce en los bordes interiores de los apoyos, con un valor de -20 Mpa. En el resto del canal es el rojo el color dominante, lo que representa una tensión mínima de 1,1 Mpa. Esto es debido al pandeo que experimenta el canal por las acciones a que se ve sometido.

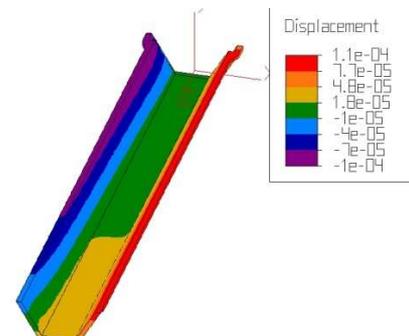


Como ocurre con la tensión mínima, es el borde interior de los apoyos donde se produce el valor más alto de la tensión cortante que experimenta el modelo, con 2,9 Mpa de tensión. Cabe pensar que esta tensión se produce por el efecto de pandeo que experimenta el vano por las acciones que se ejerce sobre el mismo y las coacciones a las que

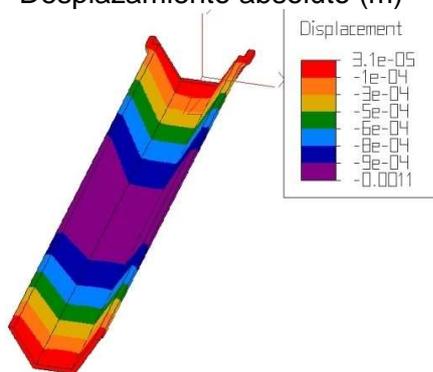
está sometido el modelo. El resto del canal tiene un color verde homogéneo que representa una tensión de 0,2 Mpa.



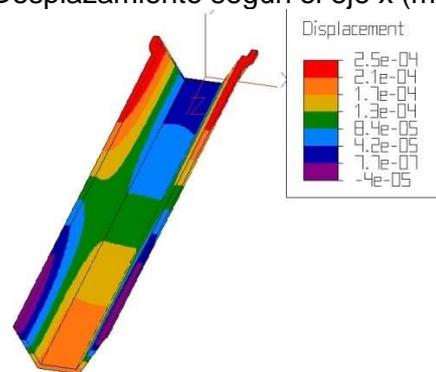
Desplazamiento absoluto (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



Desplazamiento según el eje y (m)



Desplazamiento según el eje z (m)

Teniendo en cuenta, que el modelo se encuentra apoyado en sus extremos, el desplazamiento que experimenta es de pandeo debido a las cargas que sufre el mismo. Es el centro del vano el que experimenta un mayor desplazamiento absoluto (1,11 mm) y a medida que nos acercamos a los extremos del canal este desplazamiento es nulo. En el caso del desplazamiento según el eje "x", es debido al empuje que origina el agua sobre las paredes del canal en la arista libre de las mismas. En el caso del eje "y", el desplazamiento es negativo en el centro del vano y positivo en los bordes del canal por el efecto de pandeo que experimenta el canal

Resumiendo, los puntos de apoyo del modelo sigue siendo el punto más débil, pero estos valores han disminuido, lo que era de esperar debido al incrementar del espesor de las láminas de GRC.

### 3.4.4 SÁNDWICH DE 15-30-15

Otro criterio a considera sería incrementar el espesor de la lamina de polietileno expandido a 30 mm, manteniendo el espesor de GRC en 15 mm, espesor mínimo de fabricación.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 30 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	60°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

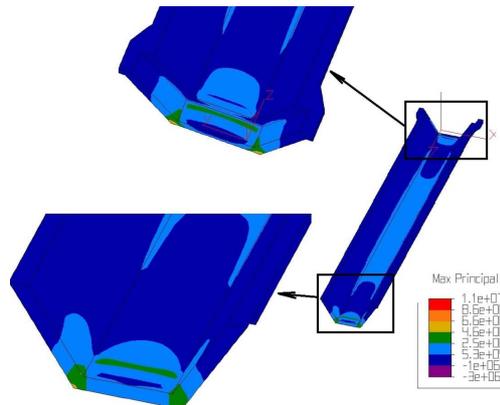
Al igual que hemos hecho, en este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal al tipo de apoyo que se establece, 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

L5-15-30-15	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	3,37	-9,43	1,72	0,64	0,07	1,00	0,11
02	MTxyz	Txyz	3,37	-9,43	1,72	0,64	0,07	1,00	0,11
03	MTxyz	Txy	10,53	-14,21	2,95	0,96	0,07	1,00	0,22
04	MTxyz	Ty	10,60	-14,44	2,43	0,97	0,07	1,00	0,22

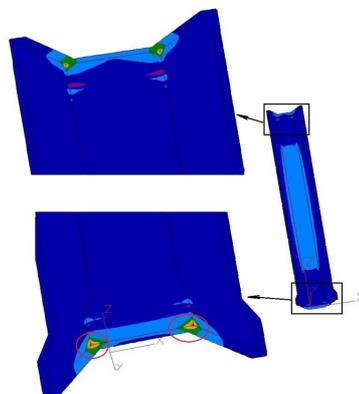
05	Txyz	MTxyz	3,37	-9,43	1,72	0,64	0,07	1,00	0,11
06	Txyz	Txyz	3,37	-9,43	1,72	0,64	0,07	1,00	0,11
07	Txyz	Txy	10,53	-14,21	2,95	0,96	0,07	1,00	0,22
08	Txyz	Ty	10,60	-14,44	2,43	0,97	0,07	1,00	0,22
09	Txy	MTxyz	8,95	-14,63	2,94	0,96	0,07	1,00	0,04
10	Txy	Txyz	8,95	-14,63	2,94	0,96	0,07	1,00	0,04
11	Txy	Txy	8,69	-14,39	2,98	0,00	0,06	1,00	0,00
12	Txy	Ty	9,56	-14,55	2,95	0,00	0,06	1,00	0,00
13	Ty	MTxyz	9,02	-14,72	2,96	0,97	0,06	1,00	0,04
14	Ty	Txyz	9,02	-14,72	2,96	0,97	0,06	1,00	0,04
15	Ty	Txy	8,47	-14,74	2,76	0,02	0,04	1,00	-0,02
16	Ty	Ty	8,67	-14,87	2,49	0,00	0,00	1,00	

Como en casos anteriores, el apoyo simple en el macho y las coacciones en la campana son los más desfavorables, pero el incremento del espesor hace que los resultados mejoren.

Los resultados del modelo 08, que consideramos como el caso más desfavorable, se resumen en las siguientes figuras:



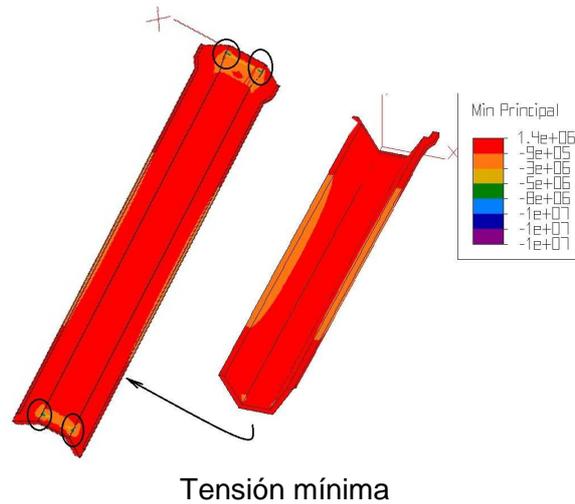
Vista superior del canal, detalle de macho y campana



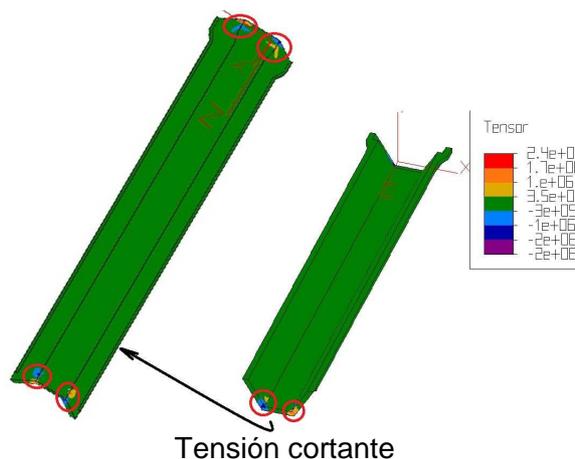
Vista inferior del canal, detalle de macho y campana  
Tensión máximos

## RESULTADOS

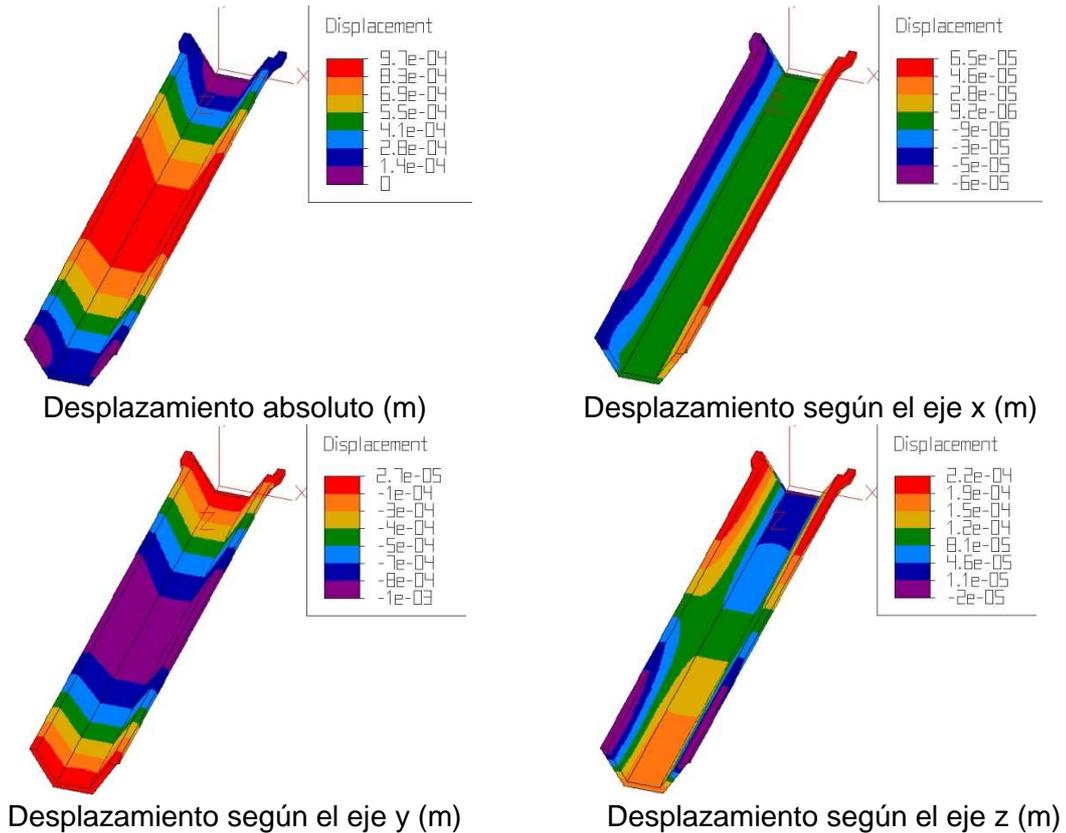
En las imágenes observamos que el color dominante es el azul en dos tonalidades, esto indica que las paredes están sufriendo una tensión de 0,53 Mpa y la base de 2,5 Mpa. Es en los vértices de la parte inferior de la campana donde se localizan la tensión máxima, 10,6 Mpa. Con estos espesores la tensión máxima se reduce un poco, en relación a modelos anterior, pero sigue estando un 50 % por encima de límite de cálculo establecido para el GRC.



La tensión mínima tiene un valor de -10 Mpa, localizada en los puntos interiores de los apoyos del modelo, se trata de una tensión puntual. El resto del canal comparte un color rojo que indica 1,4 Mpa y unas pequeñas franjas en los bordes exteriores de los lados con una tensión mínima de -0,9 Mpa.



La tensión cortante se localiza en los puntos de apoyo del canal, en la borde interior de los apoyos. El resto del modelo tiene una tensión cortante de 0,35 Mpa. Todo ello dentro de los límites de cálculo establecidos.



El pandeo que experimenta el modelo es de 0,97 mm. Se produce en el centro del vano, tanto en las paredes como en la base del canal. En los extremos del canal el desplazamiento es nulo. En cuanto al desplazamiento según el eje “x”, este se produce por la acción del agua sobre la misma en la arista libre (0,06 mm). En el eje “y” el desplazamiento es negativo en el centro del vano (1 mm) y positivo en los extremos (0,03 mm). En cuanto al eje “z”, el desplazamiento es mayor en los extremos que en el centro. Todo esto dentro del límite del 10% del espesor de la sección (60 mm).

Como hasta ahora ha ocurrido, los puntos de apoyo del canal siguen siendo los puntos más débiles, sufren la máxima tensión. El desplazamiento sigue estando dentro del límite de cálculo. Se ha producido una reducción de la tensión pero aún estamos lejos del límite de cálculo, los 6,9 Mpa.

### 3.5 DESARROLLO DE MODELOS COMERCIALES

El desarrollo de modelos que puedan ser viables comercialmente, es decir, que permitan no sólo crear nuevas redes de distribución, sino que se puedan reemplazar las deterioradas y obsoletas obligada a introducir nuevos parámetros. Un canal más comercial, supone utilizar un talud de  $73^\circ$  y una relación de la base y el lado mojado del mismo de 2 a 3.

#### 3.5.1 SÁNDWICH DE 15-15-15

Los primeros espesores considerados para esta nueva vía de estudio son los mínimos que podemos considerar en un proceso de fabricación robotizado.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 15 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	$73^\circ$ .
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

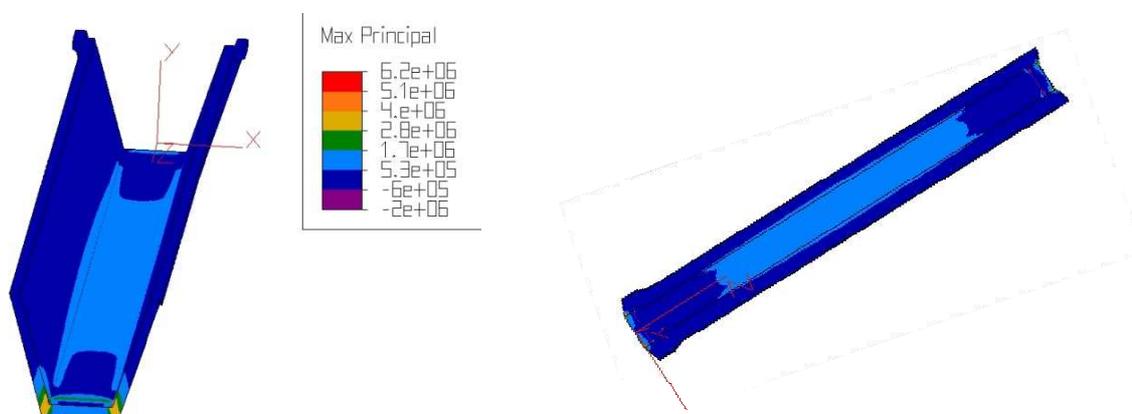
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de  $1962 \text{ N/m}^2$  uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este modelo vamos a estudiar también el comportamiento del canal al tipo de apoyo que se establece, 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

L5-73- 15-15-15	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	2,31	-7,25	1,00	0,46	0,17	0,07	0,01
02	MTxyz	Txyz	2,31	-7,25	1,00	0,46	0,16	0,07	0,10
03	MTxyz	Txy	6,21	-10,88	1,67	0,70	0,17	0,07	0,21
04	MTxyz	Ty	6,24	-11,33	1,49	0,70	0,17	0,07	0,21
05	Txyz	MTxyz	2,31	-7,25	1,00	0,46	0,17	0,07	0,10
06	Txyz	Txyz	2,31	-7,25	1,00	0,46	0,17	0,07	0,10
07	Txyz	Txy	6,22	-10,88	1,67	0,70	0,17	0,07	0,21
08	Txyz	Ty	6,24	-11,33	1,49	0,70	0,17	0,07	0,21
09	Txy	MTxyz	5,54	-11,18	1,67	0,70	0,17	0,07	0,04
10	Txy	Txyz	5,55	-11,19	1,67	0,70	0,17	0,07	0,04
11	Txy	Txy	5,16	-10,96	1,69	0,70	0,17	0,07	0,10
12	Txy	Ty	5,18	-11,42	1,50	0,70	0,17	0,07	0,01
13	Ty	MTxyz	2,31	-7,25	1,00	0,46	0,17	0,07	0,10
14	Ty	Txyz	5,57	-11,21	1,67	0,70	0,17	0,07	0,04
15	Ty	Txy	5,29	-11,00	1,68	0,70	0,17	0,07	0,07
16	Ty	Ty	5,31	-11,45	1,51	0,71	0,15	0,07	0,05

Sigue siendo el apoyo simple en el macho y las coacciones en la campana los más desfavorables, pero los resultados están por debajo de 6,50 Mpa, tensión máxima que hemos establecido como límite que puede soportar el GRC.

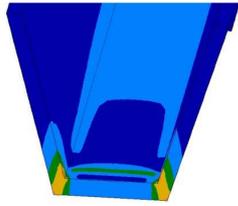
Los resultados del modelo 08, que consideramos como el más desfavorable, se resumen en las siguientes figuras:



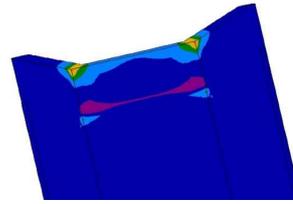
Vista superior del canal

Vista inferior del canal

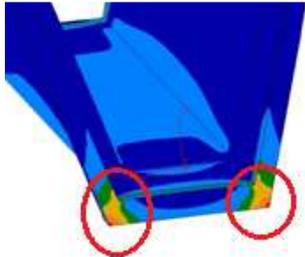
RESULTADOS



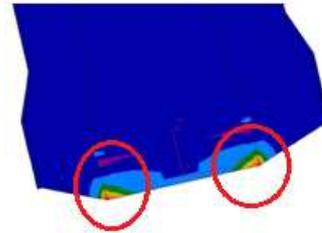
Detalle parte superior del macho



Detalle parte inferior del macho



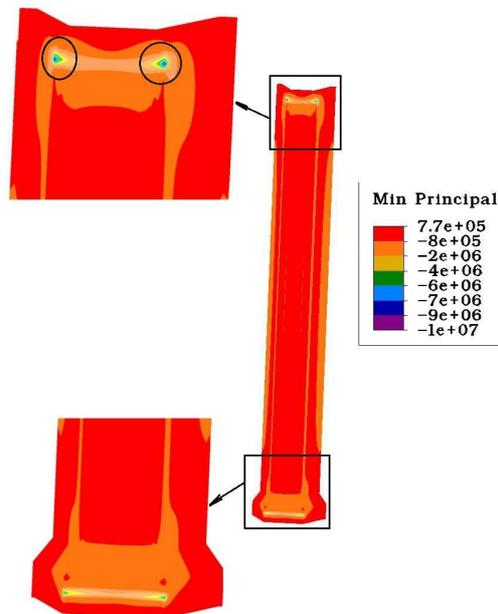
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana

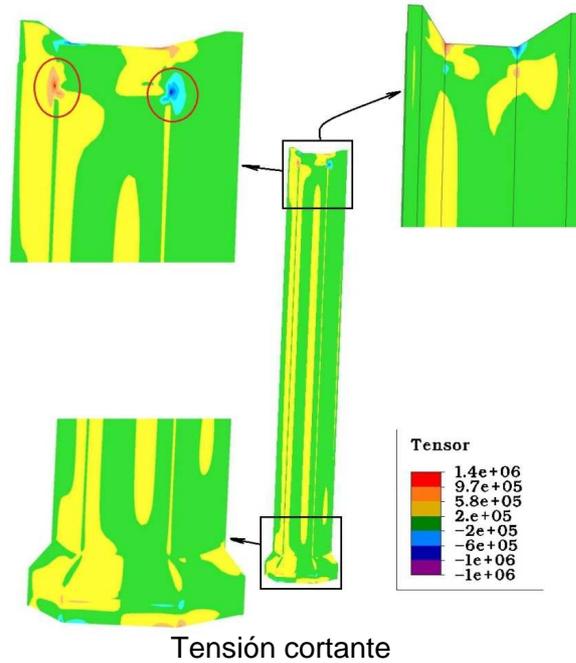
Tensión máximos

Como viene ocurriendo en los últimos modelos estudiados, los valores máximos de la tensión máxima (6,2 Mpa) se producen en los vértices de la campana, se trata de una tensión puntual en dicha zona. En el resto del modelo la tensión es de 1 Mpa, mientras que la máxima tensión es de 6,2 Mpa. En este modelo la tensión está por debajo del límite de cálculo establecido, los 6,9 Mpa.

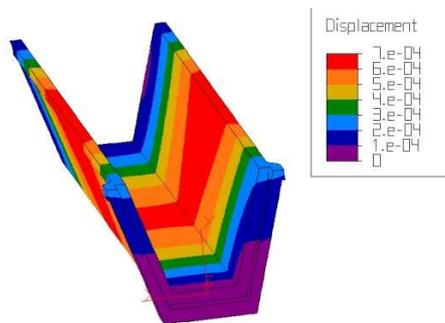


Tensión mínima

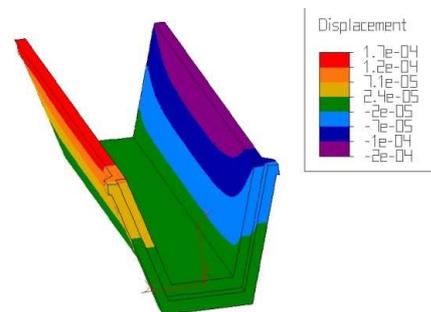
La tensión mínima tiene un valor de -10 Mpa, localizada en el parte interior del apo-  
yo del macho (-10 Mpa). En resto del canal tiene una tensión de 0,8 Mpa.



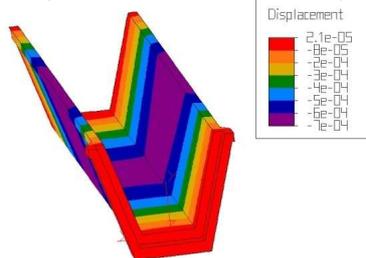
Comparativamente con los modelos anteriores, la tensión cortante se ha reducido a 1,4 Mpa, pero sigue siendo en los bordes interiores de los apoyos donde se localiza dichos valores. En el resto del canal, la tensión cortante es inferior a 1 Mpa.



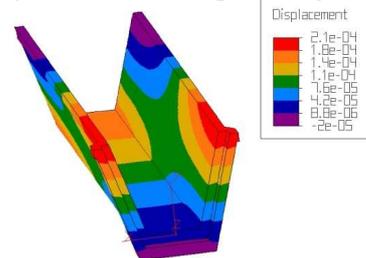
Desplazamiento absoluto (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



Desplazamiento según el eje y (m)



Desplazamiento según el eje z (m)

El límite de cálculo que se ha establecido para el desplazamiento es del 10 % el espesor de la sección, es decir, un desplazamiento de 4,5 mm. Como se puede observar el desplazamiento máximo es de 0,7 mm en el centro del vano, mientras que en los extremos es de 0 mm. Fijándonos en el desplazamiento según los ejes, en el eje "x" el des-

## RESULTADOS

plazamiento se produce hacia afuera en los bordes libres de las paredes por el empuje del agua ejerce sobre las mismas. En el eje “y”, el desplazamiento es negativo en el centro del vano (0,7 mm) y positivo en los bordes (0,02 mm) debido al pandeo producido por las acciones y las coacciones a las que se ve sometido el modelo. En lo que respecta al eje “z”, el desplazamiento es de los extremos al centro del canal.

Como ha ocurrido hasta ahora, los apoyos siguen siendo los puntos más críticos del modelo. Se ha modificado el talud de las paredes consiguiendo una reducción de la tensión máxima que soporta el modelo.

### 3.5.2 SÁNDWICH DE 18-18-18

El espesor de un canal comercial es de 54 mm, por lo que en este modelo vamos a repartir dicho espesor de una forma homogénea entre las tres capas que conforman el canal.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	18 mm de GRC 18 mm de PE 18 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal a los diferentes tipos de apoyo que se establece, 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

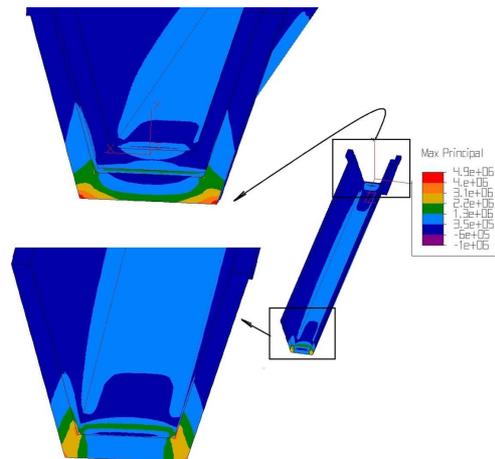
L5-73-18-18-18	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
001	MTxyz	MTxyz	1,76	-6,18	0,77	0,37	0,11	0,60	0,08
002	MTxyz	Txyz	1,76	-6,18	0,77	0,37	0,11	0,60	0,08
003	MTxyz	Txy	4,91	-9,18	1,33	0,58	0,11	0,60	0,19
004	MTxyz	Ty	4,92	-9,59	1,19	0,58	0,11	0,60	0,19

RESULTADOS

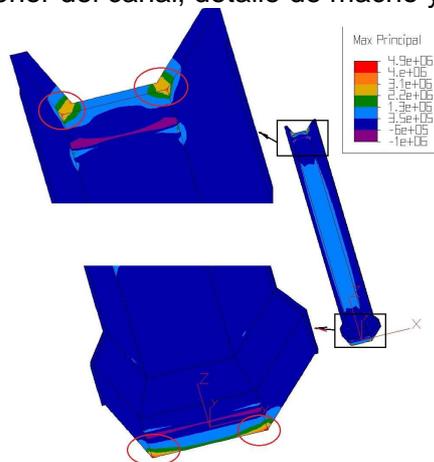
005	Txyz	MTxyz	1,76	-6,18	0,76	0,37	0,11	0,60	0,08
006	Txyz	Txyz	1,76	-6,18	0,76	0,37	0,11	0,60	0,08
007	Txyz	Txy	4,92	-9,18	1,33	0,58	0,11	0,60	0,19
008	Txyz	Ty	4,92	-9,18	1,19	0,58	0,11	0,60	0,19
009	Txy	MTxyz	4,38	-9,53	1,34	0,58	0,11	0,60	0,03
010	Txy	Txyz	4,38	-9,53	1,34	0,58	0,11	0,60	0,03
011	Txy	Txy	3,85	-9,25	1,34	0,72	0,11	0,60	0,03
012	Txy	Ty	3,85	-9,66	1,20	0,61	0,11	0,60	0,03
013	Ty	MTxyz	4,38	-9,54	1,34	0,58	0,11	0,60	0,03
014	Ty	Txyz	4,38	-9,54	1,34	0,58	0,11	0,60	0,03
015	Ty	Txy	3,85	-9,25	1,34	0,67	0,11	0,60	0,03
016	Ty	Ty	3,85	-9,66	1,20	0,62	0,09	0,60	-0,10

El apoyo simple en el macho y la coacción en la campana es el más desfavorable, pero por debajo de los 6,90 Mpa.

Los resultados del modelo 08 se resumen en las siguientes figuras:

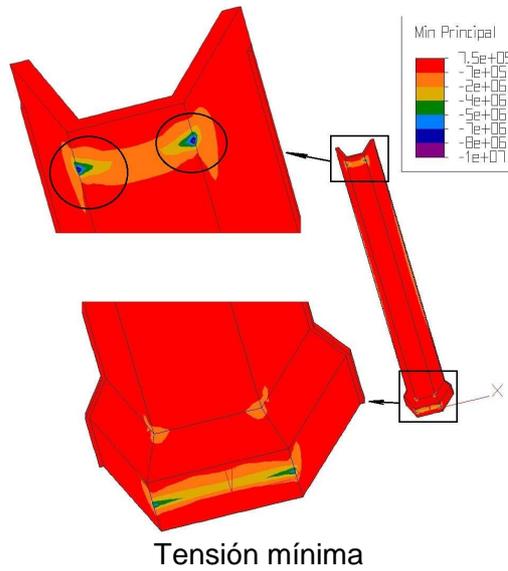


Vista superior del canal, detalle de macho y campana

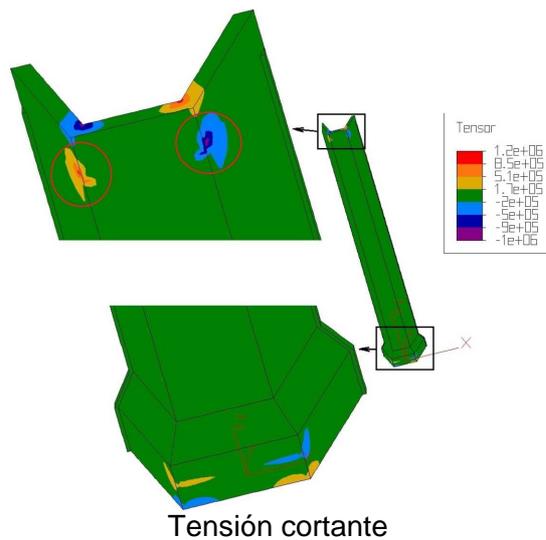


Vista inferior del canal, detalles de macho y campana  
Valores de tensión máximos

Como observamos en estas dos imágenes la tensión máxima está localizada en los vértices inferiores de la campana y macho, su valor es de 4,9 Mpa, un 71 % respecto al límite de cálculo. Sobre las paredes la tensión es de 0,35 Mpa y en la base del modelo de 1,3 Mpa.



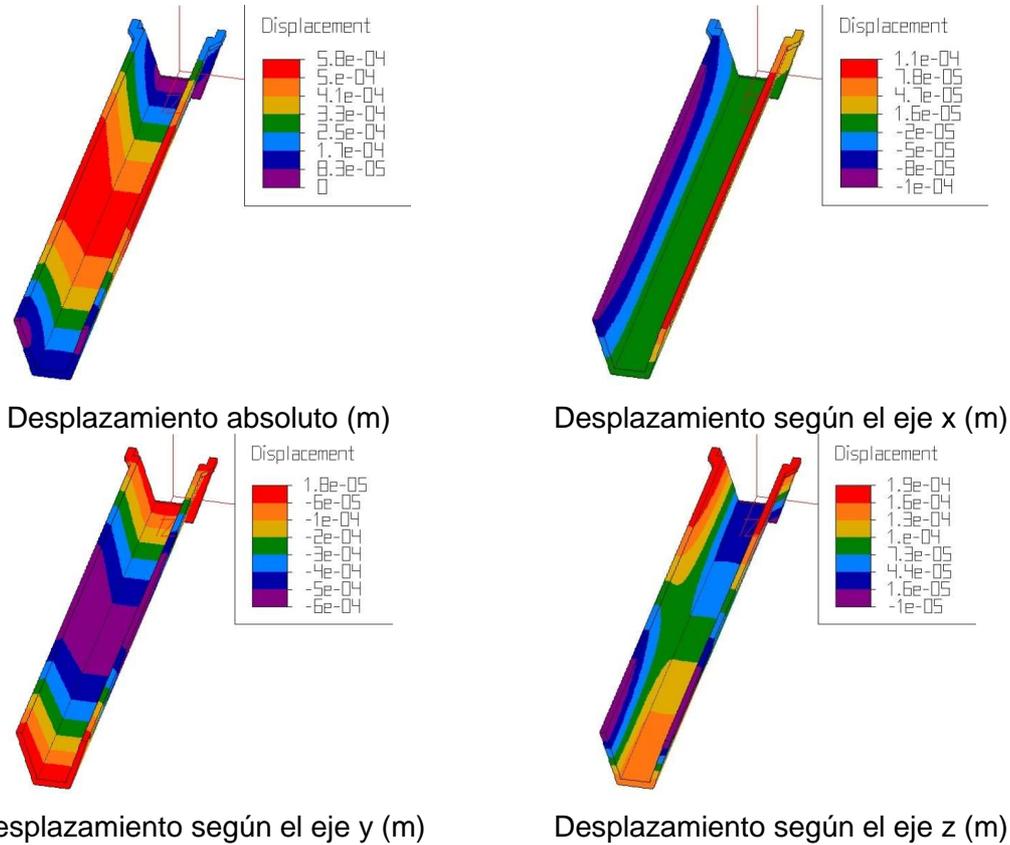
El color rojo domina en el modelo respecto a la tensión mínima. Es en los puntos de apoyo del modelo donde se produce el valor máximo de la tensión mínima, de -10 Mpa, por la parte interna de los mismos, en el lado del macho.



El borde del apoyo en el lado del macho es donde el valor de la tensión cortante es mayor, con un resultado de 1,2 Mpa. Los vértices de la sección del macho y de la cam-

pana, la tensión tiene un valor próximo al valor máximo. En la mayoría del modelo, la tensión cortante es de 0,17 Mpa.

Valores de tensión cortante



El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano, con una flecha de 0,05 mm, reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es nulo. En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (0,01 mm) en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo debido al pandeo que sufre el modelo (0,6 mm) y de signo positivo en los extremos del vano con una flecha de 0,02 mm. En el caso del eje “z”, este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo. Estos resultados están lejos del límite de cálculo (5,4 mm).

Como ha sucedido hasta ahora, los apoyos son los puntos más débiles del canal, se ha reducido las tensiones gracias al aumento del espesor de la sección.

### 3.5.3 SÁNDWICH DE 15-24-15

Otro criterio a considera es incrementar el espesor de la capa de polietileno expandido hasta 24 mm y reducir el espesor del GRC a 15 mm, espesor que se considera mínimo en el proceso de fabricación.

Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

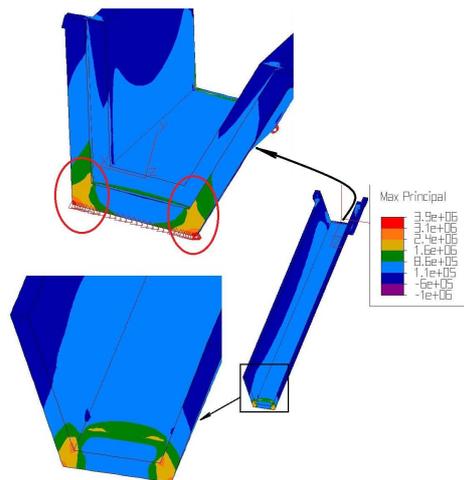
En este modelo vamos a estudiar también el comportamiento del canal al tipo de apoyo que se establece, 16 combinaciones. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de apoyos se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15	Coacciones		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
01	MTxyz	MTxyz	1,89	-6,85	0,86	0,40	0,12	0,60	0,09
02	MTxyz	Txyz	1,89	-6,85	0,86	0,40	0,12	0,60	0,09
03	MTxyz	Txy	5,15	-10,04	1,51	0,62	0,12	0,60	0,02
04	MTxyz	Ty	5,16	-10,52	1,36	0,62	0,12	0,60	0,02
05	Txyz	MTxyz	1,89	-6,85	0,86	0,40	0,12	0,60	0,09

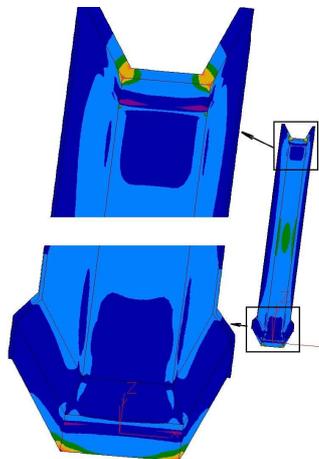
RESULTADOS

06	Txyz	Txyz	1,89	-6,85	0,86	0,40	0,12	0,60	0,09
07	Txyz	Txy	5,15	-10,04	1,51	0,62	0,12	0,60	0,02
08	Txyz	Ty	5,16	-10,52	1,36	0,62	0,12	0,60	0,02
09	Txy	MTxyz	4,63	-10,46	1,52	0,62	0,12	0,60	0,03
10	Txy	Txyz	4,63	-10,46	1,52	0,62	0,12	0,60	0,03
11	Txy	Txy	4,06	-10,11	1,52	0,62	0,12	0,60	0,03
12	Txy	Ty	4,07	-10,59	1,37	0,62	0,12	0,60	0,03
13	Ty	MTxyz	4,63	-10,46	1,52	0,62	0,12	0,60	0,03
14	Ty	Txyz	4,64	-10,46	1,52	0,62	0,12	0,60	0,03
15	Ty	Txy	4,10	-10,12	1,52	0,62	0,12	0,60	0,03
16	Ty	Ty	4,11	-10,60	1,37	0,11	0,11	0,60	0,02

El apoyo simple en el macho y las coacciones en la campana siguen siendo los más desfavorables, pero se han reducido un poco más. Los resultados del modelo 08 se resumen en las siguientes figuras:

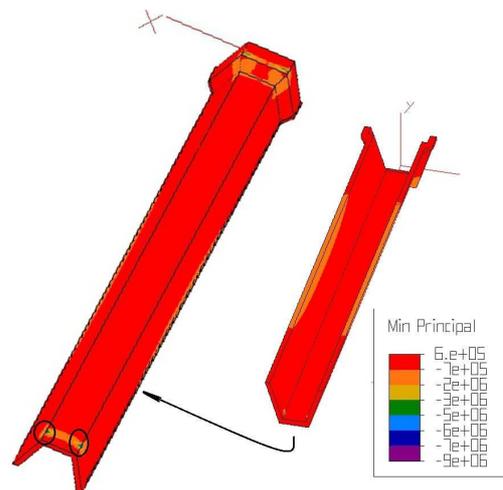


Vista superior del canal, detalle de macho y campana



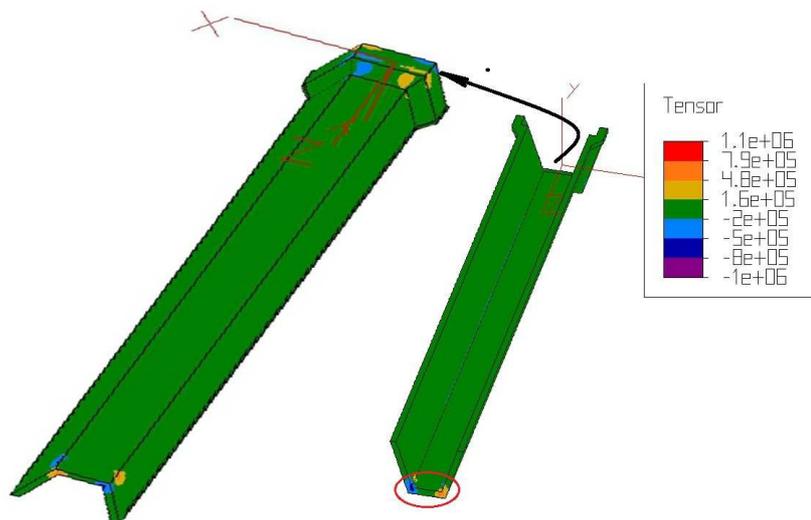
Vista inferior del canal, detalle de campana y macho  
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección, en la campana (3,9 Mpa). Las paredes soportan una tensión de 0,11 Mpa, mientras que la base del canal es de 0,86 Mpa. Todo dentro de los límites de cálculo establecidos (6,9 Mpa).



Tensión mínima

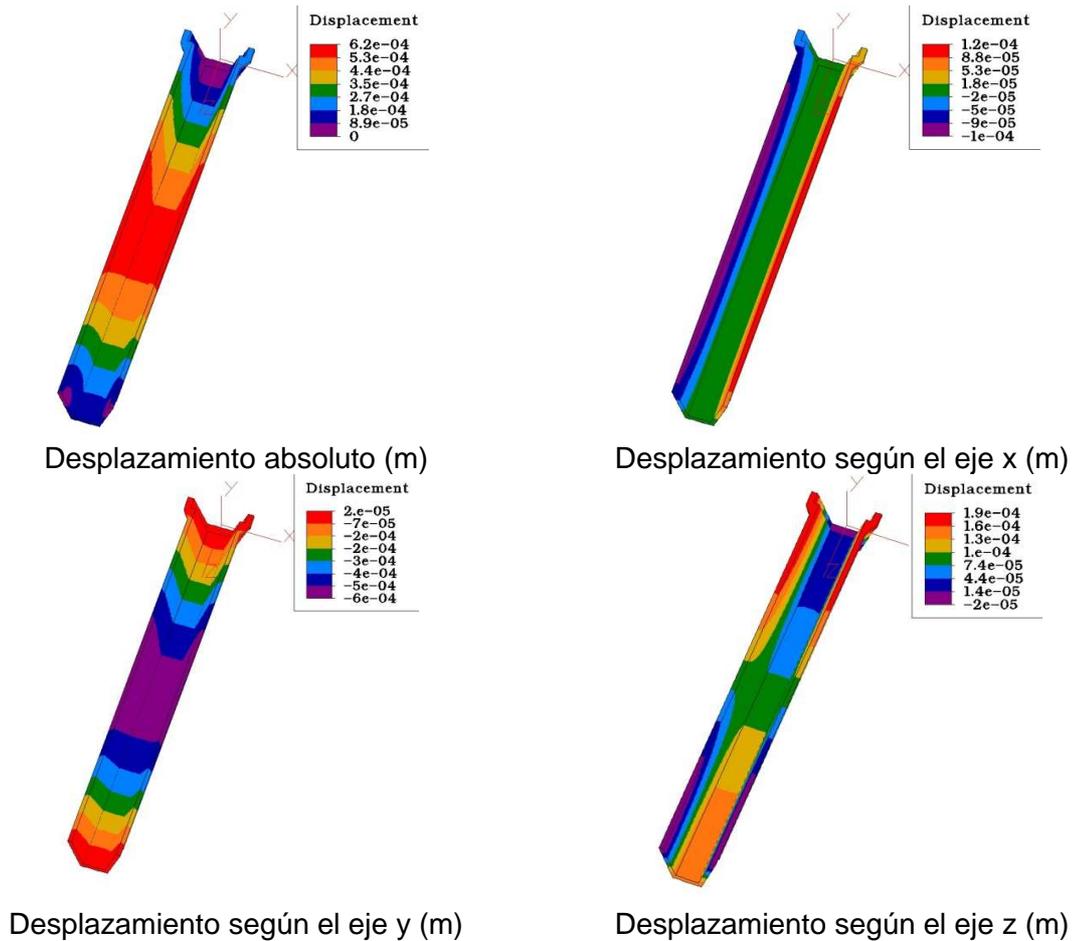
El valor máximo de la tensión mínima se localiza, como ha venido ocurriendo hasta ahora, en el borde interior del apoyo donde la tensión es de -9 Mpa. El color rojo domina el modelo, lo que supone 0,6 Mpa.



Tensión cortante

El color verde domina el modelo, lo que representa una tensión cortante de 0,16 Mpa. Los valores máximos se localizan en las aristas de los apoyos del modelo.

## RESULTADOS



El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano ( $0,62 \text{ mm}$ ), reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es nulo. Estos valores suponen un 11 % del límite de cálculo establecido ( $5,4 \text{ mm}$ ). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera en el borde superior de las paredes ( $0,12 \text{ mm}$ ) como consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo ( $0,6 \text{ mm}$ ) y hacia arriba en los extremos del vano, con una flecha de  $0,02 \text{ mm}$ , debido al pandeo que sufre el modelo. En el caso del eje “z” este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

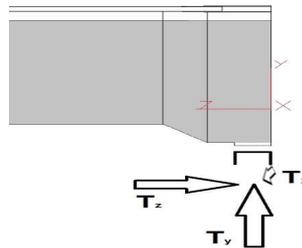
Los puntos de apoyo siguen siendo los más débiles del canal debido a la reacción de los apoyos del canal y la acción que sobre él se aplica. Los resultados se alejan del límite de cálculo.

A partir de este momento vamos a considerar el modelo 08, apoyo simple en el macho y coacción al desplazamiento en la campana, como el modelo más desfavorable. Serán estos apoyos, junto al espesor los que utilizaremos como base para el desarrollo del canal comercial.

### 3.6 DESARROLLO DE MODELOS MODIFICANDO LA BASE DE APOYO DE LA CAMPANA

#### 3.6.1 INCREMENTO DEL ESPESOR DEL APOYO

Considerando el apoyo simple en el macho y la coacción en la campana como los apoyos más desfavorables y siendo estas zonas las más débiles del canal, vamos a introducir una nueva variable de cálculo en nuestro estudio. Esta nueva variable es incrementar el espesor de la base de apoyo del lado de la campana, lugar donde se puede realizar la misma.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	100 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.

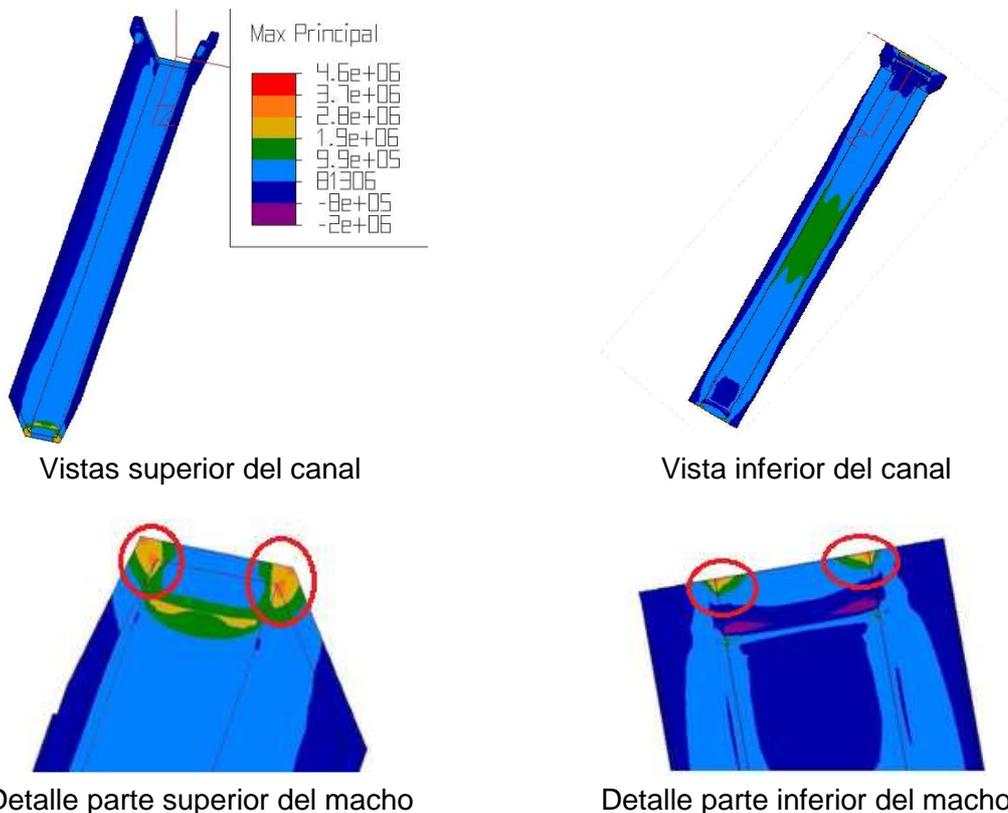
RESULTADOS

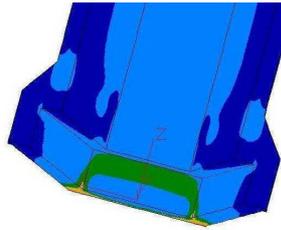
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal ante la variación del grosor en el apoyo de la campana. Consideraremos 4 espesores, un incremento de 15 mm por ser el mínimo que se puede considerar en el proceso de robotización, que iremos incrementado en 5 y 10 mm hasta llegar a los 40 mm de espesor. Los resultados obtenidos para los diferentes espesores se resumen en la siguiente tabla:

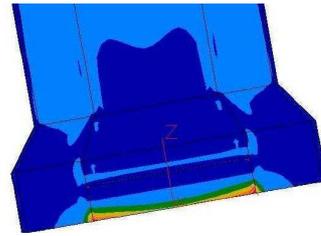
L5-73-15-24-15-	Incremento espesor (mm)		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
e15	15	00	4,63	-10,04	1,38	0,64	0,12	0,60	0,20
e20	20	00	4,13	-10,74	1,38	0,64	0,12	0,60	0,21
e30	30	00	4,14	-10,82	1,40	0,64	0,12	0,60	0,21
e40	40	00	4,17	-10,88	1,40	0,65	0,12	0,60	0,02

Los resultados, que siguen estando por debajo del límite establecido, han mejorado en relación al modelo que hemos tomado como base y lo resumimos en las siguientes figuras:





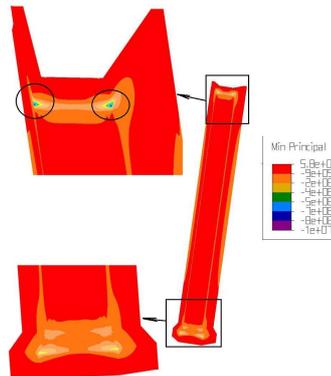
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana

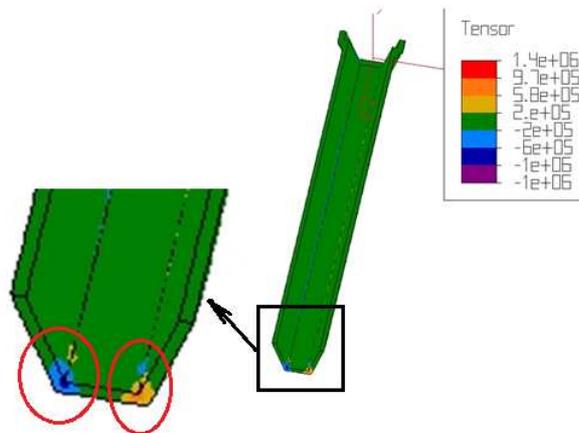
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en el vértice del macho con un valor de 4,6 Mpa. Las paredes soportan una tensión de 0,8 Mpa. La base soporta una tensión de 1,9 Mpa en el centro del vano que se reduce a 1 Mpa a medida que nos acercamos a los apoyos donde la tensión es de 0,8 Mpa.



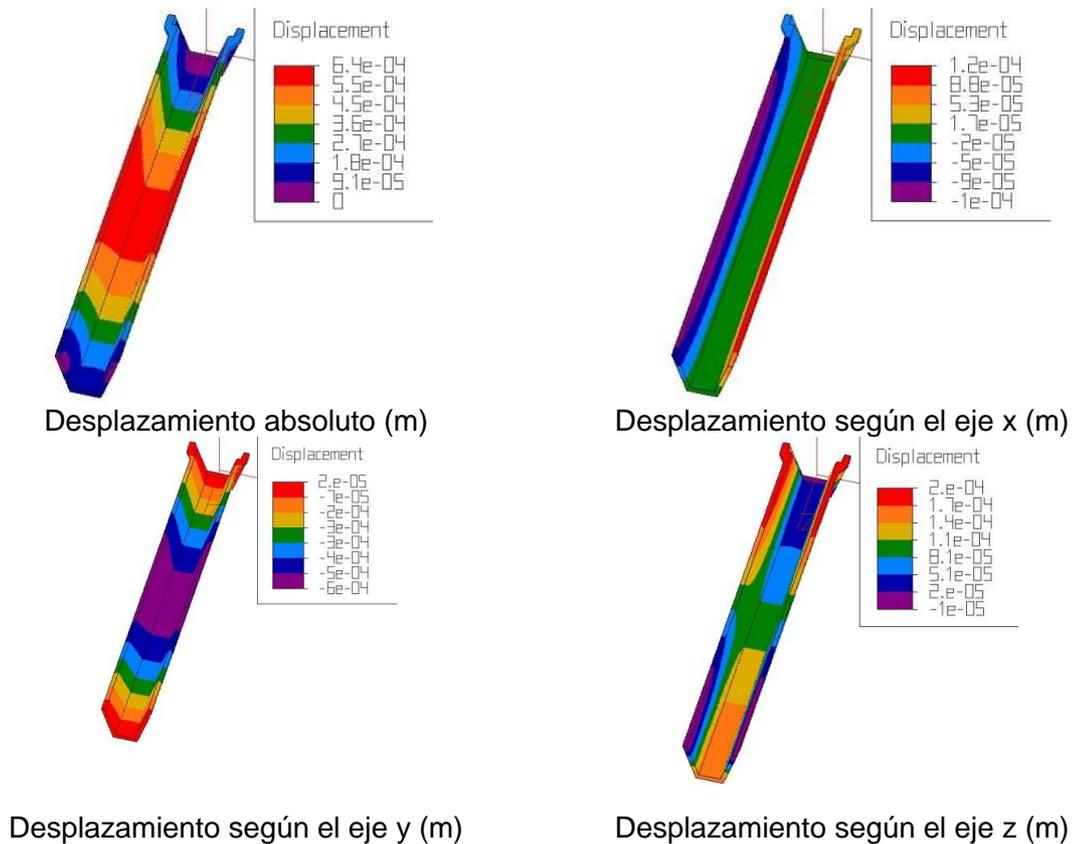
Tensión mínima

El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa 0,58 Mpa, cambia un poco en los apoyos, pero sólo supone 2 Mpa. Es en el borde interior del apoyo, en el macho, donde se localiza el máximo valor con -10 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



Tensión cortante

Como se observa en la imagen el color verde domina el modelo con una tensión de de 0,2 Mpa. Como se observa, en el macho donde se localiza la máxima tensión cortante con 1,4 Mpa y se puede distinguir el apoyo desde esta vista superior del modelo.

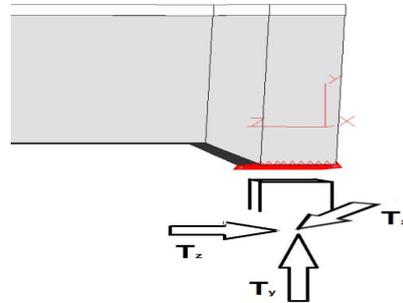


El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano (0,64 mm), reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde tiene un valor de 0 mm. Estos valores suponen un 11 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (0,12 mm) en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo (0,6 mm) y hacia arriba en los extremos del vano, una flecha de 0,02 mm, debido al pandeo que sufre el modelo y los apoyos en los extremos. En el caso del eje “z”, este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

Los apoyos siguen siendo los puntos débiles del modelo, pero como ha sucedido hasta ahora, está dentro de los límites de cálculo, reduciéndose en al aumentar el espesor de la sección de apoyos en el caso de la campana.

### 3.6.2 INCREMENTO DE LA LONGITUD DEL APOYO

La variable a analizar es el incremento de la longitud del apoyo en el lado de la campana teniendo en cuenta el espesor de dicho apoyo. Se considera una longitud de apoyo de 180 mm, longitud de la campana.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

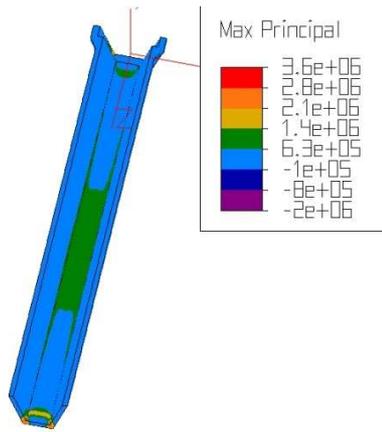
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

RESULTADOS

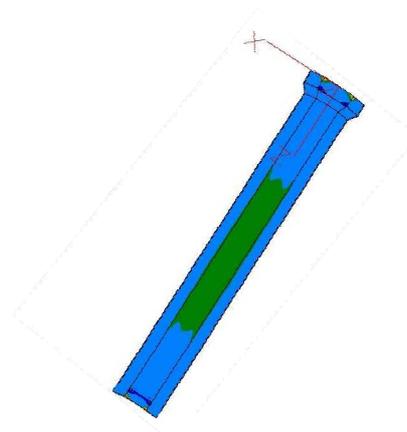
En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal incrementando el espesor del apoyo con una longitud de 180 mm en la campana. Consideramos los espesores del punto anterior, estudiamos 5 modelos. Los resultados obtenidos para los diferentes espesores se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-08-Lo18	Incremento espesor (mm)		Resultados						
	Campana	Macho	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
e00	00	00	3,57	-9,75	1,26	0,55	0,12	0,50	0,02
e15	15	00	3,62	-9,85	1,28	0,57	0,12	0,50	0,16
e20	20	00	3,64	-9,88	1,28	0,57	0,12	0,50	0,12
e30	30	00	3,66	-9,92	1,28	0,57	0,12	0,50	0,12
e40	40	00	3,94	-10,44	1,35	0,61	0,12	0,50	0,20

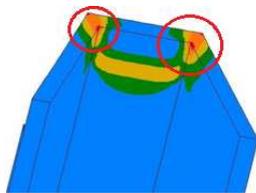
Los resultados de este modelo han mejorado con respecto al supuesto anterior. Simplemente, alargando el apoyo se ha mejorado, sin necesidad de incrementar el espesor del apoyo. El resultado del modelo e00 se resume en las siguientes figuras:



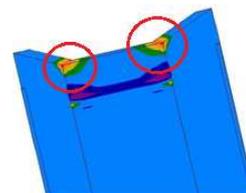
Vista superior del canal



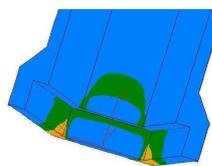
Vista inferior del canal



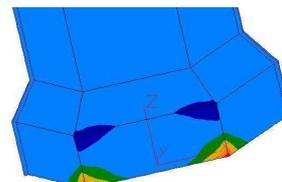
Detalle parte superior del macho



Detalle parte inferior del macho



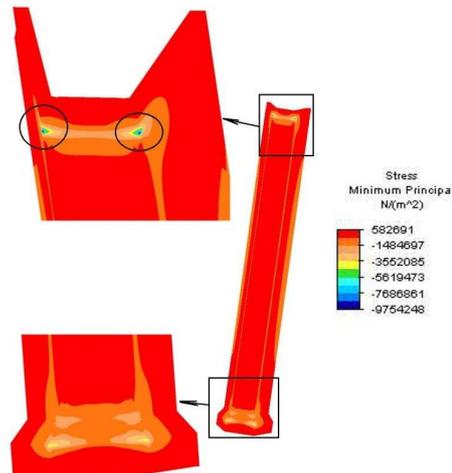
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana

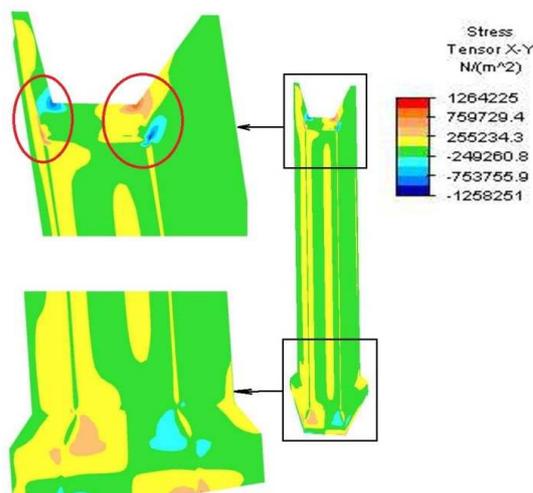
Tensión máximos

La tensión máxima en este modelo es del 51 % en relación al límite de cálculo establecido (6,9 Mpa). Como viene ocurriendo, el valor máximo de la tensión máxima (3,5 Mpa) se localiza en los vértices de la sección, en el macho. El vano de la base tiene una tensión de 1,4 Mpa que se reduce a 0,63 Mpa a medida que nos acercamos a los apoyos del modelo, el mismo que soporta las paredes.



Tensión mínima

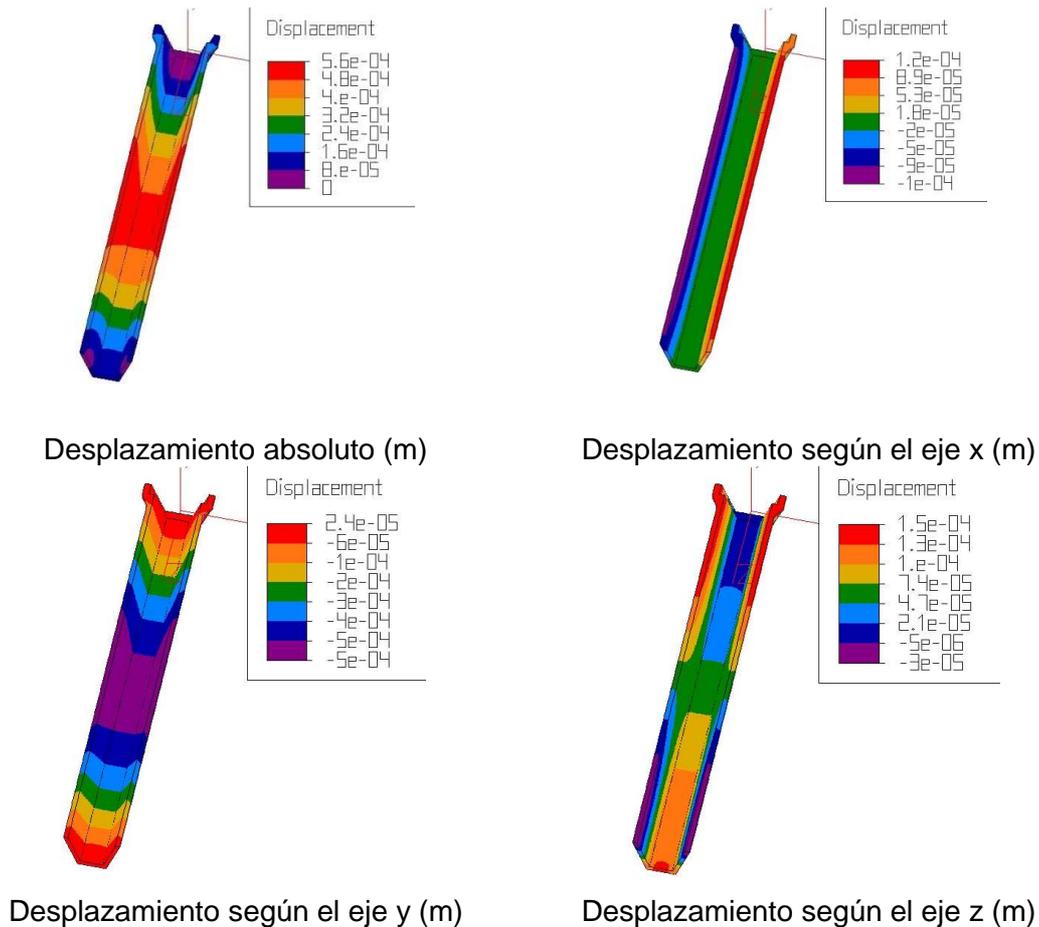
El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión mínima de 0,06 Mpa, reduciéndose un poco en las aristas de la sección y en los bordes exteriores de las paredes. Es en el borde interior del apoyo, en el macho, donde se localiza el máximo valor con -9,75 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



Tensión cortante

Es el verde y amarillo los colores dominantes en la figura de la tensión cortante, tienen un valor absoluto de 0,25 Mpa, pero de signo contrario. Es el vértice superior y en el vértice interior del apoyo, en el macho, donde se localiza la máxima tensión cortante con un valor de 1,26 Mpa, reduciéndose este valor en los bordes de los apoyos, tanto de la campana como del macho.

## RESULTADOS



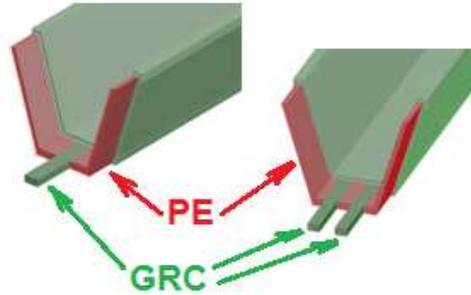
El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano (0,56 mm), reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es nulo. Estos valores suponen un 11 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas (1 mm), según el eje "x". En cuanto al eje "y", el desplazamiento se produce hacia abajo debido al pandeo que sufre el modelo, (0,5 mm) y hacia arriba en los extremos con una flecha de 0,02 mm, debido a las cargas a las que se ve sometido el modelo. En el caso del eje "z" este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

El punto débil continúa siendo la zona de los apoyos. Vemos que el incremento de la longitud del apoyo supone una reducción de la tensión que soporta el canal, pero el incremento del espesor de ese apoyo tiene el efecto contrario al esperado, incrementa la tensión que soporta el modelo. A partir de este punto vamos a considerar una longitud de apoyo en la campana de 180 mm, ya que la longitud del macho está condicionada al apoyo sobre la campana del canal continuo.

### 3.7 DESARROLLO DE MODELOS INTRODUCIENDO REFUERZOS

#### 3.7.1 REFUERZO LONGITUDINAL EN LA BASE

En este caso vamos a estudiar el comportamiento del canal introduciendo en el diseño una serie de refuerzos de GRC en la capa de PE con el objeto de conseguir reducir la tensión máxima que soporta el canal. En un principio vamos a introducir un refuerzo longitudinal en la base del canal.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.
Incremento espesor de la campana	0 mm
Refuerzos:	
Longitudinal:	si.
Transversal:	ninguno.

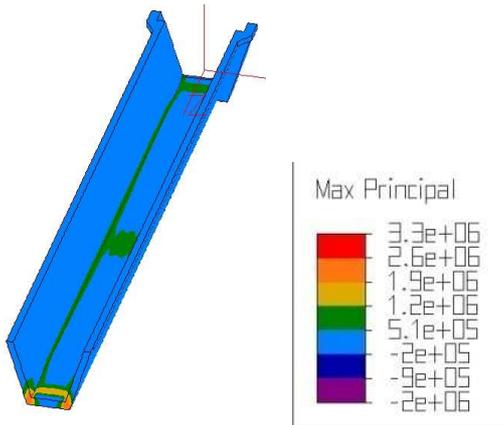
Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

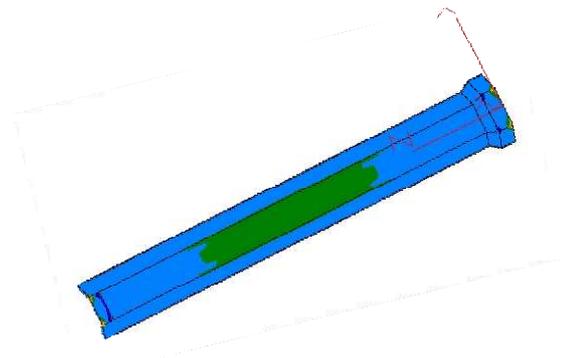
En este caso vamos a estudiar el comportamiento del canal con la introducción de refuerzos longitudinales en la base del mismo. Se van a considerar la colocación y uno o dos refuerzos centrales. En el ancho de estos refuerzos se tiene en cuenta que se han discretizado "brick" con un ancho (según eje "x") de 20 mm, estableciéndose un mínimo de 40 mm de ancho del refuerzo, teniendo en cuenta no sustituir todo el PE de la base del modelo. Considerando estos factores hemos establecido 9 modelos para su estudio. Los resultados obtenidos para los diferentes refuerzos se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-08-Lo18-	Refuerzo longitudinal		Resultados						
	Nº	anchura	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
RLB4	1	40 mm	3,50	-9,40	1,22	0,50	0,12	0,50	0,14
RLB8	1	80 mm	3,44	-9,23	1,20	0,53	0,12	0,50	0,14
RLB12	1	120 mm	3,40	-9,07	1,18	0,52	0,12	0,50	0,14
RLB16	1	160 mm	3,37	-8,90	1,16	0,52	0,12	0,50	0,14
RLB20	1	200 mm	3,34	-8,70	1,13	0,50	0,12	0,50	0,14
RLB24	1	240 mm	3,33	-8,37	1,08	0,49	0,11	0,50	0,14
RLTB	1	Base	3,48	-7,08	0,86	0,45	0,08	0,50	0,14
2RLB4	2	40 mm	3,45	-9,09	1,18	0,53	0,12	0,50	0,14
2RLB6	2	60 mm	3,41	-8,85	1,15	0,52	0,12	0,50	0,14

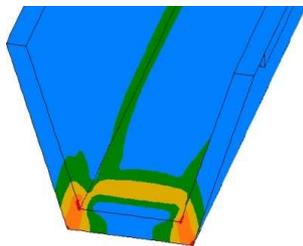
Un refuerzo longitudinal en el centro de la base con una anchura de 240 mm es la variable más favorable, como solución no sería óptima por sustituir todo el polietileno expandido de la base por GRC, no consiguiéndose uno de los objetivos de esta Tesis, reducir el peso del canal. Los resultados del modelo RLB24 se resume en las siguientes figuras:



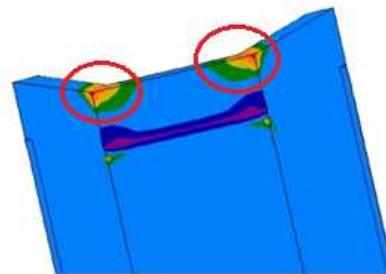
Vista superior del canal



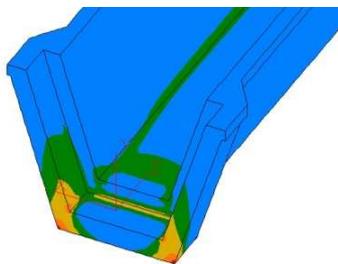
Vista superior del canal



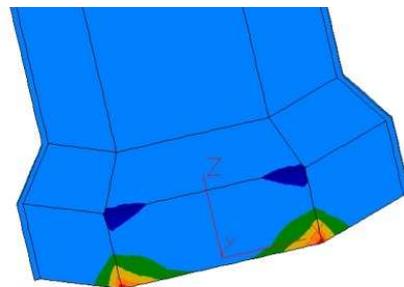
Detalle superior del macho



Detalle inferior del macho



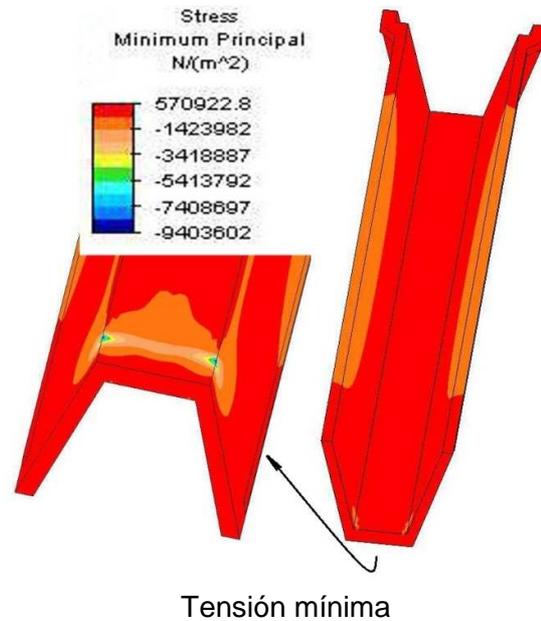
Detalle superior de la campana



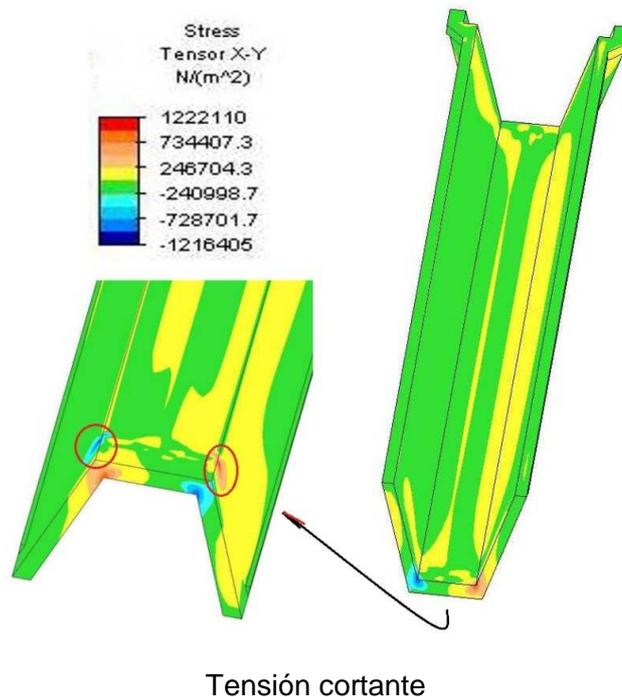
Detalle inferior de la campana

Tensión máximos

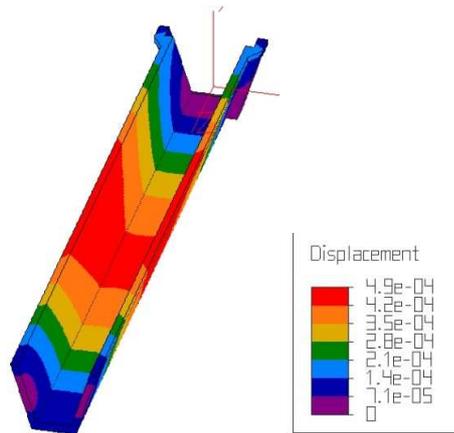
La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección, en el macho, con un valor de 3,3 Mpa. Las paredes soportan una tensión de 0,51 Mpa, mientras que la base del canal es de 1,2 Mpa en el centro del modelo y en las aristas de la sección. Todo dentro de los límites de cálculo establecidos (6,9 Mpa).



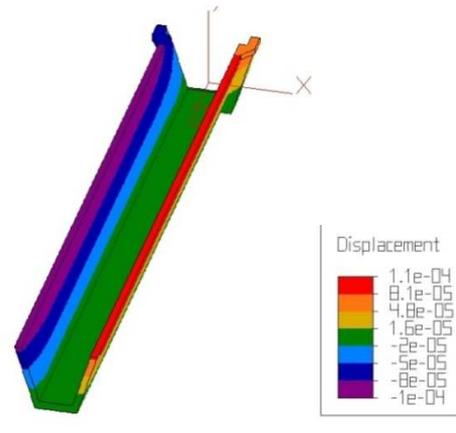
El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión mínima de 0,54 Mpa, reduciéndose un poco en las aristas de la sección y en los bordes exteriores de las paredes. Es en el borde interior del apoyo, en el macho, donde se localiza el máximo valor con -8 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



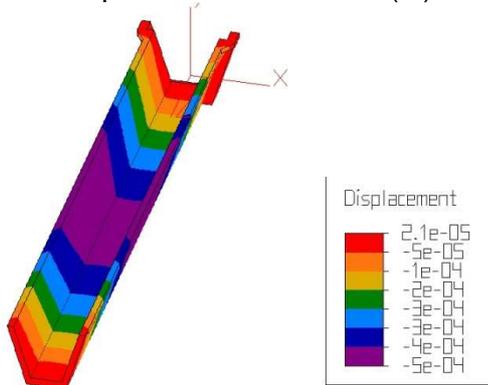
El color verde domina la figura, lo que representa una tensión cortante de 0,15 Mpa. El valor más elevado se localiza en el vértice del macho con un valor de 1,1 Mpa, reduciéndose hasta 0,47 Mpa en los bordes de los apoyos, tanto en la campana como en el macho.



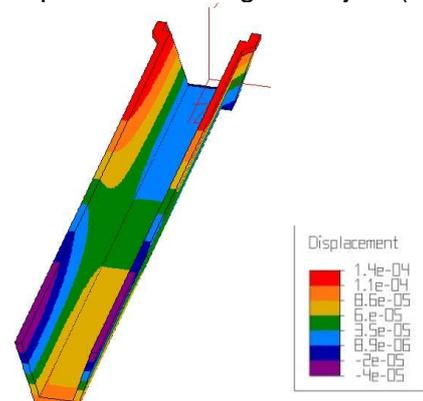
Desplazamiento absoluto (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



Desplazamiento según el eje y (m)



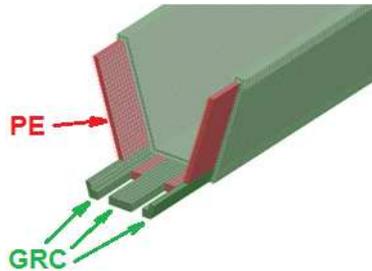
Desplazamiento según el eje z (m)

El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano (0,49 mm), reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde se hace nulo. Estos valores suponen un 10 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (1,1 mm) en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo (0,5 mm) debido al pandeo que sufre el modelo y positivo en los extremos del vano (0,02 mm) debido a los apoyos. En el caso del eje “z”, este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

La colocación de refuerzos longitudinales en la base del modelo ha permitido la reducción de la tensión máxima que soporta el mismo, localizándose en el vértice de la sección del macho, como viene ocurriendo, pero dentro de los límites de cálculos establecidos (6,9 Mpa). En cuanto al desplazamiento, está por debajo de los 5,4 mm establecidos como límites de cálculo, el 10 % del espesor de la sección del modelo (54 mm).

### 3.7.2 REFUERZO LONGITUDINAL EN BASE Y VÉRTICES

Una nueva variable a introducir es colocar refuerzos en las esquinas y en el centro de la base del canal.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.
Incremento del espesor de la campana	0 mm
Refuerzos:	
Longitudinal:	si.
Transversal:	ninguno.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

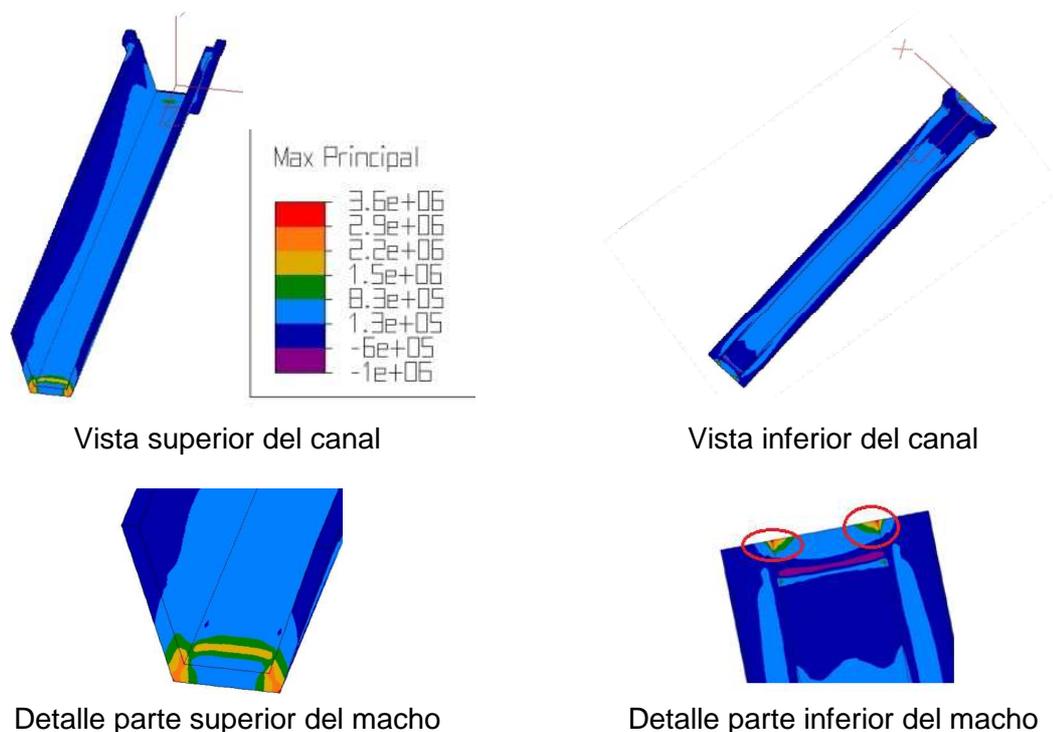
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.

- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

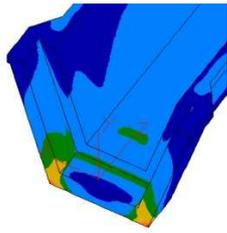
En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal a la colocación de refuerzos longitudinales en la base y esquinas del canal. En este caso no vamos a considerar la posibilidad de colocar dos refuerzos longitudinales en la base del canal porque reduciría a la mínima expresión el PE. Consideramos 5 modelos. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-08-Lo18-	Refuerzo longitudinales	Resultados						
	Anchura	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
RLB0-RE	0 mm	3,82	-8,06	0,90	0,48	0,09	0,02	0,14
RLB4-RE	40 mm	3,74	-7,84	0,90	0,48	0,09	0,02	0,14
RLB8-RE	80 mm	3,68	-7,74	0,88	0,47	0,08	0,02	0,14
RLB12-RE	120 mm	3,64	-7,64	0,87	0,46	0,09	0,02	0,13
RLB16-RE	160 mm	3,63	-7,64	0,89	0,47	0,09	0,02	0,13

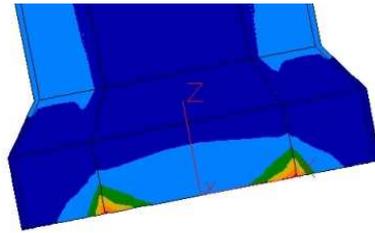
La introducción de los refuerzos longitudinales en las esquinas del canal no ha mejorado los resultados, sino que los han empeorado. El modelo RLB16-RE se resume en las siguientes figuras:



## RESULTADOS



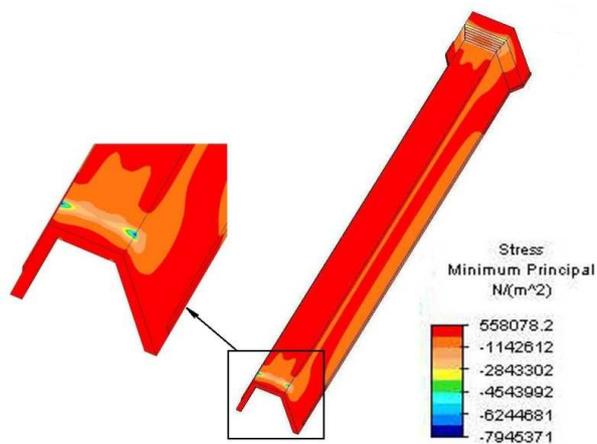
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana

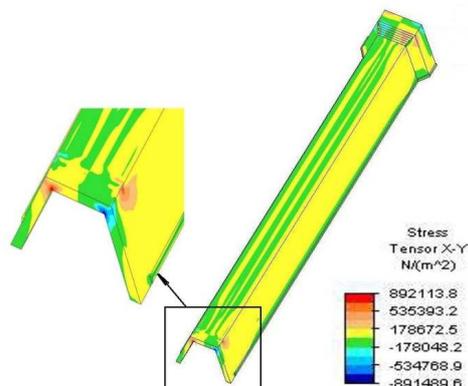
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección, en la campana, con un valor de 3,6 Mpa. Las paredes soportan una tensión de 0,13 Mpa, mientras que la base del canal de 0,83 Mpa. Todo dentro de los límites de cálculo establecidos, 6,9 Mpa.



Tensión mínima

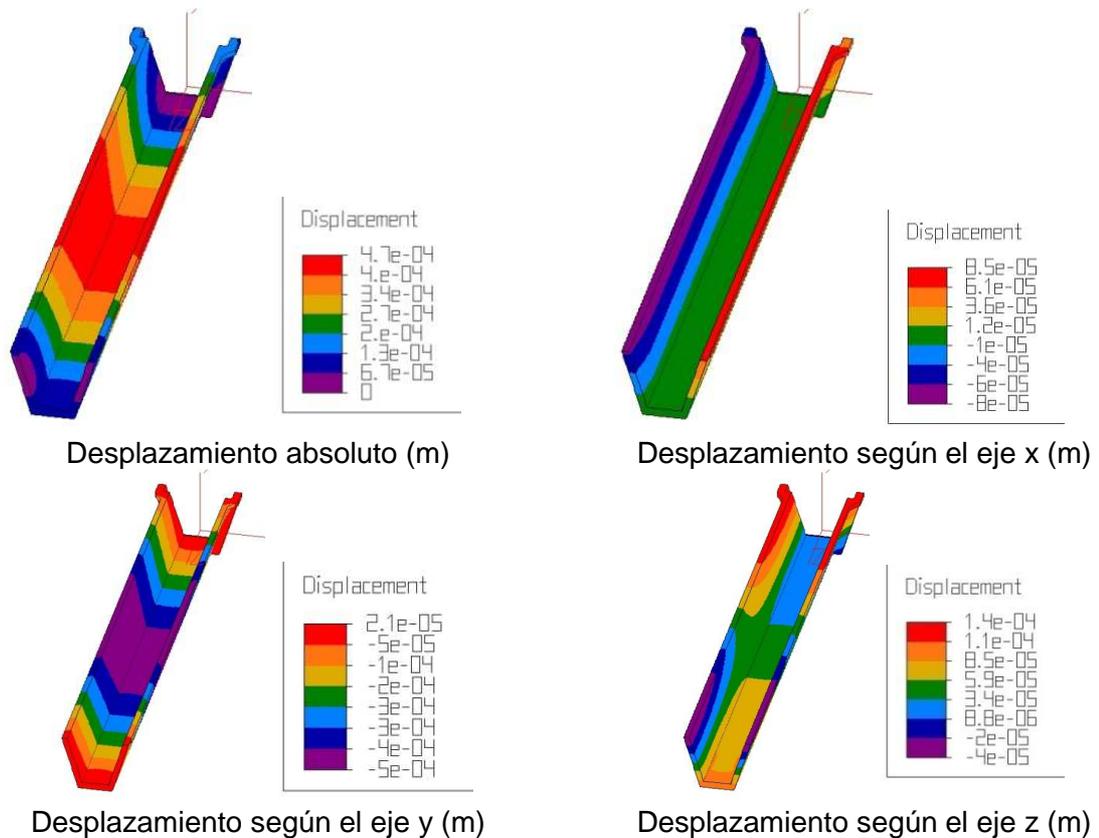
El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión mínima de 0,55 Mpa, reduciéndose un poco en las aristas de la sección y en los bordes exteriores de las paredes. Es en el borde interior del apoyo en el macho donde se localiza el máximo valor con -8 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



Tensión cortante

Son el verde y amarillo los colores dominantes en la figura de la tensión cortante, tienen un valor absoluto de 0,17 Mpa. Es la arista exterior del macho donde se localiza la

máxima tensión cortante con un valor de 0,89 Mpa, reduciéndose este valor en los apoyos, tanto de la campana como del macho.

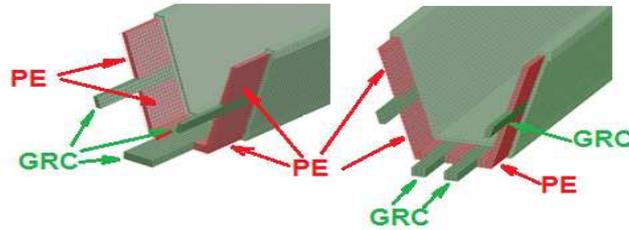


El desplazamiento máximo (0,47 mm) se origina en el centro del vano, reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es de 0 mm. Estos valores suponen un 9 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (0,85 mm), según el eje “x”, en el borde superior de las paredes del modelo a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo (- 0,5 mm) debido al pandeo que sufre el modelo y de signo positivo en los extremos del vano (0,02 mm), debido a los apoyos. En el caso del eje “z” este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

La introducción de refuerzos en las aristas de la sección no ha mejorado los resultados obtenidos hasta ahora, sino que la tensión máxima ha aumentado un 5 %. Por debajo de los 6,9 Mpa, límite de cálculo establecidos. En cuanto al desplazamiento este se ha reducido un poco en comparación a los resultados obtenidos para el modelo en que sólo se introdujo los refuerzos en la base.

### 3.7.3 REFUERZOS LONGITUDINALES EN BASE Y PAREDES

La variable a analizar es la introducción de refuerzos en la base, esquinas y paredes laterales del canal, para evitar el pandeo ocasionado por la presión del agua.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.
Incremento del espesor de la campana	0 mm
Refuerzos:	
Longitudinal:	si.
Transversal:	ninguno.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.

- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

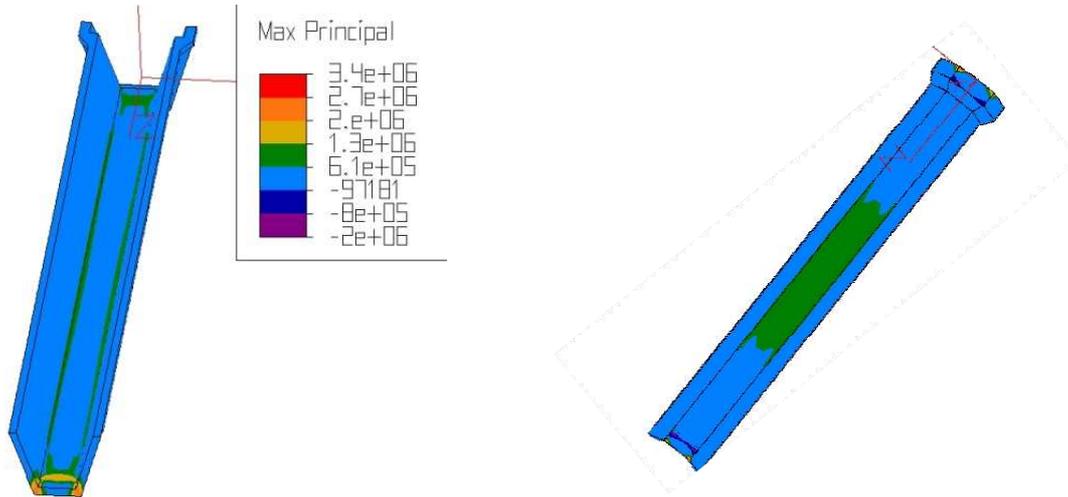
En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal a la colocación de refuerzos longitudinales en la base, esquinas y paredes laterales del canal. En el caso de la base se van a considerar las opciones que se tuvieron en el punto anterior y en el caso de las paredes, se van a considera un único refuerzo en el centro de la pared de 60, 80 y 140 mm o dos refuerzos equidistantes de 40 y 60 mm. Hemos establecido una combinación de 23 modelos. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-08-Lo18-	Refuerzos longitudinales					Resultados						
	N	Base (mm)	Esquina	N	Pared (mm)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
RB4-RE-RP6	1	40	si	1	60	3,80	-7,98	0,90	0,48	0,08	0,02	0,14
RB8-RE-RP6	1	80	si	1	60	3,74	-7,86	0,89	0,48	0,08	0,02	0,14
RB4-RE-RP10	1	40	si	1	100	3,84	-8,06	0,91	0,49	0,08	0,02	0,14
RB8-RE-RP10	1	80	si	1	100	3,77	-7,94	0,90	0,48	0,08	0,02	0,15
RB4-RE-RP14	1	40	si	1	140	3,84	-8,09	0,91	0,49	0,08	0,02	0,15
RB8-RE-RP14	1	80	si	1	140	3,77	-7,97	0,90	0,48	0,08	0,02	0,15
RB4-RP6	1	40	no	1	60	3,58	-9,58	1,24	0,55	0,12	0,02	0,14
RB8-RP6	1	80	no	1	60	3,52	-9,39	1,22	0,54	0,12	0,02	0,15
RB12-RP6	1	120	no	1	60	3,47	-9,22	1,20	0,53	0,12	0,02	0,15
RB16-RP6	1	160	no	1	60	3,43	-9,05	1,18	0,52	0,12	0,02	0,15
RB4-RP10	1	40	no	1	100	3,63	-9,69	1,26	0,55	0,12	0,02	0,14
RB8-RP10	1	80	no	1	100	3,57	-9,50	1,23	0,54	0,12	0,02	0,15
RB12-RP10	1	120	no	1	100	3,52	-9,32	1,21	0,53	0,12	0,02	0,15
RB16-RP10	1	160	no	1	100	3,48	-9,14	1,29	0,52	0,12	0,02	0,15
RB20-RP10	1	200	no	1	100	3,48	-9,14	1,19	0,52	0,12	0,02	0,15
RB8-RP14	1	80	no	1	140	3,61	-9,60	1,25	0,54	0,12	0,02	0,15
RB12-RP14	1	120	no	1	140	3,56	-9,42	1,22	0,53	0,12	0,02	0,14
RB16-RP14	1	160	no	1	140	3,51	-9,23	1,20	0,52	0,12	0,02	0,14
RB20-RP14	1	200	no	1	140	3,48	-9,01	1,17	0,52	0,12	0,02	0,14
2RB4-2RP4	2	40	no	2	40	3,50	-9,23	1,20	0,53	0,12	0,02	0,14
2RB4-2RP6	2	40	no	2	60	3,54	-9,32	1,21	0,53	0,12	0,02	0,15
2RB6-2RP4	2	60	no	2	40	3,51	-9,27	1,20	0,53	0,12	0,02	0,15
2RB6-2RP6	2	60	no	2	60	3,50	-9,07	1,18	0,52	0,12	0,02	0,14
2RB4-RP6	2	40	no	1	60	3,52	-9,25	1,20	0,54	0,12	0,02	0,15
2RB4-RP10	2	40	no	1	100	3,52	-9,26	1,20	0,54	0,12	0,02	0,15
2RB4RP14	2	40	no	1	140	3,61	-9,46	1,23	0,54	0,12	0,02	0,15
2RB6-RP6	2	60	no	1	60	3,48	-9,01	1,17	0,52	0,12	0,02	0,15

RESULTADOS

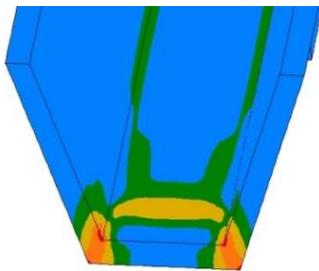
2RB6-RP10	2	60	no	1	100	3,52	-9,11	1,18	0,53	0,12	0,02	0,15
2RB6-RP14	2	60	no	1	140	3,56	-9,20	1,19	0,53	0,12	0,02	0,15

Combinando estas tres variables no se ha logrado mejor los resultados que se resumen en las siguientes figuras, modelo RB16-RP6:

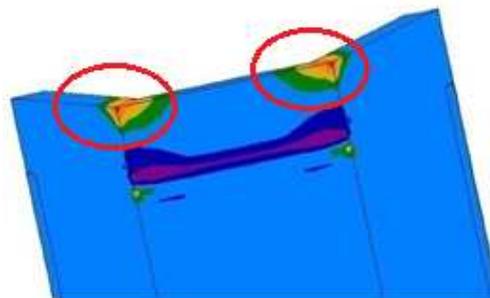


Vista superior del canal

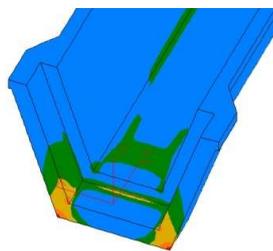
Vista inferior del canal



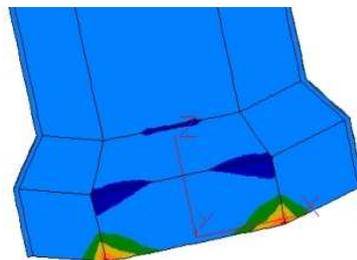
Detalle parte superior del macho



Detalle parte inferior del macho



Tetalle parte superior de la campana

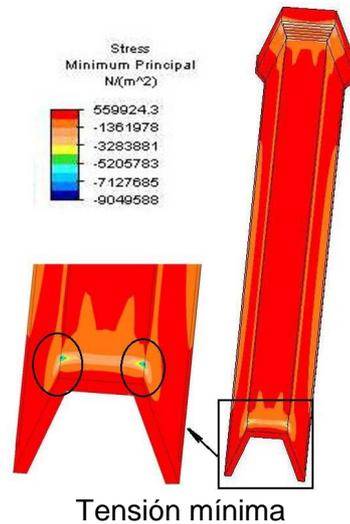


Detalle parte inferior de la campana

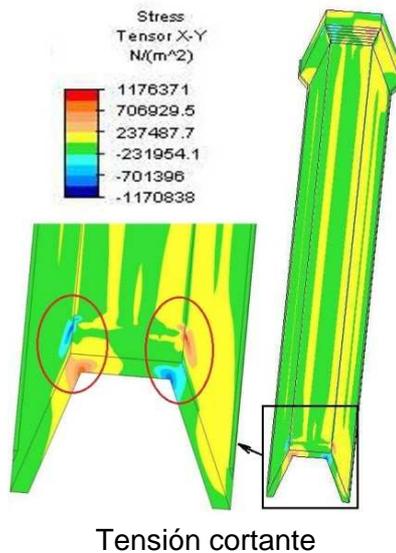
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección en la campana, es de 3,4 Mpa. Las paredes soportan una tensión de 0,61 Mpa al igual que en la base, mientras que en la aristas de la sección, la tensión máxima es de 1,36 Mpa.

Por la parte inferior del modelo observamos el color verde, lo que representa una tensión de 1,36 Mpa, en el centro del vano, que se transforma en azul (0,61 Mpa) en los extremos. En los puntos de apoyo, por su parte interior, la tensión es de -2 Mpa. En los vértices exteriores de los apoyos esta tensión es máxima. Todo dentro de los límites de cálculo establecidos, 6,9 Mpa.



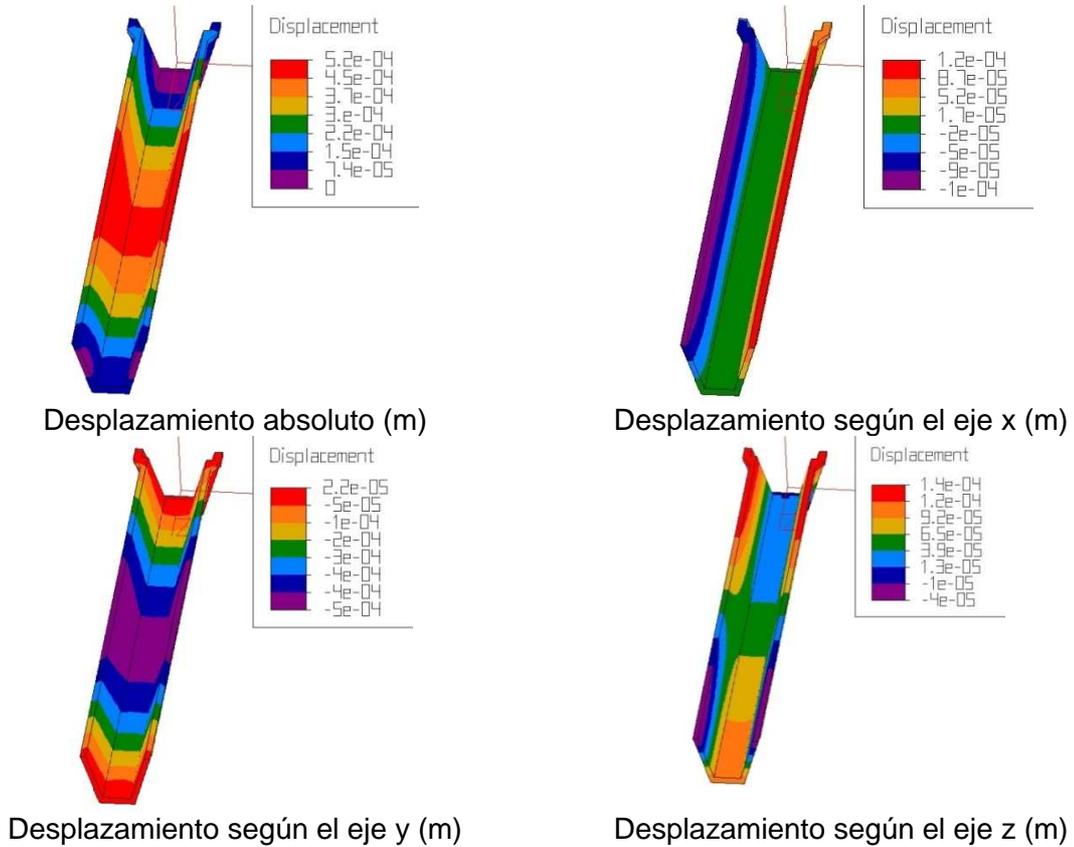
El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión mínima de 0,56 Mpa, reduciéndose un poco en las aristas de la sección y en los bordes exteriores de las paredes. Es en el borde interior del apoyo, en el macho, donde se localiza el máximo valor con - 9 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



Es el verde y amarillo los colores dominantes en la figura de la tensión cortante, tienen un valor absoluto de 0,23 Mpa. Es la arista exterior del macho donde se localiza la

## RESULTADOS

máxima tensión cortante con un valor de 1,18 Mpa, reduciéndose este valor en los apoyos, tanto de la campana como del macho.

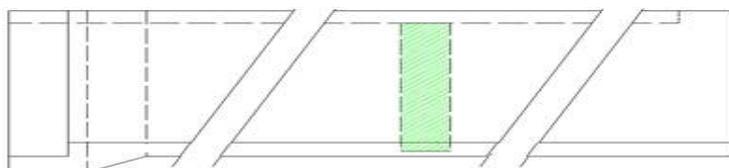


El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano (0,52 mm), reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es 0 mm. Estos valores suponen un 10 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (1,2 mm), según el eje “x”, en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo (0,5 mm) debido al pandeo que sufre el modelo, y en los extremos de signo positivo con un valor 0,02 mm a consecuencia de elevarse los extremos debido a los apoyos. En el caso del eje “z” este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

En este modelo los resultados son dispares, se reduce la tensión máxima que soporta el modelo y en otros casos se incrementa levemente, en torno al 50 % de los límites de cálculo. Los desplazamientos están en torno al 1 % del límite de cálculo establecido. La introducción de refuerzos en las paredes reduce un poco la tensión y la flecha que experimenta las paredes del modelo.

### 3.7.4 REFUERZO TRANSVERSAL

Otra variable a considerar es la introducción de refuerzos transversales, a lo largo del perímetro de la sección del modelo, en la capa de PE.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.
Incremento espesor de la campana	0 mm
Refuerzos:	
Longitudinal:	Ninguno.
Transversal:	Si.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

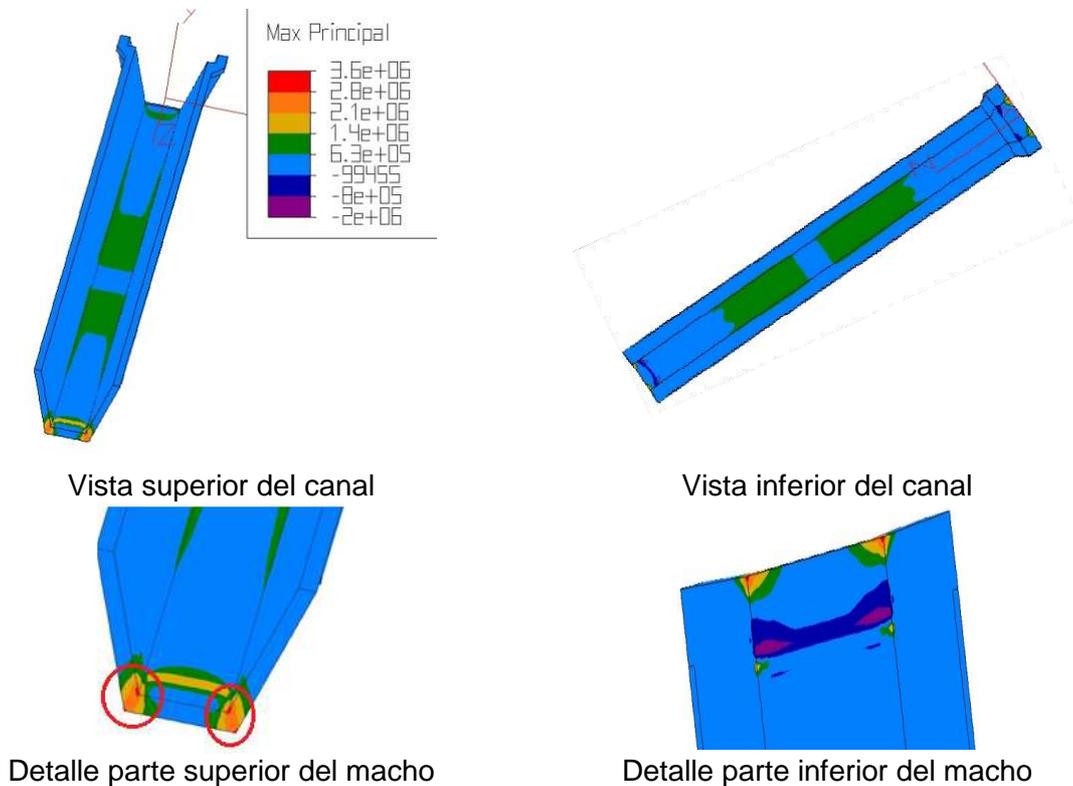
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

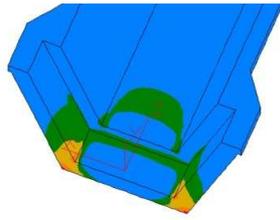
RESULTADOS

En este caso vamos a estudiar el comportamiento del canal con la introducción de varios refuerzos transversales en todo el perímetro del canal. Se colocaran un refuerzo en el centro del vano, dos y tres refuerzos transversales equidistantes. Se han considerado una longitud de 200, 400 y 500 mm. Combinando estos factores se han elaborado 9 modelos. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

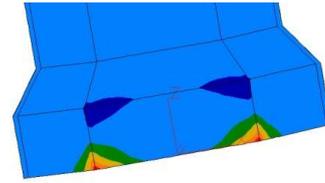
L5-73-15-24-15-08-Lo18	Refuerzos transversales		Tensión			Desplazamiento			
	Nº	Anchura	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\Delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
RT20	1	200 mm	3,58	-9,76	1,26	0,55	0,12	0,02	0,15
RT40	1	400 mm	3,57	-9,74	1,26	0,53	0,12	0,02	0,15
RT50	1	500 mm	3,57	-9,72	1,26	0,53	0,12	0,02	0,15
2RT20	2	200 mm	3,59	-9,77	1,27	0,55	0,11	0,02	0,15
2RT40	2	400 mm	3,58	-9,86	1,27	0,55	0,11	0,02	0,15
2RT50	2	500 mm	3,58	-9,77	1,27	0,55	0,11	0,02	0,15
3RT20	3	200 mm	3,60	-9,78	1,27	0,54	0,11	0,02	0,15
3RT40	3	400 mm	3,59	-9,76	1,26	0,54	0,10	0,02	0,15
3RT50	3	500 mm	3,58	-9,75	1,26	0,54	0,10	0,02	0,15

Los resultados de este modelo no mejoran los anteriores, se resumen en las siguientes figuras, modelo RT40:



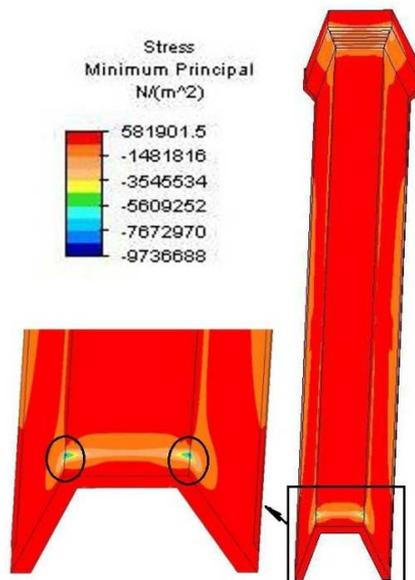


Detalle parte superior de la campana  
Tensión máximos



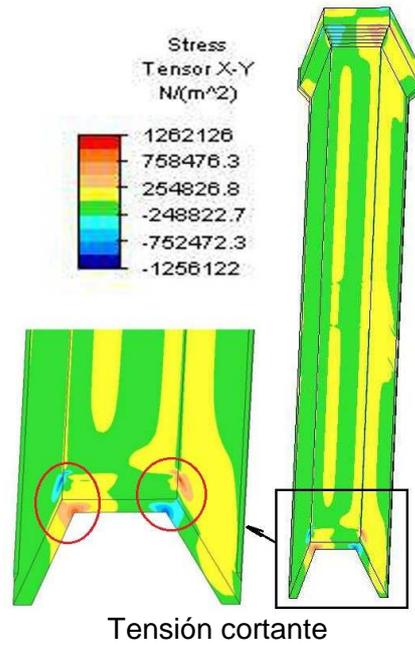
Detalle parte inferior de la campana  
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección, en la campana, donde tiene un valor de 3,6 Mpa. Las paredes soportan una tensión de 0,63 Mpa. En la base de la sección, se puede distinguir el refuerzo transversal. La tensión en este punto es 0,63 Mpa, pasando a un color verde que representa una tensión de 1,4 Mpa y a medida que nos acercamos a los extremos vuelve a tener un valor de 0,63 Mpa. Todo dentro de los límites de cálculo establecidos, 6,9 Mpa.

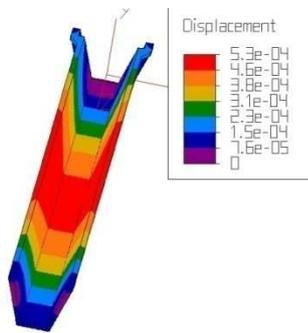


Tensión mínima

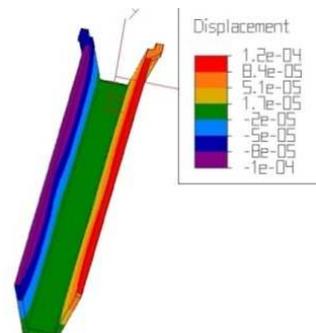
El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa la tensión mínima de 0,58 Mpa, reduciéndose un poco en las aristas de la sección y en los bordes exteriores de las paredes. Es en el borde interior del apoyo, en el macho, donde se localiza el máximo valor con -10 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



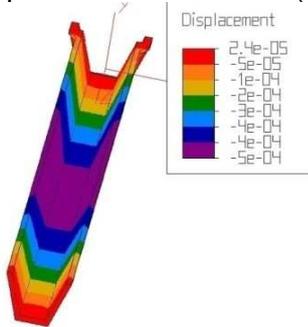
Es el verde y amarillo los colores dominantes en la figura de la tensión cortante, tienen un valor absoluto de 0,25 Mpa. Es la arista exterior del macho donde se localiza la máxima tensión cortante con un valor de 1,26 Mpa, reduciéndose este valor en los apoyos, tanto de la campana como del macho.



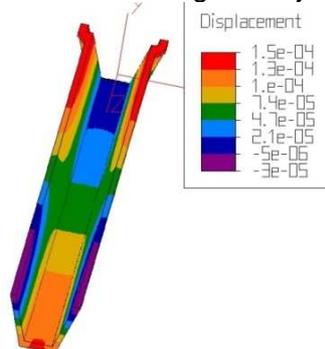
Desplazamiento absoluto (m)



Desplazamiento según el eje x (m)



Desplazamiento según el eje y (m)



Desplazamiento según el eje z (m)

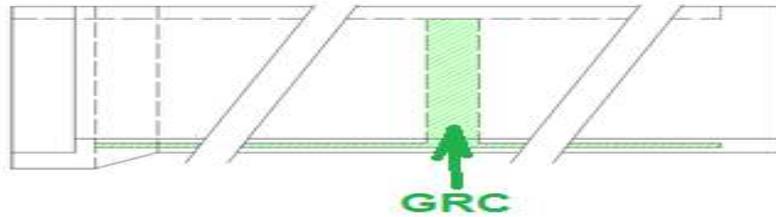
El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano (0,53 mm), reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es nulo. Estos valores

suponen un 10 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (0,10 mm), según el eje "x", en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje "y" el desplazamiento se produce hacia abajo (0,5 mm) debido al pandeo que sufre el modelo y positivo en los extremos del vano con una flecha de 0,02 mm a consecuencia de los apoyos. En el caso del eje "z", este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

El empleo de refuerzos transversales en el perímetro del modelo no mejora los resultados, manteniéndose próximos a los considerados en el modelo tomado como referencia. Igual sucede con el desplazamiento. Pero todo ello dentro de los límites de cálculos establecidos para el GRC.

### 3.7.5 REFUERZO LONGITUDINAL EN VÉRTICES Y TRANSVERSAL

La variable a analizar es la introducción de refuerzos longitudinales en las esquinas y transversales en el canal.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.
Incremento del espesor de la campana	0 mm
Refuerzos:	
Longitudinal:	Si.
Transversal:	Si.

En este caso vamos a estudiar el comportamiento del canal a la colocación de refuerzos longitudinales en las esquinas y transversales en el canal. Tenemos 5 modelos. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

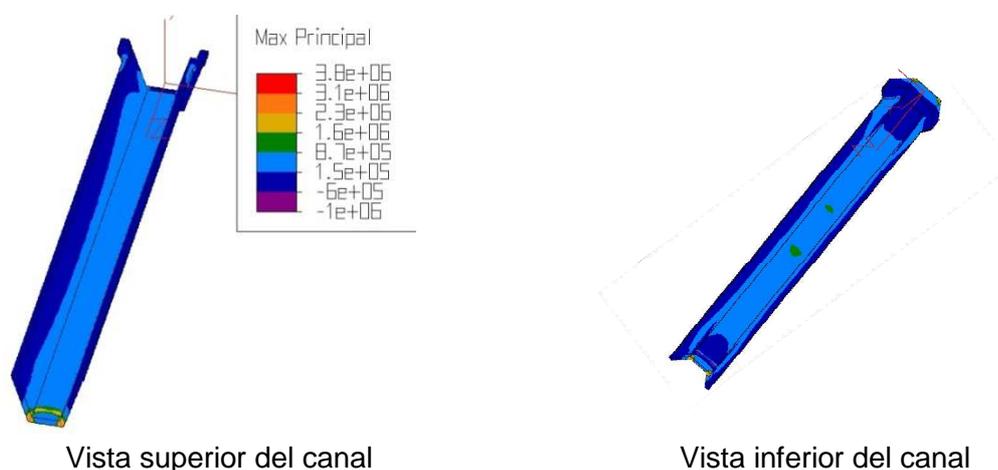
Las acciones que se consideran son las siguientes:

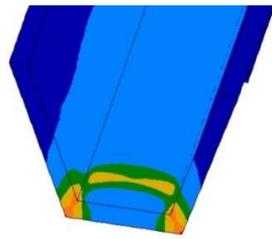
- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

En este caso vamos a estudiar el comportamiento del canal con la introducción de varios refuerzos longitudinales en los vértices de la sección y transversales. Se considerarán los refuerzos transversales que se han tenido en cuenta en el punto anterior, tanto en cuanto al número como a la longitud de los mismos. Los refuerzos longitudinales en las esquinas serán comunes para todos los supuestos de los refuerzos transversales. Combinando estos factores se han elaborado 9 modelos. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla

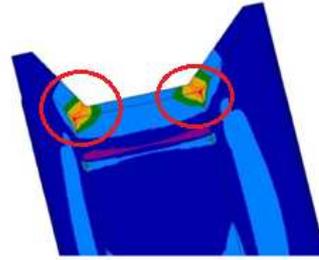
L5-73-15-24-15-08-Lo18-	Refuerzos transversales		Resultados						
	Nº	Achura (mm)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
RE-RT20	1	200	3,82	-8,08	0,90	0,48	0,09	0,02	0,14
RE-RT40	1	400 mm	3,81	-8,08	0,90	0,48	0,09	0,02	0,14
RE-RT50	1	500 mm	3,78	-8,07	0,89	0,47	0,09	0,02	0,14
RE-2RT20	2	200 mm	3,82	-8,11	0,90	0,49	0,09	0,02	0,14
RE-2RT40	2	400 mm	3,80	-8,10	0,90	0,49	0,09	0,02	0,14
RE-2RT50	2	500 mm	3,80	-8,10	0,90	0,49	0,09	0,02	0,14
RE-3RT20	3	200 mm	3,81	-8,11	0,90	0,49	0,09	0,02	0,14
RE-3RT40	3	400 mm	3,80	-8,11	0,90	0,48	0,09	0,02	0,14
RE-3RT50	3	500 mm	3,78	-8,11	0,09	0,48	0,09	0,02	0,14

Los resultados de este modelo se resumen en las siguientes figuras:

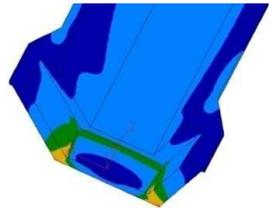




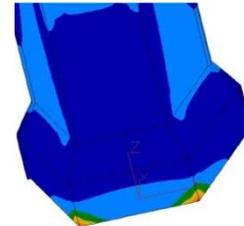
Detalle parte superior del macho



Detalle parte inferior del macho



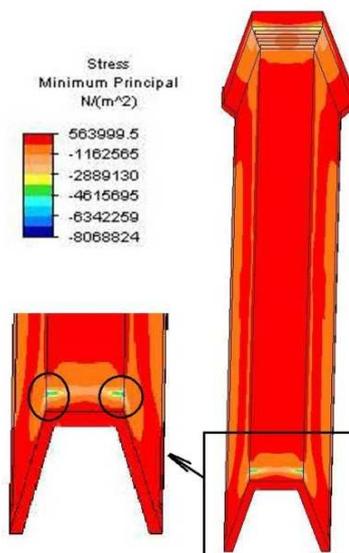
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana

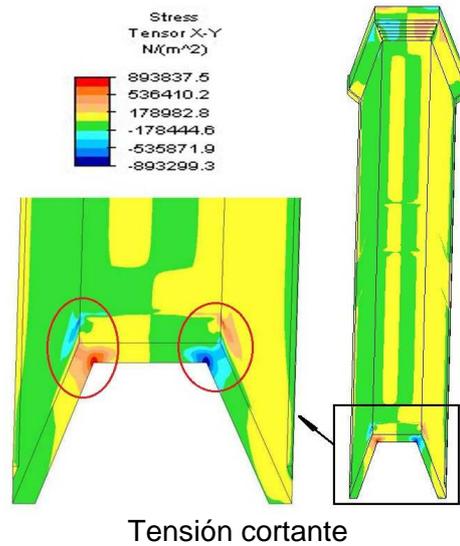
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección, en la campana, con un valor de 3,8 Mpa. Las paredes, con un color azul oscuro, soportan una tensión de de 0,15 Mpa mientras que la base del canal, un azul más claro, es de 0,87 Mpa y unas pequeñas zonas donde la tensión es de 1,6 Mpa. Todo dentro de los límites de cálculo establecidos, 6,9 Mpa.

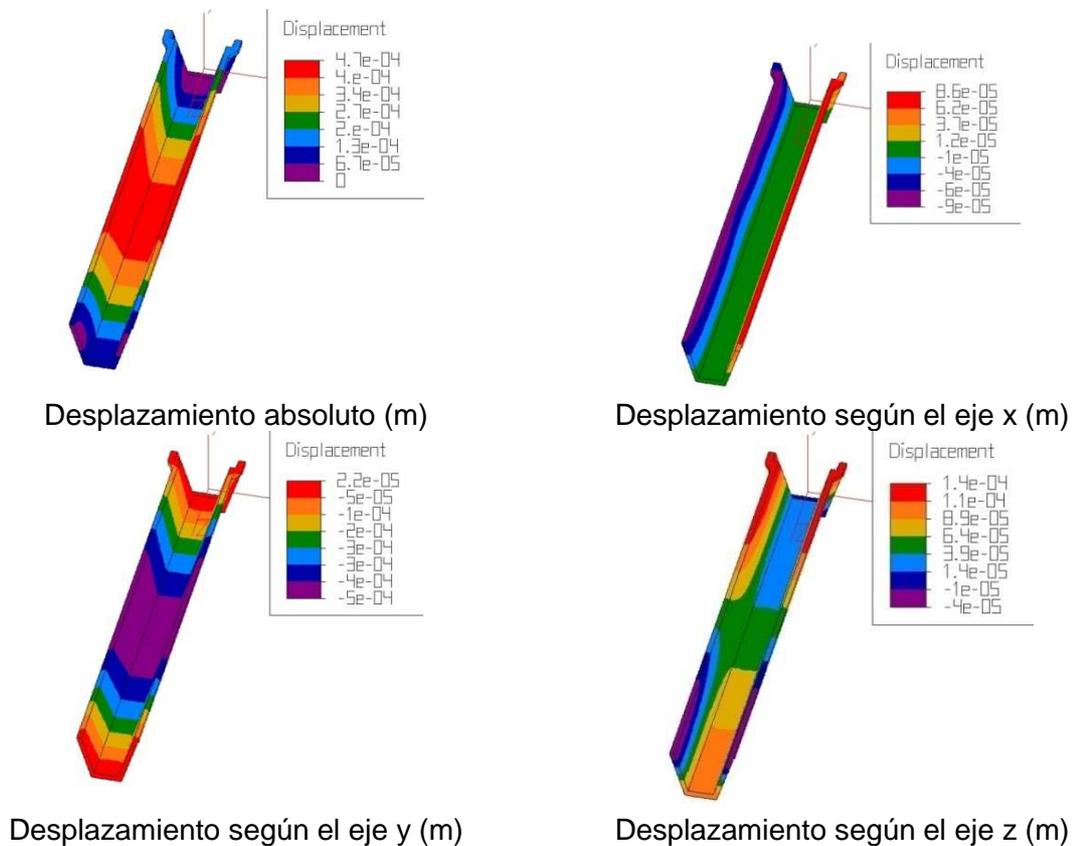


Tensión mínima

El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión mínima de 0,55 Mpa, reduciéndose un poco en las aristas de la sección y en los bordes exteriores de las paredes. Es en el borde interior del apoyo, en el macho, donde se localiza el máximo valor con -8 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.



Es el verde y amarillo los colores dominantes en la figura de la tensión cortante, tienen un valor absoluto de 0,18 Mpa, pero de signo contrario. Es la arista exterior del macho donde se localiza la máxima tensión cortante con un valor de 0,89 Mpa, reduciéndose este valor en los apoyos, tanto de la campana como del macho. Valores que están lejos del límite de cálculo establecido.



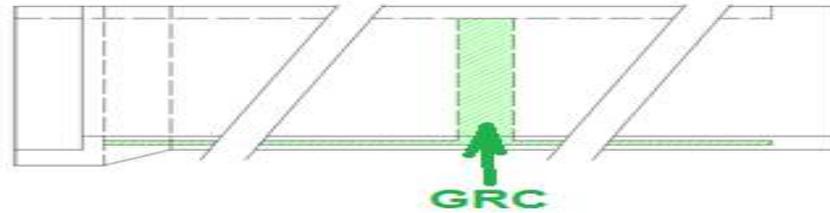
## RESULTADOS

El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano con una flecha 0,47 mm, reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde se hace nulo. Estos valores suponen un 10 % del límite de cálculo establecido. En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia afuera (0,09 mm), según el eje "x", en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje "y", el desplazamiento se produce hacia abajo debido al pandeo que sufre el modelo, 0,5 mm en el centro del vano y en los extremos el movimiento es hacia arriba y positivo en los extremos del vano con un valor de 0,02 mm. En el caso del eje "z", este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

Al igual que sucedía en el modelo que emplea refuerzos longitudinales en los vértices de la sección y longitudinales en la base, los resultados empeoran un 6 %, pero sin sobre pasar los límites de cálculo. En cuanto al desplazamiento estos se mantienen en los valores obtenidos para el modelo de referido anteriormente.

### 3.7.6 REFUERZO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL

La variable a analizar es la introducción de refuerzos longitudinales en la base, esquinas y paredes laterales del canal y transversales.



Las características de este modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm.
Incremento del espesor de la campana	0 mm
Refuerzos:	
Longitudinal:	Si.
Transversal:	Si.

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, se considera el apoyo simple.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.

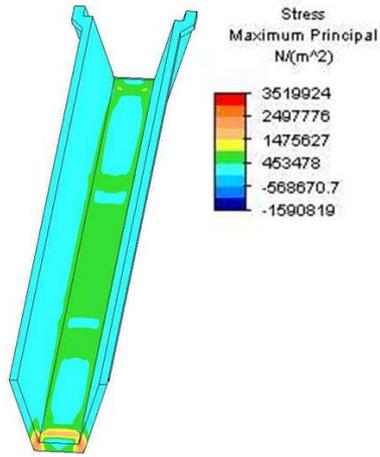
RESULTADOS

- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

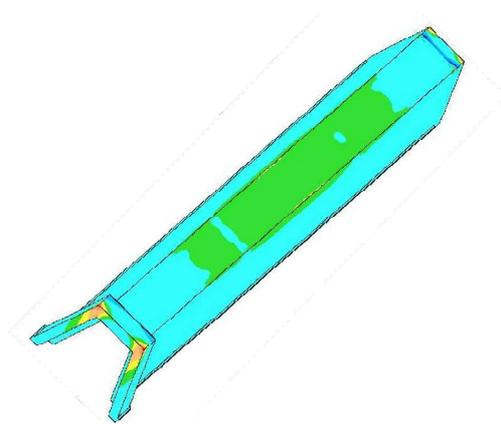
En este modelo vamos a estudiar el comportamiento del canal a la colocación de refuerzos longitudinales (base y laterales) y transversales en el canal. Debido a la gran cantidad de combinaciones que podemos establecer, considerando los supuestos estudiados anteriormente para estas tres condiciones. Nos centraremos en canales que tengan 2 refuerzos longitudinales de 40 mm en la base, un refuerzo longitudinal de 60 mm o dos de 40 mm en la pared y las nueve combinaciones que tenemos de los refuerzos transversales. Considerando esta combinación de elementos tenemos 27 modelos. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RB40-	Refuerzo longitudinal				Refuerzo transversal		Resultados						
	Nº	Base (mm)	Nº	Pared (mm)	Nº	Anchura (mm)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
RT20	2	40	0	0	1	200	3,47	-8,99	1,16	0,52	0,12	0,02	0,15
RT40	2	40	0	0	1	400	3,45	-8,97	1,16	0,51	0,12	0,02	0,14
RT50	2	40	0	0	1	500	3,43	-8,98	1,16	0,49	0,11	0,02	0,14
2RT20	2	40	0	0	2	200	3,47	-9,00	1,16	0,52	0,11	0,02	0,15
2RT40	2	40	0	0	2	400	3,46	-9,00	1,16	0,52	0,11	0,02	0,14
2RT50	2	40	0	0	2	500	3,46	-9,11	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15
3RT20	2	40	0	0	3	200	3,47	-9,00	1,16	0,51	0,11	0,02	0,14
3RT40	2	40	0	0	3	400	3,47	-9,00	1,16	0,51	0,10	0,02	0,14
3RT50	2	40	0	0	3	500	3,46	-8,98	1,16	0,51	0,10	0,02	0,14
RP60-RT20	2	40	1	60	1	200	3,52	-9,14	1,18	0,52	0,12	0,02	0,15
RP60-RT40	2	40	1	60	1	400	3,51	-9,09	1,18	0,51	0,12	0,02	0,15
RP60-RT50	2	40	1	60	1	500	3,48	-9,10	1,18	0,50	0,11	0,02	0,15
RP60-2RT20	2	40	1	60	2	200	3,51	-9,12	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15
RP60-2RT40	2	40	1	60	2	400	3,52	-9,13	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15
RP60-2RT50	2	40	1	60	2	500	3,52	-9,25	1,20	0,52	0,11	0,02	0,15
RP60-3RT20	2	40	1	60	3	200	3,53	-9,13	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15
RP60-3RT40	2	40	1	60	3	400	3,52	-9,10	1,15	0,51	0,10	0,02	0,15
RP60-3RT50	2	40	1	60	3	500	3,51	-9,08	1,17	0,51	0,10	0,02	0,15
2RP60-RT20	2	40	2	40	1	200	3,51	-9,11	1,18	0,52	0,12	0,02	0,15
2RP60-RT40	2	40	2	40	1	400	3,50	-9,09	1,18	0,51	0,11	0,02	0,15
2RP60-RT50	2	40	2	40	1	500	3,48	-9,09	1,18	0,49	0,11	0,02	0,14
2RP40-2RT20	2	40	2	40	2	200	3,51	-9,12	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15
2RP40-2RT40	2	40	2	40	2	400	3,50	-9,10	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15
2RP40-2RT50	2	40	2	40	2	500	3,50	-9,22	1,20	0,52	0,11	0,02	0,15
2RP40-3RT20	2	40	2	40	3	200	3,52	-9,11	1,18	0,51	0,10	0,02	0,15
2RP40-3RT40	2	40	2	40	3	400	3,51	-9,10	1,18	0,51	0,10	0,02	0,14
2RP40-3RT50	2	40	2	40	3	500	3,50	-9,08	1,17	0,51	0,10	0,02	0,14

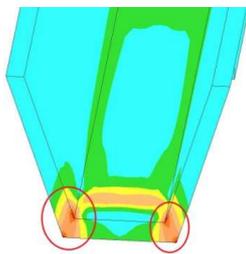
Los resultados de este modelo no han conseguido mejorar los obtenidos en otros modelos. Estos resultados del modelo L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RLB40-RP60-2RT20 se resumen en las siguientes figuras:



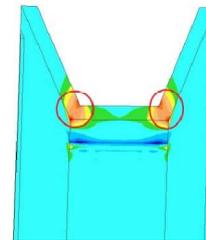
Vista superior del canal



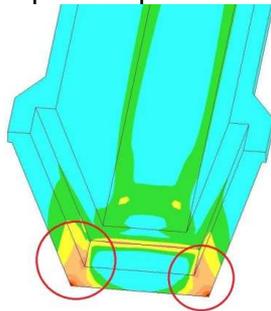
Vista inferior del canal



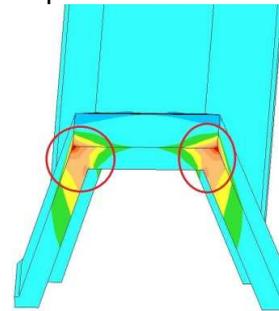
Detalle parte superior del macho



Detalle parte inferior del macho



Detalle parte superior de la campana

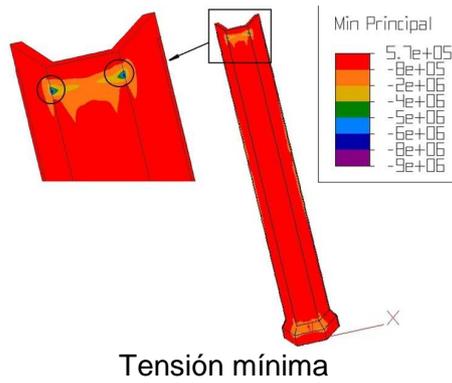


Detalle parte inferior de la campana

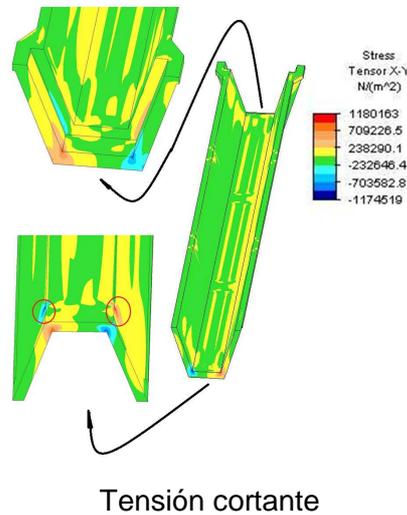
Tensión máximos

La tensión máxima se localiza en los vértices de la sección, en el macho y campana, con un valor de 3,5 Mpa. El color azul, que representa una tensión máxima de 0,45 Mpa, es el que domina toda la figura, en paredes. En la base es el color verde (1,47 Mpa) es el dominante, pero nos permite distinguir los refuerzos colocados. Este color, el verde, también se encuentra por la parte superior de la arista del modelo, en toda su longitud, lo que representa la unión entre las paredes y la base del canal. Pero todo dentro de los límites de cálculo establecidos, 6,9 Mpa.

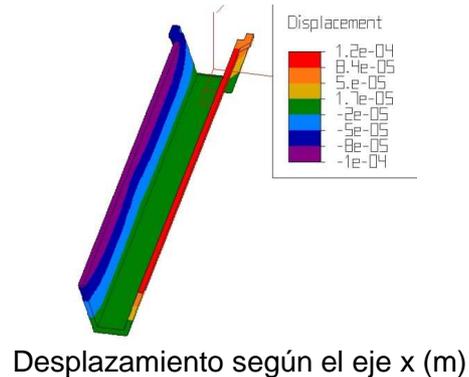
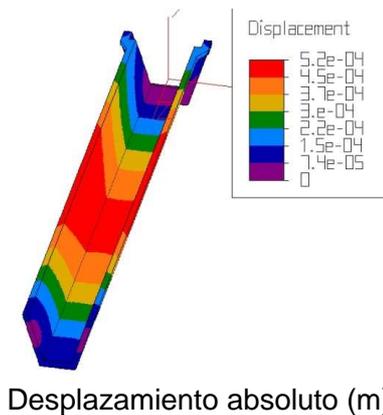
RESULTADOS

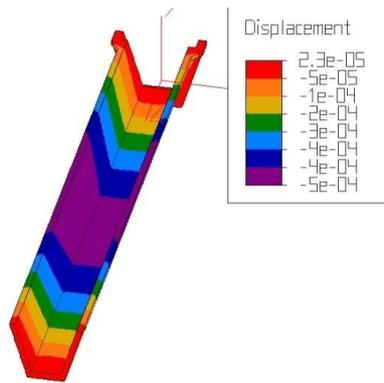


El color rojo sigue dominando el modelo, lo que representa una tensión mínima de 0,57 Mpa. Es en el borde interior del apoyo en el macho donde se localiza el máximo valor con - 9 Mpa, en la intersección del apoyo y la arista de la sección.

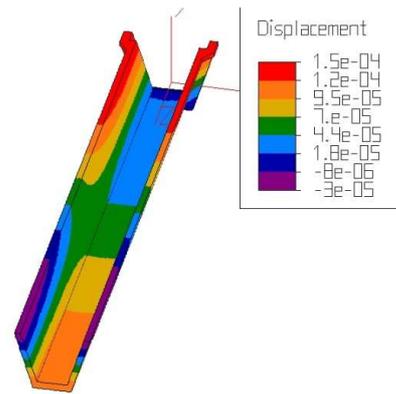


Es el verde el color dominante en la figura de la tensión cortante, tienen un valor absoluto de 0,24 Mpa. En las aristas exteriores es donde se localiza la máxima tensión cortante con un valor de 1,2 Mpa, al igual que en el interior de los apoyos, tanto de la campana como del macho.





Desplazamiento según el eje y (m)



Desplazamiento según el eje z (m)

El desplazamiento máximo se origina en el centro del vano con una flecha de 0,52 mm, reduciéndose a medida que nos acercamos a los extremos del modelo donde es nulo. Estos valores suponen un 10 % del límite de cálculo establecido (5,4 mm). En relación a los ejes, este desplazamiento se produce hacia el exterior del modelo (0,12 mm) en el borde superior de las paredes a consecuencia de la presión del agua sobre las mismas. En cuanto al eje “y”, el desplazamiento se produce hacia abajo (0,5 mm), de signo negativo, debido al pandeo que sufre el modelo en el centro del vano y positivo o hacia arriba en los extremos con una flecha de 0,023 mm. En el caso del eje “z”, este desplazamiento se produce hacia el centro del modelo.

Los resultados obtenidos en este modelo son muy parejos, en torno a 3,50 Mpa como tensión máxima que soporta, al igual que los desplazamientos. Todo ello dentro de los límites de cálculo.

Considerar el modelo L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RLB40-RP60-2RT20 como referencia es debido a:

- El espesor del sándwich reduce el peso del modelo, sin por ello disminuir la resistencia que tiene. Respetando los 15 mm de espesor mínimo que ha de tener el GRC para un proceso de robotización en su elaboración.
- La longitud de apoyo de 180 mm por ser la longitud total de la campana.
- La colocación de los refuerzos longitudinales que permiten reducir el pandeo que puede sufrir las diferentes secciones que conforman el modelo.
- La colocación de los refuerzos transversales que reducen el pandeo de las paredes debido a la acción de uso del modelo, transporte de agua.

## RESULTADOS

- La colocación de los refuerzos en su conjunto permiten reducir las tensiones y los desplazamientos que pueda soportar el modelo debido a las acciones que pueda sufrir el modelo en su uso y que no se han tenido en consideración.

## **4 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Índice

4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	1
4.1	Introducción .....	3
4.2	Tipo de apoyo .....	3
4.3	Talud de las paredes.....	9
4.4	Espesor de las láminas .....	11
4.5	Condiciones de coacción al movimiento en el lado de la campana .....	14
4.6	Refuerzos.....	16
4.7	Modelo a verificar.....	24

## 4.1 INTRODUCCIÓN

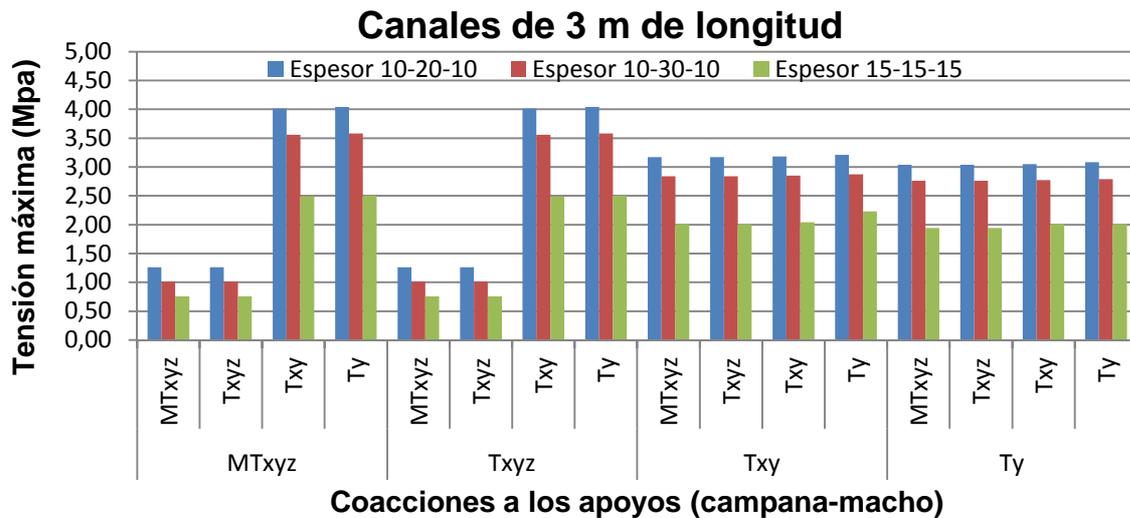
En este capítulo vamos a analizar los resultados obtenidos hasta este momento en el desarrollo de esta Tesis. A través de una serie de graficas vamos a poder determinar la estructura que más se adapta al objetivo de reducir el peso de los canales de riego. Durante el desarrollo de este capítulo, vamos a ir conociendo la influencia de las variables planteadas para este estudio, la influencia de los espesores de cada una de las laminas que conforman este material compuesto tipo sándwich, el ángulo de inclinación de las paredes del canal, la colocación de refuerzos, todos ellos con el objetivos de reducir el peso final del canal manteniendo los limites de cálculo establecidos para el GRC.

No nos olvidemos que el objeto de esta Tesis es continuar con el estudio de la aplicación del GRC, material poco empleado en el sector agrícola, que comenzó D. LUIS RICOTE LÁZARO, Doctor Ingeniero Agrónomo con la tesis titulada “Análisis del comportamiento mecánico de elementos para conducciones hidráulicas abierta en poliéster reforzado con fibra de vidrio” dirigida por D. JOSE LUIS MELÉNDEZ FALKOWSKI, Doctor Ingeniero Agrónomo. Continuada con el trabajo “Comportamiento mecánico de conducciones abiertas de sección comerciales. El GRC, tecnología de nuevos materiales para la fabricación de canales de riego”.

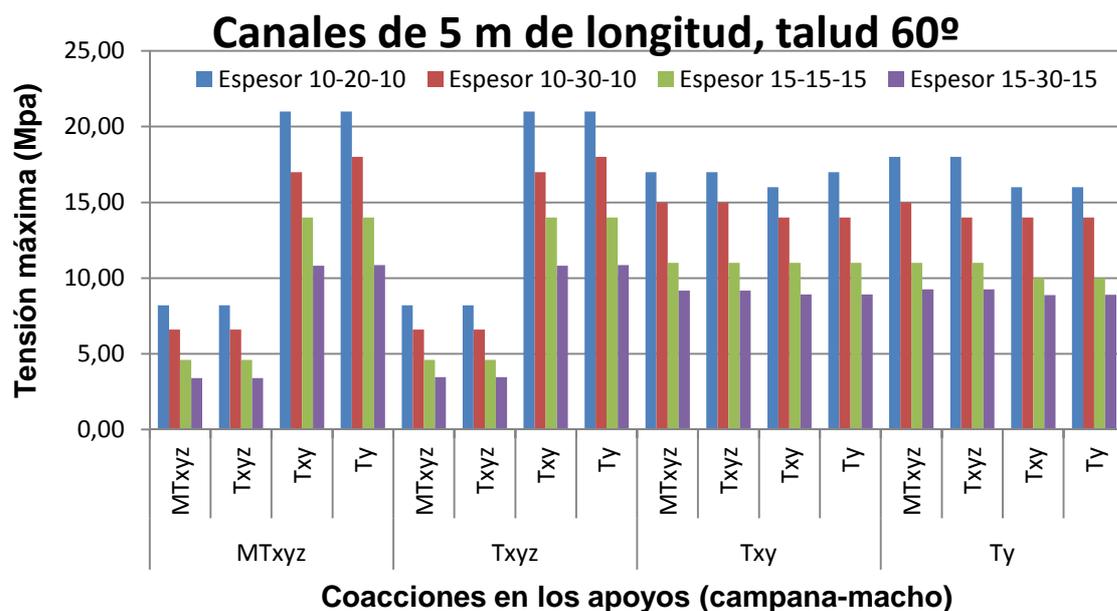
## 4.2 TIPO DE APOYO

Comenzamos este estudio analizando la influencia del tipo de apoyo en los canales. Se ha considerado dos apoyos como la situación más desfavorable, situados en los extremos de canal. La influencia que tiene las distintas coacciones que puede sufrir los canales es el primer factor a considerar. Partimos de canales de 3 m de longitud, con un talud 60° por ser los estudios de partida. Se han analizado 16 combinaciones de apoyos con todos los modelos diseñados y un apoyo de 10 cm de longitud.

### 4.2.1 TENSION

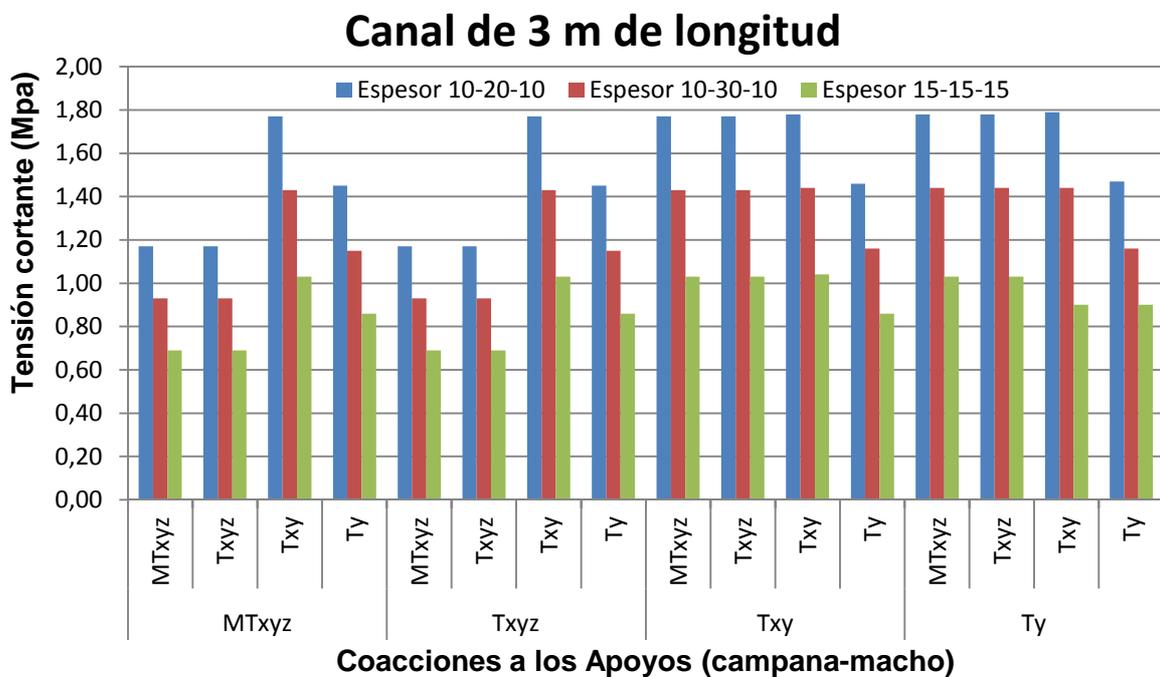


La gráfica representa la tensión que sufren los modelos de 3 metros de longitud y talud de 60°. Como observamos, las coacciones al giro y movimiento en el lado de la campana de los tres espesores modelizados junto con el apoyo simple en el lado del macho son las situaciones más desfavorables. En este caso, para canales de 3 m de longitud no es ningún problema porque estos valores están lejos de límite de proporcionalidad en tracción pura, 6,9 Mpa. Una situación de coacción al giro y/o movimiento en todas las direcciones de los apoyos son las situaciones más favorables, mejoramos en torno al 70 % los resultados más desfavorables. Cuando liberamos alguno de los movimientos, los resultados se igual un poco, mejorando en torno a un 20 % los resultados más desfavorables.

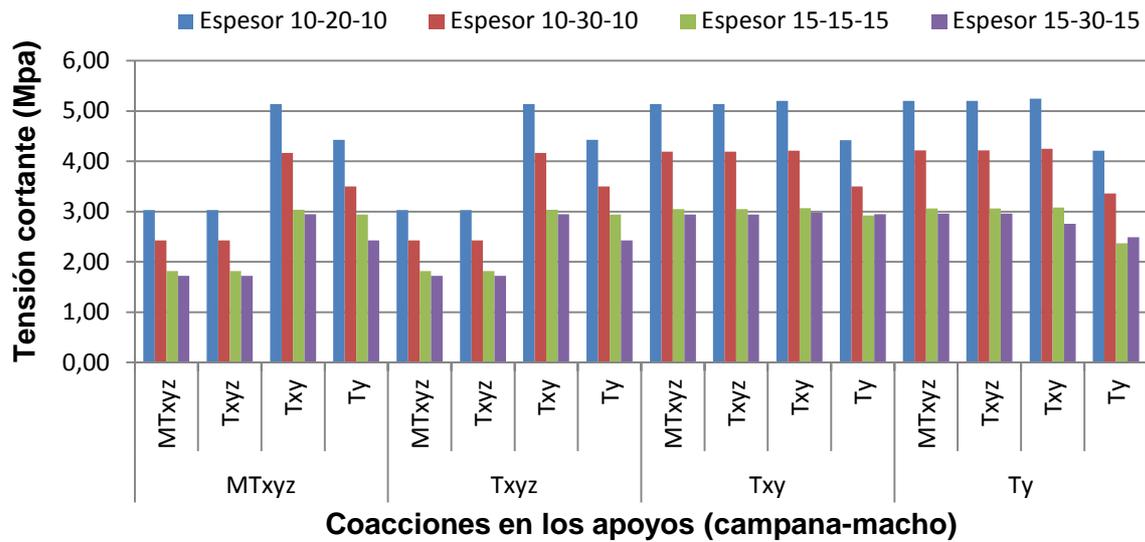


Al igual que sucedía con los modelos de 3 m de longitud, las coacciones al giro y a la traslación en todas las dirección, en el lado de la campana de los cuatro espesores modelizados, junto con el apoyo simple en el lado del macho son las situaciones más desfavorables. Los modelos con coacciones al giro y/o traslación en los dos apoyos cumplirían la condición del límite de cálculo de la tensión máxima (6,90 Mpa), excepto el espesores 10-20-10. Como sucedía en los canales de 3 m de longitud, cuando liberamos el movimiento en uno de los apoyos, en cualquiera de los ejes, los resultados se igualan. Se mejora los resultados un 23 % respecto a la situación más desfavorable, pero aun lejos del límite de cálculo, un 250 %.

## 4.2.2 CORTANTE



En los canales de 3 m de longitud, los resultados para rotura en tracción pura se encuentran muy alejados de 25,4 Mpa, límite de cálculo. En este caso los resultados son muy parejos cuando se no se restringe el movimiento en todos los sentidos en alguno de los apoyos. En el caso de coacciones al giro y/o traslación en todos los sentidos en los dos apoyos son la situación más favorable porque se reduce la cortante un 34 %.

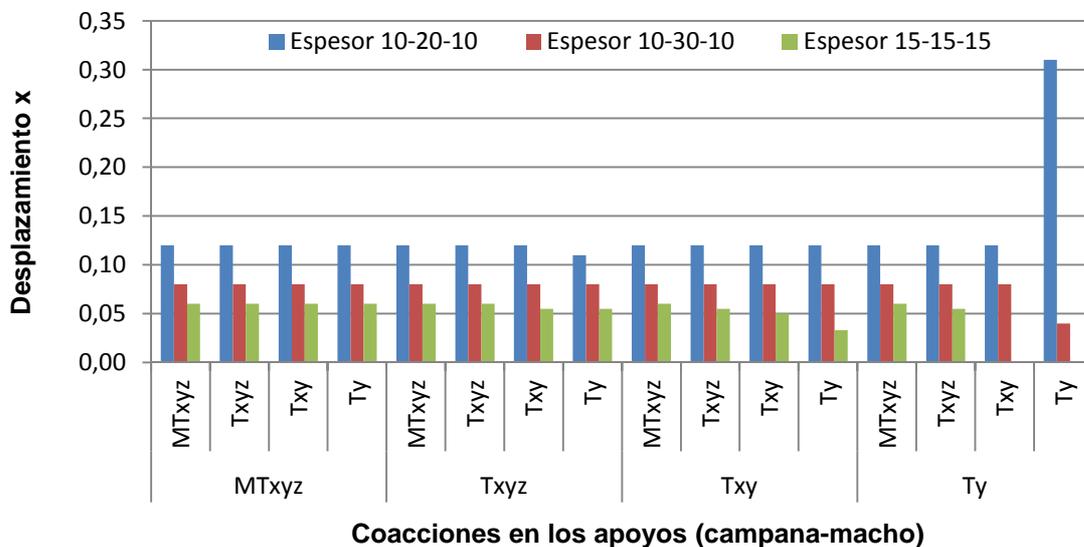


Como sucedía en el caso de los canales de 3 m de longitud, la tensión de rotura sigue estando lejos del límite de cálculo. De la misma forma, cuando en cualquiera de los apoyos no se restringe el movimiento en todos los ejes es la situación más desfavorable y cuando así se produce se reduce en torno al 40 % la tensión cortante en el modelo.

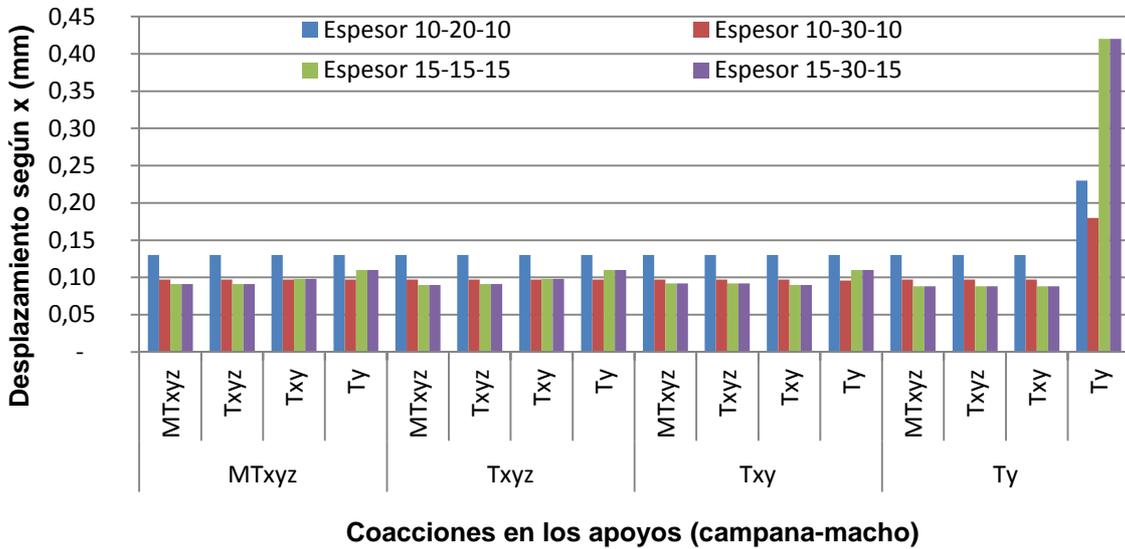
### 4.2.3 DESPLAZAMIENTO

El límite que se estableció para el desplazamiento máximo según su componente vertical (dirección del calado) y horizontal es del 10 % de las dimensiones de la sección según dichas direcciones.

El desplazamiento según el eje “x” se representa en las siguientes graficas:

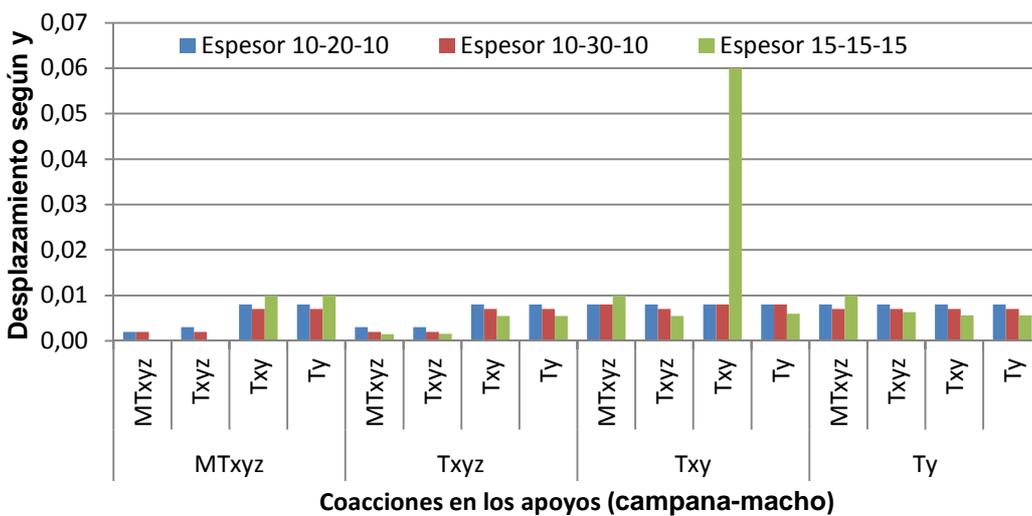


Para un canal de 3 m de longitud, los desplazamientos según este eje es mínimo, que estas lejos del límite que se estableció, 10 % del espesor de la sección. En el caso de apoyo simple en los extremos del modelo de 10 mm de GRC más 20 mm de polietileno expandido más 10 mm de GRC destaca sobre los demás tipo de apoyos y espesores, pero sin llegar al límite establecido de 4 mm.



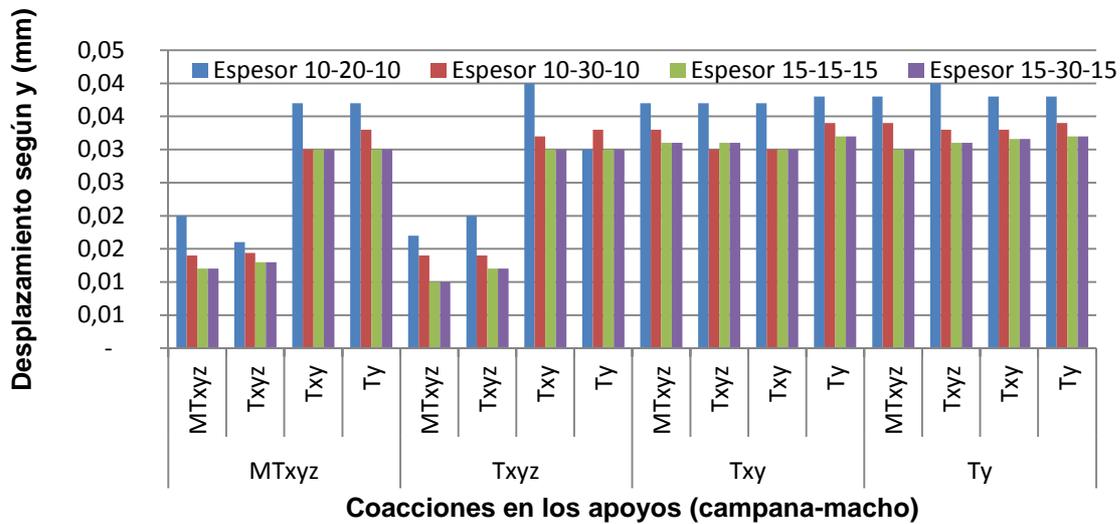
Para un canal de 5 m, el desplazamiento según el eje “x” no llega a alcanzar el 1 % de las dimensiones de la sección según este eje. El apoyo simple en los dos extremos sigue destacando sobre el resto de apoyos, pero sin superar ese 1 %.

Los resultados del desplazamiento según el eje “y” se representa en las siguientes gráficas:



En los canales de 3 m de longitud el desplazamiento según el eje “y” no llega al 1 % de las dimensiones de la sección en todos los tipos de apoyos. En el caso de un apoyo

que coacciona el desplazamiento de los ejes “x” e “y” supera ese 1 %, pero sin llegar al 10 % que se establece como límite de desplazamiento.



Los modelos de 5 m, al igual que ocurría con los modelos de 3 m, están en torno al 1 % de desplazamiento. Son las coacciones a la rotación y translación tienen los valores más bajos de los tipos de apoyos.

#### 4.2.4 COMENTARIO

Un apoyo simple se modelizaría con coacciones verticales en un solo sentido (hacia abajo), con lo cual las distintas posibilidades de deformación del canal en la zona del apoyo dan lugar a distintas situaciones de apoyo real; así deformaciones notables por flexión longitudinal y transversal en el canal darían lugar a apoyos en, prácticamente, dos puntos solamente. Sin embargo, un apoyo del canal sobre mortero fresco extendido en la superficie del soporte (opción que, por otra parte, tiene como ventaja dotar de estabilidad a la conducción, en especial, ante acciones transversales) tendría que simularse con coacciones a la traslación (rótulas) en toda la superficie de contacto. Aún así, en este último caso, sería razonable prever daños en el mortero de unión por el paso del tiempo y por los continuos procesos de carga y descarga en el canal, con lo que se volvería a una situación similar a la anterior.

Por ello, la consideración inicial de un apoyo simple en el macho y coacciones a la traslación en el lado de la campana como situación que más idónea de cálculo por tratarse de la situación inicial a la que se sometería el canal en su montaje y durante un período más o menos largo de tiempo, además de ser la situación más desfavorable que hemos obtenidos en los cálculos realizados. Con el paso del tiempo, el canal con dos

apoyos en los extremos pasaría a ser apoyos simples en los mismos, situación por lo que se ha podido comprobar es más favorable.

Teniendo en cuenta los estudios llevados a cabo por el equipo dirigido por el Profesor Meléndez Falkowski en los que supone un diagnóstico de la situación de las canalizaciones de riego en diversas zonas de León. Dado que más del 90 % de la longitud de los canales es de 5 m, esta la variable será la que consideraremos en para la longitud de los modelos. Además, destacar que los canales de 3 m de longitud con espesores mínimo de 10 mm de lamina de GRC más 20 mm de Polietileno expandido y 10 mm de GRC están un 42 % del límite de cálculo en cuanto a tensión máxima, mientras que en cortante y desplazamiento está muy alejado de los límites establecidos.

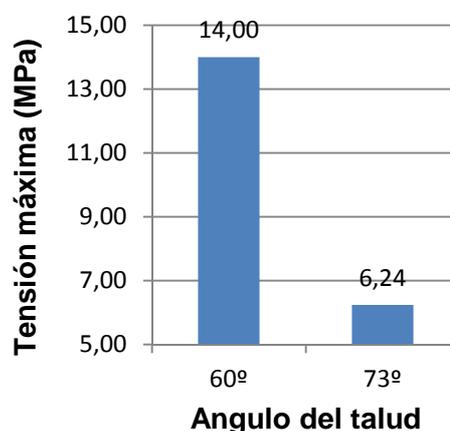
## 4.3 TALUD DE LAS PAREDES

### 4.3.1 INTRODUCCIÓN

Partimos de una serie de estudios previo en los cuales una variable utilizada ha sido un talud de las paredes del canal de sección trapecial de  $60^\circ$  donde la relación entre la base y la pared mojada es de 1 a 1. Si uno de los objetivos planteados es modelizar canales viables comercialmente, es decir, que puedan sustituir aquellos elementos deteriorados o rotos se ha de considerar un ángulo de inclinación de la pared de  $73^\circ$  y una relación base / lado mojado de  $2/3$  aproximadamente. Además de mantener las restantes variables establecidas de acción y reacción en el canal.

### 4.3.2 TENSIÓN MÁXIMA

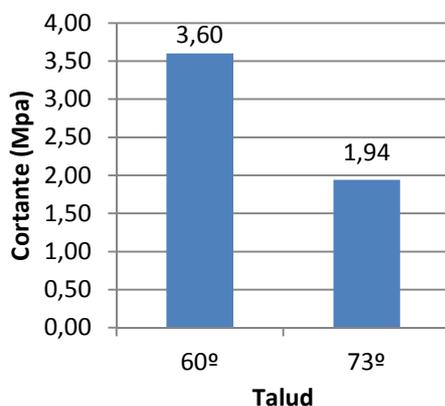
Vamos a considerar un espesor de la lámina de GRC de 15 mm y de Polietileno de 15 m.



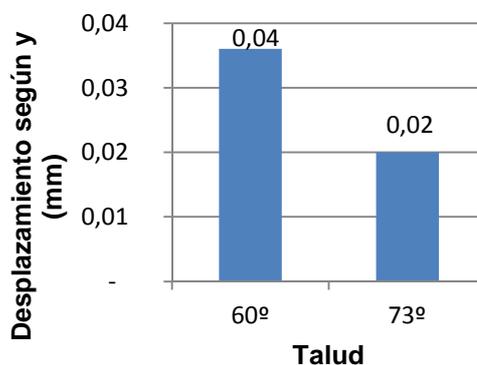
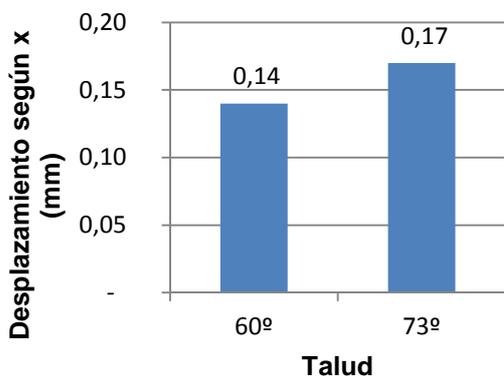
El ángulo que da forma al talud tiene una gran importancia en la tensión máxima. Cuando le aplicamos el talud comercial a nuestro modelo se reduce en un 55 % la tensión máxima que soporta. Considerando en los dos casos un canal de 5 m de longitud, un espesor de laminas de 15-15-15 mm. En el caso de un ángulo de 60° supera ampliamente el límite de cálculo, el doble del mismo. En cambio, con uno de ángulo de 73° la tensión máxima esta 10 puntos por debajo del límite.

### 4.3.3 CORTANTE

Como sucedía en el caso de la tensión máxima, se reduce más de un 50 % la tensión cortante al utilizar un talud de 73°. En ambos casos estos resultados están muy lejos del límite de rotura del GRC.



### 4.3.4 DESPLAZAMIENTO



El máximo desplazamiento admisible para un canal con unas dimensiones de 45 mm de espesor sería de 4,5 mm, en ambos ejes. Como podemos observar en estas gráficas, están lejos de este límite de cálculo, más de un 90 %.

### 4.3.5 COMENTARIO

Se ha considerado un talud de  $60^\circ$  y una relación base / lado mojado de 1/1, por tratarse de dos variables de los estudios anteriores. Posteriormente se ha considerado un talud de  $73^\circ$  y una relación base / lado mojado de 2/3 por tratarse de las variables empleadas comercialmente. La comparativa de estas dos variables se ha realizado empleando un espesor de 15 mm en las dos capas de GRC y 15 mm en la capa de Polietileno Expandido. Como puede observarse, sobre todo la gráfica de tensión máxima, el empleo de un talud comercial mejora considerablemente los resultados, llegando a ser un valor que entra dentro de los límites de cálculo, la variable de  $60^\circ$  llega a estar en el doble de dicho cálculo. Por ello la opción más favorable es utilizar un talud de  $73^\circ$  y una relación base y lado mojado de 2/3.

Este resultado está por debajo del límite de cálculo, pero se ha de conseguir reducir aún más estos valores, sobre todo el valor de la tensión máxima, ya que los otros siempre han estado muy por debajo de los límites establecidos de cálculo. Otra variable a considerar es modificar el espesor de las láminas que integran la sección transversal del modelo.

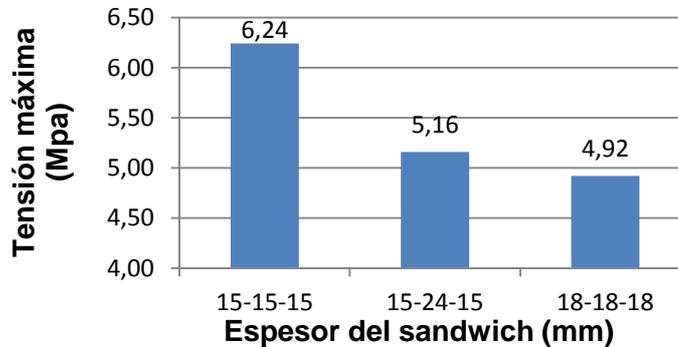
## 4.4 ESPESOR DE LAS LÁMINAS

Determinado una longitud de cálculos 5 m, coacción a la traslación en el lado de la campana y apoyo simple en el macho como los tipos de apoyos, un ángulo del talud de  $73^\circ$  y una relación de la base y lado de 2 / 3; además de considerar el propio peso del canal, la carga hidráulica de 100 l/s y una sobre carga de  $1962 \text{ N/m}^2$  como acciones que soporta el modelo; el siguiente paso será determinar el espesor de las láminas que conforman la sección transversal del modelo.

En este punto, vamos a analizar los resultados obtenidos en relación al espesor que han de tener las láminas que conforman la estructura tipo sándwich para modelizar una canal que cumpla uno de los objetivos planteados en esta Tesis, reducir el peso de la estructura. Partiremos de un espesor mínimo de 15 mm en la capa de GRC considerado como el espesor mínimo que se puede considerar en el proceso de fabricación mediante robot, el espesor de 18 mm se considera para conseguir que las tres láminas tenga un espesor homogéneo.

#### 4.4.1 TENSIÓN

En la siguiente gráfica se recogen los resultados de los tres modelos planteados según las condiciones establecidas y recogidas en el punto anterior.



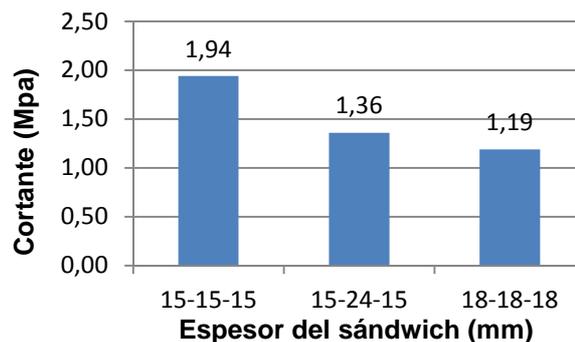
Indicar que en los tres casos estudiados, la tensión máxima que soporta el canal está por debajo del límite de cálculo. Partimos de un espesor mínimo de 15 mm de la lámina de GRC, considerado como el mínimo espesor que se puede considerar para el proceso de fabricación robotizado, e igual espesor para Polietileno Expandido. La tensión máxima se ha reducido un 9 %.

Cuando mantenemos el espesor mínimo de las láminas de GRC pero aumentamos el polietileno expandido hasta conseguir un espesor total de la sección de 54 mm, se reduce a un 75 % del límite de cálculo. Cuando aumentamos ligeramente las tres capas de forma que conseguimos tres laminas de igual espesor hasta conseguir el espesor comercial, logramos reducir un 29 % el límite de cálculo.

Como puede observarse en los resultados, cuando se incrementa el espesor de polietileno se reduce la tensión máxima de forma importante, pero cuando lo que se incrementa es el espesor de las laminas de GRC esta reducción es mayor.

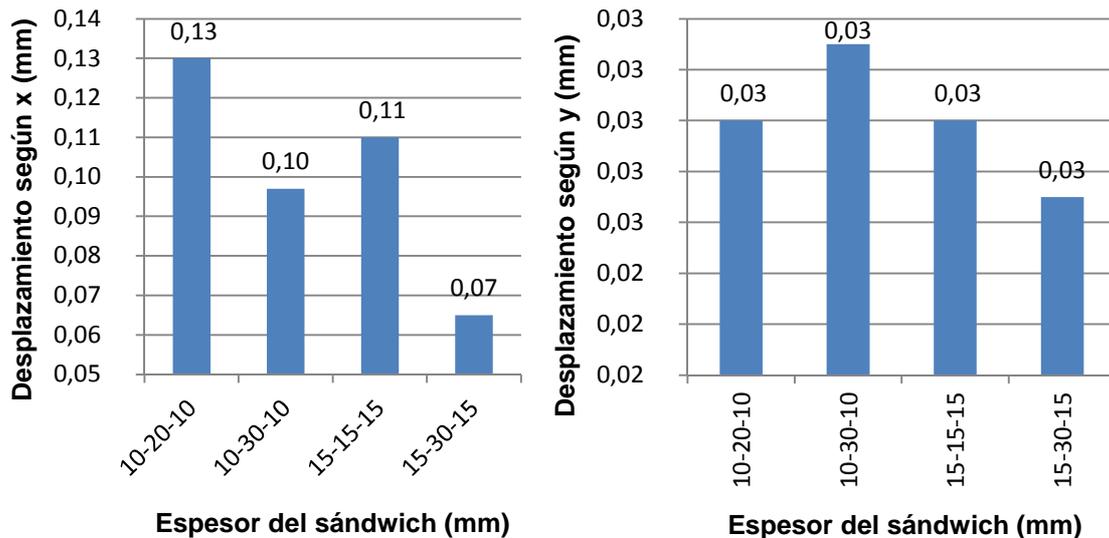
#### 4.4.2 CORTANTE

En la gráfica siguiente se recoge la tensión cortante:



Cuando aumentamos el espesor del Polietileno Expandido se reduce la cortante un 30%, y cuando los espesores de las tres láminas son iguales se reduce más de un 60 % la tensión cortante. Pero como ocurría en el caso de los modelos de 60° su valor sigue estando muy por debajo del límite de cálculo.

#### 4.4.3 DESPLAZAMIENTO



En ninguno de los dos casos, tanto en el desplazamiento según el eje “x” como según el eje “y”, se está por encima del límite de cálculo, un desplazamiento superior al 10 % de las dimensiones de la sección. Incluso, este no llega a superar el 1 % en ninguno de los dos.

#### 4.4.4 COMENTARIO

Como era de esperar, al aumentar el espesor de las láminas se consigue reducir la tensión máxima que sufre el modelo. Hemos de tener en cuenta que en este punto partimos de un espesor de 15 mm en las tres láminas. Considerando un espesor total de 54 mm por tratarse del empleado en los canales que se están empleando en la actualidad, se ha considerado dos opciones, las tres láminas de un espesor homogéneo y considerar el espesor mínimo en las láminas de GRC de 15 mm y 24 mm en la Polietileno Expandido hasta conseguir un espesor total de 54 mm. Como era de esperar al incrementar el espesor de las láminas de GRC se ha conseguido reducir casi un 30 % el límite de cálculo, mientras que al incrementar sólo la lámina de Polietileno Expandido se ha conseguido reducir un 20 %. Considerando el objetivo de reducir el peso del canal, se

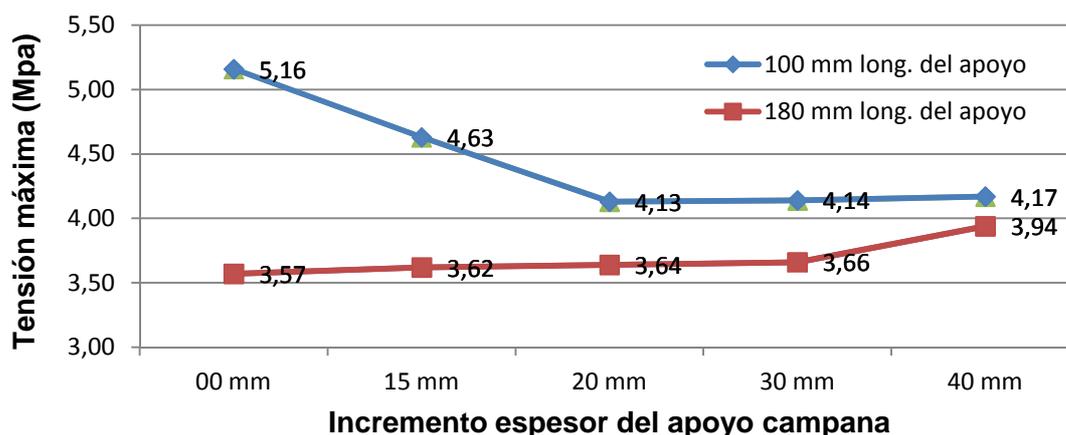
considera el espesor mínimo de GRC de 15 mm como punto de partida para explorar otras variables de cálculo.

## 4.5 CONDICIONES DE COACCIÓN AL MOVIMIENTO EN EL LADO DE LA CAMPANA

Como se planteo en capítulo 2, una de las variables a analizar es el comportamiento del espesor y la longitud del apoyo en la campana. Como se observa en las figuras del capítulo anterior, los apoyos son los puntos más desfavorables de todos los modelos. En el lado del macho, la condición de una superficie laminar del agua homogénea, no se puede modificar su espesor, así mismo la longitud del apoyo está condicionada a la longitud de la campana. Sólo se puede modificar las condiciones de la coacción en el lado de la campana. Por lo que plantearon como variables en el apoyo de la campana incrementar el espesor de la lámina de GRC en los apoyos e incrementar la longitud de los mismos hasta los 180 mm, longitud de la campana.

Se sigue considerando un canal de 5 m de longitud, con un talud de 73°, un pesor de 15 mm en las láminas de GRC y 24 mm la de polietileno expandido y coacciones al desplazamiento en el lado de la campana y apoyos simple en el macho de los modelos.

### 4.5.1 TENSIÓN MÁXIMA



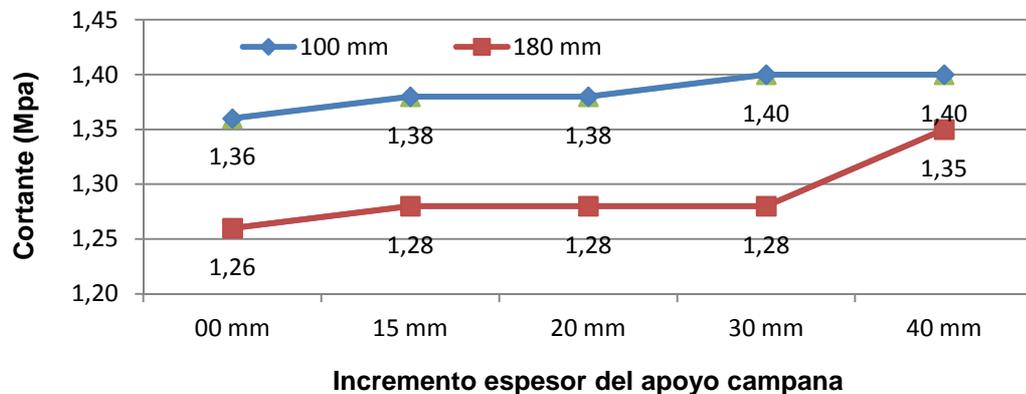
En esta gráfica tenemos dos curvas, una por cada longitud de apoyo, en función del incrementa el espesor de la base de la campana. Como se puede observar, para una longitud de apoyo de 100 mm, a medida que incrementamos el espesor disminuye la tensión máxima, pero con un incremento de 20 mm la tensión vuelve a incrementarse ligeramente.

Caso totalmente contrario ocurre con una longitud de apoyo de 180 mm, longitud total de la campana. El valor más bajo corresponde a un incremento nulo del espesor y a medida que incrementamos este, va aumentando su valor.

Lo destacado en esta gráfica es que simplemente con aumentar hasta 180 mm la longitud del apoyo se consigue reducir más de un 30% la tensión máxima que soporta el canal. Esta tensión esta a un 50 % del límite de cálculo (6,90 Mpa).

## 4.5.2 CORTANTE

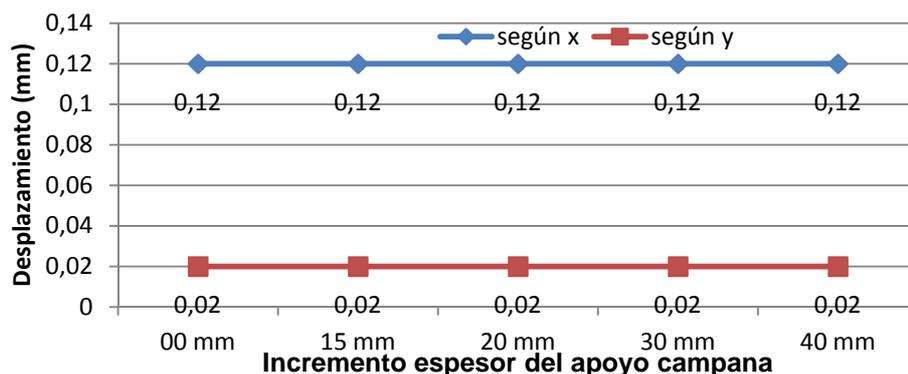
Hasta este punto, la cortante ha estado siempre por debajo del límite de rotura del canal, en este caso sucede lo mismo como se puede observar en la siguiente gráfica:



Son valores que no varían mucho de unos a otros, 0,14 Mpa. Estos valores se encuentran muy por debajo del límite de rotura.

## 4.5.3 DESPLAZAMIENTO

En este modelizado, los desplazamiento según "x" e "y" son iguales, 0,12 mm según el eje "x" y 0,02 mm según el eje "y". Se ha desplazado menos del 0,5 % de las dimensiones de la estructura, muy lejos del 10 % considerado como límite de cálculo.



#### **4.5.4 COMENTARIO**

Considerando los apoyos como los puntos más débiles de los modelos es razonable pensar que variando las condiciones en estas zonas se mejorarían los resultados, como así ha sido. Variando el espesor del apoyo simplemente no se consigue el mejor resultado, es incrementar la longitud del apoyo hasta los 180 mm, longitud que tiene el elemento de la campana cuando se obtiene este. Cuando hemos incrementado la longitud de este apoyos se ha conseguido reducir la tensión máxima, pero cuando se ha incrementa el espesor de ese apoyo se ha producido en el proceso inversos, se ha incrementado esa tensión máxima.

En relación a la utilización de un espesor mayor de las láminas, este resultado ha mejorado considerablemente el obtenido para ese caso. Hemos reducido la tensión un 50 % con relación al límite de cálculo, mientras que en el caso de incrementar los espesores hasta los 18 mm de las tres láminas se ha logrado reducir un 20 %. Si se hubiera considerado un espesor de las tres láminas de 18 mm tal se hubiera reducido la tensión máxima, pero nos alejaríamos de uno de los objetivos planteados de reducir el peso del canal.

En este punto hemos de considerar la opción de colocar refuerzos de tiras de GRC en la lámina de Polietileno Expandido. Esto haría incrementar el peso del canal, pero menos que si se utilizamos un espesor de 18 mm en las láminas.

El siguiente paso es analizar la influencia que tiene estos refuerzos en la tensión máxima que soporta un canal de 5 m de longitud, un talud de  $73^{\circ}$ , coacciones a la translación en el lado de la campana y apoyo simple en el macho, unos espesores de 15 mm de lámina de GRC y 24 mm de Polietileno Expandido.

La cortante y los desplazamientos siguen estando muy por debajo de los límites de cálculo, como ha ocurrido desde el principio en este estudio.

#### **4.6 REFUERZOS**

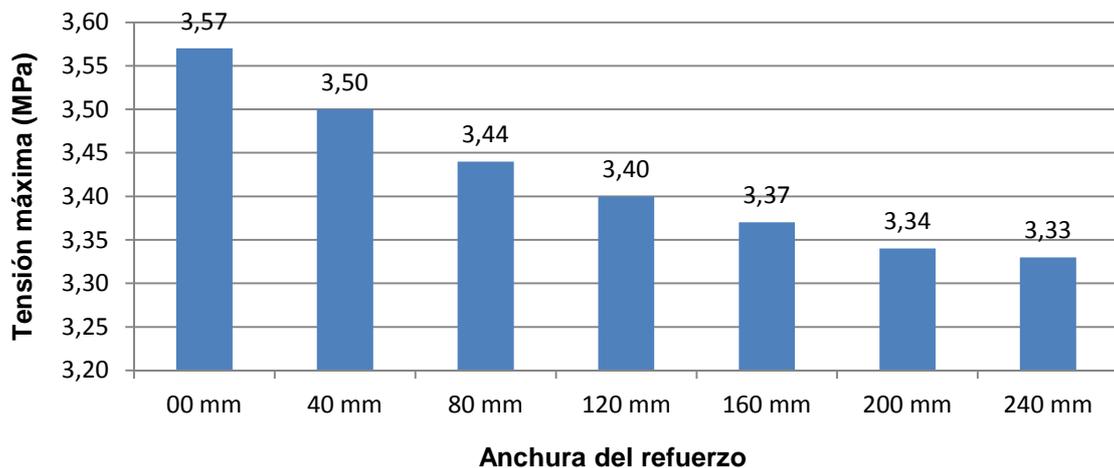
En el capítulo dos de esta Tesis se plantea como variables de cálculo la posibilidad de colocar refuerzos de GRC, tanto longitudinales como transversales, en la lámina de Polietileno Expandido. Esta modelización se planteo de la siguiente forma: se colocaban en primer lugar un solo refuerzo longitudinal en la base del canal de diferentes anchos, a continuación se introducía dos refuerzos, también longitudinales, en cada una de las

esquinas de la base. Posteriormente, se ponían dos refuerzos longitudinales en la base, eliminando los refuerzos de las esquinas. A continuación se colocó uno, dos y tres refuerzos transversales a lo largo de todo el contorno del canal. Por último, se combinaron los refuerzos longitudinales y transversales. Teniendo en cuenta la combinación de modelos que se obtendría, a medida que se llevan a cabo las modelizaciones, en este caso, se han considerado los más adecuados en cada uno.

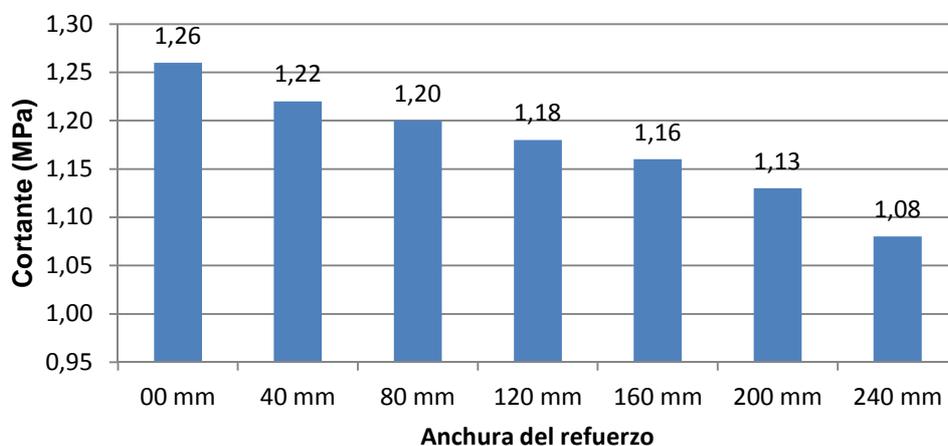
## 4.6.1 REFUERZOS LONGITUDINALES EN LA BASE

### 4.6.1.1 Un refuerzo longitudinal en la base

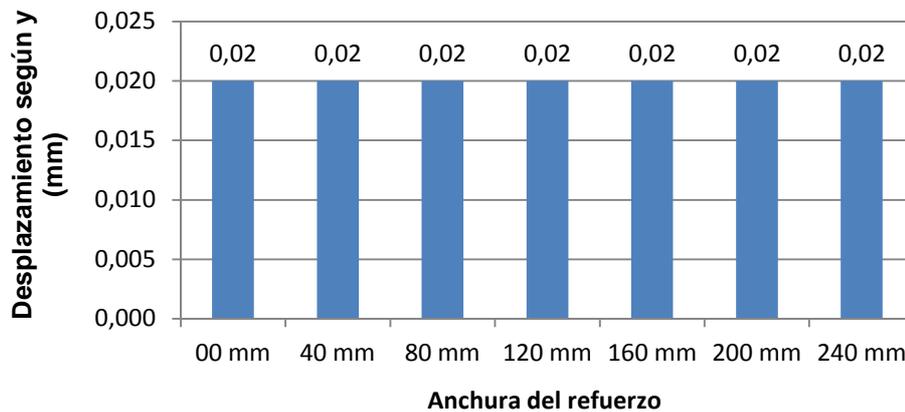
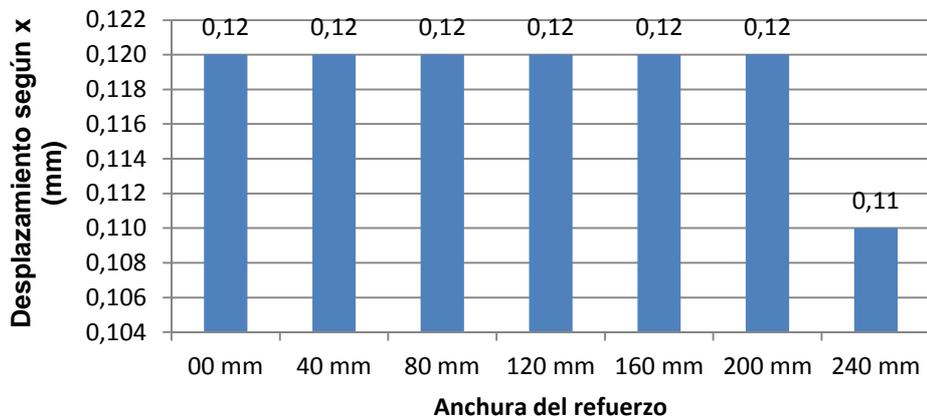
Como se muestra en la gráfica siguiente, a medida que incrementamos el ancho del refuerzo se va reduciendo la tensión máxima, en un 5 %. Para conseguir esta reducción de la tensión hemos tenido que colocar un refuerzo longitudinal en toda la base del canal.



Como ha sucedido hasta ahora, la cortante y los desplazamientos siguen siendo muy bajos.



Como se observa en la gráfica, el valor de la cortante disminuye a medida que se incrementa la anchura del refuerzo, muy por debajo del límite de cálculo.

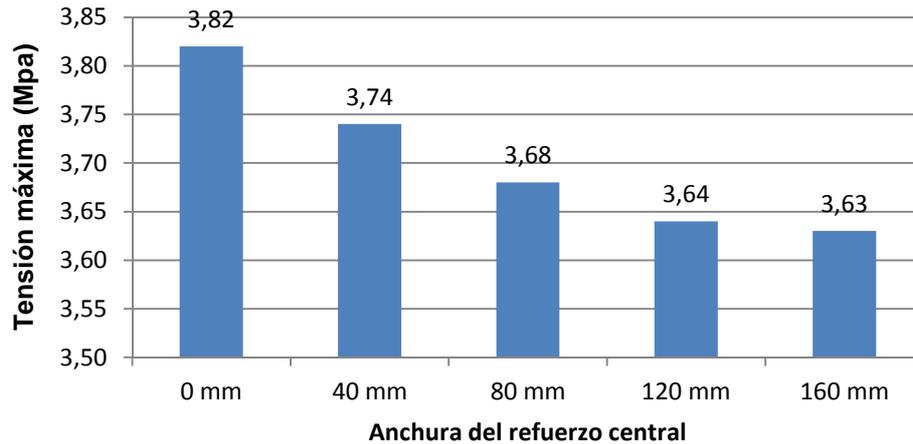


Los desplazamiento según los dos ejes "x" e "y" están muy por debajo de los 4,5 mm considerado máximo desplazamiento, a un 2 % del límite de cálculo.

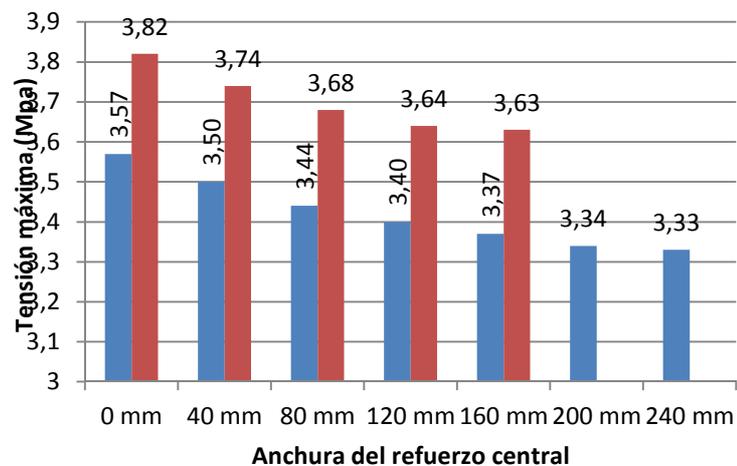
La cortante y el desplazamiento son valores que siempre han estado por debajo del límite de cálculo por lo que a partir de este punto solo haremos referencia a estos puntos cuando existe alguna variación importante en los mismos.

#### 4.6.1.2 Un refuerzo longitudinal en la base y en las esquinas

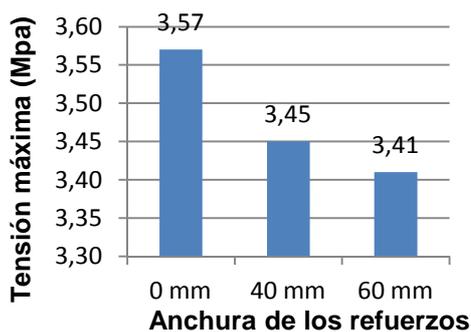
Al igual que sucedía con la colocación de un refuerzo longitudinal en la base del canal, si colocamos dos más, también longitudinales, en las esquinas de la base se consigue reducir un 5 % la tensión máxima. No nos olvidemos que está por debajo de límite de cálculo. En este caso no podemos sobrepasar los 160 mm de ancho del refuerzo longitudinal central porque el polietileno expandido quedaría eliminado en la base del modelo.



La colocación de refuerzos longitudinales en las esquinas de la base no es una opción favorable porque incrementa de un 4 a un 5 % la tensión que soporta la zona de apoyo del la campana, considerando el mismo ancho del refuerzo en el centro de la base. Como se puede observar en la gráfica siguiente donde se recoge los datos de los modelos con refuerzo central y aquellos modelos que además de tener refuerzo central tienen un refuerzo en las esquinas.



#### 4.6.1.3 Dos refuerzos longitudinales en la base



Sustituimos el refuerzo longitudinal de la base por dos refuerzos colocados de forma equidistante en la base del canal. Limitados la anchura de los refuerzos a 40 y 60 mm para no eliminar el Polietileno Expandido de la base.

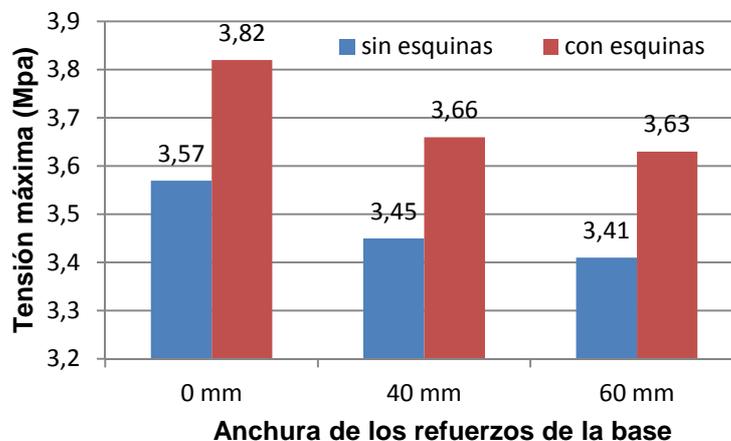
En esta gráfica se ha incluido la tensión del modelo sin refuerzo. Como se puede observar, la tensión disminuye en los dos supuestos que se habían planteado. Comparativamente, al introducir dos refuerzos longitudinales en la base de 40 mm se ha mejorado un 1 % en relación al no tener ningún refuerzo. Con los refuerzos de 60 mm se mejora un 1 % al modelo anterior y 2 % al de referencia.

En relación a la utilización de uno o dos refuerzos longitudinales en la base, observando la gráficas del punto 4.5.1.1. se puede determinar que está muy parejos porque si consideramos en el caso de los refuerzos la anchura total de los mismos y lo comparamos con los que tienen un solo refuerzo, son prácticamente iguales.

#### 4.6.1.4 Dos refuerzos longitudinales en la base y en las esquina

Como ha sucedido en el supuesto de colocar un refuerzo central y uno en cada esquina de la base del canal, no se mejora los resultados obtenidos, son más desfavorables. Teniendo en cuenta que no están lejos del límite de cálculo establecido para este tipo de materiales.

En la siguiente gráfica se puede observar los resultados obtenidos.

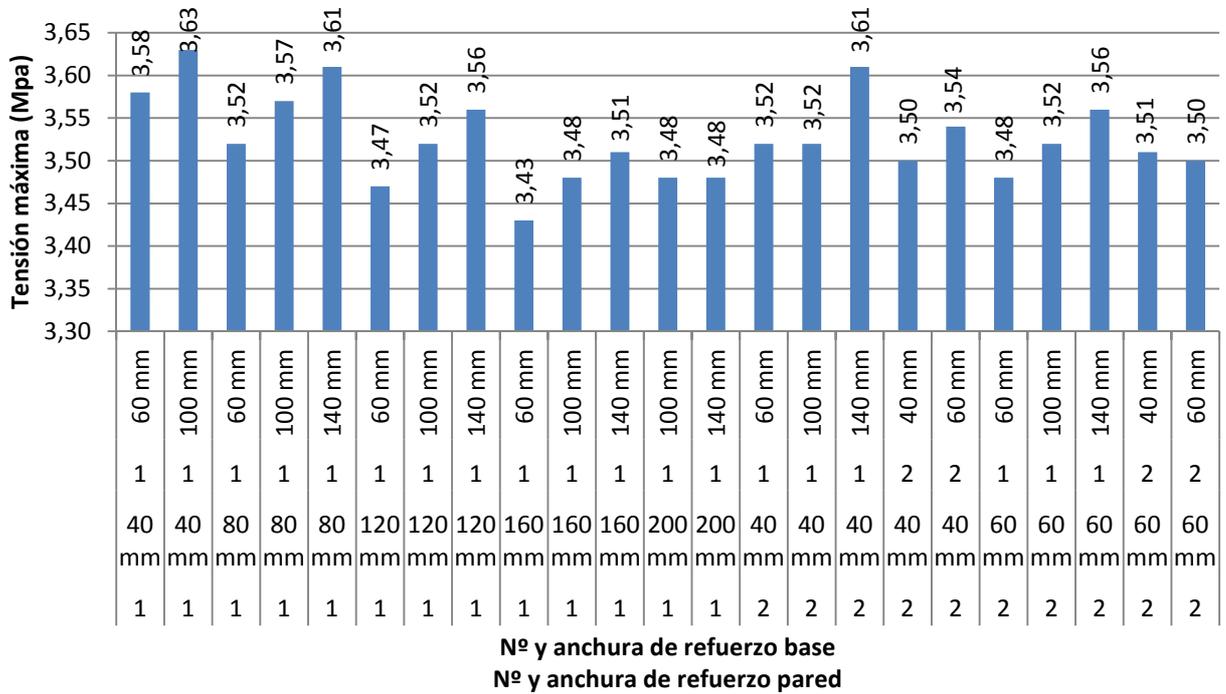


La colocación de los refuerzos en las dos esquinas no mejoran los resultados, al igual que sucedía con el refuerzo central en la base y las esquinas, sino que los empeoran de un porcentaje de 3 % en cada uno de los anchos considerado.

#### 4.6.2 REFUERZO LONGITUDINAL EN LA BASE Y PAREDES DEL CANAL

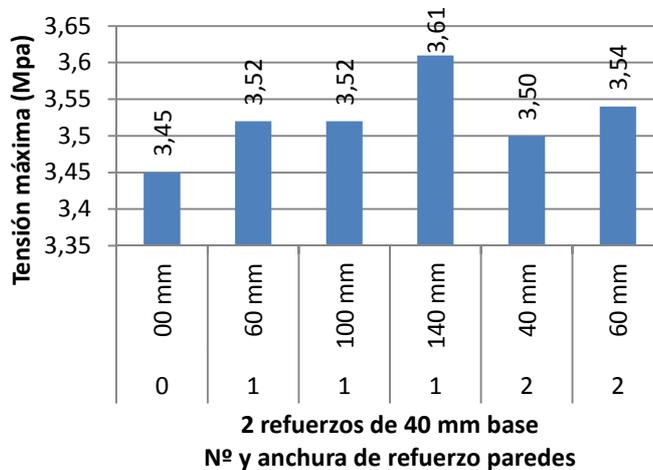
En este punto vamos a considerar los refuerzos laterales que se han supuestos en la base del canal y añadir unos refuerzos laterales en las paredes laterales del canal. No se va a considerar colocar refuerzos longitudinales en las esquinas porque se ha probado

su ineficiencia. En el caso de las paredes del canal vamos a considerar colocar un solo refuerzo en el centro de la pared de 60, 110 y 140 mm de anchura y colocar dos refuerzos de 40 y 60 mm. En la siguiente gráfica se recogen los resultados:



La colocación de refuerzos longitudinales en las paredes no mejoran los resultados. Teniendo en cuenta que las máximas tensión se producen en la zona de los apoyos, la colocación de refuerzos longitudinales en las paredes apenas tiene influencia en dicha zona.

Si analizamos, concretamente, dos refuerzos longitudinales en la base de 40 mm y uno y dos refuerzos longitudinales en las paredes.

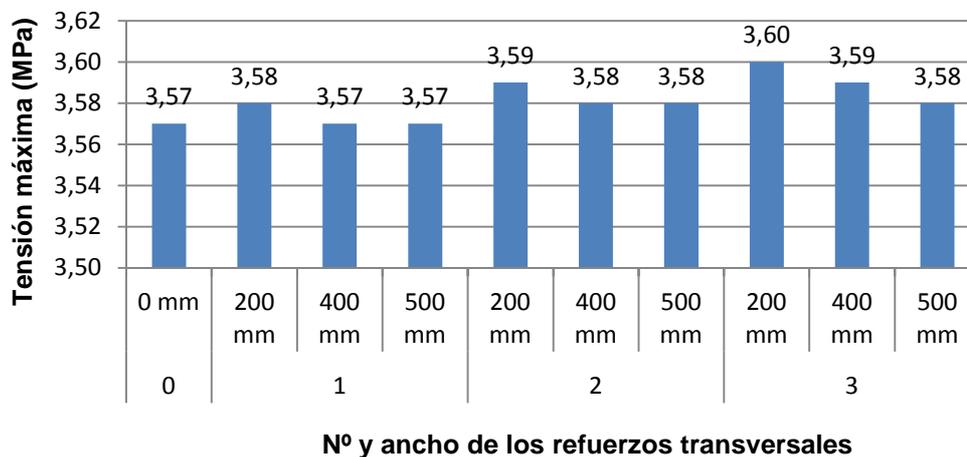


En la gráfica se puede observar que la colocación de refuerzos longitudinales en las paredes del canal no mejora el modelo, sino que incrementan la tensión en un 1 %.

El colocar refuerzos longitudinales en las paredes sería para reforzar el canal ante posibles golpes laterales más que reducir las tensiones y desplazamientos. Se colocaría un refuerzo longitudinal de 60 mm.

#### 4.6.3 REFUERZOS TRANSVERSALES EN EL CONTORNO DEL CANAL

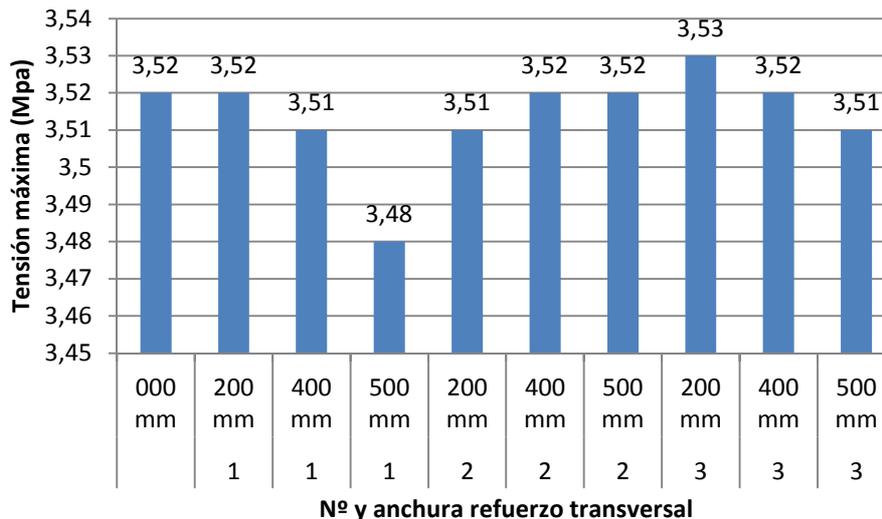
Se han considerado tres supuestos, un solo refuerzo en el punto medio y dos y tres refuerzos equidistantes a lo largo del canal. También se ha tenido en cuenta la anchura de estos refuerzos, para ello se han utilizado tres medidas, 200, 400 y 500 mm. Todo ello se recoge en la siguiente gráfica:



La primera columna refleja la tensión máxima para un canal de 5 m de longitud, 73° de talud, un espesor de láminas de 15 mm de GRC, 24 mm de polietileno expandido y 15 mm de GRC, sin ningún tipo refuerzo. Considerando coacción al movimiento en la campana y apoyo simple en el macho del canal y como acciones que actúan sobre el modelo el propio peso de la estructura, el agua con una profundidad de 400 mm y la sobrecarga en las hombreras de 1962 N/m<sup>2</sup>. Salvo para un refuerzo transversal de 400 y 500 mm que su valor es igual al modelo que no tiene refuerzo, todos los demás modelos están ligeramente por encima, unas decimas de Mpa. Por lo que se puede concluir que no tienen apenas influencia en el resultado final.

#### 4.6.4 UTILIZACIÓN DE REFUERZOS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

Se delimitará el número de combinaciones que se podrían establecer a modelos con dos refuerzos longitudinales de 40 mm en la base, uno de 60 mm en la pared y uno, dos y tres refuerzos transversales de 200 mm, 400 mm y 500 mm. En la gráfica siguiente analizaremos el comportamiento de los modelos.



La tensión máxima se reduce en el caso de colocar dos refuerzos en la base de 40 mm, uno de 60 mm en la pared y uno transversal de 500 mm. En comparación con el modelo de referencia que no tiene refuerzo transversal se reduce la tensión máxima 1%. Colocar un refuerzo transversal de 500 mm supone incrementar el peso de la pieza.

#### 4.6.5 COMENTARIO

A un canal de 5 m de longitud, coaccionado a la translación en el lado de la campana y apoyo simple en el lado del macho, un talud de 73° de inclinación, un espesor de 15 mm en las dos láminas de GRC y 24 mm en la Polietileno Expandido, una longitud de apoyo de 180 mm en el lado de la campana y 100 mm en el del macho, sin necesidad de incrementar el espesor del apoyo cumpliría las condiciones establecidas para el límite de cálculo de las tensiones máxima, cortante y desplazamiento. La colocación de dos refuerzos longitudinales en las base de 40 mm y uno de 60 mm en la pared y dos transversales equidistantes a lo largo del canal, de 200 mm no sería necesario para mejorar los resultados, pero si se colocan es con el objetivo de reforzar la estructura

modelizada ante situaciones como golpes puntuales que puede sufrir por aperos de trabajado y otras situaciones de uso.

#### 4.7 MODELO A VERIFICAR

Las características del modelo **L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RB40-RP60-2RT20** se recogen en la siguiente tabla:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Tipo de coacciones en los apoyos:	
Lado de la campana	Txyz
Lado del macho	Ty
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x200 mm

Los datos de este modelo **L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RB40-RP60-2RT20** son los siguientes:

L5-73-15-24-15-08- Lo18-2RB40- RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{m\acute{a}x.}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
	3,51	-9,12	1,18	0,52	0,11	0,02	0,15

Uno de los objetivos que se planteaba al comienzo de esta Tesis era reducir el peso de los canales de riego fabricados con hormigón armado, los más de 1000 kg que puede llegar a pesar un canal de 100 l / s y 5 m de longitud. La introducción de láminas de Polietileno Expandido permite reducir este peso.

El empleo de materiales compuestos ha supuesto un avance en nuevos materiales. Se está planteando emplear dos tipos de materiales compuestos. Por una parte estamos utilizando hormigón reforzado con fibra de vidrio, así como un material compuesto estructural al emplear una sección tipo sándwich utilizando dos láminas de hormigón reforzado con fibra de vidrio y una lámina de Polietileno Expandido.

A medida que nos acercamos a una sección comercial, es decir, un espesor total de la sección de 54 mm y un talud de  $73^\circ$  se ha ido reduciendo la tensión máxima que sufrían los modelos. En un principio, determinamos el tipo de apoyo que era más desfavorable para los cálculos, determinándose que la coacción a la traslación en el lado de la campana y un apoyo simple en el macho de la misma cumplían esta condición, así mismo el apoyo de la campana debería ser toda la longitud de la misma. Posteriormente determinamos que el ángulo de los taludes del canal así como la relación entre la base y el lado mojado del mismo tenían que ser los utilizados en los canales comerciales, un talud de  $73^\circ$  y una relación aproximada entre la base y el lado de  $2/3$ .

En el punto de determinar el espesor que debían tener las tres láminas, observamos que considerando un espesor mínimo en las láminas de GRC de 15 mm, espesor considerado como mínimo que se puede considerar en un proceso de fabricación mecanizado empleando robot, reducíamos las tensiones bastante. Claro está, considerando un espesor del Polietileno Expandido de 24 mm para conseguir que el espesor final del canal fuera el que tiene los canales normalizados que se emplean en la actualidad.

La colocación de refuerzos hacía pensar que se iba a mejora bastante los resultados, pero resulta que empeoraban si colocamos refuerzos longitudinales en los vértices de la sección semitrapezoidal, o mejoraban un poco si la anchura de los refuerzos longitudinales era del 90 % de la base. La colocación de refuerzos longitudinales en las paredes no mejoraba los resultados, así como la colocación de refuerzos transversales a lo largo del cuerpo del canal. El considerar dos refuerzos longitudinales en la base del modelo y uno en la pared, así como tres transversales es por el hecho de poder soportar mejor las acciones de cargas puntuales, como podría ser el impacto de aperos de labor.

En todo momento, la cortante y los desplazamientos se han encontrado dentro de los límites de cálculo establecidos. Por ello no se han tenido muy en cuenta en el desarrollo de los cálculos. La colocación de los refuerzos puede hacer pensar que tienen como fin reducir los desplazamientos, apenas ha tenido influencia en los resultados de los mismos.

En este punto, queda por plantear una serie de cuestiones.Cuál sería el comportamiento en condiciones normales y puntuales de trabajo. Condiciones normales, hasta ahora se a considerado el canal aislado, pero en sus condiciones de trabajo se coloca el macho del canal anterior apoyado en la campana de contiguo. Que los apoyos no solo se limiten a unas zonas de la campana y el macho, sino que puede estar apoyada toda la base del modelo en el suelo. Someter al modelo a una situación límite de trabajo cuando se produce una situación de desbordamiento, etc. Interrogantes que trataremos de resolver en el siguiente capítulo.

## **5 VERIFICACION DEL MODELO**

Índice

<b>5</b>	<b>VERIFICACION DEL MODELO .....</b>	<b>1</b>
5.1	TRES CANALES .....	4
5.2	APOYO .....	9
5.3	DESBORDAMIENTO DEL CANAL .....	13
5.4	CARGAS PUNTUALES.....	18
5.4.1	<i>Carga puntual en hombreras</i> .....	18
5.4.2	<i>Carga lateral</i> .....	27
5.5	SOBRE CARGA EN LAS HOMBREAS .....	35

En este punto vamos a someter a una serie de pruebas al modelo **L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RB40-RP60-2RT20** cuyas características generales se indican a continuación:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC
	24 mm de PE
	15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x200 mm

Con estas pruebas lo que se pretende es verificar el comportamiento del modelo ante situaciones desfavorables que intentan modelizar situaciones de trabajo del canal. En todo momento hemos considerado un canal aislado, pero como es sabido, las conducciones abiertas están formadas por numerosos canales. Para ello vamos a modelizar una conducción formada por 3 canales, donde nuestro intereses se centra en el canal que ocupa la posición central de la estructura modelizada. En este punto, analizaremos distintas situaciones:

- Conjunto de cargas y coacciones consideradas hasta este momento
- Canal apoyado en toda su longitud sobre el terreno,
- Una situación de desbordamiento del canal,
- Una fuerza puntual de 1471 N ( $\approx$  150 Kg) según establece las Normas UNE para la "Determinación de la resistencia a carga estática" (artículo 8.3 de la 53-302-76 y 6.1 de la 53-342-78) para cargas puntuales y una carga lateral a modo de golpe lateral. En el primer caso, como indica la cita norma se tendrá en consideración la conducción llena de agua y la carga sobre las hombreras y en el segundo caso, no se tendrá en cuenta la presión hidrostática por tratarse en las situaciones más desfavorables.

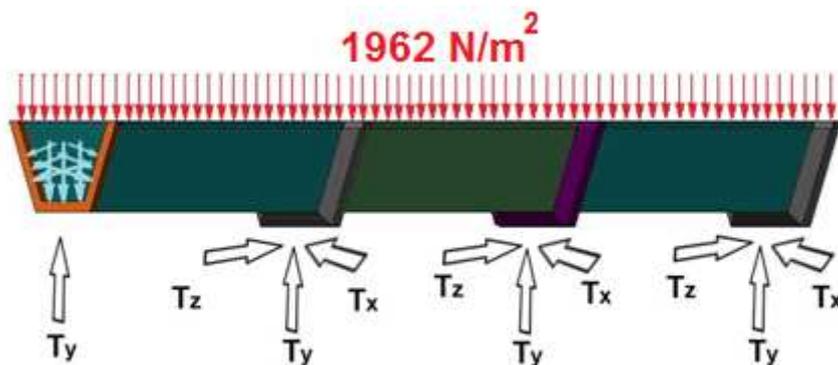
## 5.1 TRES CANALES

Vamos a modelizar una estructura constituida por tres canales con las siguientes características:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Longitud del modelo	15,00 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Longitud de apoyo	
Lado campana	180 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x 200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana de los tres canales se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

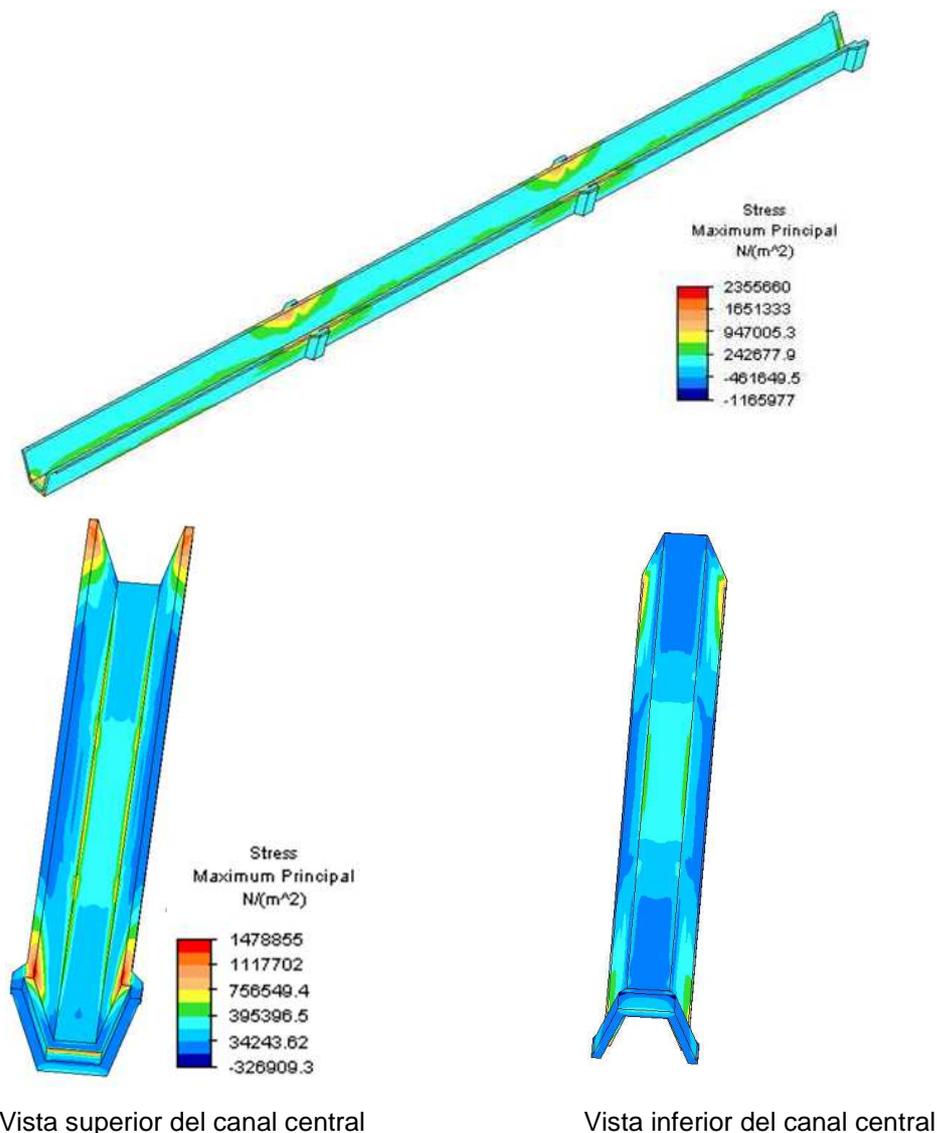


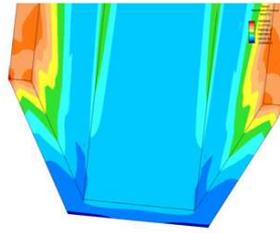
Los resultados obtenidos para los tres canales se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15- Lo18-2RB60-RP60- 2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Tres canales	1,48	-2,16	0,24	0,21	0,11	0,00	0,03
Canal aislado	3,51	-9,12	1,18	0,52	0,11	0,00	0,15

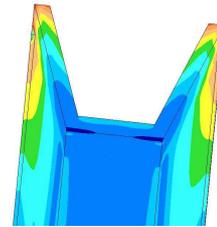
Si recordamos, la tensión máxima que sufría al canal cuando se consideraba aislado era de 3,51 Mpa. Se ha reducido en más de un 50 % la tensión máxima que soporta el canal y se encuentra en el 21 % del límite de cálculo (6,9 Mpa) que se había establecido en este estudio. La tensión mínima y cortante también se han reducido. Los desplazamientos se han reducido y siguen están por debajo del 1 %, lejos del 10 % establecido como límite de cálculo (5,4 mm).

A continuación, los resultados se resumen en las siguientes imágenes:

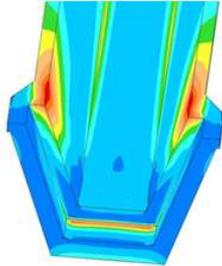




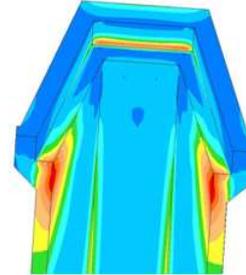
Detalle parte superior del macho



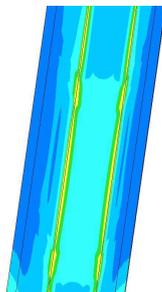
Detalle parte inferior del macho



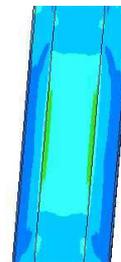
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



Detalle parte superior del cuerpo del canal

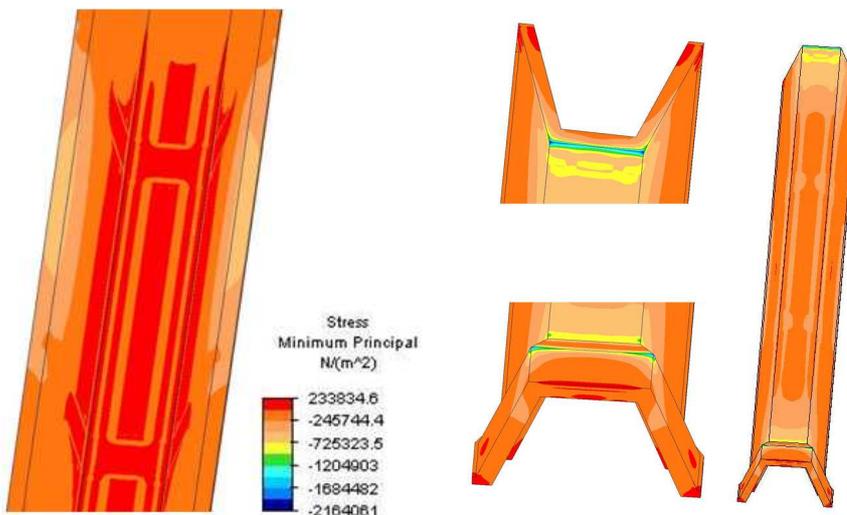


Detalle parte inferior del cuerpo del canal

Tensión máxima

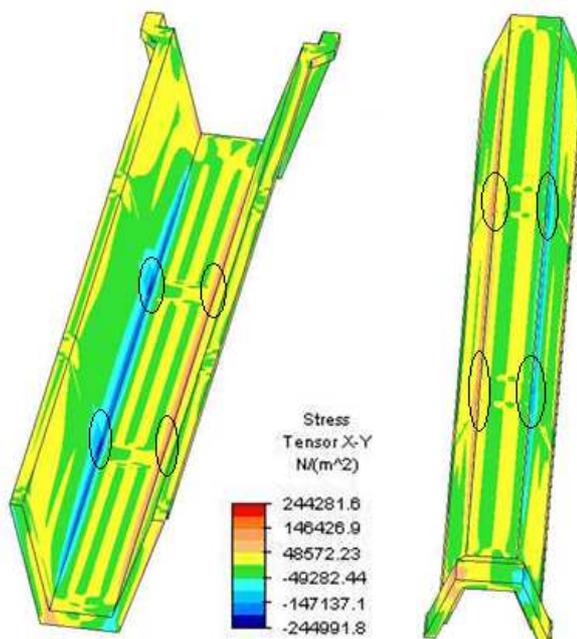
Como podemos observar en los resultados que hemos obtenido y compararlos con los resultados cuando consideramos un canal aislado, se han reducido a la mitad. Dichas tensiones se localizaban en los bordes exteriores de los apoyos del canal, lado campana. Este valor hace pensar que la tensión sufrida en este punto es debida al macho del canal contiguo. En los bordes superiores del lado del macho la tensión es menor, 1,11 Mpa.

En los bordes centrales es donde se localiza las menores tensiones. En cambio en la base del canal, se puede distinguir los refuerzos transversales porque se diferencian tres zonas claramente. La zona central es la que sufre una mayor tensión que las zonas exteriores. Al igual que la tensión que soporta las aristas del canal, mayores que la base y las paredes debido al empuje del agua sobre la superficie del canal, como era de esperar.



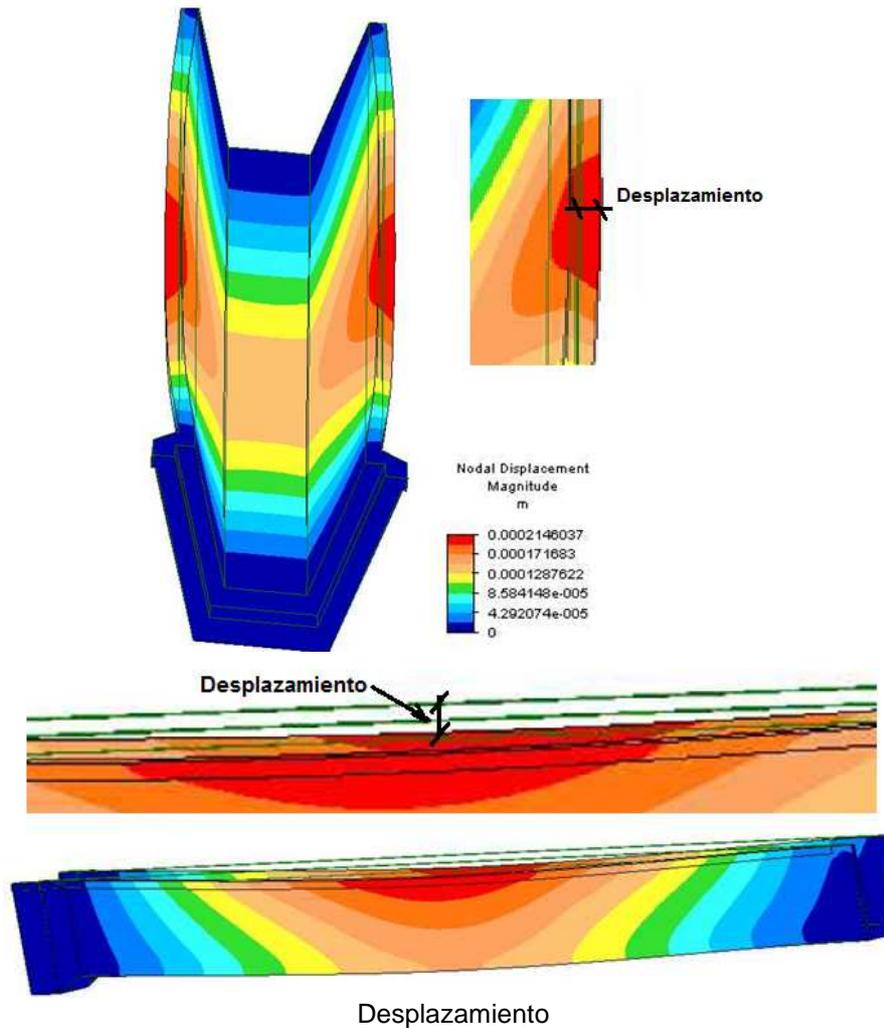
Tensión mínima

Se puede determinar los refuerzos que le hemos colocado al canal en la parte superior de la base. Las tensiones mínimas son zonas más claras. En los apoyos es donde se dan los valores más desfavorables. En el lado de la campana, se da en el borde interior del apoyo debido, probablemente, al pandeo del canal. En lado del macho se produce en el borde exterior del apoyo debido al apoyo con la campana del canal contiguo.



Tensión cortante

Al igual que ocurría con las tensiones mínimas, se puede determinar la ubicación de los refuerzos longitudinales y transversales colocados en el canal. Estos valores máximos se localizan en las aristas de la sección, en el cuerpo del canal, debido al empuje que puede llegar a producir el agua sobre las paredes del mismo que intentan abrir las paredes.



Los desplazamiento se localizan en los bordes de la sección, concretamente en el centro del cuerpo del canal. Como cabría esperar, el empuje del agua en las paredes y base del canal produciría un pandeo que sería mayor en los bordes superior de la paredes por tratarse de una zona con menos refuerzos. Las paredes se abren en el centro y la base sufre un ligero pandeo como puede observarse en las imágenes, con un factor de escala de 1, que nos permite percibir el desplazamiento más claramente. Pero siempre dentro del límite de los 54 mm máximo de desplazamiento que se consideraría como admisible.

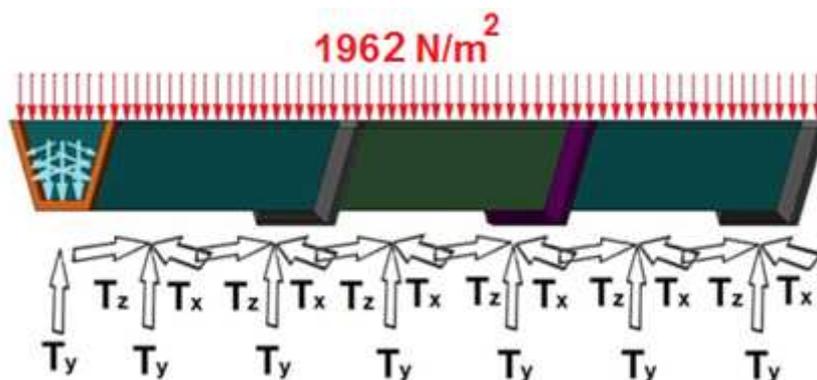
## 5.2 APOYO

Hasta ahora hemos considerado el modelo apoyado en los extremos, pero una situación habitual es encontrarlo apoyado a lo largo de toda la base del canal. Esta situación sería favorable, es decir, cabe esperar que los valores máximos se reduzcan. Las características de modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Longitud del modelo	15,00 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x 200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

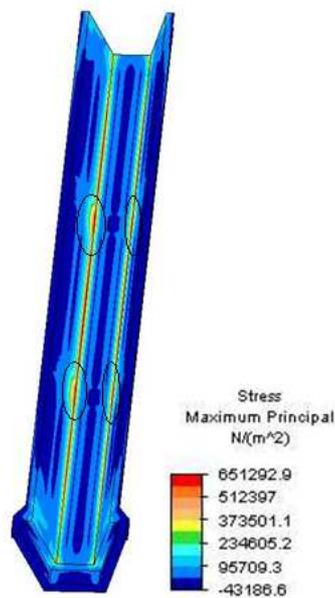
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup>, uniformemente repartida sobre las hombreras.
- Coacciones en los apoyos, a lo largo del canal se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.



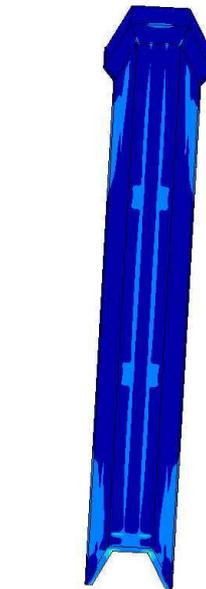
Los resultados obtenidos para los tres canales se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60- RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Apoyos puntuales	1,48	-2,16	0,24	0,21	0,11	0,00	0,03
Toda la superficie de apoyo	0,65	-0,74	0,20	0,07	0,06	0,00	0,00

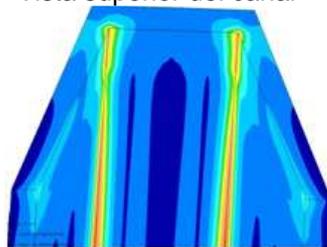
Como se indico anteriormente, los resultados han mejorado, se ha reducido hasta un 50% en el caso de la tensión máxima si lo comparamos con los dos apoyos en los extremos y está por debajo del 10 % del límite de cálculo (6,9 Mpa). Los resultados se resumen en las siguientes imágenes.



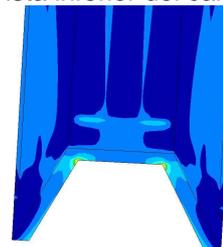
Vista superior del canal



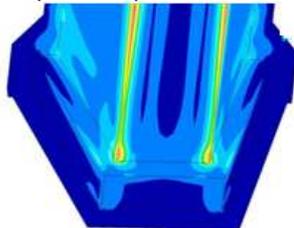
Vista inferior del canal



Detalle parte superior del macho



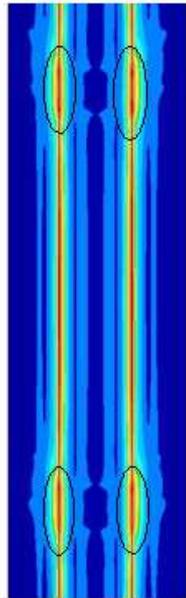
Detalle parte inferior del macho



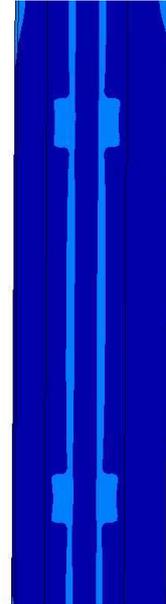
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



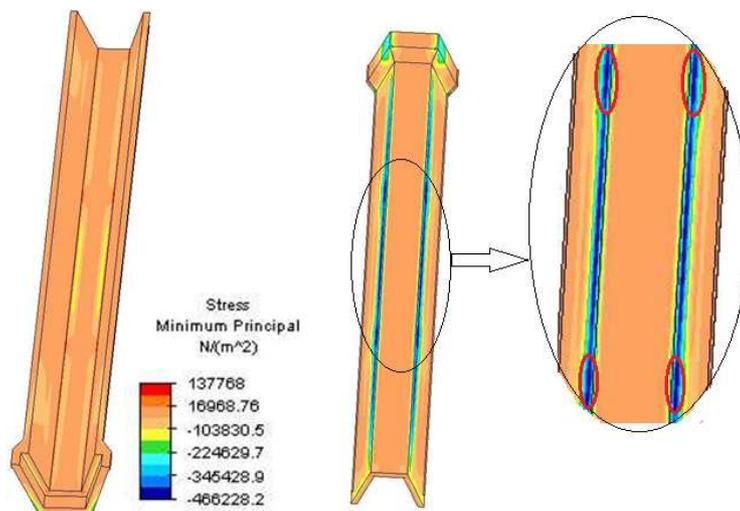
Detalle parte superior del cuerpo canal



Detalle parte inferior del cuerpo canal

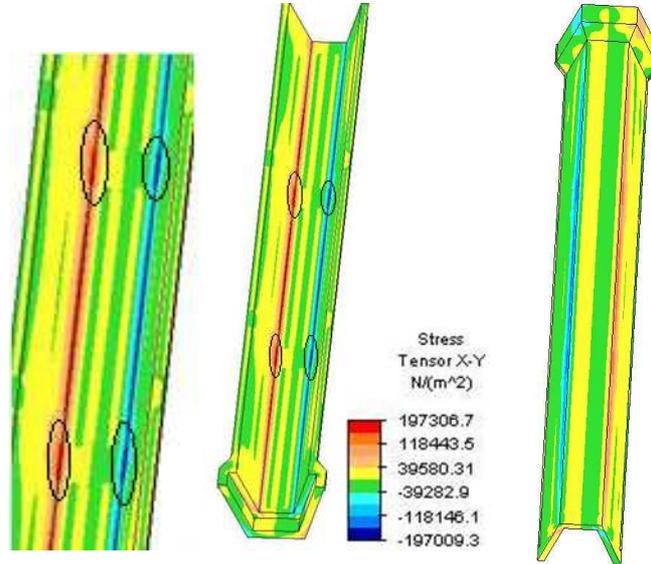
Tensión máxima

Según se puede observar en las imágenes, las máximas tensión se ha trasladado a las aristas de trapecio. Teniendo en cuenta que el único movimiento que se puede producir es el desplazamiento lateral de las paredes del canal y que la base del mismo se encuentra coaccionada a la traslación en los tres ejes, es donde se produce la máxima tensión, pero representa el 10 % de la establecida como límite de cálculo (6,9 Mpa). Se puede observa la ubicación de los refuerzos transversales, así como los longitudinales en la base del canal. Es en la intersección de la arista con los refuerzos transversales donde más intenso es el color rojo (0,65 Mpa) que indica la máxima tensión. Las paredes sufren una tensión de 0,4 Mpa que no representa el 0,5 % de la máxima tensión de cálculo (6,9 Mpa). La campana soporta la mitad de la tensión que soporta el macho, que es de 0,96 Mpa.



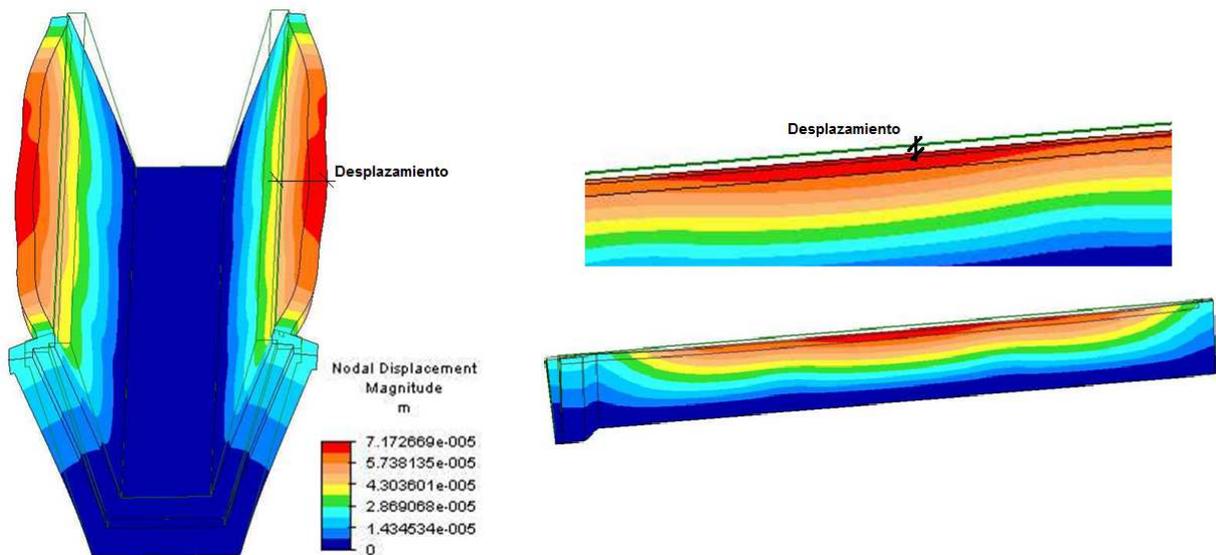
Tensión mínima

En la imagen de la derecha se puede observar que la tensión mínima que soporta el canal se encuentra localizada en la arista inferior del canal y más concretamente en la zona donde se encuentran los refuerzos transversales que se han colocado al modelo. Pero con valores muy pequeños.



Tensión cortante

Según se observa, en los resultados existe una simetría entre los lados del canal. También se puede ubicar perfectamente los refuerzos, tanto transversales como longitudinales en la base del canal. La máxima tensión cortante se produce en las aristas del trapecio y más intenso es el color rojo y azul, valores máximos de 0,19 Mpa, en la zona de los refuerzos transversales.



Desplazamiento

El desplazamiento según el eje “x” es mayor que el desplazamiento según el eje “y” como puede observarse en las dos imágenes. Como cabe esperar, la base del canal no sufre pandeo al estar apoyada toda la base en el suelo. Las paredes sufren desplazamiento según el eje “x” e “y”, debido al empuje del agua. El mayor desplazamiento, el pandeo se produce en el borde superior, mientras que en la arista que une la base con la pared, este desplazamiento es cero.

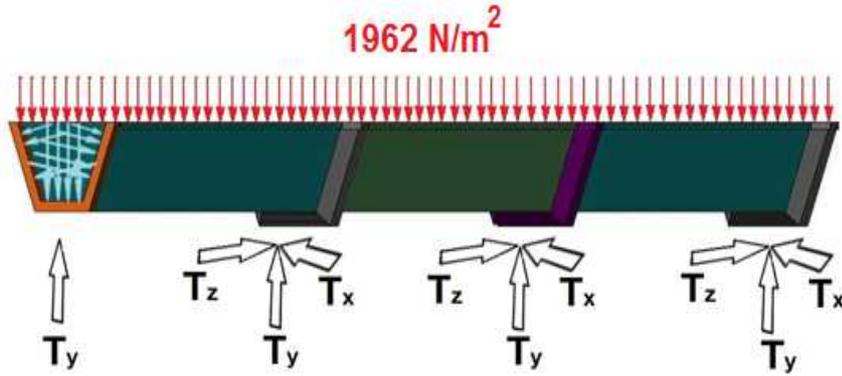
### 5.3 DESBORDAMIENTO DEL CANAL

Vamos a modelizar una estructura constituida por tres canales que sufren un desbordamiento hecho habitual en el uso de este tipo de conducciones, con las siguientes características:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Longitud del modelo	15,00 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC
	24 mm de PE
	15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Longitud de apoyo	
Lado campana	180 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

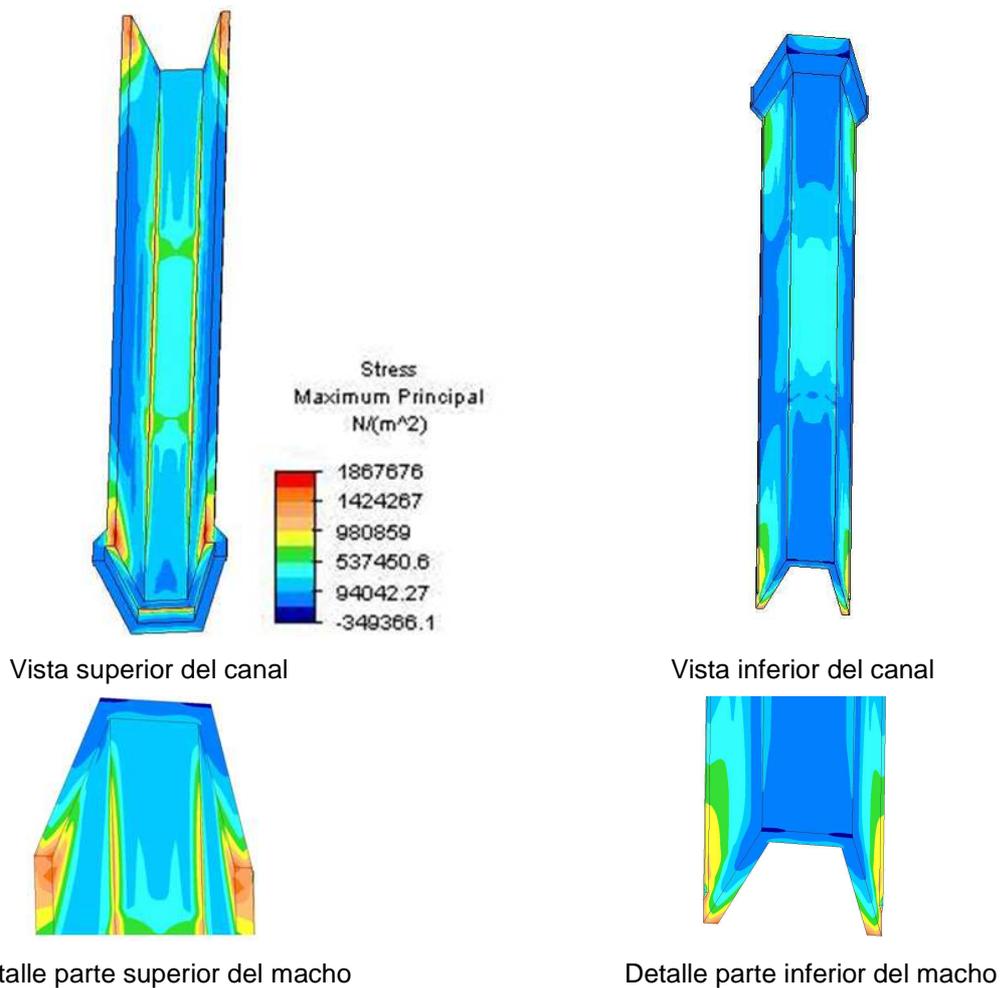
- Coacciones en los apoyos, en la campana de los tres canales se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,50 m de altura.
- Cagar de 1962 N /m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.

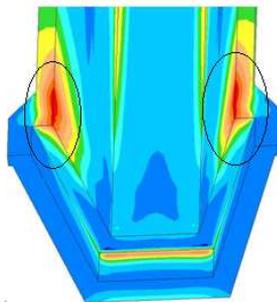


Los resultados obtenidos para los tres canales se resumen en la siguiente tabla:

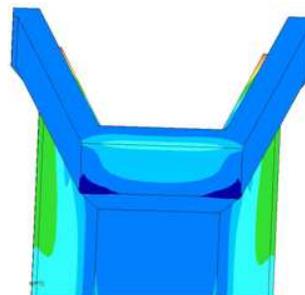
L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60-RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Altura agua 400 mm	1,48	-2,16	0,24	0,21	0,11	0,00	0,00
Altura agua 500 mm	1,87	-2,41	0,35	0,31	0,19	0,00	0,00

Cuando se produce un desbordamiento del canal, los resultados empeoran, como cabría esperar, pero siguen estando en todos los casos dentro de los límites de cálculo establecidos. Los resultados se resumen en las siguientes imágenes:

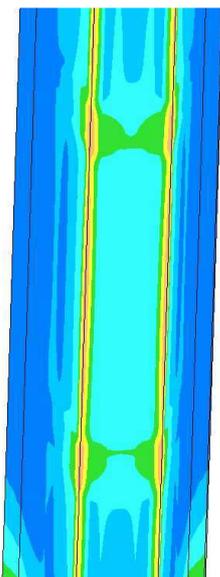




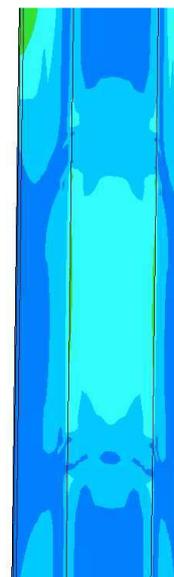
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



Detalle parte superior del cuerpo del canal

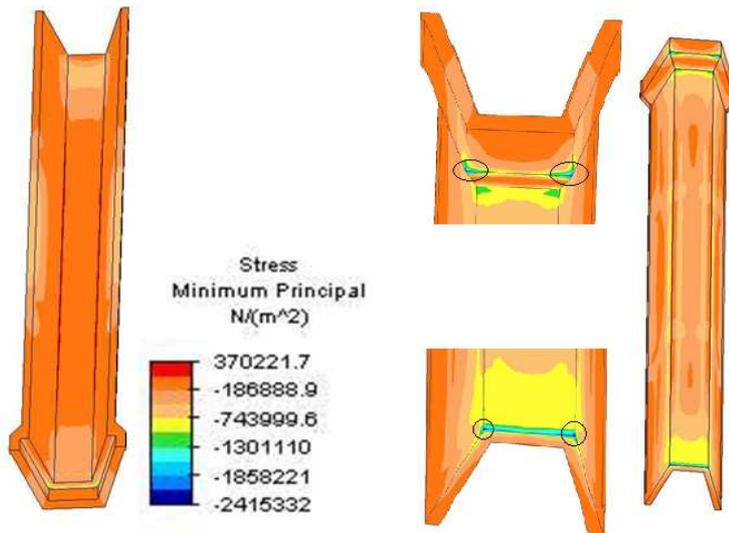


Detalle parte inferior del cuerpo del canal

Tensión máxima

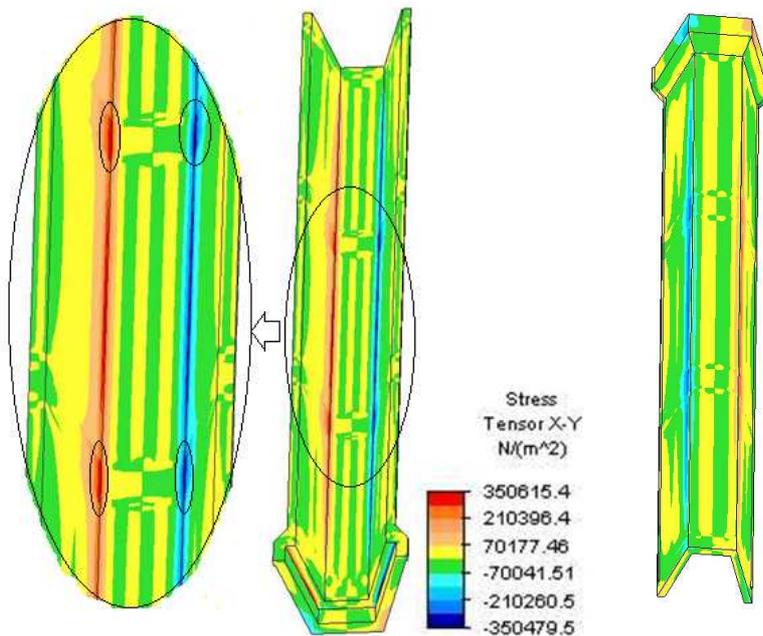
Los resultados que se observan en las imágenes, son parecidos a los que se vieron en el caso del canal con resguardo. La tensión máxima se localiza en el borde superior del canal, en el lado de la campana. Hace suponer que esta tensión se produce por la acción del canal contiguo.

Así mismo, en los bordes centrales es donde se localiza las menores tensiones. En cambio en la base del canal, se puede distinguir los refuerzos transversales que permite diferenciar tres zonas. La zona central sufre menor tensión que las zonas exteriores. Al igual que la tensión que soporta las aristas del canal son mayores que en la base y las paredes debido al empuje del agua sobre la superficie del canal, como era de esperar.



Tensión mínima

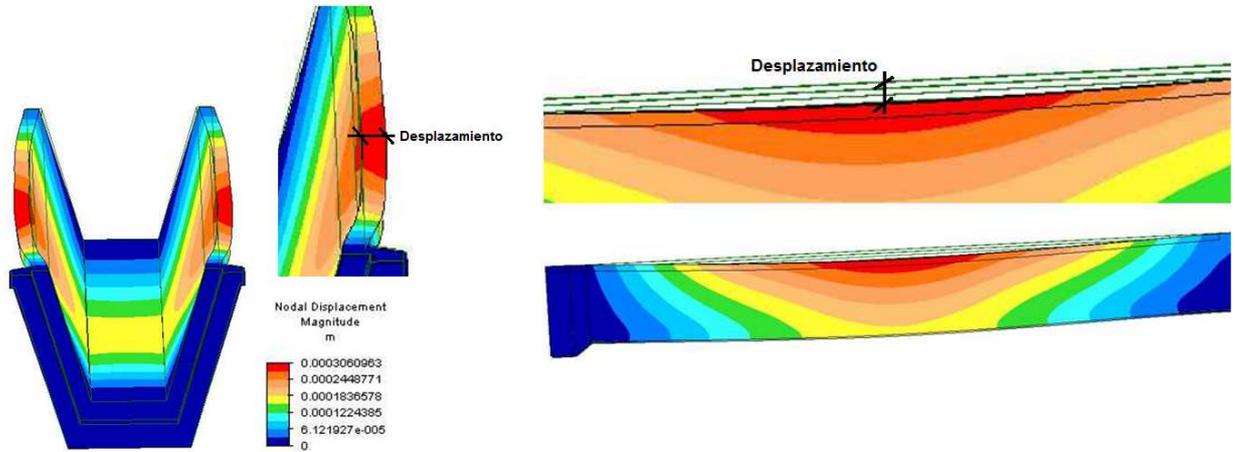
Como puede observarse en la imagen de la derecha, los valores más altos se encuentran en los bordes de los apoyos. En el lado de la campana se produce en el interior del apoyo, debido al pandeo del modelo. En el caso del macho en el lado exterior del apoyo debido, probablemente, al roce con la campana del canal contiguo.



Tensión cortante

En la imagen de la izquierda se señalan los puntos donde el valor de la cortante es mayor. Al igual que sucedía en el caso de considerar un resguardo de 100 mm, los valores más altos se dan en la arista del trapecio, el color rojo y azul (0,35 Mpa) se hace más intenso en los

puntos donde se ubican los refuerzos transversales. En la base del canal, además de los refuerzos transversales, también se puede ubicar la colocación de los refuerzos longitudinales.



### Desplazamiento

Como cabe esperar, el desplazamiento por desbordamiento es mayor que en el caso de resguardo. El desplazamiento según los ejes “x” e “y” son algo mayores que en el caso de resguardo. El mayor desplazamiento se produce en el borde exterior del canal, en el centro del vano, donde se produce la mayor flecha, disminuyendo a medida que nos acercamos a la arista que une la pared con la base. La base sufre una flecha de 0,18 mm, un 3% de del límite de cálculo establecido. Los extremos del canal no sufre apenas desplazamiento.

## 5.4 CARGAS PUNTUALES

Como establece las Normas UNE para la “Determinación de la resistencia a carga estática” (artículo 8.3 de la 53-302-76 y 6.1 de la 53-342-78) para cargas puntuales y carga lateral a modo de golpe lateral, se realizarán varios modelos a los que aplicaremos una fuerza puntual de 1471 N sobre las hombreras y 1471 N sobre las paredes del modelo. Se pretende determinar el comportamiento del modelo a la acción de cargas puntuales.

### 5.4.1 CARGA PUNTUAL EN HOMBRERAS

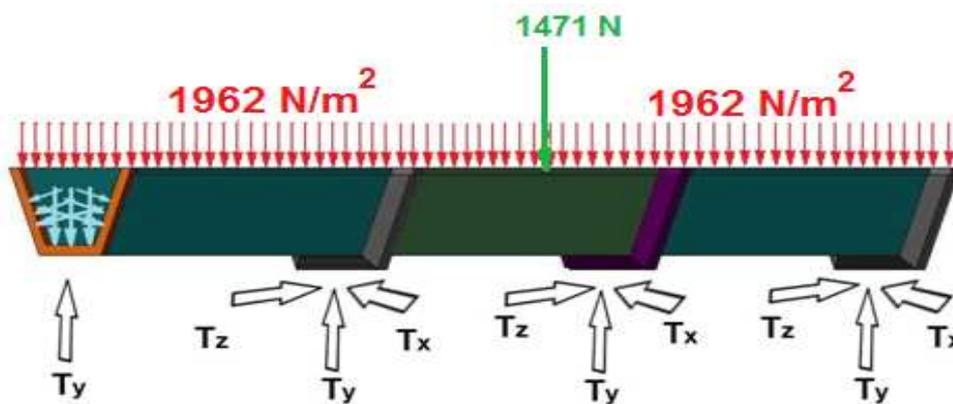
#### 5.4.1.1 Carga en una de las hombreras

Sus características son las siguientes:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Longitud del modulo:	15,00 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Longitud de apoyo:	
Lado campana	180 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x 200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

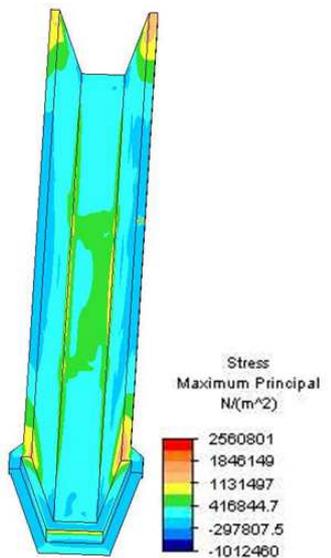
- Coacciones en los apoyos, en la campana de los tres canales se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m de altura.
- Carga de 1962 N/m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.
- Carga puntual de 1471 N ( $\approx$  150 kg) en una de la hombreras



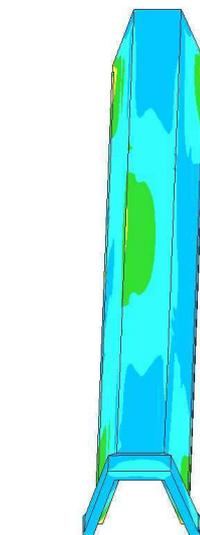
Los resultados obtenidos para una carga puntual en una de las hombreras se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60-RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\bar{\delta}$ (mm)	$\bar{\delta}_x$ (mm)	$\bar{\delta}_y$ (mm)	$\bar{\delta}_z$ (mm)
Carga puntual	2,56	1,36	0,64	0,06	0,00	0,00	0,00
Sin carga puntual	1,48	-2,16	0,24	0,21	0,11	0,00	0,03

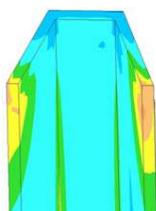
Los resultados de la tensión máxima han empeorado un poco, un 40 % en comparación a los obtenidos cuando no se considerado las cargas puntuales. Los resultados se resumen en las siguientes imágenes:



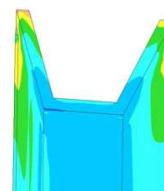
Vista superior del canal



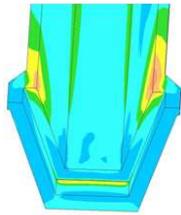
Vista inferior del canal



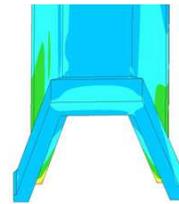
Detalle parte superior del macho



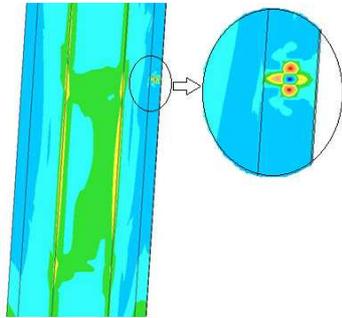
Detalle parte inferior del macho



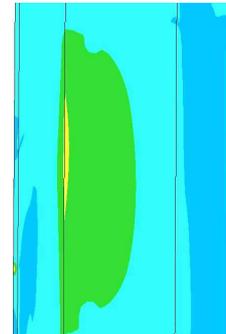
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



Detalle parte superior del cuerpo canal

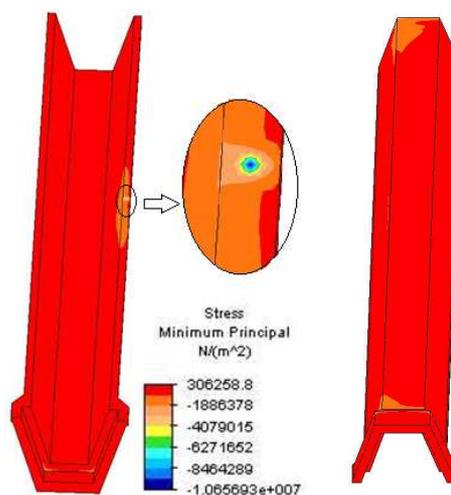


Destalle parte inferior del cuerpo canal

Tensión máxima

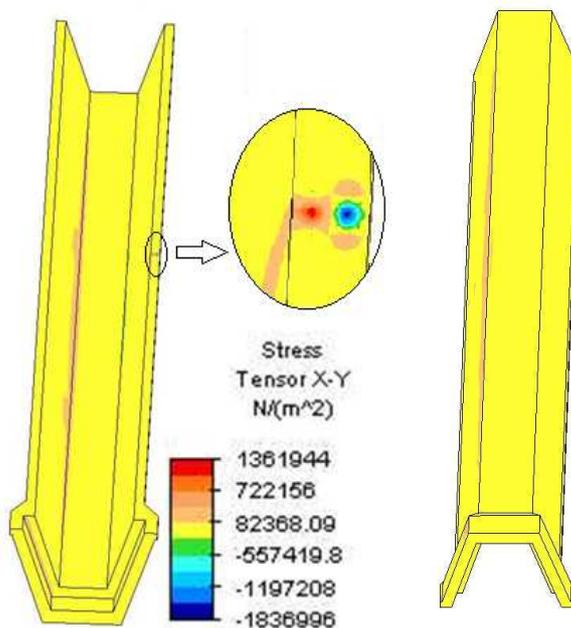
Como cabe esperar, los valores más altos se localizan en el punto donde se aplica la carga puntual, 2,56 Mpa. Si exceptuamos este punto, los resultados siguen siendo parecidos a los obtenidos para los tres canales en los cuales la acción del propio peso de los mismos, la carga uniformemente repartida en las hombreras, 1962 N/m<sup>2</sup> y una altura del agua de 400 mm. Una tensión de 1,84 Mpa se localiza en el borde superior del canal, en el lado de la campana, debido a la acción del canal contiguo.

En el cuerpo del canal la mayor tensión, 1,13 Mpa, se localiza en el lado donde se aplica la carga puntual, en la base del mismo. Prolongándose hacia los refuerzos transversales localizados en la arista opuesta. En el envés de la base, la tensión se localiza en la base del canal difuminándose a medida que nos alejamos.



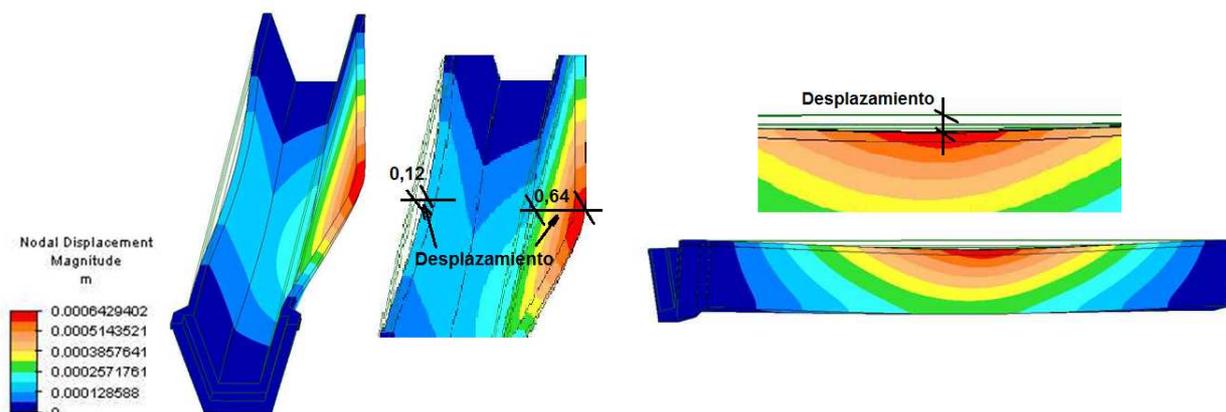
Tensión mínima

La tensión mínima, como ocurre con la tensión máxima se localiza en el punto donde se aplica la carga puntual, -10,65 Mpa; en el resto del canal, la tensión es uniforme, 0,31 Mpa.



Tensión cortante

Como no muestra el detalle de la imagen de la derecha, el máximo valor de la cortante se produce en el punto en el cual se aplica la carga puntual. En el resto del canal la máxima tensión cortante esta entorno al 0,08 Mpa. Todos estos datos están muy alejados de los límites de cálculo.



Desplazamiento

El mayor desplazamiento, como se observa en la figuras, se produce en el lado donde se aplica la carga puntual, 0,06 mm según el eje “x” y 0,00 en los ejes “y”, “z”. Como cabe esperar, para poder observar el comportamiento del canal se ha tenido que recurrir establecer un factor de escala de 2, lo que permite hacer visible la deformación que se produce en el modelo.

Como viene ocurriendo hasta ahora, los valores se encuentran muy alejados de los límites de cálculos establecidos, el 10 % del ancho de la sección, lo que supone 5,4 mm.

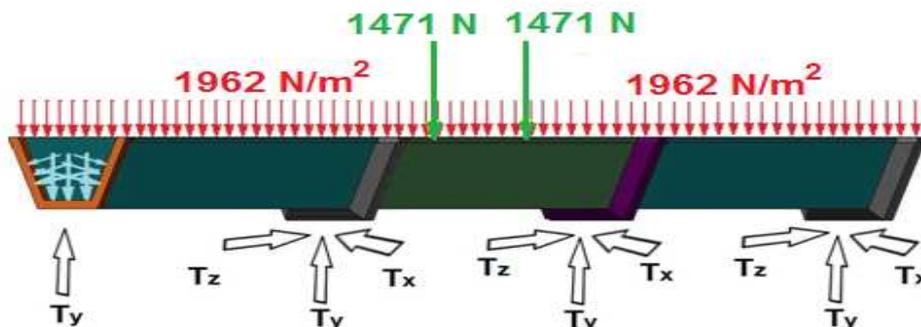
#### 5.4.1.2 Carga puntual en las dos hombreras

En este punto del estudio vamos a considerar dos carga puntuales en las dos hombreras de 1471 N, algo que no considera la cita Norma, pero es una forma de llevar nuestro modelo al límite. Las características del modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Longitud de apoyo:	
Lado campana	180 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x 200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en la campana de los tres canales se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m y 0,50 m de altura.
- Cagar de 1962 N /m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras.
- Una carga puntual de 1471 N (≈ 150 kg) en el centro del vano del modelo de cada una de las hombreras.

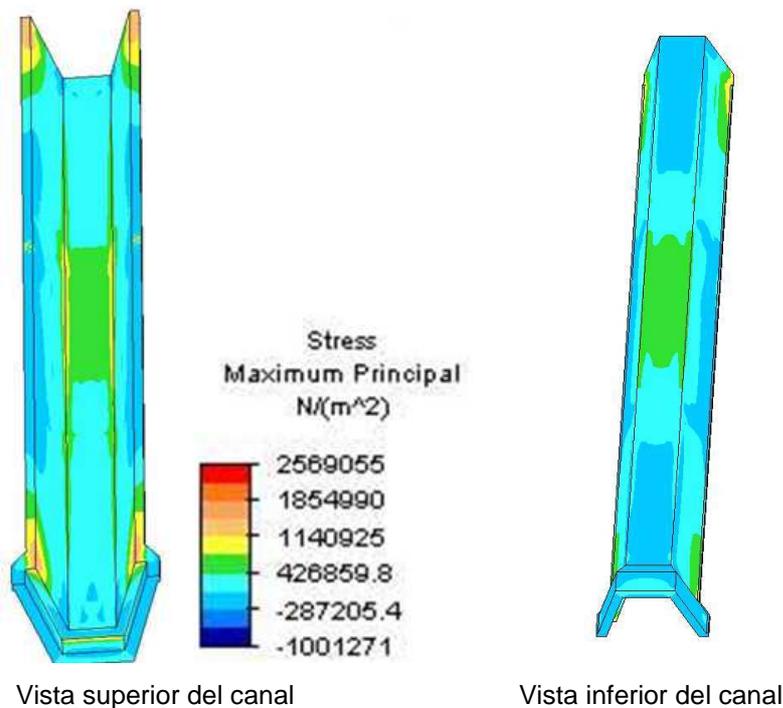


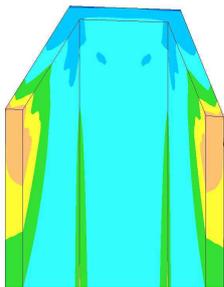
Los resultados obtenidos para los tres canales se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60- RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Carga en una hombrera	2,56	-1,06	1,36	0,64	0,06	0,00	0,00
Carga en las dos hombreras	2,56	-1,06	1,84	0,40	0,23	0,00	0,00

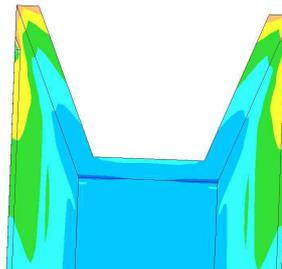
Se ha recogido los resultados de la aplicación de la carga puntual en una hombrera y en las dos hombreras para tener una referencia y poder comparar dicho resultado. Como puede observarse en los resultados, no sufren grandes variaciones e incluso iguales en el caso de la tensión máxima y mínima.

Estos resultados se resumen en las siguientes imágenes.

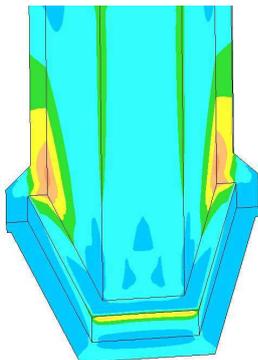




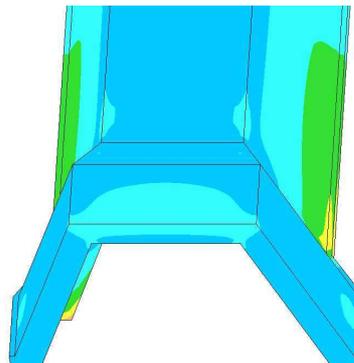
Detalle parte superior del macho



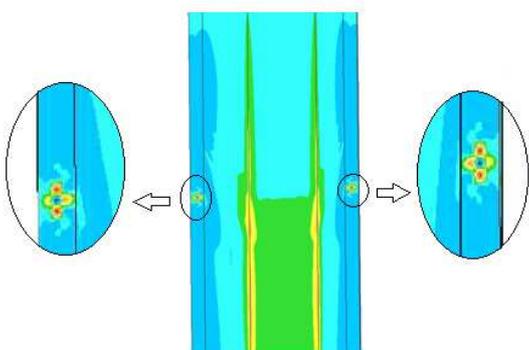
Detalle parte inferior del macho



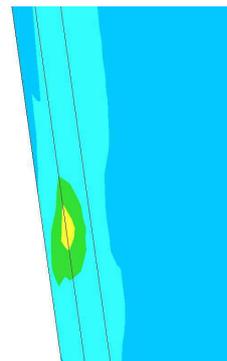
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



Detalle parte superior del cuerpo canal



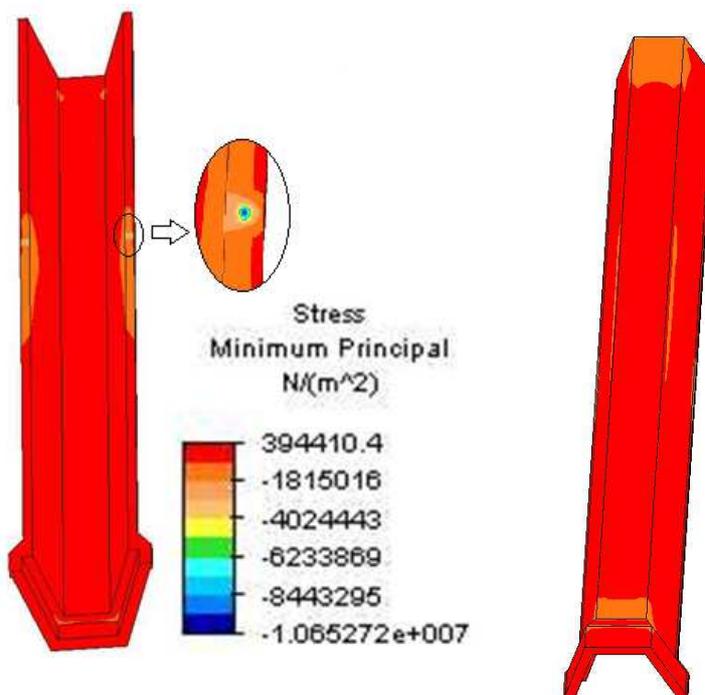
Destalle parte inferior del cuerpo canal

Tensión máxima

Como ha ocurrido al aplicar una carga puntual en las hombreras, las máximas tensiones se producen en los puntos en los que se aplica las cargas puntuales, teniendo el mismo valor que en el caso anterior, 2,56 Mpa.

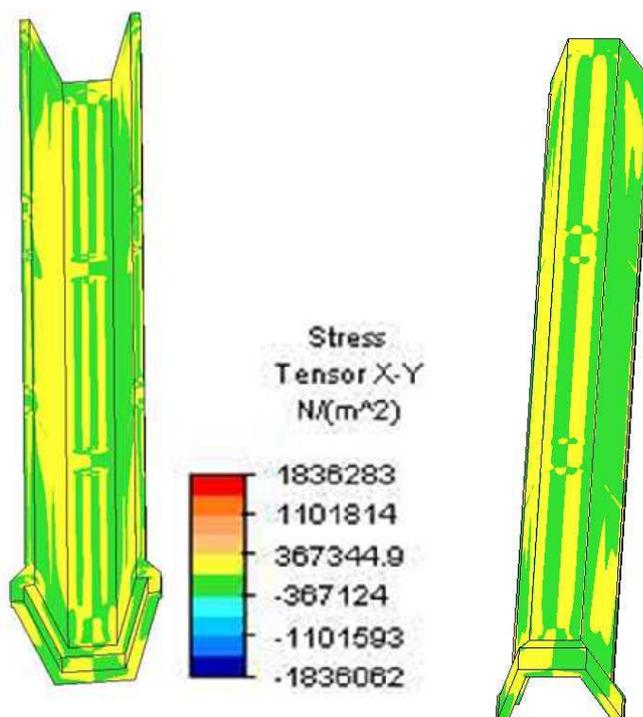
A parte de los puntos donde se aplica las cargas puntuales, siguen siendo los bordes superiores, en el lado de la campana y del macho donde se produce una tensión máxima de 1,85 Mpa, debido a la acción del canal contiguo. Es en las aristas, a la altura de la aplicación de las cargas puntuales donde se produce la máxima tensión en la base del canal, disipándose hacia los bordes del canal.

Todos estos valores suponen un 37 % del valor límite de cálculo (6,9 Mpa) en el caso de la tensión en los puntos de carga puntual y un 21 % en el caso de los bordes superiores de los extremos del canal.



Tensión mínima

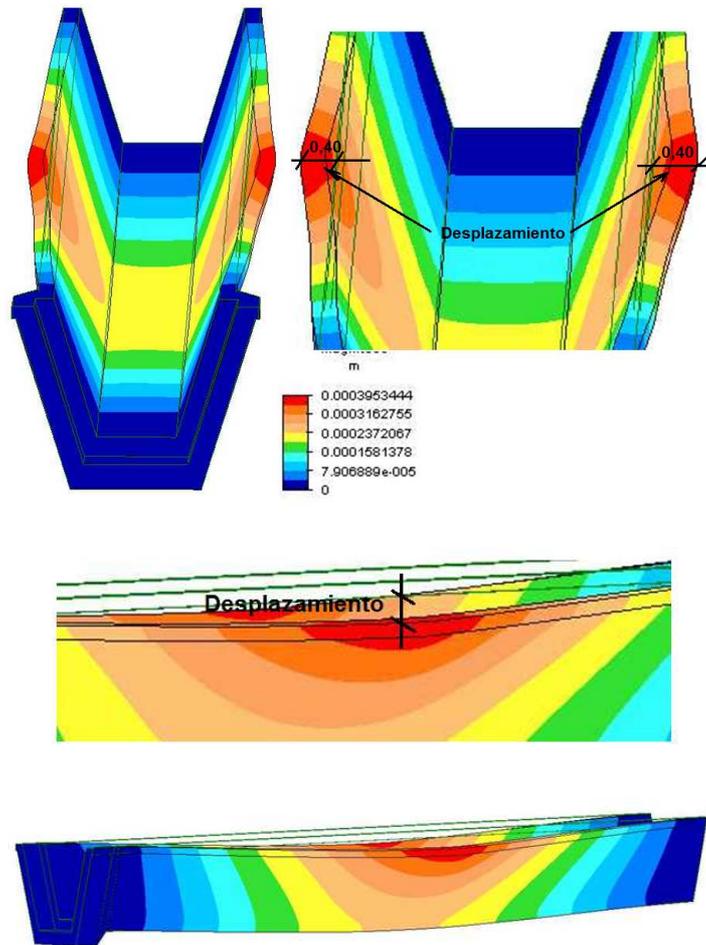
El máximo valor de la tensión mínima se da, al igual que ha sucedido en el caso de la tensión máxima, en los puntos de aplicación de las cargas puntuales.



Tensión cortante

La tensión cortante es mayor que en el caso de la carga puntual en una hombrera. La tensión cortante máxima, como es de suponer, se produce en los puntos de aplicación de las cargas puntuales. Las tensiones cortantes se distribuyen en la base de forma simétrica a lo

largo del eje central del modelo y como ha sucedido hasta este momento, se localiza la ubicación de los refuerzos, tanto longitudinales como transversales.



Desplazamiento

Los desplazamientos se producen en los puntos de aplicación de las dos fuerzas puntuales que unido a la presión del agua hace que sea de 0,40 mm el desplazamiento hacia afuera. En relación al límite de cálculo establecido, este desplazamiento representa menos del 10 % del valor máximo (5,4 mm). Se produce un pandeo en esta zona de la pared del canal que va disminuyebndo a medida que nos acercamos a la arista de la sección. Son los extremos del canal los que sufren un desplazamiento nulo.

## 5.4.2 CARGA LATERAL

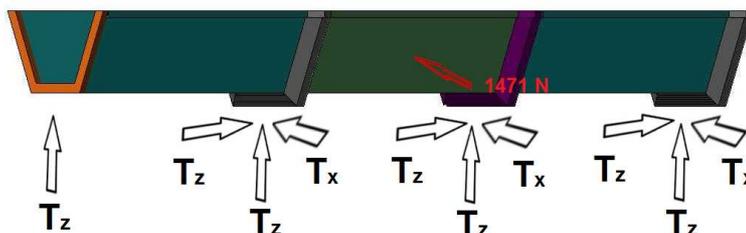
### 5.4.2.1 Carga puntual en el lateral

Como se indico, las Normas UNE para la “Determinación de la resistencia a carga estática” (artículo 8.3 de la 53-302-76 y 6.1 de la 53-342-78) para cargas puntuales. En este modelo vamos aplicar una carga lateral a modo de golpe lateral. En este modelo no vamos a considerar la acción del agua ni la carga uniforme de  $1962 \text{ N/m}^2$ , según establece dicha Norma. Sus características son las siguientes:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Longitud del modelo:	15,00 metros
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Longitud de apoyo:	
Lado campana	180 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x 200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

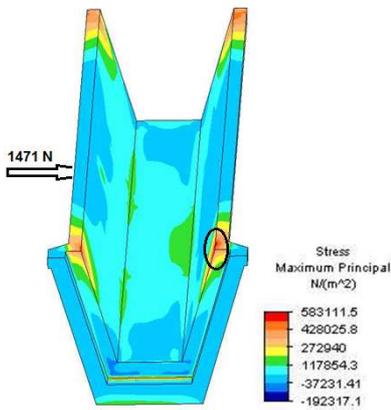
- Coacciones en los apoyos, en la campana de los tres canales se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.
- Peso propio del canal.
- Carga puntual en un lateral del canal, en el centro del vano, con un valor de 1471 N.



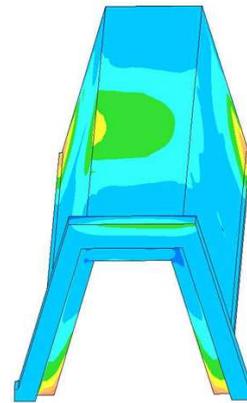
Los resultados obtenidos para los tres canales se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60- RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Carga puntual lateral	0,58	-1,00	0,10	0,12	0,03	0,00	0,00

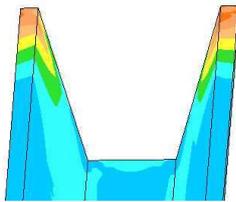
Los resultados se reflejas en las siguientes imágenes.



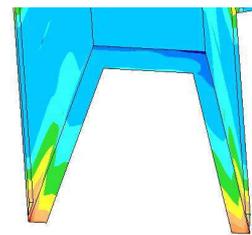
Vista superior del canal



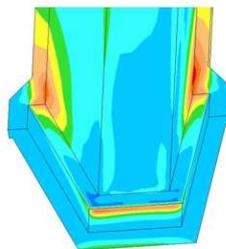
Vista inferior del canal



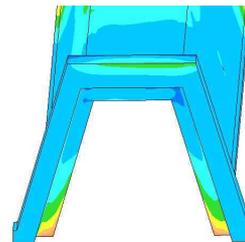
Detalle parte superior del macho



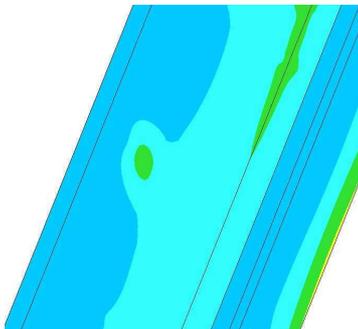
Detalle parte inferior del macho



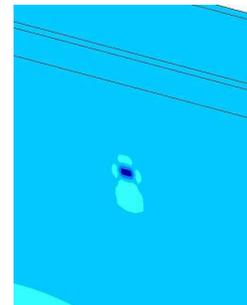
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



Detalle parte interior del cuerpo canal

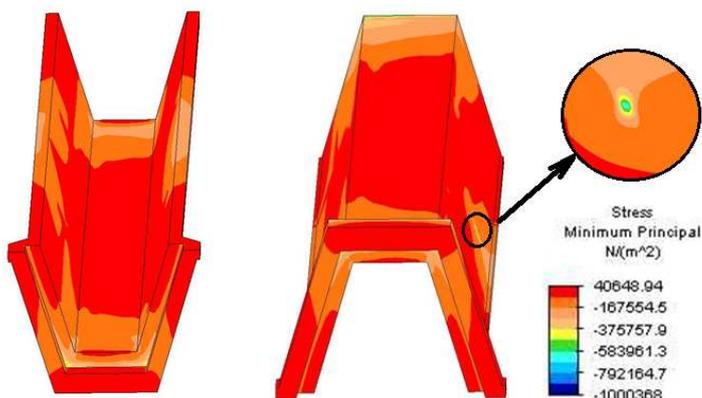


Detalle parte exterior del cuerpo canal

Tensión máxima

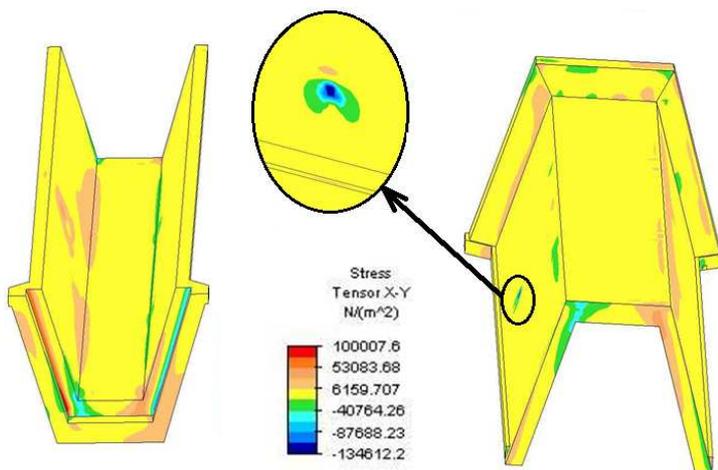
La tensión máxima es de 0,58 Mpa, lo que representa un 8 % del límite de cálculo que se ha considerado para el GRC, 6,90 Mpa. Esta tensión máxima se produce en el lado opuesto a donde se aplica la carga puntual, localizándose en el vértice superior del cuerpo del canal, en el extremo de la campana. En los otros vértices superiores del cuerpo del canal, la tensión es de 0,42 Mpa, disipándose la tensión de forma concéntrica a dichos puntos. Esto hace suponer que sea debido a la acción de los canales contiguos.

En el punto donde se aplica la carga, la tensión es de 0,18 Mpa, en su cara interior, muy por debajo de límite de cálculo. A esta altura, en la arista opuesta la tensión es de 0,24 Mpa, disipándose por la cara externa de la base del canal.



Tensión mínima

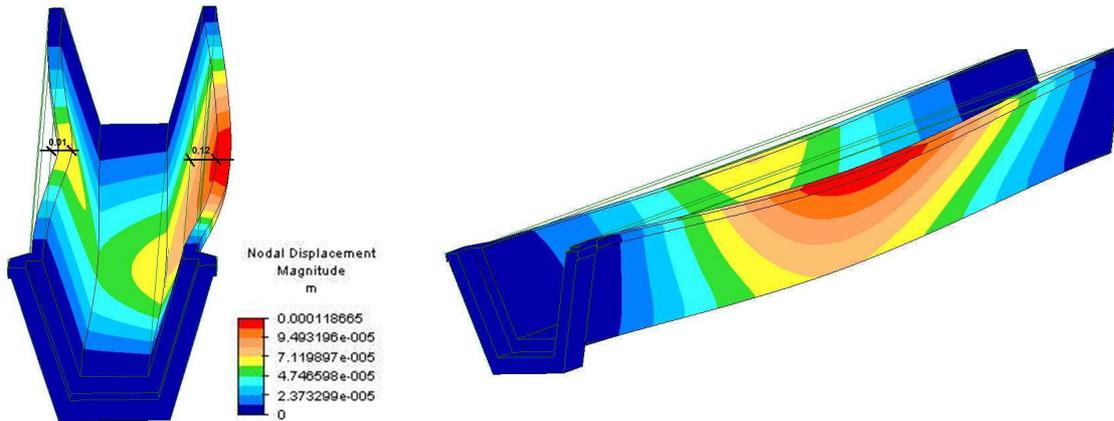
En el punto donde se aplica la carga puntual es el que tiene una tensión mínima más alta, por la parte exterior de la pared. El resto del canal tiene una tensión mínima homogénea y reducida.



Tensión cortante

La tensión máxima cortante se produce en el punto de aplicación de la carga puntual, por su parte externa con 0,10 Mpa, de forma puntual porque esta tensión se reduce rápidamente en las cercanías del punto. Las aristas internas de la campana, sufren una tensión cortante de

0,09 Mpa y 0,10 Mpa. Puede ser debido a la acción del canal contiguo. En el lado del macho del canal la tensión cortante es de 0,05 Mpa en los vértices de la sección.



Desplazamiento

El mayor desplazamiento se produce la pared opuesta a la que se aplica la carga puntual. La flecha que se origina es de 0,12 mm, en la imagen superior se ha tenido de aplicar un factor de escala de 1 que nos permite observar más nitidamente el desplazamiento. El desplazamiento del lado donde se aplica la carga puntual es de 0,07 mm. Como se puede observar, se trataría de un pandeo en el borde exterior de la pared del canal. Verticalmente el pandeo que se produce en la base del canal esta en torno a 0,03 mm teniendo cuenta que es el lado opuesto a la carga puntual aplicada donde se produce el mayor desplazamiento. En los extremos del canal, el desplazamiento es nulo.

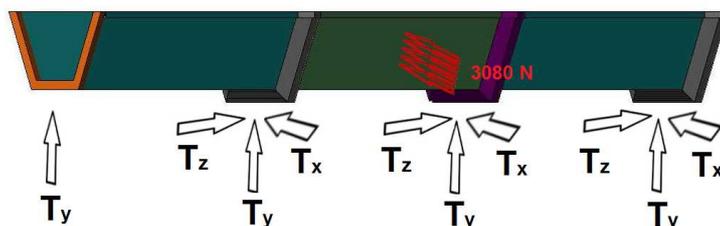
### 5.4.2.2 Carga uniforme en un lateral

En este punto del estudio vamos a introducir una variable que no está recogida en ninguna norma. En el punto anterior hemos supuesto una carga lateral puntual que suponía un golpe lateral que sufría el canal. En este aparatado vamos a suponer el golpe de un apero. Consideramos las siguientes características del canal:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Longitud del modelo:	15,00 metros
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Longitud de apoyo:	
Lado campana	180 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x 200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

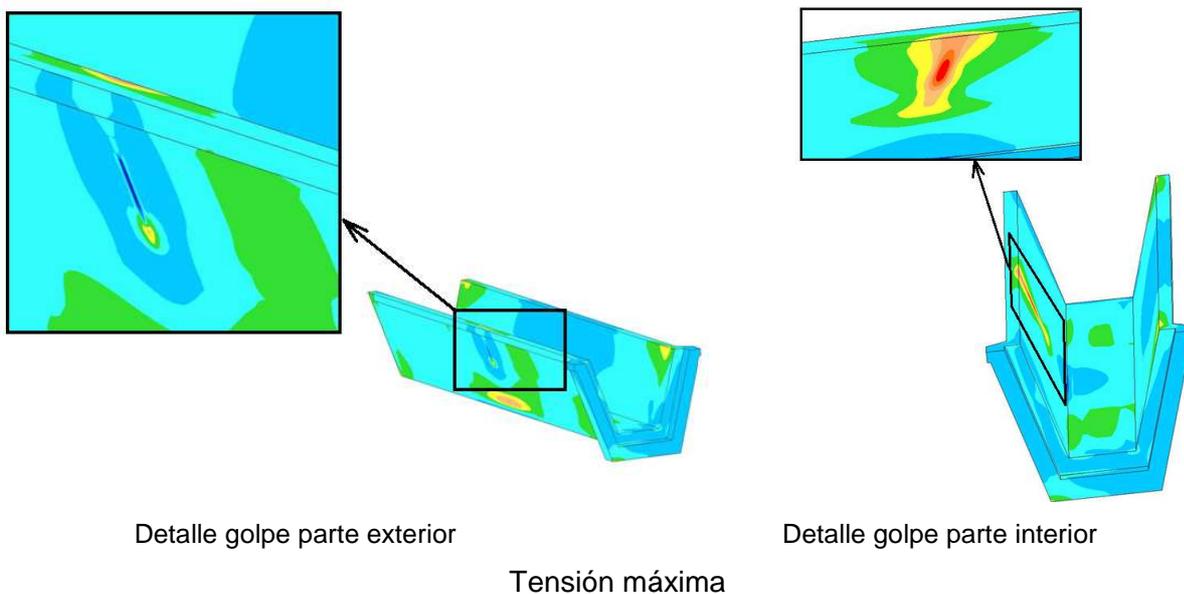
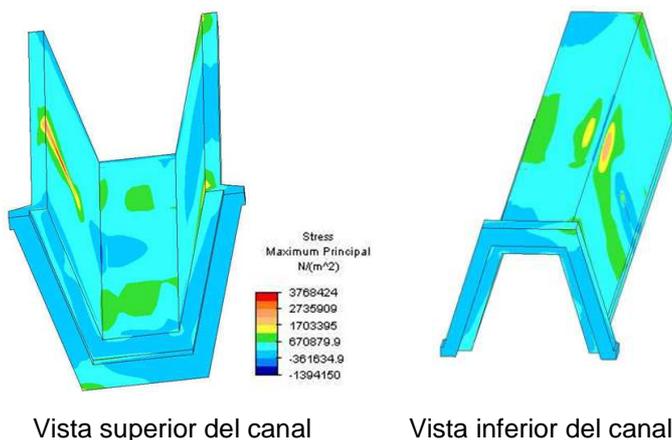
- Coacciones en los apoyos, en la campana de los tres canales se considera la coacción al movimiento de translación en los tres ejes y en el caso del lado del macho, sólo se considera el apoyo simple en el tercer canal.
- Peso propio del canal.
- Carga lateral, suponemos una carga lateral de de 3080 N aplicada en 5 nudos del modelo. Ello intenta simula el golpe de una vertedera, sección lineal de 200 mm. Se considera un tractor y un arado de verterá reversible de un peso de 11.000 kg todo el conjunto.



Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

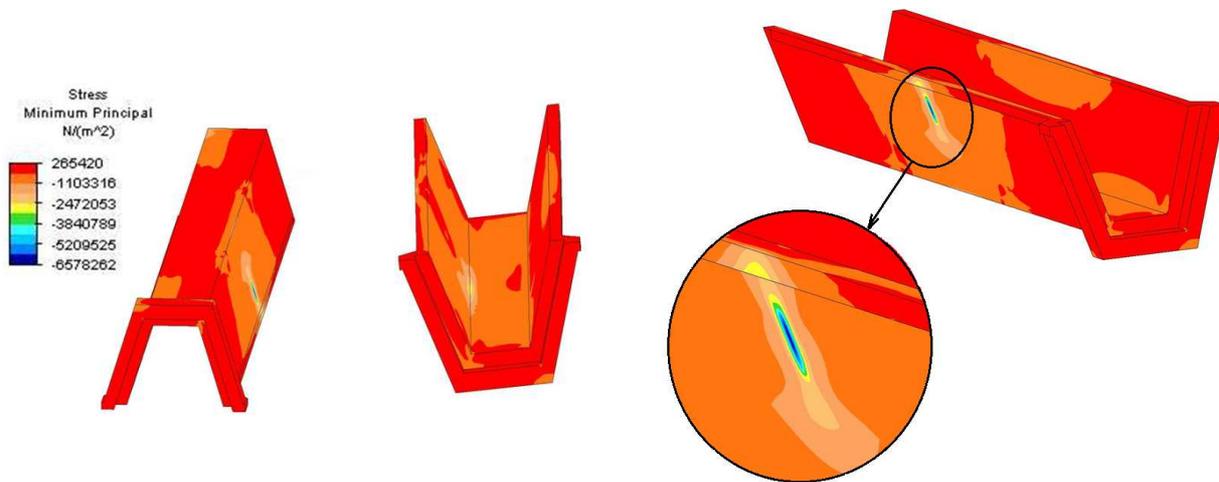
L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60- RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Carga puntual lateral	3,77	-6,58	0,81	1,86	0,03	0,68	0,05

Los resultados se reflejas en las siguientes imágenes.



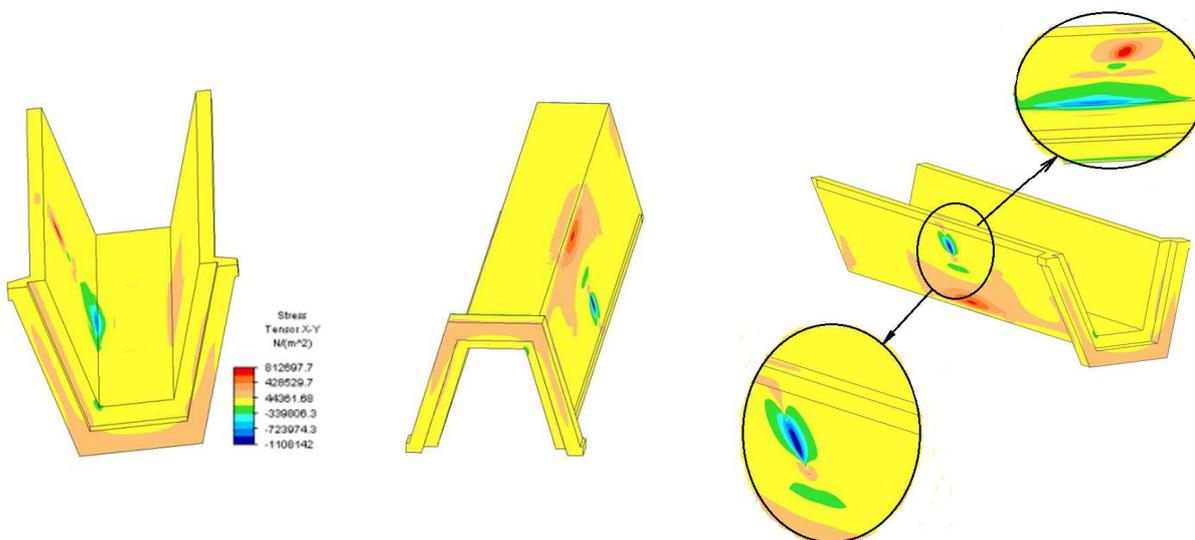
La tensión máxima es de 3,77 Mpa, lo que representa más de 50 % del límite de cálculo que se ha considerado para el GRC, 6,90 Mpa. Esta tensión se localiza en el interior del canal, donde ha sido golpeado el modelo, justo en el centro del impacto. Como se ha considerado en el caso de la carga puntual lateral y teniendo en cuenta las Normas UNE para la “Determinación de la resistencia a carga estática” (artículo 8.3 de la 53-302-76 y 6.1 de la 53-342-78) para cargas puntuales, no se ha considerado la acción del agua, que reduciría la tensión que soporta. La tensión en la zona donde se aplica la carga es de 1,39 Mpa en valor absoluto.

En los vértices superiores del cuerpo del canal y en el lado opuesto al que se aplica la fuerza, donde en casos anteriores se originaba la máxima tensión, 1,70 Mpa, un poco por encima del 1,47 Mpa que se originaba cuando se consideraba como acciones la acción del agua y la carga uniformemente repartida sobre las hombreras.



Tensión mínima

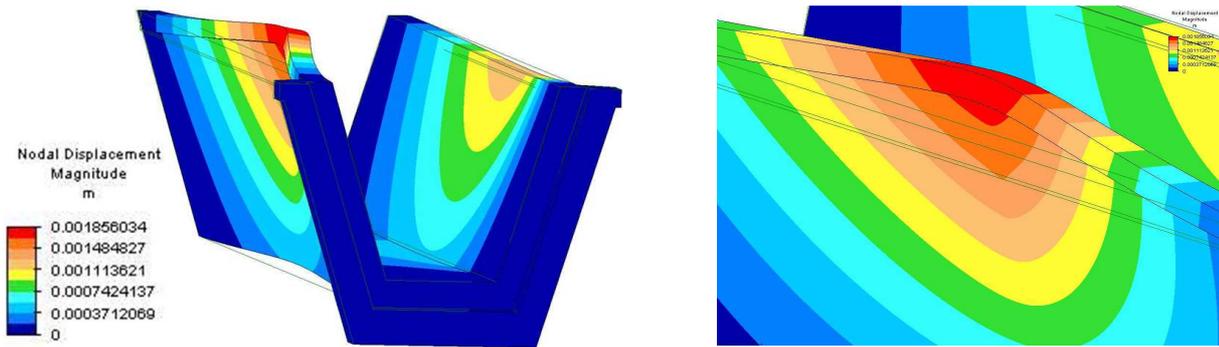
Como se puede observar en el detalle de la imagen superior la tensión mínima es localizada en la zona de aplicación la acción. Estaría en los -6,58 Mpa.



Tensión cortante

La tensión máxima cortante se produce en el punto de aplicación de la carga puntual, por su parte interior y en una pequeña zona delimitada a la misma altura que la carga aplicada, en la arista de la sección. El color amarillo es el más abundante en el modelo y representa una tensión de corte de 0,04 Mpa. Excepto, en la cara externa de la campana, una pequeña zona cercana a los puntos de máxima tensión cortante donde la tensión es de 0,42 Mpa.

## VERIFICACIÓN DEL MODELO



Desplazamiento

El mayor desplazamiento se produce la pared donde se aplica la carga, en el borde superior de la pared. Se origina una flecha 1,86 mm, en la imagen superior se ha tenido de aplicar un factor de escala de 1 que nos permite observar más nitidamente el desplazamiento. En el lado opuesto hay un desplazamiento de 1,11 Mpa. Como observamos en la imagen superior, se ha producido un ligero desplazamiento de la arista inferior del modelo, 0,37 mm

Como ha ocurrido en todos los casos en los extremos del canal, el desplazamiento es nulo

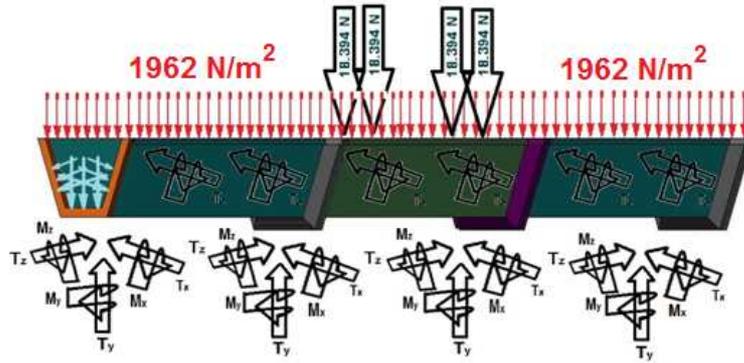
## 5.5 SOBRE CARGA EN LAS HOMBRERAS

En este punto del estudio vamos a considerar que sobre el canal pasa un vehículo, en este caso un remolque de 15.000 kg, algo que no considera cita Norma, pero es una forma de llevar nuestro modelo al límite. Las características del modelo son las siguientes:

Sección:	Trapezial.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC
	24 mm de PE
	15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x200 mm

Las acciones que se consideran son las siguientes:

- Coacciones en los apoyos, en este caso los canales se encuentran coaccionados a rotación y translación en todo el perímetro de los mismos, es decir, se encuentran enterrados en el terreno y sobre ellos se colocan una serie de losas de hormigón que permiten salvar el canal.
- Peso propio del canal.
- Peso de una columna de agua de 0,40 m y 0,50 m de altura.
- Carga de 1962 N /m<sup>2</sup> uniformemente repartida sobre las hombreras, lo que vendría a suponer en este caso, el peso de las losetas de hormigón colocadas para salvar el canal.
- Se considera un remolque de 15.000 kg, sustentado sobre cuatro ruedas, lo que supone 34.335 N sobre cada rueda. Lo modelizamos de cómo dos apoyos en cada una de las hombreras del modelo separados 2,50 m, ancho máximo de un vehículo.

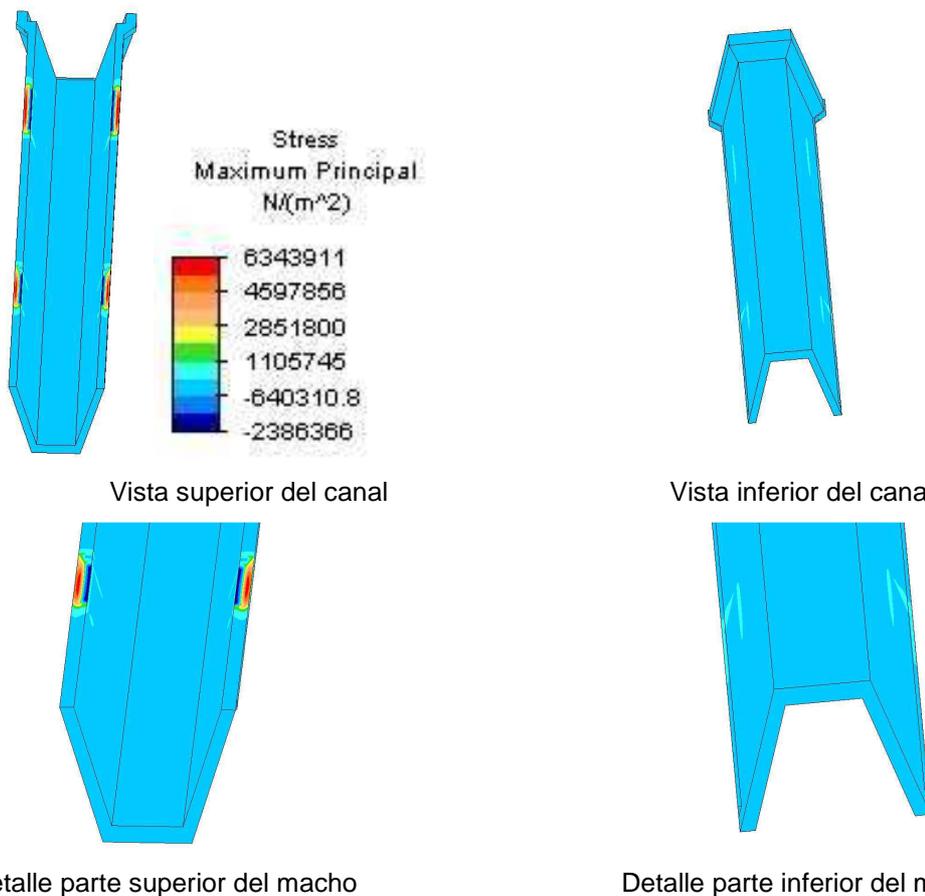


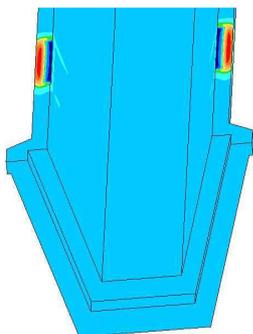
Los resultados obtenidos para los tres canales se resumen en la siguiente tabla:

L5-73-15-24-15-Lo18-2RB60- RP60-2RT20	Resultados						
	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_z$ (mm)
Dos carga en cada hombrera	6,34	-7,95	2,18	0,04	0,01	0,04	0,00

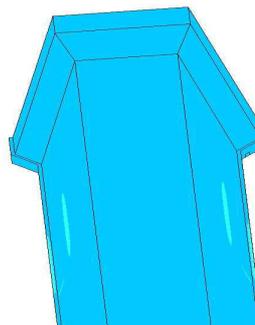
Como puede observarse en los resultados, la tensión máxima esta cerca del límite de cálculo establecido para el GRC, 6,9 Mpa, mientras que el desplazamiento está lejos del 10 % del ancho de la sección, es decir, los 5,4 mm de desplazamiento.

Estos resultados se resumen en las siguientes imágenes.

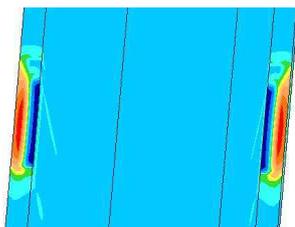




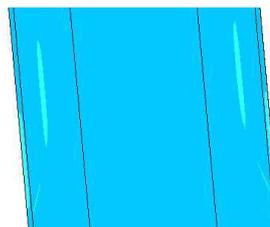
Detalle parte superior de la campana



Detalle parte inferior de la campana



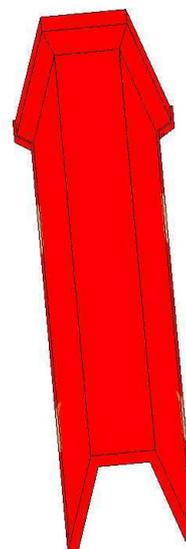
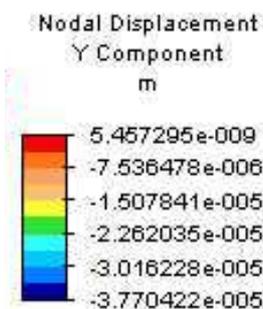
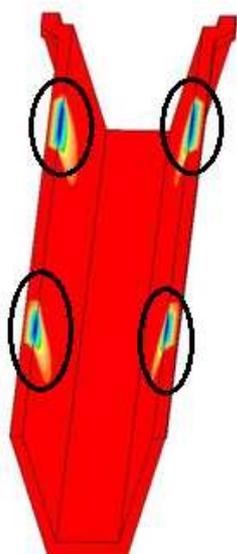
Detalle parte superior del cuerpo canal



Destalle parte inferior del cuerpo canal

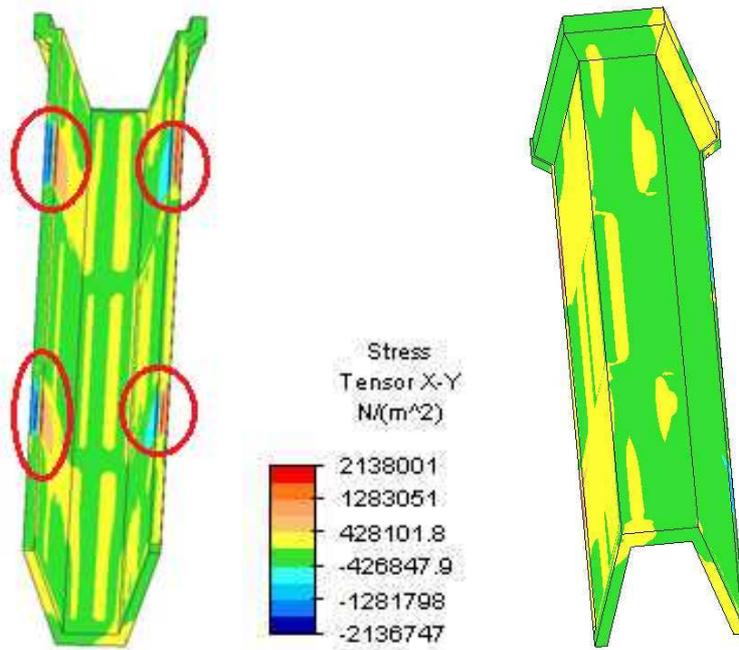
Tensión máxima

Como cabe esperar, la máxima tensión se localiza en los puntos donde se aplica la acción de la carga, lo que supone un 92 % del valor límite de cálculo establecido para el GRC. El color dominante es el azul claro, lo que representa una tensión de 0,64 Mpa muy por debajo del límite de cálculo, debido a la coacción a translación y rotación en todo el perímetro del modelo.



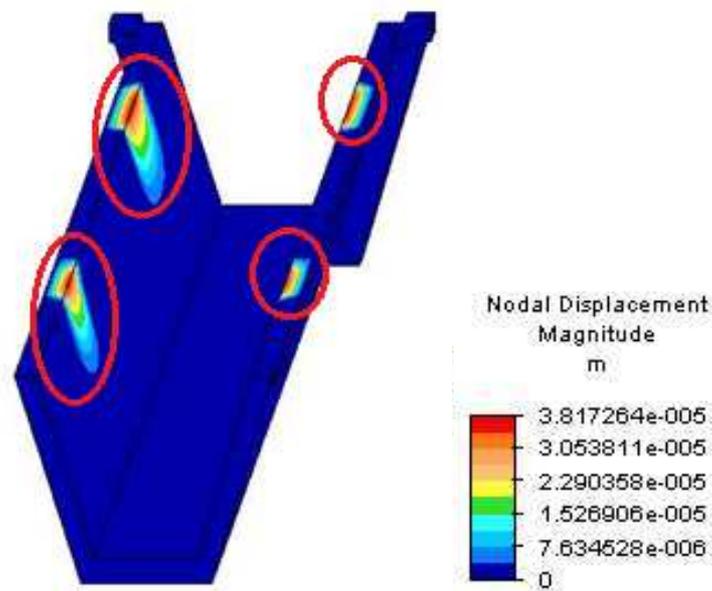
Tensión mínima

El máximo valor de la tensión mínima se da, al igual que ha sucedido en el caso de la tensión máxima, en los puntos de aplicación de las acciones de las cargas. El color rojo domina el modelo, lo que representa un valor de  $5,4 \cdot 10^{-3}$  Mpa.



Tensión cortante

Como viene ocurriendo en el caso de la tensión máxima y mínima, los valores más altos se dan en los puntos donde suponemos la acción de las cargas consideradas de 18.394 N. El valor máximo es de 2,14 Mpa en valor absoluto. Los colores dominantes en el modelo son el amarillo y verde, lo que representa un valor de 0,42 Mpa en los dos casos.



Desplazamiento

Los desplazamientos se producen en los puntos de aplicación de las acciones, con un valor de 0,04 mm. En relación al límite de cálculo establecido, este desplazamiento representa **menos del 10 % del valor máximo. En este modelo no se observa pandeo del modelo debido a las coacciones a las que esta sometido.**

Hemos sometido al modelo a una sobrecarga debido al paso de un remolque arrastrado con una carga de 15.000 kg para un modelo con 4 ruedas. Este modelo se encuentra cerca del límite de cálculo de tensión máxima, pero hemos llevado al límite a nuestro modelo.



## **6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURAS**

Índice

<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURAS .....</b>	<b>1</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	3
6.2	MODELO DESARROLLADO .....	6
6.3	LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURAS .....	8
6.4	REFERENCIAS .....	10

## 6.1 CONCLUSIONES

Según la definición de materiales compuestos son todos aquellos en los cuales combinamos dos o más materiales para conseguir mejorar las características de cada uno. En nuestro caso estamos modelizando un canal de riego que cumple esta condición de forma doble, mezcla el hormigón con la fibra de vidrio para conseguir el GRC (hormigón reforzado con fibra de vidrio) con una mejora de las características del hormigón muy importante. A este tipo de material compuesto hay que añadir el hecho que estamos diseñando una estructura compuesta tipo sándwich utilizando dos láminas de GRC y una lámina de polietileno expandido.

Los factores considerados fijos en todo momento han sido la influencia de la carga que transporta, 100 l/s de agua con un resguardo de 7 cm como mínimo, una carga de  $1962 \text{ N/m}^2$  en las hombreras y no olvidemos el peso propio de la estructura, todo ello son acciones a considerar en los cálculos a realizar.

Tratándose de una Tesis Doctoral que recoge estudios previos de la aplicación de materiales compuestos en la fabricación de canales de riego. La Tesis Doctoral con el título “Análisis del comportamiento mecánico de elementos para conducciones hidráulicas abiertas en poliéster reforzado con fibra de vidrio” del Doctor Ingeniero Agrónomo D. Luis Ricote Lázaro. Estudios sobre la situación de los regadíos en la provincia de León y empleo del GRC en los canales de riego, del grupo de investigación dirigido por el Doctor Ingeniero Agrónomo D. José Luis Meléndez Falkowski. Estos estudios precedentes consideran canales de 3 m de longitud, que se considera en un principio y posteriormente consideramos modelos de 5 m.

Como variables de cálculo se han considerado las coacciones al movimiento que sufre el canal en los apoyos, el espesor de las láminas que constituyen la estructura sándwich, el ángulo de inclinación de las paredes del trapecio, las condiciones de longitud y espesor del apoyo en la campana y el reemplazo de parte del polietileno por GRC a modo de refuerzos tanto longitudinales como transversales.

Los primeros resultados nos han dicho que un espesor mínimo de 10 mm en la lámina de GRC sería suficiente para soportar las acciones que se han establecido para el cálculo de los canales de 3 m de longitud. En el proceso robotizado de fabricación, el espesor mínimo ha de ser de 15 mm, por ello los primeros resultados fueron muy alentadores, con un sándwich de 10 mm en la lamina de GRC y 20 mm en la de polietileno se cumplía los límites de cálculo que se habían establecido para el GRC.

Con estos primeros pasos tan alentadores nos pasamos a modelizar canales de 5 m de longitud. Comenzamos a modelizar canales con un espesor de 10 mm en la capa

de GRC, pero los resultados no fueron buenos. Si consideramos una coacción a todos los movimientos en los apoyos se estaba por debajo del límite de cálculo establecido. Considerando coacciones a la traslación y apoyos simples, los resultados se disparaban al doble de los límites de cálculo, incluso se triplicaban para apoyos simples.

Teníamos que incrementar el espesor de la lámina de GRC por cuestiones de robotizar su proceso de fabricación, para ello se estableció un espesor mínimo de 15 mm. Ya se notaba un descenso en los valores. Al considerar la situación más desfavorable, coacción a la traslación en el lado de la campana y un apoyo simple en el macho, para continuar con el modelizado, utilizamos la situación más desfavorable.

En nuestro estudio partíamos de modelos con un talud de  $60^\circ$ , pero los canales comercializados tienen un talud de  $73^\circ$  y una sección de 54 mm de espesor. Datos que entraron a ser condicionantes de nuestro estudio para conseguir modelos que puedan comercializarse y con ello poder reemplazar a los utilizados actualmente. Introduciendo estas variables, los resultados mejoraron, reduciéndose a la mitad la tensión. Indicar que la deformación y cortante se encontraba en todo momento en valores bajos.

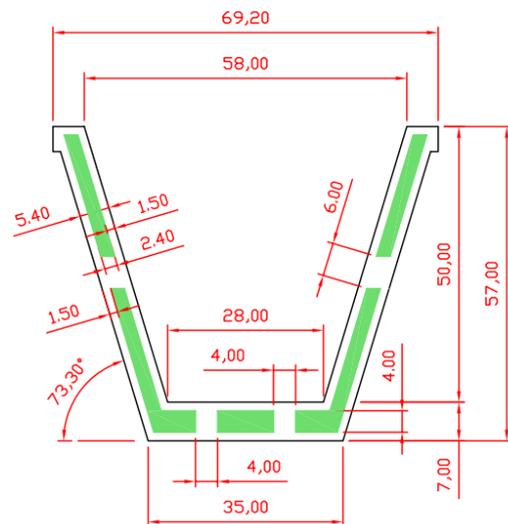
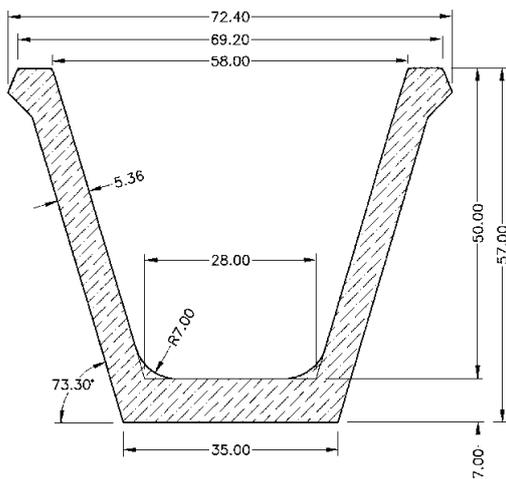
Se introdujo nuevas variables, longitud del apoyo en el lado de la campana y colocación de refuerzos. El apoyo en el lado de la campana es la única variable que se podía modificar porque en el lado del macho, al ir encajado en la campana, no se podía alterar sus condiciones de apoyo. Indudablemente, incrementar el apoyo de la campana en todo lo que era su longitud se reducía la tensión máxima. Siempre dentro de los límites de cálculo (6,9 Mpa).

Posteriormente se introdujo como variable de cálculo una serie de refuerzos. Consistía en colocar unas láminas de GRC dentro de la lámina de polietileno expandido. Los resultados mejoraban un poco. Se considera dos refuerzos en la base y uno en la pared de forma longitudinal y dos transversales a lo largo del perímetro de la sección como los más adecuados para aumentar la rigidez del modelo y con ello reducir el pandeo de la estructura.

Llegados a este punto, se vio que el estudio estaba considerando un canal aisladamente, pero hemos de tener en cuenta que la red de canales está constituida por una interconexión entre los mismos. Por ello, se modelizó una estructura constituida por tres canales para determinar la interacción que producían los canales extremos sobre el central. El programa informático nos permitía aislar los resultados del canal central para comprobar el comportamiento que tenía con las mismas condiciones de cálculo que se habían considerado hasta ese momento. No íbamos a quedarnos en este punto, se consideraron situaciones extremas a las que podía estar sometido el canal durante su

vida útil. Situaciones como desbordamientos, golpes verticales y horizontales, e incluso, apoyado toda la base del canal sobre el terreno. Los resultados obtenidos fueron favorables y hacía viable el modelo generado. Tan sólo nos quedaba modelizar un golpe de un apero en el canal, prueba que supero el modelo generado, al igual que una sobrecarga por el paso de un remolque.

Entre los objetivos planteados en esta Tesis Doctoral estaba el poder utilizar materiales compuestos en la fabricación de canales de riego. La utilización de Hormigón Reforzado con Fibra de Vidrio (GRC) y Polietileno Expandido (PE) nos permite reducir el peso de los elementos diseñados y con ellos los costes de fabricación y aumentar la manejabilidad en el proceso de montaje de los mismos. Se ha conseguido reducir en un 50 % del peso de un canal de hormigón armado empleado actualmente, a los 500 Kg que pesaría un canal fabricado con GRC y Polietileno Expandido.



Volumen: 0,48 m<sup>3</sup>  
 Peso: 1.180 Kg  
 Resistencia minina: 350 Kg/cm<sup>2</sup>

Acequia prefabricada de hormigón capaz de transportar un caudal de 100 l/seg. con una pendiente de 1/1000

Volumen: 0,33 m<sup>3</sup>  
 Peso: 490 Kg  
 Resistencia minina: 650 Kg/cm<sup>2</sup>

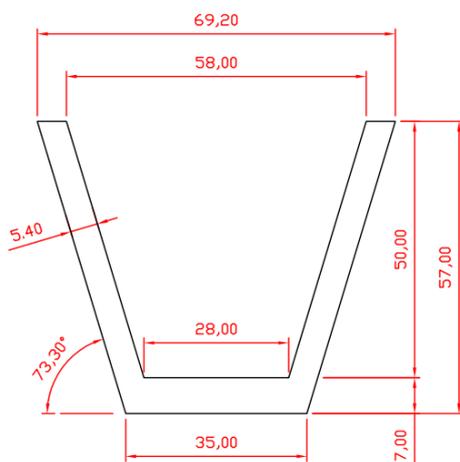
Acequia prefabricada de mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC), aligerado con polietileno expandido capaz de transportar un caudal de 100 l/seg. con una pendiente de 1/1000

## 6.2 MODELO DESARROLLADO

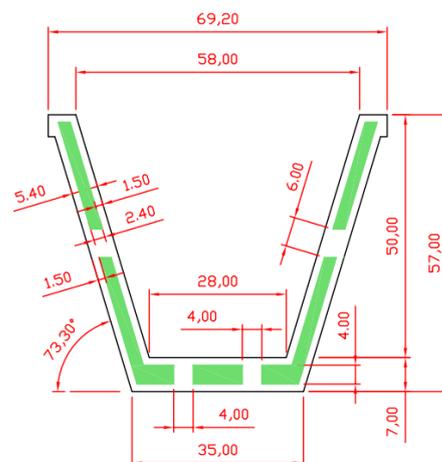
Las características del modelo **L5-73-15-24-15-08-Lo18-2RB40-RP60-2RT20**, considerado como óptimo, se indican a continuación:

Sección:	Trapezoidal.
Longitud del canal:	5,10 metros.
Sección transversal:	
Tipo	Sándwich
Espesores de las diferentes capas:	15 mm de GRC 24 mm de PE 15 mm de GRC.
Talud del canal:	73°.
Longitud de apoyo:	
Lado de la campana:	180 mm
Lado del macho:	100 mm
Incremento del espesor apoyo campana	0 mm
Refuerzos longitudinales	
Base	2 x 40 mm
Paredes	1 x 60 mm
Refuerzos transversales	2 x200 mm

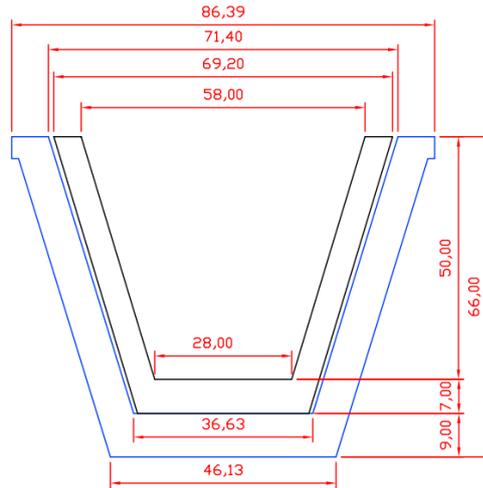
A continuación se indican las características geométricas del modelo considerado como óptimo (unidades en cm):



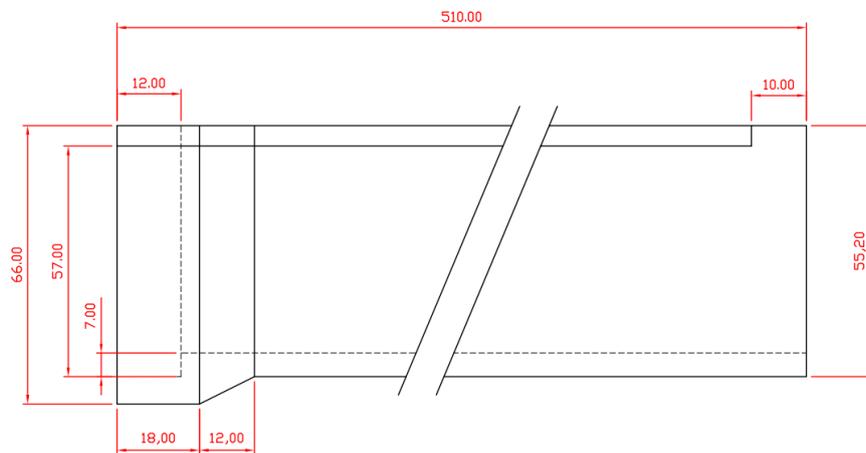
Macho del modelo



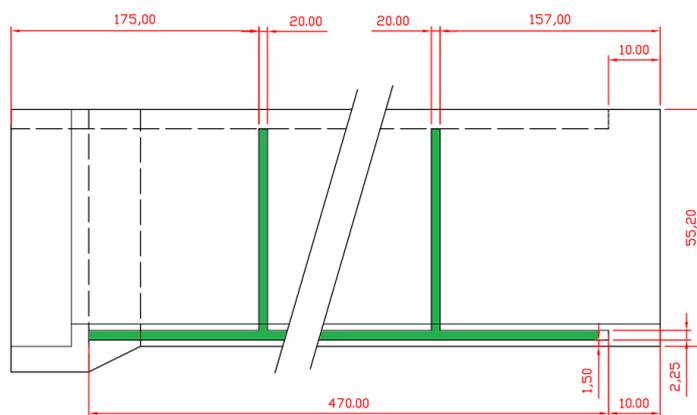
Sección transversal del modelo



Campana y macho del modelo



Perfil longitudinal



Sección longitudinal del modelo.

### 6.3 LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURAS

La agricultura es el sector primario de la economía, sector estratégico que no se debe olvidar. España es un país donde el regadío, a nivel de superficie, apenas representa el 20 % de la superficie cultivada, pero en el aspecto económico triplica el peso de la agricultura de secano.

La agricultura consume el 80 % del agua que se consume en España, en torno a 16 millones de hm<sup>3</sup> para regar 3,6 millones de hectáreas. En muchos casos existe un derroche de este elemento por las técnicas de riego, mal estado de las conducciones, etc. Hasta ahora, España se dividía entre la España húmeda, el norte de la península, donde se recogían más del 60% de las precipitaciones que caen y representa un 12 % de la superficie y la España seca, el sur donde sólo recogen el 40 % de las precipitaciones. Estos datos han hecho que en el norte de España esté muy extendido el riego por gravedad. Esto supone el empleo de conducciones abiertas para llevar el agua a las fincas, existiendo miles de km de las mismas. El estado en que se pueden encontrar las mismas es lamentable debido al deterioro que pueden sufrir, por lo que existen grandes pérdidas en las mismas.

Indudablemente, el aplicar nuevas técnicas de riego así como el cobro del agua por el consumo y no por superficie regada, supondrá reducir este derecho. La implantación de riego por aspersión supone una gran inversión que en algunos casos es difícil de asimilar por el agricultor. El riego por gravedad supone algo más del 50 % de la superficie regada en España.

Emplear nuevos materiales en la fabricación de las conducciones supondría un ahorro importante en el desperdicio de tan preciado elemento. Renovar aquellas conducciones defectuosas y desterrar de una vez para siempre la conducciones de tierra supondría un paso importante para reducir el consumo de tan preciado elemento.

Pero no sólo el riego por gravedad utiliza conducciones abiertas para llevar el agua a los puntos de consumo, también el riego por aspersión y goteo se nutren de este sistema de conducción para llevar el agua.

El uso de canales de riego no desaparecerá de nuestros campos por lo que es necesario renovarlos para evitar las pérdidas. El GRC es un material que podría utilizarse para la fabricación de estas conducciones abiertas, sus características lo hacen idóneo.

Las conducciones abiertas no solo se utilizan para canales de riego, sino que también tiene otros usos, drenaje de fincas, carreteras o caminos, alcantarillado urbano, e incluso se utilizan como abrevaderos para el ganado.

La implantación de nuevos sistemas de riego no implica la desaparición de las conducciones abiertas de agua, sino que hace necesario la renovación y mejora de las existentes para evitar las pérdidas que se pueden originar por el deterioro de los materiales empleados en la fabricación.

Esta Tesis Doctoral ha pretendido ser el punto de partida para la aplicación del GRC en el sector agrario. Futuras investigaciones podría ir encaminadas hacia el dimensionamiento de nuevos canales de sección semicircular, rectangular, triangular, trapecial, circular con diferentes volúmenes.

## 6.4 REFERENCIAS

- [1] Allen, H. G. (1969). The fabrication and properties of glass reinforced cement. Composites, Vol. 1, nº 1: pp. 19–24.
- [2] Caballero, J. M. y Casanova, S. (1993a). A classic facade in Gran Vía. GRC Proceedings 1993, Copenague, Dinamarca.
- [3] Carnio, M.A., Moraes, A. A. y Seddon, E. B. (2003). Glass fiber reinforced concrete pavements. GRC Proceedings 2003, Barcelona, España.
- [4] Antequera, P.; Jiménez, L. y Miravete, A.: Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio.
- [5] Aveston, J. y Kelly, A (1974). Theory of multiple fracture of fibrous composites. Journal of Materials Science, Vo l. 8 : pp. 352–362 .
- [6] Ball, H. P.: Performance of polymer modified GRC with respect to Curing and durability.
- [7] Ball, H. y Wackers, M. (1995). Long term durability o f naturally aged GFRC composites containing polymer. GRC Proceedings 1995, Estrasburgo, Francia .
- [8] Ball, H. y Wackers, M. (2001). Long term durability o f naturally aged GFRC mixes containing Forton polymer. GRC Proceedings 2001, Dublin, Irlanda.
- [9] Banthia, N., Chokri, K., Ohama, Y. y Mindess, S. (1994). Fiber-reinforced cement based composites under tensile impact. Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, nº 3: pp. 131–141.
- [10] Barros, A.: El Cemento Reforzado con Fibras de Vidrio en España. Asociación Española de Fabricantes de GRC.
- [11] Bazant, Z. P. y Planas, J. (1998). Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials. CRC.
- [12] Bentur, A. (1983). Durability o f carbonated glass fiber reinforced cement composites. Durability o f building materials, pp. 313–326.
- [13] Bijen, J.: GRC, an Ideal Building Material. Mechanical and Physical Properties.
- [14] Bijen, J.: Improved Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Cement by polymr modification.
- [15] Biryukovich, K. L., Biryukovic h, Y. L. y Biryukovich, D. L. (1965). Glass fiber reinforced cement.
- [16] Bravo, J.P., Comportamiento Mecánico de Hormigón Reforzado con Fibra de Vidrio: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicional, Universidad de Chile, 2003.
- [17] Brazier, J. F.: Propietés mecaniques des composites ciment-verre.
- [18] Catálogos profesionales de fabricantes españoles de GRC (Huarte S.A., Dragados y Cnes S.A., Preinco S.A., Especo S.A.).

- [19] CEM-FIL INTERNATIONAL: Cem-FIL GRC Technical Data.
- [20] CEM-FIL INTERNATIONAL: Guías de Proyección y Premezcla.
- [21] CEM-FIL INTERNATIONAL: Guías de utilización de las fibras Cem-FIL.
- [22] CEM-FIL INTERNATIONAL: La Fuerza del Vidrio.
- [23] CEM-FIL INTERNATIONAL: The Stud Wall System.
- [24] Chan, Y. W. y Li, V. C. (1997). Age effect on the characteristics of fiber cement inter facial properties. *Journal of Materials Science*, Vol. 32: pp. 5287–5292.
- [25] Cian, D. y Della Bella, M. (2001). Structural applications of GRC for precast floors. *GRC Proceedings 2001*, Dublín, Irlanda.
- [26] Comino, P.I., Romero J.C., Saint Gobain Vetrotex, El GRC Material Compuesto de Matriz Cementicia Reforzada con Fibra de Vidrio AR.
- [27] Cornelissen, H. A . W., Hordijk, D. A. y Reinhardt, H. W. (1986). Experiments and theory for the application of fracture mechanics to normal and lightweight concrete. *Fracture Mechanics and Fracture energy of concrete*, pp. 565–575. 264
- [28] Correia, J.R., Ferreira, J. B. y Fernando, A. (2006). A rehabilitation study of sandwich GRC facade panels. *Construction and Building Materials* , Vol. 2º, nº 8: pp. 554–561.
- [29] Curtin, W. A. (1991). Exact theory of fiber fragmentation in a single-filament composite. *Journal of Materials Science*, Vol. 26: pp. 5239–5253.
- [30] Danchaivijit, S. y Shetty, D. K. (1993). Matrix cracking in ceramic composites. *American Ceramics Society*, Vol. 76: pp. 2497–2507.
- [31] de Gutiérrez, R. M. y Torres, A . J. (2003). Puzolana obtenida por activación térmica. III Jornadas iberoamericanas de materiales de construcción. Red Iberoamericana de Rocas y Minerales Industriales XIII.
- [32] de Gutiérrez, R. M., Día z, L . y Delvasto, S. (2005). Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, nº 5: pp. 593–598.
- [33] de Vekey, R. C. y Majumdar, A. J. (1975). The properties of polymer modified cement pastes. *Proceedings international conference on Polymer concrete*, Londres, Mayo.
- [34] Della Bella, M. y Cian, D. (2003). Extra light GRC sandwich elements for roofing in industrial buildings. *GRC Proceedings 2003*, Barcelona, España.
- [35] Diversos documentos elaborados y editados en el Centro Técnico de Aplicaciones de Vetrotex España S.A.
- [36] Duda, W. H.: *Manual Tecnológico del Cemento*.
- [37] Durability of some Glass Fiber Reinforced Cement Composites. *American*

- Concrete Institute Journal. Jul-Ag. 1983.
- [38] Enfedaque, A., Cendón, D., Gálvez, F., Sánchez-Gálvez, V., Envejecimiento y pérdida de propiedades en los morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio (GRC), *Anales de mecánica de las fracturas* 26, Vol. 2, 2009
- [39] Enfedaque, A., Resistencia a impacto de morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio (GRC), ETSICCP, UPM, 2008.
- [40] Ferreira, J. G. y Branco, F. A. (2007). Structural application of GRC in telecommunication towers. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, nº 1: pp. 19–28.
- [41] Fujita, N., Okada, H. y Shiomi, K. (1995). Investigation of GRC panels which were suffered from the great hashing earthquake. *GRC Proceedings 1995*, Dublin, Irlanda.
- [42] Genis, A., Thiery, J., y Soukatchoff, P.: High durability Glass Cement Composites. New Vetrotex System.
- [43] Gilbert, G. T. (2003). GRC standing the test of time. *GRC Proceedings 2003*, Barcelona, España.
- [44] Glinicki, M. A. (1998). Effects of diatomite on toughness of premix glass fiber reinforced cement composites. *GRC Proceedings 1998*, Cambridge, Reino Unido.
- [45] Glinicki, M. A., Vautrin, A., Soukatchoff, P. y Francois-Brazier, J. (1994). Plate impact testing method for GRC materials. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 16, nº 4: pp. 241–251.
- [46] Glinicki, M. A.: Impact performance of Glassfibre Reinforced Cement. Plates subjected to accelerated Ageing.
- [47] Gopalaratnam, V. S. y Shah, S. P. (1986). Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. *ACI Materials Journal*, Vol. 83: pp. 117–126.
- [48] Gopalaratnam, V. S. y Shah, S. P. (1987). Tensile fracture of steel fiber reinforced concrete.
- [49] GRC. Cemento Reforzado con Fibras de Vidrio. Panda.
- [50] Gregory, T. (1995). Complementary use of GRC and precast concrete for the external clad-ding to city plaza 1 redevelopment in Hong Kong. *GRC Proceedings 1995*, Estrasburgo, Francia.
- [51] Grutzeck, M. W. (1981). *Advances in cement-matrix composites Proceedings*. Materials Research Society.
- [52] Hayashi, M., Sato, S. y Fuji, H. (1986). Some ways to improve durability in GFRC. *International Proceedings on durability of Glass Fiber Reinforced Cement*, Chicago, EEUU.

- [53] Horsley, F. W. (1995). GRC cornices with integral backup framing; the ideal system for new and retrofit construction. GRC Proceedings 1995, Estrasburgo, Francia. 266
- [54] IP36/79, B. I. P. (1979). Building research establishment properties of GRC: 10 years results. Inf. téc., BRE.
- [55] Jakes, E.: Curing and long-term durability of GRC.
- [56] Jiménez Montoya, P.; G<sup>a</sup> Meseguer, A. y Morán F.: Hormigón Armado.
- [57] Joisela, A.: Fisuras y Grietas en Morteros y Hormigones.
- [58] Kabele, P. y Stemberk, M. (2005). Stochastic model of multiple cracking process in fiber reinforced cementitious composites. Engineered Composites.
- [59] Kanda, T. y Li, V. C. (1998). Multiple cracking sequence and saturation in fiber reinforced cementitious composites. JCI Concrete Research And Technology, Vol. 9: pp. 19–33.
- [60] Kanda, T., Lin, Z. y Li, V. C. (2000). Tensile stress-strain modeling of pseudo strain hardening cementitious composites. Journal of Materials in Civil Engineering , Vo I. May 2000: pp. 147–156.
- [61] Kim, G. B., Pilakoutas, K. y Waldron, P. (2007). Development of thin frp reinforced GFRG permanent formwork systems. Construction and building materials, 2007.
- [62] Kimber, A. C. y Keer, J. C. (1982). On the theoretical average crack spacing in brittle matrix composites containing continuous aligned fibbers. Journal of Materials Scientific Letters, Vol. 1: pp. 353–354.
- [63] Komlos, K.; Badal, B. y Vanis, M.: Durability of GRC and its testing.
- [64] Lawrence, P. (1972). Some theoretical considerations of fiber pull-out from an elastic matrix. Journal of Materials Science, Vol. 7: pp. 6–10.
- [65] Leonard, S. y Bentur, A. (1984). Improvement of the durability of glass fiber reinforced cement using blended cement matrix. Cement and Concrete Research, Vol. 14, n<sup>o</sup> 5: pp. 717–728.
- [66] Les Composites Ciment-Verre. CERIB Actualités.
- [67] Leung, C. K. Y. y Li, V. C. (1991). New strength-based model for the debonding of discontinuous fibers in a elastic matrix. Journal of Materials Science, Vol. 26: pp. 5996–6010.
- [68] Leung, C. K. Y. y Li, V. C. (1992). Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites. Journal of the Mechanics and Physics o f Solids, Vol. 40, n<sup>o</sup> 6: pp. 1333–1362. 267
- [69] Li, V. C. y Wu, H. C. (1992). Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. Applied Mechanics Reviews, Vol. 45: pp. 390–

398.

- [70] Li, V. C., Maalej, T. y Hashida, T. (1994). Experimental determination of the stress-crack opening relation in fiber cementitious composites with a crack-tip singularity. *Journal of Materials Science*, Vol. 29: pp. 2719–2724.
- [71] Li, V. C., Wang, Y. y Backer, S. (1990). Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fiber pull-out from a cement matrix. *Composites*, Vol. 21, nº 2: pp. 132–140.
- [72] Li, V. C. y Leung, C. Y. (1992). Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118: pp. 2246–2264.
- [73] Li, V. C., Wang, Y. y Backer, S. (1991). A micromechanical model of tension-softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 39, nº 5: pp. 607–625.
- [74] Liang, W., Cheng, J., Hu, Y. y Luo, H. (2002). Improved properties of GRC composites using commercial e-glass fibers with new coatings. *Materials Research Bulletin*, Vol. 37, nº 4: pp. 641–646.
- [75] Lin, Z. y Li, V. C. (1997). Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, nº 5: pp. 763–787.
- [76] Litherland, K. L., Oakley, D. R. y Proctor, B. A. (1981). The use of accelerated ageing procedures to predict the long-term strength of GRC composites. *Cement and concrete research*, Vol. 11: pp. 455–466. 268
- [77] Luo, X., Sun, W. y Chan, S. Y. N. (2000). Characteristics of high-performance steel fiber-reinforced concrete subject to high velocity impact. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, nº 6: pp. 907–914.
- [78] Maalej, M. y Li, V. C. (1994). Flexural strength of fiber cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6: pp. 390–406.
- [79] Maalej, M. y Li, V. C. (1995). Effect of fiber rupture on tensile properties of short fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. August 1995: pp. 903–913.
- [80] Majumdar, A. J. (1975). *Fiber reinforced cement and concrete*. The Construction press.
- [81] Majumdar, A. J., Evans, T. J. y Sig, B. (1985). *The properties of cemfil2/GRC*. GRC Proceedings 1985, Darmstadt, Alemania Occidental.
- [82] Majumdar, A. J., Singh, B. y Evans, T. J. (1981). Glass fiber-reinforced supersulphated cement. *Composites*, Vol. 12, nº 3: pp. 177–183.

- [83] Majumdar, A. y Laws, V. (1991). Glass fiber reinforced cement. BSP Professional Books.
- [84] Majumdar, A.J. y Laws, V.: Glass Fiber Reinforced Cement.
- [85] Marikunte, S., Aldea, C. y Shah, S. P. (1997). Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and met kaolin. *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 5, nº 3-4: pp. 100–108.
- [86] Menetrey, P. (1999). Relationships between flexural and punching failure. *ACI Structural Journal American Ceramics Society*, Vo I. 95 : pp. 412–419 .
- [87] Mills, R. H. (1981). Age-embrittlement of glass-reinforced concrete containing blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, nº 3: pp. 421–428. 269
- [88] Mindess, S., Wang, N., Rich, L.D. y Morgan, D. R. (1998). Impact resistance of polyolefin fibre reinforced precast units. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, nº 5: pp. 387– 392.
- [89] Ministerio de Fomento (2000). Instrucción de hormigón estructural (EHE- 99).
- [90] Mu, B. y Meyer, C. (2003). Bending and punching shear strength of fiber reinforced glass concrete slabs. *ACI Materials Journal*, Vol. 100: pp. 127–132.
- [91] Naaman, A. E. y Shah, S. P. (1976). Pull-out mechanism in steel fiber reinforced concrete. *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 102: pp. 1537–1548.
- [92] Ong, K. C. G., Basheerkhan, M. y Paramasivam, P. (1999). Resistance of fiber concrete slabs to low velocity projectile impact. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, nº 5-6: pp. 391–401.
- [93] Peaston, C. y Cather, W. (2003). Properties and life prediction of cem-fil G RC cladding after more than 15 years of service. *GRC Proceedings 2003*, Barcelona, España.
- [94] Peña Fernández, A. L. (2006). Comportamiento ante impacto de materiales compuestos de carbono e híbridos carbono/vidrio. Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería de Materiales, UPM .
- [95] Peter, I. P. (2008). Sprayed premix. the new GRC. Inf. téc, GRCA Technical report.
- [96] Piggott, M. R. (1974). Toughness in obliquely- stressed fibrous composites. *Journal of the Mechanics and Physics o f Solids*, Vol. 22, nº 6: pp. 457–458.
- [97] Pilakoutas, K. y Petkovski, M. ( 2001). The development of the decathlon drainage channels. *GRC Proceedings 2001*, Dublín, Irlanda.
- [98] Planas, J. y Elices, M. (1992). Shrinkage Eigen stresses and structural size effect. *Fracture Mechanics of concrete structures*, pp. 939–950.
- [99] Proctor, B. A. y Litherland, K. (1985). Improving the strength retention o f GRC by matrix and fibre modifications. *GRC Proceedings 1985*, Darmstadt, Alemania

Occidental.

- [100] Proctor, B. y Yale, B. (1980). Inf. tec., Phil. Trans. Roy. Soc., London A294, 427. 270
- [101] Prontuario del cemento. Labahn/Kohlhaas.
- [102] Purnell, P. (1998). The durability of GRC made with new cementitious matrices. Tesis Doctoral, Aston University.
- [103] Purnell, P. y Beddows, J. (2003). Durability of new matrix glass fiber reinforced concrete. GRC Proceedings 2003, Barcelona, España.
- [104] Purnell, P. y Beddows, J. (2005). Durability and simulate d ageing of new matrix glass fiber reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, nº 9-10: pp. 875–884.
- [105] Purnell, P., Buchanan, A. J., Short, N. R., Page , C. L. y Majumdar, A . J. (2000a). Determination of bond strength in glass fiber reinforced cement using petrography and image analysis. Journal of Materials Science, Vol. 35: pp. 4653–4659.
- [106] Purnell, P., Short, N. R. y Page, C. L. (2001a). Modeling durability in GRC. GRC Proceedings 2001, Dublin, Irlanda.
- [107] Purnell, P., Short, N. R. y Page, C. L. (2001b). Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 1: mechanical testing and chemical analysis. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 3 2, nº 12: pp. 1777–1787.
- [108] Purnell, P., Short, N. R., Page, C. L. y Majumdar, A. J. (2000b). Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement. Cement and Concrete Research, Vol. 30, nº 11: pp. 1747–1753.
- [109] Purnell, P., Short, N. R., Page, C. L., Majumdar, A. J. y Walton, P. L. (1999). Accelerated ageing characteristics of glass-fibre reinforced cement made with new cementitious 271 matrices. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 30, nº 9: pp. 1073– 1080.
- [110] Purnell, P., Short, N. R., Page, C. L., Majumdar, A.J. y Walton, P. L. (1998). Durability of GRC made with new cementitious matrices. GRC Proceedings 1998, Cambridge, Reino Unido.
- [111] Ramakrishna, G. y Sundararajan, T. (2005). Impact strength of a few natural fiber reinforced cement mortar slabs: a comparative study. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, nº 5: pp. 547–553.
- [112] Ross, C. A., Tedesco, J. W. y Kuennen, S. T. (1995). Effects of strain rate on concrete strength. ACI Materials Journal, Vol. 92: pp. 37–47.
- [113] Sánchez Paradela, L. y Sánchez Gálvez, V. (1989). Los cementos reforzados con

- fibras de vidrio. Hormigón y Acero, Vol. 173: pp. 113–126. 272
- [114] Sánchez Paradela, L. y Sánchez Gálvez, V. (1991). Comportamiento atracción de cementos reforzados con fibras de vidrio. Informes de la construcción, Vol. 43: pp. 77–89.
- [115] Sánchez Paradela, L. y Sánchez Gálvez, V. (1995). Improving the long term strength retention of GRC by using an additive to the cement paste. GRC Proceedings 1995, Estrasburgo, Francia .
- [116] Sánchez Paradela, M. L. y Sánchez Gálvez, V.: Comportamiento a tracción de Cementos Reforzados con Fibras de Vidrio. Informes de la Construcción, Vol. 43. nº 413 May-Jun 1991.
- [117] Sánchez-Gálvez, V.: Los Hormigones reforzados con Fibra de Vidrio.
- [118] Segurado, J. y LLorca, J. (2004). A new three-dimensional inter face finite element to simulate fracture in composites. International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, nº 11-12: pp. 2977–2993.
- [119] Seneviratne, A. M. G., Short, N. R., Purnell, P. y Page, C. L. (2002). Preliminary investigations of the dimensional stability of super-critically carbonated glass fiber reinforced cement. Cement and Concrete Research, Vol. 32, nº 10: pp. 1639–1644.
- [120] Server, W. L., Wullaert, R. A . y Sheckhard, J. W. (1977). Evaluation of current procedures for dynamic fracture toughness testing. Flaw Growth and Fracture, pp. 446–461.
- [121] Shaaban, A. y Gesund, H. (1994). Punching shear strength of steel fiber reinforced concrete flat plates. ACI Structural Journal , Vol. 91: pp. 406–414 .
- [122] Singh, B. y Majumdar, A. J. (1981). Properties of GRC containing inorganic fillers. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 3, nº 2: pp. 93–102.
- [123] Singh, D., Singh, J. P. y Wheeler, M. J. (1996). Mechanical behavior of SiC (f) /SiC composites and correlation to in situ fiber strength at room and elevated temperature. Journal American Ceramics Society, Vol. 79: pp. 591–596.
- [124] Stein, C. y Tavener, C. (1993). Material selection, an architect's view. a case study of the reconstruction of a mayor landmarked gothic revival building. GRC Proceedings 1993, Copenague, Dinamarca.
- [125] Suaris, W. y Shah, S. P. (1983). Properties of concrete subjected to impact. Journal of Structural Engineering, Vol. 109: pp. 1727–1741.
- [126] Sufiyan, S. S. (1995). Mass production of custom designed GRC cladding panels. GRC Proceedings 1995, Estrasburgo, Francia.

- [127] Takeuchi, Y., Nishibori, S. y Kobayashi, M. (2003). Freeze-thaw resistance of premix GRC. GRC Proceedings 2003, Barcelona, España.
- [128] The Glass Fibre Reinforced Cement Association. The Congresses.
- [129] Thiery, J.: Durabilité en Matière Cimentaire des nouveaux verres AR.
- [130] Vambersky, J. N. J. A.: Designing GRC.
- [131] Van Der Plas, C.: The many Improvements of GRC by polymer modification.
- [132] Wang, Y., Li, V. C. y Backer, S. (1988). Modeling of fiber pull- out from a cement matrix. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 10, nº 3: pp. 143–149.
- [133] West, J.M., DeVekey, R. C. y Majumdar, A. J. (1985). Acrylic-polymer modified GRC. Composites, Vol. 16, nº 1: pp. 33–40.
- [134] Wijk, G., Collin, A. y Amiree, R. (2001). Sphere penetration into gelatine and board. Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics. 273
- [135] Wu, H. C. y Li, V. C. (1994). Trade-off between strength and ductility of random discontinuous fiber reinforced cementitious composites. Cement and Concrete Composites, Vol. 16, nº 1: pp. 23–29.
- [136] Wu, H.C. y Li, V. C. (1995). Stochastic process of multiple cracking in discontinuous random fiber reinforced brittle matrix composites. International Journal of Damage Mechanics, Vol. 4: pp. 83–102.
- [137] Zhang, Y., Sun, W., Shang, L. y Pan, G. (1997). The effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites. Cement and Concrete Research, Vol. 27, nº 12: pp. 1885–1891.
- [138] Zhu, W. y Bartos, P. J. M. (1997). Assessment of inter facial microstructure and bond properties in aged GRC using a novel microindentation method. Cement and Concrete Research, Vol. 27: pp. 1701–1711.
- [139] Zhu, W., Trtik, P. y Bartos, P. J. M. (2001). Improving the efficiency of fiber reinforcement in GRC. GRC Proceedings 2001, Dublín, Irlanda.
- [140] Zok, F. W. y Spearing, S. M. (1992). Matrix crack spacing in brittle matrix composites. Journal of the American Ceramics Society, Vol. 40: pp. 2033–2043.
- [141] Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. y Curran, D. R. (1982). Impact Dynamics. John Wiley & Sons

