



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE MASTER

---

Estudio y diseño de una solución constructiva  
sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío  
en Chile.

---

*Presentado por*

Potti Guindal, Álvaro

---

*Para la obtención del*

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

*Curso: 2020/2021*

*Fecha: 13/07/2021*

*Tutor: Julia Irene Real Herraiz*



# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES, OBJETIVOS, ALCANCE Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>5</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	6
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE .....	6
1.3 METODOLOGÍA.....	7
<b>CAPÍTULO 2: ESTUDIO DE ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	9
2.2 VARIABLES Y NIVELES DE ESTUDIO.....	9
2.2.1 VARIABLE 1. RELACIÓN AGUA - CEMENTO.....	10
2.2.2 VARIABLE 2. PORCENTAJE DE ÁRIDO A SUSTITUIR POR NFU .....	12
2.2.3 VARIABLE 3. TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE CAUCHO A INTRODUCIR EN EL HORMIGÓN .....	19
2.2.4 VARIABLE 4. TAMAÑO DE LOS ÁRIDOS A INTRODUCIR EN EL HORMIGÓN .....	20
2.3 CONCLUSIONES .....	25
<b>CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DE POSIBLES DOSIFICACIONES .....</b>	<b>27</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	28
3.2 MODELO ESTADÍSTICO A UTILIZAR.....	28
3.3 APLICACIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO DE TAGUCHI .....	32
3.4 CONCLUSIONES .....	35
<b>CAPÍTULO 4: FABRICACIÓN Y ENSAYO DE DOSIFICACIONES.....</b>	<b>37</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	38
4.2 ENSAYOS A REALIZAR .....	39
4.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	39
4.2.2 TRACCIÓN INDIRECTA .....	41
4.2.3 COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO .....	43
4.2.4 DETERMINACIÓN DE LA DOCILIDAD.....	44
4.2.5 EMBUDO EN V .....	45

4.2.6	ESCLERÓMETRO .....	46
4.2.7	MÓDULO ELÁSTICO .....	47
4.2.8	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL SATURADA Y DENSIDAD REAL SECA .....	50
4.2.9	MÉTODOS DE ENSAYO - DETERMINACIÓN DE LA IMPERMEABILIDAD AL AGUA .....	51
4.3	MATERIALES NECESARIOS .....	51
4.3.1	RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y CONSISTENCIA .....	52
4.3.2	TRACCIÓN INDIRECTA .....	53
4.4	MÓDULO ELÁSTICO .....	53
4.4.1	COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO .....	54
4.4.2	DENSIDAD .....	55
4.4.3	EMBUDO EN V .....	55
4.4.4	ESCLERÓMETRO .....	56
4.4.5	IMPERMEABILIDAD .....	56
4.5	ACOPIO DE MATERIAL .....	57
4.6	FABRICACIÓN DE PROBETAS .....	58
4.6.1	INCIDENCIAS REGISTRADAS .....	58
4.7	EJECUCIÓN DE ENSAYOS .....	62
4.7.1	INCIDENCIAS REGISTRADAS .....	62
4.8	RESULTADOS.....	65
4.9	CONCLUSIONES .....	67
<b>CAPÍTULO 5: VALORIZACIÓN ECONÓMICA DE LAS DOSIFICACIONES.....</b>		<b>68</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	69
5.2	VALORIZACIÓN ECONÓMICA DE MATERIALES.....	69
5.3	COSTOS REFERIDOS AL PROCESO DE INSTALACIÓN DE CADA DOSIFICACIÓN.....	71
5.4	COSTOS TOTALES POR DOSIFICACIÓN .....	75
5.5	CONCLUSIONES .....	76
<b>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS MULTICRITERIO. SELECCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES RELEVANTES .....</b>		<b>78</b>

6.1	INTRODUCCIÓN .....	79
6.2	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES TÉCNICAS.....	79
6.2.1	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	80
6.2.2	RESISTENCIA A TRACCIÓN .....	80
6.2.3	MÓDULO ELÁSTICO .....	80
6.2.4	COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO .....	81
6.2.5	DENSIDAD.....	81
6.2.6	CONSISTENCIA.....	81
6.2.7	EMBUDO EN V .....	81
6.2.8	ESCLERÓMETRO .....	81
6.2.9	PERMEABILIDAD .....	82
6.2.10	VARIABLES FINALES.....	82
6.3	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES ECONÓMICAS.....	82
6.4	ANÁLISIS MULTICRITERIO.....	83
6.5	CONCLUSIONES .....	88
<b>CAPÍTULO 7: ANÁLISIS SÍSMICO MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA.....</b>		<b>90</b>
7.1	INTRODUCCIÓN .....	91
7.2	DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO .....	91
7.2.1	DIMENSIONES GENERALES DEL MODELO .....	91
7.2.2	TIPOLOGÍA Y DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	95
7.2.3	CONDICIONES DE CONTORNO .....	97
7.2.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	98
7.2.5	METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE CARGAS .....	98
7.3	SIMULACIÓN SÍSMICA DEL CANAL .....	100
7.3.1	ALTERNATIVAS DE ESTUDIO .....	100
7.3.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL.....	105
7.3.3	RESULTADOS DEL ANÁLISIS SÍSMICO ESPECTRAL.....	107

7.4	OBTENCIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	111
7.5	CONCLUSIONES .....	113
<b>CAPÍTULO 8: ESTUDIO DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y PUESTA EN OBRA.....</b>		<b>114</b>
8.1	INTRODUCCIÓN .....	115
8.2	PREPARACIÓN DEL CAUCE.....	115
8.2.1	LIMPIEZA DEL CAUCE.....	116
8.2.2	DESBROCE DEL CAUCE.....	116
8.2.3	PERFILADO Y NIVELACIÓN .....	117
8.3	PREPARACIÓN DE MAQUINARIA .....	119
8.4	ACTIVIDADES RELATIVAS AL GEOTEXTIL .....	121
8.4.1	DIMENSIONES DEL COLCHÓN GEOTEXTIL.....	121
8.4.2	UNIÓN ENTRE GEOTEXILES.....	125
8.4.3	TIPO DE GEOTEXTIL .....	125
8.4.4	PROCEDIMIENTO DE MONTAJE.....	127
8.5	CONCLUSIONES .....	134
<b>ANEXO I: RELACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE CON EL TFM .....</b>		<b>136</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>		<b>141</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>		<b>145</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>147</b>

## **Capítulo 1: Antecedentes, objetivos, alcance y metodología**

---

## **1.1 ANTECEDENTES**

---

La realización del presente proyecto nace ante el problema de la ineficacia hídrica de gran parte de los canales de regadío existentes actualmente en Chile. Esta falta de funcionalidad de los canales es debida a las constantes pérdidas de caudal que sufren estos, motivadas por la inexistencia o malas condiciones del revestimiento. Además, hay que tener en cuenta la gran actividad sísmica del país, que provoca que este tipo de infraestructuras, entre muchas otras, vea condicionado su correcto funcionamiento por los efectos negativos que provocan este tipo de sucesos.

Con ello, se propone el diseño y desarrollo de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile. Para ello, el sistema estará compuesto, básicamente, de dos elementos: un colchón geotextil impermeable, que actúa como continente, y un hormigón elástico y bombeable que actúa como contenido.

El colchón geotextil es un producto comercial ya existente en el mercado. Se ha de elegir un producto cuya anchura permita cubrir el perímetro transversal del canal y cuya longitud esté en consonancia con la bombeabilidad del hormigón elástico a diseñar y fabricar. Las dimensiones del colchón geotextil no son un aspecto limitante del proyecto puesto que existe una enorme variabilidad en el mercado.

El hormigón elástico bombeable con el que se rellenará el colchón es la parte más importante del proyecto. El conseguir un hormigón elástico dotará a la solución de una adecuada resistencia frente a las acciones sísmicas, por lo que su vida útil aumentará, y con ella disminuirá el costo a largo plazo. Paralelamente, y con el fin de minimizar los costos a corto plazo, el diseño de la solución permitirá que esta sea instalable con medios tradicionales de puesta en obra, lo cual exige que el nuevo hormigón sea bombeable.

## **1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE**

---

Como se ha comentado en el punto anterior, el objetivo del presente TFM es estudiar y desarrollar una nueva solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío de Chile. No obstante, para que este objetivo pueda llevarse a cabo, se requiere la consecución parcial de una serie de objetivos específicos que se exponen a continuación:

- Estudio de los antecedentes necesarios para diseñar correctamente la solución definida
- Diseño factorial de dosificaciones a partir de modelos estadísticos (Taguchi)
- Fabricación y ensayo de dosificaciones para comprobar la idoneidad de las mismas y caracterizar sus propiedades principales
- Empleo de herramientas de modelación numérica (MEF) para evaluar la resistencia sísmica de las diferentes alternativas
- Realización de un análisis multicriterio, teniendo en cuenta variables técnicas y económicas, para seleccionar la opción óptima

Con todo ello, el alcance del presente TFM será encontrar la solución más idónea para revestir canales de regadío en Chile, a través de una valoración técnico-económica de las alternativas propuestas.

### **1.3 METODOLOGÍA**

---

Para el desarrollo completo del presente documento, se comenzará estudiando los antecedentes necesarios de todo aquello a tener en cuenta para el diseño de la solución constructiva. Dentro del desarrollo de esta, la primera parte estará dedicada al desarrollo de la dosificación del hormigón. En esta parte, se establecerán todas las pautas necesarias para fabricar y ensayar dicha dosificación. Además, se ensayarán en laboratorio las potenciales dosificaciones para caracterizarlas .

La segunda parte estará enfocada en diseñar la solución constructiva de revestimiento de canales, para lo que se utilizará el programa ANSYS de modelación numérica. Se realizará un análisis sísmico de las dosificaciones caracterizadas en la primera parte del proyecto, para seleccionar aquella que presente un comportamiento más óptimo. Por último, se establecerán las pautas para llevar a cabo la construcción y puesta en obra de la solución planteada.



## **Capítulo 2: Estudio de antecedentes**

---

## **2.1 INTRODUCCIÓN**

---

La obtención de la dosificación definitiva del material que se va a instalar en el interior del colchón geotextil es un proceso de suma complejidad técnica, donde se debe considerar una determinada cantidad de variables y posibilidades en cada una de ellas. Por ello, como punto de partida del proyecto, en el presente Capítulo se exponen los resultados relativos a los estudios previos realizados sobre las variables tenidas en cuenta para obtener la mezcla de hormigón.

De esta forma, el estudio de antecedentes se centra en determinar cuáles son las variables de interés para encontrar la dosificación correcta, así como los niveles a los cuáles se estudiarán estas variables. Concretamente, se consideran 4 variables significativas, las cuáles se enumeran a continuación:

- Porcentaje de árido a sustituir por NFU
- Relación agua – cemento
- Diámetro máximo de árido
- Diámetro máximo de los gránulos de caucho

Cada una de las variables anteriores va a presentar 3 niveles distintos, los cuáles se van a indicar y justificar a lo largo del presente Capítulo. La selección de cada uno de estos niveles se va a realizar considerando los requisitos que presentará el hormigón una vez se vaya a disponer en obra. Estos requisitos son fundamentalmente que la mezcla sea bombeable mientras se encuentre en estado fresco, pero que una vez el hormigón haya fraguado y se endurezca, adquiera propiedades elásticas manteniendo en todo momento un elevado grado de impermeabilidad.

Si bien estas propiedades pueden resultar antagónicas, esta tarea se va a centrar en encontrar un punto de equilibrio entre todas las variables consideradas de manera que la mezcla de hormigón dosificada ofrezca plenas garantías para funcionar como relleno del colchón geotextil de la solución.

## **2.2 VARIABLES Y NIVELES DE ESTUDIO**

---

En la introducción de este Capítulo se ha comentado que tanto las variables como los niveles que compongan cada una de ellas deben seleccionarse con miras a conseguir una mezcla que reúna tres características fundamentales: bombeable en estado fresco, y elástica e impermeable una vez haya endurecido. Si bien es cierto que estas características pueden resultar antagónicas en un hormigón, en los siguientes puntos se justificará la manera en que se pretenden reunir en una sola mezcla para que ésta pueda cumplir su papel de relleno del colchón geotextil. Tras analizar el estado actual de la técnica, se ha visto como existen una serie de condicionantes y limitaciones al respecto de los distintos componentes del hormigón. Estas limitaciones surgen principalmente desde el punto de vista de la puesta en obra del hormigón, ya que en el marco de este proyecto la ejecución del revestimiento es un proceso complejo que tiene en el relleno del colchón su punto más comprometido. A continuación,

se comentarán de forma individualizada cada una de las variables tenidas en cuenta, indicando cuando proceda las principales limitaciones que se deben superar en cada caso.

### 2.2.1 VARIABLE 1. RELACIÓN AGUA - CEMENTO

El valor de la relación agua - cemento es una de las decisiones más importantes que se deben tomar a la hora de dosificar un hormigón. En función de la cantidad de agua añadida a la mezcla, se conseguirá una consistencia u otra. La consistencia de un hormigón puede ser seca, plástica, blanda, fluida y líquida en función de la cantidad de agua que ésta posea. Como regla general, la mínima relación agua – cemento para que se produzca la hidratación de todos los elementos que compongan la mezcla, y que además permita la ligazón entre estos, es de 0,42 [1]. Esta relación agua – cemento, no obstante, daría pie a una pasta de hormigón muy seca, sin apenas trabajabilidad, la cual sería imposible bombear a través de una manguera sin utilizar algún tipo de aditivo superplastificante de gran potencia.

Según fuentes consultadas [1], el aumento de agua no lleva asociado un aumento igual de la fluidez en todos los casos. Generalmente, esto depende del tipo de árido, de su granulometría o de la existencia o no de adiciones en la pasta de cemento. De manera habitual, la consistencia del hormigón se mide mediante el procedimiento del cono de Abrams. Este es un método sencillo empleado por diferentes normativas de distintos países del mundo. A continuación, se muestra un ejemplo encontrado en [1], donde se estudiaron las variaciones en el descenso en el cono de Abrams ante distintas relaciones agua – cemento.

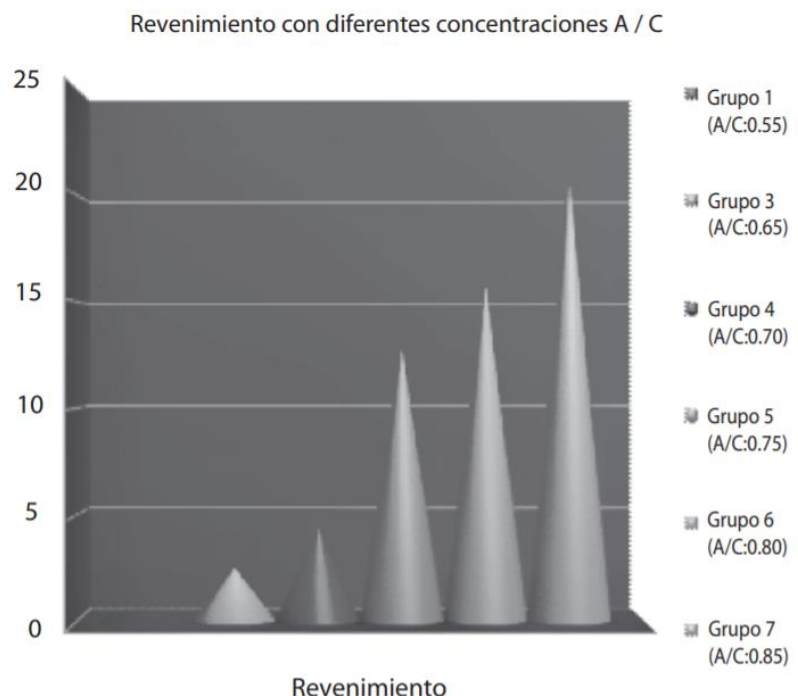


Figura 2.1 Descenso en cono de Abrams de muestras con distintas relaciones agua – cemento..  
Fuente: [1]

En la anterior imagen se observa como para relaciones agua – cemento cercanas a 0,5 o 0,55 se producen descensos en el cono de Abrams de escasa importancia, lo cual implica que la consistencia de la mezcla sería seca. En cambio, conforme se aumenta la relación agua – cemento hacia valores superiores a 0,7 el descenso en el cono de Abrams se incrementa de manera notable, dando pie a consistencias fluidas o líquidas.

Para realizar el bombeo de una mezcla de hormigón, la consistencia de la mezcla deberá ser líquida o fluida [2]. Esto implicaría dotar a la mezcla de una cantidad elevada de agua, la cual facilitaría sumamente el bombeo de la misma y la instalación en el interior del colchón geotextil. Si bien esta sería la decisión adecuada con miras a conseguir una mezcla de hormigón bombeable, hay que remarcar que cantidades excesivas de agua no contribuyen a conseguir una mezcla de carácter impermeable. Con el único objetivo de conseguir la trabajabilidad en una mezcla de hormigón, el agua utilizada es siempre superior a la necesaria para que el cemento fragüe. En el caso de 100 kg de cemento, se necesitarían, en teoría, únicamente 18 kg de agua, tratándose de una relación agua – cemento de 0,18. Sin embargo, para convertir el cemento en una pasta manejable se precisa incrementar la cantidad de agua hasta unos 25 o 30 kg, consiguiendo una relación agua – cemento de 0,25 o 0,30. Finalmente, para humedecer los áridos, la relación agua – cemento efectiva se encuentra normalmente entre 0,45 y 0,7. De este modo, en el hormigón recién instalado existe siempre una cantidad muy elevada de agua que no se combina en ningún momento con la pasta de cemento. Este agua sobrante posteriormente se evapora, generando así en el cemento fraguado una red de canales capilares intercomunicados y ramificados entre sí, a causa de la presencia de granos de arena, provocando en la masa del hormigón una estructura micro fisurada que facilita la posterior penetración del agua [3].

El requisito para que la mezcla, una vez haya fraguado, sea impermeable es que esta resulte homogénea y con una porción reducida de aire ocluido. Es por esto que ciertos autores limitan la cantidad de agua a introducir en el hormigón a relaciones agua – cemento que no superen el 0,6 o, en ocasiones especiales, el 0,7 [3]. Además, una cantidad excesiva de agua favorece la aparición de fenómenos de segregación de los áridos, los cuáles también podrían poner en riesgo la impermeabilidad del hormigón en diferentes puntos del revestimiento. Una de las técnicas para mitigar la aparición de fenómenos de segregación es realizar un vibrado del hormigón una vez se haya dispuesto, completado con un cuidadoso curado. No obstante, en este caso en concreto no es posible realizar ninguna de estas dos actuaciones, de manera que la única forma de eludir la aparición de fenómenos de segregación será controlar al máximo la presencia de agua en el hormigón, así como realizar una ejecución muy cuidadosa de la mezcla.

En la siguiente imagen se observa una muestra de hormigón ya endurecida que ha experimentado fenómenos de segregación. En ella se puede ver como los áridos han tendido a separarse de la mezcla y se ven claramente como un componente aparte. Este suceso pondría en serio peligro la impermeabilidad del revestimiento.



Figura 2.2 Fenómeno de segregación en hormigón ya endurecido. Fuente: [4]

Finalmente, y como punto final a este apartado, se determinan los tres niveles en los que va a actuar esta variable. Se ha visto que para que un hormigón resulte impermeable el límite en la relación agua – cemento se encuentra entre 0,6 y 0,7. Mientras, se ha comprobado a su vez que para que la mezcla resulte bombeable la consistencia debe ser fluida o líquida, lo cual quiere decir que la relación agua – cemento debería ser, como mínimo, superior a 0,7. Así, los tres niveles de la variable “Relación agua – cemento” serán: 0,6, 0,65 y 0,7. De este modo, se tratará de encontrar el valor intermedio idóneo para conseguir la bombeabilidad de la mezcla, pero sin descuidar en ningún momento la impermeabilidad del hormigón una vez éste haya fraguado.

### 2.2.2 VARIABLE 2. PORCENTAJE DE ÁRIDO A SUSTITUIR POR NFU

En el apartado anterior, las diferentes consideraciones realizadas sobre la variable analizada han tratado especialmente su influencia sobre la capacidad impermeable y de bombeo del hormigón dosificado. En este caso, la sustitución de parte del NFU por árido se realiza para conseguir la elasticidad suficiente en el revestimiento de manera que los fenómenos sísmicos que tuvieran lugar no fisuren o dañen la estructura.

Así mismo, hay que tener presente que los gránulos de caucho procedente de neumático fuera de uso presentan una adherencia con la pasta de cemento mucho menor que los áridos convencionales. De este modo, el empleo de NFU genera necesariamente un volumen de huecos importante que hay que tener en cuenta a la hora de valorar la impermeabilidad del hormigón. En las siguientes líneas se comentan las publicaciones más interesantes.

En el año 2009, Ganjian, E et al [5] ensayaron diferentes mezclas de hormigón con caucho procedente de NFU sustituyendo porcentajes de árido del 5, 7,5 y 10 % por caucho de un tamaño comprendido entre 25 y 850 milímetros. El objetivo de la investigación era conocer las propiedades del hormigón conforme aumentaba la cantidad de NFU, de modo que se realizaron ensayos de resistencia a

compresión, resistencia a flexión, resistencia a tracción y módulo de elasticidad. Así mismo, también se comprobó la durabilidad del hormigón mediante un ensayo de permeabilidad y otro de absorción.

En el estudio del módulo de elasticidad, las reducciones para el caso de mayor sustitución de árido por NFU alcanzaron prácticamente el 50 % del valor inicial, comprobando también considerables reducciones para los otros casos de sustitución. De esta manera, quedó comprobada la gran influencia que ejerce la adición de NFU sobre la elasticidad de una mezcla de hormigón. En la siguiente figura quedan expresados los anteriores resultados:

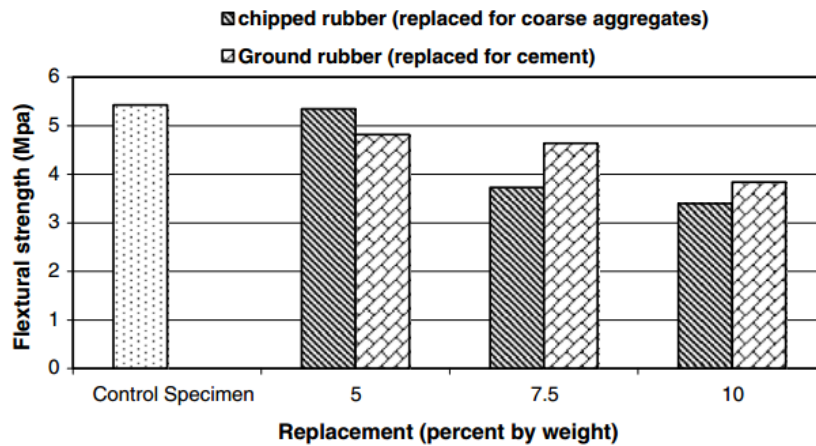


Figura 2.3 Resistencia a flexión de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [5]

Una vez analizadas las propiedades estructurales del hormigón, se ensayaron la permeabilidad y la penetración de agua. En el caso de la permeabilidad, si la probeta convencional mostraba una penetración de agua de 14 mm, el caso de la probeta con más añadido de NFU alcanzó los 35 mm, es decir, la permeabilidad aumentó más del doble. Sin embargo, en los casos de menor sustitución apenas aumentó en 7 milímetros. De nuevo, los resultados quedan plasmados en la siguiente figura.

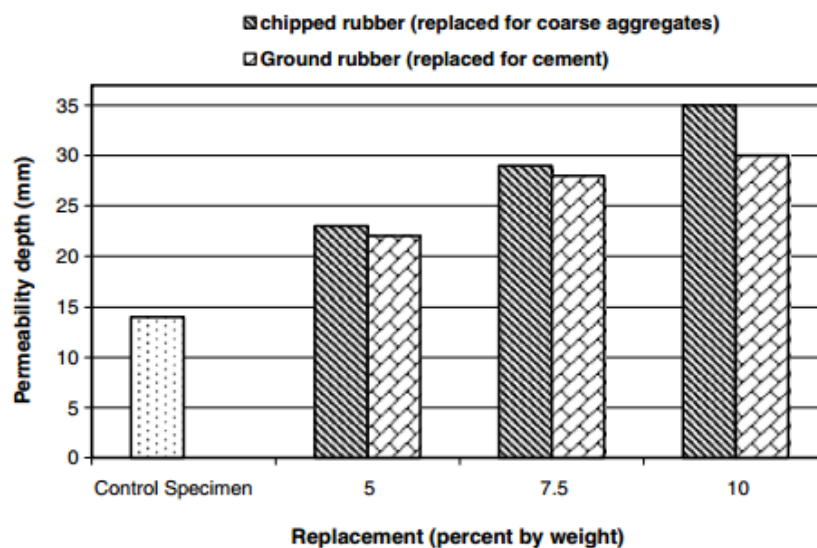


Figura 2.4 Permeabilidad de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [5]

En el caso de la absorción de agua, la probeta convencional mostró resultados del 2 % en este indicador, mientras que la probeta con más contenido de NFU el indicador de absorción de agua era cercano al 4 %. No obstante, para los casos de menores porcentajes de sustitución este indicativo se mantuvo prácticamente igual. En la siguiente figura quedan plasmados estos resultados.

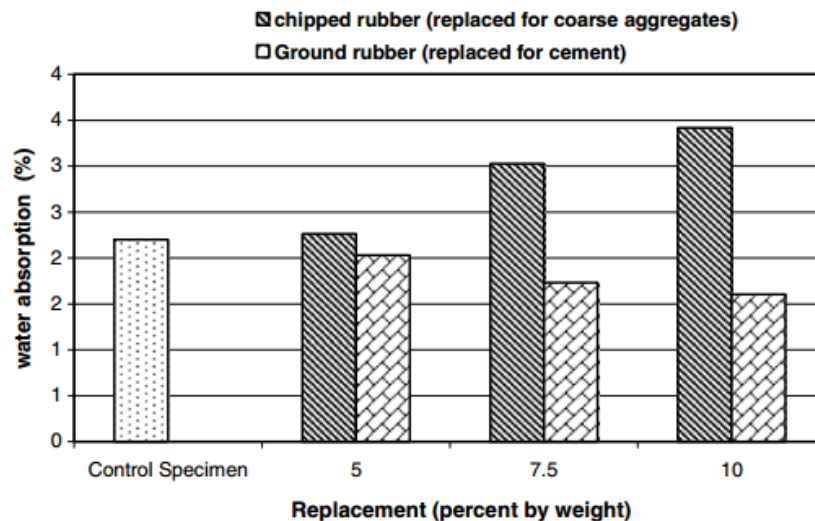


Figura 2.5 Absorción capilar de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [5]

En este artículo quedó demostrada la influencia que tiene el NFU tanto en el aumento de la elasticidad del hormigón (disminuyendo el módulo de elasticidad) como en la permeabilidad de la mezcla. No obstante, en este caso de estudio se emplearon porciones muy grandes de NFU, de manera que era previsible el aumento significativo de permeabilidad.

Otro estudio de índole similar tuvo lugar en el año 2012 a cargo de Lin, C.Y et al [6]. En este artículo científico, se realizaron ensayos experimentales sobre el coeficiente de amortiguamiento y las propiedades estructurales de hormigones que sustituyen parcialmente el árido fino por gránulos de caucho proveniente de NFU. Los gránulos de caucho incluidos tenían tamaños máximos de #10 y #40 según normativa ASTM. Los resultados fueron muy satisfactorios desde el punto de vista de la capacidad amortiguadora de vibraciones por parte del hormigón con caucho proveniente de NFU. En este ensayo se probó que una sustitución de árido fino por NFU de tamaño máximo #10 de no más de un 7,5 % consigue al menos un aumento del coeficiente de amortiguación de un 156 %. En caso de utilizar árido de tamaño máximo #40, la mejora en el coeficiente de amortiguación es de hasta un 194 %.

Así mismo, Khaloo, A et al desarrollaron también estudios sobre las variaciones registradas en las propiedades del hormigón cuando se introducían diferentes porcentajes de NFU [7]. Este artículo surgió en base a una nueva idea de gestión de residuos que pretendía reutilizar los neumáticos fuera de uso como material de construcción. En esta publicación en concreto, el NFU se utiliza como añadido de hormigón pero, a diferencia de los casos anteriores, en vez de sustituir parcialmente el árido, sustituye el hormigón en porcentajes del 12,5, 25, 37,5 y 50 %.

Tras el desarrollo de los ensayos experimentales pertinentes, se alcanzaron las siguientes conclusiones:

- Las mezclas en estado fresco de hormigón con NFU presentan un menor peso específico cuanto más caucho contienen. Respecto a la trabajabilidad, ésta disminuye cuanto más caucho añadido existe en la probeta, no obstante, se obtienen buenos comportamientos en el hormigón cuanto más finas son las partículas de caucho incluidas.
- Se observa un comportamiento más dúctil del hormigón cuando contiene NFU. El modo de fallo del material es menos caótico, y ocurre con una menor rapidez que en el caso de hormigones convencionales. Además, el plano de rotura alcanzado es más gradual y uniforme.

En el año 2008, Bustamente.R et al [8] realizaron estudios similares a los anteriormente comentados pero esta vez trabajando sobre placas de mortero. En esta publicación se estudió la influencia del caucho procedente de NFU en placas de mortero de caucho – cemento. La sustitución del material se realizó hasta que el NFU superó el 30 % en volumen del material. De nuevo, se estudiaron propiedades como la resistencia a compresión o a flexión, sin embargo, en estos estudios se analizaron otras propiedades físicas como la densidad aparente o el coeficiente de absorción, propiedades térmicas o propiedades acústicas como el ruido aéreo o ruido a impacto.

Las conclusiones que se alcanzaron tras llevar a cabo los ensayos experimentales fueron las siguientes:

- Propiedades físicas: En este caso se midieron el coeficiente de absorción, la densidad aparente y la dureza superficial. El coeficiente de absorción experimentó un aumento desde un 1,02 % a un 2,92 % para el caso de mayor adición de NFU, es decir, aumentó casi 3 veces. La densidad aparente disminuyó aproximadamente un 25 % y por último, la dureza superficial, presentó un descenso cercano al 10 %. No obstante, para los casos de menores porcentajes de sustitución, apenas se registraron variaciones.

PROBETAS Contenido de caucho*	DENSIDAD APARENTE g/cm <sup>3</sup>	COEF. DE ABSORCIÓN %	Dureza superficial Shore C
0%	2,09	1,02	93
7%	1,80	1,55	72
10%	1,56	2,66	83
12%	1,49	2,75	66
15%	1,16	-	60
17%	1,60	2,92	80

(\*) porcentajes en relación al peso total del mortero.

Figura 2.6 Propiedades físicas de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [8]

- Respecto del módulo de elasticidad, se registraron reducciones de hasta el 70 % para el caso de mayor sustitución de árido por NFU. Para el resto de situaciones, la disminución de este módulo rondo o incluso superó el 50 %.



Probetas prismáticas % de caucho en la mezcla	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Módulo de Elasticidad E(GPa)	Resistencia a flexión N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión N/mm <sup>2</sup>
Sin caucho	2,23	27,00	7,32	54,77
7%	1,97	17,67	6,16	26,48
10%	1,63	10,85	4,59	17,97
12%	1,58	9,06	4,14	14,80
15%(1)	1,29	5,75	2,76	7,88
15%(2)	1,16	4,02	1,91	5,28
17 %	1,60	8,50	4,48	13,82

Figura 2.7 Propiedades físicas de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [8]

En el año 2014, J. Real et al. realizaron estudios referentes a la mitigación de vibraciones provocadas en entornos ferroviarios [9]. En esta publicación se estudió la mitigación de vibraciones provocadas en entornos ferroviarios comprobando la eficacia de distintos elementos amortiguadores. En el artículo, concretamente, se evalúan escenarios donde existen limitaciones impuestas por el entorno de las vías y que pueden limitar la actuación de estas barreras de ondas vibratorias. Se ensayaron tanto aislamientos pasivos como activos, comprobando que en el primer caso son más efectivos zanjas abiertas o materiales de revestimiento más bien rígidos, y que en el segundo caso resultan más efectivos los amortiguamientos más blandos. De ambas tipologías de amortiguadores se comentan sus ventajas e inconvenientes, determinando que quizá una combinación de ambos pueda contribuir a equilibrar las diferencias entre ellos. Finalmente, en el artículo se pone de manifiesto la influencia que tienen las frecuencias registradas en la decisión definitiva del material de amortiguamiento adecuado.

Aiello, M.A. et al realizaron a su vez ensayos en el año 2010 acerca de la influencia del NFU en el hormigón tanto en estado fresco como endurecido [10]. El objetivo principal de esta publicación era investigar las propiedades de varias mezclas de hormigón tanto en estado fresco como endurecido, obtenidas a partir de una sustitución parcial del agregado fino o grueso por caucho procedente de NFU en distintos porcentajes (25, 50 y 75 %). Algunas de las propiedades estudiadas fueron la trabajabilidad en estado fresco, la resistencia a flexión y a compresión y el comportamiento post rotura. Respecto al módulo de elasticidad, este se redujo cerca de un 30 %, lo cual refleja un marcado aumento de la elasticidad de las probetas que contienen NFU. En cuanto al comportamiento en rotura, las mezclas que poseían NFU mostraron un comportamiento menos caótico respecto del caso de hormigón convencional. Este aspecto también resultaría sumamente interesante en el marco de este proyecto. Por último, la trabajabilidad también se vio mejorada, aunque ligeramente, para algunas porciones de NFU. Esta propiedad vuelve a ser muy interesante dentro del campo de actuación de este proyecto.

En el año 2009, Royano, V et al. [11] volvieron a hacer estudios en el hormigón con partículas de NFU, tanto en estado fresco como endurecido. De este modo, se estableció una dosificación estándar de hormigón sobre la cual se sustituyeron porcentajes del 5, 10 y 15 % del árido por NFU, tanto de la porción gruesa como de la porción fina. En estado fresco se analizó la fluidez a partir del ensayo de cono de Abrams, obteniendo una consistencia más fluida a mayor cantidad de NFU incluida en la dosificación de hormigón. Sin embargo, y de manera muy similar a como ha sucedido en el caso anterior, a partir de una determinada cantidad de NFU añadido se apreciaba una clara disminución de la fluidez de la mezcla. Así mismo, estos autores analizaron también la influencia de la granulometría

de NFU en la fluidez del hormigón, concluyendo que, para una misma cantidad de NFU, cuanto más pequeño era el tamaño de las partículas de caucho el hormigón era más fluido.

A continuación, se adjunta la tabla final de resultados del ensayo de consistencia realizado mediante cono de Abrams, donde se observa como un aumento de la cantidad de NFU, en especial de la porción fina, desemboca en un aumento de la capacidad de fluir del hormigón. Desde el punto de vista del proyecto, este aspecto es de elevada importancia, pues el aumento de la cantidad de NFU se ha demostrado que aporta claras ventajas a la hora de aumentar las propiedades elásticas de la mezcla endurecida, por tanto aumentando la cantidad de NFU se estaría favoreciendo la consecución de dos de las tres propiedades demandadas en la mezcla diseñada.

Tipo de hormigón	Fecha del ensayo	Asentamiento	Aspecto del hormigón
HS/C	20 - III - 07	8 cm	
H5%-NFU-F	20 - III - 07	8 cm	
H10%-NFU-F	27 - III - 07	12 cm	
H15%-NFU-F	27 - III - 07	11 cm	
H5%-NFU-G	03 - III - 07	9 cm	
H10%-NFU-G	03 - III - 07	10 cm	
H15%-NFU-G	17 - IV - 07	9 cm	

Figura 2.8 Resultados del ensayo de consistencia medida en cono de Abrams de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [11]

En el estudio también se evaluaron otras propiedades de la mezcla como la resistencia a compresión, a tracción, el módulo de elasticidad o la resistencia al fuego. Nuevamente, el módulo de elasticidad volvió a disminuir conforme se incrementó el porcentaje de árido sustituido por NFU, no obstante, en este caso la diferencia no fue tan perceptible como en otras ocasiones. A continuación, se adjunta una

gráfica donde se observa el descenso del módulo de elasticidad conforme aumenta la cantidad de caucho procedente de neumático fuera de uso.

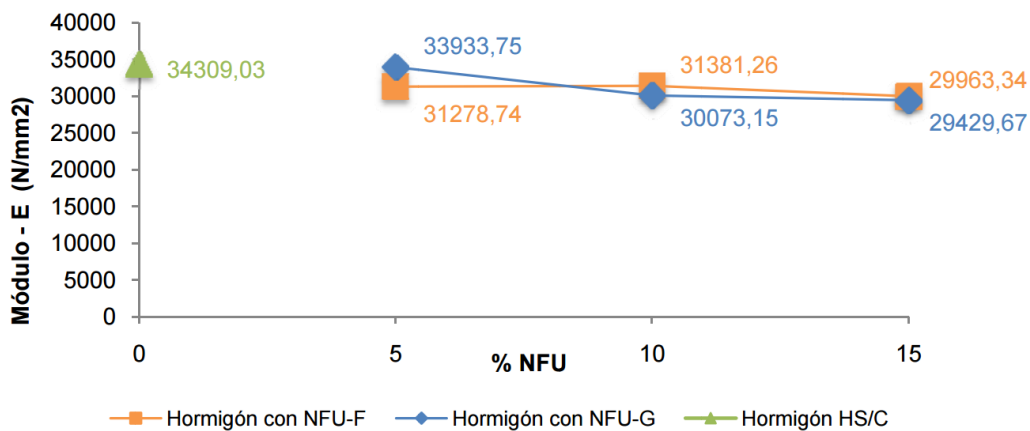


Figura 2.9. Módulo de elasticidad de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [11]

Por otra parte, en este estudio también se realizaron pruebas de porosidad. Hay que recordar que la porosidad está íntimamente ligada con la permeabilidad del hormigón, ya que a mayor índice de poros más facilidad para que estos estén conectados entre sí, y en consecuencia se facilitarían muchísimo más que pasara el agua a través del hormigón. No obstante en la siguiente imagen se ha vuelto a comprobar que para un porcentaje de sustitución reducido la porosidad no aumentaría, sino que disminuye ligeramente.

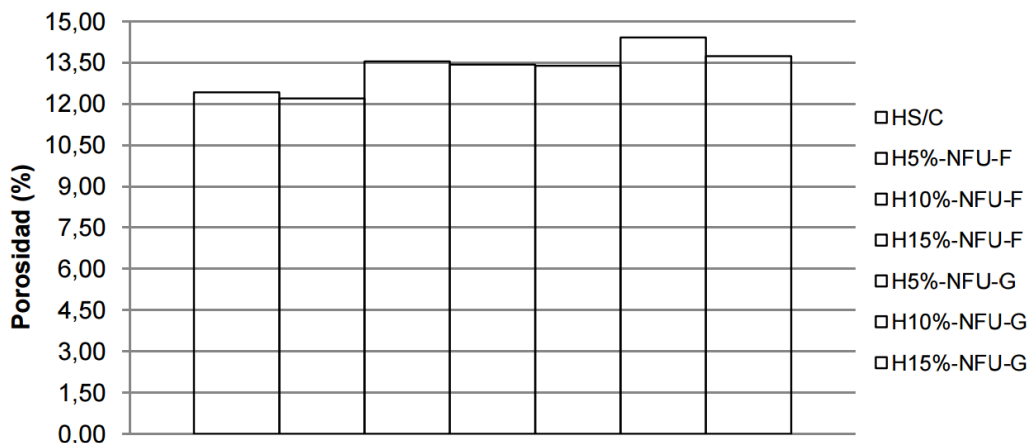


Figura 2.10. Porosidad de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [11]

Una vez se han analizado diferentes estudios correspondientes a la literatura científica, y en vista de que porcentajes reducidos de sustitución de árido por NFU no alterarían excesivamente la capacidad de impermeabilización del hormigón, se proponen tres porcentajes de sustitución que se pueden considerar de reducida magnitud. Según algunas de las publicaciones comentadas anteriormente, el módulo de elasticidad disminuye prácticamente de inmediato al introducir caucho en el hormigón. De esta manera, sería posible encontrar unos porcentajes de sustitución razonables que favorecieran la consecución de ambas características. Por esta razón, y tras analizar la situación, se cree conveniente que los porcentajes de sustitución de árido por NFU sean del 5, 10 y 15 %.

### 2.2.3 VARIABLE 3. TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE CAUCHO A INTRODUCIR EN EL HORMIGÓN

Una vez se han comentado las dos primeras variables de la mezcla de hormigón, se pasa en este apartado a comentar la tercera. En este caso, y una vez se han determinado los porcentajes de sustitución de árido por NFU (5, 10 y 15 %), hay que determinar los niveles relativos al tamaño de las partículas de NFU.

Previamente a entrar en materia se debe realizar una breve reseña referente a las posibilidades de bombeo de la mezcla. Hay que decir que el tamaño máximo de las partículas de caucho vendrá limitado por el diámetro de la tubería que se vaya a emplear. Generalmente, se adopta la premisa de que el tamaño máximo de los gránulos no sea superior a  $\frac{1}{3}D$  tubería. De forma aproximada, se tomará como valor 100 mm de diámetro. De este modo quedaría fijado un tamaño máximo de las partículas de caucho cercano a los 30 milímetros.

A continuación, y a modo de ejemplo, se adjunta una imagen de unas tuberías de bombeo de hormigón convencionales, similares a las que se podrían utilizar para la puesta en obra y ejecución del nuevo sistema de revestimiento [12].



Figura 2.11. Tuberías para bombeo de hormigón. Fuente: [12]

De otro modo, se debe estudiar el tamaño máximo de las partículas de NFU desde el punto de vista de la impermeabilidad de la mezcla una vez ésta haya endurecido. Según fuentes bibliográficas consultadas [3], el tamaño máximo de las partículas y/o áridos (este campo se tratará posteriormente) añadidos al hormigón no puede superar la magnitud de  $\frac{1}{5}e$ , siendo 'e' el espesor de la pieza de hormigón. Como ha sucedido en el caso del diámetro de la tubería, actualmente se desconoce todavía este valor, pues el espesor de la pieza de hormigón dependerá del colchón geotextil seleccionado, y éste a su vez puede variar en función de cada caso de aplicación. Sin embargo, y aproximando de nuevo

este espesor a un valor de 100 milímetros, se obtendría que el tamaño máximo de las partículas de NFU quedaría limitado a 20 milímetros.

Así pues, en base a la información dispuesta en los párrafos anteriores se ha visto que el valor de tamaño máximo más limitante es el segundo, el cual impone el tamaño desde el punto de vista de la consecución de la impermeabilidad. De este modo, se justifica que las partículas de NFU no podrán tener un tamaño superior a los 20 milímetros. No obstante, y en base a los ensayos y estudios que se han realizado en las publicaciones científicas que se han dispuesto en el apartado anterior, se ha visto como las propiedades que se están buscando en el hormigón se ven favorecidas cuanto más pequeño es el tamaño de NFU. Las partículas finas de NFU, también conocidas como polvo de neumático fuera de uso (PNFU), suelen tener un tamaño comprendido entre 1 y 4 milímetros, y dan pie a hormigones más homogéneos y compactos que si se utilizan partículas de mayor tamaño.

Por ejemplo, en los estudios de Verónica Royano (2015) [11] sobre la adición de NFU al hormigón que se han comentado anteriormente, se demostró como algunas propiedades que se ven claramente perjudicadas por la adición del NFU, como lo es por ejemplo el aumento de la permeabilidad de la mezcla debido a un incremento de la porosidad, se verían controladas o incluso reducidas en el caso de emplear partículas pequeñas. De otro modo, si es cierto que el uso de partículas de mayor tamaño da pie a hormigones más elásticos, sin embargo, en este mismo estudio se comprobó que si las partículas pequeñas quedaban uniformemente distribuidas, y la ejecución de la mezcla de hormigón era correcta, el aumento de las propiedades elásticas del hormigón era prácticamente similar.

Así mismo, Ganjian et al (2009) [5] llevaron a cabo estudios de índole similar donde se estudió directamente la permeabilidad del hormigón dosificado. Si bien estos casos la permeabilidad sí aumentaba proporcionalmente conforme se incrementaba la fracción de NFU en la dosificación, se comprobó que esta experimentaba valores ligeramente inferiores cuando la porción de NFU introducida era fina.

Una vez comentados los aspectos anteriores, es momento de determinar los tres niveles que se estudiarán en el análisis de la variable 'Tamaño de las partículas de caucho a introducir en el hormigón'. Para fijar el tamaño de estas partículas no se detallará una dosificación completa, sino que se indicará un tamaño máximo del caucho que no podrá superar. Así pues, los tamaños que se van a fijar a continuación se han considerado, como ya se ha hecho en los apartados anteriores, desde el punto de vista de la consecución de las tres propiedades imprescindibles para el desarrollo del proyecto (elasticidad, bombeabilidad e impermeabilidad). Dicho esto, los niveles a ensayar esta variable serán: tamaño máximo 4 milímetros, tamaño máximo 10 milímetros y tamaño máximo 20 milímetros.

#### **2.2.4 VARIABLE 4. TAMAÑO DE LOS ÁRIDOS A INTRODUCIR EN EL HORMIGÓN**

Respecto al tamaño máximo de los áridos a incluir en el hormigón, valen muchos de los conceptos que se han dispuesto en el apartado anterior. Desde el punto de vista del bombeo de la mezcla, o desde el

punto de vista la impermeabilidad del hormigón una vez haya fraguado, de nuevo el tamaño máximo del árido quedaría limitado a 20 milímetros. Se debe recordar que la fracción de áridos a añadir al hormigón se compone de arena, gravilla y grava. Dado que la parte más gruesa es la grava, cuando se hable de tamaño máximo se estará haciendo referencia a este material.

No obstante, para este caso en concreto, debe considerarse un factor más desde el punto de vista de la puesta en obra del hormigón. El bombeo se realizará, como es habitual, con la ayuda de una tubería que conectará la bomba con el interior del colchón geotextil. En el transporte del hormigón a través de la tubería o de la manguera se hace continuamente inciso en la necesidad de atender a la habitual redistribución de áridos hacia el exterior. Cuando el hormigón sale de la tubería, es habitual observar una concentración mayor de finos en la parte exterior del vertido de hormigón, conociendo este fenómeno como segregación periférica.

El hormigón fresco bombeable es un producto denso en cualquier parte de la tubería de transporte, esto es, que la mezcla de áridos flota con libertad por la pasta de hormigón. Los espacios que se forman entre los granos se saturan de pasta de cemento. Los poros de aire existentes, con acción fluidificante, se comprimen hasta una pequeña fracción de su tamaño natural debido a la presión necesaria para el bombeo y por este motivo pierden su acción fluidificante en el proceso [2].

A continuación, se muestra una imagen donde se observa la segregación periférica de una tubería de 100 milímetros de hormigón para el caso de un hormigón convencional [2].

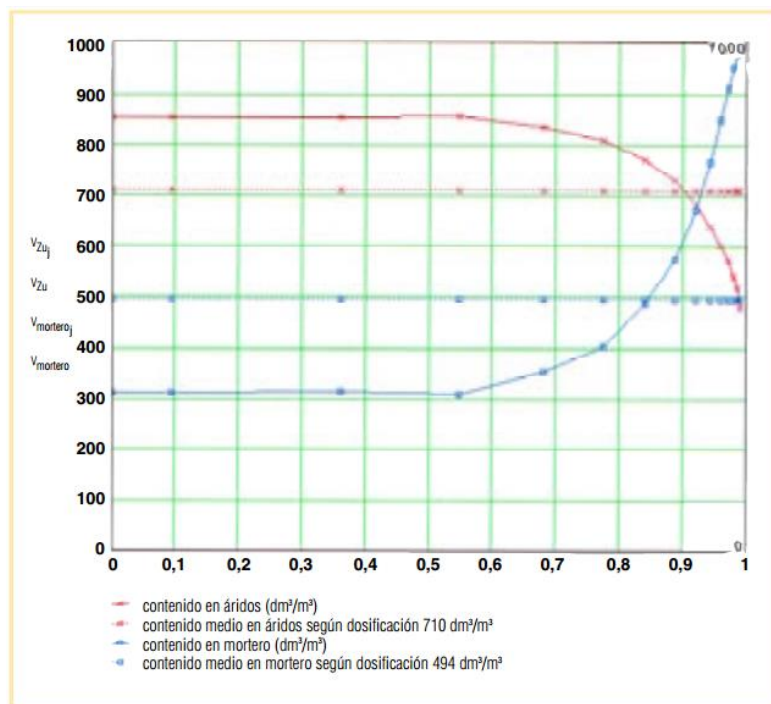


Figura 2.12. Representación de la segregación periférica en tubería de 100 mm. Fuente: [2]

Si se supone una presión de transporte de 85 bar, el grado de aireación que se vierte en caída libre disminuye un 10 % aproximadamente, situándose alrededor del 0,12 %. Los granos de árido del

hormigón tienen participación en el llenado del espacio según su porcentaje sobre el volumen. Para ilustrarlo mejor, en la siguiente imagen se observa la diferente disposición de los áridos en función de su tamaño en una tubería de hormigón. En el caso a) el tamaño de grano es 16/32, mientras que en el caso b) el tamaño de grano es 8/16 y 16/32 [2].

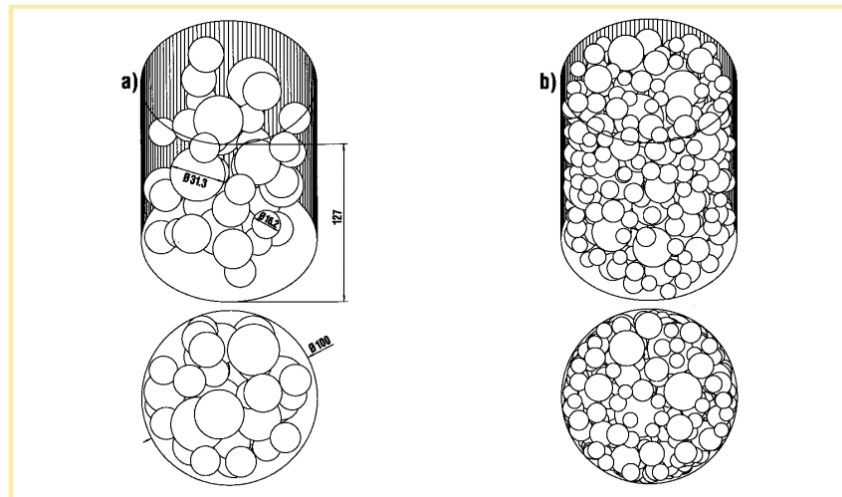


Figura 2.13. Distribución de los áridos sobre la tubería de bombeo de hormigón. Fuente: [2]

Es conocido que los granos más grandes y obstaculizadores presentan un diámetro de hasta  $1/3$  del de la tubería de vertido. No obstante, los granos se pueden acercar a la pared como máximo hasta hacer contacto con su propia superficie. En la siguiente imagen se observa la variación de su curva granulométrica en la zona central y periférica [2].

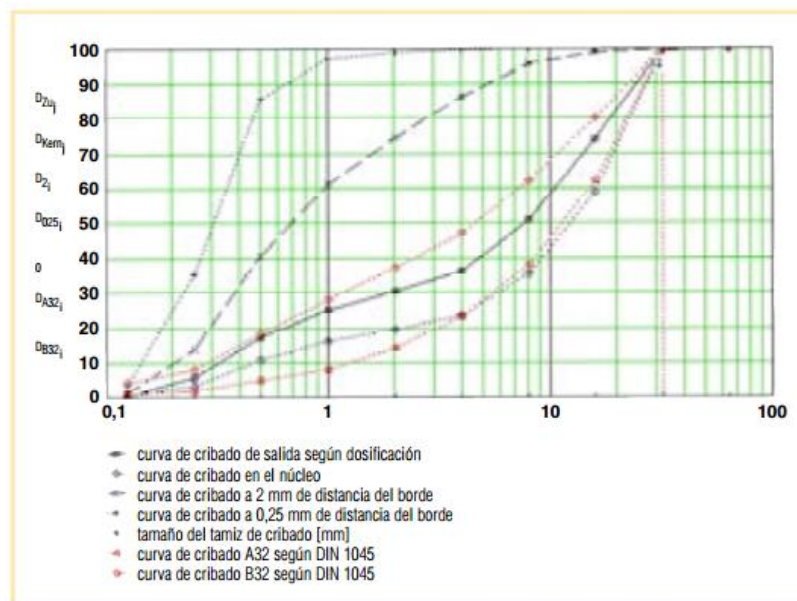


Figura 2.14. Distribución granulométrica de los áridos según la zona de la tubería. Fuente: [2]

Si se examina con atención la capa paralela a la pared del tubo, por ejemplo a 1 milímetro de distancia de la misma, se observan únicamente las capas externas de los granos grandes. Mientras, los granos de diámetro menor que 1 mm, contribuyen con todo su volumen disponible a llenar el espacio y compensar de este modo el déficit de granos de mayor tamaño. Explicado de otra manera, para que se llene totalmente la sección transversal de la tubería con los componentes que forman el hormigón, es necesario que al menos en la zona periférica los granos de mayor tamaño se empujen hacia dentro, mientras que una parte de los granos pequeños y agua sean repelidos hacia fuera.

La segregación de la zona periférica ocurre necesariamente cuando se llena la luz interior del hormigón, es decir, cuando se llenan las tuberías de transporte hasta su disposición final. Por tanto, es importante controlar la movilidad interna del hormigón fresco. En la zona periférica se genera un incremento continuo de los finos de la mezcla hasta generar incluso prácticamente un mortero en la pared interna de la conducción. Mientras, en la zona central se concentran los granos gruesos y se reduce la proporción de la pasta de cemento. Por tanto, el requisito para la bombeabilidad del hormigón es que se conserve la impermeabilidad de la zona central pese a la segregación periférica, por esto es por lo que un hormigón es bombeable hasta un determinado diámetro de tubo.

Al depender la composición del hormigón del radio en la sección del tubo, se pone de manifiesto que las propiedades del hormigón en estado fresco dependerán también de la sección y del radio, y estarán sujetas a las correspondientes variaciones durante el bombeo. En el recorrido del hormigón a través de la tubería de transporte, el hormigón en estado fresco sufre distintas cargas y deformaciones a las cuales ofrece una resistencia diferente. En la siguiente imagen se observan los esfuerzos que sufre la corriente de hormigón en cada sección al ser transportada [2].

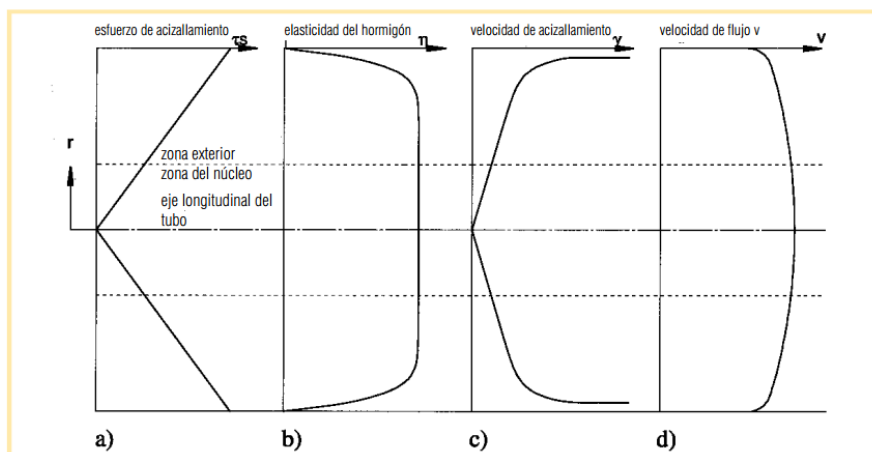


Figura 2.15. Esfuerzos sobre la corriente de hormigón en el proceso de bombeo. Fuente: [2]

En la imagen anterior, en la gráfica a) se observa el esfuerzo de cizallamiento que debe resistir el hormigón al discurrir por el tubo cilíndrico, y el cual se aprecia que aumenta linealmente con el radio.

El hormigón se opone a este esfuerzo mediante una resistencia de cizallamiento (elasticidad del hormigón) que depende de la velocidad, pero que no resultará constante en toda la sección. Esto se debe a que la elasticidad del hormigón está relacionada con el fuerte gradiente de disminución entre



la pasta de cemento y los granos de los áridos hacia la pared. Por ello, en la zona central el porcentaje de áridos resulta un múltiplo del porcentaje de la pasta de cemento, en cambio, en la periferia el porcentaje de áridos es muy cercano a cero. Si se compara el tamaño del grano medio del cemento (cerca de 0,01 mm) con el grano máximo (por ejemplo 32 mm), la curva de representación de la elasticidad del hormigón se corresponde con la gráfica b), donde la elasticidad en la pared equivale prácticamente a la de la pasta de cemento tal y como se conoce de realizar mediciones reológicas, aumentando miles de veces hacia el centro [2].

La existencia de una supuesta tensión radial límite por debajo de la que el hormigón no cizalle, y por tanto, sea transportado de manera compacta, no se ha demostrado todavía ni empíricamente ni en laboratorio, pese a haberla barajado en reiteradas ocasiones en planteamientos teóricos. La elasticidad notablemente mayor de la zona central en comparación con la periferia, así como el aumento del esfuerzo de cizalladura con el radio, dan como resultado una velocidad de cizallamiento que crece ingentemente hacia la zona periférica, tal y como se demuestra en la gráfica c), y un perfil de velocidad como el que se ha adjuntado en la gráfica d). En base a diferentes ensayos de laboratorio, se demostró que tras un recorrido de transporte de 10 metros, en la zona central de la conducción se registraba una deformación de empuje total de únicamente 0,3 a 0,5 metros, la cual equivale a un empuje 100 o 200 veces mayor en la periferia respecto de la zona central. De esto se desprende que el transporte de hormigón fresco a través de la tubería no posee efectos de remezcla añadidos. Tan sólo al salir de la tubería de transporte, en las tareas de compactación y vertido, podría existir un cierto grado de remezcla. No obstante, este no sería el caso, ya que en este proyecto no se contemplan tareas de compactación o vibrado una vez se instale la mezcla de hormigón [2].

A continuación se adjunta un dibujo donde se representa el fenómeno explicado en los párrafos anteriores [2]:

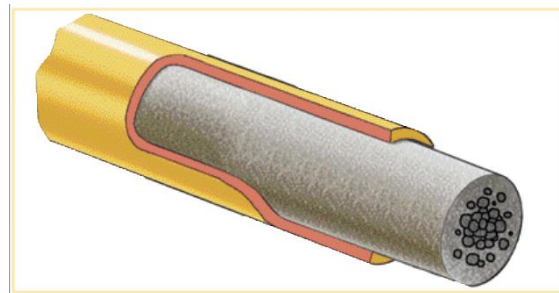


Figura 2.16. Croquis del fenómeno de segregación periférica. Fuente: [2]

Una vez expuesto el fenómeno de la segregación periférica, se entenderá que hay que tener una especial precaución a la hora de fijar el tamaño máximo del árido. Bajo unas circunstancias en las que el hormigón endurecido no requiriese propiedades impermeabilizantes, o en las cuáles fuera posible realizar un vibrado de la mezcla una vez fuera instalada, es posible que tuviera un menor calado esta decisión, no siendo este el caso. De este modo, se debe prever la aparición de fenómenos de segregación periférica en los cuáles la impermeabilidad en el hormigón que se encuentra en la parte central de la entubación pueda verse seriamente perjudicada.

En este sentido, se va a limitar al máximo el tamaño de la grava seleccionada para la dosificación, ya que así, en caso de producirse segregación periférica, el árido grueso que se quede en la parte central de la conducción podrá afrontar el mantenimiento de la impermeabilidad con buenas garantías. Además, limitar la diferencia de tamaño de los áridos también podría limitar la magnitud del fenómeno de segregación periférica. Con todo ello, los niveles de la variable 'Tamaño de los áridos a introducir en el hormigón' serán: Tamaño máximo 20 milímetros, tamaño máximo 16 milímetros y tamaño máximo 12 milímetros.

## **2.3 CONCLUSIONES**

---

Para determinar la dosificación de la mezcla de hormigón que se va a instalar en el interior del colchón geotextil, se deben realizar una serie de estudios previos enfocados a conocer en mayor medida los diferentes condicionantes o posibilidades que existen alrededor de la mezcla. En este sentido, el análisis de las variables existentes en la dosificación es uno de ellos, y la determinación con acierto de los niveles a los que se deben estudiar puede marcar significativamente el éxito o no en la búsqueda de un hormigón que reúna todas las propiedades necesarias para alcanzar la solución buscada.

Como se ha comentado en la introducción de este mismo Capítulo, a lo largo de este proyecto se está diseñando una mezcla de hormigón que permita su bombeo mientras esté en estado fresco, y que resulte elástica e impermeable una vez haya endurecido. Estas propiedades pueden resultar en muchas ocasiones opuestas, de manera que para encontrar una dosificación que permita la consecución de las tres se debe realizar una cuidadosa selección de las variables a analizar, así como de los niveles que las componen.

Así pues, finalmente han sido 4 las variables seleccionadas. La primera de ellas ha sido referente a la relación agua – cemento, donde tras consultar diferentes publicaciones científicas relacionadas principalmente con la consistencia del hormigón, se ha concluido que 0,6, 0,65 y 0,7 eran las relaciones agua – cemento más adecuadas para este caso de estudio. Un requisito indispensable para que la mezcla sea bombeable es que la consistencia de la misma sea fluida o líquida, y con estos valores de relación agua – cemento se conseguirían este tipo de consistencias.

En un segundo lugar, la variable que se ha considerado ha sido el porcentaje de sustitución de árido por NFU. Este aspecto podía influir principalmente en la elasticidad e impermeabilidad del hormigón endurecido. Se ha comprobado al recurrir a distintas publicaciones de índole científica, que el hormigón con NFU es tanto más elástico cuantas más partículas de caucho contiene, en cambio, la impermeabilidad decrece al aumentar la presencia de este material. Es por este motivo que se debía encontrar una solución de compromiso que beneficiara a ambos aspectos, tratando de mejorar mediante una misma cantidad de NFU tanto la impermeabilidad como las propiedades elásticas de la mezcla ya endurecida. Finalmente, y tras consultar una gran variedad de artículos científicos, se han seleccionado tres porcentajes: 5 %, 10 % y 15 %.

La tercera de las variables consideradas ha sido el tamaño de los gránulos de NFU. En este caso, ha sido necesario tener en consideración aspectos como el tamaño de la tubería, el cual puede mermar significativamente el tamaño máximo de este material. De otro modo, se comprobó como un tamaño reducido de los gránulos de caucho afectaba en menor medida a la impermeabilidad de la mezcla, de modo que sustituyendo el árido por caucho de estas dimensiones apenas se estarían viendo afectadas las propiedades impermeabilizantes del hormigón dosificado. No obstante, en la literatura científica también se encontró que un tamaño grande de las partículas de NFU contribuía de manera más directa a que la mezcla adquiriese un comportamiento flexible frente a vibraciones o sollicitaciones externas. De este modo, se determinó que las partículas de NFU a ensayar tendrían un tamaño máximo de 4, 10 y 20 milímetros.

Por último, se consideró como cuarta variable el tamaño de los áridos. En este caso, aparte del resto de condicionantes que eran comunes con las partículas de caucho, también se encontraba la segregación periférica. Este fenómeno tiende a arrinconar a los áridos finos en la parte exterior de la tubería en la ejecución del bombeo, dejando la fracción gruesa del árido al centro de la conducción. De este modo, se ha buscado limitar el tamaño máximo de los áridos a introducir de manera que en caso de aparición fenómenos de segregación periférica se pudiesen minimizar las consecuencias.

## **Capítulo 3: Planteamiento de posibles dosificaciones**

---

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

---

Como punto de partida del proyecto, en el Capítulo 2 se ha realizado un estudio de las variables a estudiar así como de los niveles que componían cada una de ellas. La correcta selección de estos conceptos puede influir de una manera importante en el éxito o no de la consecución de la dosificación buscada. A modo de recordatorio, se debe considerar que el hormigón de relleno del colchón geotextil debe reunir unas determinadas propiedades para poder desempeñar su función como contenido. Estas propiedades son tres básicamente: bombeabilidad en estado fresco, y elasticidad e impermeabilidad una vez la mezcla hubiera fraguado.

Las variables seleccionadas han sido 4: Porcentaje de sustitución de áridos por NFU (Neumático Fuera de Uso), Relación agua – cemento de la mezcla, Tamaño máximo de las partículas de NFU y Tamaño máximo del árido. El estudio de estas variables se consideró indispensable para poder conseguir en la mezcla las propiedades deseadas. Cada una de las variables se estudió a tres niveles, siendo los niveles considerados para cada una de ellas los siguientes.

- Porcentaje de sustitución de árido por NFU: 5 %, 10 % y 15 %.
- Relación agua – cemento: 0,6, 0,65 y 0,7.
- Tamaño máximo de las partículas de NFU: 4, 10 y 20 mm.
- Tamaño máximo de los áridos: 12, 16 y 20 mm.

En base a estas premisas, es necesario llevar a cabo una serie de experimentos que permita ensayar cada una de estas situaciones de una manera lógica y coherente. Evidentemente, no es posible el ensayo de todas las combinaciones de variables y niveles existentes, pues daría pie a un número de ensayos totalmente inasumible. De esta forma, en el presente Capítulo se recurrirá a un modelo de diseño estadístico para obtener un número mucho más reducido de dosificaciones sin perder en ningún momento el rigor estadístico en el proceso.

El modelo estadístico a emplear para este caso de estudio se describirá a continuación, mostrando claramente como se aplicaría para este caso en concreto.

### **3.2 MODELO ESTADÍSTICO A UTILIZAR**

---

Habitualmente se han empleado técnicas de diseño de experimentos para evaluar los efectos que distintos factores tenían sobre la calidad de una característica determinada. En caso de un solo ensayo, para cada experimento se combinarían diferentes valores de la respuesta observados en cada una de las realizaciones de experimentos, estando estos definidos en la matriz representativa del diseño y obteniendo una estimación de los efectos principales y sus interacciones [13].

Sin embargo, con el objetivo de simplificar este procedimiento, la aplicación del conocido método estadístico de Taguchi es una buena alternativa.

De esta forma, para el estudio de los factores que afecten a un producto o proceso productivo, Taguchi se basa en utilizar un conjunto reducido de matrices de diseño. Estas matrices definen diseños ortogonales, esto es, sus columnas son ortogonales. Los diseños factoriales  $2^k$  son un claro ejemplo de diseños ortogonales. Taguchi emplea los valores 1 y 2 para denotar los niveles bajo y alto, respectivamente, en vez de la notación habitual  $\pm$ , ya que considera la posibilidad de más de dos niveles en cada factor [13]. En la metodología de Taguchi se consideran diseños ortogonales fraccionarios, es decir, se reduce el número de filas de la matriz del diseño mediante la identificación de factores principales y factores de interacción. De este modo, se permite una mayor viabilidad del estudio de tratamientos. Por ejemplo, para diseñar  $2^7$  de 7 factores con dos niveles, Taguchi consideraría la siguiente matriz de diseño [13].

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Figura 3.1. Ejemplo de matriz Taguchi de 7 variables a 2 niveles. Fuente: [13]

Esta matriz se refiere como matriz del diseño  $L_8$ . Presenta siete columnas ortogonales y ocho filas, en contraste con los  $2^7 = 128$  experimentos que constituirían la matriz del diseño de un diseño factorial completo de 7 factores a dos niveles. Esta matriz  $L_8$  se puede utilizar también para estudiar un número inferior de factores, cuando no queden asignados a algunas columnas de los factores principales. De este modo, con un conjunto relativamente pequeño de diseños, Taguchi proporciona un catálogo reducido de modelos que permitirían abordar un número considerablemente alto de experimentos en ingeniería.

De manera intuitiva, cuando se reduce el número de filas de la matriz del diseño asociada, por ejemplo, a un diseño factorial  $2^k$ , se produce una pérdida que queda relegada en:

- Pérdida de capacidad para estimar las interacciones entre factores.
- Pérdida de capacidad para estimar algunos de los efectos principales.

En este sentido, Taguchi proporciona reglas gráficas para cada una de las matrices de diseño utilizadas en el catálogo. De manera concreta, en los gráficos propuestos, los nodos se asignan a factores principales y los segmentos que unen dos nodos son asignados a los factores de interacción correspondientes.

#### Selección de un diseño ortogonal

Para seleccionar un diseño ortogonal se emplea el método siguiente. Partiendo de un primer diseño  $L_N$  que tiene asociados  $N - 1$  grados de libertad. Entonces, un diseño apropiado para el desarrollo de un estudio es el más pequeño cuyos grados de libertad estén justo por encima de los grados de libertad asociados con todos los factores e interacciones. El proceso de selección puede resumirse en los siguientes ítems [13]:

1. Cada factor con  $k$  niveles tiene  $k - 1$  grados de libertad.
2. Los grados de libertad para un factor de interacción doble son el producto de los grados de libertad de los factores principales que lo definen.
3. Los grados de libertad requeridos para todos los factores principales e interacciones se suman para obtener el total de grados de libertad  $d.f_{total}$  requeridos en el desarrollo del experimento.
4. Se selecciona el  $L_N$  más pequeño para el cual  $N - 1 \geq d.f_{total}$  total requeridos en el desarrollo del experimento.

Bajo algunas circunstancias, el estudio requiere combinaciones de factores principales e interacciones que impiden que el diseño seleccionado en el punto 4 sea apropiado, y por esto, se tenga que considerar el siguiente  $L_N$  en magnitud. Por ejemplo, esto sucede cuando se incluye un número elevado de factores de interacción en el estudio. Para resolver esta problemática también es posible desarrollar un análisis preliminar de los factores de interacción que son realmente significativos.

Algunos ejemplos de diseños Taguchi se muestran a continuación. Por ejemplo, la primera matriz que se adjunta representa el caso de 7 variables a dos niveles cada una, dando pie a 8 combinaciones diferentes [13]:

Run	Columns						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Figura 3.2. Ejemplo de matriz Taguchi de 7 variables a 2 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]

En esta otra matriz se observa el caso de 11 variables a dos niveles cada una de ellas, originando en este caso un total de 12 combinaciones:

Run	Columns										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Figura 3.3. Ejemplo de matriz Taguchi de 11 variables a 2 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]

En el siguiente ejemplo se adjunta el caso de 4 variables a 2 niveles más 1 variable a 4 niveles. Esta situación generaría nuevamente 8 combinaciones diferentes:

Run	Columns				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1
3	1	1	2	2	2
4	2	2	1	1	2
5	1	2	1	2	3
6	2	1	2	1	3
7	1	2	2	1	4
8	2	1	1	2	4

Figura 3.4. Ejemplo de matriz Taguchi de 4 variables a 2 niveles más 1 variable a 4 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]

Finalmente, en el último caso de estudio considerado se observa el caso de 1 variable 2 niveles y 7 variables a 3 niveles:



Run	Columns								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	1	2	2
3	2	2	1	1	2	2	1	3	3
4	2	2	2	2	1	1	1	4	4
5	2	2	1	2	1	2	2	1	2
6	2	2	2	1	2	1	2	2	1
7	1	1	1	2	2	1	2	3	4
8	1	1	2	1	1	2	2	4	3
9	1	2	2	2	2	1	3	1	3
10	1	2	1	1	1	2	3	2	4
11	2	1	2	2	1	2	3	3	1
12	2	1	1	1	2	1	3	4	2
13	2	1	2	1	2	2	4	1	4
14	2	1	1	2	1	1	4	2	3
15	1	2	2	1	1	1	4	3	2
16	1	2	1	2	2	2	4	4	1

Figura 3.5. Ejemplo de matriz Taguchi de 1 variables a 2 niveles y 7 variables a 3 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]

### 3.3 APLICACIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO DE TAGUCHI

Una vez expuesto el modelo estadístico que se va a utilizar, tan sólo falta determinar las posiciones que ocuparán en él los niveles de cada una de las variables. En este sentido, se debe determinar en primer lugar el orden que seguirán dentro de la matriz.

- Variable 1: Porcentaje de árido sustituido por NFU
  - Nivel 1: NFU 5; 5 %
  - Nivel 2: NFU 10; 10 %
  - Nivel 3: NFU 15; 15 %
- Variable 2: Tamaño del NFU introducido
  - Nivel 1: Fino (F); 4 mm
  - Nivel 2: Medio (M); 10 mm
  - Nivel 3: Grueso (G); 20 mm
- Variable 3: Relación agua – cemento
  - Nivel 1: A/C 1; 0,6
  - Nivel 2: A/C 2; 0,65
  - Nivel 3: A/C 3; 0,7
- Variable 4: Tamaño máximo del árido
  - Nivel 1: D<sub>máx</sub> 1; 12 mm
  - Nivel 2: D<sub>máx</sub> 2; 16 mm
  - Nivel 3: D<sub>máx</sub> 3; 20 mm

Una vez concretados estos parámetros tan sólo queda sustituir en la matriz del modelo Taguchi correspondiente al caso de 4 variables actuando a 3 niveles. Este caso de estudio daría pie a 9 dosificaciones distintas las cuáles se van a ver a continuación. En primer lugar se adjuntará la matriz correspondiente al modelo de Taguchi para conocer posteriormente el origen de las 9 dosificaciones propuestas:

Run	Columns			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Figura 3.1 Matriz del modelo Taguchi seleccionada. Elaboración propia a partir de [13]

Una vez vista la matriz del modelo de Taguchi que representa este caso de estudio se sustituyen las variables y niveles en ella, dando pie a las 9 combinaciones que finalmente se someterán a ensayos de laboratorio. En la siguiente tabla se observa como queda finalmente el proceso:

Dosificación	Porcentaje de NFU	Tamaño de NFU	Relación A/C	Tamaño Máximo Árido
1	NFU 5	F	A/C 1	Dmáx 1
2	NFU 5	M	A/C 2	Dmáx 2
3	NFU 5	G	A/C 3	Dmáx 3
4	NFU 10	F	A/C 2	Dmáx 3
5	NFU 10	M	A/C 3	Dmáx 1
6	NFU 10	G	A/C 1	Dmáx 2
7	NFU 15	F	A/C 3	Dmáx 2
8	NFU 15	M	A/C 1	Dmáx 3
9	NFU 15	G	A/C 2	Dmáx 1

Tabla 3.1 Variables significativas del modelo. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]

En base a estas variables, a continuación se adjuntan las 9 dosificaciones en peso que se van a ensayar en la campaña de ensayos de laboratorio, aportando la cantidad necesaria por metro cúbico de hormigón (kg/m<sup>3</sup>).

Dosificación 1	
Cemento	284
Arena	873
Gravilla	253
Grava	829

<b>NFU</b>	16
<b>Agua</b>	170
<b>Aditivo P/SP</b>	1,6
<b>Impermeabilizante</b>	5,25

Tabla 3.2 Dosificación 1. Fuente: Elaboración propia.

<b>Dosificación 2</b>	
<b>Cemento</b>	262
<b>Arena</b>	919
<b>Gravilla</b>	241
<b>Grava</b>	829
<b>NFU</b>	16
<b>Agua</b>	170
<b>Aditivo P/SP</b>	1,6
<b>Impermeabilizante</b>	4,86

Tabla 3.3 Dosificación 2. Fuente: Elaboración propia.

<b>Dosificación 3</b>	
<b>Cemento</b>	243
<b>Arena</b>	919
<b>Gravilla</b>	253
<b>Grava</b>	789
<b>NFU</b>	16
<b>Agua</b>	170
<b>Aditivo P/SP</b>	1,6
<b>Impermeabilizante</b>	4,54

Tabla 3.4 Dosificación 3. Fuente: Elaboración propia.

<b>Dosificación 4</b>	
<b>Cemento</b>	262
<b>Arena</b>	828
<b>Gravilla</b>	253
<b>Grava</b>	829
<b>NFU</b>	32
<b>Agua</b>	170
<b>Aditivo P/SP</b>	1,6
<b>Impermeabilizante</b>	4,86

Tabla 3.5 Dosificación 4. Fuente: Elaboración propia.

<b>Dosificación 5</b>	
<b>Cemento</b>	243
<b>Arena</b>	919
<b>Gravilla</b>	253
<b>Grava</b>	829
<b>NFU</b>	32
<b>Agua</b>	170
<b>Aditivo P/SP</b>	1,6
<b>Impermeabilizante</b>	4,54

Tabla 3.6 Dosificación 5. Fuente: Elaboración propia.

Dosificación 6	
Cemento	284
Arena	919
Gravilla	253
Grava	747
NFU	32
Agua	170
Aditivo P/SP	1,6
Impermeabilizante	5,25

Tabla 3.7 Dosificación 6. Fuente: Elaboración propia.

Dosificación 7	
Cemento	243
Arena	782
Gravilla	253
Grava	829
NFU	16
Agua	170
Aditivo P/SP	1,6
Impermeabilizante	4,54

Tabla 3.8 Dosificación 7. Fuente: Elaboración propia.

Dosificación 8	
Cemento	284
Arena	919
Gravilla	216
Grava	829
NFU	32
Agua	170
Aditivo P/SP	1,6
Impermeabilizante	5,24

Tabla 3.9 Dosificación 8. Fuente: Elaboración propia.

Dosificación 9	
Cemento	262
Arena	919
Gravilla	253
Grava	705
NFU	47
Agua	170
Aditivo P/SP	1,6
Impermeabilizante	4,86

Tabla 3.10 Dosificación 9. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 CONCLUSIONES

El objetivo principal de este Capítulo ha sido exponer el diseño de experimentos necesario para poder ensayar todas las variables y niveles posibles de manera lógica y ordenada. En este sentido, se ha considerado oportuno emplear el modelo estadístico de Taguchi, basado en un diseño factorial de experimentos. A partir de los modelos preestablecidos, se decide proponer hasta 9 dosificaciones donde se evaluarán las variables definidas en el Capítulo 2.

En cuanto a estas variables, conviene recordar que atendían fundamentalmente al tamaño y cantidad de NFU introducido en el hormigón, a la relación agua/cemento y al tamaño máximo del árido empleado para realizar las dosificaciones. Una vez definido el modelo factorial y resultando conocidas las prestaciones que ofrece la mezcla tras la combinación de estas variables, se definen las 9 dosificaciones que se someterán posteriormente a ensayo. En este sentido, la tarea actual es una de las de mayor calado del proyecto, pues en ella se definen las dosificaciones que se ensayarán para seleccionar posteriormente una de ellas.

El presente Capítulo se postula como un primer paso a la hora de alcanzar un hormigón realmente adecuado para servir de relleno del colchón geotextil que se extenderá sobre los taludes del canal. A partir de esta tarea, los siguientes esfuerzos se van a centrar en seleccionar una de las dosificaciones expuestas anteriormente, para que pueda servir como relleno elástico, impermeable y bombeable del colchón geotextil.

## **Capítulo 4: Fabricación y ensayo de dosificaciones**

---

## **4.1 INTRODUCCIÓN**

---

En este punto del proyecto, ya se han dado los pasos previos para llevar a cabo un plan de ensayos de laboratorio coherente con los requisitos que se exigen en este proyecto. Por un lado, se han identificado las variables relevantes de cara a conseguir las características demandadas en la mezcla: bombeabilidad, elasticidad e impermeabilidad. Como se ha visto y comentado anteriormente, estas propiedades pueden resultar antagónicas en algunos casos, de manera que la selección de las variables que se someterán a análisis se ha debido realizar de manera cuidadosa.

A modo de recordatorio, las variables a analizar han sido 4, cada una de las cuáles contaba con 3 niveles.

- Porcentaje de sustitución de NFU por árido: Se contemplan los siguientes porcentajes de sustitución: 5, 10 y 15 %.
- Relación agua/cemento: Las A/C seleccionadas fueron de 0,65, 0,7 y 0,75.
- Tamaño máximo de NFU: Los tamaños máximos de NFU son de 4, 10 y 20 milímetros.
- Tamaño máximo de árido: Los tamaños máximos son de 12, 16 y 20 milímetros.

Por otro lado, se ha llevado a cabo el diseño de experimentos a realizar. Se observa como 4 variables, actuando cada una de ellas a 3 niveles, ofrecen un número muy elevado de posibilidades de combinación. El ensayo de todas ellas es prácticamente irrealizable por motivos de tiempo y económicos, de modo que se decide optar por un diseño factorial de experimentos que reduce a 9 las dosificaciones que se van a ensayar, tomando en cada una de ellas combinaciones que muestren de manera representativa la influencia que tiene sobre la mezcla cada una de las variables actuando en cada uno de los niveles que se han considerado.

Una vez realizadas estas actividades, se va a desempeñar la campaña de ensayos de laboratorio de las distintas mezclas propuestas. Esta campaña está compuesta por un determinado número de ensayos, cada uno de los cuales se va a ejecutar según la normativa chilena al respecto. No obstante, aquellos ensayos que no se encuentren en el listado del MINVU, se desarrollarán a partir de normativa internacional. Estos ensayos son los siguientes:

- ✓ Resistencia a compresión
- ✓ Tracción Indirecta
- ✓ Módulo Elástico
- ✓ Coeficiente de amortiguamiento
- ✓ Densidad
- ✓ Docilidad (consistencia)
- ✓ Embudo en V
- ✓ Esclerómetro
- ✓ Permeabilidad

Con todo ello, en el presente Capítulo se comenzará definiendo los ensayos a realizar. Posteriormente, se calcularán los materiales e insumos necesarios para realizarlos. En última instancia, los ensayos serán realizados para caracterizar las propiedades principales de las 9 dosificaciones diseñadas, de forma que posteriormente puedan ser correctamente modeladas a través de un programa de cálculo de elementos finitos.

## **4.2 ENSAYOS A REALIZAR**

---

En este apartado de la actividad se van a exponer los ensayos de laboratorio que se van a realizar para caracterizar cada una de las dosificaciones diseñadas en el Capítulo 3. En cada uno de ellos se añadirá una pequeña descripción al respecto, así como se indicará el número de muestras que resultan necesarias.

### **4.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

El objetivo de este ensayo es conocer la resistencia a compresión del hormigón endurecido. Las probetas se comprimen hasta romper en una máquina de ensayo de compresión. Se registra la máxima carga soportada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

En este ensayo se utilizarán tres probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para cada uno de los tipos de hormigón ensayados. Todas las probetas se ensayaron 28 días después de su fabricación. El ensayo se realizará bajo la norma NCh 1037 Of. 77 [14].

Previamente a la realización del ensayo, se deberán limpiar los platos de carga de la máquina, eliminando cualquier resto de gravilla u otro material de las superficies de probeta en contacto con los platos. No se debe usar ningún componente añadido entre los platos auxiliares o bloques espaciadores entre la probeta y los platos de ensayo de la máquina.

En el caso de las probetas cúbicas, se deben colocar de tal forma que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección de hormigonado, habiendo tenido previamente la precaución de secar el exceso de humedad de la superficie de la misma.

Las probetas se centrarán respecto al plato inferior con una aproximación del  $\pm 1$  % de la dimensión normalizada del lado de la probeta cúbica.

#### Equipos utilizados

- Prensa





Figura 4.1. Ensayo de resistencia a compresión en prensa. Fuente: Prontubeam

Respecto al proceso de elaboración, el primer paso será disponer la probeta en la prensa de manera adecuada, tal y como se ha comentado en los párrafos anteriores. Una vez ajustada la probeta, se le aplica una carga a una velocidad constante comprendida dentro del rango  $0,6 \pm 0,2$  Mpa/s. Posteriormente, se le aplica la carga inicial, la cual no debe superar el 30 % de la carga de rotura. A continuación, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades incrementando continuamente  $\pm 10$  % hasta que la probeta no pueda soportar más carga.

Se registra la carga máxima que indica el elemento de lectura y se calculaba la resistencia a compresión del hormigón mediante la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Dónde:

- $f_c$ : Resistencia a compresión (N/mm<sup>2</sup>). Su valor se redondea al 0,5 N/mm<sup>2</sup> más cercano;
- $F$ : Carga máxima en rotura (N);
- $A_c$ : Área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión (mm<sup>2</sup>);

Una vez finalizado el ensayo y conocida la resistencia a compresión, se puede conocer la resistencia media del hormigón ( $f_{cm}$ ) como el valor correspondiente a la media aritmética de una serie de tres resultados de ensayos a 28 días. La resistencia característica del proyecto ( $f_{ck}$ ) es el valor que se adopta en el proyecto para la resistencia a compresión, como base de los cálculos.

La resistencia media a 28 días ( $f_{cm}$ ) deberá superar la resistencia de proyecto ( $f_{ck}$ ), con una holgura suficiente para que sea razonable esperar que, con la dispersión que introduce la ejecución en obra, sobrepase también a la de proyecto. Si se toman unas condiciones de ejecución de obra medias (las más desfavorables), la resistencia media necesaria en laboratorio ( $f_{cm}$ ) deberá cumplir la siguiente relación:

$$f_{cm} = 1,5 * f_{ck} + 2,0 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$$

Dónde:

- $f_{cm}$ : Resistencia media del hormigón a compresión (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_{ck}$ : Resistencia característica del hormigón de proyecto (N/mm<sup>2</sup>)

## 4.2.2 TRACCIÓN INDIRECTA

Este ensayo se utiliza para conocer la resistencia a tracción indirecta de las probetas cilíndricas de hormigón endurecido. Consiste en aplicar una fuerza de compresión sobre una probeta cilíndrica aplicada en una banda estrecha en toda su longitud. El resultado de la fuerza de tracción longitudinal resultante provoca la rotura de la probeta a tracción.

El hormigón es un material que resiste muy bien solicitaciones a compresión, en cambio, su resistencia a tracción es del orden de 10 veces menor. Determinar la resistencia a tracción pura del hormigón no es sencillo a causa de las tensiones secundarias que acostumbran a producirse a la hora de realizar los ensayos. En este sentido, se utilizará el ensayo a tracción indirecta, ya que es un sistema sencillo y práctico. La normativa seguida es la NCh 1170. Of 77 [14].

### Equipos Utilizados

- Máquina de ensayos a tracción indirecta: la misma prensa que la utilizada en el ensayo de resistencia a compresión
- Bandas de apoyo: fibras pretensadas y de acuerdo con la norma EN 316

En cuanto al proceso de ejecución, la probeta se sitúa centrada en la prensa, con su eje principal horizontal centrado en el plato inferior de la prensa. De manera cuidadosa se dispondrán también las bandas de apoyo. A través de soportes temporales, se asegurará que las probetas permanezcan centradas mientras desciende el eje del pistón y el plato superior de la prensa haga contacto con la misma.

Se aplicará incremento de tensión constante comprendida entre 0,04 MPa/s y 0,06 MPa/s. Posteriormente, se aplica la carga inicial, la cual no debe ser mayor al 20 % de la carga de rotura. A continuación, se sigue aplicando la carga sin brusquedades e incrementando de manera continua un  $\pm$  1% hasta que la probeta no pueda soportar más la carga y rompa por su plano diametral.

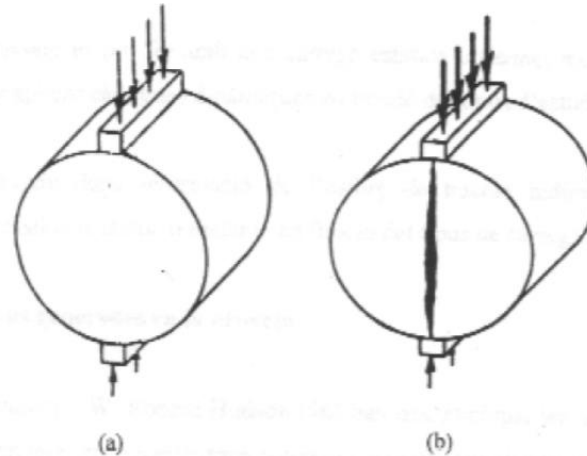


Figura 4.2. Esquema de ensayo de tracción indirecta. Fuente: [15]

La velocidad de carga requerida se calcula a partir de la fórmula:

$$R = \frac{s \times \pi \times L \times d}{2}$$

Dónde:

- R es la velocidad de carga requerida (N/s)
- L es la longitud de la probeta (mm)
- d es la dimensión de la sección transversal de la probeta (mm)
- s es el incremento de tensión (Mpa/s)

En el ensayo de tracción indirecta las probetas cilíndricas han estado sometidas a una carga de compresión sobre el plano diametral. A causa del estado tensional del cilindro, la rotura se produce por tracción cuando las tensiones que aparecen en el plano de aplicación de las cargas alcanzan el valor de la resistencia a tracción del material. En ese instante, el material inicia su rotura y ésta se propaga a lo largo del plano diametral mencionado.

El estado tensional generado no tendrá por qué ser uniaxial. El material soporta tensiones de compresión ( $\sigma_c$ ) que son normales a las tensiones de tracción ( $\sigma_t$ ), con valores absolutos que pueden sobrepasar en más de 3 veces la resistencia a tracción en el momento de la fractura. Dado que el hormigón es un material con una relación compresión/tracción alta, la rotura se produce a causa de las tensiones de tracción, mientras que las tensiones de compresión no producen daño alguno.

Se registrará la carga máxima que refleje la máquina, para seguidamente calcular la resistencia a tracción indirecta del hormigón mediante la siguiente fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi L d}$$

Dónde:

- $f_{ct}$ : Resistencia a tracción indirecta (N/mm<sup>2</sup>). Se expresa con una aproximación de 0,05 N/mm<sup>2</sup>;
- $F$ : Carga máxima soportada (N);
- $L$ : Longitud de la línea de contacto de la probeta (mm);
- $d$ : Dimensión de la sección transversal de la probeta (mm);

La resistencia a tracción pura se obtendrá mediante la resistencia a tracción indirecta a partir de la siguiente expresión:

$$f_{ct} = 0,9f_{ci}$$

Dónde:

- $f_{ct}$ : Resistencia a tracción indirecta (N/mm<sup>2</sup>). Se expresa con una aproximación de 0,05 N/mm<sup>2</sup>;
- $f_{ci}$ : Resistencia a tracción pura (N/mm<sup>2</sup>);

### 4.2.3 COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO

La ausencia de normativa nacional o internacional que estandarice una metodología para determinar el coeficiente de amortiguamiento del hormigón ha provocado que para ensayar esta cualidad del material se deba recurrir a literatura científica para conocer los procedimientos seguidos en otras ocasiones. Así pues, el método más adecuado bajo nuestro punto de vista es el descrito en "A Study on the Damping Ratio of Rubber Concrete" [16]. Se describe a continuación.

#### Equipos utilizados

- Martillo: Elemento necesario para golpear las muestras.
- Acelerómetros: Dispositivos utilizados para registrar la señal vibratoria del hormigón.
- SAD: Sistema de adquisición de datos que permita almacenar los registros.

Respecto al proceso de elaboración, las probetas de hormigón se proveen en este caso de una ligera vara metal en su interior que actúa a modo de armadura de refuerzo. Con este elemento, se reduce considerablemente el riesgo de rotura. Las probetas se disponen en voladizo, ancladas sobre una base de hormigón mediante 8 pernos uniformemente distribuidos. Con el martillo se golpea el extremo libre de la probeta. Los acelerómetros registran la señal asociada a la vibración. Se debe recordar que el pico de amplitud no tiene por qué producirse en el primer ciclo, sino que se puede dar también en el segundo o en el tercero.

A continuación, se adjuntan dos imágenes del proceso de ejecución del ensayo:

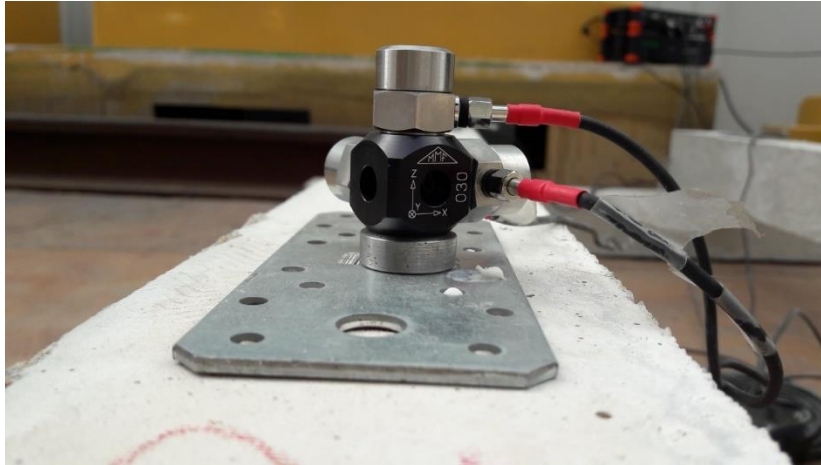


Figura 4.3. Detalle del acelerómetro instalado sobre la viga. Fuente: elaboración propia



Figura 4.4. Vigas correspondientes a las diferentes dosificaciones. Fuente: elaboración propia

#### 4.2.4 DETERMINACIÓN DE LA DOCILIDAD

Se ha seguido la normativa NCh1019.EOf1974, en la cual se establecen las especificaciones y procedimientos a llevar a cabo para conocer la docilidad del hormigón fresco mediante un método aplicable tanto en obra como en laboratorio, el cono de Abrams. Este método, sin embargo, tan sólo se aplica a hormigones cuyo tamaño de árido sea inferior o igual a 50 mm, y cuenten con una cohesión y plasticidad suficientes como para llevar a cabo el ensayo [17].

Mediante el ensayo del cono de Abrams se puede medir la docilidad y consistencia del hormigón en estado fresco evaluando la disminución de altura experimentada por un tronco cónico previamente moldeado con hormigón fresco. El molde que se emplea en este ensayo consiste en un tronco de cono recto y metálico, con diámetro superior a  $100 + 1,5$  mm, diámetro inferior de  $200 + 1,5$  mm, y una altura igual a  $300 + 1,5$  mm. Además, esta herramienta se provee de dos pisaderas laterales en la parte inferior para que el operario encargado de realizar el ensayo pueda sujetar el molde durante el llenado. También hay dos asas en la parte superior para sacar el molde una vez se haya vertido el hormigón.

En la siguiente imagen se pueden ver los materiales utilizados:



*Figura 4.5. Herramientas empleadas en el ensayo de consistencia*

Para el llenado del cono de Abrams, se debe verter la mezcla en 3 capas de volumen muy similar, y posteriormente se compacta cada una de ellas mediante una varilla apisonadora. Finalmente, se debe enrasar la parte de arriba del relleno de hormigón que sobresalga por el molde troncocónico. Este proceso no debe contar con una duración superior a 3 minutos. Posteriormente a la retirada del molde, si el hormigón se vuelca hacia un lado o sufre disgregaciones el ensayo debería repetirse, si esto vuelve a suceder cuando se repita el ensayo se declarará que el hormigón no es apto para realizar el ensayo del cono de Abrams por no contar con la consistencia necesaria.

Por último, para conocer la consistencia que tendrá la mezcla de hormigón, se deberá tomar la medida del descenso respecto de la altura de la placa de enrase. Cuanto menos descienda la mezcla más seco será el hormigón, dando pie a consistencias secas o plásticas. A menor consistencia, más descenso en el cono, originando consistencias blandas, fluidas o líquidas.

#### **4.2.5 EMBUDO EN V**

Para la determinación de la capacidad de relleno de un hormigón o mortero se debe seguir la normativa europea EN 12350-9 [18], dado que no se recoge esta metodología en la norma chilena.

Esta norma emplea el método del ensayo de embudo en V. El ensayo de embudo en V sirve para determinar la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón. Se llena de hormigón fresco, en este caso mortero, un embudo con forma de V y se registra el tiempo que tarda el hormigón en fluir fuera del cono como tiempo de flujo en el embudo en V.

A partir de estudios experimentales se demostró que en el flujo de hormigón a través de un embudo, al ir reduciendo la sección transversal de la salida se incrementaba el riesgo de bloqueo de la masa por el contacto entre los áridos gruesos, siendo este un indicativo del valor de viscosidad. El objetivo del ensayo será por tanto evaluar la capacidad de fluir del hormigón en áreas restringidas de dirección vertical y bajo su propio peso, cualificando la tendencia que presenta la masa a la segregación y al bloqueo, mediante el análisis de la variación de la velocidad de flujo.

El único equipo necesario para el desarrollo del ensayo es el propio embudo en forma de V. A continuación se dispone una imagen del mismo [17].



*Figura 4.6. Herramientas empleadas en el ensayo de consistencia*

#### **4.2.6 ESCLERÓMETRO**

Este ensayo consiste en una prueba no destructiva de la resistencia del hormigón. Se conoce como ensayo esclerométrico o de martillo Schmidt, siendo su valor “R” (índice de rebote) una unidad adimensional que relaciona la dureza superficial del hormigón con su resistencia. La normativa seguida ha sido la ASTM C805 (Standard Test Method for Rebound Number Of Hardened Concrete) [19] y EN

12504 – 2 (Ensayos de Hormigón en Estructuras. Parte 2: Ensayos No Destructivos. Determinación del Índice de Rebote) [20] .

En el ensayo, una masa proyectada por un muelle golpea un vástago que está en contacto con la superficie de la estructura o probeta a evaluar. El resultado del ensayo se expresa como un número en términos de la distancia de rebote de la masa. También puede obtenerse un número en términos de la diferencia de energía o velocidad antes y después del impacto de la masa.

#### Equipos utilizados

- Esclerómetro: Pequeño martillo de menos de 2 kg de peso y fuerte energía de impacto.
- Yunque de tarado: Herramienta que lanza el esclerómetro contra la superficie de hormigón.
- Visor escalado: Mide el rebote del esclerómetro.

En cuanto al proceso de ejecución, el primer paso consiste en alisar las superficies de hormigón tratando de reducir al máximo la rugosidad. La distancia entre puntos de aplicación del esclerómetro debe ser de al menos 25 mm. Posteriormente, se carga el yunque para lanzar el esclerómetro con una energía de impacto fija. Se presiona el yunque contra la superficie de hormigón, sin realizar ninguna medición hasta el momento.

En el instante que en el que el yunque llegue a un determinado punto, un resorte suelta el esclerómetro y golpea el hormigón. De momento, todavía no se realiza ninguna medición. El esclerómetro golpea la superficie del hormigón y en función de la dureza de la misma rebota con mayor o menor dureza. El rebote desplaza una guía sobre un visor escalado de 10 a 100 (medida adimensional) y ofrece la medición.

Finalmente, se analiza la huella efectuada en la superficie después del choque y si el impacto aplasta o rompe huecos.



*Figura 4.7. Esclerómetro a utilizar en el ensayo*

## **4.2.7 MÓDULO ELÁSTICO**

En este ensayo se determina el módulo secante de elasticidad en compresión del hormigón una vez endurecido. El método permite determinar tanto el módulo inicial como el módulo estabilizado,



mediante la aplicación de una compresión uniaxial y la obtención de una recta secante a la curva tensión – deformación durante el primer ciclo de carga [20].

Este ensayo permite medir la deformación que experimenta el hormigón al recibir una cierta tensión, determinando así el módulo secante de elasticidad.

#### Equipos utilizados

- Máquina de ensayo: Máquina de ensayo a compresión conforme a la Norma EN 12390-4 con los siguientes requisitos adicionales: capaz de incrementar y disminuir la carga a velocidad constante dentro de una tolerancia determinada y capaz de mantener una carga constante a valores nominales seleccionables con una variación máxima del  $\pm 5\%$ .

En cuanto al proceso de elaboración, las probetas de ensayo deben ser probetas moldeadas (cilindros o prismas) o testigos extraídos que cumplan con los requisitos de las Normas EN 12390-1 o EN 12504-1, debido a la usencia de norma chilena. La dimensión  $d$  (diámetro o anchura) debe ser al menos 3,5 veces  $D$  máx. La relación entre la longitud de la probeta  $L$  y la dimensión  $d$  debe estar en el rango  $2 \leq L/d \leq 4$ . Las probetas de ensayo recomendadas son cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura

Los instrumentos de medida de la deformación se deben colocar de tal forma que la base de medición sea equidistante con los extremos de la probeta. Deben disponerse al menos dos instrumentos de medida de la deformación dispuestos simétricamente respecto al eje central de la probeta. La probeta debe estar centrada en el plato inferior.

La resistencia a la compresión del hormigón  $f_c$  debe determinarse sobre una o varias probetas adicionales, preferiblemente de la misma forma y dimensión que las probetas empleadas para la determinación del módulo secante de elasticidad.

Con objeto de comprobar la estabilidad del dispositivo de medida (*primera comprobación*) y de la colocación de la probeta (*segunda comprobación*) se llevan a cabo tres ciclos de precarga. Se coloca la probeta de ensayo centrada en la máquina de ensayo, con los instrumentos de medición colocados axialmente. Durante el primer ciclo de carga, se aplica una tensión a la probeta a una velocidad de  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s hasta alcanzar la *tensión inferior*  $\sigma_b$ . Se mantiene la *tensión inferior* dentro del  $\pm 5\%$  del valor nominal durante un periodo de tiempo no superior a 20 s. Se registra la *tensión inferior*  $\sigma_b^m$ . Se reduce la tensión a una velocidad de  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s hasta el valor de la *tensión de precarga*  $p$ . Se mantiene la *tensión de precarga* durante un periodo de tiempo no superior a 20 s. Al final de este periodo se ponen a cero los instrumentos de medición.

Se repite el ciclo de carga anterior dos veces adicionales, es decir, ciclos segundo y tercero. Al final del segundo y tercer ciclo se registra la deformación  $\epsilon_b$  en cada línea de medición para el nivel de tensión inferior.

Posteriormente se realizarán varias comprobaciones:

- Primera comprobación: La variación de  $\epsilon_b$  en cada línea de medición entre el segundo y el tercer ciclo no debe ser superior al 10%. Si la diferencia en la deformación es superior al 10%, se detiene el ensayo; se reajustan los instrumentos de medición y se comienza de nuevo el ensayo. Si no es posible reducir la diferencia por debajo del 10% tras la reanudación, el ensayo debe darse por concluido.
- Segunda comprobación: Las deformaciones  $\epsilon_b$  en todas las líneas de medición durante el tercer ciclo no deben diferir en más del 20% de la media de todas ellas.

Respecto al ciclo de carga, se incrementa la tensión desde la *tensión de precarga* hasta la *tensión inferior* a una velocidad de  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s. Se mantiene la *tensión inferior* dentro del  $\pm 5\%$  del valor nominal durante un periodo de tiempo no superior a 20 s. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media  $\epsilon_{b,0}$  para este nivel de tensión.

Se aplican tres ciclos de carga. Para cada ciclo, se incrementa la tensión aplicada a la probeta a una velocidad de  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s hasta que se alcanza la *tensión superior*,  $\sigma_a$ . Se mantiene la *tensión superior* dentro del  $\pm 5\%$  del valor nominal durante un periodo de tiempo no superior a 20 s. Para los ciclos uno y dos, se reduce la tensión a una velocidad de  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s hasta la *tensión inferior*. Se mantiene la *tensión inferior* dentro del  $\pm 5\%$  del valor nominal durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos.

Al final del periodo de *tensión superior* del primer y tercer ciclos, y cuando la carga es estable, se registran las correspondientes deformaciones a lo largo de cada línea de medición y se calculan las deformaciones medias,  $\epsilon_{a,1}$  y  $\epsilon_{a,3}$  para esos niveles de carga.

Al final del periodo de *tensión inferior* del segundo ciclo y cuando la carga es estable, se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media  $\epsilon_{b,2}$  para ese nivel de carga.

- Se debe registrar el valor medido de la *tensión inferior*  $\sigma_b^m$
- Se debe registrar el valor medido de la *tensión superior*  $\sigma_a^m$

Una vez realizadas todas las mediciones durante el nivel superior de tensión del tercer ciclo de carga, se debe determinar la resistencia a compresión de la probeta de acuerdo al procedimiento de carga. Se registra la resistencia a compresión redondeada a 0,1 MPa.

- 1) Determinación de los módulos secantes elasticidad iniciales y estabilizados:

#### Módulo inicial

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\epsilon_{a,3} - \epsilon_{b,0}}$$

#### Módulo estabilizado

$$E_{c,0} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_0} = \frac{\sigma_a^m \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,2}}$$

#### 4.2.8 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL SATURADA Y DENSIDAD REAL SECA

Para determinar la densidad real seca y saturada del hormigón, se seguirá la normativa NCh2186.Of1992 [21], la cual se basa fundamentalmente en la fórmula habitual para determinar la densidad, la cual se define como el cociente entre la masa de la probeta y el volumen que esta ocupa, pero descontando el volumen de poros saturables. Para llevar a cabo el ensayo, se emplean muchas de las herramientas utilizadas en el caso de la densidad aparente, como por ejemplo una balanza de sensibilidad, una cesta de alambre, un recipiente para proceder a la inmersión de la cesta (esto sucederá cuando se esté buscando la densidad saturada), varilla compactadora, picnómetro y estufa.

El procedimiento del ensayo se realiza de la siguiente forma. En primer lugar, se satura la muestra con agua durante 24 horas. Una vez transcurridas estas 24 horas se seca la superficie con la toalla y se tiene la muestra superficialmente seca pero al mismo tiempo saturada, lista para conocer la densidad real saturada. Para realizar el ensayo de la muestra seca esta se introduce en el horno 24 horas hasta que quede completamente seca.

Procediendo de idéntica manera al caso del ensayo de la densidad aparente, el ensayo se repetirá 4 veces para cada una de las dosificaciones.



Figura 4.8. Aparato de medida

A la hora de expresar los resultados se deberá aportar un valor promedio obtenido a partir de todas las pruebas realizadas.

#### **4.2.9 MÉTODOS DE ENSAYO - DETERMINACIÓN DE LA IMPERMEABILIDAD AL AGUA**

La normativa NCh2262.Of1997 [22] establece un procedimiento para determinar en ensayo de laboratorio la impermeabilidad del hormigón. El procedimiento se aplica a hormigones con áridos cuya densidad real seca sea mayor de 2.000 kg/m<sup>3</sup> y D<sub>n</sub> resulte igual o mayor a 40 mm. En este caso también se necesitan dispositivos específicos para este ensayo, como por ejemplo son los moldes metálicos, no absorbentes, rígidos y de caras planas, un equipo para aplicar una presión de agua de magnitud establecida en esta norma y barra de carga de acero de sección semicircular.

El ensayo comenzará cuando las probetas cumplan 28 días de edad. En este momento se colocarán sobre el equipo para que la presión de agua actúe sobre una de las caras y los resultados puedan observarse en las otras. Previamente a la aplicación de la presión se dispondrá un anillo entre el equipo y la maquinaria de aplicación de la presión para que no se produzcan pérdidas de agua o fugas en dicha zona durante la ejecución del ensayo. Posteriormente, las presiones aplicadas se encontrarán entre 0,1 y 0,7 MPa.

Si el agua aflora por el exterior de alguna probeta inmediatamente se debe detener el ensayo y anotar la presión existente. En caso de que no haya aflorado agua, en el mismo instante en que finaliza el ensayo las probetas se deben someter a rotura por hendimiento para conocer la profundidad de penetración de agua así como la forma en que se distribuye.

La expresión de la impermeabilidad del hormigón se mide en base a la penetración del agua en mm, como el promedio de las máximas profundidades de penetración de agua medidas en las tres probetas, con aproximaciones de 1 mm.

### **4.3 MATERIALES NECESARIOS**

---

Previamente a la ejecución de la campaña de ensayos de laboratorio, es necesario realizar una estimación de la cantidad de material que va a ser necesaria para llevarla a cabo.

Para estimar el volumen de mezcla necesario para la ejecución de cada ensayo, es importante conocer la información que recoge la normativa chilena al respecto. Si bien en los ensayos donde la mezcla haya fraguado y esté ya endurecida el volumen necesario vendrá marcado por las dimensiones de las probetas a utilizar, en el caso del hormigón en estado fresco la cantidad viene marcada de la siguiente manera en la normativa existente. Según NCh175.EOf75 *“el tamaño de la muestra de hormigón fresco será superior a una y media vez el volumen necesario para efectuar los ensayos requeridos, y en ningún caso inferior a 30 dm<sup>3</sup> (1 dm<sup>3</sup> = 1 litro).”* En este sentido, el volumen de las mezclas en estado fresco

dependerá directamente de los volúmenes de los recipientes empleados para la realización de los correspondientes ensayos, quedando este definido en muchos casos en la normativa chilena en vigor.

Para tomar orden de magnitud de la medida, 30 litros es la capacidad habitual de una hormigonera de laboratorio. Con esta cantidad de mezcla, es habitual rellenar un mínimo de 5 probetas e incluso practicar ensayo de cono de Abrams. De este modo, 30 litros por mezcla permitirán realizar los ensayos correspondientes a cada dosificación. No obstante, dado que en la norma chilena indica que es la cantidad mínima, se realizará este volumen de mezcla.

Previamente al análisis individual de cada una de las pruebas, se adjuntan a continuación los diferentes ensayos considerados a modo de recordatorio.

- ✓ Resistencia a compresión
- ✓ Tracción Indirecta
- ✓ Módulo Elástico
- ✓ Coeficiente de amortiguamiento
- ✓ Densidad
- ✓ Consistencia
- ✓ Embudo en V
- ✓ Esclerómetro

Una vez introducidos los ensayos a ejecutar se comenta de manera individual la cantidad de material necesaria para ejecutar cada uno de ellos.

### **4.3.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y CONSISTENCIA**

Estos ensayos se realizarán a partir de una misma amasada. Por tanto, para cada una de las dosificaciones se fabricará una hormigonera de 30 litros. El ensayo de resistencia a compresión se realizará conforme la norma NCh 1037 Of. 77 [14], mientras que el ensayo de consistencia se llevará a cabo mediante NCh1019.EOf1974 [17].

Para el ensayo de Resistencia a compresión, se emplearán probetas cilíndricas y una prensa hidráulica de laboratorio. Para el ensayo de cono de Abrams, se utilizará el cono descrito anteriormente.

En la siguiente imagen se observa la prensa hidráulica a emplear [23]:



Figura 4.9. Prensa hidráulica para ensayos de hormigón. Fuente: [23]

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

### 4.3.2 TRACCIÓN INDIRECTA

Para este ensayo, de nuevo se fabricará una amasada de 30 litros para cada una de las 9 dosificaciones que se deben someter a ensayo. El ensayo se llevará a cabo a partir de la norma NCh 1170 Of. 12 [24].

Los equipos a emplear serán la prensa hidráulica utilizada para el ensayo anterior, las probetas cilíndricas y las bandas de apoyo de fibras pretensadas.

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

## 4.4 MÓDULO ELÁSTICO

---

Para la realización de este ensayo se fabricará una amasada de 30 litros para cada dosificación ensayada. El ensayo, ante la ausencia de normativa en el dosier del MINVU, se realizará conforme la norma europea EN 12390 – 4 [18].

Como equipos se emplea una máquina de ensayo a compresión (prensa hidráulica) que además cuente con la capacidad de incrementar y disminuir la carga a una velocidad constante dentro de una determinada tolerancia.

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

#### **4.4.1 COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO**

Para este ensayo, de nuevo se fabricará una amasada de 30 litros para cada una de las 9 dosificaciones que se deben someter a ensayo. El ensayo se llevará a cabo a partir del estudio “A Study on the Damping Ratio of Rubber Concrete” [19].

Los equipos empleados serán el martillo mecánico para golpear las muestras, los acelerómetros dispuestos para registrar la señal vibratoria y el sistema de adquisición de datos que permite almacenar los registros. Seguidamente se muestra una imagen de los equipos empleados.



*Figura 4.10. Equipos empleados en el ensayo de coeficiente de amortiguamiento.*

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

#### **4.4.2 DENSIDAD**

Nuevamente, serán fabricados 30 litros para cada dosificación, ya que es el mínimo especificado en la norma chilena. Las pruebas se llevarán a cabo conforme a las especificaciones de la norma NCh2186. Of1992 [21].

El único equipo necesario será la balanza para pesar las diferentes muestras de hormigón secas y saturadas.

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

#### **4.4.3 EMBUDO EN V**

Para la realización de este ensayo se fabricarán 30 litros para cada dosificación que se vaya a someter a ensayo. Se debe indicar que ante la ausencia de normativa en Chile se va a desempeñar la prueba conforme a las especificaciones de la norma europea EN 12350 – 9: 2011 [25].

El equipo a emplear va a ser el embudo en V descrito en la tarea anterior, seguidamente se adjunta una imagen del mismo [26].



*Figura 4.11. Embudo en V a emplear en el ensayo. Fuente: [26]*



El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

#### **4.4.4 ESCLERÓMETRO**

De nuevo para este ensayo se van a fabricar 30 litros por dosificación. Dado que no existe norma en Chile, se lleva a cabo conforme la normativa europea EN 12504 – 2 [20].

El equipo necesario para llevarlo a cabo es el martillo Schmidt, el yunque de tarado que lanza el martillo contra la superficie de hormigón y el visor de escalado, que mide el rebote.

En la siguiente imagen se muestra un esclerómetro:



*Figura 4.12. Esclerómetro, acompañado de medidor. Fuente: Proceq*

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

#### **4.4.5 IMPERMEABILIDAD**

Para este ensayo serán necesarios 30 litros para cada una de las dosificaciones a ensayar. La normativa a emplear es la NCh 2262. Of1997 [22], donde además del procedimiento a seguir se especifican las características de los áridos.

Los equipos requeridos en este caso son moldes metálicos, no absorbentes, rígidos y de caras planas, en equipo de aplicación de presión de carga y barra de carga de acero de sección semicircular.

En la siguiente imagen se observa el equipo de penetración de agua bajo presión:



Figura 4.13. Equipo de penetración de agua bajo presión. Fuente: Proeti

El volumen total de hormigón necesario para realizar este ensayo es de 30 litros por dosificación. Como son 9 dosificaciones, se realizarán 270 litros.

## 4.5 ACOPIO DE MATERIAL

---

En el apartado anterior de la actividad se ha justificado la cantidad de material necesaria para llevar a cabo cada ensayo. Para determinar los metros cúbicos de mezcla a emplear, se ha tomado como punto de partida las dimensiones mínimas de los recipientes a utilizar, siempre y cuando estos volúmenes fueran superiores a la cantidad mínima que viene especificada en la normativa vigente. En base a estas cantidades, ya es posible conocer el volumen total de mezcla necesario para ejecutar el plan de ensayos. A partir de las dosificaciones presentadas en tareas anteriores y del volumen necesario para la campaña de ensayos, se obtendrá la cantidad de material total a utilizar.

En el siguiente cuadro se resumen los metros cúbicos necesarios para la realización de cada uno de los ensayos:

ENSAYO	CANTIDAD DE MATERIAL (m <sup>3</sup> )
Resistencia a Compresión	0,03
Resistencia a Tracción	0,03
Módulo Elástico	0,03
Coefficiente de Amortiguamiento	0,03
Densidad	0,03

Consistencia	-
Embudo en V	0,03
Esclerómetro	0,03
Impermeabilidad	0,03
<b>TOTAL</b>	<b>0,24</b>

*\*No computa como volumen de mezcla pero hay que considerar estas cantidades de material.*

*Tabla 4.1 Volumen necesario para ejecutar los ensayos de laboratorio. Fuente: Elaboración propia*

En la anterior tabla se aprecia que son 0,24 metros cúbicos los necesarios para llevar a cabo todos los ensayos, no obstante, y para quedar del lado de la seguridad considerando una cantidad de material ligeramente superior a la realmente requerida, se redondea a 0,3 metros cúbicos de mezcla. Tomando como referencia la cantidad media de cada uno de los materiales que componen 1 metro cúbico de cada una de las dosificaciones, la cantidad total de material necesaria para llevar a cabo los ensayos de laboratorio se resumen en la siguiente tabla.

<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (kg)</b>
CEM II 42,5	86
Arena	4263
Gravilla	78
Grava	251
PNFU	6
Agua	52
Plastificante/Superplastificante	0,6
Impermeabilizante*	1,8

*\*La cantidad de impermeabilizante se define habitualmente en función del contenido en cemento, depende del fabricante.*

*Tabla 4.2 Cantidad necesaria de cada material para ejecutar los ensayos. Fuente: Elaboración propia*

## **4.6 FABRICACIÓN DE PROBETAS**

La campaña de ensayos de laboratorio se compondrá de dos etapas claramente diferenciadas e igualmente importantes. La primera de ellas es la fabricación de las probetas que se van a someter a ensayo, la segunda, la propia ejecución de estos ensayos. En este apartado se van a comentar las incidencias que han tenido lugar durante el proceso de fabricación de las probetas.

### **4.6.1 INCIDENCIAS REGISTRADAS**

Para fabricar correctamente las probetas a ensayar, previamente se deberá conseguir una mezcla fiel a la dosificación diseñada. Solo así los resultados obtenidos en la campaña de ensayos pueden ser un buen indicador de las características del hormigón. De este modo, el hormigón se ejecutó siguiendo detalladamente las pautas establecidas en los estándares chilenos, conformando así un material plenamente capacitado para desarrollar el plan de ensayos de laboratorio.

Una de las mayores preocupaciones de los técnicos de laboratorio fue realizar una adecuada caracterización de los insumos empleados para confeccionar las dosificaciones. En este sentido, se tomaron precauciones especiales a la hora de determinar la humedad de los áridos, ya que diferentes valores de humedad en este material pueden alterar la relación agua/cemento real, alterando de este modo parámetros como la consistencia y la resistencia a compresión, a la cual van también ligados otros ensayos como la resistencia a tracción o el módulo de elasticidad. De esta manera, previamente a la fabricación de las dosificaciones, los áridos fueron estabilizados. Durante 3 días estuvieron expuestos a secado, y posteriormente se tomó la humedad. Antes de fabricar cada dosificación, se comprobó que los áridos mantenían los valores iniciales de humedad.

Otro tema importante fue el orden de vertido de los materiales en la hormigonera. Este aspecto de notable influencia en el comportamiento final de la mezcla, en muchas ocasiones no cuenta con la importancia suficiente. En este sentido, se siguieron las pautas establecidas por los técnicos de laboratorio, siendo el orden el siguiente:

- **Agua:** El primer insumo añadido fue agua, aunque no en total cantidad, ya que se añadió la mitad del volumen a emplear definitivamente. El propósito fue lubricar inicialmente la hormigonera, evitando que los áridos se depositen o fijen en las paredes.
- **Grava:** El segundo insumo añadido fue la grava. De este modo se inicia el mezclado del árido de mayor tamaño con la cantidad de agua añadida. La grava, de este modo, se hidrata y no restará agua posteriormente, cuando tenga lugar la reacción de hidratación del cemento.
- **Cemento:** Posteriormente se añadió el cemento, de manera que se iniciaba el mezclado e hidratación del mismo. En este momento hay que estar pendiente a la demanda de agua, e ir añadiendo paulatinamente el agua necesaria hasta agotar la cantidad total.

En la siguiente imagen se observa la pasta de hormigón todavía sin hidratar:



Figura 4.14. Mezcla de materiales en la hormigonera. Fuente: Elaboración propia

- **Arena y NFU premezclado**: El siguiente paso es el vertido de la arena y el NFU, insumos que han sido previamente premezclados. El añadido de estos materiales se realizará con precaución, evitando las aglomeraciones y permitiendo que el mezclado con el cemento tenga lugar de manera adecuada.
- **Agua restante**: En este paso se añadirá el agua restante, de manera que se complete la hidratación del cemento.
- **Aditivos**. El último insumo a añadir serán los aditivos.

En la siguiente imagen se observa el vertido de los insumos:



Figura 4.15. Vertido de insumos en la hormigonera. Fuente: Elaboración propia

Una vez estén todos los insumos en la hormigonera, se deberá dejar un tiempo de mezclado suficiente para que tenga lugar la hidratación del cemento. No existe un tiempo de mezclado fijo, puesto que cada mezcla de hormigón presenta unas características diferentes. No obstante, los técnicos de laboratorio comentaron algunas prácticas o estrategias habituales para determinar cuando ha finalizado este proceso. El más empleado es el siguiente.

Se suspende momentáneamente el proceso de mezclado del hormigón. Una vez la mezcla se estabilice y deje de moverse, se extiende la palma de la mano sobre la superficie de la mezcla. Si al disponer la mano se toca agua y ésta no queda manchada, todavía queda agua por reaccionar con el cemento. Si por el contrario la palma de la mano toca una pasta homogénea y queda manchada, la hidratación ha quedado completada.

En la imagen siguiente se observa un momento donde se podría aplicar este procedimiento sobre la mezcla de hormigón.



*Figura 4.16. Mezcla de hormigón finalizada. Fuente: Elaboración propia*

Una vez el proceso de mezclado haya concluido, se procede a rellenar las probetas y realizar los ensayos donde se requiera un estado fresco del hormigón. De este modo, dado que la amasada fue la misma para realizar los ensayos de resistencia a compresión y consistencia, se tuvo un especial cuidado en no malgastar nada de mezcla de hormigón. A continuación, adjuntamos una imagen de este proceso.



Figura 4.17. Trabajos de relleno de probetas. Fuente: Elaboración propia

En esta fase no llegó a registrarse ninguna incidencia de importancia. No obstante, sí se detectó que para determinadas dosificaciones el fraguado era más rápido, y el vertido del hormigón en las probetas tuvo que realizarse rápidamente ya que los técnicos de laboratorio notaban que la mezcla empezaba a endurecer. Aun así, pudo realizarse sin consecuencias.

## 4.7 EJECUCIÓN DE ENSAYOS

---

Una vez fabricadas las probetas, tuvo lugar la ejecución de los ensayos. Cada uno de ellos se desarrolló cifiéndose por completo a la norma chilena en caso de que esta existiese, y cuando no fue así, a la norma internacional pertinente. Como es habitual en estos casos, en muchos de los ensayos surgieron inconvenientes o dificultados en su ejecución, las cuales se solucionaron gracias a la experiencia de los técnicos de laboratorio encargados de desarrollarlos, o en base a situaciones similares descritas en la literatura científica.

A continuación, se recopilan las incidencias más destacadas que se han encontrado durante la realización de los ensayos.

### 4.7.1 INCIDENCIAS REGISTRADAS

En primer lugar, hubo que repetir un ensayo de cono de Abrams debido a una mala ejecución del mismo. El técnico de laboratorio relleno, compactó y enrasó correctamente el cono. No obstante, en el momento de sujetar el cono empleando los pies, previamente a levantarlo, hubo un pequeño levantamiento en un costado del cono que provocó una fuga de hormigón. Posteriormente, el asiento de la mezcla fue considerablemente mayor al esperado y totalmente fuera del orden de magnitud del resto de dosificaciones.

Se decidió que lo más adecuado era la repetición del ensayo. Rápidamente pudo prepararse otro cono y llevar a cabo la prueba sin mayores problemas. Los resultados estuvieron dentro del orden de magnitud esperado.

A continuación se adjunta una imagen donde se observa la ejecución del ensayo.



*Figura 4.18. Ejecución cono de Abrams. Fuente: Elaboración propia*

El otro percance registrado tuvo lugar durante la ejecución del ensayo de resistencia a compresión mediante prensa hidráulica. En concreto, fue durante el ensayo de una probeta correspondiente a la primera dosificación.

La probeta a ensayar, cuando estaba siendo manipulada por los técnicos de laboratorio, recibió un golpe en un lateral aparentemente sin consecuencias. Dado que visualmente no registraba incidencias, se decidió ensayar igualmente. A continuación, se adjunta una imagen de la misma:





*Figura 4.19. Probeta para ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia*

Una vez se realizó la rotura de la probeta, la resistencia a compresión obtenida por la misma fue anormalmente baja en comparación con la del resto de dosificaciones sometidas a ensayo. En la siguiente imagen se puede ver el ensayo a compresión realizado y la resistencia obtenida. La resistencia fue de 16,2 MPa, del orden de 10 MPa menos que la del resto de probetas sometidas a ensayo.



*Figura 4.20. Ejecución ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia*

Una vez la probeta rompió, se estudió su forma de rotura. Se comprobó como la misma presentaba un claro plano de rotura, probablemente a causa del golpe recibido anteriormente. Dada esta situación, se decidió disponer de una nueva probeta de esta misma dosificación (recordemos que se fabricaron 5 de cada una) para repetir el ensayo. Los resultados estuvieron en concordancia con los esperados y se tomó este resultado como válido.

En la siguiente imagen se observa el plano de rotura de la probeta.



*Figura 4.21. Plano de rotura provocado durante ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia*

## **4.8 RESULTADOS**

---

En este apartado de la actividad, se adjuntan los resultados obtenidos para las diferentes dosificaciones ensayadas. De esta forma, se recogen los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, coeficiente de amortiguamiento, densidad, consistencia, embudo en V, esclerómetro y permeabilidad.

Como se puede ver en la siguiente tabla, se realizaron dos pruebas por cada dosificación y ensayo, de manera que, de producirse algún tipo de anomalía en algún ensayo, sería fácilmente detectable.

Tras realizar esta breve introducción, se adjunta la tabla con los resultados definitivos de la campaña:

Mezcla	Resistencia a Compresión (Mpa)	Tracción Indirecta (MPa)	Módulo Elástico (Gpa)	Coefficiente de amortiguamiento (%)	Densidad (gr/cm3)	Consistencia (cm)	Embudo en V (s)	Esclerómetro (Mpa)	Permeabilidad (cm/s)
1	29,2	4,6	27	62	2,38	10	13	36,1	3,1
	28,75	4,4	26	64	2,36	10	13	36,2	3,3
2	26,85	3,4	20	73	2,29	8,5	9	35,6	4
	27,1	3,6	21	71	2,3	9	9	35,75	4,2
3	23,7	2,3	17,5	80	2,21	9	10	34,9	6,2
	23,9	2,35	18	78,5	2,22	9	10	35	6,5
4	26,5	3,2	18	78	2,25	12	9	35,35	5,5
	26,7	3,3	19	75	2,27	13	9	35,45	5,3
5	24,5	2,5	17	81	2,23	14	8	34,85	5,5
	25	2,7	18	78	2,25	15	8	35	5,6
6	27,8	3,9	23	68	2,33	10	11	35,8	3,2
	28,2	4,2	24	67	2,32	10,5	11	35,95	3,4
7	24,7	2,7	18,5	77	2,24	11	9	35,05	4,9
	25	2,8	19	76	2,25	12	9	34,85	5
8	28,4	4,65	24,5	63	2,19	9	12	36,3	4
	28,8	4,75	24,75	65	2,2	9,5	12	36,2	3,7
9	25,2	2,8	17	81	2,23	15	8	35,15	5,1
	25,5	3	18	78	2,25	15	8	35,3	4,8

Tabla 4.3 Resultados ensayos para las diferentes dosificaciones. Fuente: Elaboración propia

## 4.9 CONCLUSIONES

---

En el presente Capítulo, se ha comenzado definiendo el plan de ensayos de laboratorio ideado para evaluar las dosificaciones de hormigón propuestas. Cada uno de estos ensayos se ha seleccionado para conocer el comportamiento del hormigón en relación con las características inicialmente demandadas en el marco del proyecto. Como se ha comentado anteriormente, la mezcla diseñada debía reunir las propiedades de impermeabilidad, bombeabilidad y elasticidad.

Estos ensayos no se han descrito de manera detallada, pues se ha considerado que para conocer los distintos detalles o especificaciones que puedan resultar de interés se puede recurrir al documento oficial. De esta manera, la descripción de los ensayos se ha llevado a cabo con la intención de ofrecer una visión global del ensayo, comprender adecuadamente cuáles son los objetivos de cada uno de ellos, y conocer los equipos, dispositivos o herramientas que van a ser necesarios para realizar los ensayos.

Posteriormente, se ha realizado una estimación del material necesario para llevar a cabo la campaña de ensayos de laboratorio diseñada. Este procedimiento es el paso previo a la propia ejecución de los ensayos. Se ha observado que la cantidad de material varía significativamente en base al estado del hormigón a la hora de realizar las pruebas. Si el hormigón está en estado fresco, la cantidad de material viene limitada por el tamaño de los recipientes o herramientas a utilizar, no obstante, la norma chilena adopta una cantidad mínima de mezcla de 30 litros, por lo que en muchas ocasiones se ha debido considerar este volumen para realizar la estimación. En el caso del hormigón endurecido, la cantidad de material necesaria se define en función de las dimensiones y tamaño de las probetas. Así mismo, la norma de Chile también contempla una especificación al respecto, pues indica que la cantidad de material necesaria se debe mayorar por un coeficiente de 1,5 para mantenerse en todo momento del lado de la seguridad.

Una vez conocidos los metros cúbicos de mezcla que se necesitan para la ejecución de los respectivos ensayos, se recurre a las dosificaciones propuestas para conocer la cantidad exacta de cada material. La cantidad de material necesaria debe poseerse en el laboratorio en el momento de iniciar los ensayos, pudiendo así ejecutar todas las muestras tanto en estado fresco como endurecido con antelación a la realización de las pruebas.

Antes de la ejecución del plan de pruebas, se han fabricado las probetas que se van a ensayar. Conformar las probetas de manera adecuada es clave para que los ensayos se puedan realizar de manera correcta y representativa. Por esta razón se han seguido detalladamente los estándares chilenos, tratando así de encontrar las mayores garantías de éxito en el plan de ensayos.

Por último, se ha desarrollado el plan de ensayos de laboratorio. Si bien algunos de ellos se han llevado a cabo sin mayores problemas, en otros han surgido inconvenientes que se han debido subsanar de la manera más eficiente posible. Esto ha sido posible gracias a la experiencia de los técnicos de laboratorio encargados de la realización de los mismos.

## **Capítulo 5: Valorización económica de las dosificaciones**

---

## **5.1 INTRODUCCIÓN**

---

El cometido principal de este Capítulo será valorar económicamente cada una de las dosificaciones ensayadas, de manera que éstas se puedan evaluar tanto desde un punto de vista técnico como económico, con miras a encontrar aquella composición que sea una mejor solución para el proyecto de manera global. De este modo, la actividad se va a estructurar de la siguiente manera. En primer lugar, se dedicará un apartado al completo a valorar económicamente cada una de las dosificaciones ensayadas. La valorización de cada dosificación se realizará en función del costo de los materiales que la componen, y de la cantidad en que aparece cada uno de estos materiales. Una vez obtenido el coste total de cada una de las dosificaciones, se establecerá una clasificación donde estas aparezcan ordenadas de menor a mayor costo por unidad de volumen.

Realizado este apartado, se incluirá un segundo bloque donde se comentarán aquellas particularidades de cada una de las dosificaciones que podrían incurrir en un sobre coste considerando la puesta en obra. Esto se refiere fundamentalmente a la necesidad de proveer una bomba de mayor potencia o condiciones de instalación específicas. Finalmente, se realizará un apartado donde, considerando todos los sobre costes económicos correspondientes a cada dosificación, se obtendrá aquella más interesante desde un punto de vista económico.

## **5.2 VALORIZACIÓN ECONÓMICA DE MATERIALES**

---

El propósito de este apartado es la caracterización económica de cada una de las mezclas dosificadas. En este sentido, el primer paso será obtener un valor aproximado del costo por kg de cada uno de los insumos en el mercado chileno. Dado que esta cifra puede oscilar en función de la cantidad total de hormigón requerida, del emplazamiento de la obra, o de la disponibilidad puntual del insumo, entre otros, se han consultado diferentes proveedores, tanto físicos como on line, además de plantas de hormigón, donde se nos ha informado del costo que supone para ellos cada insumo. Las plantas de hormigón consultadas han sido las de mayor prestigio en Chile, las cuales cuentan además con presencia en la Región Metropolitana de Santiago.

Si bien este procedimiento ha sido de utilidad para determinar los costos asociados al cemento, a los áridos y al NFU, se ha actuado de manera diferente para conocer el costo asociado a los aditivos empleados. Son dos los aditivos químicos a emplear en las dosificaciones: superplastificante e impermeabilizante. Dado que estos productos se usan en un volumen diferente en las plantas de fabricación de hormigón, y que muchas veces estas plantas tienen acuerdos comerciales con los proveedores de aditivos, los precios de estos insumos proporcionados por las plantas de fabricación de hormigón no se han considerado como representativos, ya que pueden estar minorados debido a la compra al por mayor. Así mismo, tampoco se ha considerado que el precio de venta de los aditivos encontrado en determinadas webs on – line pudiera resultar fiable, debido a la elevada variabilidad encontrada. Esta variabilidad viene influenciada por diferentes factores. En primer lugar, la venta al

## Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

por menor de aditivos por internet emplea en ocasiones productos al límite de su vida útil, que pueden obtenerse a buen precio si se opta por una rápida utilización. En otras ocasiones, esta venta en pequeñas cantidades lleva asociados elevados gastos, debido a que muchas compañías proveedoras tan sólo plantean la comercialización al por mayor del producto.

En esta situación, se buscó la colaboración con un proveedor reconocido y fiable de aditivos, la empresa BASF. Desde la compañía, se nos facilitó un catálogo de precios para sus diferentes productos, donde se consideraba venta al por menor, al por mayor e intermedia.

A partir de estas consultas realizadas, se ha elaborado una tabla donde se indica el costo por kg de cada uno de los materiales que se han empleado en las dosificaciones.

Insumo	\$/kg
Cemento II 42,5 N	78
Cemento II 42,5 R	78
Cemento IV 42,5 N	78
Agua	0,39
Arena	6,5585
Grava	8,931
Gravilla	8,931
Aditivo SP	980
Aditivo Impermeabilizante	1.890
Caucho F	91
Caucho G	48,75

*Tabla 5.1 Valorización económica de los insumos empleados (Precios en pesos chilenos)*

Analizando los precios de los diferentes insumos, se detecta a primera vista el aumento significativo del costo del NFU en comparación con un árido convencional. Es por tanto previsible que las mezclas que sustituyan una mayor porción de árido por NFU aumenten visiblemente su costo por m<sup>3</sup>. Así mismo, se comprueba que el cemento es también un insumo caro. Ya que en las dosificaciones empleadas se han probado diferentes relaciones A/C, fijando en 170 kg/m<sup>3</sup> la cantidad de agua, el contenido en cemento para cada mezcla ha variado, viéndose modificado el costo total de cada dosificación. También se puede comprobar como los aditivos son con diferencia los insumos más caros, especialmente el aditivo impermeabilizante. Sin embargo, dado que aparecen en cantidades muy pequeñas en cada una de las dosificaciones, y que la variación de esta cantidad de una a otra mezcla es muy pequeña (dado que se dosifican sobre un pequeño porcentaje del peso total del cemento), la influencia que tendrán sobre el costo total por m<sup>3</sup> de dosificación será menor que en las ocasiones anteriores.

En base el costo por kg indicado en la tabla anterior, y a la composición de las diferentes dosificaciones, se han obtenido los costos por m<sup>3</sup> de cada una de las mezclas planteadas en el diseño de experimentos. Se recopilan los resultados en la siguiente tabla:

Dosificación	\$/kg
--------------	-------

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

1	50.553,7
2	47.619,1
3	45.282,3
4	49.261,5
5	46.419,5
6	50.227,1
7	45.417
8	50.610,1
9	48.130,1

*Tabla 5.2 Cuantificación económica de las dosificaciones empleadas (Precios en pesos chilenos)*

En la tabla anterior se observa que el costo de las diferentes mezclas oscila entre 45.000 y 50.000 \$/m<sup>3</sup>. Las mezclas 1, 6 y 8 son las más caras, superando la barrea de los 50.000 \$/m<sup>3</sup>. Esto es debido a que son aquellas que llevan adicionada una cantidad mayor de cemento. Por el contrario, las mezclas más económicas, la 3, 5 y 7, siendo las que menos cemento poseen. Efectivamente, se comprueba que las mezclas que cuentan con una cantidad mayor de cemento son aquellas que consiguen una resistencia a compresión mayor, de manera opuesta a aquellas mezclas que cuentan con un contenido en cemento menor.

Una vez valorizadas económicamente las diferentes dosificaciones, en el siguiente apartado se analizará la puesta en obra de cada una de ellas. Principalmente atendiendo al bombeo, el proceso podrá incurrir en unos gastos mayores si este proceso requiere de una mayor mano de obra o de algún elemento específico. Será entonces cuando se podrán determinar los costes totales imputados a cada dosificación. Esta cuantía económica se comparará con los resultados obtenidos tras la campaña de ensayos de laboratorio, de manera que la dosificación idónea para llevar a cabo el proyecto se pueda determinar mediante una evaluación técnico – económica.

### **5.3 COSTOS REFERIDOS AL PROCESO DE INSTALACIÓN DE CADA DOSIFICACIÓN**

---

Como se ha mencionado anteriormente, la tarea constructiva que mayor costo económico puede repercutir respecto del total es el bombeo de la mezcla de hormigón al interior del colchón geotextil. Por tanto, esta fase es la que requiere de un mayor análisis, para determinar si alguna de las dosificaciones puede incurrir en sobrecostos respecto a su puesta en obra.

El paso inicial será determinar el tipo de bomba a emplear. Básicamente, se han considerado dos opciones: camión bomba estacionado en obra y bomba estacionaria. A continuación, se analizan las particularidades en el procedimiento del bombeo, tratando de dilucidar si se producen variaciones en función de cual sea la consistencia o la capacidad de relleno de cada una de las dosificaciones.

#### **Camión bomba estacionada [27]**



## Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

Empleando esta maquinaria para el bombeo, se deben tener en cuenta una serie de consideraciones previas al inicio de los trabajos. En primer lugar, se debe prever la instalación de cuñas en cada una de las ruedas del camión, de manera que este quede totalmente inmobilizado. Existen ya camiones que cuentan con dispositivos de anclaje, no obstante, estas versiones de camión bomba son las más novedosas, siendo difíciles de encontrar en algunas situaciones. Es por esto que, si no se dispone de las garantías suficientes acerca de la estabilidad del camión, se dispondrán estas cuñas en cualquier caso.

Posteriormente, se deberán analizar los codos y uniones de la tubería de bombeo, comprobando que estos son estancos y que no van a dar pie a fugas de hormigón que, en el caso de bombeo a gran presión, pudieran dar pie a roturas en la conducción. En caso de no poder garantizar la estanqueidad, se deberán proveer de elementos de refuerzo, tal y como se ve en la siguiente imagen:



*Figura 5.1. Sellado de juntas en manguera para bombeo de hormigón*

Respecto a los codos de la tubería de bombeo, se comprobará que no tengan un radio de curvatura reducido. Si esto sucediera, el hormigón podría no fluir correctamente por el interior de la manguera, generando apelotonamientos que pondrían en un riesgo importante la ejecución del proceso. Por último, una consideración que se debe tener en cuenta siempre previamente a proceder con el bombeo es la lubricación de la manguera o conducto. Para ello, se puede emplear algún tipo de mortero de baja calidad.

Una vez adoptadas las precauciones anteriores, se podrá iniciar al bombeo, fase que también deberá realizarse bajo unas determinadas circunstancias. Es importante que los estabilizadores del camión se mantengan en todo momento extendidos y apoyados sobre el terreno firme, tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---



*Figura 5.2. Estabilizadores de camión bomba de hormigón*

Además, el vertido de hormigón se programará en diferentes tongadas para evitar sobrecargas puntuales. Las diferentes operaciones enmarcadas en esta fase serán realizadas por un mínimo de dos operarios.

A continuación, se muestra una imagen de la maquinaria:



*Figura 5.3. Camión bomba de hormigón. Fuente: [28]*

### **Bomba estacionaria [29]**

Igual que en el caso anterior, previamente a la ejecución del bombeo, se llevarán a cabo una serie de trabajos previos que permitirán garantizar que los trabajos son llevados a cabo adecuadamente. En primer lugar, en relación a las uniones entre tramos de tubería, los cuáles acostumbran a ser de longitudes menores que para el caso anterior, se deberá asegurar que estos elementos soporten

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

adecuadamente las presiones en el bombeo. En segundo lugar, se revisará que la manguera o tubo de bombeo está sujeta e inmovilizada de forma correcta, ya que esta se empalmará con la bomba para cada actuación a realizar, y no vendrá fija de serie. Respecto de la lubricación necesaria para la tubería, se procederá de igual manera que en el caso anterior empleando un mortero de dosificación de baja calidad.

Respecto a la utilización de este tipo de bomba, también será necesaria la presencia de, mínimo, dos operarios para llevar a cabo el bombeo.

Una imagen de esta maquinaria se adjunta a continuación [4]:



*Figura 5.4. Bomba de hormigón. Fuente: [30]*

Como se ha visto en la descripción anterior, no existen características de una u otra maquinaria que dependan de la dosificación de la mezcla a bombear. No obstante, a partir de este momento, se trabajará bajo el supuesto del empleo de un camión bomba de hormigón, ya que para la dinámica de funcionamiento del futuro sistema de revestimiento de canales será lo más adecuado.

En esta tesitura, y profundizando en las características del hormigón para ser bombeado a partir de este tipo de bombas, se debe destacar que la capacidad de bombeo no viene influenciada únicamente por la consistencia de la mezcla, sino también por la capacidad para atravesar codos y cambios de sección transversal. De este modo, a parte del ensayo de consistencia, también se deberá analizar el ensayo de embudo en V para evaluar y caracterizar la viabilidad para el bombeo que presentará cada una de las mezclas. Además, estas dos propiedades tendrán una influencia directa en el proceso de desgaste de la bomba, aunque este análisis excede al propósito de esta tarea.

En este caso en concreto, todas las mezclas se han concebido para permitir un bombeo adecuado, sin incurrir en ningún tipo de problema o deficiencia en el mismo. No obstante, habrá mezclas que presenten una mayor idoneidad que otras para tal cometido.

Analizando diferentes bancos de precios, se ha tratado de encontrar un rendimiento aproximado de los camiones bomba para hormigonado. Se ha comprobado que este rendimiento es muy similar para

diferentes mezclas, aunque disminuye ligeramente cuando la consistencia de la mezcla pasa de fluida a blanda (se debe recordar que un hormigón es bombeable a partir de resistencia blanda, y que la resistencia líquida queda prohibida por normativa). De este modo, por m<sup>3</sup> de mezcla de hormigón, para un hormigón de consistencia fluida el rendimiento en horas del camión bomba es de 0,045, mientras que para el caso de hormigones de consistencia blanda es de 0,042, es decir, hay una diferencia de 0,003. Considerando que la hora de alquiler de un camión bomba es de 119.000 \$, esta diferencia de rendimiento supone un costo añadido de 357 \$ por hora y m<sup>3</sup> de hormigón.

Aunque a priori el aumento del costo para una mezcla de consistencia blanda es muy reducido, para grandes extensiones de canal puede registrarse un aumento notable del costo de ejecución de la obra debido a este ligero sobrecoste registrado cuando la mezcla tiene consistencia blanda.

## 5.4 COSTOS TOTALES POR DOSIFICACIÓN

---

Para realizar una valorización económica completa de cada una de las dosificaciones, no es suficiente con cuantificar cada mezcla a partir del costo unitario de los insumos, sino que habrá que estimar los sobrecostos imputados a cada una de ellas en función de su capacidad de puesta en obra.

Es por esto que, en el apartado anterior, se ha realizado una estimación del sobrecoste asociado al bombeo de una mezcla cuya consistencia sea blanda en lugar de fluida. De nuevo, se matiza que el sobrecoste detectado, 357 \$ por hora y m<sup>3</sup>, no resulta muy significativo a priori, aunque podría incrementar el valor de la obra notablemente en caso de que la superficie de canal a revestir fuera sumamente extensa.

Para identificar que dosificaciones serían aquellas susceptibles de acarrear sobrecoste, se muestra de nuevo la tabla de resultados particularizada para los ensayos de consistencia (cm) y embudo en V (s):

Mezcla	Consistencia (cm)	Embudo en V (s)
<b>1</b>	10	13
	10	13
<b>2</b>	8,5	9
	9	9
<b>3</b>	9	10
	9	10
<b>4</b>	12	9
	13	9
<b>5</b>	14	8
	15	8
<b>6</b>	10	11
	10,5	11
<b>7</b>	11	9
	12	9
<b>8</b>	9	12

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

	9,5	12
<b>9</b>	15	8
	15	8

Tabla 5.3 Tabla de resultados de los ensayos de consistencia y embudo en V.

Se detecta que las mezclas 2, 3 y 8 presentan consistencia blanda. Cabe destacar que se considera consistencia blanda cuando el asiento en cono de Abrams se encuentra dentro del intervalo 6 – 9 cm. La consistencia fluida se identifica para asientos dentro del intervalo 10 – 15 cm. Serán por tanto estas mezclas las que, potencialmente, puedan suponer un sobrecosto desde el punto de vista de la ejecución del bombeo.

Dicho esto, en la siguiente tabla se indican los costos finales de material para cada una de las dosificaciones planteadas, así como el sobrecosto de ejecución del bombeo, cuando corresponda.

Dosificación	Costo material (\$/m3)	Sobrecosto bombeo (\$/m3/h)
<b>1</b>	50.553,7125	-
<b>2</b>	47.619,1315	+ 357 \$
<b>3</b>	45.282,2635	+ 357 \$
<b>4</b>	49.261,48	-
<b>5</b>	46.419,5035	-
<b>6</b>	50.227,0615	-
<b>7</b>	45416,989	-
<b>8</b>	50610,0565	+ 357 \$
<b>9</b>	48130,1095	-

Tabla 5.4 Costo material final por dosificación

## 5.5 CONCLUSIONES

El propósito de este Capítulo ha sido la realización de una caracterización y valorización económica de cada una de las mezclas planteadas. El análisis económico se ha enfocado desde una doble perspectiva, en primer lugar estudiando el costo de fabricación de cada una de las mezclas a partir del costo unitario de cada uno de los insumos, y en segundo lugar estudiando la puesta en obra de cada dosificación.

Para la resolución se han dispuesto 3 apartados. En el primer apartado se ha realizado el estudio del costo de fabricación de cada una de las mezclas. Para ello, previamente, se ha debido identificar el costo de cada insumo utilizado. Para la obtención de este costo, la búsqueda se ha enfocado desde una perspectiva de mercado, tratando de encontrar cifras cercanas a la ejecución real de la solución. En este sentido, se han realizado consultas a diferentes plantas de hormigón de Chile, especialmente a aquellas que cuentan con una mayor presencia o zona de influencia en la región metropolitana de

Santiago. También se han revisado los precios de diferentes proveedores online de productos de construcción. Mediante esta dinámica se han identificado los costos del cemento y de los áridos.

El procedimiento ha sido diferente en el caso de los aditivos. Si bien en un principio se planteó esta misma dinámica, pronto se comprobó que existe en el mercado una alta variabilidad en relación el precio de adquisición de este insumo. Muchos de los proveedores online ofertan productos al borde de su vida útil a precios muy bajos, otros en cambio venden únicamente cantidades mínimas sumamente elevadas. También se consultó en relación a este insumo a las plantas de hormigón y tampoco se encontraron valores fiables, dado que cada una tiene acuerdos comerciales con los diferentes proveedores de aditivos. En este escenario, se decidió consultar directamente con los proveedores de aditivos de hormigón a gran escala con presencia internacional. Se contactó con la empresa BASF, quién facilitó información y catálogos comerciales de donde se obtuvieron los costes para los aditivos empleados.

En un segundo apartado se valorizó económicamente los sobrecostos asociados a la implantación de las diferentes dosificaciones. Mediante consulta de los diferentes bancos de precios, se comprobó como el bombeo de mezclas fluidas puede conseguir rendimientos ligeramente mayores que el bombeo de mezcla blandas. Siendo estos rendimientos por hora y m<sup>3</sup> de escasa magnitud, se debe mencionar que sí pueden llegar a incurrir en sobrecostos notables cuando se vaya a bombear una cantidad muy importante de hormigón.

Finalmente, en un último apartado se recopilamos las conclusiones de los dos apartados, añadiendo una tabla donde se resume el costo material de cada una de las dosificaciones y el sobrecosto potencial que podían suponer, en su caso. Previamente, se adjuntaron los resultados de los ensayos de consistencia y capacidad de relleno medido en embudo en V.

## **Capítulo 6: Análisis multicriterio. Selección de las dosificaciones relevantes**

---

## **6.1 INTRODUCCIÓN**

---

El propósito del presente Capítulo es identificar aquella dosificación que resulte más adecuada desde una perspectiva técnico – económica. En estos momentos, ya se han caracterizado todas las dosificaciones tanto desde un punto de vista técnico como desde una perspectiva económica, y es momento de, en base a los resultados obtenidos, identificar cual es la dosificación más conveniente tras la realización de los correspondientes ensayos de laboratorio. Es importante indicar que el resultado de esta actividad no será definitivo, pues las dosificaciones deberán someterse todavía a ensayo de sismorresistencia mediante un modelo numérico que simulará su comportamiento real una vez instaladas en el interior del colchón geotextil.

Para identificar la dosificación más adecuada, se desempeñará un análisis multicriterio donde las diferentes variables serán tanto el aspecto económico como los diferentes ensayos de laboratorio realizados. No obstante, no todos los ensayos serán incluidos en el análisis ya que habrá casos donde no proceda su inclusión. Por ejemplo, el ensayo que mide la fluidez del hormigón en estado fresco (cono de Abrams) ha proporcionado unos resultados donde todas las dosificaciones resultan aptas para bombear. En esta tesitura no se podrá seleccionar una mezcla mejor que otra, pues todas podrían desempeñar el cometido que se les exige.

La tarea se estructurará en 3 bloques claramente diferenciados. En un primer bloque se identificarán aquellas variables técnicas que vayan a formar parte del análisis multicriterio. Se comentará la importancia de cada uno de los ensayos realizados y se justificará, individualmente, si procede que forme parte del proceso o no. Concretamente, el breve razonamiento expuesto en el párrafo anterior se extenderá a todos los ensayos realizados en la campaña de laboratorio. Además, se indicará razonadamente el peso que se le dará a cada una de las variables y la manera en que van a formar parte del proceso.

En un segundo bloque, se realizará la caracterización económica de las diferentes dosificaciones. Los criterios económicos tendrán un peso similar a los criterios técnicos dentro del análisis multicriterio. Además, dado que en la tarea anterior se ha caracterizado económicamente también el proceso de bombeo de las diferentes mezclas, se penalizarán aquellas mezclas que incurran en sobrecostes según su procedimiento constructivo. El método de penalización se razonará en el marco de este apartado.

En un último apartado se realizará el análisis multicriterio, indicando los resultados finales y comentando la dosificación que finalmente se considerará más óptima para formar parte del colchón geotextil atendiendo a los resultados obtenidos en la campaña de ensayos de laboratorio.

## **6.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES TÉCNICAS**

---



Como se ha comentado en la introducción, el primer apartado se destinará a caracterizar e identificar las variables técnicas influyentes en la selección de la dosificación óptima. Las variables técnicas partirán de los resultados alcanzados en los ensayos de laboratorio, de modo que a continuación, individualmente, se evaluarán los ensayos realizados y se razonará si aplica su consideración como variable técnica.

Además, para los ensayos que se incluyan en el análisis multicriterio se indicará si son de importancia especial o no.

### **6.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

El ensayo de resistencia a compresión mide este mismo parámetro, siendo una de las pruebas básicas en la caracterización de cualquier hormigón o mortero. A partir de los valores que ofrezca la resistencia a compresión, se puede empezar a conocer detalladamente las características que poseerá un determinado hormigón, así como el rango de valores en el que se moverá cuando se analicen otros parámetros. Si bien la resistencia a compresión no es una propiedad con una influencia decisiva en este caso, puede aportar buena información en relación con los valores obtenidos en otros ensayos como son la resistencia a tracción o el módulo de elasticidad. De este modo, se considera que este ensayo debe estar presente en el análisis multicriterio.

### **6.2.2 RESISTENCIA A TRACCIÓN**

Este parámetro está sumamente ligado a la resistencia a compresión. Mide la resistencia que presentará el hormigón cuando esté sometido a esfuerzos de tracción, siendo ésta una característica a tener en cuenta en el ámbito del proyecto. La resistencia a tracción del hormigón puede resultar clave a la hora de resistir movimientos diferenciales del terreno o acciones sísmicas, de modo que se considera que este ensayo debe aparecer en el análisis multicriterio. Dado que es el parámetro relativo a propiedades mecánicas que más aplica en el marco de este proyecto, se le concederá un peso especial en el análisis.

### **6.2.3 MÓDULO ELÁSTICO**

El módulo elástico mide la capacidad elástica del hormigón ya endurecido. Este parámetro se encuentra ligado directamente a la resistencia a compresión, de hecho existen fórmulas empíricas que relacionan estos dos parámetros para situaciones en que no sea posible ejecutar ambos ensayos. En este caso en concreto, y para esta aplicación en particular, la importancia de este ensayo es muy elevada dado que se está buscando un hormigón elástico. Por ello, a esta variable se le concederá un peso especial.

#### **6.2.4 COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO**

El coeficiente de amortiguamiento es un parámetro que rara vez se mide en el ámbito del hormigón. El hormigón es un material sumamente rígido en el que no se suelen buscar propiedades relacionadas con la disipación de energía. Sin embargo, en este caso se está buscando un material de relleno del colchón geotextil que resista en mayor medida a las sollicitaciones externas, tratando de minimizar la fisuración asociada a fenómenos sísmicos o desplazamientos del terreno. Este ensayo se considerará por tanto como variable, aunque no se le concederá un peso especial. El principal motivo es que el ensayo mediante el cual se ha obtenido el coeficiente de amortiguamiento no está normalizado, ni en normativa chilena ni en normativa internacional.

#### **6.2.5 DENSIDAD**

La densidad es un parámetro que debe caracterizarse siempre que se dosifique un nuevo hormigón. En este caso se estaría buscando un hormigón denso, donde el poro fuera cerrado y contribuyera de esta manera a la impermeabilidad posteriormente. No obstante, todas las dosificaciones han obtenido valores muy similares de densidad, y dado que la solución no lleva implícita una mejora ante un determinado valor de densidad, se decide descartar este parámetro del análisis multicriterio.

#### **6.2.6 CONSISTENCIA**

La consistencia de la mezcla en estado fresco tiene una influencia directa en la bombeabilidad del material. En este caso, se buscaba una consistencia para las mezclas blanda o fluida, dado que son las consistencias demandadas cuando el hormigón debe ser bombeable. En este caso, todas las dosificaciones han conseguido consistencia blandas o fluidas, de modo que todas ellas serían bombeables. Dado que es muy difícil cuantificar cuanto más bombeable sería el hormigón dentro de estas dos consistencias, se decide desestimar este ensayo como variable para el análisis multicriterio.

#### **6.2.7 EMBUDO EN V**

Mediante el ensayo de embudo en V se registra la viscosidad de la mezcla de hormigón. En esta tesitura, para obtener unos resultados óptimos del ensayo, el tiempo de vaciado debe ser menor a 20 segundos. Dado que todas las mezclas cumplen, y siguiendo el razonamiento empleado en el apartado anterior, se decide desestimar la consideración de este ensayo como variable en el análisis multicriterio.

#### **6.2.8 ESCLERÓMETRO**

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

El ensayo de esclerómetro mide la resistencia a impacto de la superficie del hormigón ensayado. Si bien esta práctica no es habitual, dado que en la mayoría de aplicaciones el hormigón no está sometido a impacto, en algunas ocasiones como esta en particular debe utilizarse. En este caso, el revestimiento del canal estará expuesto al golpeo de sólidos en suspensión tales como áridos, ramas o residuos. Estos sólidos incidirán de manera constante en el revestimiento, pudiendo provocar fisuras si este no resiste convenientemente. En este caso, las fisuras no pondrían en jaque la impermeabilidad del sistema, dado que el colchón en sí es impermeable, pero sí que podrían condicionar la estabilidad del revestimiento en conjunto. Dado que es de considerable importancia este parámetro, se le concederá un peso especial.

### **6.2.9 PERMEABILIDAD**

El hormigón dosificado para este proyecto busca ser apto para su aplicación en cualquier tipo de colchón geotextil. Esta tecnología utiliza tanto tejidos permeables como impermeables, de modo que la mezcla debe estar preparada para su uso en cualquier escenario de aplicación. Dado que el hormigón buscado desde un principio debía tener propiedades impermeabilizantes, se decide incluir este ensayo en el análisis multicriterio.

### **6.2.10 VARIABLES FINALES**

De este modo, finalmente, los ensayos considerados como variables en el análisis multicriterio son:

- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción
- Módulo de Elasticidad
- Coeficiente de amortiguamiento
- Esclerómetro
- Permeabilidad

De los anteriores, los ensayos de resistencia a tracción, módulo de elasticidad y esclerómetro tendrán un peso especial en el análisis.

## **6.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES ECONÓMICAS**

---

Tal y como se ha especificado en la introducción, en este punto se van a identificar las variables de índole económica. En este sentido, habrá una única y principal variable que es el costo por dosificación. En la tarea anterior se han caracterizado económicamente todas las dosificaciones sometidas a ensayo, de modo que ya son conocidas los costos de todas ellas por metro cúbico.

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

Los costos por metro cúbico se obtuvieron a partir de los costos por kg de cada uno de los insumos que aparecen en la dosificación. Estos precios se obtuvieron en valor de mercado, teniendo que consultar de este modo con diferentes proveedores de cada uno de los insumos. Finalmente, se recopiló la tabla que se muestra a continuación, donde se indica el precio medio de cada material.

Insumo	\$/kg
Cemento II 42,5 N	78
Cemento II 42,5 R	78
Cemento IV 42,5 N	78
Agua	0,39
Arena	6,5585
Grava	8,931
Gravilla	8,931
Aditivo SP	980
Aditivo Impermeabilizante	1.890
Caucho F	91
Caucho G	48,75

Tabla 6.1 Valorización económica de los insumos empleados

A partir de estos valores y de la composición en peso de cada una de las dosificaciones, se determinó el coste por metro cúbico de cada una. Se muestra en la siguiente tabla:

Dosificación	\$/m3
1	50.553,7
2	47.619,1
3	45.282,3
4	49.261,5
5	46.419,5
6	50.227,1
7	45.417
8	50.610,1
9	48.130,1

Tabla 6.2 Cuantificación económica de las dosificaciones empleadas

## 6.4 ANÁLISIS MULTICRITERIO

---

Una vez se han caracterizado las variables a emplear, es momento de realizar el análisis multicriterio. Previamente, se expondrá la manera en que se han otorgado los pesos en cada una de las variables, así como se ha concedido un peso especial a las variables seleccionadas en el apartado anterior.

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

Tanto las variables técnicas como la económica se han ordenado del 1 al 9, en función del resultado ofrecido por cada variable en cada ensayo considerado. Se ha decidido que este valor sea el peso asociado a cada dosificación en cada variable, de manera que, sumando todos los pesos asociados a cada dosificación, se obtenga un valor total que sirva de comparativa entre las diferentes dosificaciones sometidas a ensayo.

A continuación, se adjunta cada variable y dosificación con sus respectivos pesos para el análisis multicriterio.

<b>Dosificación</b>	<b>Resistencia a Compresión</b>
1	9
2	6
3	1
4	5
5	2
6	7
7	3
8	8
9	4

Tabla 6.3 Ponderación variable resistencia a compresión

<b>Dosificación</b>	<b>Tracción indirecta</b>
1	8
2	6
3	1
4	5
5	2
6	7
7	3
8	9
9	4

Tabla 6.4 Ponderación variable resistencia a tracción

<b>Dosificación</b>	<b>Módulo elástico</b>
1	1
2	4
3	7
4	6
5	9
6	3
7	5

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

8	2
9	8

Tabla 6.5 Ponderación variable módulo elástico

Dosificación	Coficiente de amortiguamiento
1	1
2	4
3	3
4	6
5	9
6	3
7	5
8	2
9	8

Tabla 6.6 Ponderación variable resistencia a compresión

Dosificación	Esclerómetro
1	8
2	6
3	2
4	5
5	1
6	7
7	3
8	9
9	4

Tabla 6.7 Ponderación variable esclerómetro

Dosificación	Permeabilidad
1	9
2	6
3	1
4	3
5	2
6	8
7	5
8	7
9	4

Tabla 6.8 Ponderación variable permeabilidad

Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile.

---

Así mismo, para la variable económica se han puntuado en base a criterios de economicidad.

<b>Dosificación</b>	<b>Variable económica</b>
1	2
2	6
3	9
4	4
5	7
6	3
7	8
8	1
9	5

Tabla 6.9 Ponderación variable económica

Además, para las variables consideradas con un peso especial este valor se ha multiplicado por 2, de manera que estas han puntuado doble en la clasificación definitiva.

De esta manera la tabla definitiva del análisis multicriterio queda de la manera siguiente:

<b>Mezcla</b>	<b>Resistencia a Compresión</b>	<b>Tracción Indirecta</b>	<b>Módulo Elástico</b>	<b>Coefficiente de amortiguamiento</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>Esclerómetro</b>	<b>Variable Económica</b>	<b>TOTAL</b>
<b>1</b>	9	16	2	1	9	16	2	55
<b>2</b>	6	12	8	4	6	12	6	54
<b>3</b>	1	2	14	3	1	4	9	34
<b>4</b>	5	10	12	6	3	10	4	50
<b>5</b>	2	4	18	9	2	2	7	44
<b>6</b>	7	14	6	3	8	14	3	55
<b>7</b>	3	6	10	5	5	6	8	43
<b>8</b>	8	18	4	2	7	18	1	58
<b>9</b>	4	8	16	8	4	8	5	53

Tabla 6.10 Análisis multicriterio



Finalmente, se observa como la dosificación número 8 es aquella que consigue una puntuación más alta. No obstante, todavía falta aplicar una penalización por sobrecoste a aquellas dosificaciones que, por poseer consistencia blanda, incurran en un bombeo más costoso. En este sentido, son las mezclas 2, 3 y 8 aquellas que poseen consistencia blanda. La penalización finalmente será descontar 2 puntos sobre la puntuación total alcanzada en el análisis multicriterio. De este modo, la clasificación queda de la siguiente manera:

Dosificación	Total
1	55
2	52
3	32
4	50
5	44
6	55
7	43
8	56
9	53

Tabla 6.11 Resultados finales

Se comprueba que igualmente la dosificación 8 es la que obtiene una mejor puntuación. Sin duda, los excelentes valores obtenidos en los ensayos de resistencia a tracción y esclerómetro han resultado decisivos para que esta dosificación sea la seleccionada. Además, pese a ser un hormigón con buenas propiedades mecánicas ha conseguido también unos valores aceptables en los ensayos de módulo de elasticidad y coeficiente de amortiguamiento. De este modo, técnicamente esta dosificación ha conseguido los mejores resultados al combinar de manera adecuada la rigidez necesaria para conseguir una buena resistencia en la mezcla ya endurecida, con la elasticidad suficiente para disponer de capacidad sismorresistente. La única desventaja asociada a esta dosificación es que es ligeramente más cara que el resto de dosificaciones, no obstante, este factor queda contrarrestado con las buenas prestaciones técnicas que es capaz de ofrecer.

## 6.5 CONCLUSIONES

El objetivo de este Capítulo ha sido encontrar la dosificación de hormigón óptima para formar parte del revestimiento de la nueva solución constructiva. Los criterios técnicos se han obtenido a partir de los resultados alcanzados en la campaña de ensayos de laboratorio, mientras que los criterios económicos se han determinado a partir de la valorización económica realizada.

Para cumplir con el propósito establecido, el documento se ha estructurado en 3 bloques diferentes. En el primero de los bloques se han caracterizado las variables técnicas. En este sentido, se ha justificado razonadamente cuales ensayos de laboratorio aplicaban para formar parte del análisis multicriterio y cuáles no, además de identificar que ensayos (o variables) deberían tener un peso

especial a la hora de realizar el análisis. Finalmente, se ha determinado que los ensayos a incluir en el análisis multicriterio fueran:

- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción
- Módulo de elasticidad
- Coeficiente de amortiguamiento
- Esclerómetro
- Permeabilidad

De los anteriores, se han seleccionado el ensayo de resistencia a tracción, módulo de elasticidad y esclerómetro para poseer un peso especial, debido a la gran influencia que pueden ejercer en el comportamiento del revestimiento los resultados de estos ensayos.

En un segundo apartado se ha caracterizado la variable económica a partir de los costos de cada una de las dosificaciones. Básicamente, el contenido de este apartado ha sido un pequeño resumen del Capítulo 5, donde se justificó en mayor grado de detalle el costo económico de las diferentes mezclas.

Finalmente, en el último apartado se llevó a cabo el análisis multicriterio, siendo la mezcla 8 aquella que consiguió una mejor puntuación. Por último, quedaba aplicar una penalización de dos puntos sobre aquellas dosificaciones que fueran de consistencia blanda, ya que estas incurren en ligeros sobrecostos en el bombeo del hormigón al interior del colchón geotextil. Aun así, la mezcla número 8 era la que alcanzaba una mayor puntuación, por lo que fue la seleccionada finalmente.

## **Capítulo 7: Análisis sísmico mediante modelación numérica**

---

## **7.1 INTRODUCCIÓN**

---

El objeto del presente Capítulo es la exposición del planteamiento, cálculo y análisis de resultados de la modelización numérica de las dosificaciones candidatas. Con ello, se pretende disponer de las herramientas necesarias para llevar a cabo un análisis comparativo en la respuesta tenso-deformacional mostrada por las diferentes dosificaciones frente a un hormigón convencional en una situación de sollicitación sísmica.

Para ello, en primer lugar se realizará la modelación numérica de un canal de regadío, definiendo: tamaño del modelo, condiciones de contorno, ecuaciones constitutivas de los materiales, elementos de cálculo y la metodología de aplicación de las cargas. Posteriormente, se simulará el comportamiento estructural del canal ante una acción sísmica, con las distintas dosificaciones relevantes. Finalmente, se obtendrán y analizarán los resultados, seleccionando la dosificación óptima desde una perspectiva de comportamiento estructural del hormigón.

El cálculo se ha llevado a cabo mediante el software comercial basado en el MEF – Método de los Elementos Finitos - ANSYS Mechanical APDL.

## **7.2 DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO**

---

En este apartado se abordan los aspectos fundamentales que caracterizan al modelo numérico de Elementos Finitos implementado. Dichos aspectos son:

- Dimensiones generales del modelo
- Tipología y dimensiones de los elementos finitos empleados
- Condiciones de contorno
- Caracterización de los materiales
- Metodología de aplicación de cargas

### **7.2.1 DIMENSIONES GENERALES DEL MODELO**

Como se detallará más adelante, la característica principal del modelo implementado es el tipo de sollicitación escogida. Puesto que el objetivo principal del hormigón diseñado es la mejora de su deformabilidad y capacidad de disipación de energía gracias a la adición de una proporción de NFU, se ha decidido simular en el modelo una serie de escenarios sometidos a una sollicitación sísmica de diseño.

Esta peculiaridad supone una serie de limitaciones directas sobre las dimensiones del modelo y, como se verá más adelante, también sobre las propias condiciones de contorno del mismo.

Por lo que respecta a las dimensiones mínimas del mismo, para su determinación se ha atendido a tres diferentes criterios:

- Recomendaciones de la literatura existente
- Limitaciones propias del fenómeno de propagación de ondas sísmicas
- Garantía de uniformidad en la distribución de tensiones y deformaciones en, al menos, una sección de control. Esto es, evitar posibles alteraciones de los resultados en puntos próximos a los contornos.

Atendiendo a la literatura existente, existen múltiples modelos numéricos de análisis sísmico de estructuras. Dentro de todos ellos, debido al marcado carácter lineal de los canales de regadío y a tratarse de una estructura semienterrada, interesa recurrir a aquellos estudios que traten estructuras con características similares a las mencionadas. Si bien es cierto que el estudio sísmico de obras de regadío y conducciones no resulta una práctica frecuente, existen otros muchos casos de estudio acerca de la respuesta dinámica de tramos rectos de túnel. Algunas de las más destacadas son [31], [32] y [33].

En todas ellas se nombra, o aplica, un criterio sancionado por la práctica que establece el ancho transversal mínimo – tanto en horizontal como en vertical – del que debe disponer el modelo para no verse influenciado por los contornos en los puntos de interés. Puesto que se trata de modelos cilíndricos, dicha distancia mínima se establece en el orden de 10 veces el radio interior del túnel desde el eje hasta los contornos.

Trasladado al caso de una estructura semienterrada de sección en artesa como se muestra a continuación, es posible adaptar dicho criterio a través del radio mínimo que circunscribe a la sección del canal.

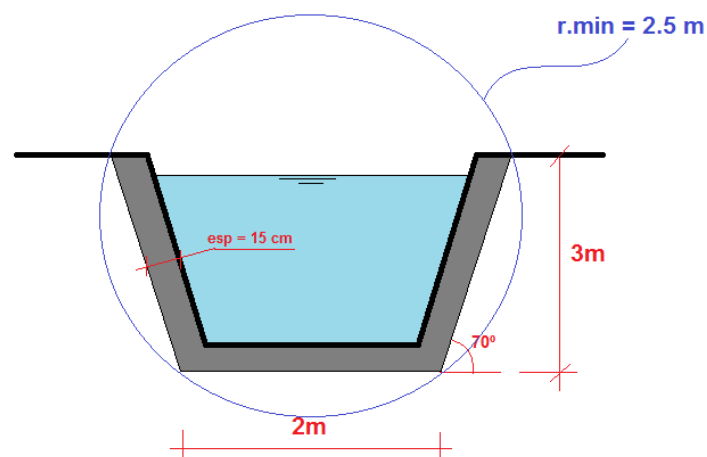


Figura 7.1. Sección transversal canal tipo. Radio mínimo equivalente. Fuente: elaboración propia.

Puesto que en los modelos de túneles existe un contorno perimetral continuo – por tratarse de estructuras totalmente enterradas –, tanto el ancho total como el alto del modelo será el doble que en el caso que nos ocupa – puesto que no existe terreno por encima del canal –. Es por ello que, las

dimensiones globales del modelo a implementar corresponden a una separación de 10 radios equivalentes ente el eje del canal y los contornos, lo que supone un total de 50 x 25 metros. **La longitud limitante en este caso es 25 metros.**

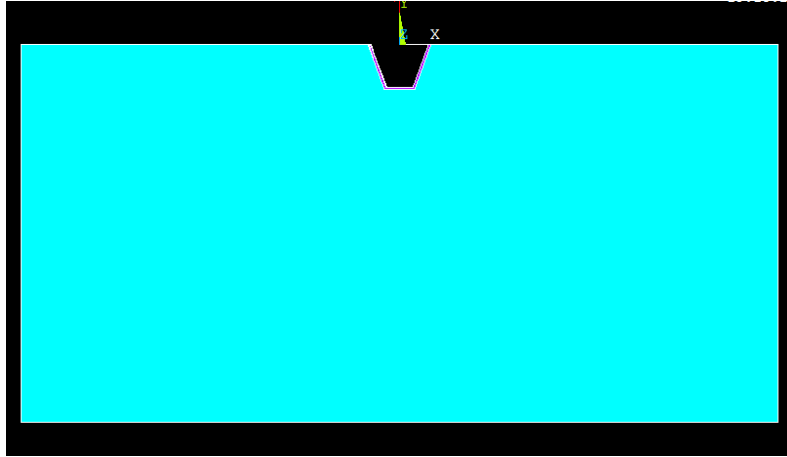


Figura 7.2. Sección transversal modelo ANSYS. Fuente: elaboración propia.

Por lo que respecta al fenómeno del sismo, sin entrar en mayor detalle, el modelo debe ser capaz de captar, al menos, la mayor longitud de onda que se transmita en él. En una sollicitación sísmica se distinguen tres tipologías distintas de onda: ondas P, ondas S y ondas de Rayleigh (superficiales).

Puesto que se trata de una estructura semienterrada de poca profundidad – se entiende como un elemento lineal superficial comprendido habitualmente en un único estrato –, la longitud de onda determinante será la mayor de las ondas Rayleigh incidentes. Dicha longitud se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\lambda_{SUP} = \frac{V_{RAYLEIGH}}{f_{inf}}$$

Donde  $\lambda_{sup}$  indica la mayor longitud de onda,  $V_{RAYLEIGH}$  la velocidad de propagación de dicha onda y  $f_{inf}$  la menor frecuencia esperable.

La velocidad de propagación, a su vez, se obtiene mediante la expresión:

$$V_R = 0.9 * V_S = 0.9 * \sqrt{\frac{E_{estrato} / 2 * (1 + \nu)}{\rho_{estrato}}}$$

Donde  $E_{estrato}$  es el módulo de elasticidad del estrato de propagación de la onda,  $\nu$  indica el coeficiente de Poisson del terreno y  $\rho_{estrato}$  la densidad del mismo.

Como se verá más adelante, se ha escogido un supuesto de un único estrato potente de arcillas saturadas, cuyos parámetros son:

- $E_{\text{estrato}} = 10 \text{ MPa}$
- $\nu = 0.45$
- $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$
- Velocidad de Rayleigh obtenida = 1.50 m/s
- Frecuencia mínima de afección esperable = 0.1 Hz
- **Longitud de onda máxima = 15 metros**

De entre los dos criterios anteriores, el más restrictivo ha resultado en una separación mínima del eje del canal a los contornos de 25 metros. El último criterio, basado en la observación de la distribución de tensiones en una primera simulación, validará las disposiciones anteriores.

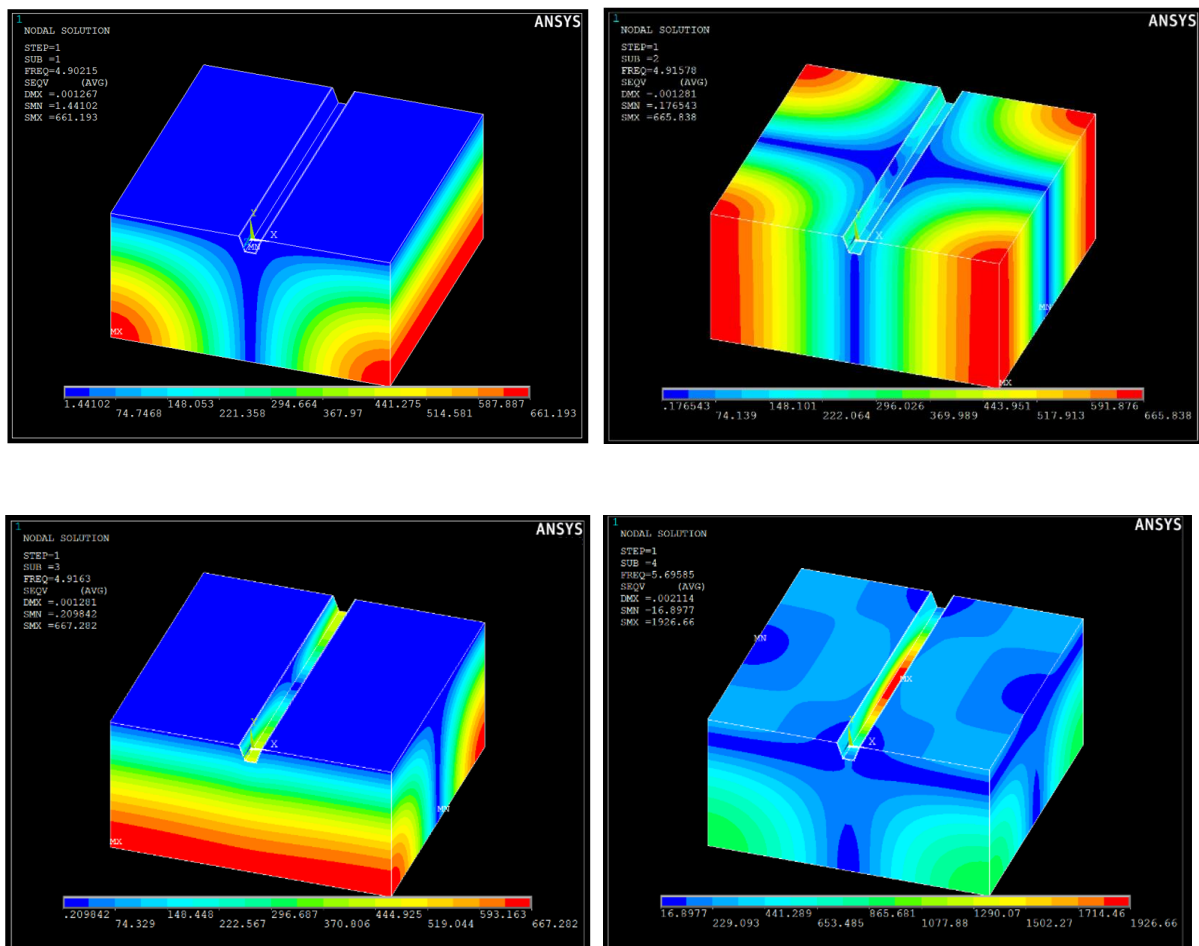


Figura 7.3. Distribuciones uniformes de tensiones de Von Mises tras análisis modal. Fuente: elaboración propia.

Como puede apreciarse en la figura anterior, para una primera simulación orientativa – sin incluir los parámetros correspondientes a las dosificaciones y demás aspectos concretos –, se observa que, para las dimensiones dadas, el modelo proporciona una respuesta uniforme en la práctica totalidad de su longitud. Es por ello que los criterios anteriores quedan validados y se empleará un modelo de **50 x 25 metros**.

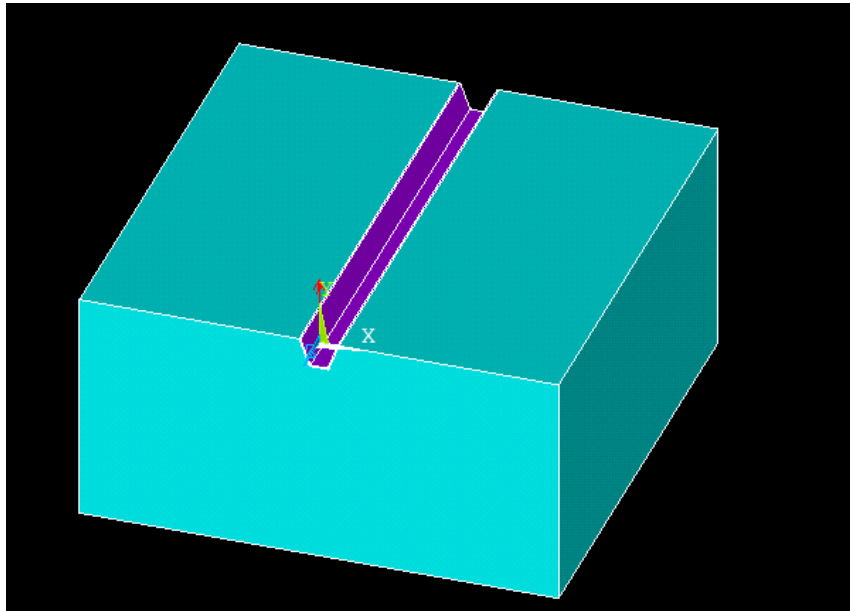


Figura 7.4. Perspectiva general del modelo. Fuente: elaboración propia.

## 7.2.2 TIPOLOGÍA Y DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El presente apartado hace referencia a una fase que suele resultar fundamental en el tiempo de computación de cualquier modelo numérico de grandes dimensiones: la discretización.

Para llevar a cabo una discretización adecuada que sea solución de compromiso entre una precisión suficiente de los resultados y tiempo de computación, es fundamental plantear, a priori, que tipo de análisis y de resultados se desean obtener.

En nuestro caso, se realizará para cada cálculo de un escenario planteado con tres tipos distintos de análisis:

- Análisis estático con las cargas de peso propio y sobrecarga de caudal de agua – en los casos correspondientes –. Tiene como finalidad servir de punto de partida para el cálculo de tensiones y deformaciones previo al análisis modal.
- Análisis modal del conjunto estructura-terreno. Tiene por finalidad servir de base para el posterior análisis espectral. Es necesario para proseguir con el cálculo.
- Análisis sísmico espectral. Existen diferentes formas de simular la acción sísmica en estructuras – método de las fuerzas estáticas equivalentes, análisis espectral, análisis transitorio, etc. –. En



este caso, por las propiedades de la estructura – lineal semienterrada – y su particular relación con el entorno – se encuentra embebida en el terreno –, **resulta más conveniente realizar un análisis espectral**. De él, se obtendrán las tensiones máximas y mínimas actuantes tanto en el propio hormigón del canal como en el terreno.

Puesto que se desea obtener tensiones en el plano medio del hormigón, éstas deben ser obtenidas de algún modo en dicho punto. Además, como las dimensiones globales del modelo son muy superiores al propio espesor del hormigón, debe buscarse una configuración que, con el menor número de elementos posible, proporcione los resultados deseados.

Por otra parte, en análisis de carácter dinámico conviene que las dimensiones de los elementos sean lo más regulares posible por lo que el espesor del hormigón resulta ya un factor limitante en el tamaño de los elementos.

Citados los condicionantes, caben dos posibilidades: dividir el espesor de hormigón en un número par de filas de elementos o emplear elementos con nodos intermedios y una sola capa.

La segunda opción resulta mucho más ventajosa desde el punto de vista computacional y, pese a que la solución en nodos intermedios se calcula como la interpolación entre los nodos contiguos, el hecho de tratar con distribuciones de carga uniformes, grandes dimensiones del modelo y homogeneidad en todos los materiales, permite adoptar esta segunda solución sin incurrir en un error grave. Es por ello que se determina que el tamaño de los elementos será el correspondiente al espesor del hormigón y, además, estos serán de tipo hexaédrico con nodos intermedios e integración de esfuerzos cortantes reducida para evitar inducir rigideces adicionales.

En el caso de ANSYS, existen diversas opciones de elemento que cumplen dichas condiciones, pero uno de ellos es capaz de calcular, en todas las fases del proceso descrito, la tensión equivalente de Von Mises. Se trata del elemento SOLID186 de 20 nodos:

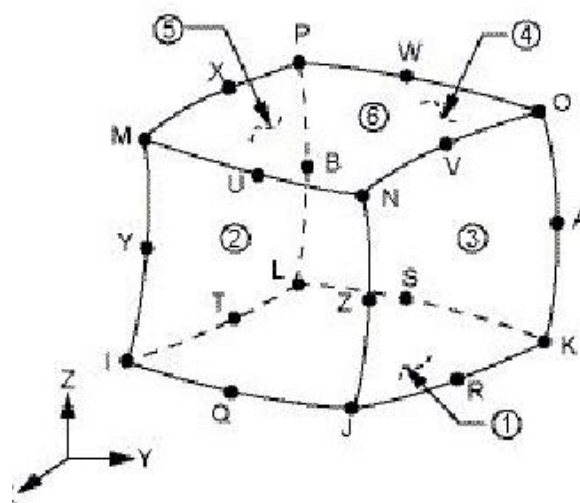


Figura 7.5. Elemento SOLID186 empleado en el cálculo. Fuente: SCHARNET.

### 7.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Por lo que respecta a las condiciones de contorno, sólo se impondrán de dos tipos:

- Vinculaciones con el resto de terreno y canal: coacción en los desplazamientos. Se coartan los desplazamientos normales a todas las superficies limítrofes del modelo, exceptuando la cara horizontal superior – interfaz terreno-canal-atmósfera – la cual queda libre.

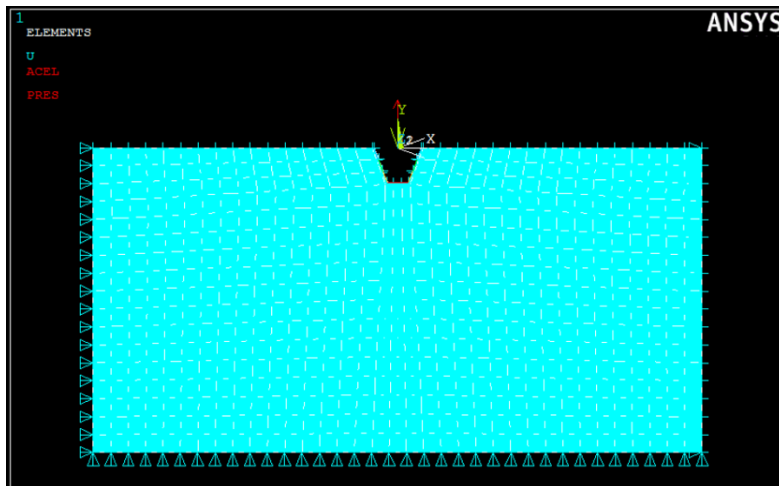


Figura 7.6. Aplicación de condiciones de contorno. Vinculaciones. Fuente: elaboración propia.

- Efecto del agua en solera y cajeros del canal, en los casos que se considere canal con agua: como una ley hidrostática de presiones de valor igual al producto de la densidad del agua por la profundidad en cada punto. Se considera que la circulación del agua en el canal se produce en régimen laminar, situación en la cual los efectos de las presiones dinámicas resultan despreciables frente a la componente hidrostática. Se representa como una ley prismática triangular a lo largo de sendos cajeros y de valor uniforme sobre la solera del canal.

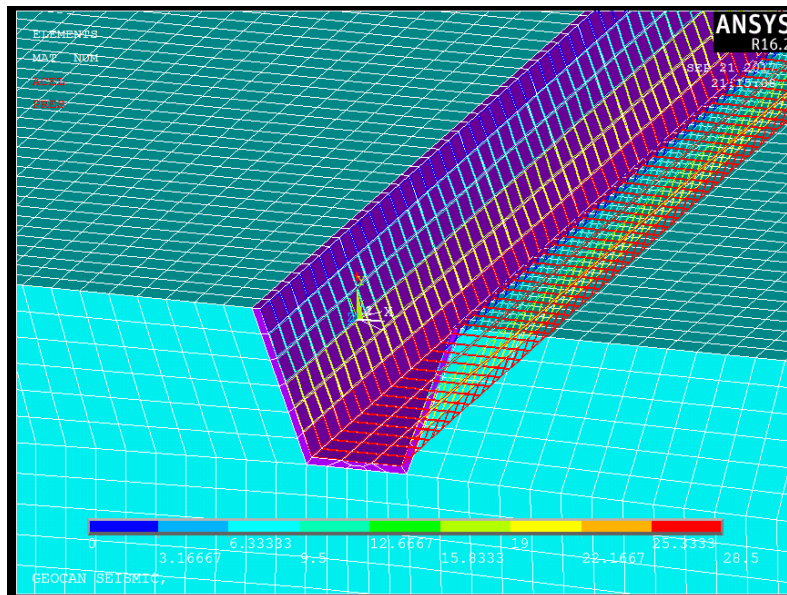


Figura 7.7. Aplicación de condiciones de contorno. Presión de agua. Fuente: elaboración propia.

## 7.2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Puesto que no se va a analizar un análisis a rotura – tipo *push over* – y la finalidad última es la comparación entre la respuesta frente a una sollicitación dinámica de las distintas dosificaciones y no la reproducción precisa del estado del terreno, se asume que el comportamiento de los materiales sigue un patrón elástico-lineal. Es decir, existe proporcionalidad directa en todo momento entre la tensión y la deformación según dicta la Teoría de la Elasticidad y expresada mediante la Ley de Hooke generalizada.

En términos del hormigón, equivale a considerar que la rotura se produce inmediatamente en el límite elástico del mismo. No se considera comportamiento distinto a compresión y a tracción. No se trata de hacer un cálculo iterativo donde se observe cómo evolucionaría una fisura o rotura, sino comparar que dosificación presenta menor estrés durante su trabajo en la rama elástica.

## 7.2.5 METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE CARGAS

En el modelo actuarán tres tipos de cargas:

- Peso propio: implementado mediante la densidad de cada material y la aplicación de una aceleración uniforme vertical y hacia debajo de  $9.81 \text{ m/s}^2$
- Sobrecarga de agua: implementada, como se citó anteriormente, mediante la aplicación de una presión hidrostática sobre la solera y cajeros del canal. Sólo se contemplan dos posibilidades: canal lleno y canal vacío.

- Sismo: se introduce en el modelo siguiendo una técnica muy habitual en estructuras de edificación, obras de paso y otro tipo de construcciones con grandes masas suspendidas. Se trata de la introducción de un espectro de diseño en pseudo-aceleraciones para un rango de frecuencias determinado.

El cálculo de dicho espectro se ha realizado atendiendo a lo dictado por la Norma Oficial Chilena NCh 433. Se ha considerado la ubicación del canal en Santiago – aceleración efectiva máxima de 2.94 g –; construcción de categoría D – construcciones aisladas o provisionales no destinadas a habitación, no clasificables en ninguna de las categorías A, B o C–; y suelo tipo IV – cohesivo saturado con resistencia última a compresión simple sin drenaje igual o inferior a 0.05 MPa –.

La expresión que define el espectro es:

$$S_a = \frac{S \cdot A_0 \cdot \alpha}{R^* / I}$$

donde:

- $S_a$  es el valor de la pseudo-aceleración de cálculo
- $A_0$  es la aceleración efectiva máxima para la localidad escogida
- $\alpha$  es el coeficiente amplificador
- $R^*$  es el factor de reducción
- $I$  es el coeficiente relativo a la construcción

Las expresiones de  $\alpha$  y  $R^*$ , como sigue:

$$\alpha = \frac{\left(1 + 4,5 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^p\right)}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3}$$

$$R^* = 1 + \frac{T^*}{0,10 T_0 + \frac{T^*}{R_0}}$$

donde:

- $T_n$  es el periodo de vibración del modo 'n'
- $T_0$  y  $p$  son parámetros relativos al tipo de suelo tomados de la tabla 6.3 de dicha norma
- $R_0$  depende del tipo de estructura. Se extrae del epígrafe 5.7 de la norma.

Como puede apreciarse, para cada valor de frecuencia se obtiene su correspondiente pseudo-aceleración de cálculo, resultando, para el supuesto planteado, como sigue:

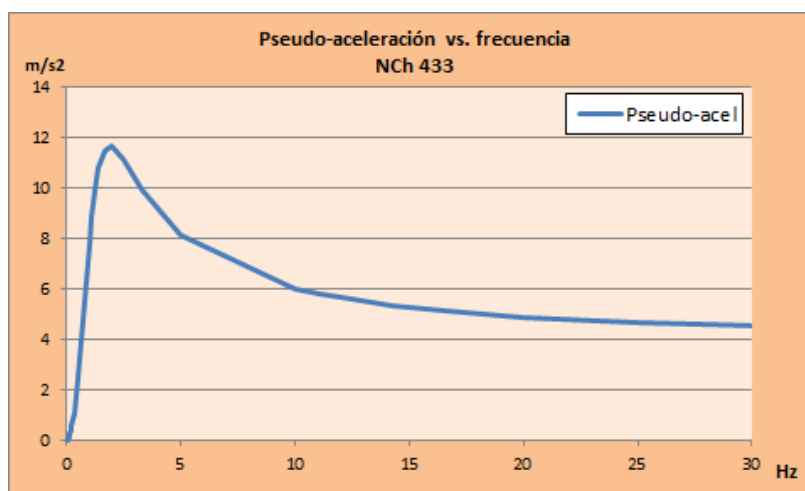


Figura 7.8. Espectro de pseudo-aceleraciones de diseño para el caso propuesto. Fuente: elaboración propia a partir de NCh 433.

## 7.3 SIMULACIÓN SÍSMICA DEL CANAL

En el presente apartado se plantean los diferentes casos de estudio, los parámetros a controlar para cada uno de ellos y los resultados obtenidos del cálculo. Sin entrar en interpretaciones, la finalidad de este epígrafe es la de describir el procedimiento de cálculo.

### 7.3.1 ALTERNATIVAS DE ESTUDIO

En el Capítulo 3 se describen un total de 9 mezclas, de las cuales se obtienen dos probetas por amasada. Las características de cada una de las mezclas junto con los resultados obtenidos en los ensayos se muestran, a modo de recordatorio, a continuación. Cabe señalar que se ha añadido una muestra ficticia de referencia (muestra 0) con los valores típicos de un hormigón convencional de 30 MPa – valores fijados por el Eurocódigo 2.

Dosificación	Porcentaje de NFU	Tamaño de NFU	Relación A/C	Tamaño Máximo Árido
1	NFU 5	F	A/C 1	Dmáx 1
2	NFU 5	M	A/C 2	Dmáx 2
3	NFU 5	G	A/C 3	Dmáx 3
4	NFU 10	F	A/C 2	Dmáx 3
5	NFU 10	M	A/C 3	Dmáx 1
6	NFU 10	G	A/C 1	Dmáx 2
7	NFU 15	F	A/C 3	Dmáx 2

*Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de riego en Chile.*

---

<b>8</b>	NFU 15	M	A/C 1	Dmáx 3
<b>9</b>	NFU 15	G	A/C 2	Dmáx 1

*Tabla 7.1 Variables significativas del modelo. Fuente: Elaboración propia*

Mezcla	Resistencia a Compresión (Mpa)	Tracción Indirecta (MPa)	Módulo Elástico (Gpa)	Coefficiente de amortiguamiento	Δ Coeficiente de amortiguamiento (%)	Densidad (gr/cm3)	Consistencia (cm)	Embudo en V (s)	Esclerómetro (Mpa)
0	30	2,9	33	5	0	2,4	-	-	-
1	29,2	4,6	27	8,1	62	2,38	15	13	36,1
	28,75	4,4	26	8,2	64	2,36	15	13	36,2
2	26,85	3,4	20	8,65	73	2,29	17	9	35,6
	27,1	3,6	21	8,55	71	2,3	17	9	35,75
3	23,7	2,3	17,5	9	80	2,21	16	10	34,9
	23,9	2,35	18	8,925	78,5	2,22	17	10	35
4	26,5	3,2	18	8,9	78	2,25	17	9	35,35
	26,7	3,3	19	8,75	75	2,27	17	9	35,45
5	24,5	2,5	17	9,05	81	2,23	18	8	34,85
	25	2,7	18	8,9	78	2,25	18	8	35
6	27,8	3,9	23	8,4	68	2,33	16	11	35,8
	28,2	4,2	24	8,35	67	2,32	16	11	35,95
7	24,7	2,7	18,5	8,85	77	2,24	15	9	35,05
	25	2,8	19	8,8	76	2,25	16	9	34,85
8	28,4	4,65	24,5	8,15	63	2,19	15	12	36,3
	28,8	4,75	24,75	8,25	65	2,2	15,5	12	36,2
9	25,2	2,8	17	9,05	81	2,23	18	8	35,15
	25,5	3	18	8,9	78	2,25	18	8	35,3

Tabla 7.2 Resumen de resultados obtenidos en ensayos para las muestras de control. Fuente: elaboración propia.

Por tanto, se establecen, al menos, un total de 10 alternativas a procesar. Además, hay que añadir la posible influencia del agua en la distribución tensional final, lo que supondría un total de 20 casos de estudio. Para el análisis de cada dosificación, se tomará el valor de ambas probetas mostrado en la tabla superior.

Puesto que se trata de un modelo de grandes dimensiones, con elementos de nodos intermedios y un análisis dinámico espectral, el tiempo de computación total puede comprometer el desarrollo de fases posteriores del proyecto. Es por ello que, en primer lugar, se determinará la influencia de la presión de agua en el resultado final ya que, *a priori*, la carga sísmica podría parecer muy superior a la ejercida por la circulación del agua.

Para ello, se toma de referencia el caso de 'Mezcla 0' y se realiza una primera simulación con canal lleno y vacío.

Los parámetros a controlar en todas las mezclas serán, para los primeros modos de traslación en las tres direcciones:

- Máximo esfuerzo de compresión localizado
- Máximo esfuerzo de tracción localizado
- Máxima tensión de comparación de Von Misses

De este modo, será posible obtener la dosificación que soporta un menor estrés frente a sollicitación sísmica.

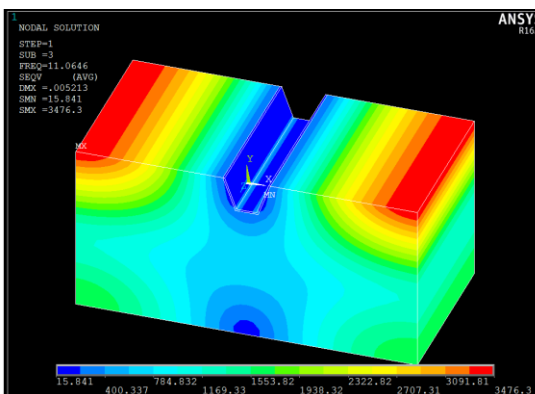
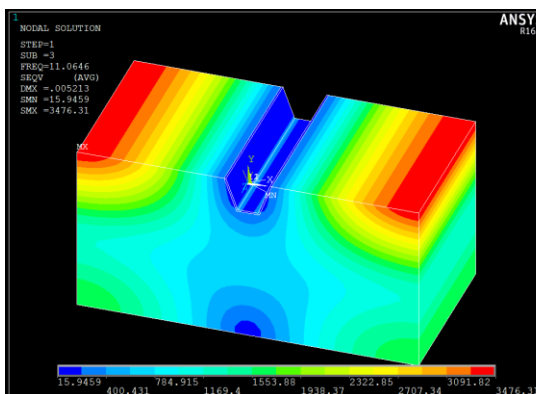
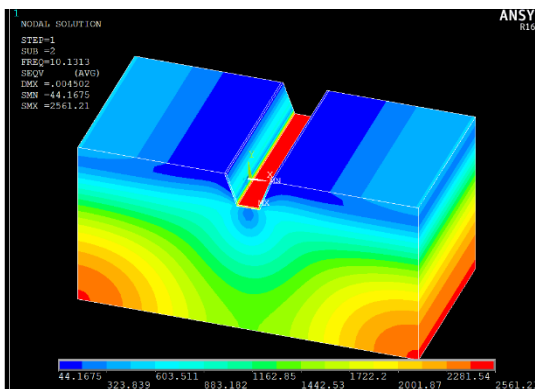
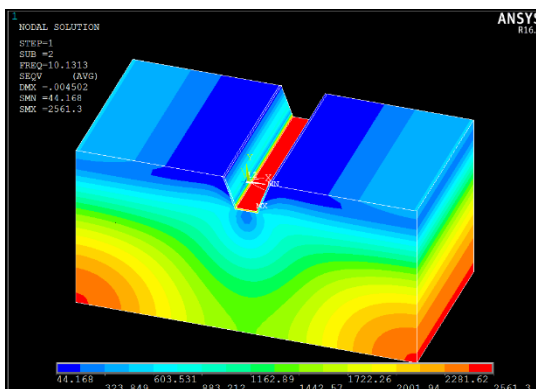
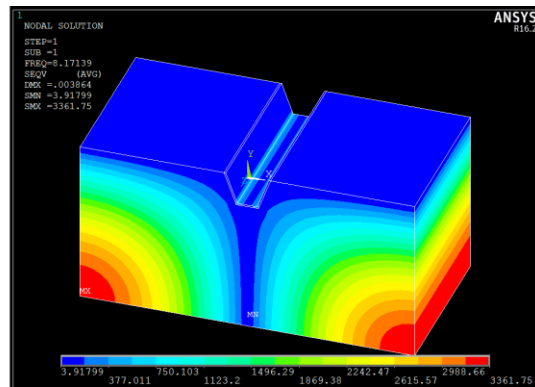
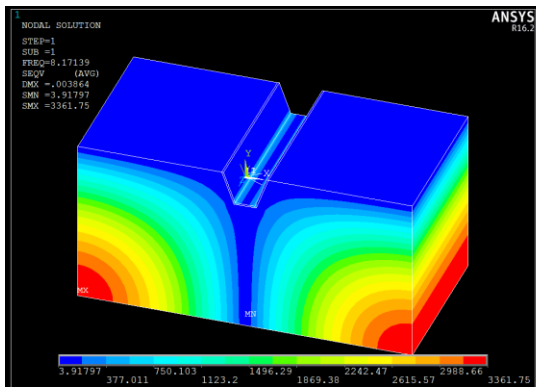
### **INFLUENCIA DEL AGUA EN LA RESPUESTA DINÁMICA**

Como resulta habitual en las normas sísmicas, parte o el total de la sobrecarga de diseño de la estructura se incluye dentro de la matriz de masas a la hora de introducir el espectro sísmico. Esto equivale a considerar que, la proporción de carga indicada participa en el equilibrio dinámico de la estructura aunque no se haya modelizado como un cuerpo sólido y sí como condición de contorno.

En este caso, se han considerado los dos casos extremos: canal vacío y canal lleno. El hecho de realizar un análisis estático previo considerando los efectos de las tensiones iniciales hace que se parta, ya desde el análisis modal, de unas matrices de rigidez [K] y de masas [M] adecuadas a la geometría deformada, de modo que se incluye el efecto del agua en el cálculo sin necesidad de modelizar un 'volumen' que simule el agua – con el consiguiente ahorro computacional –.

Para el caso de referencia, y atendiendo únicamente a la tensión de comparación de Von Misses, las diferencias en los primeros modos de vibración para el caso con y sin agua se muestran a continuación:





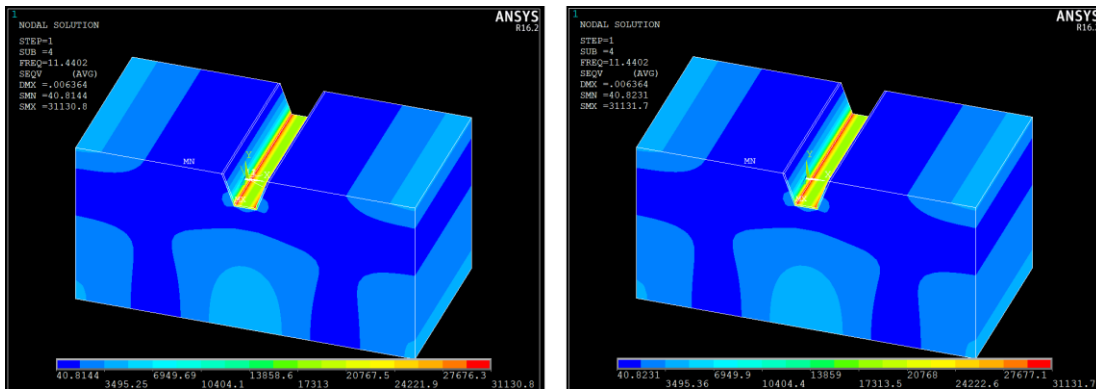


Figura 7.9. Comparación en las tensiones de Von Mises tras análisis sísmico con agua (izq.) y sin agua (dcha.) para la dosificación 0 para los cuatro primeros modos de vibración. Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en las figuras anteriores, la variación producida por el agua en la sollicitación sísmica, para las dimensiones de canal y modelo dadas, es muy reducida y ligeramente más desfavorable en el caso de canal lleno, por lo que el **total de casos a analizar se decide reducir a 10** – uno por dosificación –, todos ellos con canal lleno.

### 7.3.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL

Como último paso para terminar de definir la metodología de cálculo, debe caracterizarse la respuesta modal de la estructura, ya que resulta fundamental conocer los principales modos de traslación de la estructura puesto que es en ellos donde se determinarán los esfuerzos de comparación.

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	8.1714	1	1	1
2	10.131	1	2	2
3	11.065	1	3	3
4	11.440	1	4	4
5	11.768	1	5	5
6	12.586	1	6	6
7	12.976	1	7	7
8	15.344	1	8	8
9	15.859	1	9	9
10	16.220	1	10	10

Figura 7.10. Resultados de las 10 primeras frecuencias propias. Fuente: elaboración propia.

Para identificar cada uno de los primeros modos, se ha recurrido a la obtención de los factores de participación modal que se muestran a continuación, donde 'x' representa la dirección horizontal transversal al eje del canal, 'y' el eje vertical y 'z' el longitudinal:

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	8.17139	0.12238	-208.03	0.829812	43274.8	0.407789	0.326219
2	10.1313	0.98704E-01	0.10983E-01	0.000044	0.120626E-03	0.407789	0.909313E-09
3	11.0646	0.90379E-01	250.69	1.000000	62845.7	1.000000	0.473750
4	11.4402	0.87411E-01	0.57343E-01	0.000229	0.328821E-02	1.000000	0.247875E-07
5	11.7684	0.84974E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
6	12.5856	0.79456E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
7	12.9764	0.77063E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
8	15.3438	0.65173E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
sum					106120.		0.799969

Rot. eje longitudinal

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	8.17139	0.12238	0.61249E-02	0.000019	0.375139E-04	0.349421E-09	0.282791E-09
2	10.1313	0.98704E-01	323.24	1.000000	104481.	0.973184	0.787610
3	11.0646	0.90379E-01	-0.20600E-01	0.000064	0.424366E-03	0.973184	0.319900E-08
4	11.4402	0.87411E-01	53.656	0.165998	2879.01	1.000000	0.217028E-01
5	11.7684	0.84974E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
6	12.5856	0.79456E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
7	12.9764	0.77063E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
8	15.3438	0.65173E-01	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
sum					107360.		0.809313

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	8.17139	0.12238	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	10.1313	0.98704E-01	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	11.0646	0.90379E-01	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	11.4402	0.87411E-01	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	11.7684	0.84974E-01	-66.907	1.000000	4476.50	0.962098	0.337452E-01
6	12.5856	0.79456E-01	0.10887E-02	0.000016	0.118527E-05	0.962098	0.893495E-11
7	12.9764	0.77063E-01	-0.37658E-03	0.000006	0.141809E-06	0.962098	0.106900E-11
8	15.3438	0.65173E-01	-13.280	0.198481	176.350	1.000000	0.132938E-02
sum					4652.85		0.350746E-01

Desplazamiento longitudinal muy coartado. Poco relevante.

Figura 7.11. Factores de participación modal en cada una de las direcciones cartesianas. Fuente: elaboración propia

Puede apreciarse claramente como los modos 2 y 3 corresponden a las primeras traslaciones en la dirección vertical y transversal respectivamente. Por lo que respecta a la dirección longitudinal, al encontrarse el modelo con los desplazamientos coartados en las caras frontal y dorsal en esta dirección y, además, no existir una discontinuidad en la rigidez del terreno transversal al desplazamiento en 'z', la participación de los modos en dicho desplazamiento es prácticamente nula. Por lo anterior, sólo se tendrán en cuenta las tensiones en el hormigón en los modos 2 y 3.

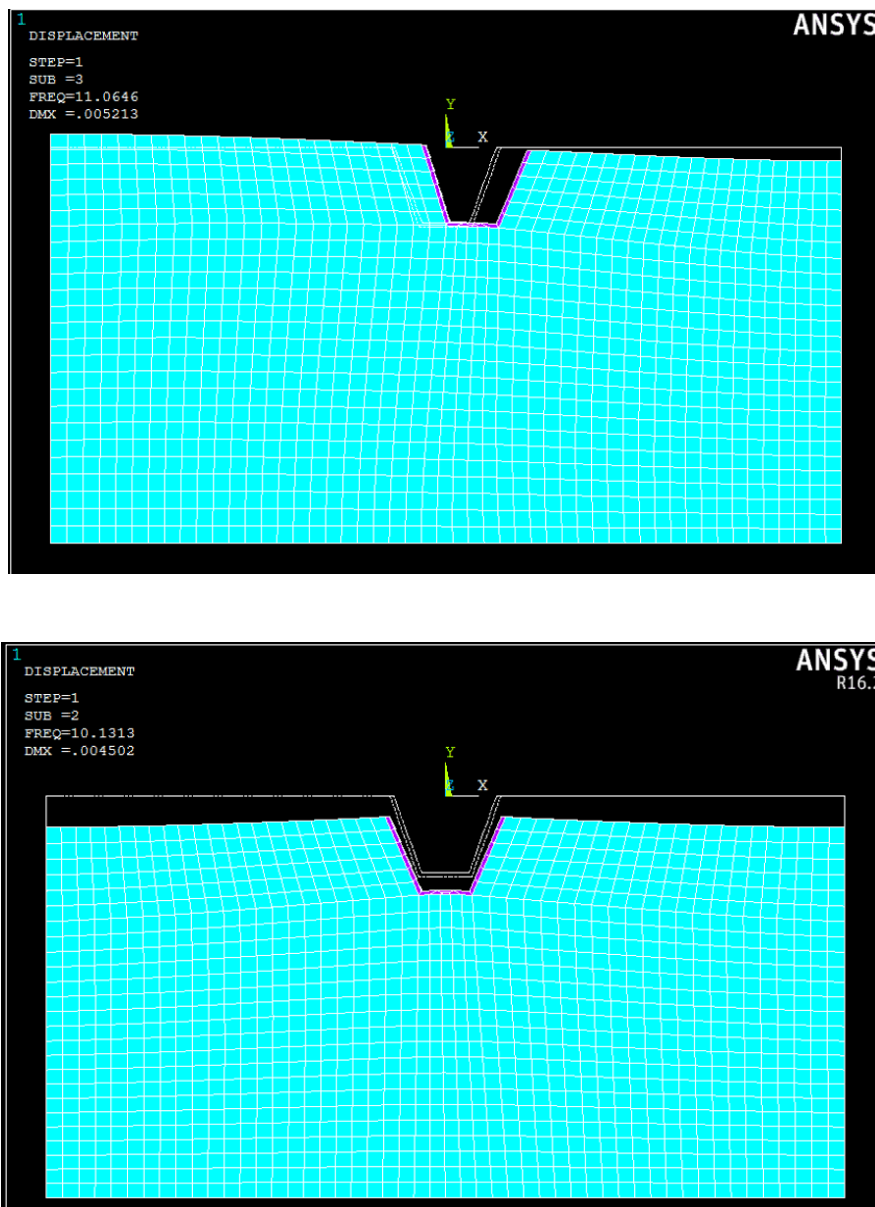


Figura 7.12. Modo de traslación transversal (sup.) y vertical (inf.). Fuente: elaboración propia.

### 7.3.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS SÍSMICO ESPECTRAL

Como se adelantó en los apartados anteriores, los resultados a obtener para cada dosificación tras el análisis espectral son los esfuerzos axiales contenidos en el plano medio del revestimiento y la tensión de comparación de Von Misses.

Se asume que el modelo trabajará como una lámina plegada – resistiendo únicamente mediante axiles en su plano –. Esta asunción se basa en la gran diferencia que existe entre el espesor de hormigón y el

resto de dimensiones – 15 cm frente a 5 y 50 metros –. Sin entrar en mayor detalle, se estaría asumiendo que el canal está trabajando de manera similar a una chapa grecada – guardando las diferencias en la interacción suelo-hormigón y losa-chapa grecada –.

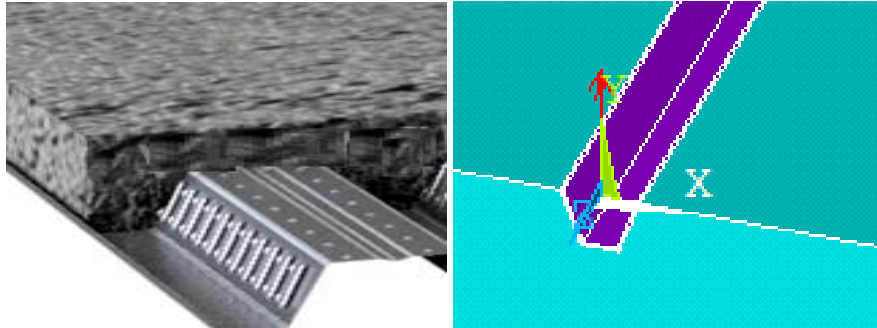


Figura 7.13. Similitud estructural entre una chapa de forjado colaborante y revestimiento de canal de regadío.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos, para todas las mezclas y de forma gráfica, serán similares al diagrama siguiente – correspondiente para el ejemplo de la ‘mezcla 0’ con canal lleno –:

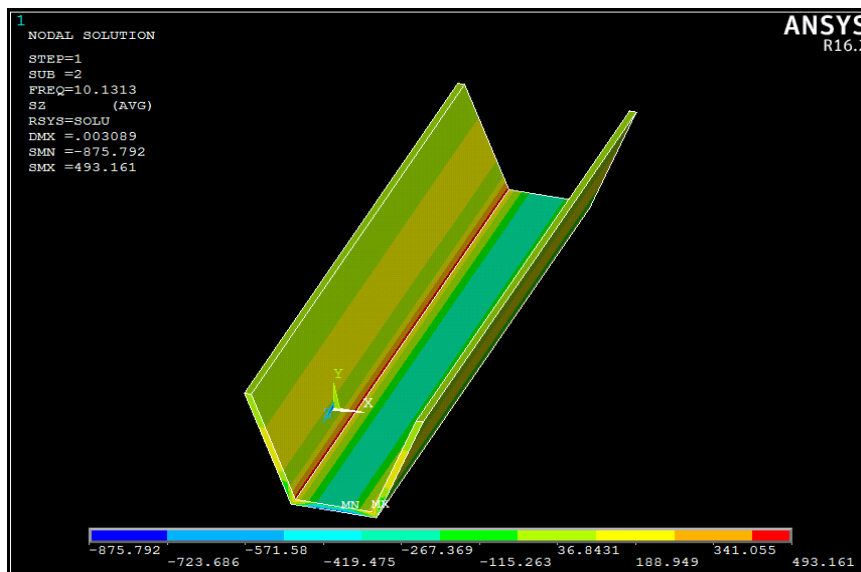


Figura 7.14. Distribución de tensiones longitudinales para el modo 2 – frec. 10.13 Hz -. Fuente: elaboración propia.

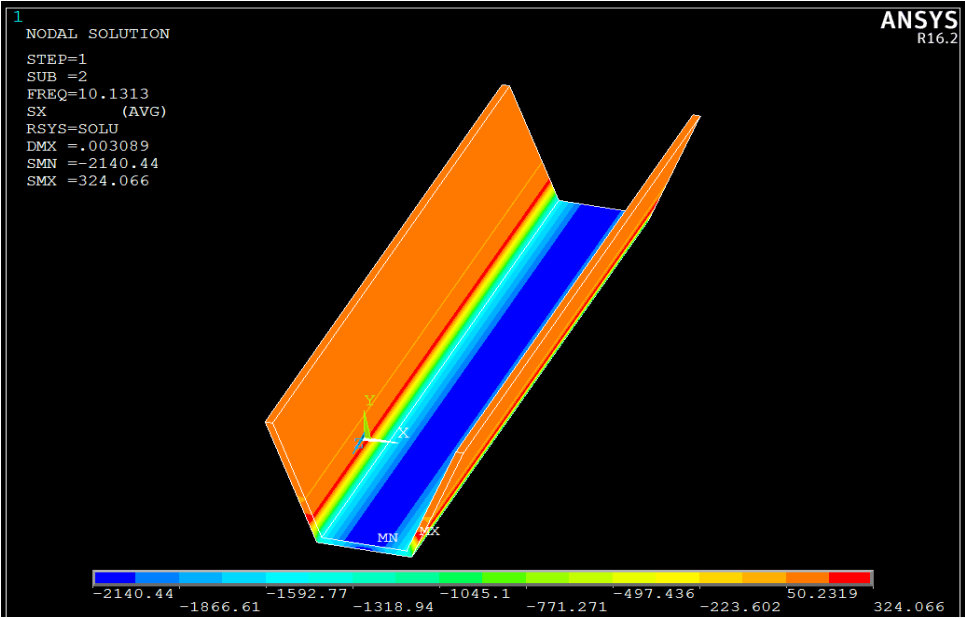


Figura 7.15. Distribución de tensiones transversales para el modo 2 – frec. 10.13 Hz -. Fuente: elaboración propia.

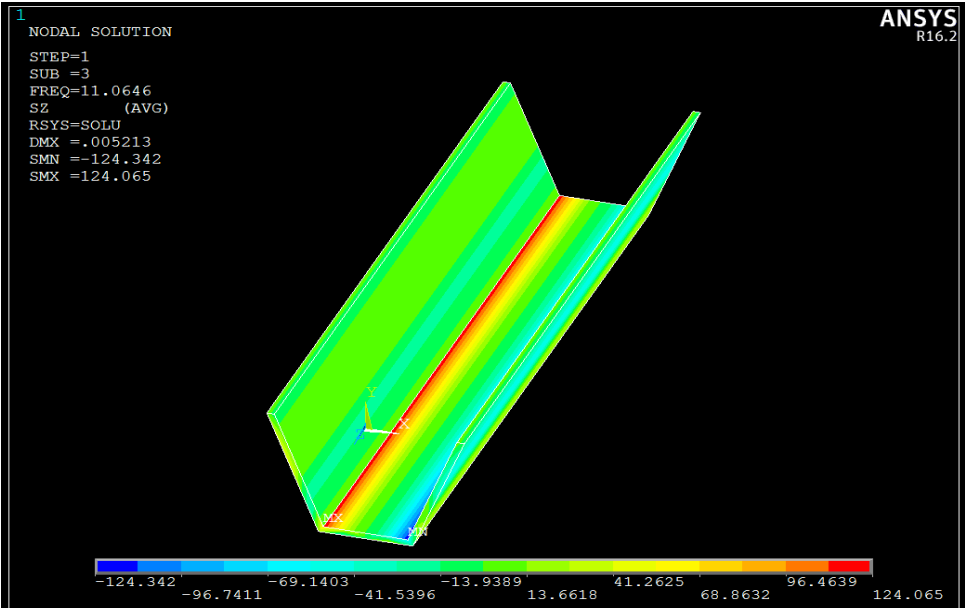


Figura 7.16. Distribución de tensiones longitudinales para el modo 3 – frec. 11.06 Hz -. Fuente: elaboración propia.

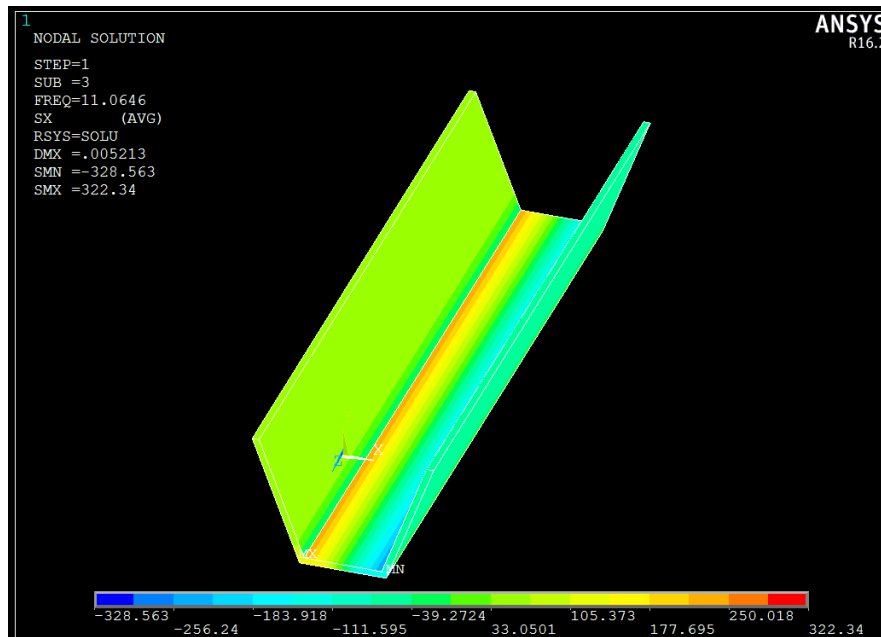


Figura 7.17. Distribución de tensiones transversales para el modo 3 – frec. 11.06 Hz -. Fuente: elaboración propia.

Los resultados se han obtenido mediante la combinación SRSS para el espectro de aceleraciones para todos aquellos modos con una influencia superior al 0.1%.

Para el caso propuesto, se tiene:

- Primer modo de traslación vertical [MODO 2: 79% de la masa; 10.13 Hz]:
  - Tracción máxima longitudinal = 493.16 kPa
  - Compresión máxima longitudinal = 875.79 kPa
  - Tracción máxima transversal = 324.06 kPa
  - Compresión máxima transversal = 2140.40 kPa
- Primer modo de traslación transversal [MODO 3: 47% de la masa; 11.06 Hz]:
  - Tracción máxima longitudinal = 124.07 kPa
  - Compresión máxima longitudinal = 124.34
  - Tracción máxima transversal = 322.34 kPa
  - Compresión máxima transversal = 328.56 kPa

## 7.4 OBTENCIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Siguiendo el procedimiento anterior, los resultados obtenidos para sendos modos de vibración son:

\*Valores de tensión en kPa

Mezcla	Resistencia a Compresión (Mpa)	Tracción Indirecta (MPa)	Modo 2: Traslación vertical					Modo 3: Traslación transversal				
			Máxima tensión Von Misses	Tracción máxima long	Compresión máxima long	Tracción máxima trans	Compresión máxima trans	Máxima tensión Von Misses	Tracción máxima long	Compresión máxima long	Tracción máxima trans	Compresión máxima trans
0	30	2,9	2561,21	493,16	875,79	324,06	2140,4	508,788	124,07	124,34	322,34	328,56
1	29,2	4,6	2191,69	411,71	755,45	268,97	1929,5	448,81	108,6	108,94	293,5	299,52
2	27,1	3,6	1859,01	210,613	677,15	210,61	1677,15	380,81	91,03	91,42	258,88	264,56
3	23,9	2,35	1686,16	554,95	282,3	180,15	1534,99	340,03	80,79	81,19	237,22	242,65
4	26,7	3,3	1744,3	297,28	578,43	190,38	1582,7	354,87	84,43	84,83	245,12	250,64
5	25	2,7	1684,04	282,38	554,57	180,1	1532,38	341,61	81,04	81,44	237,9	243,34
6	28,2	4,2	2022,13	369,69	691,68	240,25	1809,95	415,63	100,06	100,43	276,93	282,8
7	25	2,8	1772,72	296,37	583,52	191,17	1617,64	333,68	81,02	81,41	235,94	241,37
8	28,8	4,75	2132,51	380,47	715,88	249,85	1894,5	391,8	96,74	97,07	267,45	273,22
9	25,5	3	1667,02	283,04	551,53	179,71	1511,37	354,25	83,04	83,46	243,97	248,87

Tabla 4: Resultados de tensiones máximas obtenidas para el análisis sísmico espectral (en kPa). Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, para todas las mezclas propuestas, los resultados son muy favorables respecto a la respuesta esperable de un hormigón convencional, mucho más rígido y con menor capacidad de disipación de energía. También puede observarse que en ningún caso se produce la rotura del material ni en tracción ni en compresión – ni tampoco en combinación tridimensional de éstas mediante Von Misses –.

Para poder comparar de forma más clara los resultados, se ha obtenido el aprovechamiento del material en cada punto, que se define como el porcentaje requerido de la resistencia total para soportar la sollicitación correspondiente – tracción o compresión – en régimen elástico. Los menores



aprovechamientos indican un menor estrés en la sección y se han resaltado en color verde. Von Misses no resulta aplicable en este caso puesto que no se pueden comparar resultados tras aplicar la combinación SRSS. Como indicador de una mejor respuesta global, se ha procedido a obtener el sumatorio de los aprovechamientos para cada mezcla.

\*Aprovechamiento %

Mezcla	Resistencia a Compresión (Mpa)	Tracción Indirecta (MPa)	Modo 2: Traslación vertical				Modo 3: Traslación transversal				Σ Aprov		
			Máxima tensión Von Misses	Tracción máxima long	Compresión máxima long	Tracción máxima trans	Compresión máxima trans	Máxima tensión Von Misses	Tracción máxima long	Compresión máxima long		Tracción máxima trans	Compresión máxima trans
0	30	2,9	-	17,01	2,92	11,17	7,13	-	4,28	0,41	11,12	1,10	55,14
1	29,2	4,6	-	8,95	2,59	5,85	6,61	-	2,36	0,37	6,38	1,03	34,13
2	27,1	3,6	-	5,85	2,50	5,85	6,19	-	2,53	0,34	7,19	0,98	31,42
3	23,9	2,35	-	23,61	1,18	7,67	6,42	-	3,44	0,34	10,09	1,02	53,77
4	26,7	3,3	-	9,01	2,17	5,77	5,93	-	2,56	0,32	7,43	0,94	34,11
5	25	2,7	-	10,46	2,22	6,67	6,13	-	3,00	0,33	8,81	0,97	38,59
6	28,2	4,2	-	8,80	2,45	5,72	6,42	-	2,38	0,36	6,59	1,00	33,73
7	25	2,8	-	10,58	2,33	6,83	6,47	-	2,89	0,33	8,43	0,97	38,83
8	28,8	4,75	-	8,01	2,49	5,26	6,58	-	2,04	0,34	5,63	0,95	31,29
9	25,5	3	-	9,43	2,16	5,99	5,93	-	2,77	0,33	8,13	0,98	35,72

Tabla 5: Resultados de aprovechamiento del material tras el análisis sísmico espectral en %. Fuente: Elaboración propia

Puede verse como la mezcla número 8 obtiene el menor aprovechamiento global, con lo que se da por mezcla óptima.

## 7.5 CONCLUSIONES

---

En el presente informe se han expuesto los principales aspectos que definen el procedimiento de cálculo numérico de la solución. La definición del modelo, así como sus particularidades y aspectos generales – dimensiones generales, elección del elemento finito adecuado, condiciones de contorno, caracterización de materiales, metodología de aplicación de cargas, etc. – han sido expuestas.

Se ha presentado también un total de diez casos de análisis para su posterior comparación. Cada uno de estos casos contemplaba las nueve dosificaciones propuestas en el Capítulo 3 junto con un hormigón convencional empleado como muestra de comparación. Se ha asumido una respuesta elástica lineal de todos los materiales y el espectro de diseño sísmico de pseudo-aceleraciones se ha configurado según lo dispuesto en la norma NCh 433. Se ha empleado una combinación de resultados tipo SRSS.

El análisis de los resultados se ha basado en las máximas tensiones obtenidas tanto de tracción como de compresión en el plano del revestimiento del canal, acompañado siempre de la tensión de comparación tridimensional de Von Misses.

Se ha observado que todas las dosificaciones propuestas mostraban una clara mejora en términos tenso-deformacionales respecto al hormigón convencional. Se ha determinado, de entre todas ellas, la que mejor respuesta conjunta ha mostrado para los principales modos de vibración en tracciones y compresiones contenidas en el plano del revestimiento. Ésta ha resultado ser la denominada dosificación 8, cuyo porcentaje de sustitución de árido por NFU se fijó en un 15%, distribuyéndose tanto en árido fino como grueso.

## **Capítulo 8: Estudio de procesos constructivos y puesta en obra.**

---

## **8.1 INTRODUCCIÓN**

---

El propósito del presente Capítulo es la exposición de todas las actividades de preparación y adecuación del cauce que será necesario llevar a cabo previamente al extendido del colchón geotextil, así como la preparación de los equipos necesarios. Si bien la tecnología empleada presume de ser sumamente adaptable a todo tipo de escenario y de orografías del terreno, se deben ejecutar una serie de faenas previas que permiten aumentar el grado de adaptación del colchón geotextil sobre el cauce a instalar. Estas faenas o trabajos son:

- Limpieza del cauce
- Desbroce del cauce
- Perfilado y nivelación

El canal seleccionado para estudiar la puesta en obra y ejecución de la solución planteada se encuentra en la Región Metropolitana de Santiago. La sección era trapezoidal, aunque los taludes tenían una inclinación prácticamente vertical. Las dimensiones del canal era de 1,9 metros en el fondo del canal, y de 1,3 metros en las paredes de la conducción, de modo que era un canal de dimensiones pequeñas.

Para cumplir el objetivo de la tarea, se propone un primer apartado estructurado en tres bloques, donde en cada uno de ellos se incluirán las especificaciones relativas a cada una de las faenas anteriores. Así pues, en el primer apartado se comentan las actividades necesarias para realizar la limpieza del cauce. En este punto se expondrán las técnicas a emplear más habituales, así como la necesidad de llevarlas a cabo. En un segundo bloque se comentan los trabajos necesarios para realizar el desbroce del cauce. Se indicarán las herramientas y equipos más habituales, así como la forma de empleo. El desbroce es una parte importante de la preparación del cauce, pues en caso de revestir sobre plantas o matorrales se podrían poner en riesgo la estabilidad del futuro revestimiento del canal de riego. En el tercer bloque se explicarán los procesos relativos al perfilado y nivelación de las paredes del cauce a revestir. Este punto es el más importante dentro del proceso de acondicionamiento del cauce. Se explicarán las técnicas de perfilado más habituales, así como los procedimientos que suelen tener una mayor eficiencia de uso.

En un segundo apartado se comentará lo relativo a la maquinaria necesaria para llevar a cabo la obra. En este caso en concreto, la maquinaria se asocia principalmente al bombeo del hormigón al interior del colchón geotextil.

En un tercer apartado, se comentan los aspectos relacionados con el colchón geotextil en sí. Así mismo, se estudian los principales productos comerciales existentes y se selecciona aquel más oportuno. Para finalizar, se comentan las especificaciones técnicas necesarias para llevar a cabo la ejecución del revestimiento.

## **8.2 PREPARACIÓN DEL CAUCE**

---

En este apartado se comentan las tres faenas de preparación del cauce que se han expuesto en la introducción de la actividad: limpieza, desbroce y perfilado.

### **8.2.1 LIMPIEZA DEL CAUCE**

El primer paso para la instalación del revestimiento es proceder a la limpieza del cauce. Cuando se hace referencia a la limpieza del cauce es importante matizar que se busca limpiar la basura o desechos que puedan existir, así como las ramas o sedimentos naturales que se hayan depositado sobre la superficie a revestir. En muchas ocasiones se indica que estos últimos no deben limpiarse, pues pertenecen a la dinámica fluvial de la conducción [34]. No obstante, en este caso y de forma puntual, es necesario proceder a su limpieza para conseguir una mejor ejecución del revestimiento.

### **8.2.2 DESBROCE DEL CAUCE**

Una vez se haya limpiado el canal de riego, se deberá proceder a su desbroce. Si el revestimiento se va a realizar sobre un terreno virgen, es posible que debido a la humedad o al paso reiterado de agua haya surgido maleza sobre el terreno a revestir. Esta maleza es importante eliminarla para que el revestimiento se adhiera de la mejor forma posible al terreno, consiguiendo una adaptación completa que garantice la fijación del revestimiento.

Este tipo de obras requiere de maquinaria muy específica y de varias personas trabajando de forma simultánea. Entre la maquinaria principal que se emplea normalmente, se encuentran buldóceres, palas cargadores y camiones de retirada. Además, también se utilizan sierras mecánicas, cadenas para unir al buldócer y herramientas de siega.

En la siguiente imagen se observa un buldócer, a modo de ejemplo:



*Figura 8.1. Ejemplo de desbroce de canal mediante medios mecánicos. Fuente: Geosistemas Chile*

El empleo de una maquinaria u otra se deberá consensuar en función de las características de la sección sobre la cual se actúa. En caso de secciones pequeñas, no se podría introducir, por ejemplo, un

buldócer como el que se ve en la anterior imagen. En ese caso, el proceso de desbroce se ejecutaría mediante herramientas más convencionales como sierras mecánicas o palas.

En las siguientes imágenes se muestran a modo de ejemplo procesos de desbroce mediante estas herramientas en cauces de canales de riego.



*Figura 8.2. Ejemplo de desbroce de canal mediante medios manuales. Fuente: Hzach Chile*

### **8.2.3 PERFILADO Y NIVELACIÓN**

Una vez el cauce del canal se encuentre limpio y desbrozado, será preciso llevar a cabo tareas de perfilado del mismo, de manera que no haya terreno saliente ni socavones que pudieran poner en riesgo el revestimiento mediante colchón geotextil. Conseguir que los taludes de la conducción formen una superficie plana es importante para maximizar la fijación del colchón geotextil sobre el canal, garantizando de esta manera la estabilidad estructural del revestimiento.

Para poder cumplir con este cometido, se emplean palas que permiten realizar movimientos en el terreno de manera sencilla y rápida. A continuación, se muestra una imagen donde puede apreciar este tipo de maquinaria perfilando la superficie de sendos canales.

En la primera de las imágenes se observa a la pala iniciando los trabajos, ya que el terreno parece no haber sido todavía modificado, mientras que en la segunda imagen se está realizado el alisado final de la superficie del talud.



*Figura 8.3. Ejemplo de perfilado de canal mediante medios mecánicos. Fase inicial.*



*Figura 8.4. Ejemplo de perfilado de canal mediante medios mecánicos. Fase final.*

### 8.3 PREPARACIÓN DE MAQUINARIA

---

Como último paso previo a la ejecución del revestimiento, se debe preparar la maquinaria necesaria para llevar a cabo la obra. En este caso en concreto, la maquinaria se asocia principalmente al bombeo del hormigón al interior del colchón geotextil.

El primer elemento necesario es la bomba de hormigón. En este caso, se ha seleccionado un camión bomba del cual partirán hacia el colchón geotextil los conductos de bombeo, y al cual verterá el camión hormigonera el hormigón que se va a bombear. En la siguiente imagen se puede ver el camión bomba de hormigón, sin ningún tipo de conducto todavía instalado. La rejilla que se observa en la parte trasera del camión es el punto donde el camión hormigonera verterá el hormigón.



*Figura 8.5. Camión bomba a emplear*

El siguiente paso es instalar los conductos de bombeo en el camión bomba. Se unirán unos a otros y se dirigirán hacia el colchón geotextil. Es importante recordar que estos conductos deberán tener un tamaño de  $\frac{2}{3}$  partes el espesor del colchón geotextil. En la siguiente imagen se puede ver el momento en que se unen los conductos de bombeo al camión bomba.





*Figura 8.6. Camión bomba empleado y conducto de bombeo*

Posteriormente, se llevará el camión hormigonera. En la cisterna de este camión se encontrará el hormigón, en proceso de mezclado, de manera que se retrase el fraguado y se mantenga el máximo tiempo posible en estado fresco. El camión hormigonera se dispondrá de espaldas al camión bomba, de manera que las partes traseras de ambos vehículos se encuentren enfrentadas.

Una vez el camión hormigonera se encuentra enfrentado al camión bomba, se acercará, marcha atrás y lentamente, hacia este último vehículo. El propósito es que el punto de vertido de hormigón recaiga sobre el punto de recepción del hormigón por parte de la bomba. En este procedimiento es el camión hormigonera el que ajusta la posición, porque el camión bomba debe estar anclado al suelo, de manera que durante el bombeo se mantenga lo más estable posible.

El vertido debe ajustarse de manera que el volumen vertido en el camión bomba sea igual al volumen de salida de este último a través de los conductos de bombeo. En caso de que sea mayor, la mezcla de hormigón acabaría por desbordar en el camión bomba. En cambio, si fuera menor, podría bombearse el hormigón con burbujas de aire, fenómeno completamente indeseable.

En la siguiente imagen se observan los equipos dispuestos en obra y listos para iniciar el bombeo de hormigón al interior del colchón geotextil.



Figura 8.7. Disposición definitiva de los equipos

## 8.4 ACTIVIDADES RELATIVAS AL GEOTEXTIL

---

En este apartado se comentan los aspectos referentes al geotextil.

### 8.4.1 DIMENSIONES DEL COLCHÓN GEOTEXTIL

El primer paso que se deberá dar para ejecutar un revestimiento mediante el sistema propuesto será determinar las dimensiones del colchón geotextil a utilizar. Las diferentes empresas que fabrican este producto rara vez cuentan con patrones estándar, por lo que se le debe indicar en cada caso las dimensiones del geotextil.

Previamente al desarrollo de este apartado, se realiza un breve recordatorio acerca de la composición del material. El revestimiento con Colchón de hormigón (concrete mattress) consiste en dos capas paralelas de un geotextil tejido de alta resistencia, unidas entre sí con varias hebras, formando un cuerpo de encofrado para el hormigón. Cada unidad de capas paralelas de geotextil se denomina panel, conformado el colchón la unión consecutiva de reiterados paneles (como unidad de colchón se considera la unión de 3 a 5 paneles).

En la siguiente imagen se observa un revestimiento mediante colchón geotextil donde se aprecian claramente dos paneles distintos. Mediante un rectángulo de color naranja se ha marcado la unión entre ambos paneles.

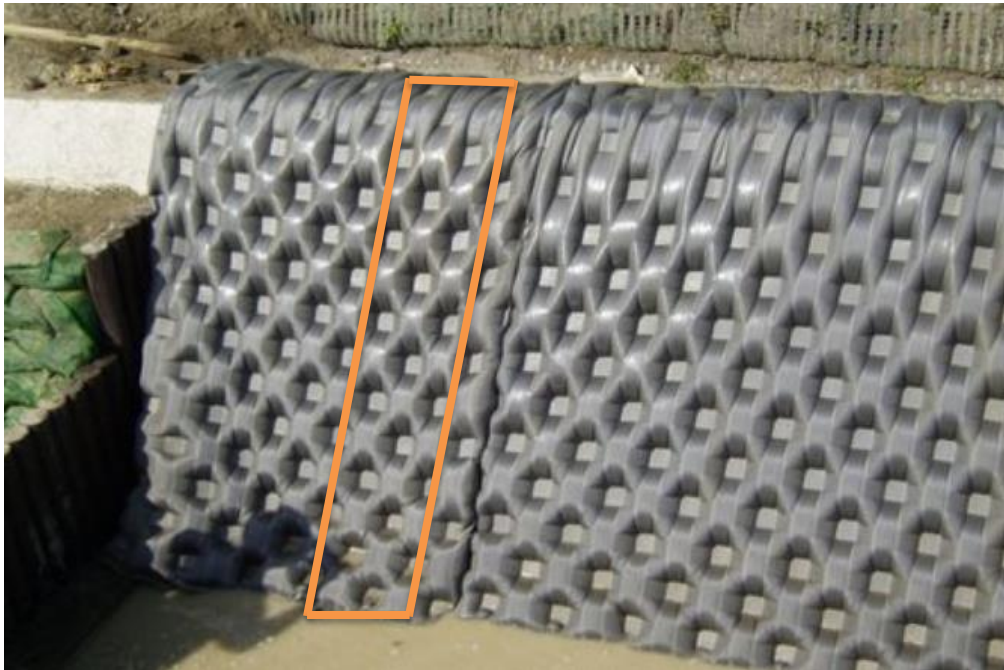


Figura 8.8. Detalle de junta en el colchón geotextil

De ahora en adelante, cuando se hable de dimensiones se hará referencia a cada panel de manera individual. Dicho esto, se comentan a continuación las tres dimensiones más significativas del panel: espesor, anchura y longitud.

### **ESPESOR DEL PANEL**

El panel geotextil presentará una separación entre las dos telas geotextiles unidas mediante filamentos. La separación total se conseguirá cuando el colchón se rellene por completo mediante hormigón, por tanto cuando hablamos de espesor del panel geotextil se habla del espesor una vez se ha rellenado. En la siguiente imagen se observa una porción de un panel geotextil relleno de hormigón, donde una flecha en color naranja marca la dimensión que hace referencia al espesor del panel.

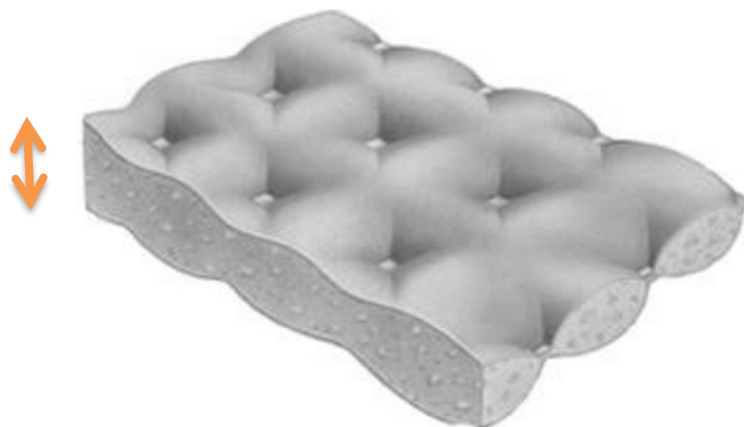


Figura 8.9. Croquis del espesor del colchón geotextil relleno

El espesor del colchón geotextil asume una longitud comprendida entre los 5 y los 60 centímetros. La selección de este espesor no es una decisión trivial, pues influirá en aspectos importantes como el tamaño de la manguera de bombeo o el riesgo de levantamiento del colchón por sobrepresiones en el terreno. Esto último se puede observar en la siguiente imagen.

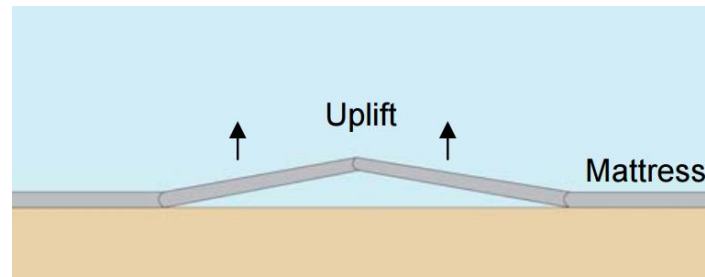


Figura 8.10. Esquema de la generación de sub presiones en el terreno

Para corregir el levantamiento del colchón geotextil, se deberá conocer en primer lugar las sobrepresiones que pueden existir en el terreno, para posteriormente seleccionar un espesor que permita alcanzar un peso unitario en el revestimiento superior al valor de estas. Como se ha comentado anteriormente, no es sencillo determinar el valor de este espesor. En este sentido, Pilarczik elaboró una serie de estudios que proponían un método para determinar el espesor del panel geotextil [34]. Este método se basa en parámetros geométricos (inclinación del talud, altura del talud, anchura de la base...), parámetros hidráulicos (altura máxima del nivel de agua, altura media del nivel de agua, velocidad máxima del agua...) y parámetros del suelo (ángulo de rozamiento interno del material de relleno, ángulo de rozamiento entre el suelo y el geosintético, peso específico saturado del material de relleno...).

Las premisas consideradas a la hora de determinar las medidas del colchón han sido:

- El espesor final limita el tamaño de la manguera de bombeo a emplear.
- Reducir al máximo la posibilidad de levantamiento del hormigón por sobrepresiones.
- Según diferentes autores, cuando el espesor del colchón relleno es menor a 10 centímetros hacen falta condiciones especiales de bombeo y anclajes especiales para el colchón.

En base a las consideraciones anteriores, se determina que el espesor del colchón geotextil empleado en la realización del banco de pruebas sea de **10 centímetros**.

### **ANCHURA DEL PANEL**

Quizá esta resulte la dimensión más estandarizada de las 3 que se comentan en este capítulo. Aunque prácticamente todas las marcas consultadas podrían confeccionar paneles geotextil de cualquier anchura, la dimensión habitual empleada por algunas de las compañías más importantes como HUESKER o ACE Geosynthetics es de 5 metros. Con todo ello, puede considerarse que **5 metros** es una dimensión adecuada, ya que permite una buena adaptación al terreno y un rápido llenado de cada panel individual.

A continuación, se adjunta una imagen donde se puede observar la dimensión comentada señalada mediante flechas de color naranja:

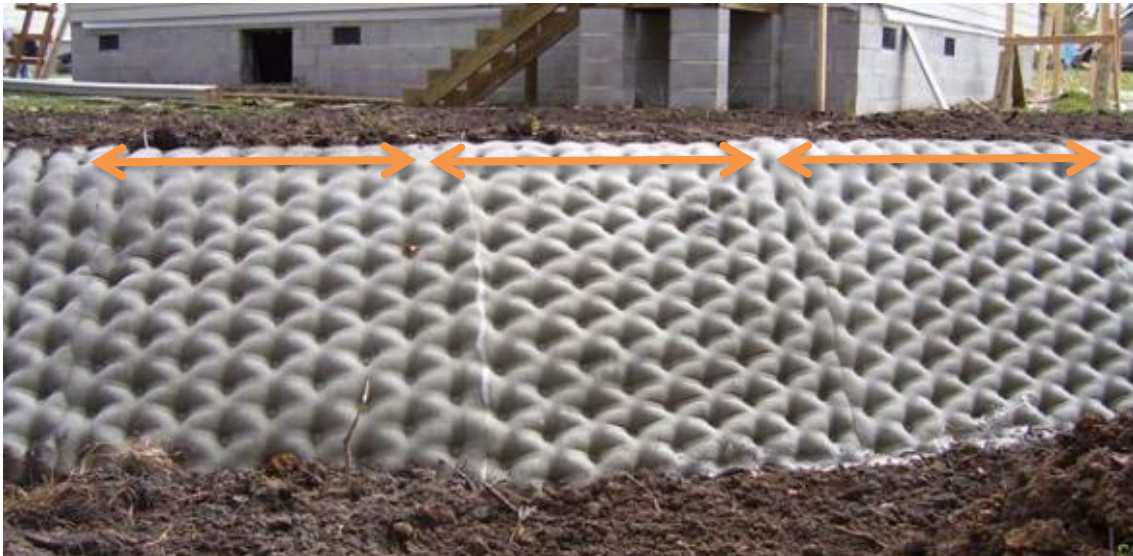


Figura 8.11. Definición de la anchura en el colchón geotextil

### **LONGITUD DEL PANEL**

De las tres dimensiones que se van a abordar es la más complicada de determinar. No existe una regla para conocer la longitud exacta que debe poseer el panel, no obstante, sí existen una serie de consideraciones.

- La longitud comprenderá el espacio necesario para realizar los anclajes de cada panel en su parte superior.
- La longitud asume una reducción de magnitud cuando el panel se llene de hormigón.
- La longitud comprenderá el fondo del canal.

En este sentido, para determinar la longitud del panel geotextil se determinará que:

- Es necesario conceder 0,75 metros más de longitud a cada lado para ejecutar correctamente los anclajes.

De este modo, se concluye que la longitud del panel geotextil deberá ser:

$$2 * L_{talud} + L_{fondo} + 2 * (0,75) \text{ metros}$$

$$2 * 1,3 + 1,9 + 2 * (0,75) = \mathbf{6 \text{ metros}}$$

Por tanto, las dimensiones de cada uno de los paneles geotextiles que conformarán nuestro colchón geotextil, serán:

- **Espesor: 0,10 metros**
- **Anchura: 5 metros**
- **Longitud: 6 metros**

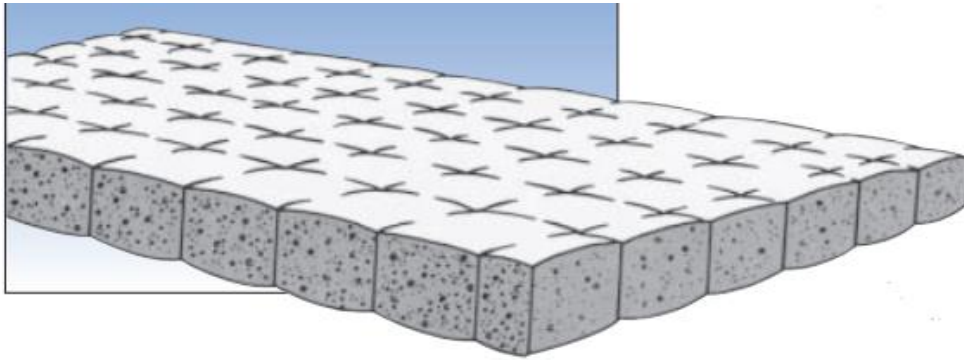
#### **8.4.2 UNIÓN ENTRE GEOTEXILES**

Para unir los paneles geotextiles que se hayan dispuesto existen básicamente dos opciones: unión mediante máquina de coser en obra o mediante cremalleras que vienen instaladas desde fábrica. En este caso nosotros nos decantamos por que los paneles geotextil vengan con cremalleras de fábrica, ya que esto simplificaría significativamente el proceso de ejecución de la obra.

#### **8.4.3 TIPO DE GEOTEXTIL**

Existen varios proveedores de este producto. La empresa HUESKER es uno de los principales productores en todo el mundo, realizando colchones geotextil de varias tipologías y aplicados a distintos usos. Uno de sus principales colchones geotextiles es el HUESKER Incomat Standard, el cual tiene como función principal convertirse en una capa que ejerza de sellado en el revestimiento, puesto que es una pieza de suma impermeabilidad. Este colchón está formado por dos capas de material sintético con elementos de separación de alta resistencia y de igual longitud, a partir de los cuales se ha tejido la tela a pares formando un patrón cuadrado de rejilla. Este colchón garantiza una sección transversal uniforme tras rellenarse de hormigón. Gracias a la modificación de la longitud de los elementos espaciadores, se pueden conseguir espesores en el hormigón de 7,5, 10, 15, 20 y 60 cm, alcanzando pesos por m<sup>2</sup> de 150 a 1.200 kg, factor muy a tener en cuenta a la hora de mitigar el efecto de las sobrepresiones que pudieran aparecer.

A continuación, se dispone una imagen del mismo acompañada de un croquis. El croquis se adjunta para poder comprar la fisonomía de este revestimiento con el de otro material producido por la misma empresa.



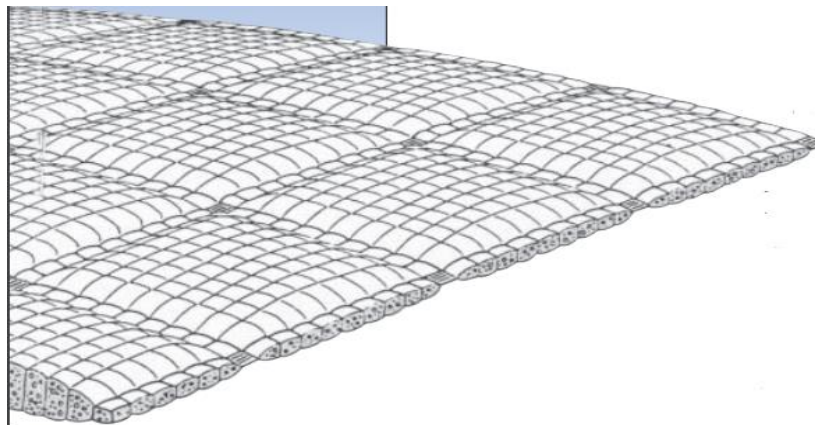
*Figura 8.12. Detalle del colchón HUESKER Incomat Standard*

Este producto también es especialmente indicado para emplear con éxito en taludes con pendientes muy pronunciadas, incluso para sellar verticalmente localizaciones que necesiten protección. Además, en base al catálogo técnico de este producto, se asegura que es especialmente indicado para revestir canales en zonas con graves problemas de sequía o escasez de agua, ya que la estanqueidad del geotextil ayuda a que la poca agua existente no se filtre por el terreno derrochando así un recurso escaso. Finalmente, otros de los aspectos más interesantes de este producto son la gran adaptabilidad a la orografía del terreno que presenta este sistema de revestimiento, y las propiedades mejoradas en cuanto a resistencia estructural se refiere que introduce el colchón geotextil.

La misma empresa HUESKER comercializa otro producto que es el Incomat Flex. Este colchón geotextil se caracteriza por aportar una elevadísima resistencia frente a cargas hidrostáticas. Esto se consigue en base a un peso muy elevado, una cobertura total del subsuelo y una gran flexibilidad bidimensional que permite acomodar elevadas deformaciones del terreno. Las roturas provocadas en el hormigón dentro de los puntos de rotura predeterminados se compensan mediante bandas de tejido de refuerzo. De esta manera, se asegura que el colchón permanezca totalmente útil, incluso si la capa superior del geotextil se daña.

Este revestimiento es un tanto más pesado que el anterior, oscilando su precio por metro cuadrado entre 300 y 1.200 kilogramos. El espesor del colchón está comprendido igualmente entre los 15 y los 60 centímetros. Con unas características generales muy similares al caso del geotextil anterior, la principal diferencia entre ambos se encuentra en que este geotextil sí es permeable. Si bien el hormigón dosificado tiene buena capacidad impermeabilizante y podría subsanar esta limitación del material.

A continuación, se adjunta una fotografía y un croquis del material de revestimiento.



*Figura 8.13. Detalle del colchón HUESKER Incomat Flex*

Por sus propiedades impermeabilizantes, tan importantes desde la perspectiva del proyecto, el colchón finalmente seleccionado es el **HUESKER Incomat Standard**.

Si bien la empresa HUESKER no cuenta con delegación en territorio chileno, la empresa GeoSistemas trabaja con esta marca, pudiendo proporcionar todos los productos de la serie Incomat.

#### **8.4.4 PROCEDIMIENTO DE MONTAJE**



Una vez se conocen las dimensiones del colchón geotextil, es momento de pasar a comentar el proceso de montaje.

### **COLOCACIÓN**

Una vez el cauce ya esté totalmente acondicionado para instalar el revestimiento, se procede a instalar el colchón geotextil. El material se ubicará en la posición exacta donde se debe encontrar finalmente, dejándolo listo únicamente a falta de introducir el hormigón bombeado. En su colocación, el material debe extenderse sin ser arrastrado, además, se deben proveer anclajes provisionales en la zona de coronación para que el material se mantenga tenso durante todo el proceso de llenado. A continuación, se observa una imagen del extendido de un panel del colchón geotextil. En ella aparecen dos operarios colocando un panel geotextil adyacente a otro que ya ha sido colocado.



*Figura 8.14. Ejemplo de extendido del colchón geotextil*

Seguidamente, se dispone una imagen de un panel geotextil extendido sobre el talud del canal. Como aspecto relevante de la fotografía, se pueden observar los anclajes que se han dispuesto en la parte inferior del panel geotextil. En este caso, se han empleado estacas de madera para conseguir la tensión necesaria en el geotextil sin necesidad de realizar ningún tipo de perforación. Habitualmente, los anclajes utilizados en la parte inferior del colchón geotextil no resultan intrusivos, es decir, no requieren de la perforación del colchón. El motivo principal es que una pequeña perforación en el colchón geotextil, por minúscula que fuera, podría poner en serio riesgo el llenado del material mediante hormigón bombeado.



*Figura 8.15. Ejemplo de anclaje del colchón geotextil*

En cambio, la situación es diferente cuando se trata de la parte superior del geotextil. En este caso, los anclajes instalados, pese a contar con carácter provisional, tienen unas exigencias resistentes mucho mayores. De este modo, los anclajes utilizados para tensar el colchón en la parte superior sí que perforan el colchón en muchas ocasiones con la intención de ganar resistencia en la sujeción. A continuación, se dispone una imagen donde se observa un colchón geotextil sobre el talud del canal. La parte del revestimiento que se encuentra al fondo de la imagen ya ha sido rellenada mediante el hormigón pertinente, mientras que la parte que se observa más cercana en la figura no se ha provisto de hormigón todavía. En ella, pueden apreciarse los anclajes que se han dispuesto para el tensado de la misma.



*Figura 8.16. Ejemplo de anclaje del colchón geotextil*

Los anclajes utilizados en la imagen anterior son similares a los que se pueden ver en la siguiente fotografía.



Figura 8.17. Ejemplo de anclajes

Es muy importante extender únicamente los paneles geotextil que se vayan a rellenar en un día. En caso de que algún panel extendido no vaya a rellenarse, se deberá asegurar su posición a base de anclajes o pesos a lo largo del mismo.

### **RELLENO**

La fase de relleno del colchón geotextil es la más crítica de todo el proceso de ejecución del revestimiento. De su correcta realización dependerá el éxito a la hora de obtener un rendimiento satisfactorio del revestimiento. En ella, se comprenden una serie de pasos y pautas que habrá que seguir para aumentar al máximo las garantías de éxito del trabajo.

Para el llenado de cada uno de los paneles, se deben realizar dos agujeros en la capa superior de los mismos, de manera que el hormigón cuente con dos puntos de acceso. En la siguiente imagen se puede observar el procedimiento.



Figura 8.18. Ejemplo de inserción de la manguera en el colchón geotextil

Este corte se realizará en la dirección del talud, y a un máximo de 5 metros de la parte más baja de llenado, para permitir de este modo la entrada del tubo de alimentación. En la siguiente imagen se muestra la longitud que debe ser inferior a 5. En este caso en concreto, ya que el canal presenta una altura de 1,3 metros, no habría ningún tipo de problema.



Figura 8.19. Ejemplo de inserción de la manguera en el colchón geotextil

Como apunte a este aspecto, es importante tener en cuenta que el diámetro de la manguera debe ser de  $2/3$  el espesor del colchón geotextil. En este caso, en el que se ha considerado un espesor de 10 centímetros, la manguera deberá poseer un diámetro de  $6,66 (\approx 7)$  centímetros.

El tubo es introducido hasta la parte inferior del panel geotextil y se va elevando de manera progresiva mientras va ascendiendo el nivel de hormigón. En el llenado es fundamental seguir una serie de etapas. En primer lugar se rellena hasta una altura determinada de un panel, para rellenar hasta esa misma altura el resto de paneles adyacentes. Así, el llenado del colchón se realiza por niveles. A continuación, se adjuntan algunas fotos que demuestran la explicación anterior.



Figura 8.20. Ejemplo de relleno simultáneo de diferentes colchones



Figura 8.21. Ejemplo de relleno simultáneo de diferentes colchones

Es necesario recordar que previamente al relleno del último nivel de un colchón, este debe unirse con el siguiente colchón a rellenar.

En caso de encontrarse en la situación de tener que ejecutar el revestimiento del canal en presencia de agua, se recomienda introducir los tubos de bombeo antes del extendido del geotextil. Para esta faena será necesario contar con la presencia de obreros buzo que anclen el geotextil al fondo, tal y como se puede ver en la siguiente imagen:



Figura 8.22. Ejemplo de relleno instalación en presencia de agua

Respecto a la bomba de hormigón a emplear, existen dos posibilidades. En primer lugar se puede utilizar una bomba estacionaria. Éstas son bombas remolcables a las cuales se conectan tuberías de acero concebidas para cada aplicación concreta a partir e tramos de 1, 2 y 3 metros, y codos y

semicurvas que permiten alcanzar el lugar donde se debe instalar el hormigón. Estas bombas son capaces de bombear a distancias de 500 metros en horizontal y de 200 metros en vertical. Son especialmente indicadas para lugares de reducido espacio. A continuación, se dispone una imagen de estas bombas.



*Figura 8.23. Ejemplo de bomba estacionaria*

Otro caso de bomba que se puede emplear es la City Pump. Estas son bombas estacionarias que van montada sobre camión, permitiendo así traslado más rápidos y seguros en carretera. Las características y particularidades del bombeo son muy similares al caso anterior. Seguidamente se adjunta una imagen de este tipo de bombas.



*Figura 8.24. Ejemplo de camión bomba*

En Chile, existen numerosas empresas que pueden proporcionar estos productos. Algunas de ellas son ZACH Bombas de hormigón, Emarsa o Lanzco.

## **ANCLAJE**

Una vez ha finalizado la fase de bombeo del hormigón, se debe proceder al anclaje definitivo del colchón geotextil. Esta vez se sustituirán los anclajes provisionales propios del bombeo del hormigón por anclajes de mayor resistencia. Estos anclajes, además de mantener el colchón geotextil en la posición deseada, también se encargarán de cerrar los agujeros realizados para el bombeo. En algunas ocasiones, se cree conveniente realizar el sellado del colchón geotextil mediante algún material conglomerante como mortero. En esta situación, los anclajes se destinarán únicamente a mantener la posición del colchón geotextil, mientras que del sellado de los agujeros realizados para el bombeo del hormigón se encargará el material conglomerante.



*Figura 8.25. Ejemplo de anclaje definitivo del colchón*

## **8.5 CONCLUSIONES**

---

El objetivo de este Capítulo ha sido recopilar todos los trabajos y tareas necesarios para adecuar el cauce previamente al extendido del colchón geotextil, además de preparar y disponer la maquinaria necesaria para llevar a cabo el bombeo del hormigón.

Como se ha comentado, el canal seleccionado para estudiar la puesta en obra y ejecución de la solución planteada se encontraba en la Región Metropolitana de Santiago. La sección era trapezoidal, aunque los taludes tenían una inclinación prácticamente vertical. Las dimensiones del canal era de 1,9 metros en el fondo del canal, y de 1,3 metros en las paredes de la conducción, de modo que era un canal de dimensiones pequeñas.

En esta tesis, se ha realizado un primer apartado donde se han comentado, desde una perspectiva teórica, las acciones a realizar para el acondicionamiento del cauce. Fundamentalmente han sido tres: limpieza del cauce, desbroce del cauce y perfilado del cauce. Para cada caso, se han comentado los procedimientos más habituales, así como los equipos a emplear. Respecto a los equipos utilizables, se ha indicado cuáles son los más idóneos al actuar sobre secciones grandes de canal, y cuáles lo son para el caso de secciones de menores magnitudes.

Por otro lado, se ha comentado la preparación de los equipos previamente a la ejecución del revestimiento. En cuanto a los equipos a emplear, básicamente son dos los más importantes: camión bomba y camión hormigonera. Estos equipos deberán prepararse adecuadamente pues su posición en obra no es trivial, ya que las partes traseras de ambos deberán estar enfrentadas para que el traspaso de hormigón del camión hormigonera al camión bomba se lleve a cabo adecuadamente. Además, también se ha indicado cuando se deben colocar los conductos de bombeo.

En un último apartado, se han comentado los aspectos relacionados con el colchón geotextil en sí. Se han razonado las dimensiones necesarias del mismo a partir de las características geométricas de la sección a revestir, y se ha determinado la manera adecuada de hallar el espesor necesario para el colchón. Así mismo, se han estudiado los principales productos comerciales y se ha seleccionado aquel más oportuno, el HUESKER Incomat Standard.

Para finalizar, se han comentado las especificaciones técnicas necesarias para llevar a cabo la ejecución del revestimiento. Se han considerado los condicionantes más claros para el bombeo y la manera más adecuada de superarlos. Además, se ha hecho especial inciso en la necesidad de realizar adecuadamente el anclaje del colchón geotextil. Aunque para este caso concreto no aplicara, también se ha realizado un pequeño comentario sobre como se debería proceder en caso de que hubiera que unir diferentes unidades de colchón geotextil.



## **ANEXO I: RELACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) CON EL TFM**

---

**Relación del TFM “Estudio y diseño de una solución constructiva sismorresistente para el revestimiento de canales de regadío en Chile” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

<b>Objetivos de Desarrollo Sostenibles</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>No Procede</b>
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				<b>X</b>
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>			<b>X</b>	
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>				<b>X</b>
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>				<b>X</b>
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				<b>X</b>
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>	<b>X</b>			
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>				<b>X</b>
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				<b>X</b>
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>		<b>X</b>		
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				<b>X</b>
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>		<b>X</b>		
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>		<b>X</b>		
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>			<b>X</b>	
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				<b>X</b>
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				<b>X</b>
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				<b>X</b>
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>				<b>X</b>

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como Objetivos Mundiales, fueron adoptados por todos los estados miembros en 2015 con el objetivo de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas tengan una mejor vida en 2030.

En total hay 17 ODS [35], pero se les considera como un conjunto ya que la intervención en uno de ellos afecta a los resultados de otros, de forma que lo más inteligente es el avance en estos de manera

conjunta. Concretamente, los 17 ODS son: 1) Fin de la pobreza, 2) Hambre cero, 3) Salud y bienestar, 4) Educación de calidad, 5) Igualdad de género, 6) Agua limpia y saneamiento, 7) Energía asequible y no contaminante, 8) Trabajo decente y crecimiento económico, 9) Industria, Innovación e infraestructura, 10) Reducción de las desigualdades, 11) Ciudades y comunidades sustentables, 12) Producción y consumo responsable, 13) Acción por el clima, 14) Vida submarina, 15) Vida de ecosistemas terrestres, 16) Paz, Justicia e Instituciones sólidas y 17) Alianzas para lograr los objetivos.

Las actividades de la ingeniería civil están altamente ligadas con las transformaciones económicas, sociales y ambientales, temáticas principales que pretenden cambiar los ODS [36]. En consecuencia, los ingenieros deben avanzar y focalizar sus esfuerzos, experiencias y conocimientos en investigar como alcanzar cada uno de los 17 ODS nombrados anteriormente. Además, estos cambios deben producirse en el corto plazo, ya que no debemos olvidar que están fijados para el horizonte temporal del año 2030.

Por otro lado, el concepto de Desarrollo Sostenible permite fijar desde la Ingeniería Civil, a partir administraciones eficaces y transparentes, un marco de actuación definido a través de políticas estratégicas e inclusivas. Todo ello implica entender a la Ingeniería Civil como uno de los principales motores de la investigación y de la innovación tecnológica, vías principales para llevar a cabo la consecución de cada uno de los Objetivos de Desarrollo sostenibles ya comentados.

Con todo ello, en el presente apartado se va a justificar como incide cada uno de los ODS que presentan relación con el TFM propuesto. Cabe destacar que se ha obviado la justificación de aquellos ODS en los que se ha señalado en la tabla anterior la categoría de grado de relación “No procede”.

#### ODS 2. HAMBRE CERO

Entre las principales metas de este objetivo, destaca la 4ª, que dice: “Para 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad del suelo y la tierra”.

En este caso, el sistema propuesto de revestimiento de canales de regadío con resistencia sísmica permitirá contribuir con la consecución del presente objetivo, ya que el nuevo sistema es capaz de reducir las pérdidas de agua de los canales a un bajo coste, lo que se traduce en un aumento de la productividad. Además, el sistema esta diseñado para ser resiliente y resistir eventos extremos, como son los sismos.

#### ODS 6. AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

Entre las principales metas de este objetivo, destaca la 4ª, que dice: “De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la

sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua”.

El este caso, el sistema propuesto de revestimiento de canales de regadío con resistencia sísmica permitirá contribuir con la consecución del presente objetivo, ya que el nuevo sistema es capaz de revestir cualquier tipología de canal a un bajo coste, lo que se traduce en una reducción considerable de las pérdidas hídricas que normalmente sufre este tipo de instalaciones.

#### ODS 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Entre las principales metas de este objetivo, destaca la 4ª, que dice: “De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas”.

El este caso, el sistema propuesto de revestimiento de canales de regadío con resistencia sísmica permitirá contribuir con la consecución del presente objetivo, ya que el sistema esta basado en un nuevo proceso que incluye partículas de NFU como aditivo en el hormigón. Además de la capacidad absorbente que brinda la inclusión de este material, utilizar un residuo como material de construcción permite contribuir con la economía circular y con la sostenibilidad de esta tipología de infraestructuras. Por último, cabe destacar que la solución presenta un elevado grado tecnológico, ya que se emplean tecnologías avanzadas como la modelación de infraestructuras a partir de programas de elementos finitos, lo que facilita el diseño y definición de la misma para que esta cumpla con los requisitos buscados y se adapte de mejor forma al emplazamiento final.

#### ODS 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

Entre las principales metas de este objetivo, destaca la 5ª, que dice: “De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad”.

El este caso, el sistema propuesto de revestimiento de canales de regadío con resistencia sísmica permitirá contribuir con la consecución del presente objetivo, ya que la capacidad sismorresistente del sistema permitirá incrementar la vida útil de este tipo de infraestructuras, reduciendo además los posibles daños y pérdidas económicas que el colapso de estas pudiera ocasionar.

#### ODS 12. PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

Entre las principales metas de este objetivo, destaca la 2ª, que dice: “De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.

El este caso, el sistema propuesto permitirá contribuir con la consecución del presente objetivo, ya que el diseño basado en la utilización de un colchón geotextil relleno de hormigón para revestir canales de regadío, que permitirá reducir en gran medida las pérdidas de un gran recurso natural como es el agua que se utiliza para las actividades de regadío.

#### ODS 13. ACCIÓN POR EL CLIMA

Entre las principales metas de este objetivo, destaca la 1ª, que dice: “Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países”.

El este caso, el sistema propuesto permitirá contribuir con la consecución del presente objetivo, ya que, como se ha comentado anteriormente, la capacidad sismorresistente del sistema aumentará la resiliencia y mejorará la adaptación a riesgos naturales -como son los sismos- de este tipo de infraestructuras .

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Descenso en cono de Abrams de muestras con distintas relaciones agua – cemento.. Fuente: [1] .....</i>	10
<i>Figura 2.2 Fenómeno de segregación en hormigón ya endurecido. Fuente: [4] .....</i>	12
<i>Figura 2.3 Resistencia a flexión de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [5] .....</i>	13
<i>Figura 2.4 Permeabilidad de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [5] .....</i>	13
<i>Figura 2.5 Absorción capilar de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [5] .....</i>	14
<i>Figura 2.6 Propiedades físicas de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [8] .....</i>	15
<i>Figura 2.7 Propiedades físicas de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [8] .....</i>	16
<i>Figura 2.8 Resultados del ensayo de consistencia medida en cono de Abrams de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [11] .....</i>	17
<i>Figura 2.9. Módulo de elasticidad de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [11] .....</i>	18
<i>Figura 2.10. Porosidad de la muestra de hormigón ensayada. Fuente: [11] .....</i>	18
<i>Figura 2.11. Tuberías para bombeo de hormigón. Fuente: [12] .....</i>	19
<i>Figura 2.12. Representación de la segregación periférica en tubería de 100 mm. Fuente: [2] .....</i>	21
<i>Figura 2.13. Distribución de los áridos sobre la tubería de bombeo de hormigón. Fuente: [2] .....</i>	22
<i>Figura 2.14. Distribución granulométrica de los áridos según la zona de la tubería. Fuente: [2] .....</i>	22
<i>Figura 2.15. Esfuerzos sobre la corriente de hormigón en el proceso de bombeo. Fuente: [2] .....</i>	23
<i>Figura 2.16. Croquis del fenómeno de segregación periférica. Fuente: [2] .....</i>	24
<i>Figura 3.1. Ejemplo de matriz Taguchi de 7 variables a 2 niveles. Fuente: [13] .....</i>	29
<i>Figura 3.2. Ejemplo de matriz Taguchi de 7 variables a 2 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13] .....</i>	30
<i>Figura 3.3. Ejemplo de matriz Taguchi de 11 variables a 2 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13] .....</i>	31
<i>Figura 3.4. Ejemplo de matriz Taguchi de 4 variables a 2 niveles más 1 variable a 4 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13] .....</i>	31
<i>Figura 3.5. Ejemplo de matriz Taguchi de 1 variables a 2 niveles y 7 variables a 3 niveles. Fuente: Elaboración propia a partir de [13] .....</i>	32

Figura 4.1. Ensayo de resistencia a compresión en prensa. Fuente: Prontubeam .....	40
Figura 4.2. Esquema de ensayo de tracción indirecta. Fuente: [15] .....	42
Figura 4.3. Detalle del acelerómetro instalado sobre la viga. Fuente: elaboración propia .....	44
Figura 4.4. Vigas correspondientes a las diferentes dosificaciones. Fuente: elaboración propia .....	44
Figura 4.5. Herramientas empleadas en el ensayo de consistencia .....	45
Figura 4.6. Herramientas empleadas en el ensayo de consistencia .....	46
Figura 4.7. Esclerómetro a utilizar en el ensayo .....	47
Figura 4.8. Aparato de medida .....	50
Figura 4.9. Prensa hidráulica para ensayos de hormigón. Fuente: [23] .....	53
Figura 4.10. Equipos empleados en el ensayo de coeficiente de amortiguamiento. ....	54
Figura 4.11. Embudo en V a emplear en el ensayo. Fuente: [26] .....	55
Figura 4.12. Esclerómetro, acompañado de medidor. Fuente: Proceq .....	56
Figura 4.13. Equipo de penetración de agua bajo presión. Fuente: Proeti .....	57
Figura 4.14. Mezcla de materiales en la hormigonera. Fuente: Elaboración propia .....	60
Figura 4.15. Vertido de insumos en la hormigonera. Fuente: Elaboración propia .....	60
Figura 4.16. Mezcla de hormigón finalizada. Fuente: Elaboración propia .....	61
Figura 4.17. Trabajos de rellenado de probetas. Fuente: Elaboración propia .....	62
Figura 4.18. Ejecución cono de Abrams. Fuente: Elaboración propia .....	63
Figura 4.19. Probeta para ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia .....	64
Figura 4.20. Ejecución ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia .....	64
Figura 4.21. Plano de rotura provocado durante ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia .....	65
Figura 5.1. Sellado de juntas en manguera para bombeo de hormigón .....	72
Figura 5.2. Estabilizadores de camión bomba de hormigón .....	73
Figura 5.3. Camión bomba de hormigón. Fuente: [28] .....	73
Figura 5.4. Bomba de hormigón. Fuente: [30] .....	74
Figura 7.1. Sección transversal canal tipo. Radio mínimo equivalente. Fuente: elaboración propia ...	92

Figura 7.2. Sección transversal modelo ANSYS. Fuente: elaboración propia. ....	93
Figura 7.3. Distribuciones uniformes de tensiones de Von Misses tras análisis modal. Fuente: elaboración propia. ....	94
Figura 7.4. Perspectiva general del modelo. Fuente: elaboración propia. ....	95
Figura 7.5. Elemento SOLID186 empleado en el cálculo. Fuente: SCHARNET. ....	96
Figura 7.6. Aplicación de condiciones de contorno. Vinculaciones. Fuente: elaboración propia. ....	97
Figura 7.7. Aplicación de condiciones de contorno. Presión de agua. Fuente: elaboración propia. ....	98
Figura 7.8. Espectro de pseudo-aceleraciones de diseño para el caso propuesto. Fuente: elaboración propia a partir de NCh 433. ....	100
Figura 7.9. Comparación en las tensiones de Von Misses tras análisis sísmico con agua (izq.) y sin agua (dcha.) para la dosificación 0 para los cuatro primeros modos de vibración. Fuente: Elaboración propia. ....	105
Figura 7.10. Resultados de las 10 primeras frecuencias propias. Fuente: elaboración propia. ....	105
Figura 7.11. Factores de participación modal en cada una de las direcciones cartesianas. Fuente: elaboración propia. ....	106
Figura 7.12. Modo de traslación transversal (sup.) y vertical (inf.). Fuente: elaboración propia. ....	107
Figura 7.13. Símil estructural entre una chapa de forjado colaborante y revestimiento de canal de regadío. Fuente: elaboración propia. ....	108
Figura 7.14. Distribución de tensiones longitudinales para el modo 2 – frec. 10.13 Hz -. Fuente: elaboración propia. ....	108
Figura 7.15. Distribución de tensiones transversales para el modo 2 – frec. 10.13 Hz -. Fuente: elaboración propia. ....	109
Figura 7.16. Distribución de tensiones longitudinales para el modo 3 – frec. 11.06 Hz -. Fuente: elaboración propia. ....	109
Figura 7.17. Distribución de tensiones transversales para el modo 3 – frec. 11.06 Hz -. Fuente: elaboración propia. ....	110
Figura 8.1. Ejemplo de desbroce de canal mediante medios mecánicos. Fuente: Geosistemas Chile	116
Figura 8.2. Ejemplo de desbroce de canal mediante medios manuales. Fuente: Hzach Chile	117
Figura 8.3. Ejemplo de perfilado de canal mediante medios mecánicos. Fase inicial. ....	118
Figura 8.4. Ejemplo de perfilado de canal mediante medios mecánicos. Fase final. ....	118



Figura 8.5. Camión bomba a emplear .....	119
Figura 8.6. Camión bomba empleado y conducto de bombeo .....	120
Figura 8.7. Camión hormigonera empleado.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 8.8. Disposición definitiva de los equipos .....	121
Figura 8.9. Detalle de junta en el colchón geotextil .....	122
Figura 8.10. Croquis del espesor del colchón geotextil relleno .....	122
Figura 8.11. Esquema de la generación de sub presiones en el terreno .....	123
Figura 8.12. Definición de la anchura en el colchón geotextil.....	124
Figura 8.13. Detalle del colchón HUESKER Incomat Standard .....	126
Figura 8.14. Detalle del colchón HUESKER Incomat Flex.....	127
Figura 8.15. Ejemplo de extendido del colchón geotextil .....	128
Figura 8.16. Ejemplo de anclaje del colchón geotextil .....	129
Figura 8.17. Ejemplo de anclaje del colchón geotextil .....	129
Figura 8.18. Ejemplo de anclajes .....	130
Figura 8.19. Ejemplo de inserción de la manguera en el colchón geotextil .....	130
Figura 8.20. Ejemplo de inserción de la manguera en el colchón geotextil .....	131
Figura 8.21. Ejemplo de relleno simultáneo de diferentes colchones .....	131
Figura 8.22. Ejemplo de relleno simultáneo de diferentes colchones .....	132
Figura 8.23. Ejemplo de relleno instalación en presencia de agua .....	132
Figura 8.24. Ejemplo de bomba estacionaria.....	133
Figura 8.25. Ejemplo de camión bomba .....	133
Figura 8.26. Ejemplo de anclaje definitivo del colchón .....	134

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1 Variables significativas del modelo. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]</i> .....	33
<i>Tabla 3.2 Dosificación 1. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	34
<i>Tabla 3.3 Dosificación 2. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	34
<i>Tabla 3.4 Dosificación 3. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	34
<i>Tabla 3.5 Dosificación 4. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	34
<i>Tabla 3.6 Dosificación 5. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	35
<i>Tabla 3.7 Dosificación 6. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	35
<i>Tabla 3.8 Dosificación 7. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	35
<i>Tabla 3.9 Dosificación 8. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	35
<i>Tabla 3.10 Dosificación 9. Fuente: Elaboración propia.</i> .....	35
<i>Tabla 4.1 Volumen necesario para ejecutar los ensayos de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.</i> .	58
<i>Tabla 4.2 Cantidad necesaria de cada material para ejecutar los ensayos. Fuente: Elaboración propia</i> .....	58
<i>Tabla 4.3 Resultados ensayos para las diferentes dosificaciones. Fuente: Elaboración propia</i> .....	66
<i>Tabla 5.1 Valorización económica de los insumos empleados (Precios en pesos chilenos)</i> .....	70
<i>Tabla 5.2 Cuantificación económica de las dosificaciones empleadas (Precios en pesos chilenos)</i> .....	71
<i>Tabla 5.3 Tabla de resultados de los ensayos de consistencia y embudo en V.</i> .....	76
<i>Tabla 5.4 Costo material final por dosificación</i> .....	76
<i>Tabla 6.1 Valorización económica de los insumos empleados</i> .....	83
<i>Tabla 6.2 Cuantificación económica de las dosificaciones empleadas</i> .....	83
<i>Tabla 6.3 Ponderación variable resistencia a compresión</i> .....	84
<i>Tabla 6.4 Ponderación variable resistencia a tracción</i> .....	84
<i>Tabla 6.5 Ponderación variable módulo elástico</i> .....	85
<i>Tabla 6.6 Ponderación variable resistencia a compresión</i> .....	85
<i>Tabla 6.7 Ponderación variable esclerómetro</i> .....	85

Tabla 6.8 Ponderación variable permeabilidad.....	85
Tabla 6.9 Ponderación variable económica .....	86
Tabla 6.10 Análisis multicriterio .....	87
Tabla 6.11 Resultados finales .....	88
<i>Tabla 7.1 Variables significativas del modelo. Fuente: Elaboración propia .....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 7.2 Resumen de resultados obtenidos en ensayos para las muestras de control. Fuente: elaboración propia. ....</i>	<i>102</i>

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Guevara Fallas, C. Hidalgo Madrigal, M. Pizarro García, I. Rodríguez Valenciano, L. D. Rojas Vega y G. Segura Guzmán, «Efecto de la variación agua/cemento en el concreto,» Tecnología en marcha, 2011.
- [2] Putzmeister AG, Tecnología del hormigón para bombas de hormigón, 2004.
- [3] C. Safránez, «Consideraciones sobre el hormigón impermeable y el aspecto de su garantía,» Informes De La Construcción, 24(233), 51–58., 1971.
- [4] J. Toriac, «Concreto fresco y en fase de fraguado,» Lecciones Prácticas Aprendidas.
- [5] E. Ganjian, M. Khorami y A. A. Maghsoudi, «Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete,» Construction and Building Materials, 2009.
- [6] C. Y. Lin, G. C. Yao y C. H. Lin, «A Study on the Damping Ratio of Rubber Concrete.,» Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2012.
- [7] A. R. Khaloo, M. Dehestani y P. Rahmatabadi, «Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles.,» Waste Management, 2008.
- [8] R. Bustamante Montoro, P. Mayor Lobo, F. Hernandez Olivares y C. Rangel, «Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de mortero caucho-cemento.,» 2008.
- [9] J. I. Real Herráiz, F. R. C. Hernández y C. Zamorano, «Wave barriers for the reduction of railway induced vibrations. Analysis in tracks with geometric restrictions,» In Journal of Vibroengineering, 2014.
- [10] M. A. Aiello y F. Leuzzi, «Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state.,» Waste Management, 2010.
- [11] V. Royano García, E. Vázquez Ramonich, F. d. P. Jordana Riba y M. Barra Bizinotto, «Realización de ensayos de laboratorio de hormigón con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).,» UPCommons, 2009.
- [12] Grupo Cipala, «Tuberías y accesorios para bombeo de hormigón.,» [En línea]. Available: [www.grupocipala.com](http://www.grupocipala.com). [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [13] Universidad de Granada, «Desarrollo de la metodología de Taguchi,» [En línea]. Available: [www.ugr.es](http://www.ugr.es).
- [14] NCh1037 Of.77. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas .

- [15] E. Garrote Villar, «Capítulo 2. Ensayo de tracción indirecta,» Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- [16] C. Y. Y. G. C. & L. C. H. Lin, « A Study on the Damping Ratio of Rubber Concrete. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 9(2), 423-429.,» 2010.
- [17] NCh1019.EOf1974 Construcción - Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.
- [18] EN 12390-13:2014 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión.
- [19] ASTM C805 , «Standard Test Method for Rebound Number Of Hardened Concrete».
- [20] Ensayos de Hormigón en Estructuras. Parte 2: Ensayos No Destructivos. Determinación del Índice de Rebote. EN 12504 – 2.
- [21] NCh2186.Of1992 Hormigón y mortero - Método de ensayo - Determinación de la densidad real saturada y densidad real seca..
- [22] NCh2262.Of1997 Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación de la impermeabilidad al agua - Método de la penetración de agua bajo presión.
- [23] ELVEC, «Equipos para ensayo de materiales de construcción,» [En línea]. Available: [www.elvec.com](http://www.elvec.com).
- [24] NCh1170 Of.12 Hormigón – Ensayo de tracción por hendimiento.
- [25] Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V. EN 12350-9:2011.
- [26] 360 Grados en concreto, «Buenas prácticas para determinar la manejabilidad del concreto,» [En línea]. Available: [www.blog.360gradosenconcreto.com](http://www.blog.360gradosenconcreto.com).
- [27] CYPE, «Generador de precios,» [En línea]. Available: [http://www.generadordeprecios.info/seguridad/06bhe010\\_Camion\\_bomba\\_estacionado\\_en\\_obra\\_\\_para\\_bombeo\\_de\\_hormigon..html](http://www.generadordeprecios.info/seguridad/06bhe010_Camion_bomba_estacionado_en_obra__para_bombeo_de_hormigon..html).
- [28] Putzmeister, [En línea]. Available: [http://www.putzmeister.es/cps/rde/xchg/pm\\_spain/hs.xsl/552\\_ESN\\_HTML.htm](http://www.putzmeister.es/cps/rde/xchg/pm_spain/hs.xsl/552_ESN_HTML.htm).
- [29] CYPE , «Generador de Precios,» [En línea]. Available: [http://www.generadordeprecios.info/seguridad/06bhe020\\_Bomba\\_estacionaria\\_\\_para\\_bombeo\\_de\\_hormigon..html](http://www.generadordeprecios.info/seguridad/06bhe020_Bomba_estacionaria__para_bombeo_de_hormigon..html).

- [30] Direct Industry , [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/cifa-spa/product-50140-1552901.html>.
- [31] G. Barla, M. Janutolo y K. Zhao, «A Completely 3D Model for Simulation of Mechanized Tunnel Excavation,» 2012.
- [32] A. Graziani, R. Ribacchi y A. Capata, «3D modelling of TBM excavation in squeezing rock masses.,» 2007.
- [33] S. Gupta, M. F. M. Hussein, G. Degrande y D. H. E. M Cloteau, «A comparison of two models for the prediction of vibrations from underground railway traffic.,» 2006.
- [34] M. K. Breteler, K. W. Pilarczyk y T. Stoutjesdijk, «Design of alternative revetments. 1998,» In Coastal Engineering, 1998.
- [35] «Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 16 junio 2020].
- [36] C. d. I. C. d. Córdoba, «Desafíos para la Ingeniería Civil,» *Civiles*, 2020.