



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE USO DEL HORMIGÓN COMPACTADO  
CON RODILLO COMO ALTERNATIVA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS  
PRESAS DE LOS EMBALSES LA TRANCA Y MURALLAS VIEJAS EN LA  
COMUNA DE COMBARBALA, IV REGIÓN DE COQUIMBO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**DANIEL ANDRÉS MARIQUEO BELTRÁN**

PROFESOR GUÍA:  
ADOLFO OCHOA LLANGATO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
EZEQUIEL CAMUS HAYDEN  
DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: DANIEL ANDRÉS MARIQUEO BELTRÁN  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: ADOLFO OCHOA LLANGATO

## **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE USO DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO COMO ALTERNATIVA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS PRESAS DE LOS EMBALSES LA TRANCA Y MURALLAS VIEJAS EN LA COMUNA DE COMBARBALA, IV REGIÓN DE COQUIMBO**

La construcción de las presas de los embalses se puede realizar mediante diversos materiales, siendo el hormigón compactado con rodillo (HCR) uno de ellos. En Chile de los 60 principales embalses construidos, solo 3 se han realizado mediante esta tecnología. Es por esto que este trabajo se enfoca en realizar una investigación más profunda sobre el uso del HCR para la construcción de presas en Chile.

El presente trabajo de título se centra en el estudio del uso del hormigón compactado con rodillo (HCR) como una alternativa para la construcción de las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, dos proyectos de ingeniería que se encuentran dentro del Plan Nacional de Embalses de Chile, y que están programados para construirse mediante una presa de gravas compactadas con pantalla de hormigón (CFRD). Debido a que en Chile se han construidos muy pocas presas de HCR, este material se considera relativamente nuevo.

El estudio está estructurado en cuatro etapas principales: primero se realiza una revisión y análisis de los estudios de factibilidad existentes de La Tranca y Murallas Viejas, con el fin de presentar los antecedentes necesarios para el diseño las presas de HCR y también explicar las características de las presas CFRD ya definidas. Segundo se define un diseño a nivel de ingeniería conceptual de presas de HCR para ambos embalses, estos diseños son ubicados en los sitios de emplazamiento y cubicados. Tercero se abordan las principales características de los materiales que componen el HCR y las dosificaciones típicas. También se desarrolla la metodología de construcción de las presas mediante la tecnología del HCR, se definen las principales especificaciones técnicas, obras secundarias, y tiempos de construcción.

En la cuarta etapa, se estiman los costos de construcción de las presas de HCR, y se comparan con los costos de las presas originales. Las conclusiones indican que las presas de HCR serian más costosas que las de CFRD, pero tienen el punto a favor de que se construirían en menores tiempos. Este trabajo de título contribuye con información muy útil sobre el HCR, y la construcción de presas de este tipo en Chile.

*Dedicado a mi mama y mis abuelos,*

***Los quiero mucho***

# Agradecimientos

Quiero agradecer a toda la gente que me ha apoyado a lo largo de mi vida, desde que era pequeño e iba al colegio hasta hoy que me encuentro cerrando mi etapa universitaria.

Primero, quiero agradecerle a mi mamá María Eliana, quien además de ser la mejor mamá que pude haber tenido, siempre fue la primera persona que me incentivó, ayudó y motivó a ser un buen estudiante. Gracias a su apoyo incondicional y mucho sacrificio, me encuentro hoy en día terminando mi carrera. A mis abuelos Eliana y Humberto, quienes siempre me entregaron todo su amor y cariño, y se encargaron de que nunca me faltara nada en ningún sentido. No puedo estar más agradecido por ello. A mis hermanas Javiera, María Graciela, Antonia y Martina por haberme soportado como hermano mayor todos estos años y hacerme reír constantemente. A mi papá Octavio, quien siempre me hizo sentir muy bien, compartió momentos agradables y me brindó su apoyo cuando lo requerí. A mi padrastro Ricardo, quien desde el momento que llegó a mi familia, me ha subido el ánimo, hecho reír y motivado siempre. A mi primo Maximiliano por haberme apoyado desde pequeño y siempre haber creído en mí.

A mis amigos de casi toda la vida, Esteban, Ítalo, Matías, Miguel, Cristóbal, Felipe, Acuña y Franco, que desde 7mo han estado ahí. A mis amigos del Liceo Nacional, Juan Pablo y Axl, quienes han estado presentes siempre. Mis amigos penta Diego, Paz, Pía y Valentina que siempre tuvieron fe en mí. A todas las amistades que hice en la Universidad: Luis, Vicente, Raimundo, Javier, Max, Francisca, Benjamín, Camila y Mikael. Por si se me olvida alguien, quiero agradecer a todos aquellos que han sido parte de mi círculo de amigos durante mi vida.

A mis profesores, Gema y Oscar, quienes me motivaron siempre, y finalmente a mi profesor guía Adolfo, quien me ha acompañado durante este proceso y me ha ayudado a realizar este trabajo de la mejor manera posible.

¡Muchísimas gracias a todos!

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.2.1. Objetivo general . . . . .	1
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	1
1.3. Metodología . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Plan Nacional de Grandes Embalses . . . . .	4
2.1.1. ¿Qué es un embalse? . . . . .	4
2.1.2. Elementos de un embalse . . . . .	4
2.2. Tipos de Presas . . . . .	5
2.2.1. Consideraciones para escoger el tipo de presa de un proyecto . . . . .	5
2.2.2. Clasificación de las presas . . . . .	5
2.2.3. Cimientos . . . . .	6
2.2.4. Presas de Enrocados o Gravas Compactadas con Pantalla Aguas Arriba (CFRD) . . . . .	6
2.2.4.1. Sección típica de Presa de Enrocado o Gravas Compactadas con Pantalla Aguas Arriba (CFRD) . . . . .	7
2.2.5. Presas de Gravedad de Hormigón Compactado (HCR) . . . . .	8
2.2.5.1. Sección típica de Presa de Gravedad de Hormigón . . . . .	9
2.3. Hormigón Compactado con Rodillo . . . . .	10
2.3.1. ¿Qué es el HCR? . . . . .	10
2.3.2. Nomenclaturas utilizadas alrededor del mundo . . . . .	10
2.3.3. Historia del HCR . . . . .	11
2.3.4. Características generales del HCR . . . . .	11
2.4. Experiencias Nacionales . . . . .	12
2.4.1. Presa Pangué . . . . .	14
2.4.1.1. Características Presa Pangué . . . . .	14
2.4.1.2. Consideraciones durante la construcción de la Presa Pangué . . . . .	14
2.4.1.3. Rendimientos de colocación Pangué . . . . .	15
2.4.2. Presa Ralco . . . . .	16
2.4.2.1. Características Presa Ralco . . . . .	17
2.4.2.2. Consideraciones durante la construcción de la Presa Ralco . . . . .	17
2.4.2.3. Rendimientos de colocación Ralco . . . . .	17
2.4.3. Presa Angostura . . . . .	18
2.4.3.1. Características Presa Angostura . . . . .	18

2.5.	Posibles problemas de disponibilidad en los yacimientos del embalse La Tranca	18
<b>3.</b>	<b>Recopilación y Análisis Antecedentes Previos MN Ingenieros</b>	<b>19</b>
3.1.	Proyecto Embalse La Tranca . . . . .	19
3.1.1.	Ubicación Embalse La Tranca . . . . .	19
3.1.2.	Alternativas sitio de emplazamiento de la Presa . . . . .	20
3.1.3.	Estudio Geotécnico Sitio La Tranca 1 . . . . .	21
3.1.4.	Anteproyecto Presa CFRD . . . . .	23
3.1.4.1.	Presa CFRD La Tranca . . . . .	23
3.1.4.2.	Evacuador de Crecidas La Tranca . . . . .	25
3.1.5.	Yacimientos . . . . .	26
3.2.	Proyecto Embalse Murallas Viejas . . . . .	26
3.2.1.	Ubicación Embalse Murallas Viejas . . . . .	27
3.2.2.	Alternativas sitio de emplazamiento de la Presa . . . . .	27
3.2.3.	Estudio Geotécnico Sitio El Quillay . . . . .	29
3.2.4.	Anteproyecto Presa . . . . .	30
3.2.4.1.	Presa CFRD Murallas Viejas . . . . .	30
3.2.4.2.	Evacuador de Crecidas Murallas Viejas . . . . .	32
3.2.5.	Yacimientos . . . . .	33
3.3.	Comentarios para aplicación Presa HCR . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>Diseño Conceptual Presa de HCR</b>	<b>36</b>
4.1.	Elección del Hormigón Compactado con Rodillo como material para la presa	36
4.2.	Consideraciones y supuestos generales . . . . .	37
4.2.1.	Cuerpo de una presa de HCR . . . . .	37
4.2.2.	Evacuador de crecidas de una presa de HCR . . . . .	37
4.2.3.	Obras de desvió y entrega . . . . .	37
4.3.	Diseño Conceptual Sección Tipo Presa HCR . . . . .	38
4.3.1.	Sección Presa HCR La Tranca . . . . .	38
4.3.2.	Sección Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	39
4.4.	Verificaciones Estabilidad Presas de HCR . . . . .	41
4.4.1.	Estabilidad al Volcamiento . . . . .	43
4.4.1.1.	Caso Estático La Tranca . . . . .	44
4.4.1.2.	Caso Pseudo-Estático La Tranca . . . . .	44
4.4.1.3.	Caso Estático Murallas Viejas . . . . .	45
4.4.1.4.	Caso Pseudo-Estático Murallas Viejas . . . . .	46
4.4.2.	Estabilidad al Deslizamiento . . . . .	46
4.4.2.1.	Caso Estático La Tranca . . . . .	47
4.4.2.2.	Caso Pseudo-Estático La Tranca . . . . .	47
4.4.2.3.	Caso Estático Murallas Viejas . . . . .	48
4.4.2.4.	Caso Pseudo-Estático Murallas Viejas . . . . .	48
4.4.3.	Comentarios Estabilidad Presas de HCR . . . . .	49
4.5.	Definición Ubicación Eje de Emplazamiento Presa HCR . . . . .	49
4.5.1.	Ubicación Emplazamiento Presa HCR La Tranca . . . . .	49
4.5.2.	Ubicación Emplazamiento Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	51
4.6.	Cubicación de Materiales . . . . .	52
4.6.1.	Metodología . . . . .	52

4.6.2.	Modelado Presa HCR La Tranca . . . . .	53
4.6.3.	Modelado Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	58
4.6.4.	Cubicación Final Presa HCR La Tranca . . . . .	63
4.6.5.	Cubicación Final Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	63
<b>5.</b>	<b>Materiales y Dosificaciones para una presa de HCR</b>	<b>65</b>
5.1.	Materiales del HCR . . . . .	65
5.1.1.	Materiales Cementicios . . . . .	66
5.1.2.	Áridos . . . . .	68
5.1.2.1.	Granulometrías utilizadas en presas de HCR . . . . .	69
5.2.	Dosificación del HCR . . . . .	70
5.2.1.	Factores principales . . . . .	71
5.2.2.	Metodologías de dosificación del HCR . . . . .	72
5.2.3.	Dosificaciones tipo utilizadas en presas de HCR . . . . .	73
5.3.	Mezcla de HCR para presas La Tranca y Murallas Viejas . . . . .	77
5.3.1.	Supuesto general . . . . .	77
5.3.2.	Metodología de dosificación . . . . .	77
5.3.3.	Dosificación Final para las presas de HCR de La Tranca y Murallas Viejas . . . . .	78
<b>6.</b>	<b>Metodología de Construcción presa de HCR</b>	<b>79</b>
6.1.	Producción de áridos, material cementicio y HCR . . . . .	80
6.1.1.	Planta de áridos . . . . .	82
6.1.2.	Planta de HCR . . . . .	85
6.1.2.1.	Planta de dosificación . . . . .	86
6.1.2.2.	Planta de mezclado . . . . .	87
6.2.	Sistema de transporte del HCR . . . . .	88
6.3.	Construcción de la presa de HCR . . . . .	90
6.3.1.	Excavaciones . . . . .	90
6.3.2.	Control de temperatura en la mezcla . . . . .	91
6.3.3.	Colocación y Extensión del HCR . . . . .	91
6.3.4.	Compactación del HCR . . . . .	93
6.3.5.	Juntas de construcción entre capas de HCR . . . . .	95
6.3.5.1.	Juntas de construcción horizontales . . . . .	97
6.3.5.2.	Juntas de construcción verticales . . . . .	98
6.3.6.	Juntas de Contracción . . . . .	99
6.3.7.	Construcción del paramento aguas arriba . . . . .	99
6.4.	Ensayos recomendados para los materiales y el HCR . . . . .	100
6.5.	Tiempos de Construcción . . . . .	101
6.5.1.	Rendimientos de colocación La Tranca y Murallas Viejas . . . . .	101
6.5.2.	Rendimiento de producción de áridos y cemento . . . . .	103
<b>7.</b>	<b>Estimación de costos</b>	<b>105</b>
7.1.	Costo presa CFRD . . . . .	105
7.1.1.	Costo presa CFRD La Tranca . . . . .	106
7.1.2.	Costo presa CFRD Murallas Viejas . . . . .	108
7.2.	Costo presa HCR . . . . .	111
7.2.1.	Supuestos Generales . . . . .	112

7.2.1.1.	Costos Evacuador de Crecidas y Obras de Desvió y Entrega, Presa de HCR La Tranca . . . . .	113
7.2.1.2.	Costos Evacuador de Crecidas y Obras de Desvió y Entrega, Presa de HCR Murallas Viejas . . . . .	113
7.2.2.	Estimación Costos 1, en base a la Central Ralco . . . . .	113
7.2.2.1.	Estimación 1 Costo presa HCR La Tranca . . . . .	114
7.2.2.2.	Estimación 1 Costo presa HCR Murallas Viejas . . . . .	115
7.2.3.	Estimación Costos 2, en base al Estudio de Prefactibilidad del Embalse Chillán . . . . .	115
7.2.3.1.	Estimación 2 Costo presa HCR La Tranca . . . . .	116
7.2.3.2.	Estimación 2 Costo presa HCR Murallas Viejas . . . . .	116
7.2.4.	Estimación Costos 3, en base al trabajo de Blinder, Krempel y Andriolo . . . . .	117
7.2.4.1.	Estimación 3 Costo presa HCR La Tranca . . . . .	118
7.2.4.2.	Estimación 3 Costo presa HCR Murallas Viejas . . . . .	119
7.2.5.	Estimación Costos 4, en base a la información de la Asociación de Cemento Portland acerca de los costos de construcción de presas de HCR . . . . .	119
7.2.5.1.	Estimación 4 Costo presa HCR La Tranca . . . . .	120
7.2.5.2.	Estimación 4 Costo presa HCR Murallas Viejas . . . . .	120
7.2.6.	Estimación Costos 5, en base a la central Ralco y Unicon Chile . . . . .	121
7.2.6.1.	Estimación 5 Costo presa HCR La Tranca . . . . .	122
7.2.6.2.	Estimación 5 Costo presa HCR Murallas Viejas . . . . .	122
7.3.	Resumen costos HCR vs CFRD . . . . .	123
7.3.1.	Comentarios respecto a la estimación de costos . . . . .	125
7.4.	Costos Definitivos . . . . .	125
7.5.	Comparación Presas HCR vs CFRD . . . . .	127
7.5.1.	Ventajas HCR . . . . .	127
7.5.2.	Ventajas CFRD . . . . .	127
7.5.3.	Comparación general Proyectos La Tranca y Murallas Viejas . . . . .	128
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y Comentarios Finales</b>	<b>129</b>
8.1.	Cumplimiento de objetivos . . . . .	129
8.2.	Perspectiva Técnica . . . . .	129
8.3.	Perspectiva Económica . . . . .	130
8.4.	Discusión . . . . .	131
	<b>Bibliografía</b>	<b>133</b>

# Índice de Tablas

3.1.	Coordenadas Eje de emplazamiento La Tranca, MN Ingenieros . . . . .	25
3.2.	Características Embalse La Tranca, mejor alternativa . . . . .	25
3.3.	Coordenadas Eje de emplazamiento, MN Ingenieros . . . . .	32
3.4.	Características Embalse Murallas Viejas, mejor alternativa . . . . .	32
3.5.	Yacimientos fluviales del río Combarbalá . . . . .	33
4.1.	Características geométricas, Presa HCR La Tranca . . . . .	39
4.2.	Características geométricas, Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	40
4.3.	Coeficiente sísmico . . . . .	42
4.4.	Pesos específicos . . . . .	43
4.5.	Parámetros Roca . . . . .	43
4.6.	Factores de seguridad . . . . .	43
4.7.	Nivel de Aguas . . . . .	43
4.8.	Fuerzas Verticales La Tranca, Caso Estático . . . . .	44
4.9.	Fuerzas Horizontales La Tranca, Caso Estático . . . . .	44
4.10.	Factor de seguridad obtenido . . . . .	44
4.11.	Fuerzas Verticales La Tranca, Caso Pseudo-Estático . . . . .	44
4.12.	Fuerzas Horizontales La Tranca, Caso Pseudo-Estático . . . . .	45
4.13.	Factor de seguridad obtenido . . . . .	45
4.14.	Fuerzas Verticales Murallas Viejas, Caso Estático . . . . .	45
4.15.	Fuerzas Horizontales Murallas Viejas, Caso Estático . . . . .	45
4.16.	Factor de seguridad obtenido . . . . .	45
4.17.	Fuerzas Verticales Murallas Viejas, Caso Pseudo-Estático . . . . .	46
4.18.	Fuerzas Horizontales Murallas Viejas, Caso Pseudo-Estático . . . . .	46
4.19.	Factor de seguridad obtenido . . . . .	46
4.20.	Fuerzas estabilidad deslizamiento La Tranca, Caso Estático . . . . .	47
4.21.	Factores de seguridad obtenidos . . . . .	47
4.22.	Fuerzas estabilidad deslizamiento La Tranca, Caso Pseudo-Estático . . . . .	47
4.23.	Factores de seguridad obtenidos . . . . .	47
4.24.	Fuerzas estabilidad deslizamiento Murallas Viejas, Caso Estático . . . . .	48
4.25.	Factores de seguridad obtenidos . . . . .	48
4.26.	Fuerzas estabilidad deslizamiento Murallas Viejas, Caso Pseudo-Estático . . . . .	48
4.27.	Factores de seguridad obtenidos . . . . .	49
4.28.	Coordenadas Eje de emplazamiento Presa de HCR La Tranca . . . . .	50
4.29.	Coordenadas Eje de emplazamiento Presa de HCR Murallas Viejas . . . . .	51
4.30.	Largo del Muro La Tranca . . . . .	56
4.31.	Largo del Muro Murallas Viejas . . . . .	60
4.32.	Cubicación y características geométricas Presa HCR La Tranca . . . . .	63
4.33.	Cubicación y características geométricas Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	64

5.1.	Granulometrías combinadas de áridos típicas en mezclas de HCR de alta trabajabilidad, Fuente: Boletín 177. Comisión Internacional de Grandes Presas . . . .	69
5.2.	Granulometrías combinadas utilizadas en presas de HCR alrededor del mundo, Fuente: Boletín 126. Comisión Internacional de Grandes Presas . . . . .	70
5.3.	Parámetros indicativos de resistencias de presas de HCR, Fuente: Boletín 177, Comisión Internacional de Grandes Presas . . . . .	71
5.4.	Dosificación Inicial Presa Pangué, Fuente: Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del HCR, Luis Uribe . . . . .	73
5.5.	Dosificación mezcla de HCR con más contenido cementicio en la Presa Ralco, Fuente: Características del diseño y construcción de la presa Ralco en Chile, Luis Uribe . . . . .	73
5.6.	Resistencias a Compresión y Tracción Presa Pangué, Fuente: Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del HCR, Luis Uribe .	74
5.7.	Resistencias a Tracción Presa Ralco, Fuente: Características del diseño y construcción de la presa Ralco en Chile, Luis Uribe . . . . .	74
5.8.	Dosificaciones utilizadas en presas alrededor del mundo, Fuente: ACI 207.5R-11	75
5.9.	Resistencias alcanzadas en presas alrededor del mundo, Fuente: ACI 207.5R-11	76
5.10.	Dosificación mezcla de HCR para los embalses La Tranca y Murallas Viejas .	78
6.1.	Cantidades disponibles en los Yacimientos . . . . .	81
6.2.	Cantidad de toneladas a producir por la planta de áridos . . . . .	85
6.3.	Ensayos típicos de control de calidad de los materiales que componen al HCR, Fuente: ICOLD boletín 177 y ACI 2011 . . . . .	100
6.4.	Ensayos típicos de control de calidad del HCR fresco ,Fuente: ICOLD boletín 177 y ACI 2011 . . . . .	101
6.5.	Ensayos típicos de control de calidad del HCR endurecido, Fuente: ICOLD boletín 177 . . . . .	101
6.6.	Rendimientos de colocación La Tranca . . . . .	102
6.7.	Rendimientos de colocación Murallas Viejas . . . . .	102
6.8.	Cantidad de áridos producidos por mes . . . . .	103
7.1.	Costos Unitarios para presa CFRD La Tranca estimados a Julio del año 2009, Fuente: MN ingenieros . . . . .	106
7.2.	Costos Unitarios para presa CFRD La Tranca estimados a Julio del año 2023, Fuente: Elaboración propia . . . . .	106
7.3.	Proporción de materiales presa CFRD La Tranca . . . . .	107
7.4.	Costo Presa CFRD La Tranca . . . . .	107
7.5.	Costo Evacuador de Crecidas Presa CFRD La Tranca . . . . .	107
7.6.	Obras de Desvio y Entrega, Presa CFRD La Tranca . . . . .	108
7.7.	Costo Final Presa CFRD + Vertedero Lateral La Tranca + Obras de Desvio y Entrega . . . . .	108
7.8.	Costos Unitarios para presa CFRD Murallas Viejas estimados a noviembre del año 2009, Fuente: MN ingenieros . . . . .	108
7.9.	Costos Unitarios para presa CFRD Murallas Viejas estimados a Julio del año 2023, Fuente: Elaboración propia . . . . .	109
7.10.	Proporción de materiales presa CFRD Murallas Viejas . . . . .	109
7.11.	Costo Presa CFRD Murallas Viejas . . . . .	110
7.12.	Costo Evacuador de Crecidas Presa CFRD Murallas Viejas . . . . .	110
7.13.	Obras de Desvio y Entrega, Presa CFRD Murallas Viejas . . . . .	110

7.14.	Costo Final Presa CFRD + Vertedero Frontal Murallas Viejas + Obras de Desvío y Entrega . . . . .	110
7.15.	Costos Unitarios Vertedero en el cuerpo de la presa de HCR estimados a diciembre del año 2013, Fuente: SMI Ingenieros . . . . .	112
7.16.	Costos Unitarios Vertedero en el cuerpo de la presa de HCR estimados a julio del año 2023, Fuente: Elaboración propia . . . . .	112
7.17.	Costo Evacuador de Crecidas, Presa HCR La Tranca . . . . .	113
7.18.	Costo Obras de Desvío y Entrega, Presa HCR La Tranca . . . . .	113
7.19.	Costo Evacuador de Crecidas, Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	113
7.20.	Costo Obras de Desvío y Entrega, Presa HCR Murallas Viejas . . . . .	113
7.21.	Costos Unitarios para presa HCR Central Ralco Julio de 1993, Fuente: INGEN-DESA . . . . .	114
7.22.	Costos Unitarios para presa HCR Central Ralco Julio de 2023, Fuente: Elaboración propia . . . . .	114
7.23.	Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 1 . . . . .	114
7.24.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 1 . . . . .	115
7.25.	Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 1 . . . . .	115
7.26.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega Murallas Viejas, Estimación 1 . . . . .	115
7.27.	Estimación de Costos Presa por m3 de HCR CLP Diciembre 2013, Fuente: SMI Ingenieros . . . . .	115
7.28.	Estimación de Costos Presa por m3 de HCR CLP Julio 2023, Fuente: Elaboración propia . . . . .	116
7.29.	Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 2 . . . . .	116
7.30.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 2 . . . . .	116
7.31.	Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 2 . . . . .	116
7.32.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega Murallas Viejas, Estimación 2 . . . . .	117
7.33.	Incidencia en la construcción de presas de HCR, Fuente: Blinder, Krempel y Andriolo . . . . .	117
7.34.	Estimación de Costos Presa por m3 de HCR USD 1998, Fuente: Blinder, Krempel y Andriolo . . . . .	118
7.35.	Estimación de Costos Presa por m3 de HCR CLP 2023 . . . . .	118
7.36.	Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 3 . . . . .	118
7.37.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 3 . . . . .	118
7.38.	Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 3 . . . . .	119
7.39.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega Murallas Viejas, Estimación 3 . . . . .	119
7.40.	Costos estimados por la PCA, Fuente: Asociación del Cemento Portland . . . . .	119
7.41.	Costos estimados por la PCA, en 2023, Fuente: Elaboración propia . . . . .	120
7.42.	Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 3 . . . . .	120
7.43.	Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 3 . . . . .	120
7.44.	Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 4.1 . . . . .	121
7.45.	Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 4.2 . . . . .	121

7.46.	Costos de cemento Unicon Chile aumentados un 53%	122
7.47.	Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 5	122
7.48.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 5	122
7.49.	Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 5	123
7.50.	Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 5	123
7.51.	Resumen estimación de costos, La Tranca y Murallas Viejas	123
7.52.	Estimación Final, La Tranca y Murallas Viejas	126
7.53.	Costo por m3, La Tranca y Murallas Viejas	126
7.54.	Precio del m3 embalsado para ambas alternativas	126
7.55.	Cuadro Comparativo HCR vs CFRD, La Tranca	128
7.56.	Cuadro Comparativo HCR vs CFRD, Murallas Viejas	128
8.1.	Comparación Teórica	131

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Presa de enrocados o gravas compactadas con pantalla aguas arriba, Fuente: Diseño de Pequeñas Presas . . . . .	7
2.2.	Rellenos de una presa CFRD, Fuente: Diseño de Pequeñas Presas . . . . .	8
2.3.	Sección típica de una presa de gravedad de HCR, Fuente: ACI 207.5R-11 . . . . .	9
2.4.	Presa Pangue, Fuente: Enel Chile . . . . .	12
2.5.	Presa Ralco, Fuente: Enel Chile . . . . .	13
2.6.	Presa Angostura, Fuente: Colbun . . . . .	13
2.7.	Rendimientos de colocación de HCR, Fuente: Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas, Luis Uribe . . . . .	16
3.1.	Ubicación general La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	20
3.2.	Ubicación en plano geológico alternativa de sitios, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	21
3.3.	Ubicación Sitio La Tranca 1, Fuente: Elaboración propia Google Earth . . . . .	22
3.4.	Sección Típica Presa CFRD La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	23
3.5.	Planta Presa CFRD La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	24
3.6.	Vertedero Presa CFRD La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	25
3.7.	Zona de yacimientos . . . . .	26
3.8.	Ubicación general Murallas Viejas, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	27
3.9.	Ubicación de los Sitios para el embalse Murallas Viejas, Fuente: Google Earth . . . . .	29
3.10.	Ubicación Sitio El Quillay, Fuente: Elaboración propia Google Earth . . . . .	30
3.11.	Sección Típica Presa CFRD Murallas Viejas, Fuente: E.F MN Ingenieros . . . . .	31
3.12.	Planta Presa CFRD Murallas Viejas, Fuente: E.F MN ingenieros . . . . .	31
3.13.	Vertedero Presa CFRD Murallas Viejas, Fuente: E.F MN ingenieros . . . . .	33
4.1.	Sección Típica Presa HCR La Tranca, Fuente: Elaboración propia . . . . .	39
4.2.	Sección Típica Presa HCR Murallas Viejas, Fuente: Elaboración propia . . . . .	40
4.3.	Fuerzas que actúan sobre la presa, Caso Estático, Fuente: Elaboración propia . . . . .	41
4.4.	Fuerzas que actúan sobre la presa, Caso Pseudo-estático Fuente: Elaboración propia . . . . .	42
4.5.	Eje de emplazamiento Presa HCR La Tranca, Fuente: Elaboración propia . . . . .	50
4.6.	Eje de emplazamiento Presa HCR Murallas Viejas, Fuente: Elaboración propia . . . . .	51
4.7.	Topografía Sitio La Tranca I, Global Mapper . . . . .	54
4.8.	Perfil longitudinal del eje de emplazamiento La Tranca, Civil 3D . . . . .	55
4.9.	Proyección presa de HCR La Tranca, Civil 3D . . . . .	55
4.10.	Totalidad de Secciones Transversales Presa HCR La Tranca, Civil 3D . . . . .	56
4.11.	Sección Transversal Ejemplo Presa HCR La Tranca, Civil 3D . . . . .	57
4.12.	Proyección presa de CFRD La Tranca, Civil 3D . . . . .	57
4.13.	Totalidad de Secciones Transversales Presa CFRD La Tranca, Civil 3D . . . . .	58
4.14.	Sección Transversal Ejemplo Presa CFRD La Tranca, Civil 3D . . . . .	58

4.15.	Topografía Sitio El Quillay, Global Mapper . . . . .	59
4.16.	Perfil longitudinal del eje de emplazamiento Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	59
4.17.	Proyección presa de HCR Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	60
4.18.	Totalidad de Secciones Transversales Presa HCR Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	61
4.19.	Sección Transversal Ejemplo Presa HCR Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	61
4.20.	Proyección presa de CFRD Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	62
4.21.	Totalidad de Secciones Transversales Presa CFRD Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	62
4.22.	Sección Transversal Ejemplo Presa CFRD Murallas Viejas, Civil 3D . . . . .	63
5.1.	Materiales de una mezcla de HCR . . . . .	66
5.2.	Tipo de Cemento utilizado en la construcción de presas,Fuente: Boletín 126. Comisión Internacional de Grandes Presas . . . . .	67
6.1.	Comparativa construcción, HCR vs Hormigón Convencional. . . . .	79
6.2.	Construcción Presa Pangué, Planta de HCR, Fuente: Adolfo Ochoa . . . . .	82
6.3.	Almacenamiento de áridos, Fuente: Asamach . . . . .	83
6.4.	Ejemplo de Harnero, Fuente: Metso . . . . .	84
6.5.	Maquinas Chancadoras . . . . .	84
6.6.	Ejemplo Camión Tolva, Fuente: Hino . . . . .	86
6.7.	Ejemplo Cintas Pesadoras, Fuente: Arco Electrónica . . . . .	87
6.8.	Planta de HCR utilizada en la construcción de la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa . . . . .	88
6.9.	Cintas Transportadoras de 910 mm utilizadas en la construcción de la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa . . . . .	89
6.10.	Máquina Crawler Placer operando en la construcción de la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa . . . . .	90
6.11.	Colocación horizontal de capas de HCR con dos calles, Fuente: Elaboración propia	92
6.12.	Bulldozer Caterpillar D6, Fuente: truck1 . . . . .	93
6.13.	Rodillo Vibratorio de un solo tambor, Fuente: Sinomach . . . . .	94
6.14.	Rodillo Vibratorio compactando capa de HCR, Fuente: Adolfo Ochoa . . . . .	95
6.15.	Densímetro Nuclear, Fuente: Protección Radiológica Chile . . . . .	95
6.16.	Diagrama junta de contracción horizontal, Fuente: Elaboración propia . . . . .	96
6.17.	Diagrama junta de contracción vertical, Fuente: Elaboración propia . . . . .	96
6.18.	Moldajes utilizados en la construcción del paramento aguas arriba en la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa Llangato . . . . .	99
6.19.	Colocación de HCR, La Tranca . . . . .	102
6.20.	Colocación de HCR, Murallas Viejas . . . . .	103
7.1.	Costos presa CFRD y HCR, La Tranca, Fuente: Elaboración propia . . . . .	124
7.2.	Costos presa CFRD y HCR, Murallas Viejas, Fuente: Elaboración propia . . . . .	124
7.3.	Costos presa CFRD vs HCR, Fuente: Elaboración propia . . . . .	126

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) es un material utilizado para la construcción de presas, con una historia relativamente nueva, este corresponde a un hormigón muy seco, sin asentamiento de cono, transportado y colocado con equipos comúnmente utilizados para el movimiento de tierra, que finalmente es compactado mediante el uso de rodillos vibratorios.

Dentro de nuestro país se han construido tres presas utilizando esta tecnología, las cuales corresponden a las presas Pangué, Ralco y Angostura, desarrolladas por inversionistas privados y corresponden a presas para embalses de centrales hidroeléctricas. Estos proyectos demostraron que la utilización de HCR en la construcción de presas, pueden disminuir los costos y los tiempos cuando se construyen presas de mayor volumen.

Considerando las bondades que tiene este material y el desarrollo del plan de embalses que lleva adelante la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas, se propone estudiar este método como alternativa para la construcción de presas para embalses destinados a riego.

Por lo expuesto, se desarrolló un estudio de factibilidad técnica económica sobre la construcción de las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, con HCR. Estos proyectos están dentro del plan de la DOH y sus estudios de factibilidad contemplan la construcción de las presas con rellenos de materiales de suelos seleccionados (presas CFRD, presas de enrocados o gravas compactadas con pantalla de hormigón).

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es determinar la factibilidad técnica económica, a nivel de ingeniería conceptual, de construir las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, con hormigón compactado con rodillo (HCR).

#### 1.2.2. Objetivos específicos

Para la materialización del objetivo general, el trabajo a realizar consideró:

- Definir, a nivel de ingeniería conceptual, un diseño de presa de HCR para los embalses La Tranca y Murallas Viejas.
- Determinar y enlistar los principales recursos necesarios para construir las presas con HCR.
- Definir y describir las obras necesarias (principales y secundarias) y las principales partidas para la construcción de las presas en HCR.
- Desarrollar la metodología de construcción de las presas de HCR, y secuencia de construcción, señalando las principales especificaciones técnicas asociadas.
- Estimar los costos de construcción de las presas con HCR y compararlos con los costos de construcción con rellenos de tierra.
- Concluir, considerando las ventajas y desventajas, acerca de la factibilidad técnica y económica de construir las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas con hormigón compactado con rodillo.

### 1.3. Metodología

Para llevar a cabo el trabajo propuesto, cumpliendo los objetivos anteriormente mencionados, se realizaron los siguientes procedimientos:

1. **Revisión de antecedentes e investigación:** Se revisaron los estudios de factibilidad de ambos embalses La Tranca y Murallas Viejas, con la finalidad de tener presente las características principales de los proyectos, las cuales sirvieron como base para el estudio de estas presas con HCR. Además, se revisó y estudio bibliografía relacionada sobre el HCR, y el diseño y construcción de presas utilizando esta tecnología.
2. **Elaboración del diseño de presa de HCR y cubicación de esta:** Se elaboró a nivel de ingeniería conceptual una presa de HCR para ambos embalses, esto teniendo en cuenta las principales consideraciones descritas en la bibliografía respecto al diseño de presas de gravedad de HCR. Se consideró la ubicación definida en los estudios de factibilidad previos. Se determinó la sección de una presa de HCR para cada uno de los embalses, y se cubicó para establecer las partidas principales de construcción. Para todo lo anterior, se utilizó los programas Google Earth, Global Mapper y Civil 3D.
3. **Definición de materiales :** Se definieron los principales materiales que constituyen una presa de HCR, así como también las recomendaciones al momento de dosificar las mezclas de HCR. Esto se realizó en base a la lectura de estudios, normas internacionales y bibliografía elaborada por organizaciones expertas en la construcción de presas. También se estudió bibliografía sobre experiencias nacionales en la construcción de presas de HCR teniendo en cuenta los materiales utilizados en estas. Además, en base a distintos supuestos se definió una dosificación de HCR para ambos embalses.
4. **Metodología de Construcción presa de HCR:** Se estableció un método constructivo para las presas de HCR, considerando las principales obras necesarias como plantas de áridos, plantas de HCR y sistemas de transporte de HCR. Se presentaron las principales descripciones técnicas sobre la construcción de las presas de HCR, entre ellas

la colocación y compactación del HCR en la presa. Para esto se usó como referencia la bibliografía producida por expertos en la disciplina y también la bibliografía elaborada sobre experiencias tenidas en Chile con la construcción de presas de HCR.

5. **Estimación de costos y comparación con presa CFRD:** Se estimó el costo de la construcción de las presas de ambos embalses con HCR. Para esto, se estudió bibliografía relacionada con los análisis de costos de presas de HCR en la región, informes de evaluación económica de presas de HCR y los costos de experiencias nacionales en la construcción de presas de HCR. Se compararon los costos obtenidos con los costos estimados de una presa CFRD, y también se realizó un cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los métodos con HCR y con tierra (CFRD).
6. **Conclusiones y comentarios:** Se concluyó, en base a los resultados y costos obtenidos durante el desarrollo del trabajo, sobre la factibilidad de construir las presas de los embalses de La Tranca y Murallas Viejas mediante la tecnología del HCR.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

En el siguiente capítulo se presentan los principales antecedentes y conceptos generales, en los que se basó este trabajo.

### 2.1. Plan Nacional de Grandes Embalses

El plan nacional de grandes embalses es un proyecto de la Dirección de Obras Hidráulicas que considera la construcción de 20 embalses entre los años 2015 y 2025. Este plan tiene como objetivo embalsar un volumen total de 1.900 Hm<sup>3</sup> a lo largo del país, con el fin de beneficiar a más de 30.600 predios. Esto también permitirá aumentar en un 36 % la capacidad actual de embalsamiento nacional.

Los nuevos embalses tendrán múltiples beneficios, uno de los principales es que aumentará la seguridad de riego, y entre los secundarios, permitirá controlar las crecidas de los ríos y un mejor aprovechamiento del agua para generar energía hidroeléctrica. Dentro de este plan se encuentra la construcción de los embalses La Tranca y Murallas Viejas.

#### 2.1.1. ¿Qué es un embalse?

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) define los embalses como las obras que conservan el agua que precipita en el invierno en forma de lluvia en los valles y como nieve en la cordillera, además de las aguas que bajan de los deshielos primaverales; para adicionarlas a los ríos con el agua que llevan en primavera y verano, otorgando mayor seguridad al riego.

Los embalses están constituidos principalmente por una presa o terraplén que, limita el escurrimiento de agua y que cierra su cauce natural. Para evitar que el agua supere la cota máxima de los embalses, se construyen vertederos, los cuales controlan las crecidas en la cuenca.

#### 2.1.2. Elementos de un embalse

Los embalses a manera general están compuestos por tres componentes fundamentales, los cuales son la presa, los evacuadores de crecida y las obras de toma.

- **Presa:** Corresponde a los muros de contención encargados de retener el agua, que se acumula en el embalse.

- **Evacuadores de crecida:** : Corresponde a la estructura de descarga que tienen los embalses en caso de que este alcance su nivel operativo máximo, están encargados de evitar que se produzcan posibles desbordamientos, y que la presa pueda colapsar.
- **Obras de toma:** Corresponde al conjunto de estructuras, tubos o conductos, que se construyen con el fin de extraer el agua de manera controlada, y comunicar con el lugar de distribución del agua, ya sea una central hidroeléctrica o la red general de abastecimiento.

Además para su construcción también se deben considerar algunas obras secundarias de uso temporal, como los túneles de desvío y las ataguías, estas constituyen las obras de desvío en la construcción de un embalse.

- **Ataguía:** Se trata de una pequeña presa temporal que desempeña el papel de disminuir o redirigir el caudal de agua utilizada para canalizar corrientes de agua.
- **Túnel de desvío:** Es una obra temporal que se encarga de desviar el agua de un río mientras se construye la presa en el sitio de emplazamiento. Cumple la función de descargar el agua del río abajo del sitio de emplazamiento de la presa.

## 2.2. Tipos de Presas

A continuación, se presenta una definición y explicación general de los tipos de presas que se presentarán en este trabajo: de enrocados o gravas compactadas, -porque el estudio de factibilidad actual de ambos proyectos contempla este tipo de presas- (presas CFRD, Concrete Face Rockfill Dam), y gravitacionales debido a que las presas de HCR corresponden a presas de este tipo. Toda la información presentada en el punto 2.2 estará en base al libro Diseño de Pequeñas Presas:

### 2.2.1. Consideraciones para escoger el tipo de presa de un proyecto

El libro menciona que, para escoger un tipo de presa, se deben considerar diversos factores físicos. La topografía, la geología y las condiciones de los cimientos, los materiales disponibles, el tipo aliviadero, la hidrología y los terremotos de la zona, suelen ser los elementos fundamentales al momento de seleccionar qué tipo de presa se construirá para un proyecto.

Por lo general, solo en ocasiones muy particulares resulta adecuado un solo tipo de presa para un determinado emplazamiento. Por lo tanto, analizar distintos diseños preliminares y estimaciones para diferentes tipos de presa, suele ser la mejor metodología para la elección de la más óptima.

Los factores físicos no solo son los que determinan el tipo de presa del lugar, también se debe considerar factores legales, económicos y estéticos, estos factores también influyen en la selección del tipo de presa.

### 2.2.2. Clasificación de las presas

El libro Diseño de Pequeñas Presas, define que las presas se pueden clasificar de tres formas distintas, estas son: según su utilización, según su diseño hidráulico y según los materiales

utilizados en su construcción. A continuación, se describirá brevemente cada categoría:

- **Clasificación de acuerdo con su uso:** Las presas se clasifican según su función: presas de embalse, derivación o retención. Esta clasificación se puede complementar con la función específica que vaya a cumplir la presa.
- **Clasificación por sus características Hidráulicas:** Las presas con vertedero y sin vertedero. Las presas con vertederos pueden verter el agua por su coronación, mientras que las que no tienen vertedero no pueden realizar esto. Las presas con vertederos deben construirse con materiales que no erosionen cuando se está vertiendo agua.
- **Clasificación según los materiales:** Corresponde a la clasificación más común y se basa en los materiales que se utilizarán para la construcción de la presa. En esta clasificación se incluye la diferenciación del tipo estructural de la presa, por ejemplo: presa de gravedad de hormigón, o presa de arco de hormigón.

Dentro de la clasificación según los materiales, podemos encontrar las presas de enrocados o gravas compactadas (CFRD) y las presas gravitacionales de hormigón compactado con rodillo (HCR).

### 2.2.3. Cimientos

En el libro, Diseño de Pequeñas Presas, se hace referencia a que la condición geológica de los cimientos determina en gran medida el tipo de presa adecuado para ese lugar. Existen distintos tipos de cimientos, entre ellos podemos encontrar cimientos en roca, cimientos de grava, cimientos de limo o arena fina, cimientos de arcilla y cimientos no uniformes. Entre estos, los cimientos en roca destacan como los más apropiados, principalmente debido a sus resistencias, las cuales permiten la construcción de cualquier tipo de presa en ellos.

Las presas de gravedad de hormigón compactado con rodillo necesitan en la mayoría de los casos una roca sana y fuerte para poder cimentarse, por el contrario, las presas CFRD son más relajadas en ese aspecto, ya que también pueden cimentarse en gravas compactadas.

### 2.2.4. Presas de Enrocados o Gravas Compactadas con Pantalla Aguas Arriba (CFRD)

CFRD son las siglas de Concrete Face Rockfill Dam lo que quiere decir -Presa de relleno de roca con pantalla de hormigón-.

El libro Diseño de Pequeñas Presas también define que las presas de enrocados o gravas compactadas son presas que están compuestas mayormente por piedras de todos los tamaños, volcadas o en capas, lo que garantiza la estabilidad de la presa y utilizan una pantalla impermeable como barrera para el agua. La pantalla impermeable se ha construido con distintos materiales, pero el material más utilizado corresponde al hormigón.

La principal diferencia que encontramos entre las presas CFRD de enrocados y las presas CFRD de gravas compactadas, se encuentra en el tamaño máximo de sus piedras, ya que en los enrocados se pueden tener rocas o piedras más grandes, de hasta 1,6 m, mientras que las

gravas compactadas se encuentran piedras medianas del orden de 60 cm.

La ubicación de la pantalla de hormigón puede ser tanto en el centro de la presa, como aguas arriba del dique de esta. Lo más común es la ubicación de la pantalla aguas arriba. En la figura 2.1 se puede observar una sección típica de una presa de enrocados o gravas compactadas con pantalla aguas arriba.

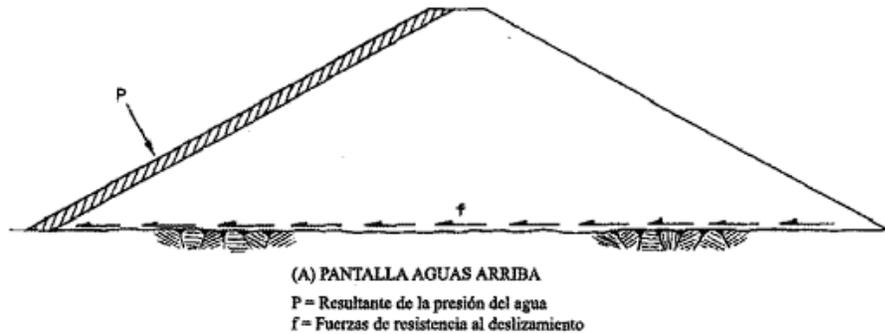


Figura 2.1: Presa de enrocados o gravas compactadas con pantalla aguas arriba, Fuente: Diseño de Pequeñas Presas

Dentro de las ventajas que proporciona construir la pantalla de hormigón aguas arriba de la presa se encuentran:

- Facilidad para la inspección y reparación.
- Puede construirse después de la realización de la sección de enrocado.
- Puede realizarse la inyección de la cimentación simultáneamente con la colocación de enrocado.
- Una mayor parte del dique está disponible para la estabilidad contra el deslizamiento.
- Puede usarse como protección del talud.
- Es relativamente fácil recrecer la presa en fecha posterior.
- En los climas húmedos, la ausencia de rellenos de suelos impermeables simplifica y acelera la construcción.

En este tipo de presas, para evitar las filtraciones dentro del dique, se suele utilizar lechada en la pantalla aguas arriba. Además, es vital prevenir las filtraciones bajo el dique de la presa, para esto frecuentemente se ejecuta una junta de sellado entre la pantalla y la cimentación.

#### 2.2.4.1. Sección típica de Presa de Enrocado o Gravas Compactadas con Pantalla Aguas Arriba (CFRD)

El libro Diseño de Pequeñas presas, también menciona que las secciones típicas de una presa CFRD tienen pendientes aguas abajo de 1,3:1 a 1,7:1 (horizontal a vertical), esto debido a que los proyectistas verificaron que era más económico utilizar pendientes próximas al ángulo de reposo natural de los materiales. La pendiente aguas arriba para las presas CFRD

con pantalla aguas arriba, también son del orden de 1,3:1 a 1,7:1.

La presa suele estar compuesta por tres tipos de relleno, estos se pueden observar en la figura 2.2.

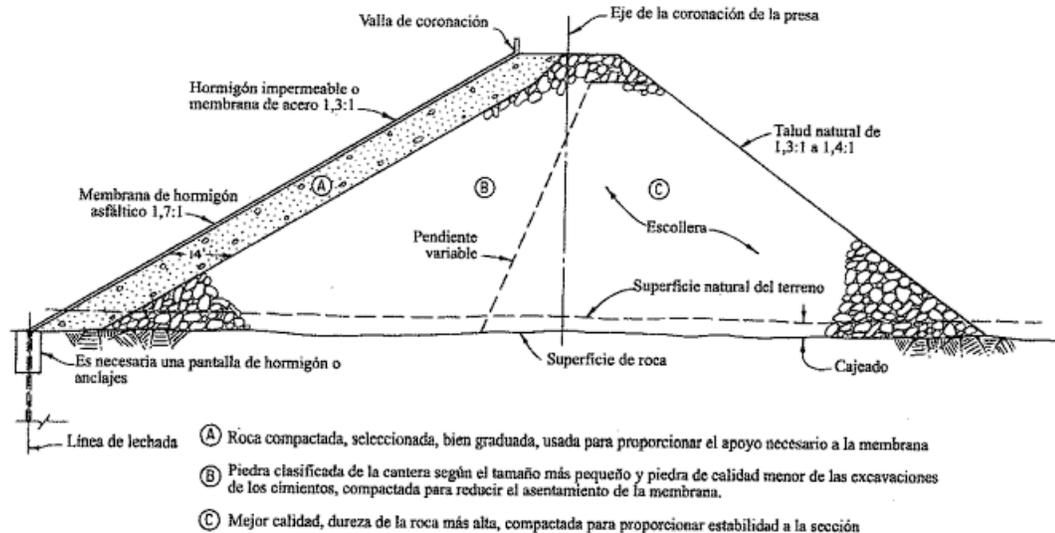


Figura 2.2: Rellenos de una presa CFRD, Fuente: Diseño de Pequeñas Presas

El libro define de la siguiente manera los rellenos de una presa de enrocados o gravas compactadas (CFRD):

- **Relleno en zona C:** La zona más grande aguas abajo del dique, compuesta por la roca de mejor calidad, la piedra más grande y compactada; esta zona proporciona una alta estabilidad a la sección.
- **Relleno en zona B:** Roca de menor calidad que la de la zona C, como la de la excavación del vertedero; utilizada para minimizar los costos totales de la presa.
- **Relleno en zona A:** Piedra más pequeña y grava; bien graduada, usada para proporcionar un apoyo a la pantalla y retardar grandes pérdidas de agua debidas a la fisuración de la pantalla.

### 2.2.5. Presas de Gravedad de Hormigón Compactado (HCR)

Según lo expuesto en el libro Diseño de Pequeñas Presas, una presa de gravedad de hormigón se diseña para que su propio peso proporcione una resistencia mayor que las fuerzas ejercidas sobre ella. En caso de contar con un cemento apropiado y realizar un diseño y construcción de la manera correcta, este tipo de presas será duradera y requerirá un mantenimiento pequeño.

Suelen ser una muy buena solución cuando la cimentación del emplazamiento es buena, además una de sus ventajas principales es que pueden tener aliviaderos de coronación. También como alternativa a la construcción convencional de presas de gravedad, en donde se ha construido con hormigón en masa por bloques, el hormigón compactado con rodillo (HCR) se

presenta como una alternativa mucho más económica debido a la rapidez de su construcción y que es igual de competente. Las presas de gravedad de HCR se construyen igual que las presas de tierra. El HCR seco, se vierte, se extiende, y se compacta con los rodillos vibratorios en capas continuas entre las laderas de 0,3 a 0,6 metros de espesor.

### 2.2.5.1. Sección típica de Presa de Gravedad de Hormigón

En la figura 2.3 se puede observar una sección típica de una presa de gravedad de HCR.

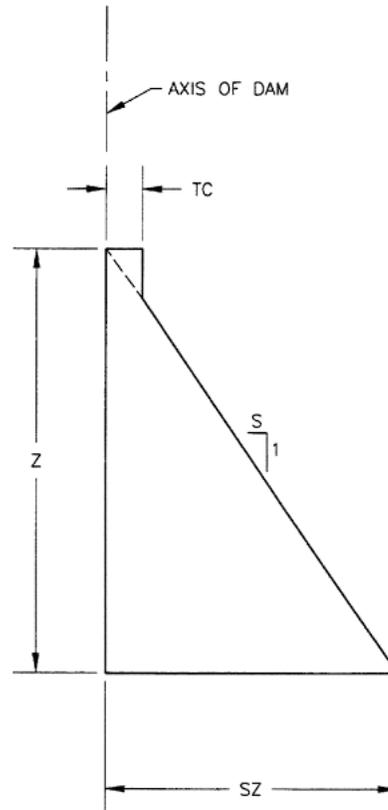


Figura 2.3: Sección típica de una presa de gravedad de HCR, Fuente: ACI 207.5R-11

Por lo general, las secciones de este tipo de presas suelen caer verticalmente aguas arriba, y tienen pendientes aguas abajo de 0,6:1 a 1:1 (horizontal a vertical).

Además, el Boletín 177 Presas de Hormigón Compactado con Rodillo, de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) menciona que las cargas, estabilidad y tensiones admisibles de una presa de HCR, son diseñadas utilizando los mismos criterios y principios con los cuales se diseñan las presas de gravedad de hormigones convencionales. La idea principal del diseño de una presa de HCR es transferir todas las cargas estáticas y dinámicas a los cimientos mediante su propio peso y por lo general son diseñadas como estructuras bidimensionales en tensión plana. Actualmente, se utilizan softwares de elemento finito para respaldar los cálculos de estabilidad, especialmente para obtener la respuesta estructural frente a cargas sísmicas.

Cuando se trata de una presa de gravedad construida con hormigón compactado con

rodillo, se aplican principios similares. No obstante, es esencial tener en cuenta la posible redistribución de la carga lateral entre bloques adyacentes y el consiguiente impacto en la estabilidad tanto interna como global de la presa.

## **2.3. Hormigón Compactado con Rodillo**

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de factibilidad del uso del hormigón compactado con rodillo (HCR), como material para la construcción de las presas de dos proyectos. Es por esto que, antes de comenzar con el desarrollo de este mismo, se debe establecer una base sólida de entendimiento acerca de lo que es el HCR, por lo que a continuación en base a distintos documentos como: "Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo", de la ingeniera civil Luz Elena Santaella; el reporte ACI 207.5R-11 del Instituto Americano del Concreto, y el artículo "Nuevas Aplicaciones Hormigón Rodillado", del ingeniero Luis Pinilla Bañados, se explicarán y definirán las principales cualidades y características que presenta el HCR.

### **2.3.1. ¿Qué es el HCR?**

Santaella en su artículo dice que el hormigón compactado con rodillo se define como: "un hormigón de consistencia seca, asiento nulo, que se coloca de forma continua y su consolidación se realiza con un rodillo vibrante, es decir, un material cuya consistencia y dosificación difieren del hormigón convencional, y su manejo requiere también un procedimiento diferente al hormigón convencional". A su vez, el reporte ACI 207.5R-11 del Instituto Americano del Concreto define al HCR como: "concreto que, en su estado no endurecido, soportará un rodillo mientras se compacta".

Por las singularidades mencionadas, el HCR fue rápidamente aceptado para la construcción de presas, esto principalmente porque sus características permitían trabajarlo con maquinaria que usualmente se utiliza para los movimientos de tierras, lo cual reducía costos y tiempo de construcción en comparación con las presas de hormigón convencional.

El HCR ha demostrado ventajas económicas en la construcción de grandes presas gravitacionales, especialmente cuando se compara con presas de hormigón convencional. Además, esta competitividad económica sobre las presas de hormigón convencional, no solamente se presenta en la construcción de grandes presas, sino tal y como menciona Pinilla en su artículo, también se observan en la construcción de presas de menor tamaño. Por todo lo anterior, la utilización de HCR en la construcción de presas de gravedad es cada vez más común.

### **2.3.2. Nomenclaturas utilizadas alrededor del mundo**

Las nomenclaturas utilizadas alrededor del mundo para llamar al hormigón compactado con rodillo son:

- RCC (Roller Compacted Concrete)
- RDLC (Roller Dry Lean Concrete)

- RCD (Roller Compacted Dam)
- BCR (Beton Compacte au Rouleau)
- CCR (Concreto Compactado con Rodillo)
- HCR( Hormigón Compactado con Rodillo)

### 2.3.3. Historia del HCR

La técnica del hormigón compactado con rodillo emergió en los años 60 y como hemos mencionado, principalmente combinó las virtudes del hormigón convencional y los equipos utilizados en la construcción de presas de materiales sueltos. Inicialmente, se utilizó en la reparación de presas, como en la presa de enrocados de Shimen en Taiwan en 1960, y también en la construcción de ataguías. Debido a su gran éxito, la técnica se fue expandiendo alrededor del mundo durante los años 70 y 80, principalmente por ser una técnica eficiente y económica. Para los años 90, China, Estados Unidos y España, se habían convertido en los principales pioneros de esta técnica.

En el año 2012 en el Simposio Internacional Sobre Presas de Hormigón Compactado con Rodillo, se estimó que se habían construido más de 400 presas de HCR en más de 40 países distintos. China es el país que más presas de HCR ha construido con más de 110 presas de este tipo. A nivel nacional se han construido 3 presas de HCR, las cuales son: Pangué (finalizada en 1996), Ralco (finalizada en 2004) y Angostura (finalizada en 2010).

### 2.3.4. Características generales del HCR

Dentro de las características principales de las presas de HCR, podemos observar lo siguiente:

- **Composición:** Respecto a su composición, las mezclas de HCR se componen principalmente de áridos gruesos y finos, puzolanas, cemento Portland y agua, la dosificación variará dependiendo de los requerimientos de cada proyecto. El contenido de áridos de las mezclas corresponde en muchos casos al 80 % de la mezcla de HCR. Por lo general, el contenido cementicio de las mezclas suele oscilar entre los 60 kg/m<sup>3</sup> y 200 kg/m<sup>3</sup>. Los aditivos cumplen con la función de otorgar características especiales a las mezclas, como por ejemplo retardar el fraguado o controlar el calor de hidratación.
- **Resistencia:** Por lo general, las mezclas de HCR son capaces de alcanzar un rango muy variado de resistencias a la compresión. Existen mezclas que alcanzan compresiones desde 2 MPa hasta 40 MPa. La principal variable que determina las resistencias es la cantidad de contenido cementicio presente en la mezcla. Considerando lo anterior, las mezclas de HCR pueden alcanzar resistencias similares a las que alcanzarían las presas de hormigón convencional.
- **Economía:** La principal ventaja del HCR con respecto al hormigón convencional, se encuentra en el ahorro de costos de material y la eficiencia en la etapa de construcción. El HCR contiene aproximadamente un tercio del cemento de un hormigón convencional.

- **Método de Construcción:** El HCR se transporta desde las plantas de HCR definidas en las obras hacia el sitio de emplazamiento de la presa. Las presas de HCR se construyen en capas horizontales, con cada capa compactada antes de agregar la siguiente. Las capas se compactan con un rodillo vibratorio. Esto ayuda a garantizar la adecuada adherencia entre las capas y una resistencia uniforme en toda la estructura.
- **Tiempos de Construcción:** Las presas de HCR se distinguen principalmente por su rápida construcción en comparación con otro tipo de presas, esto debido principalmente al comportamiento del HCR lo que permite construir en muchas capas continuas, y a su vez debido a que tienen secciones tipo iguales a las presas de hormigón convencional, la cantidad de volumen total es mucho menor en comparación a otro tipo de presas.

## 2.4. Experiencias Nacionales

A continuación, se presentarán experiencias en Chile de la construcción de presas de HCR, considerando sus principales características, detalles y lecciones aprendidas de la utilización de esta tecnología. Dentro de las presas construidas con HCR en Chile encontramos las presas Pangué, Ralco y Angostura.



Figura 2.4: Presa Pangué, Fuente: Enel Chile



Figura 2.5: Presa Ralco, Fuente: Enel Chile



Figura 2.6: Presa Angostura, Fuente: Colbun

La información recopilada se encontró en los distintos estudios y bibliografía elaborada por el ingeniero civil Luis Uribe Crisostomo, quien desarrolló textos relacionados tanto de la construcción de la presa Pangué y Ralco, entre estos textos podemos mencionar: "Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas", donde se estudió la construcción de la presa Pangué y "Características del diseño y construcción de la presa Ralco en Chile", donde se estudió la construcción de la presa Ralco. También el ingeniero David Bosshart en conjunto con Uribe elaboraron el texto: "Challenging RCC dam construction on the Ralco project in Chile", en

donde también se presentó información de la construcción de la presa Ralco.

### **2.4.1. Presa Pangué**

La presa de la central Pangué representa un gran hito en la construcción de presas en Chile, ya que fue la primera en implementar la tecnología del hormigón compactado con rodillo en el país. Esta comenzó su etapa de construcción de obras en 1993 y finalizó en 1996. Está ubicada a 87 km al sudeste de la ciudad de Los Ángeles, en la Región del Biobío, en la confluencia de los ríos Pangué y Biobío. La central Pangué es la tercera central eléctrica que más energía aporta al país, con 456 MW. Considerando lo anterior, la Presa Pangué es un proyecto emblemático en la historia de la construcción de obras hidráulicas en Chile.

Como menciona Uribe, debido a la falta de experiencia en la construcción de presas de HCR en Chile, la empresa Ingendesa S.A encargada del desarrollo del proyecto, tuvo que realizar un gran número de ensayos de laboratorio para establecer una dosificación correcta de la mezcla de HCR que fuese capaz de alcanzar las resistencias requeridas en el diseño.

#### **2.4.1.1. Características Presa Pangué**

En los estudios de Uribe se expresa que la presa se fundó enteramente en roca, y alcanzó una altura de 120 m, a su vez la longitud de coronamiento fue de 470 m con un ancho de 8,5 m. El muro gravitacional en su geometría considera un talud vertical paramentos aguas arriba y con una inclinación 0,8:1 (H:V) en el paramento aguas abajo. Además, en el paramento aguas arriba se utilizó una pantalla de un metro de espesor de hormigón convencional. Finalmente, el volumen utilizado en la construcción de la presa fue de 710.000 m<sup>3</sup>.

#### **2.4.1.2. Consideraciones durante la construcción de la Presa Pangué**

Uribe en el estudio “Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas” menciona que para la elaboración de áridos de la presa Pangué se instaló una planta chancadora con capacidad promedio de 400 toneladas por hora para producir áridos utilizados en la mezcla de HCR para la presa. La planta produjo alrededor de 100,000 metros cúbicos de material mensualmente. A pesar de existir algunas averías y ajustes necesarios en la planta chancadora debido a la alta producción, no hubo interrupciones en la producción de HCR debido a la falta de áridos, excepto en el caso de la arena fina. La extracción de la arena fina del yacimiento fue complicada debido a su ubicación en estratos profundos.

Uribe también dice que hubo problemas en la gestión de los materiales en los acopios debido principalmente a la falta de espacio físico para almacenar el material producido. Debido a lo anterior se formaron acopios muy altos, lo que produjo problemas de segregación en las laderas de los acopios de materiales gruesos. También el excesivo tránsito de camiones y bulldozers sobre los acopios provocó fracturas en los materiales. El hecho que los camiones tolva descargaran material desde los bordes de los taludes también generó problemas de segregación. Para evitar lo anterior se propuso homogeneizar los acopios y reducir la pendiente de los taludes de las pilas.

La segregación de los áridos en los acopios dio origen a importantes variaciones granulométricas, esto originó un HCR con mayor porcentaje de áridos gruesos y que agravaba los problemas de segregación de la mezcla de hormigón.

Con respecto al método de transporte del HCR, este se realizó inicialmente en camiones tolva, en los cuales se experimentó segregación debido a distintos factores, entre ellos la baja producción en la planta de hormigón, la carga inadecuada en las tolvas, y tiempos de transporte demasiado largos que afectaron la trabajabilidad Vebe. Con la utilización de cintas transportadoras se minimizó la segregación, pero problemas de mantenimiento en esta también afectaron el rendimiento. Se recomienda para futuros proyectos controlar la trabajabilidad Vebe.

Dentro de las lecciones que dejó la construcción de la presa Pangué se destaca que la continuidad en la producción y colocación de HCR es vital para evitar los problemas de segregación. Para prevenirlos, es clave construir acopios de áridos de la manera correcta, implementar planes de abastecimiento eficientes y realizar un correcto mantenimiento de los distintos equipos que participan en el funcionamiento de las plantas y obra. Finalmente, las cintas transportadoras se prefieren por encima de los camiones tolva, ya que son más adaptables, veloces y mejoran la eficiencia en la colocación de las capas de HCR.

#### **2.4.1.3. Rendimientos de colocación Pangué**

En la figura 2.7 podemos observar los rendimientos de colocación de HCR en la construcción de la presa Pangué, en los meses iniciales de enero y febrero se utilizaron solamente camiones para el transporte del HCR, mientras que en el resto de meses se utilizaron cintas transportadoras.

Mes	Capas #	Total m <sup>3</sup> Mensuales	Máximo diario m <sup>3</sup>	Promedio diario m <sup>3</sup>	Equipos de colocación
Enero (5-31)	1-41	18.721	1.899	750 *	Camiones/Swinger
Febrero (1-25)	41-73	<b>36.452</b>	<b>2.040</b>	<b>1.640 *</b>	Solo camiones

Mes	Capas #	Total m <sup>3</sup> mensuales	Máximo Diario m <sup>3</sup>	Promedio mensual m <sup>3</sup>	Equipos de colocación
Marzo (1-31)	73-93	35.105	2.627	1.280 *	Crawler Placer
Abril (1-30)	93-125	56.180	<b>4.090</b>	1.873 *	Crawler Placer
Mayo (1-27)	125-156	70.989	3.727	2.629 *	Crawler Placer
Junio (7-30)	156-172	36.008	3.315	2.120 *	Crawler Placer
Julio (1-31)	172-188	35.969	3.565	2.060 *	Crawler Placer
Agosto (1-24)	188-201	34.086	3.088	1.827 *	Tripper/C. Placer
Septiembre (1-30)	201-224	65.243	3.730	2.373 *	Tripper/C. Placer
Octubre (1-31)	224-253	72.559	4.542	2.341 *	Tripper/C. Placer
Noviembre (1-30)	253-294	<b>95.018</b>	<b>4.758</b>	<b>3.250 *</b>	Tripper/C. Placer
Diciembre (1-31)	294-320	32.657	4.400	1.347 *	Tripper/C. Placer
Enero M.D	320-361	12.540	754	590 *	Camiones/Swinger
Enero M.I	306-336	34.681	1.957	1.639 *	C. Placer/Camiones
Febrero M.D	361-404	6.701	540	194	Camiones/Swinger
Febrero M.I	336-370	19.111	1.106	992 *	C. Placer/Camiones
Marzo M.I (1-27)	370-404	20.220	1.175	769 *	C. Placer/Camiones

\*Días completos. Se ignoran los días en los que se colocó menos de 500 m<sup>3</sup> de HCR.

Figura 2.7: Rendimientos de colocación de HCR, Fuente: Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas, Luis Uribe

En los meses de mayor disposición del HCR se alcanzaron tasas de colocación de hasta 95.018 m<sup>3</sup> mensuales, es importante destacar que la presa Pangué se construyó en condiciones extremas, porque en muchos meses de invierno llovió y nevó, lo que originó bastantes problemas, debido a esto mismo se abordaron distintas técnicas para permitir la colocación de capas de HCR en condiciones complejas.

## 2.4.2. Presa Ralco

La presa de la central Ralco fue la segunda en implementar la tecnología del hormigón compactado con rodillo en el país. Esta comenzó su etapa de construcción de obras en 1998 y finalizó en 2004. Está ubicada en la comuna de Alto Biobío, a 120 km al este de la ciudad de Los Ángeles, en la Región del Biobío, en la cuenca del río Biobío. Además, es la central eléctrica que más aporta energía en el país con 690 MW.

#### **2.4.2.1. Características Presa Ralco**

En los estudios de Uribe y Bosshart, se expresa que la presa se fundó enteramente en roca, y alcanzó una altura de 155 m, a su vez la longitud de coronamiento fue de 360 m con un ancho de 8,5 m. El muro gravitacional en su geometría considera un talud vertical paramentos aguas arriba y con una inclinación 0,8:1 (H:V) en el paramento aguas abajo. Finalmente, el volumen utilizado en la construcción de la presa fue de 1.500.000 m<sup>3</sup>.

#### **2.4.2.2. Consideraciones durante la construcción de la Presa Ralco**

La presa Ralco es una de las presas de HCR más grandes y altas del mundo y se construyó en condiciones climáticas extremas, por lo que fue un gran desafío construirla. Demandó tasas muy elevadas de colocación de HCR, y se tuvo que disponer de sistemas eficientes y confiables para la producción de materiales. En su momento peak se alcanzaron tasas diarias de producción de áridos de 9.600 toneladas y 760 toneladas de cemento.

Para el suministro de áridos se utilizaron yacimientos fluviales cercanos a la obra, los cuales fueron tratados en tres plantas de áridos, con una producción teórica de 300 toneladas por hora. Las plantas de áridos estaban equipadas por máquinas chancadoras primarias, secundarias, harneros para el lavado y la separación de los tamaños de los áridos, como también un clasificador de arena.

Con respecto al sistema de transporte del HCR, estos fueron muy complejos debido a la topografía del lugar, especialmente entre las plantas de hormigón y el emplazamiento de la presa. Se decidió utilizar un sistema de cintas transportadoras de alta velocidad. Debido a las condiciones del terreno, fue necesario construir un túnel para ubicar un tramo de la cinta transportadora.

El sitio del proyecto enfrentó condiciones climáticas extremas, con 140 días de lluvias intensas y temperaturas muy variadas de entre -5,9°C y 36,4°C, en donde en 115 días hubo temperaturas bajo cero y en 130 superiores a 25°C. Para enfrentar estas condiciones de trabajo, dependiendo de las condiciones climáticas del día, se adoptaron las siguientes medidas. Para bajas temperaturas se consideró el calentamiento del agua de amasado y el uso de mantas térmicas, mientras que, en los casos de temperaturas superiores a 25°C, se redujo la temperatura mediante riego y se ajustó la trabajabilidad del HCR, a pesar de esto cuando las condiciones fueron muy extremas no se detuvo la colocación de HCR (esto ocurrió durante 40 días aproximadamente).

#### **2.4.2.3. Rendimientos de colocación Ralco**

En su momento la construcción de la presa Ralco alcanzó el récord mundial de colocación de HCR. El rendimiento máximo de colocación de HCR fue de 7.793 m<sup>3</sup> diarios y 145.215 m<sup>3</sup> mensuales, además durante el peak de la construcción se alcanzaron rendimientos promedios de HCR de hasta 132.380 m<sup>3</sup>. Por lo que la presa Ralco fue concluida no solo con óptimos niveles de calidad sino también con muy altos rendimientos de colocación.

### **2.4.3. Presa Angostura**

La presa de la central Angostura fue la tercera en implementar la tecnología del hormigón compactado con rodillo en el país. Está ubicada a 63 kilómetros de la ciudad de Los Ángeles y utiliza las aguas del río Huequecura y del río Biobío para la generación de energía eléctrica. Comenzó con la construcción de sus obras en el año 2004, y se inauguró en el 2014.

#### **2.4.3.1. Características Presa Angostura**

La presa de Angostura tiene una longitud de 160 m y 10 m de ancho en su coronamiento con una altura máxima 63 metros. La presa se construyó con la función de disponer el evacuador de crecidas en el cuerpo de esta, ya que para cerrar el valle por la ribera sur se construyó un pretil de gravas compactadas CFRD.

## **2.5. Posibles problemas de disponibilidad en los yacimientos del embalse La Tranca**

En el trabajo realizado por el ingeniero Camilo Ponce Castro, se determinó que los yacimientos disponibles para el embalse La Tranca podrían no contener la cantidad necesaria de relleno para construir la presa CFRD con los requerimientos pedidos. En este trabajo se expresa que la cantidad de material disponible en el caso más optimista sería alrededor del 50 % de la cantidad total necesario.

En caso de existir este problema, beneficiaría la posible elección de una presa de HCR para el embalse La Tranca.

# Capítulo 3

## Recopilación y Análisis Antecedentes Previos MN Ingenieros

En el presente capítulo se presentan y revisan los principales antecedentes y estudios existentes de los proyectos Embalse La Tranca y Embalse Murallas Viejas, esto con el fin de obtener las principales características de los embalses tales como, su ubicación, altura y volumen de almacenamiento. Así como también las características de los sitios de emplazamiento de las presas, para de esta manera obtener la geología y geotécnica del lugar, las cuales son claves al momento de emplazar una presa de HCR, y también los yacimientos cercanos con material de empréstito disponible. Estos antecedentes corresponden a los estudios de Factibilidad elaborados por la consultora MN Ingenieros entre los años 2009 y 2011.

### 3.1. Proyecto Embalse La Tranca

El proyecto de embalse La Tranca está dirigido mayormente a gestionar los recursos hídricos del río Cogotí, esto principalmente para mejorar las condiciones del riego en la zona y también respaldar los sistemas de agua potable rural (APRs) del lugar. Es por esto que La Dirección de Obras Hidráulicas, teniendo en cuenta los escasos recursos hídricos del río Cogotí (caudal medio anual 2,43 m<sup>3</sup>/s) y las fuertes pérdidas en la red de canales de la zona (debido a que estos no están revestidos), tiene contemplado una obra como el embalse La Tranca.

#### 3.1.1. Ubicación Embalse La Tranca

El proyecto de embalse La Tranca se ubicará en el río Cogotí, en la comuna de Combarbalá en la Región de Coquimbo, tal como se aprecia en la figura 3.1

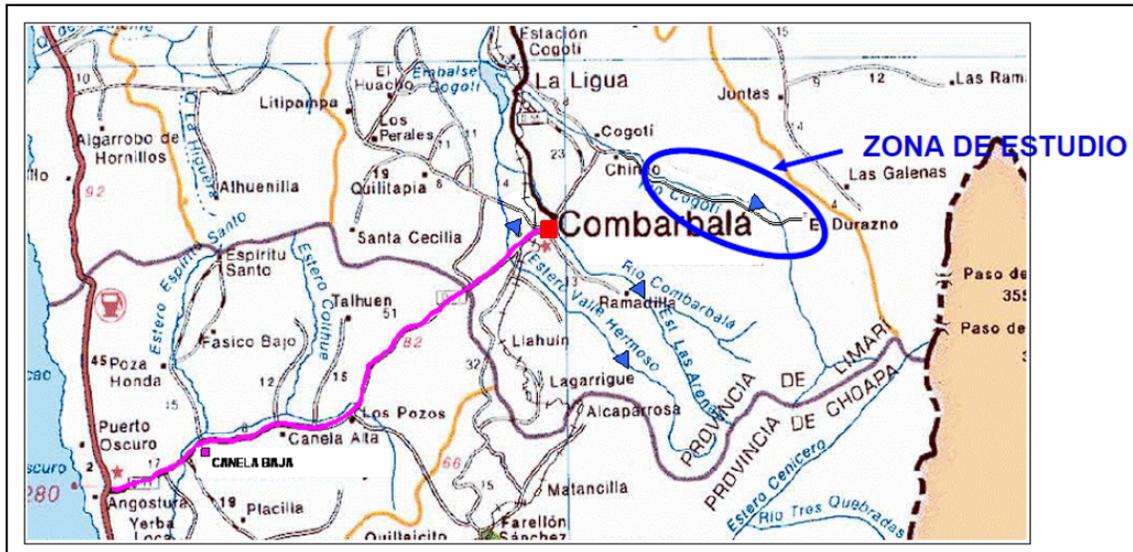


Figura 3.1: Ubicación general La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros

### 3.1.2. Alternativas sitio de emplazamiento de la Presa

Para la selección del sitio de emplazamiento de la presa, la consultora analizó 5 alternativas, las cuales fueron:

- **Sitio La Tranca I** : Este sitio se ubica en el río Cogotí, aproximadamente a 14 km aguas arriba del poblado que lleva el mismo nombre, y su eje se emplaza directamente aguas abajo de la quebrada Quillayes. Dentro de las ventajas que presenta este sitio se encuentra que se observa roca sana en su apoyo izquierdo, y que tiene una garganta muy angosta y aguas arriba se abre inmediatamente, lo que implica una muy buena relación volumen embalsado/ volumen de muro. Además, se estima que la roca basal se encuentra a 8 metros del fondo del valle.
- **Sitio La Tranca II**: Este sitio se ubica a 80 metros del Sitio la Tranca I y presenta características similares al Sitio La Tranca I, roca sana en su apoyo izquierdo y una garganta muy angosta, así como también una muy buena relación volumen embalsado/ volumen de muro.
- **Sitio La Fraguüita**: Este sitio se ubica en el río Cogotí, a 10 km aproximadamente aguas arriba del poblado que lleva el mismo nombre y se emplaza exactamente donde nace el canal la Fraguüita. Dentro de las ventajas que presenta este sitio se encuentra que la roca en ambas laderas se encuentra sana, pero cubierta con depósitos de escombros de falda con espesores variables, además la roca basal está cubierta por una capa de depósitos fluviales de alrededor de 30 metros, lo cual implicaría un costo mayor para impermeabilizar el suelo.
- **Sitio El Pedregal**: Este sitio se ubica en el río Cogotí aproximadamente a 18 km aguas arriba del sitio La Tranca I. Dentro de las ventajas de este sitio se observa que presenta roca sana en ambas laderas, pero se estima que la roca basal en el valle está cubierta por una capa de depósitos fluviales de entre 20 y 30 metros, lo cual también implicaría un costo mayor para impermeabilizar el suelo.

- **Sitio La Crucita:** Este sitio, al igual que el sitio El Pedregal se ubica a 18 km aguas arriba del sitio La Tranca I. Dentro de las ventajas de este sitio se encuentra que la roca en ambas laderas se presenta sana y firme, pero la roca basal se estima cubierta por una capa depósitos fluviales de 25 metros, y considerando su ancho a nivel de lecho de 80 metros, implicaría costos mayores para impermeabilizar el suelo.

En la figura 3.2 se presenta un plano geológico con la ubicación de cada uno de los sitios, en este se puede apreciar las principales unidades geológicas regionales que se presentan en el sector, entre estas encontramos la Formación Quebrada Marquesa Kqm, la Formación Salamanca Kv y la Superunidad Cogotí.



Figura 3.2: Ubicación en plano geológico alternativa de sitios, Fuente: E.F MN Ingenieros

Finalmente, la consultora decidió que el mejor sitio correspondía al sitio La Tranca I, ya que este presenta favorables características geológicas y geotécnicas para la construcción de obras de desvío, también dado las características del lugar se puede fundar de manera directa la presa a la roca basal sin la necesidad de excavar volúmenes masivos, además la morfología del lugar permite un muro de poca longitud y no se requiere impermeabilizar los suelos bajo la fundación.

### 3.1.3. Estudio Geotécnico Sitio La Tranca 1

El sitio La Tranca 1 tiene las siguientes coordenadas estándar UTM aproximadas: Zona 19, hemisferio sur, 322363,24 E, 6555965,24 S. Se puede apreciar en la figura 3.3



Figura 3.3: Ubicación Sitio La Tranca 1, Fuente: Elaboración propia Google Earth

Para realizar el estudio geotécnico del lugar se realizaron prospecciones con sondajes a diamantina con recuperación continua de testigos y perfiles de refracción sísmica, estos se ubicaron a nivel de lecho por la ribera derecha e izquierda, y también en la cima de ambos apoyos.

En el lugar se pueden encontrar rocas intrusivas de composición granítica a granodiorita las cuales están asociadas a la Unidad Fredes de la Super Unidad Cogotí.

Desde la perspectiva geotécnica, la roca se presenta sana en superficie a lo largo de todo el apoyo derecho, y en gran parte del apoyo izquierdo. Con respecto al apoyo izquierdo, este en sus zonas superiores presenta meteorización superficial del tipo orbicular y presencia de bloques de 1 a 2 m de diámetro, pero esta mejora en profundidad, según señalan los sondajes y afloramientos. El apoyo derecho está formado por un farellón granítico de fuerte pendiente que, en estudios previos, generó sospechas de ser originado por un deslizamiento en bloque, mediante prospecciones fue posible descartar esto, por lo tanto, el sitio presenta muy buenas características geotécnicas para emplazar la presa acá.

Las prospecciones que se realizaron en el sitio lograron concluir que en el apoyo izquierdo se observan depósitos de escombros de falda con presencia de maicillo producto de la meteorización de la roca granítica, y que una pequeña parte de estos emergen de las excavaciones de corte del camino que se emplaza en el lugar. Estos depósitos de la ladera izquierda tienen un espesor de unos 4 a 5 metros, según lo analizado en las prospecciones.

Con respecto al fondo del valle, este presenta rellenos aluviales mezclados con materiales deslizados desde las laderas, los cuales tendrían un espesor de 8 a 10 metros, según lo analizado en las prospecciones. El ancho del valle a nivel de lecho es de unos 20 m por lo que eventualmente los volúmenes a remover no son masivos.

### 3.1.4. Anteproyecto Presa CFRD

La consultora determinó que es conveniente realizar una presa tipo CFRD de gravas compactadas con pantalla de hormigón.

#### 3.1.4.1. Presa CFRD La Tranca

El muro gravitacional en su geometría considera un paramento aguas arriba 1,5/1 (H:V) y aguas abajo 1,6/1 (H:V). El coronamiento es de 8 m, lo que se consigue colocando un muro parapeto de 5 m de altura aguas arriba dejándolo vertical en su tramo superior. Se estima que los rellenos para la presa son 4,3 millones de m<sup>3</sup>. En la figura 3.4 se puede apreciar la sección transversal de la presa diseñada por MN Ingenieros, mientras que en la figura 3.5 se puede apreciar una vista en planta de esta misma.

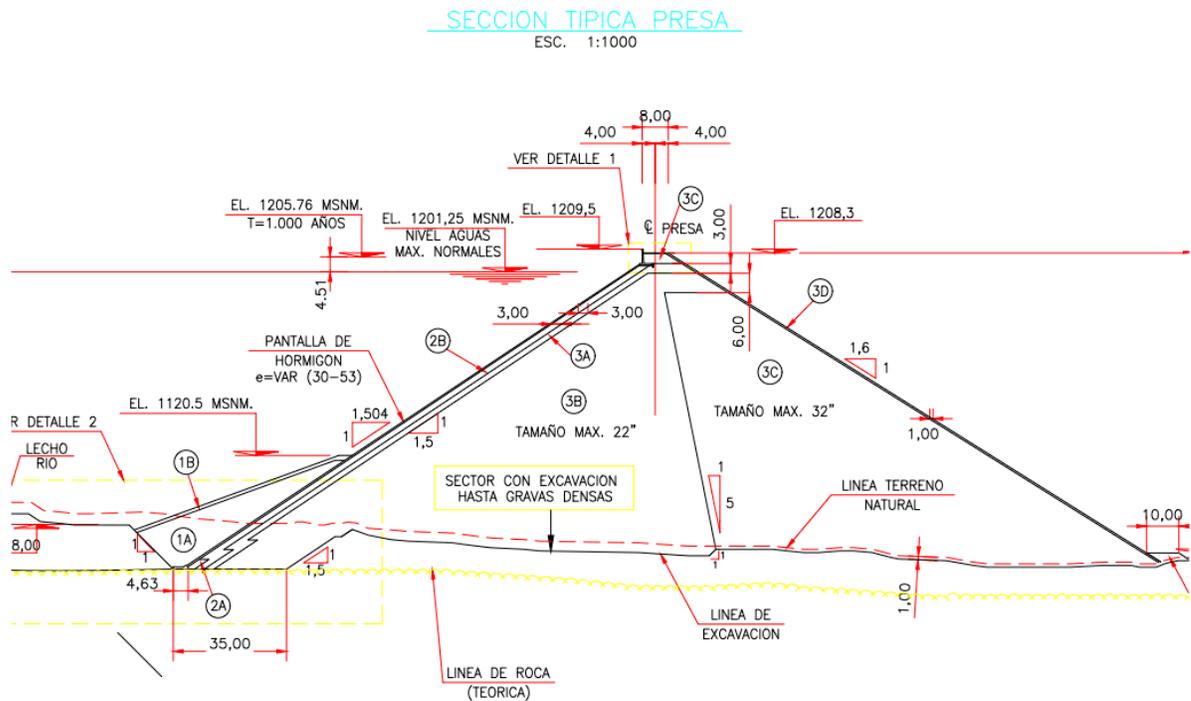


Figura 3.4: Sección Típica Presa CFRD La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros

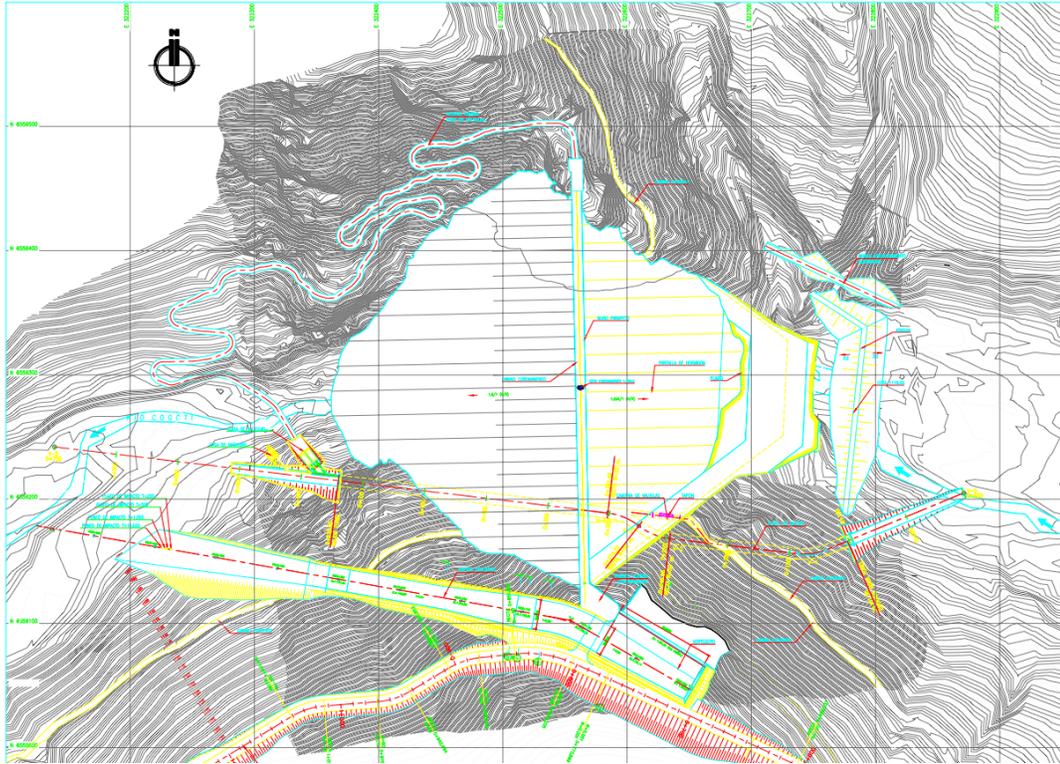


Figura 3.5: Planta Presa CFRD La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros

Los rellenos de la presa CFRD fueron estimados en 8 tipos, estos fueron denominados 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 3C y 3D y se pueden observar en la figura 3.4. A continuación, se presenta la descripción de cada uno:

- **Relleno 1A:** Estos rellenos se dispondrán inmediatamente aguas arriba de la pantalla de hormigón, y estarán compuestos por arenas limosas o limos arenosos, no cohesivos. Se dispondrán en capas de 0,3 m.
- **Relleno 1B:** Estos rellenos deberán proteger los rellenos 1A. Esta zona se dispondrá inmediatamente aguas arriba de la pantalla de hormigón, y estarán compuestos por gravas menores a 9". Se dispondrán en capas de 0,3 m.
- **Relleno 2A:** Estará compuesto por gravas arenosas menores a 1 ½" y 5% menor o igual a la malla 200. Se dispondrán en capas de 0,3 m.
- **Relleno 2B:** Estos rellenos servirán de apoyo de la pantalla de hormigón, y estarán compuestos por gravas menores a 3" con un 4 a 14% menor o igual a la malla 200. Se dispondrán en capas de 0,3 m.
- **Relleno 3A:** Estos rellenos se dispondrán entre los rellenos 2B y 3B, y estarán compuestos por gravas menores a 9". Se dispondrán en capas de 0,3 m.
- **Relleno 3B:** Estos rellenos conformarán gran parte de la presa, y estarán compuestos por gravas menores a 20" (sin procesamiento). Se dispondrán en capas de 0,6 m.
- **Relleno 3C:** Estos rellenos también constituirán una parte importante de la presa, y estarán compuestos por gravas y rocas menores a 24". Se dispondrán en capas de 0,9 m.

- **Relleno 3D:** Estos rellenos cubrirán el talud de aguas abajo, y estarán compuestos por gravas y bolones de rechazo mayores a 3” y menores a 12”. Se dispondrán en capas de 0,9 m.

Las coordenadas del eje de emplazamiento se presentan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Coordenadas Eje de emplazamiento La Tranca, MN Ingenieros

Vértices	Coordenada Este	Coordenada Norte	Zona
Inicio	322.554 E	6.556.448 S	19 J
Final	322.565 E	6.556.132 S	19 J

La cota de coronamiento de la presa se encuentra a 1209,5 m.s.n.m. Respecto al tamaño de embalse, la consultora estimó que el óptimo, en donde el VAN se hace máximo, corresponde a un tamaño de 46 hm<sup>3</sup>, lo que implicaría una cota de coronamiento de 1207,5 m.s.n.m. A pesar de esto, debido a la baja sensibilidad del modelo hidrológico que se utilizó para realizar el estudio, se puede concluir que realizar un embalse de 50 hm<sup>3</sup> es factible y se encuentra en el rango de inflexión donde el VAN se hace máximo, por lo tanto, la consultora estimó que la mejor alternativa es realizar el proyecto asociado a un tamaño de 50 hm<sup>3</sup>.

Tabla 3.2: Características Embalse La Tranca, mejor alternativa

Cota coronamiento	Volumen Embalsado
1209,5 [m.s.n.m]	50 [hm <sup>3</sup> ]

### 3.1.4.2. Evacuador de Crecidas La Tranca

MN Ingenieros determino que el evacuador de crecidas del embalse correspondería a un vertedero lateral de 80 m de largo con perfil tipo USBR, con canal colector y rápido de descarga. Este sistema se decidió emplazar en la ladera izquierda del embalse, en la figura 3.6 se puede apreciar este.

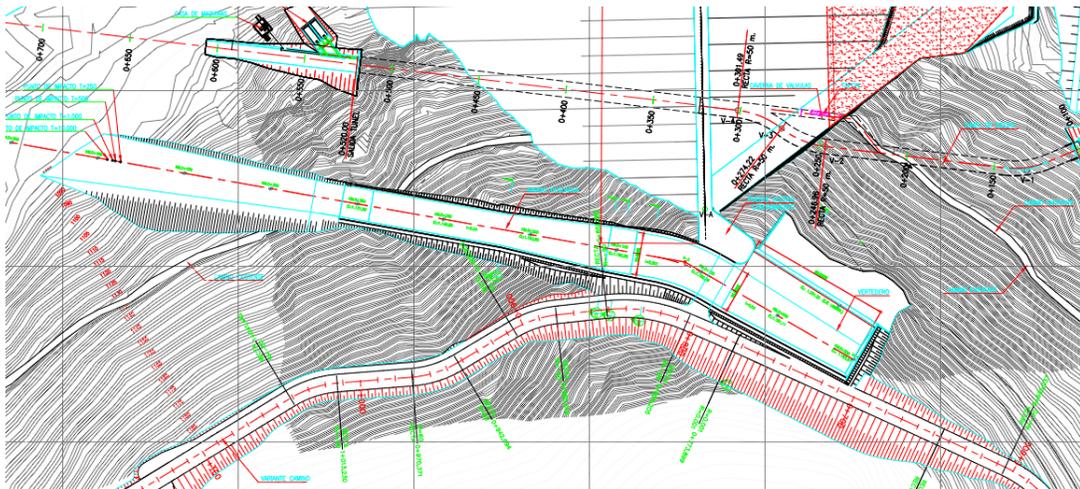


Figura 3.6: Vertedero Presa CFRD La Tranca, Fuente: E.F MN Ingenieros

### 3.1.5. Yacimientos

La consultora también determinó que la zona de yacimientos se ubica, en su gran mayoría, en la zona de inundación del embalse, a lo largo de la terraza aluvial que cubre el fondo del valle del río Cogotí, entre el denominado sitio La Tranca I y el puente El Durazno, ubicado aproximadamente a 5 km del sitio. La cercanía entre el sitio de la presa y los depósitos de empréstitos son muy favorables para el proyecto debido a que la distancia entre estos es mínima. En la figura 3.7 se puede observar la distancia entre el sitio de emplazamiento y el puente El Durazno. En caso de no alcanzarse se deberían explotar el sector de El Pedregal, el cual está a 10 km de la presa.



Figura 3.7: Zona de yacimientos

Los depósitos de empréstitos están compuestos principalmente por dos capas de sedimentos fluviales. La primera en su mayoría bolones y gravas redondeadas a subredondeadas de tamaño medio a chico, en una matriz arenosa con algo de limo, cuyo espesor es de alrededor de 3,50 m, que corresponden a la depositación más moderna del río Cogotí. La segunda capa corresponde a sedimentos compuestos por una alta proporción de bolones gruesos, envueltos en una matriz areno-limosa con arcilla.

Según los cálculos hechos por la consultora, se estima que estos sedimentos podrían llegar a ser de unos 3,6 millones de m<sup>3</sup>.

## 3.2. Proyecto Embalse Murallas Viejas

El proyecto de embalse Murallas Viejas está dirigido principalmente a gestionar los recursos hídricos del río Combarbalá, en su mayoría para mejorar las condiciones de riego en la zona y también respaldar los sistemas de agua potable rural (APRs) del lugar. Debido a esto, la

Dirección de Obras Hidráulicas, teniendo en cuenta los muy escasos recursos hídricos del río Combarbalá (caudal medio anual de 1,01 m<sup>3</sup>/s) tiene contemplado una obra como el embalse Murallas Viejas.

### 3.2.1. Ubicación Embalse Murallas Viejas

El proyecto de embalse Murallas Viejas se ubicará en el río Combarbalá en la comuna de Combarbalá en la Región de Coquimbo, tal como se aprecia en la figura 3.8.

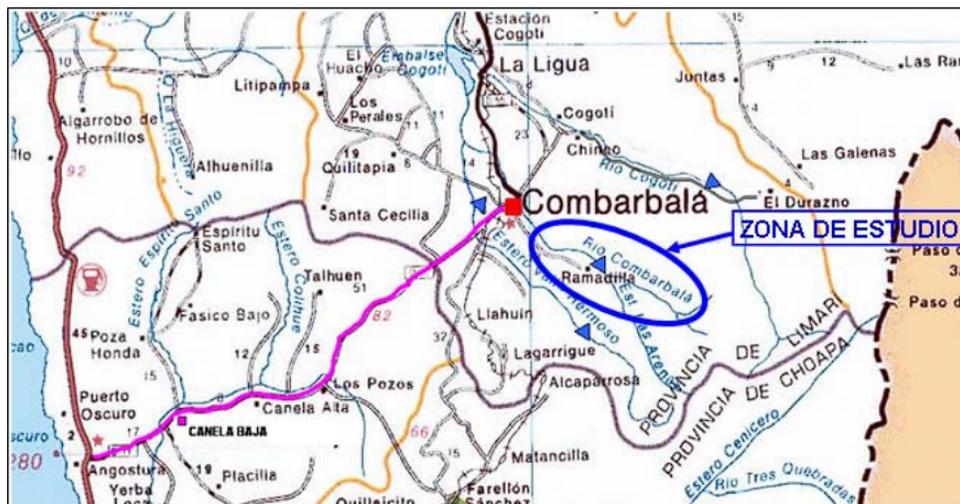


Figura 3.8: Ubicación general Murallas Viejas, Fuente: E.F MN Ingenieros

### 3.2.2. Alternativas sitio de emplazamiento de la Presa

Para la selección del sitio de emplazamiento de la presa, la consultora analizó dos zonas con un total de siete alternativas. La primera zona, denominada sector alto del valle, abarca sitios ubicados aproximadamente entre 12 y 15 kilómetros de la ciudad de Combarbalá. Estos sitios se extienden desde el nacimiento del río Combarbalá hasta la quebrada El Peñón y presentan pendientes fuertes. La segunda zona, denominada como sector bajo del valle, se encuentra en el sector del cerro Ramadilla, entre 5 y 7 kilómetros de la ciudad de Combarbalá, y posee pendientes más suaves.

La consultora estudió los siguientes sitios del sector alto: El Quillay, Reventazón, El Peñón I y El Peñón II. En cuanto al sector bajo, se evaluaron los sitios de La Totorá, Murallas Viejas y La Capilla. Las características de cada uno de ellos se presentan a continuación:

- **Sitio El Quillay:** Este sitio se ubica en la cabecera del valle, a 14,5 km de la ciudad de Combarbalá. Dentro de las ventajas de este sitio se encuentra su buena relación volumen embalsado / volumen de muro, y que también se encuentra aguas arriba del área de riego del valle. A pesar de esto, se estima una cobertura de 30 m en el sitio, lo cual implicaría altos costos al momento de impermeabilizar la presa.
- **Sitio Reventazón:** Este sitio se ubica a 12,4 km de la ciudad de Combarbalá, aguas abajo de la quebrada Honda, a 1.5 km del emplazamiento anterior. Dentro de sus ventajas se encuentra que tiene una garganta estrecha, lo cual es favorable al momento de

emplazar una presa. Además, otra ventaja es que se encuentra aguas arriba del área de riego del valle. Con respecto a la roca basal, esta presenta un problema muy grande respecto a su apoyo derecho, ya que podría encontrarse a 50 metros de profundidad.

- **Sitio El Peñón I:** Este sitio se ubica aguas arriba de la quebrada del mismo nombre, a 12,0 km de la ciudad de Combarbalá. Este sitio es el menos atractivo, ya que debido su baja pendiente y vaso angosto, tiene la relación volumen embalsado / volumen de muro más baja de todos los sitios estudiados.
- **Sitio El Peñón II:** Este sitio se ubica aguas abajo de la quebrada El Peñón, a 11,8 km de la ciudad de Combarbalá. Al igual que el sitio anterior, este no es atractivo, ya que tiene una mala relación volumen embalsado / volumen de muro en comparación con los demás sitios estudiados.
- **Sitio La Totorá:** Este sitio se ubica en el sector bajo del valle, a 7,5 km de la ciudad de Combarbalá. Este sitio presenta una gran desventaja para los agricultores debido a que se encuentra en el sector bajo del valle, por lo que muchos canales del lugar se ven afectados, ya que se encuentran aguas arriba del sitio.
- **Sitio Murallas Viejas:** Se ubica aguas abajo de La Totorá a unos 500 m y se encuentra a 6,7 km de la ciudad de Combarbalá. Este sitio presenta una muy buena relación entre el volumen embalsado y el volumen de muro, además de contar con condiciones geológicas favorables, ya que se aprecia roca sana en el fondo del valle. Sin embargo, al igual que el sitio anterior, presenta una desventaja, ya que muchos canales del sector aguas arriba no se verán beneficiados y su emplazamiento implicaría el traslado de varias familias que actualmente residen en la ribera derecha del valle, las cuales quedarían por debajo de la cota de inundación. Además, se verían afectadas las plantaciones de cítricos, parronales y paltos existentes en la cola del embalse.
- **Sitio La Capilla:** Este sitio se ubica en el sector bajo del valle, a 4,8 km de la ciudad de Combarbalá. Dentro de las ventajas de este sitio está que su relación entre el volumen embalsado y el volumen de muro es la mejor de todos los sitios estudiados, pero al igual que los sitios del sector bajo del valle presenta el problema con los canales que se encuentren aguas arriba del embalse.

En la figura 3.9 se presenta la ubicación de cada uno de los sitios

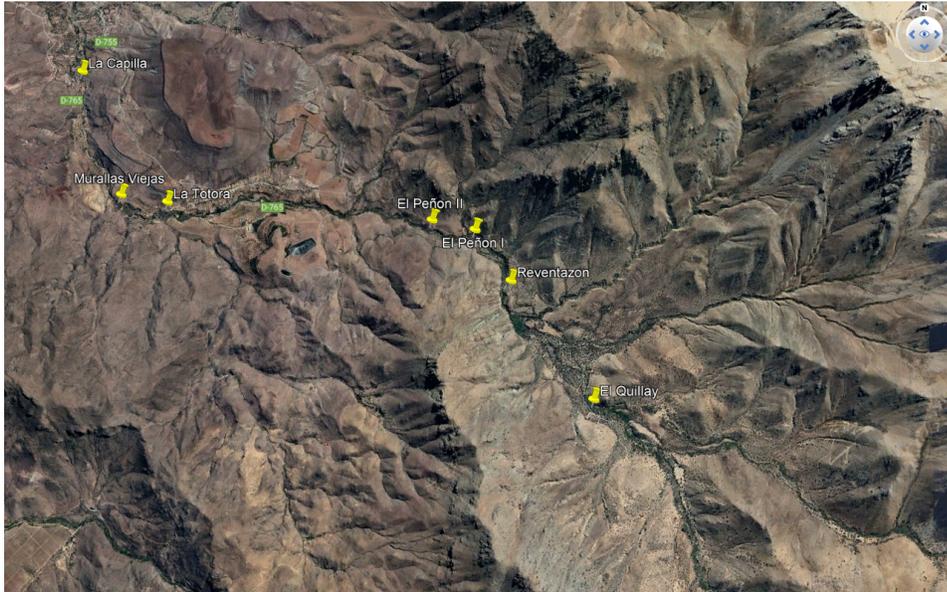


Figura 3.9: Ubicación de los Sitios para el embalse Murallas Viejas, Fuente: Google Earth

Finalmente la consultora decidió que el mejor sitio correspondía al sitio El Quillay, si bien el Sitio La Capilla presenta muy buenas características geotécnicas, este se encuentra en la parte baja del valle, lo que permitiría regular solo una parte de los caudales de la zona. Por esta razón, la consultora escogió el sitio el Quillay, ya que este se encuentra en la cabecera del valle, y permitiría regular todos los recursos hídricos del sector.

### 3.2.3. Estudio Geotécnico Sitio El Quillay

El sitio El Quillay presenta las siguientes coordenadas estándar UTM aproximadas: Zona 19, Hemisferio Sur, 319641,04 E, 6540794,03 S. Se puede apreciar en la figura 3.10



Figura 3.10: Ubicación Sitio El Quillay, Fuente: Elaboración propia Google Earth

Para realizar el estudio geotécnico del lugar se realizaron prospecciones con sondajes que se ejecutaron con una sonda de rotación con recuperación continua de testigo, esta recuperación se hizo con un muestreador tipo barril triple, lo que facilitó realizar el muestreo de manera continua. Debido a que en las laderas la roca era visible y a simple vista de muy buena calidad, la consultora MN no realizó prospecciones en estas. A diferencia de las laderas en el fondo del valle se visualizó una cobertura espesa de suelos, por lo que acá se realizaron los distintos sondajes.

Desde la perspectiva geotécnica la roca de las laderas se encuentra sana y corresponde a granitos de muy buena calidad, con muy escasa meteorización superficial. Con respecto al fondo del valle se encontraron depósitos fluviales los cuales tienen un espesor de 30 metros y tendrán que ser removidos. En la ribera derecha se observan dos fallas que deberán ser tratadas especialmente, las prospecciones realizadas lograron determinar que la roca en el fondo del valle presenta permeabilidades medias y de calidad geotécnica aceptable, por lo que pueden tratadas con inyecciones.

### 3.2.4. Anteproyecto Presa

La consultora determinó para el embalse Murallas Viejas que, al igual que en el embalse La Tranca, es conveniente realizar una presa tipo CFRD de gravas compactadas con pantalla de hormigón.

#### 3.2.4.1. Presa CFRD Murallas Viejas

El muro gravitacional en su geometría considera un paramento aguas arriba 1,5/1 (H:V) y aguas abajo 1,6/1 (H:V). El coronamiento es de 8 m, lo que se consigue colocando un muro parapeto de 5 m de altura aguas arriba, y el diseño contempla una altura de 109 metros para

la presa. Se estima que los rellenos de la presa son de 5,5 millones de m<sup>3</sup>. En la figura 3.11 se puede apreciar la sección transversal de la presa diseñada por MN Ingenieros, mientras que en la figura 3.12 se puede apreciar una vista en planta de esta misma.

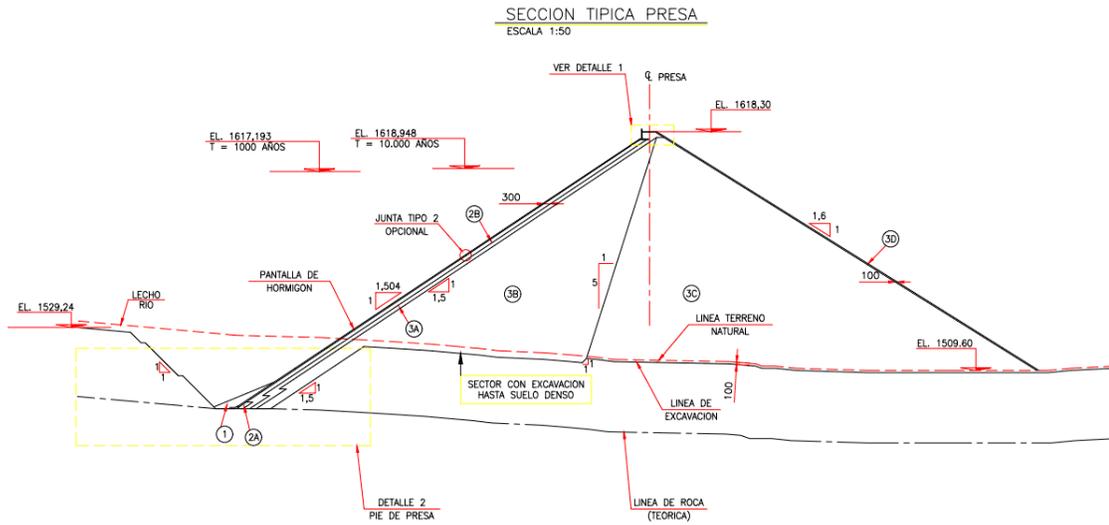


Figura 3.11: Sección Típica Presa CFRD Murallas Viejas, Fuente: E.F MN Ingenieros

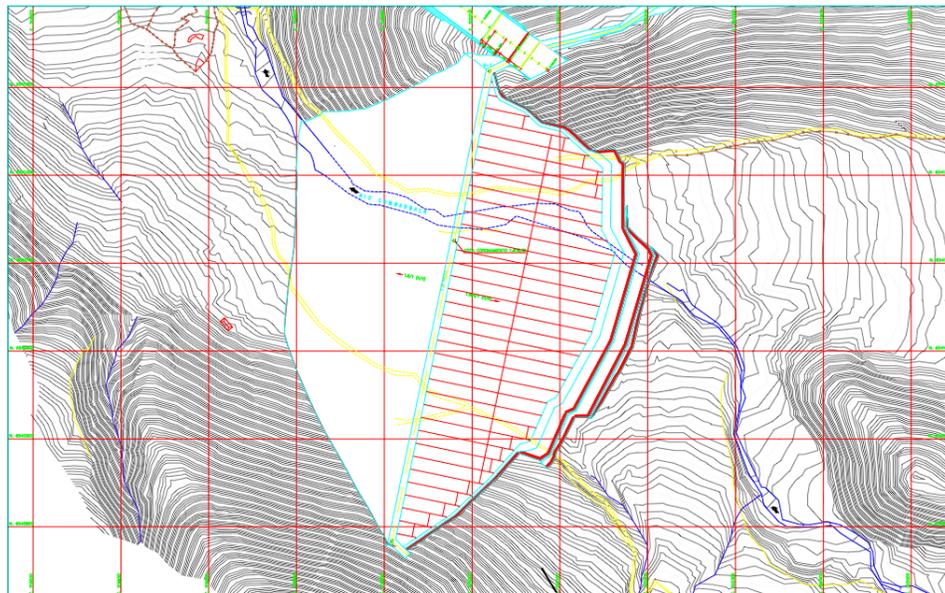


Figura 3.12: Planta Presa CFRD Murallas Viejas, Fuente: E.F MN ingenieros

Los rellenos de la presa CFRD fueron estimados en 7 tipos, estos fueron denominados 1, 2A, 2B, 3A, 3B, 3C y 3D estos se pueden observar en la 3.11. A continuación se presenta la descripción de cada uno:

- **Relleno 1:** Estos rellenos corresponden a finos no cohesivos sin compactación. .

- **Relleno 2A:** Estará compuesto por gravas arenosas menores a  $1\frac{1}{2}$ " y 5 % menor o igual a la malla 200. Se dispondrán en capas de 0,4 m.
- **Relleno 2B:** Estos rellenos servirán de apoyo de la pantalla de hormigón, y estarán compuestos por gravas menores a 3" con un 4 a 12 % menor o igual a la malla 200. Se dispondrán en capas de 0,4 m.
- **Relleno 3A:** Estos rellenos se dispondrán entre los rellenos 2B y 3B, y estarán compuestos por enrocados menores a 9". Se dispondrán en capas de 0,4 m.
- **Relleno 3B:** Estos rellenos conformarán gran parte de la presa, y estarán compuestos por enrocados menores a 24" (sin procesamiento). Se dispondrán en capas de 0,6 m.
- **Relleno 3C:** Estos rellenos también constituirán una parte importante de la presa, y estarán compuestos por enrocados y rocas menores a 40". Se dispondrán en capas de 0,9 m.
- **Relleno 3D:** Estos rellenos cubrirán el talud de aguas abajo, y estarán compuestos por enrocados y bolones de rechazo mayores a 3" y menores a 12". Se dispondrán en capas de 0,9 m.

Las coordenadas del eje de emplazamiento se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 3.3: Coordenadas Eje de emplazamiento, MN Ingenieros

Vértices	Coordenada Este	Coordenada Norte	Zona
Inicio	319.908 E	6.540.783 S	19 J
Final	320.019 E	6.541.318 S	19 J

La cota de coronamiento se encuentra a 1618 m.s.n.m. Respecto al tamaño del embalse la consultora estimó que el óptimo en donde el VAN se hace máximo corresponde a un embalse de 50 hm<sup>3</sup>, cuya capacidad alcanza para cubrir una superficie de riego de 3250 ha.

Tabla 3.4: Características Embalse Murallas Viejas, mejor alternativa

Cota coronamiento	Volumen Embalsado
1618 [m.s.n.m]	50 [hm <sup>3</sup> ]

#### 3.2.4.2. Evacuador de Crecidas Murallas Viejas

MN Ingenieros determino que el evacuador de crecidas del embalse correspondería a un vertedero frontal de 40 m de largo con perfil tipo USBR, seguido de un rápido de descarga y luego de un canalón de descarga. Este sistema se decidió emplazar en la ladera derecha del embalse, en la figura 3.13 se puede apreciar este.

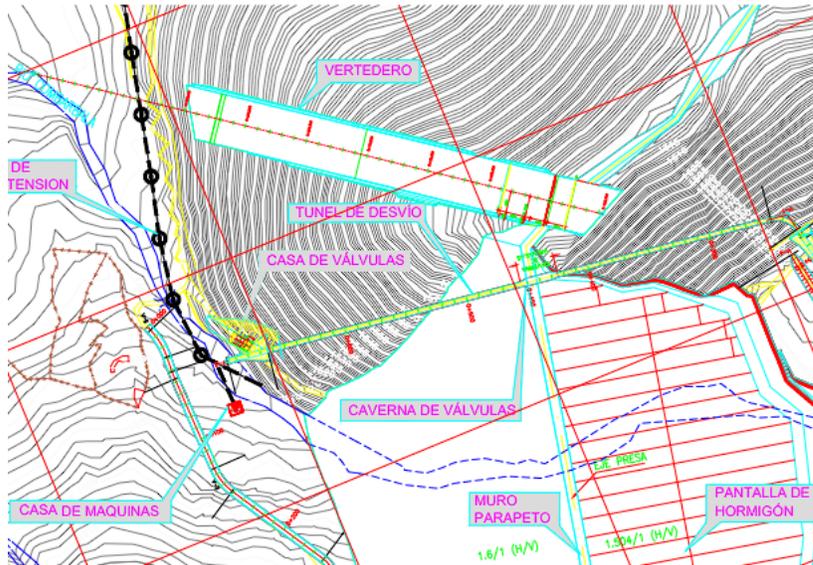


Figura 3.13: Vertedero Presa CFRD Murallas Viejas, Fuente: E.F MN ingenieros

### 3.2.5. Yacimientos

La consultora determinó distintas zonas de yacimientos dentro de los cuales se destacan los yacimientos fluviales del río Combarbalá, estos se separaron en 4 yacimientos los cuales se denominaron La Capilla, Cementerio, La Viña y El Parral, y se encuentran aguas abajo del sitio de emplazamiento de la presa cercano a la ciudad de Combarbalá. En la tabla 3.5 se presenta la capacidad de los yacimientos recién mencionados.

Tabla 3.5: Yacimientos fluviales del río Combarbalá

Yacimiento	Volumen (m <sup>3</sup> )	Distancia (km)
La Capilla	400.000	10,2
Cementerio	1.200.000	11,5
La Viña	600.000	12
El Parral	4.000.000	14

Según los cálculos hechos por la consultora, se estima que los yacimientos serían de 6,2 millones de m<sup>3</sup>.

## 3.3. Comentarios para aplicación Presa HCR

Debido a que esta investigación tiene como objetivo realizar un estudio de factibilidad a nivel de ingeniería conceptual del uso del HCR como alternativa para la construcción de las presas de los proyectos, se hizo especial énfasis en recopilar las características principales del embalse definido en los estudios existentes, teniendo muy en cuenta su cota de coronamiento la cual está directamente relacionada con el volumen de almacenamiento total y la altura final de la presa, como también la ubicación, la descripción del sitio de emplazamiento, y los yacimientos cercanos disponibles.

Por lo anterior y teniendo en cuenta estas consideraciones, se realizó este trabajo de título. La geología del lugar resulta crucial al momento de analizar la factibilidad de construir una presa con HCR, ya que cimentar en roca es fundamental en presas de este tipo. Con los antecedentes estudiados, se pudo discutir este aspecto. También se tomó en consideración la idea de realizar las presas de HCR en los mismos lugares de emplazamiento y alcanzando las mismas cotas de coronamiento que las presas CFRD estudiadas por la consultora MN Ingenieros, esto con el fin de no modificar los volúmenes de almacenamiento del proyecto y poder comparar los costos obtenidos.

- **Embalse La Tranca:** El sitio de emplazamiento definido por la consultora para el embalse La Tranca, contempla muy buenas características geológicas para emplazar una presa de HCR en el lugar, ya que se aprecia una roca de buena calidad en ambas laderas, y los rellenos del fondo del valle no presentan grandes espesores, por lo que su excavación no debiese implicar grandes costos. Además de esto, para la producción de HCR, se aprecian yacimientos fluviales de áridos muy cerca, que, si no fueran del tamaño específico que se necesita para una presa de HCR, pueden ser tratados en una planta de áridos con una máquina chancadora, como se ha hecho en distintos proyectos de presas de HCR en Chile y el resto del mundo. Considerando todo lo anterior, construir la presa de este embalse con HCR puede ser una muy buena alternativa.

Teniendo en cuenta esto, se escogió el sitio La Tranca para estudiar la construcción de la presa del embalse La Tranca con HCR.

- **Embalse Murallas Viejas:** El sitio de emplazamiento definido por la consultora para el embalse Murallas Viejas, presenta buenas características geológicas en la roca de ambas laderas, pero el espesor de los rellenos en el fondo del valle es demasiado grande, por lo que su excavación hasta la roca basal implicaría grandes costos. Considerando esto, construir la presa de este embalse con HCR en primera instancia no parece ser la mejor alternativa. Sin embargo, luego de analizar los demás sitios estudiados por la consultora, para ver si presentan buenas características para emplazar una presa de HCR, se llega a la conclusión de que, si bien existen sitios con muy buenas características –como el sitio Murallas Viejas– estos presentan una desventaja muy grande con respecto a su ubicación en el sector bajo del valle, debido a que gran parte de los canales del sector se encuentran aguas arriba de este sitio, por lo que emplazar el embalse en este lugar no permitirá regular todos los recursos hídricos del lugar, y afectaría a muchos agricultores de la zona.

El resto de los sitios ubicados en la cabecera del valle no son buenas alternativas debido a que El Peñón I y El Peñón II, presentan la peor relación de volumen embalsado/volumen de muro, por lo que emplazar la presa en estos lugares implicaría un costo mucho mayor de construcción de la misma. El sitio el Reventazón –qué podría haber sido una muy buena alternativa– lamentablemente se investigó y determinó que en su ladera derecha la roca basal se encuentra muy profunda.

Para la producción de HCR se aprecian yacimientos fluviales de áridos muy cerca, que, si no fueran del tamaño específico que se necesita, pueden ser tratados en una planta de

áridos con una máquina chancadora, como se mencionó anteriormente

Considerando las razones anteriores, al igual que la consultora MN Ingenieros se escogió el sitio El Quillay para estudiar la construcción de la presa del embalse Murallas Viejas con HCR, el estudio realizado por ellos también contempla la excavación de grandes cantidades (para impermeabilizar aguas arriba la presa CFRD), por lo que a pesar de la desventaja del sitio se estudiará la opción de HCR.

# Capítulo 4

## Diseño Conceptual Presa de HCR

En el siguiente capítulo se detalla el proceso de diseño a nivel conceptual de las presas de los embalses. Para ello, se definió la sección transversal, la ubicación, y finalmente se cubrió el material de la presa definida. Es relevante recordar que la presa definida es una presa de HCR; por lo tanto, corresponde a una presa de gravedad, y su propio peso proporciona resistencia mayor que las fuerzas ejercidas sobre ella.

### 4.1. Elección del Hormigón Compactado con Rodillo como material para la presa

Este trabajo contempla el uso del HCR como material para la construcción de las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas. El HCR al ser un hormigón muy seco y sin asentamiento de cono, permite que su transportación o colocación, se realice a través de equipos comúnmente utilizados para el movimiento de tierras, esto lo convierte en un material muy competitivo económicamente para la construcción de presas en comparación con el hormigón convencional, ya que a pesar de contener una menor cantidad de cemento en su composición refleja propiedades mecánicas similares y es notablemente más manejable.

Además, el HCR puede llegar a ser un fuerte competidor de las presas de tierra (CFRD), ya que, a diferencia de estas, las presas de HCR no son tan exigentes con respecto al diseño de las ataguías o conductos de desviación (que no serán diseñados en este trabajo, pero se estimarán en base a proyectos similares), y el vertedero se puede construir directamente en el cuerpo de la presa, lo cual puede ser favorable económicamente para el proyecto. Por otra parte, la geometría de las presas de tierra suelen ser mucho más masivas que las de HCR, y considerando que ambos tipos de presa utilizan equipos de construcción similares, se puede establecer que los tiempos de construcción son menores en las presas de HCR.

Considerando lo anterior en caso de tener el material de construcción necesario para una presa de HCR, en este caso yacimientos fluviales para la obtención de áridos (gravas, arenas, etc.) cercanos al sitio donde se emplazará el proyecto, el HCR se vuelve una opción excepcionalmente competitiva.

## **4.2. Consideraciones y supuestos generales**

### **4.2.1. Cuerpo de una presa de HCR**

Cualquier presa de gravedad debe satisfacer condiciones de durabilidad, impermeabilidad, estabilidad y resistencia debido a las diferentes condiciones, fuerzas y momentos a las que estará expuesta. Pese a esto, la resistencia a compresión en una presa de hormigón generalmente es la condición menos exigente, ya que generalmente la resistencia de diseño está determinada principalmente por la resistencia a la tracción y al corte obtenidos en los análisis estructurales realizados. Independientemente de si el hormigón con el cual se está construyendo la presa es convencional o compactado con rodillo, ambos pueden satisfacer muy bien estas resistencias y solicitudes. Debido a esto, las secciones tipo de presas de hormigón convencional o HCR suele ser muy similares o idénticas. Por lo tanto, a partir de lo recién mencionado, y debido a que estamos hablando de un diseño conceptual, se utilizarán parámetros comúnmente usados en diseños de secciones tipo de presas de HCR, los cuales debiesen cumplir con las condiciones de estabilidad y resistencia de la presa. Para el caso de la impermeabilidad es clave cimentar la presa de HCR en roca, ya que de esta manera podemos asegurar la impermeabilización de esta.

Además, es importante mencionar que el paramento aguas arriba de una presa de HCR, se efectúa con hormigón convencional. Este método considera que esta barrera aguas arriba de hormigón convencional otorgara la impermeabilidad necesaria en este sector para la presa. A pesar de esto, existen otros métodos que no consideran esta barrera, y se basan en que las capas del HCR son lo suficientemente impermeables. Pese a esto, la utilización de una barrera impermeable de hormigón convencional en el paramento de aguas arriba de la presa de HCR continúa siendo la opción más popular en la construcción de presas de HCR.

### **4.2.2. Evacuador de crecidas de una presa de HCR**

El evacuador de crecidas de una presa de HCR tiene la principal ventaja de que se puede construir en el cuerpo de la presa, es por esta razón que se suele construir en presas de HCR vertederos de perfil de labio fijo sin compuertas o vertederos de labio ancho, los que vierten de manera rápida por el paramento aguas abajo de la presa. En este trabajo no se diseñara particularmente un vertedero, pero sí en los capítulos más adelante se estimara el coste de uno en base a distintas experiencias.

Al igual que el paramento aguas arriba de la presa, los vertederos también se suelen construir con hormigón convencional, y si bien se están desarrollando nuevas técnicas en donde se utiliza el mismo HCR para esto, la utilización de hormigón convencional sigue estando presente en más del 50% de las nuevas presas que se construyen de HCR.

### **4.2.3. Obras de desvío y entrega**

Con respecto a las obras de desvío y entregas en una presa de HCR, estas son de una menor longitud en comparación con otro tipo de presas, esto debido principalmente al volumen menor que ocupan las presas de HCR en comparación con las presas de tierra o materiales sueltos. En este trabajo no se diseñarán las obras particulares para el desvío y entrega de una presa de HCR, pero sí en los capítulos más adelante se estimara el coste asociado a

estas obras para una presa de HCR en base a los estudios de MN ingenieros y otros estudios realizados.

### **4.3. Diseño Conceptual Sección Tipo Presa HCR**

Para el diseño de la sección transversal, se tomaron en cuenta las cotas de coronamiento definidas previamente en los estudios de factibilidad realizados por MN Ingenieros para ambos proyectos, esto como se mencionó anteriormente con el fin de no modificar los volúmenes embalsados.

Se definió una pendiente aguas abajo clásica en presas de gravedad de HCR, esta corresponde a 0.8/1 H/V, la cual también se ha utilizado en otras presas de gravedad de HCR construidas en Chile como Pangue y Ralco. Aguas arriba el muro caerá de manera recta, lo cual es lo que normalmente se realiza en presas de gravedad de HCR. En relación al paramento aguas arriba de la presa, esta corresponde a una barrera de hormigón convencional de 1 m de espesor.

Con respecto al ancho de coronamiento se utilizó un criterio mencionado en la bibliografía investigada, el cual consiste en que, por lo general, el ancho de coronamiento de la presa es del orden del 10 % de su altura. Además de eso, se consideró que el ancho de coronamiento debe ser lo suficientemente amplio para posibilitar la adecuada realización de la compactación. Comúnmente coronamientos de anchuras de más de 8 m agilizan la construcción de la presa.

Considerando las características geométricas recién definidas se obtienen las siguientes secciones transversales para las presas de HCR.

#### **4.3.1. Sección Presa HCR La Tranca**

Para el caso de la presa de La Tranca, la altura máxima de la presa se alcanzará en 126 m, esto ocurre tomando en cuenta la descripción geotécnica del sitio presentada en los estudios previos de la consultora MN Ingenieros, donde en la parte más baja del terreno del valle, la roca se encontraba entre 8 y 10 m de profundidad. En este caso, para el diseño se estimó que la roca se encontraba a 9 m, y por consiguiente se obtuvo la altura de 126 m.

Teniendo en cuenta lo anterior, la sección tipo de la presa de HCR de La Tranca es presentada en la figura 4.1.

### Sección Embalse La Tranca

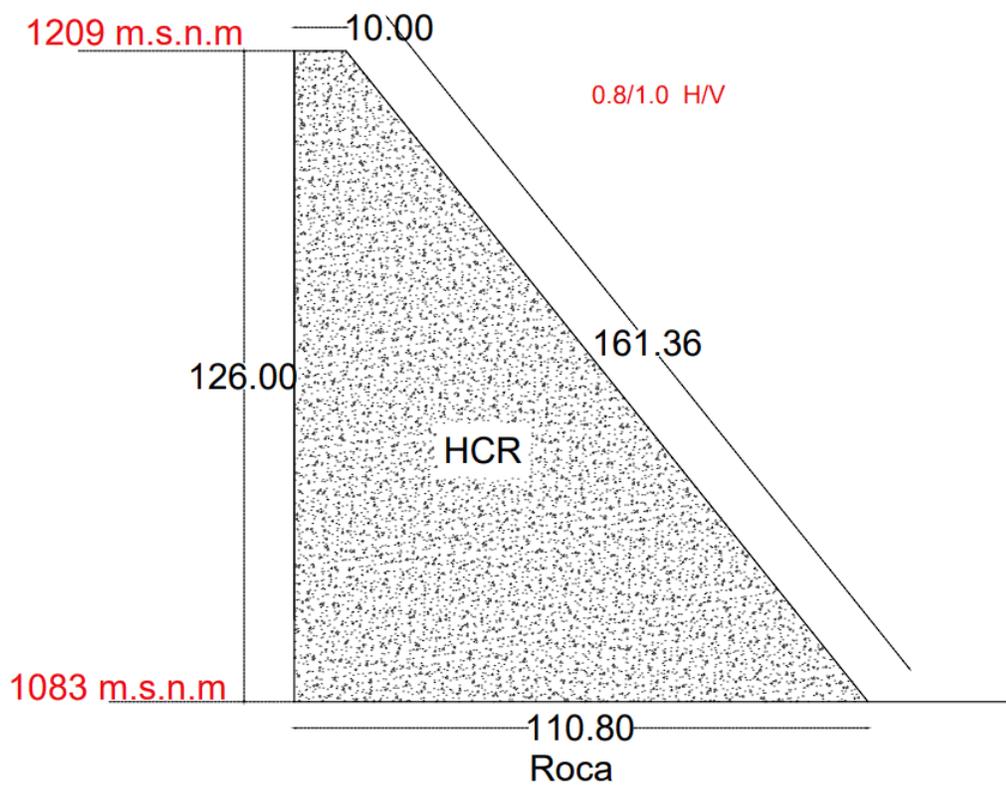


Figura 4.1: Sección Típica Presa HCR La Tranca, Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.1 se pueden observar las características geométricas de esta.

Tabla 4.1: Características geométricas, Presa HCR La Tranca

Sección Tipo La Tranca	
Cota de coronamiento [m.s.n.m]	1209
Cota de cimentación [m.s.n.m]	1083
Altura máxima [m]	126
Ancho coronamiento [m]	10
Pendiente [H/V]	0.8/1.0

#### 4.3.2. Sección Presa HCR Murallas Viejas

Para el caso de la presa de Murallas Viejas, la altura máxima de la presa se alcanzará en 133 m, esto ocurre tomando en cuenta la descripción geotécnica del sitio presentada en los estudios previos de la consultora MN Ingenieros, donde la roca en el fondo del valle se encontraba aproximadamente a 30 m de profundidad, y por consiguiente se obtuvo la altura de 133 m.

Teniendo en cuenta lo anterior, la sección tipo de la presa de HCR de Murallas Viejas es presentada en la figura 4.2.

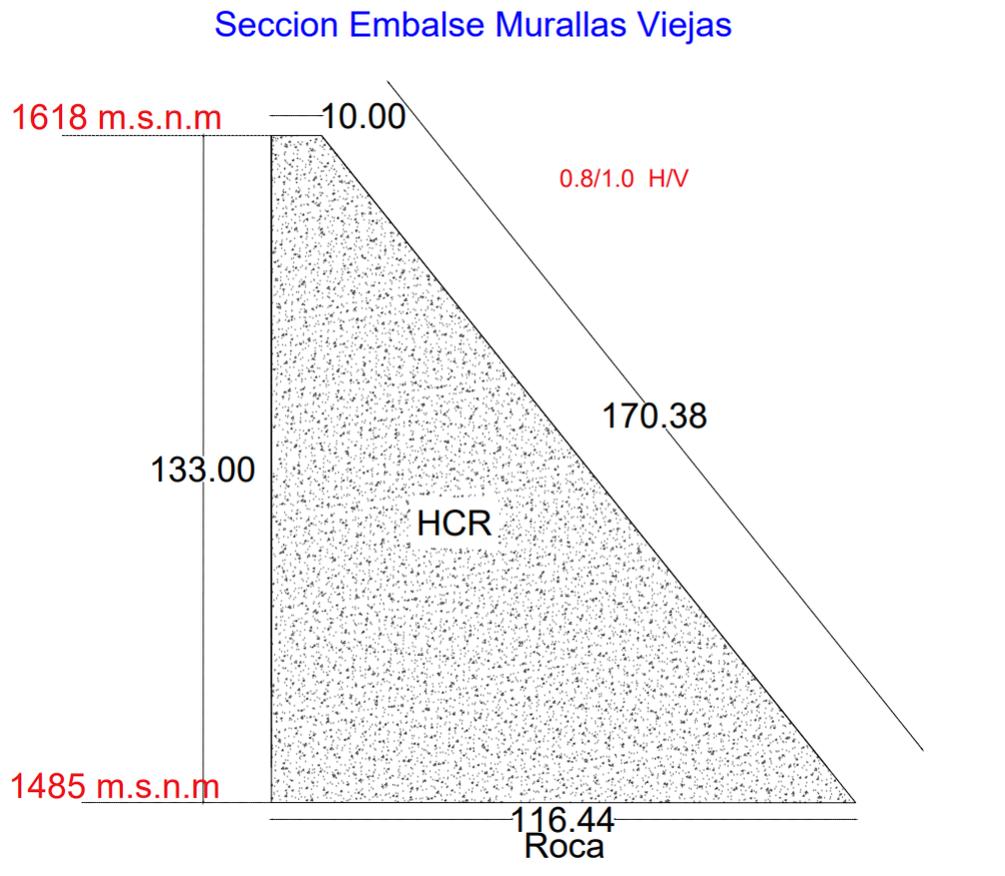


Figura 4.2: Sección Típica Presa HCR Murallas Viejas, Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.2 se pueden observar las características geométricas de esta.

Tabla 4.2: Características geométricas, Presa HCR Murallas Viejas

Sección Tipo Murallas Viejas	
Cota de coronamiento [m.s.n.m]	1618
Cota de cimentación [m.s.n.m]	1485
Altura máxima [m]	133
Ancho coronamiento [m]	10
Pendiente [H/V]	0.8/1.0

## 4.4. Verificaciones Estabilidad Presas de HCR

A continuación, realizó un análisis pseudo-estático en dos dimensiones, para verificar la estabilidad al volcamiento y al deslizamiento de las secciones definidas para los embalses La Tranca y Murallas Viejas. Para realizar lo anterior se tomarán en cuenta la Guía de Diseño Estructural ENDESA, como otros estudios de factibilidad de proyectos que consideraron presas de HCR como el Estudio de Prefactibilidad del Embalse Chillan. Teniendo en cuenta lo anterior se realizaron los siguientes supuestos:

- **Fuerzas que actúan sobre la presa:** En las figuras 4.3 y 4.4 se pueden apreciar las fuerzas que actúan sobre la presa:

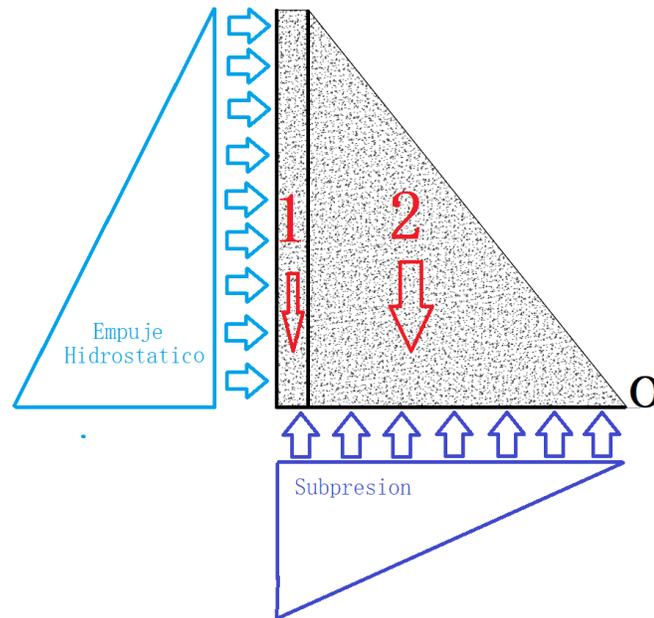


Figura 4.3: Fuerzas que actúan sobre la presa, Caso Estático, Fuente: Elaboración propia

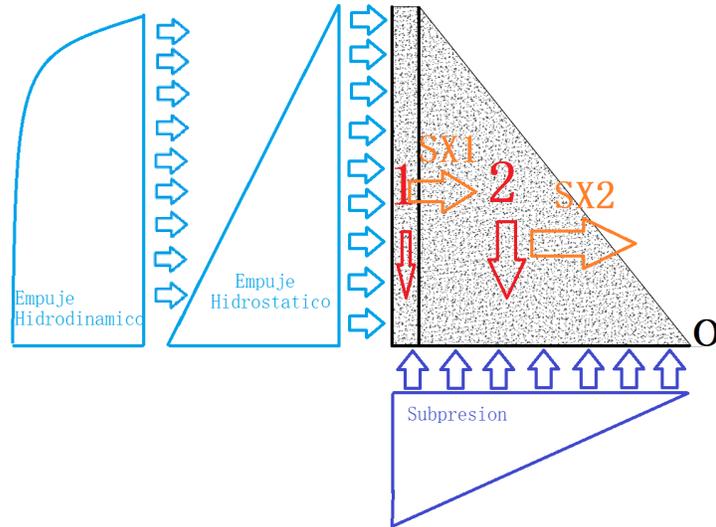


Figura 4.4: Fuerzas que actúan sobre la presa, Caso Pseudo-estático Fuente: Elaboración propia

1. **Caso estático:** Se considerarán las fuerzas descritas en la figura 4.3. Para este caso se considerará un nivel de aguas máximas eventuales.
  2. **Caso pseudo-estático:** Además de las fuerzas anteriores, se considerarán también las fuerzas sísmicas se puede apreciar en la figura 4.4. En este caso se considerará un nivel de aguas máximas normales.
- **Coefficiente Sísmico:** Las aceleraciones de diseño de la estructura fueron estimadas de acuerdo a los parámetros establecidos en Nch 433 Of.96. Por lo que considerando las ubicaciones de los embalses ambos se ubican en la zona sísmica 3, el coeficiente sísmico horizontal tanto para La Tranca y Murallas Viejas se pueden apreciar en la tabla 4.3:

Tabla 4.3: Coeficiente sísmico

Coeficiente sísmico	
$K_h$	0,15

- **Presiones Hidrodinámicas:** Para el cálculo del empuje hidrodinámico generado por los sismos, se utiliza el Método Simplificado de Westergaard:

$$F_{Hidrodinamica} = \frac{2}{3} \cdot \frac{7}{8} \cdot k_h \cdot H^2 \quad (4.1)$$

Esta fuerza se aplicará a  $\frac{2}{5}$  de la base de la presa.

- **Pesos específicos:** En la tabla 4.4 se pueden observar los pesos específicos para el agua y para el HCR.

Tabla 4.4: Pesos específicos

	Peso Específico (ton/m3)
$\gamma_a$	1,0
$\gamma_{HCR}$	2,4

- **Parámetros de la Roca de emplazamiento:** Debido a que no se tiene acceso a las propiedades físicas de las rocas en las cuales se emplazaran las presas, se trabajó con los parámetros para una roca de buena calidad que sugiere utilizar la Guía de Diseño estructural ENDESA en caso de que no se tenga mayor información sobre la roca. Estos se pueden apreciar en la tabla 4.5:

Tabla 4.5: Parámetros Roca

	Parámetros Roca
Coefficiente de Roce	0,7
Adherencia de Roca (t/m2)	100

- **Factores de seguridad:** Se consideraron los factores de seguridad definidos en la Guía de Diseño estructural ENDESA. Estos se pueden observar en la tabla 4.6:

Tabla 4.6: Factores de seguridad

	Estático	Pseudo-Estático
F.S Deslizamiento	1,5	1,3
F.S Volcamiento	1,5	1,3

- **Nivel de Aguas:** A continuación en la tabla 4.7 se presentan los niveles de agua máximos eventuales y normales definidos por MN Ingenieros para los embalses La Tranca y Murallas Viejas:

Tabla 4.7: Nivel de Aguas

Nivel de Agua	La Tranca	Murallas Viejas
Maximo Eventual (ms.n.m)	1205,76	1614,50
Maximo Normal (m.s.n.m)	1201,25	1617,19

#### 4.4.1. Estabilidad al Volcamiento

El factor de seguridad del volcamiento viene dado por la relación entre: los momentos volcantes debido al empuje hidrostático y la subpresión. Los momentos resistentes debido al peso propio de la presa. A continuación, se presentan los resultados:

$$F.S_{volcamiento} = \frac{M_{resistentes}}{M_{volcante}} \quad (4.2)$$

#### 4.4.1.1. Caso Estático La Tranca

En las tablas 4.8, 4.9 y 4.10 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al volcamiento del caso estático para La Tranca.

Tabla 4.8: Fuerzas Verticales La Tranca, Caso Estático

Fuerzas Verticales		
La Tranca	Fy (ton)	M (ton m)
Sección Presa 1	3.024	319.939
Sección Presa 2	15.241	1.024.193
Subpresion	6.801	502.360

Tabla 4.9: Fuerzas Horizontales La Tranca, Caso Estático

Fuerzas Horizontales		
La Tranca	Fx (ton)	M (ton m)
Fuerza Hidrostática	7.535	308.333

Tabla 4.10: Factor de seguridad obtenido

Caso Estático La Tranca	
Momento Resistente (ton m)	1.344.132
Momento Volcante (ton m)	810.693
<b>F.S</b>	<b>1,66</b>

Podemos observar que el F.S=1,66, es mayor a 1,5, por lo tanto, la presa cumple los requisitos de estabilidad al volcamiento para este caso.

#### 4.4.1.2. Caso Pseudo-Estático La Tranca

En las tablas 4.11, 4.12 y 4.13 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al volcamiento del caso pseudo-estático para La Tranca.

Tabla 4.11: Fuerzas Verticales La Tranca, Caso Pseudo-Estático

Fuerzas Verticales		
La Tranca	Fy (ton)	M (ton m)
Sección Presa 1	3.024	319.939
Sección Presa 2	15.241	1.024.193
Subpresion	6.551	483.904

Tabla 4.12: Fuerzas Horizontales La Tranca, Caso Pseudo-Estático

Fuerzas Horizontales		
La Tranca	Fx (ton)	M (ton m)
Fuerza Hidrostática	6.992	275.583
Fuerza Hidrodinámica por sismo	1.223	57.872
Sismo presa 1	454	28.576
Sismo presa 2	2286	96.018

Tabla 4.13: Factor de seguridad obtenido

Caso Pseudo-Estático La Tranca	
Momento Resistente (ton m)	1.344.132
Momento Volcante (ton m)	941.954
<b>F.S</b>	<b>1,43</b>

Podemos observar que el F.S=1,43, es mayor a 1,3, por lo tanto, la presa cumple los requisitos de estabilidad al volcamiento para este caso.

#### 4.4.1.3. Caso Estático Murallas Viejas

En las tablas 4.14, 4.15 y 4.16 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al volcamiento del caso estático para Murallas Viejas.

Tabla 4.14: Fuerzas Verticales Murallas Viejas, Caso Estático

Fuerzas Verticales		
Murallas Viejas	Fy (ton)	M (ton m)
Sección Presa 1	3.192	355.716
Sección Presa 2	16.988	1.205.456
Subpresion	7.696	597.423

Tabla 4.15: Fuerzas Horizontales Murallas Viejas, Caso Estático

Fuerzas Horizontales		
Murallas Viejas	Fx (ton)	M (ton m)
Fuerza Hidrostática	8.737	384.986

Tabla 4.16: Factor de seguridad obtenido

Caso Estático Murallas Viejas	
Momento Resistente (ton m)	1.561.172
Momento Volcante (ton m)	982.408
<b>F.S</b>	<b>1,59</b>

Podemos observar que el F.S=1,59, es mayor a 1,5, por lo tanto, la presa cumple los requisitos de estabilidad al volcamiento para este caso.

#### 4.4.1.4. Caso Pseudo-Estático Murallas Viejas

En las tablas 4.17, 4.18 y 4.19 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al volcamiento del caso pseudo-estático para Murallas Viejas.

Tabla 4.17: Fuerzas Verticales Murallas Viejas, Caso Pseudo-Estático

Fuerzas Verticales		
Murallas Viejas	Fy (ton)	M (ton m)
Sección Presa 1	3.192	355.716
Sección Presa 2	16.988	1.205.456
Subpresion	7.539	585.265

Tabla 4.18: Fuerzas Horizontales Murallas Viejas, Caso Pseudo-Estático

Fuerzas Horizontales		
Murallas Viejas	Fx (ton)	M (ton m)
Fuerza Hidrostática	8.385	361.958
Fuerza Hidrodinámica por sismo	1.467	76.011
Sismo presa 1	478	31.840
Sismo presa 2	2548	112.969

Tabla 4.19: Factor de seguridad obtenido

Caso Pseudo-Estático Murallas Viejas	
Momento Resistente (ton m)	1.561.172
Momento Volcante (ton m)	1.168.044
<b>F.S</b>	<b>1,34</b>

Podemos observar que el F.S=1,34, es mayor a 1,3, por lo tanto, la presa cumple los requisitos de estabilidad al volcamiento para este caso.

#### 4.4.2. Estabilidad al Deslizamiento

El factor de seguridad del deslizamiento viene dado por la relación entre: la fuerza de roce y la fuerza deslizante que actúa en la presa. A continuación, se presentaran los resultados:

$$F.S.1_{deslizamiento} = \frac{F_{roce}}{F_{deslizante}} \quad (4.3)$$

En caso de no cumplir el factor de seguridad mínimo se debe considerar el efecto de adherencia de la roca.

$$F.S.2_{deslizamiento} = \frac{F_{roce} + F_{adherencia}}{F_{deslizante}} \quad (4.4)$$

#### 4.4.2.1. Caso Estático La Tranca

En las tablas 4.20 y 4.21 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al deslizamiento del caso estático para La Tranca.

Tabla 4.20: Fuerzas estabilidad deslizamiento La Tranca, Caso Estático

Fuerzas	
La Tranca	F (ton)
Carga Vertical	11.464
Fuerza de Roce	8.025
Fuerza deslizante	7.535
Fuerza adherencia	11.080

Tabla 4.21: Factores de seguridad obtenidos

F.S La Tranca Caso Estático	
<b>F.S.1</b>	<b>1,07</b>
<b>F.S.2</b>	<b>2,54</b>

Podemos observar que el F.S.1=1,07, es menor a 1,5 por lo tanto se debe considerar el efecto de la adherencia de la roca. Considerando esta se observa que el nuevo factor de seguridad F.S.2=2,54, es mayor a 1,5 por lo tanto cumple los requisitos de estabilidad al deslizamiento.

#### 4.4.2.2. Caso Pseudo-Estático La Tranca

En las tablas 4.22 y 4.23 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al deslizamiento del caso pseudo-estático para La Tranca.

Tabla 4.22: Fuerzas estabilidad deslizamiento La Tranca, Caso Pseudo-Estático

Fuerzas	
La Tranca	F (ton)
Carga Vertical	11.714
Fuerza de Roce	8.200
Fuerza deslizante	10.955
Fuerza adherencia	11.080

Tabla 4.23: Factores de seguridad obtenidos

F.S La Tranca Caso Pseudo-Estático	
<b>F.S.1</b>	<b>0,75</b>
<b>F.S.2</b>	<b>1,766</b>

Podemos observar que el  $F.S.1=0,75$ , es menor a 1,3 por lo tanto se debe considerar el efecto de la adherencia de la roca. Considerando esta se observa que el nuevo factor de seguridad  $F.S.2=1,76$ , es mayor a 1,3 por lo tanto cumple los requisitos de estabilidad al deslizamiento.

#### 4.4.2.3. Caso Estático Murallas Viejas

En las tablas 4.24 y 4.25 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al deslizamiento del caso estático para Murallas Viejas.

Tabla 4.24: Fuerzas estabilidad deslizamiento Murallas Viejas, Caso Estático

Fuerzas	
Murallas Viejas	F (ton)
Carga Vertical	12.484
Fuerza de Roce	8.739
Fuerza deslizante	8.737
Fuerza adherencia	11.644

Tabla 4.25: Factores de seguridad obtenidos

F.S Murallas Viejas Caso Estático	
<b>F.S.1</b>	<b>1,00</b>
<b>F.S.2</b>	<b>2,33</b>

Podemos observar que el  $F.S.1=1,00$ , es menor a 1,5 por lo tanto se debe considerar el efecto de la adherencia de la roca. Considerando esta se observa que el nuevo factor de seguridad  $F.S.2=2,33$ , es mayor a 1,5 por lo tanto cumple los requisitos de estabilidad al deslizamiento.

#### 4.4.2.4. Caso Pseudo-Estático Murallas Viejas

En las tablas 4.26 y 4.27 podemos observar los resultados del análisis de estabilidad al deslizamiento del caso pseudo-estático para Murallas Viejas.

Tabla 4.26: Fuerzas estabilidad deslizamiento Murallas Viejas, Caso Pseudo-Estático

Fuerzas	
Murallas Viejas	F (ton)
Carga Vertical	12.640
Fuerza de Roce	8.848
Fuerza deslizante	12.879
Fuerza adherencia	11.644

Tabla 4.27: Factores de seguridad obtenidos

F.S Murallas Viejas Caso Pseudo-Estático	
<b>F.S.1</b>	<b>0,69</b>
<b>F.S.2</b>	<b>1,59</b>

Podemos observar que el  $F.S.1=0,69$ , es menor a 1,3, por lo tanto, se debe considerar el efecto de la adherencia de la roca. Considerando esta se observa que el nuevo factor de seguridad  $F.S.2=1,59$ , es mayor a 1,5, por lo tanto, cumple los requisitos de estabilidad al deslizamiento.

#### **4.4.3. Comentarios Estabilidad Presas de HCR**

Podemos notar que las secciones definidas cumplen con los factores de seguridad del análisis de estabilidad al volcamiento y al deslizamiento. Cabe mencionar que el factor de seguridad de la estabilidad al deslizamiento se cumplió considerando la adherencia de la roca, por lo que deberá asegurarse a través del método constructivo que la fundación de la presa empotre la presa con la roca. Debido a que este trabajo se desarrolló a nivel de ingeniería conceptual, no se realizó un análisis por elemento finito para respaldar estos cálculos, pero para otras etapas de ingeniería más avanzada sí se recomienda fuertemente hacerlo, ya que como menciona la ICOLD (2018) estos análisis ofrecen un comportamiento no lineal más realista.

### **4.5. Definición Ubicación Eje de Emplazamiento Presa HCR**

El sitio y la ubicación en donde se emplazarán las presas será la definida en los estudios de factibilidad realizados por MN Ingenieros. Por consiguiente, a continuación se presentan las ubicaciones de ambos sitio.

#### **4.5.1. Ubicación Emplazamiento Presa HCR La Tranca**

El lugar de emplazamiento de la presa de HCR estará ubicado en el denominado Sitio La Tranca I, que quedó establecido en el estudio de factibilidad de MN Ingenieros. Este sitio tiene las siguientes coordenadas estándar UTM aproximadas: Zona 19, hemisferio sur, 322363,24 E, 6555965,24 S. En la figura 4.5 se puede observar la proyección del eje de emplazamiento de la presa en el lugar.



Figura 4.5: Eje de emplazamiento Presa HCR La Tranca, Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.28 se pueden apreciar las coordenadas estándar UTM del vértice inicial y final del eje de emplazamiento. El rumbo del emplazamiento de la presa de HCR corresponde al mismo que se utilizó en el emplazamiento de los estudios previos, este es: N 1° O

Tabla 4.28: Coordenadas Eje de emplazamiento Presa de HCR La Tranca

Vértices	Coordenada Este	Coordenada Norte	Zona
Inicio	322.283 E	6.556.178 S	19 J
Final	322.295 E	6.555.684 S	19 J

- **Comentarios respecto a la ubicación del emplazamiento y los supuestos que se utilizaron:** Cabe mencionar que la ubicación exacta del emplazamiento está determinada en mayor medida por la cota de coronamiento, ya que como se mencionó anteriormente en este documento, el volumen de almacenamiento está directamente relacionado con la cota de coronamiento del embalse; por lo que, para no alterar sustancialmente este volumen y poder comparar el proyecto original con el de HCR se debe mantener esta cota. Considerando lo anterior, se obtuvo el eje de emplazamiento mostrado en la figura 4.28.

En un principio se ubicó el emplazamiento de la presa de HCR en la posición exacta del emplazamiento definido por MN Ingenieros, pero en esta posición la cota de coronamiento variaba considerablemente en comparación con la cota original, por lo que se decidió trasladar levemente el emplazamiento hacia el oeste y a su vez aumentar el largo de este, para alcanzar la cota de coronamiento de 1209 m.s.n.m. Esta diferencia se puede deber principalmente a que en este trabajo de título se está realizando con una

topografía obtenida de Google Earth, mientras que la consultora MN Ingenieros realizó su propia topografía del lugar.

#### 4.5.2. Ubicación Emplazamiento Presa HCR Murallas Viejas

Como dijimos anteriormente, el lugar de emplazamiento de la presa de HCR estará ubicado en el denominado Sitio El Quillay, que quedó establecido en el estudio de factibilidad de MN Ingenieros. Este sitio tiene las siguientes coordenadas estándar UTM aproximadas: Zona 19, hemisferio sur, 319641.04 E, 6540794.04 S. En la figura 4.6 se puede observar la proyección del eje de emplazamiento de la presa en el lugar.



Figura 4.6: Eje de emplazamiento Presa HCR Murallas Viejas, Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.29 se pueden apreciar las coordenadas estándar UTM del vértice inicial y final del eje de emplazamiento. El rumbo del emplazamiento de la presa de HCR corresponde al mismo que se utilizó en el emplazamiento de los estudios previos, este es: N 13° E

Tabla 4.29: Coordenadas Eje de emplazamiento Presa de HCR Murallas Viejas

Vértices	Coordenada Este	Coordenada Norte	Zona
Inicio	319.840 E	6.540.950 S	19 J
Final	319.720 E	6.540.382 S	19 J

- **Comentarios respecto a la ubicación del emplazamiento y los supuestos que se utilizaron:** Al igual que en el emplazamiento de la presa del embalse La Tranca, el lugar de emplazamiento está determinado directamente por la cota de coronamiento del embalse, ya que este determina principalmente el volumen embalsado total. En el caso de la presa de HCR del embalse Murallas Viejas, esta se emplazó en el mismo lugar

que la presa CFRD definida por la consultora MN Ingenieros, respetando el mismo rumbo y una longitud de muro similar. Inicialmente, realizar el emplazamiento en el mismo lugar no era posible, debido a que la topografía obtenida de Google Earth no permitía alcanzar la cota de diseño, es por esto que se investigó más detalladamente los planos de la consultora y se observó que existía un camino el cual conectaría con el coronamiento de la presa, este aún no está construido, y contempla pequeños rellenos los cuales permitirán alcanzar la cota de diseño, por lo que también se modeló este pequeño camino en Civil 3D, y se pudo emplazar la presa en el mismo lugar definido por la consultora.

## 4.6. Cubicación de Materiales

A continuación, se presenta la cubicación de las presas de HCR, para esto se utilizaron los programas Google Earth Pro, Global Mapper y Civil 3D. Estos programas permiten obtener vistas en planta de la proyección de las presas, como también cortes transversales de estas en el sitio de emplazamiento. Finalmente, en conjunto con otras funciones de los programas, se obtendrán las cantidades de hormigón compactado, hormigón tradicional y excavación, que se tendrán que tener en cuenta en este proyecto.

Enseguida se proporciona una breve descripción de los programas que se utilizará:

- **Google Earth Pro:** Esta aplicación ofrece el conjunto más completo de datos geoespaciales disponibles de manera pública e incluye imágenes de alta resolución, mapas detallados de carreteras, imágenes panorámicas desde calles, imágenes históricas y puntos de interés importantes.
- **Global Mapper:** Es una aplicación de sistema de información geográfica (SIG) potente y asequible que combina una gama completa de soluciones de software para el procesamiento de datos espaciales y proporciona acceso a una serie de formatos utilizados en el mundo del CAD.
- **Civil 3D:** Es un software CAD que permite disfrutar de flujos de trabajo más eficientes para el modelado de superficies, el modelado de obra lineal, el diseño de emplazamientos, etc. Este software de diseño de ingeniería civil admite BIM (Building Information Modeling) con funciones integradas para mejorar el dibujo, el diseño y la documentación de construcción. En este trabajo se utilizará para modelar las presas de HCR.

### 4.6.1. Metodología

Para modelar una presa en el software Civil 3D debe realizarse la siguiente secuencia de pasos:

1. Ubicación del sitio: Con el programa Google Earth Pro ingresando las coordenadas establecidas previamente se puede localizar el sitio donde se ubicará el embalse.
2. Exportación del sitio a Global Mapper: Con la función polígono de Google Earth Pro, se dibuja aproximadamente el área que cubra todo el sitio donde se ubicará el embalse. Luego de esto se debe guardar el polígono definido en un archivo kmz.

3. Obtención de las curvas de nivel y la topografía del sitio: En el programa Global Mapper en primer lugar se debe configurar en la opción “Proyección” el datum del sitio del embalse, luego de esto se procede a importar el archivo kmz definido previamente y se conecta el programa a los datos de mapas y curvas en línea (se recomienda conectarse a Aster GDEM v3). Una vez cargado el mapa, se procede a utilizar la opción “Análisis” y la función “Generar Contornos”, con esto se generarán las curvas nivel y su elevación en el sitio.
4. Exportación curvas de nivel a Civil 3D: A través de la opción “archivo” se exporta el documento en un formato “vector/lidar” en un “archivo de texto” (text file), hay que tener muy en cuenta que este archivo de texto quede delimitado por espacios y en coordenadas latitud norte. En el programa Civil 3D a través de la opción “puntos” se importa el archivo de texto que contiene las coordenadas.
5. Creación de la superficie de terreno en Civil 3D: Con los datos importados a Civil 3D, y a través de la función “Superficie” se creará la superficie del terreno, esta superficie está creada en base a las coordenadas que se obtuvieron en Global Mapper.
6. Definición eje de emplazamiento en Civil 3D: Con la función “Alineación” se define el eje de emplazamiento de la presa, luego con la función “Perfil de Superficie”, se crea el perfil longitudinal del eje de emplazamiento de la presa, con el cual se podrá definir la cota de coronamiento de la presa.
7. Definición características geométricas de la presa: Utilizando la función “Ensamblaje” se define un ensamblaje el cual contiene las características geométricas de la presa, como su ancho de coronamiento, y las pendientes respectivas aguas abajo y arriba de esta, además de la geometría de las excavaciones.
8. Creación de la presa: Utilizando la función “Corredor” se creará la presa en el programa. En Civil 3D los corredores en conjunto con el ensamblaje y la alineación definidas, representarán la presa en el sitio de emplazamiento, con toda su geometría la cual se podrá modificar con estas mismas funciones en caso de que sea necesario.
9. Visualización de la presa y Cubicación de materiales: realizando lo anterior se podrá observar la proyección de la presa en el terreno, como también una representación en 3D de la presa y en conjunto con las funciones “Section Views” distintas vistas de esta. Luego de esto con la función “Computo de materiales” se puede calcular la totalidad de material que utilizará la presa definida y de esta manera finalmente obtener la cubicación de esta misma. Es importante mencionar que una de las formas en que Civil 3D calcula los materiales es a través del promedio de las áreas de las secciones transversales, por lo tanto, a mayor cantidad de secciones transversales, más preciso será este cálculo.

#### **4.6.2. Modelado Presa HCR La Tranca**

A continuación, se presentan los principales resultados del modelado en Civil 3D de la presa de HCR La Tranca.

- **Topografía del sitio La Tranca:**

En la figura 4.7 se aprecia la topografía del sitio La Tranca I, en este podemos observar que las curvas de nivel donde se emplazará la presa varían entre los 1090 m.s.n.m y 1220 m.s.n.m

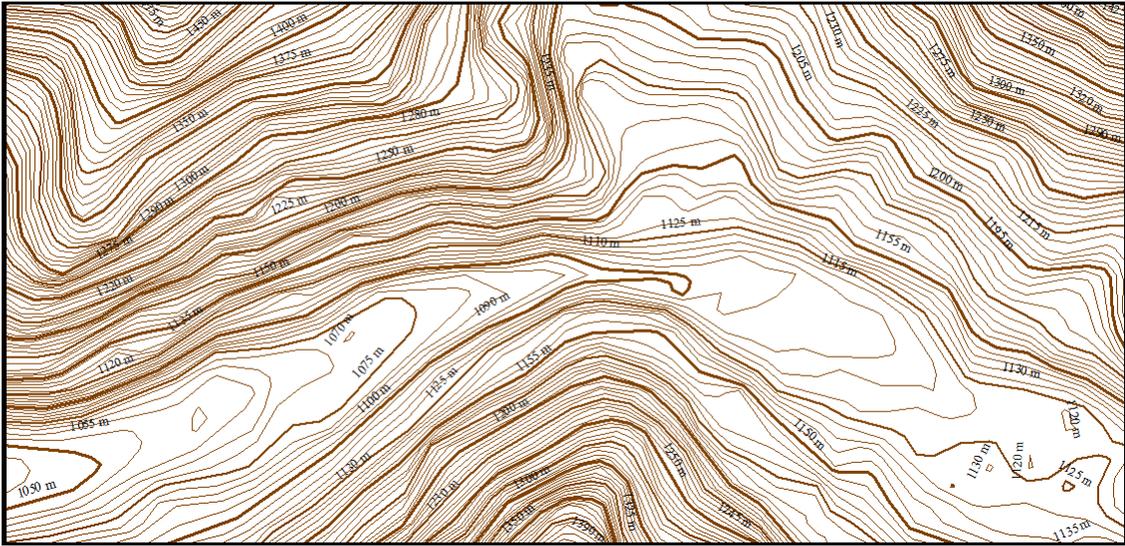


Figura 4.7: Topografía Sitio La Tranca I, Global Mapper

- **Perfil Longitudinal, eje de emplazamiento Presa HCR La Tranca:**

Con respecto al perfil longitudinal, la cota del terreno del valle se encuentra en la cota 1092 m.s.n.m, considerando el análisis geotécnico del lugar en donde se determinó que la roca de buena calidad en el valle se encontraba entre 8 a 10 metros de profundidad, se tomó la decisión de considerar que esta se encontraba a 9 m, por lo tanto, para el modelado en Civil 3D se contemplará que esta se encuentra en la cota 1083 m.s.n.m. En la figura 4.8 se aprecia el perfil longitudinal del terreno del eje de emplazamiento.

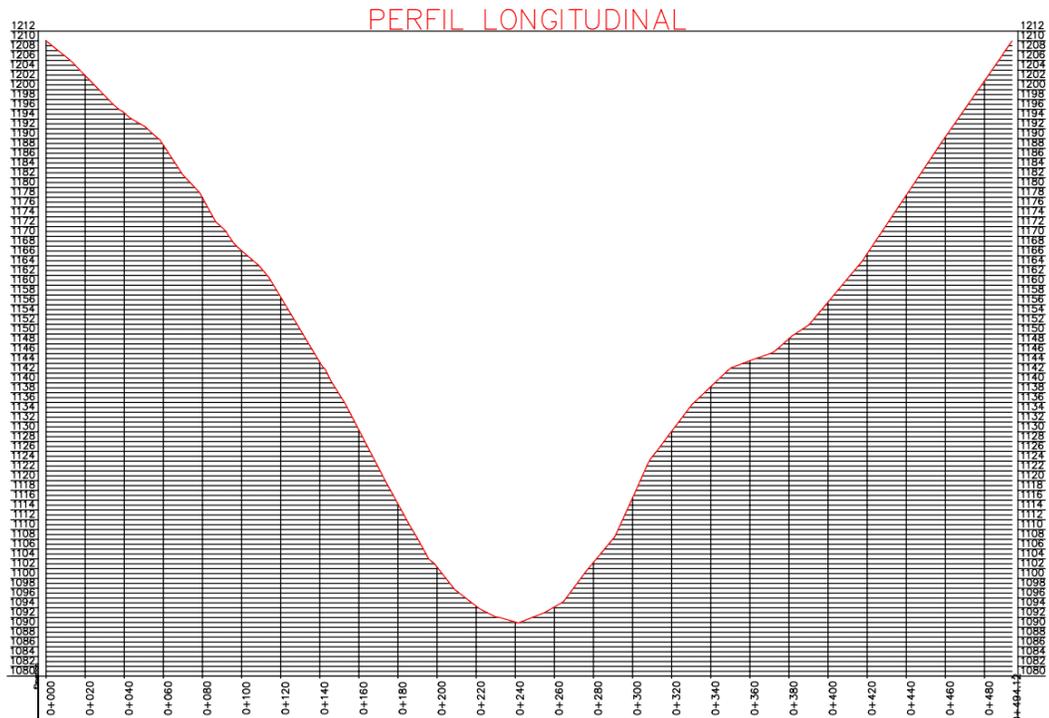


Figura 4.8: Perfil longitudinal del eje de emplazamiento La Tranca, Civil 3D

- **Proyección en el sitio Presa HCR La Tranca:**

En la figura 4.9 se puede apreciar una vista en planta del sitio con la proyección de la presa de HCR.

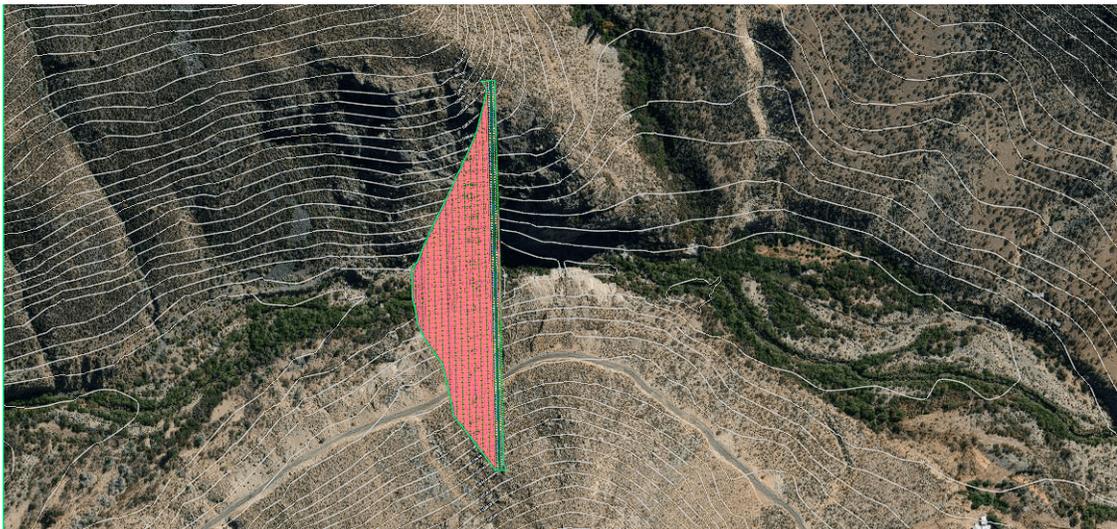


Figura 4.9: Proyección presa de HCR La Tranca, Civil 3D

En la tabla 4.30 se puede observar la longitud del muro.

Tabla 4.30: Largo del Muro La Tranca

Longitud [m]	494
--------------	-----

• **Metodología de Cálculo de Volumen Presa Civil 3D:**

El software Civil 3D utiliza el método de área final media para el cálculo de volúmenes, este consiste en realizar el cálculo del volumen de un prisma de áreas diferentes, cada área del prisma corresponde a dos secciones transversales sucesivas, y la altura de este a la distancia entre estas secciones transversales:

$$V_i = \frac{(A_i + A_{i+1})}{2} \cdot L \quad (4.5)$$

El volumen final corresponde a la sumatoria de todos los volúmenes obtenidos entre secciones transversales consecutivas

$$V_{TOTAL} = \sum_i V_i \quad (4.6)$$

En base a esto notamos que a mayor cantidad de secciones transversales que se realicen en la presa modelada, más preciso será el volumen obtenido, por esto se definieron 34 secciones transversales distribuidas cada 15 metros a lo largo de los 494 m de longitud del muro. En la figura 4.10 y 4.11 se pueden apreciar la totalidad de secciones transversales y la sección transversal donde se alcanza la altura máxima de la presa respectivamente.

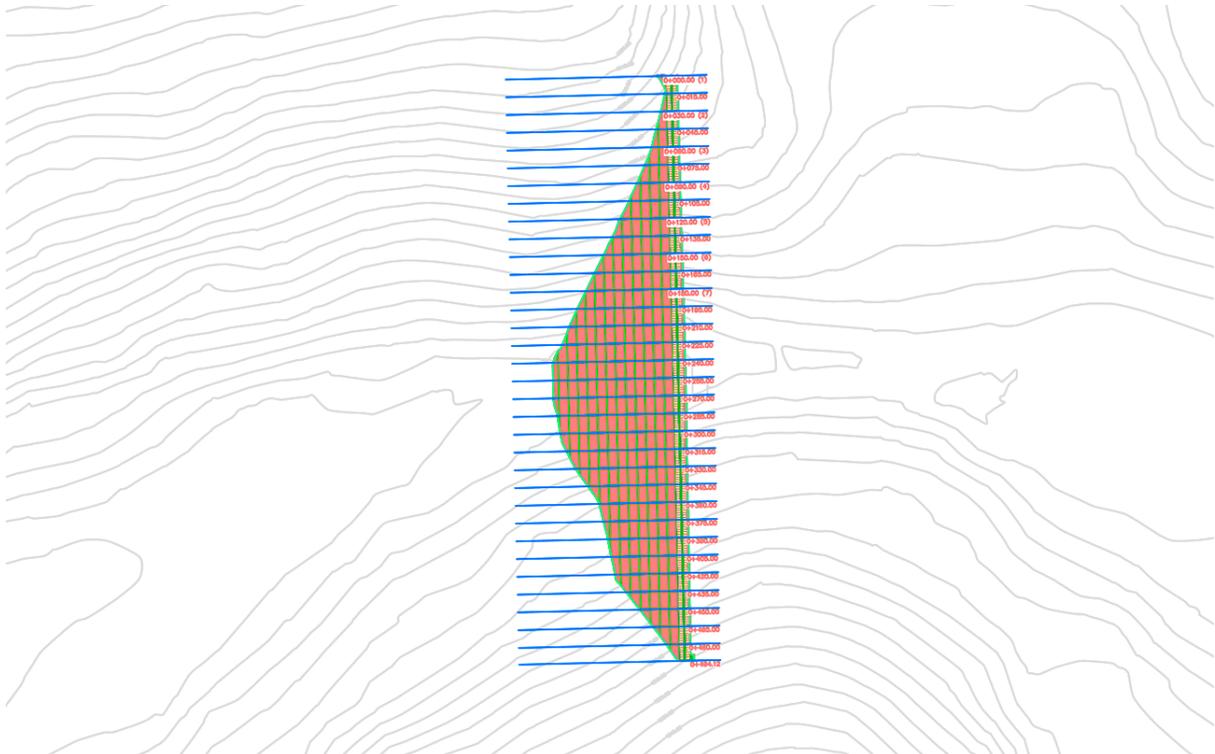


Figura 4.10: Totalidad de Secciones Transversales Presa HCR La Tranca, Civil 3D

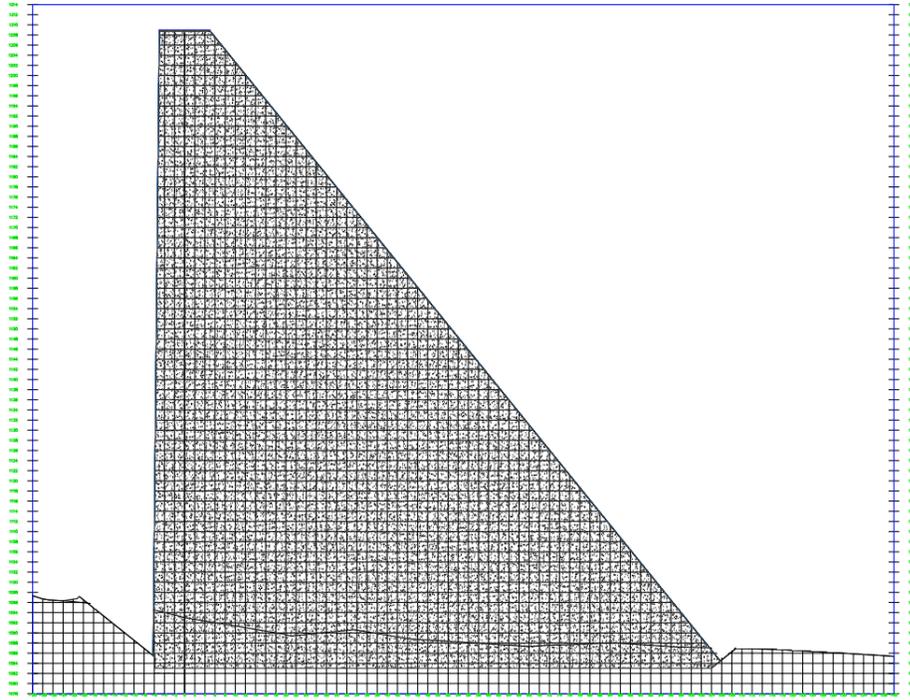


Figura 4.11: Sección Transversal Ejemplo Presa HCR La Tranca, Civil 3D

- **Comparación con Presa CFRD La Tranca Civil 3D:**

Para comparar en igualdad de condiciones los costos de la construcción de ambas presas, también se modeló una presa CFRD en el lugar de emplazamiento definido. El muro de esta contempla, tal como se definió en los estudios previos realizados por MN Ingenieros, una pendiente aguas arriba 1,5/1 (H:V) y aguas abajo 1,6/1 (H:V). En las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se pueden apreciar la proyección de la presa CFRD en el sitio La Tranca, la totalidad de secciones transversales de la presa CFRD y un ejemplo de una de estas secciones transversales de la presa CFRD respectivamente.

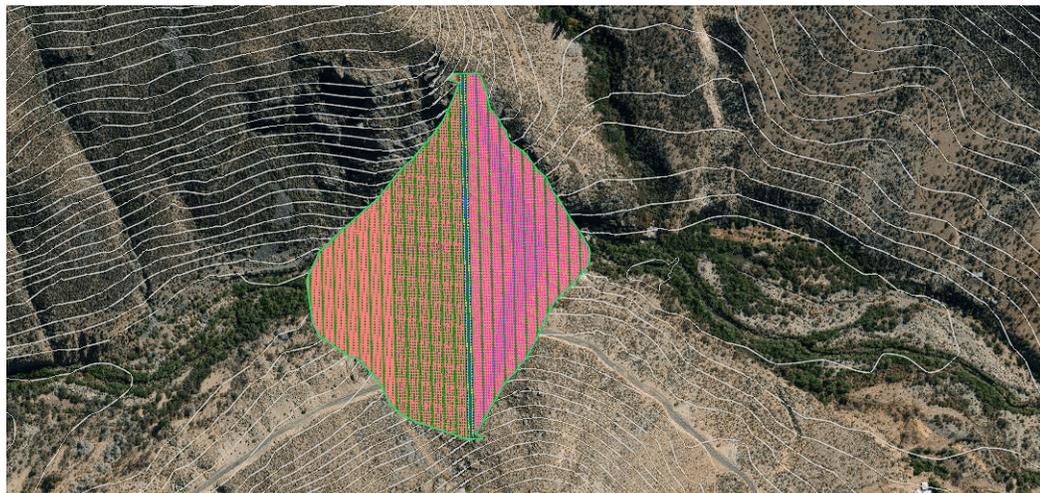


Figura 4.12: Proyección presa de CFRD La Tranca, Civil 3D

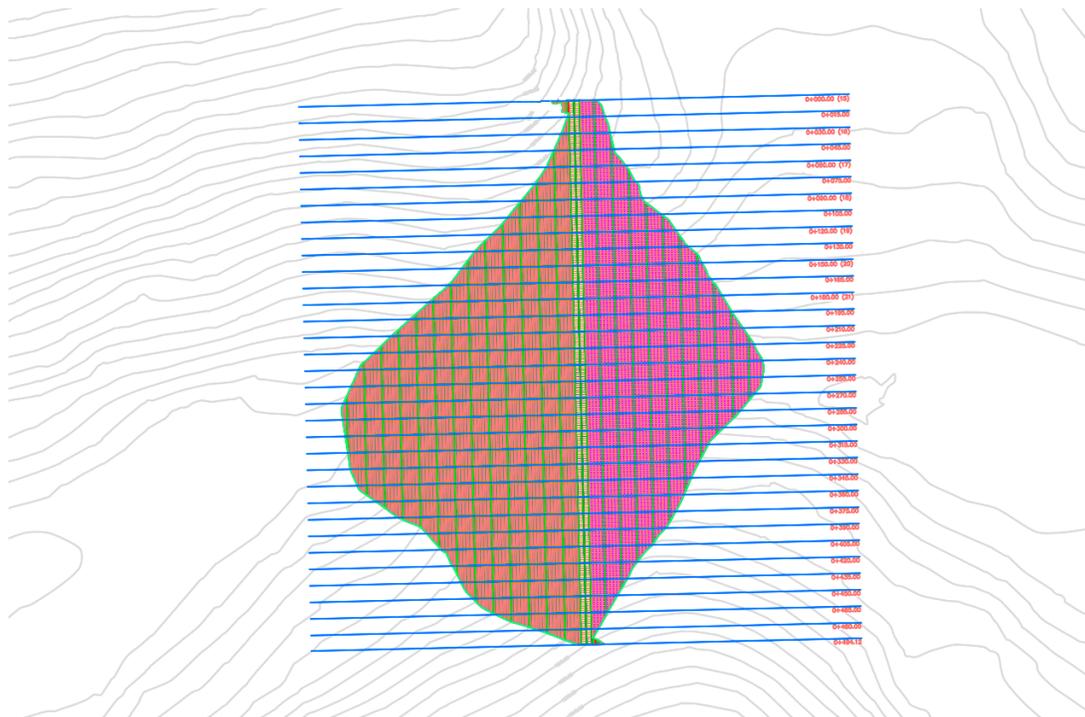


Figura 4.13: Totalidad de Secciones Transversales Presa CFRD La Tranca, Civil 3D

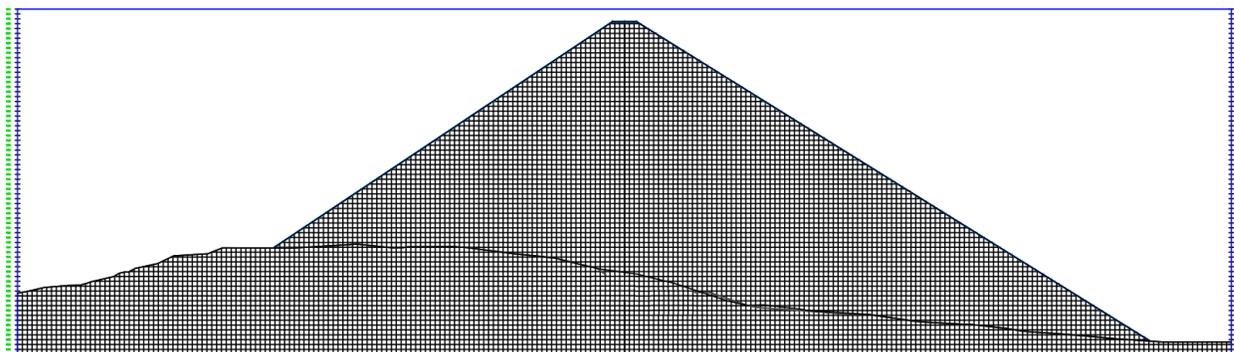


Figura 4.14: Sección Transversal Ejemplo Presa CFRD La Tranca, Civil 3D

### 4.6.3. Modelado Presa HCR Murallas Viejas

A continuación se presentan los principales resultados del modelado en Civil 3D de la presa de HCR Murallas Viejas.

- **Topografía del sitio El Quillay:**

En la figura 4.15 se aprecia la topografía del sitio El Quillay, en este podemos observar que las curvas de nivel donde se emplazará la presa varían entre los 1470 m.s.n.m y 1690 m.s.n.m



Figura 4.15: Topografía Sitio El Quillay, Global Mapper

- **Perfil Longitudinal, eje de emplazamiento Presa HCR Murallas Viejas:**

Con respecto al perfil longitudinal, la cota del terreno del valle se encuentra en su mayoría en la cota 1515 m.s.n.m, considerando el análisis geotécnico del lugar en donde se determinó que la roca en el valle se encontraba a 30 metros de profundidad, para el modelado en Civil 3D se contemplará que esta se encuentra en la cota 1485 m.s.n.m. En la figura 4.16 se aprecia el perfil longitudinal del terreno del eje de emplazamiento.

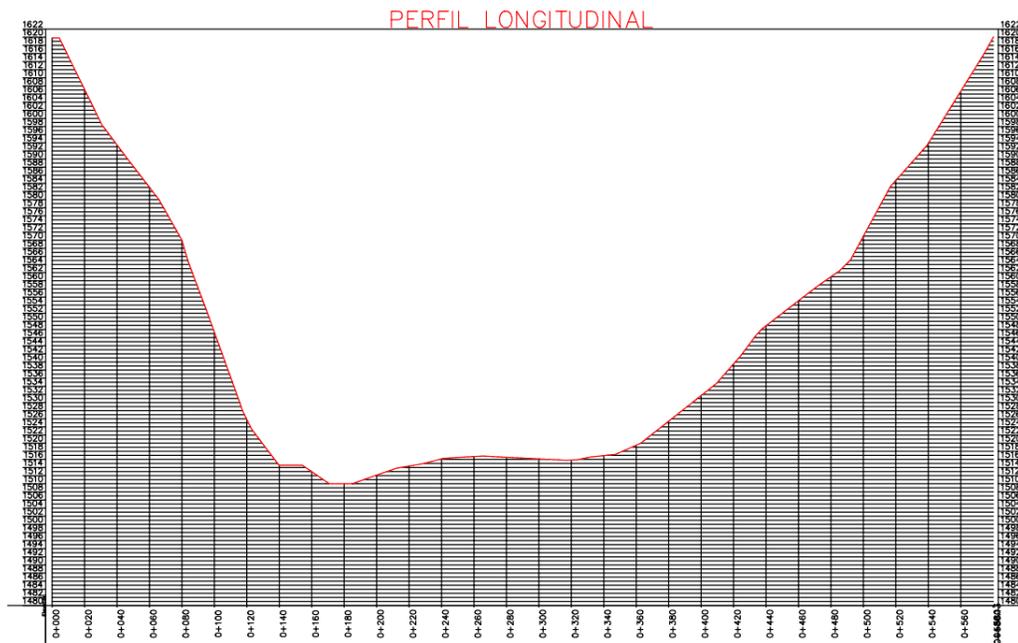


Figura 4.16: Perfil longitudinal del eje de emplazamiento Murallas Viejas, Civil 3D

- **Proyección en el sitio Presa HCR Murallas Viejas:**

En la figura 4.17 se puede apreciar una vista en planta del sitio con la proyección de la presa de HCR.

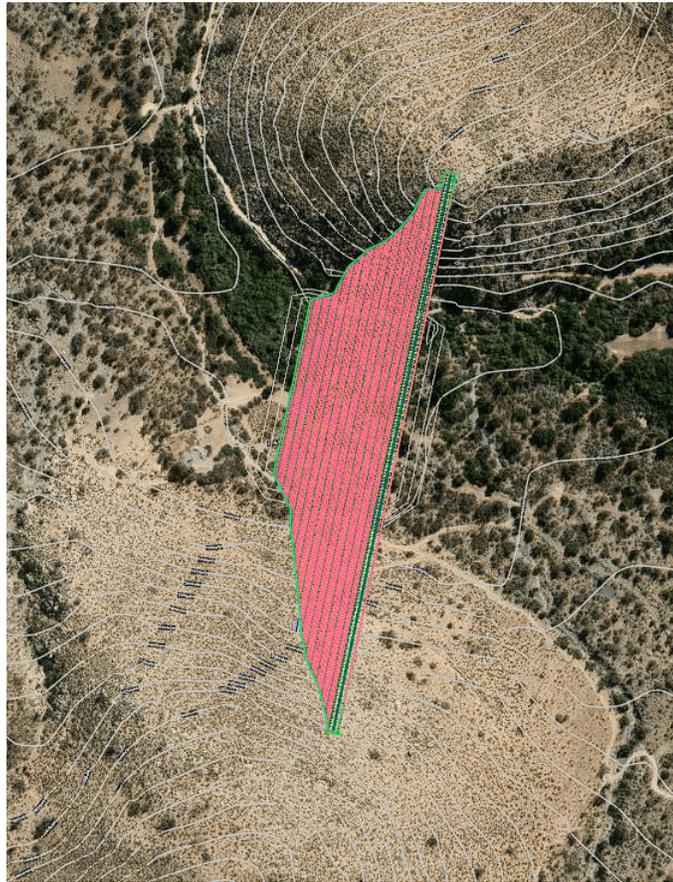


Figura 4.17: Proyección presa de HCR Murallas Viejas, Civil 3D

En la tabla 4.31 se puede observar la longitud del muro.

Tabla 4.31: Largo del Muro Murallas Viejas

Longitud [m]	580
--------------	-----

- **Cálculo de Volumen Presa Civil 3D:**

Se definieron 40 secciones transversales distribuidas cada 15 metros a lo largo de los 580 m de longitud del muro para obtener un cálculo del volumen más preciso de la presa Murallas Viejas. En la figura 4.18 y 4.19 se pueden apreciar la totalidad de secciones transversales y la sección transversal donde se alcanza la altura máxima de la presa respectivamente.

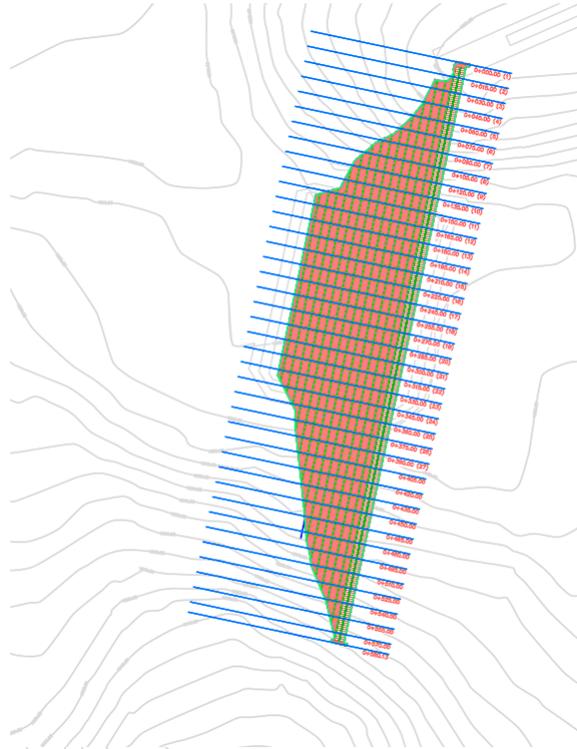


Figura 4.18: Totalidad de Secciones Transversales Presa HCR Murallas Viejas, Civil 3D

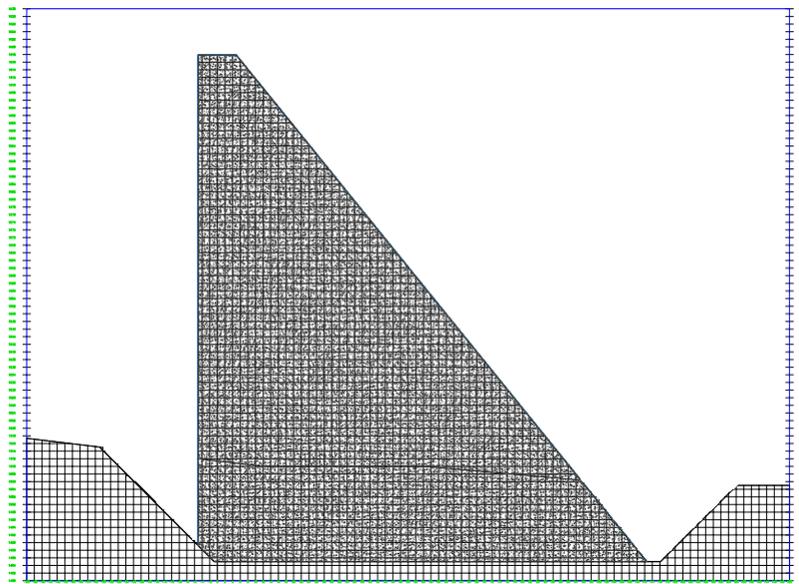


Figura 4.19: Sección Transversal Ejemplo Presa HCR Murallas Viejas, Civil 3D

- **Comparación con Presa CFRD Murallas Viejas Civil 3D:**

Al igual que con la presa del embalse La Tranca, también se modeló una presa CFRD en el lugar de emplazamiento definido para el embalse Murallas Viejas, el muro de esta

contempla tal como se definió en los estudios previos realizados por MN Ingenieros, una pendiente aguas arriba 1,5/1 (H:V) y aguas abajo 1,6/1 (H:V). En las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se pueden apreciar la proyección de la presa CFRD en el sitio El Quillay para el embalse Murallas Viejas, la totalidad de secciones transversales de la presa CFRD y un ejemplo de una de estas secciones transversales de la presa CFRD respectivamente.

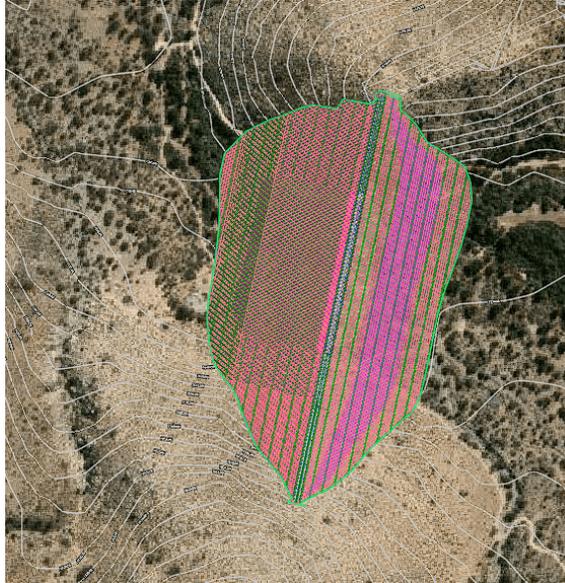


Figura 4.20: Proyección presa de CFRD Murallas Viejas, Civil 3D

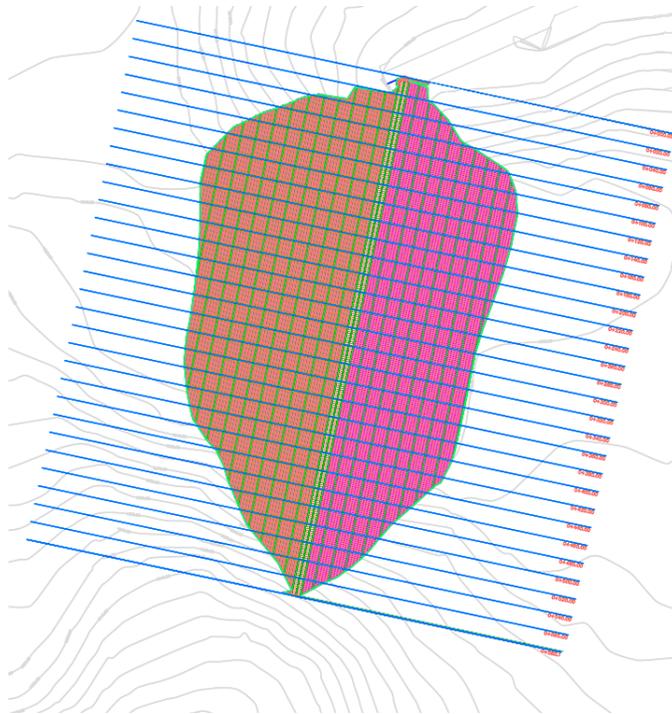


Figura 4.21: Totalidad de Secciones Transversales Presa CFRD Murallas Viejas, Civil 3D

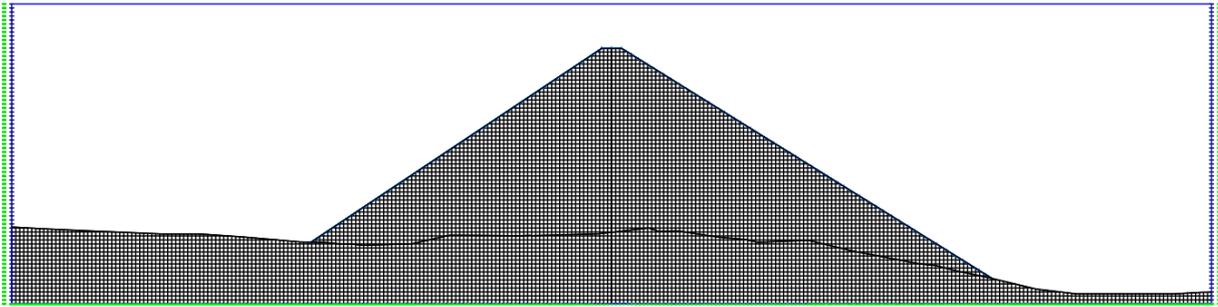


Figura 4.22: Sección Transversal Ejemplo Presa CFRD Murallas Viejas, Civil 3D

#### 4.6.4. Cubicación Final Presa HCR La Tranca

A continuación en la tabla 4.32 se entregan los resultados de la cubicación para la presa de HCR del embalse La Tranca obtenida con el software Civil 3D, las características geométricas principales de esta, y el volumen de relleno de la presa CFRD.

Tabla 4.32: Cubicación y características geométricas Presa HCR La Tranca

<b>Cubicación Presa HCR La Tranca</b>	
Hormigón Convencional [ $m^3$ ]	42.542
Hormigón Compactado con Rodillo [ $m^3$ ]	1.468.844
Excavación Fondo del Valle [ $m^3$ ]	35.911
Excavación Laderas [ $m^3$ ]	69.282
Excavación Total [ $m^3$ ]	105.193
Longitud del Muro [m]	494
Altura del Muro [m]	126
Cota de Coronamiento del Muro [m.s.n.m]	1.209
Volumen Presa CFRD [ $m^3$ ]	4.285.015

Podemos observar en la tabla 4.32 que a pesar de no haber emplazado la presa de HCR en el lugar exacto en el cual se emplazó en el estudio realizado por la consultora MN ingenieros, se obtuvieron valores muy similares, esto lo podemos notar principalmente con la presa de CFRD que se modeló en Civil 3D donde se obtuvieron 4.285.015  $m^3$  de material de relleno los cuales son bastante parecidos a los 4.300.000  $m^3$  de material de relleno definido en los estudios de la consultora. En definitiva, las cantidades obtenidas para la presa de HCR, hubiesen sido del mismo orden si la presa se hubiese emplazado en el lugar exacto definido previamente.

#### 4.6.5. Cubicación Final Presa HCR Murallas Viejas

A continuación en la tabla 4.33 se entregan los resultados de la cubicación para la presa de HCR del embalse Murallas Viejas obtenida con el software Civil 3D, las características geométricas principales de esta, y el volumen de relleno de la presa CFRD.

Tabla 4.33: Cubicación y características geométricas Presa HCR Murallas Viejas

<b>Cubicación Presa HCR Murallas Viejas</b>	
Hormigón Convencional [ $m^3$ ]	72.554
Hormigón Compactado con Rodillo [ $m^3$ ]	2.585.515
Excavación Fondo del Valle [ $m^3$ ]	764.281
Excavación Laderas [ $m^3$ ]	98.238
Excavación Total [ $m^3$ ]	862.519
Longitud del Muro [m]	580
Altura del Muro [m]	133
Cota de Coronamiento del Muro [m.s.n.m]	1.618
Volumen Presa CFRD [ $m^3$ ]	6.330.517

Podemos observar en la tabla 4.33 que el volumen de relleno obtenido en el programa Civil 3D para la presa CFRD fue de 6.330.517 m<sup>3</sup>, mientras que el volumen de relleno estimado en el estudio de la consultora MN Ingenieros fue de 5.500.000 m<sup>3</sup>, si bien los valores no son iguales, sí son del mismo orden, y la diferencia existente puede deberse mayormente –tal y como se mencionó previamente en el informe– a que la topografía que se utilizó para este estudio corresponde a la de Google Earth, mientras que la consultora realizó su propia topografía del lugar.

# Capítulo 5

## Materiales y Dosificaciones para una presa de HCR

En el siguiente capítulo se definen todos los materiales que componen el HCR, como también las principales consideraciones al momento de dosificar las mezclas de HCR tales como su trabajabilidad, resistencia, segregación y permeabilidad. Además, se presentan distintas dosificaciones utilizadas en varias presas de HCR alrededor del mundo, esto con el fin de definir a manera general posibles dosificaciones para las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas.

Todas las recomendaciones e información sobre la materialidad del HCR y sus dosificaciones presentes en el siguiente capítulo, están realizadas en base a la revisión y estudio: el reporte ACI 207.5R-11 del Instituto Americano del Concreto para presas de Hormigón Compactado con Rodillo, el Boletín Informativo 126 y 177 de la Comisión Internacional de Grandes Presas, además de la experiencia en la construcción de las presas Pangué y Ralco como el estudio del ingeniero Luis Uribe, "Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del hormigón compactado con rodilla en la construcción de presas".

### 5.1. Materiales del HCR

El HCR está compuesto por los siguientes materiales: cemento, áridos y aditivos puzolánicos, a los cuales se le añade una pequeña dosis de agua. Lograr una correcta dosificación y mezcla homogénea de estos componentes permite obtener propiedades ideales en el HCR, tales como: su resistencia, trabajabilidad, durabilidad, permeabilidad y el soporte de los equipos de compactación para alcanzar la consolidación esperada. En la figura 5.1 se pueden observar los materiales que componen una mezcla de HCR.



Figura 5.1: Materiales de una mezcla de HCR

### 5.1.1. Materiales Cementicios

Los materiales cementicios de una mezcla de HCR están integrados principalmente por cemento Portland y aditivos como las escorias siderúrgicas, puzolana natural o cenizas volantes. Debemos tener en cuenta que la proporción de cemento Portland en la mezcla está dada fundamentalmente por la razón agua/cemento definida para la resistencia de la presa. Con respecto los aditivos recién mencionados, estos cuando son utilizados cumplen distintas funciones, entre ellas retardar el fraguado de la mezcla, lo que permite compactar una mayor cantidad de capas de HCR sin verse afectada su unión, o también en caso de ser necesario compensar la falta de finos de una mezcla.

A continuación, se presenta una breve descripción los elementos que componen los materiales cementicios:

- **Cemento Portland:** Es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón, y se obtiene por la pulverización del clinker portland con la adición de una o más formas de yeso (sulfato de calcio).
- **Escoria siderúrgica:** Es un subproducto de la fundición de metales, estas se obtienen por el templado o enfriamiento brusco a la salida de los altos hornos.
- **Puzolana natural:** Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades geológicamente recientes.
- **Cenizas volantes o puzolanas artificiales:** Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

Respecto a la normativa que deben cumplir los materiales que conforman el HCR, debido a que es un material que ha sido utilizado poco en nuestro país, no existe una norma nacional exclusiva para este mismo, por lo que se aplica la misma norma de cementos tradicionales. A pesar de lo anterior, el Instituto Americano del Concreto realizó un reporte sobre el HCR, en este se menciona que el HCR se puede elaborar con cualquier tipo de cemento Portland que se encuentre en las normas ASTM ASTM C150/C150M, C595/C595M, C1157/C1157M y las normas aplicables de AASHTO, u otras normas internacionales.

Otra consideración respecto al cemento a utilizar, es que por lo general, en caso de estar localmente disponibles, se recomiendan cementos con una menor generación de calor de hidratación. Normalmente, los cementos Portland, cementos Portland puzolánicos y cementos Portland siderúrgicos, suelen ser los más utilizados en la construcción de presas de HCR. Es probable que los cementos con una baja generación de calor de hidratación alcancen las resistencias de diseño de una manera más lenta que los cementos portland corrientes, pero a largo plazo suelen alcanzar mayores resistencias que estos.

En la figura 5.2 se puede apreciar el tipo de cemento utilizado para la construcción de 157 presas de HCR hasta 1996. También cabe mencionar que para la construcción de las presas Pangue y Ralco en Chile se utilizó cemento Portland puzolánico.

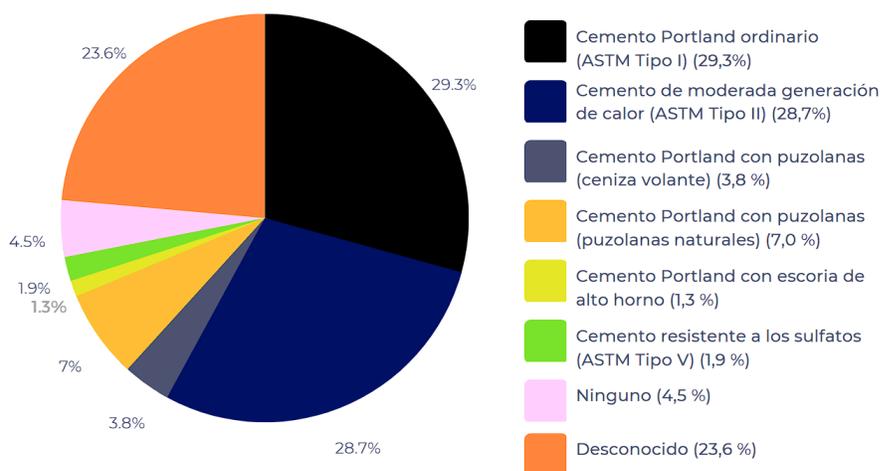


Figura 5.2: Tipo de Cemento utilizado en la construcción de presas, Fuente: Boletín 126. Comisión Internacional de Grandes Presas

Con respecto a las puzolanas que recomienda el Instituto Americano del Concreto son las que cumplen con las especificaciones de la ASTM C618, específicamente la Clase C, Clase F y Clase N han sido utilizadas con éxito en la elaboración de presas de HCR. Tal y como se mencionó anteriormente, la adición de puzolanas en las mezclas de HCR suelen cumplir con los siguientes propósitos:

1. Reemplazo parcial del cemento para reducir la generación de calor.
2. Reemplazo parcial del cemento para reducir costos.
3. Aditivo para proporcionar finos suplementarios para la trabajabilidad de la mezcla y el volumen de pasta.

Por lo general el HCR se suele clasificar según la cantidad de material cementicio que contenga su mezcla, entre las clasificaciones distinguimos cuatro principales las cuales son:

- **HCR con bajo contenido de materiales cementicios:** corresponde a la mezcla cuya cantidad de materiales cementicios es menor a 100 kg/m<sup>3</sup>, suele designarse como LCRCC.

- **HCR con medio contenido de materiales cementicios:** corresponde a la mezcla cuya cantidad de materiales cementicios se encuentra entre 100 kg/m<sup>3</sup> y 150 kg/m<sup>3</sup>, suele designarse como MCRCC.
- **HCR con alto contenido de materiales cementicios:** corresponde a la mezcla cuya cantidad de materiales cementicios es mayor a 150 kg/m<sup>3</sup>, suele designarse como HCRCC.
- **HCR elaborado con la técnica japonesa RCD :** corresponde a una mezcla específica de Japón, en la cual la cantidad de materiales cementicios se encuentra entre 120 kg/m<sup>3</sup> y 130 kg/m<sup>3</sup>.

En líneas generales, las mezclas de HCR con alto contenido de materiales cementicios presentan una alta trabajabilidad al momento de consolidar la mezcla, en cambio su contraparte las mezclas con bajo contenido de materiales cementicios presentan una baja trabajabilidad. También se debe mencionar que las mezclas de HCR con alto contenido de materiales cementicios alcanzan resistencias a la compresión y tracción mayores en comparación a los otros tipos de mezclas de HCR. Considerando esto, se puede explicar que hoy en día el tipo de HCR más utilizado alrededor del mundo para la construcción de presas es el HCRCC. En Chile, tanto para la construcción de la presa Pangué y Ralco se utilizaron mezclas HCRCC.

Basándonos en lo recién mencionado, podemos suponer que la mejor opción para la construcción de las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas es la utilización de HCR con alto contenido de materiales cementicios, esto debido a que además de que en Pangué y Ralco se utilizó este tipo de HCR, Chile es un país sísmico, por lo que las distintas resistencias de la presa, tienen un papel más importante en comparación a presas construidas en otras regiones del mundo.

### 5.1.2. Áridos

A continuación, se explican las principales recomendaciones respecto a los áridos que contiene el HCR. Mayormente los áridos abarcan el 80% del volumen del HCR, y su objetivo principal es estructurar el esqueleto del hormigón, lo cual disminuye los costos y las retracciones volumétricas de la mezcla, según Uribe. Por la razón anterior es de suma importancia la correcta selección de estos, el control de sus propiedades y granulometría son factores esenciales que influirán en la calidad de la mezcla de HCR. Con respecto a la calidad de estos, se han utilizado de manera exitosa en la construcción de presas de HCR, tanto agregados que cumplen con los estándares normales para los hormigones convencionales, como también agregados que no cumplen con estos.

Hay dos características de los agregados que tienen una importancia muy grande sobre las propiedades de las mezclas de HCR. La primera corresponde al tamaño máximo del árido grueso, el cual debe elegirse para evitar posibles problemas de segregación de la mezcla al momento de transportarla, y a su vez establecerá el espesor de las capas de HCR, lo que, de forma indirecta definirá la energía de compactación para alcanzar el grado de compactación definido. La segunda hace referencia al contenido de material fino de los áridos, ya que este permite mejorar la trabajabilidad del HCR. A manera general una mezcla de HCR con presencia de áridos más gruesos puede presentar ventajas económicas si es que se logra evitar la

segregación.

Por consiguiente, tal y como se mencionó, para evitar problemas de segregación debemos tener muy en cuenta —respecto al árido grueso— que la mayoría de proyectos de presas de HCR utilizan tamaños máximos de áridos de entre 37,5 mm a 75 mm. Por lo general no se suele utilizar tamaños mayores a 75 mm, ya que el costo de controlar los problemas de segregación no suele compensar el ahorro por la utilización de áridos más gruesos en la mezcla. Con la información investigada sabemos también que una gran cantidad de proyectos han utilizado tamaños máximos nominales de áridos de entre 40 mm y 50 mm. Utilizar un tamaño máximo de 40 mm para la construcción de presas de HCR es muy común, las presas de HCR Pangué y Ralco en Chile, utilizaron este como su tamaño máximo nominal de áridos. Como punto final con respecto al árido grueso, su tamaño viene determinado principalmente por los requisitos de colocación y compactación de la mezcla, dependiendo de esto en un proyecto u otro se determinará el tamaño máximo del árido.

En relación al árido fino, su gradación influye en la compactibilidad del HCR, y también afecta a los requisitos de agua y material cementante. Los porcentajes de arena que suelen utilizarse en proyectos de presas de HCR, varían entre el 30 % y el 40 % del total de los áridos en peso. A manera general muchos estudios afirman que aumentar el contenido de árido fino en una mezcla de HCR disminuye la tendencia de esta misma a segregarse.

En cuanto a los finos que pasan el tamiz No 200, estos cumplen la función de reducir el volumen de vacíos en los áridos finos, además estos afectaran la compactibilidad de la mezcla de HCR, por ende pueden influir en la cantidad de pasadas del rodillo vibratorio. En mezclas de HCR con bajo contenido de cemento es necesario utilizar una mayor cantidad de finos para que estos llenen los espacios vacíos en los agregados. La cantidad de finos aportados por los áridos suele oscilar entre el 3 % y 8 %, pero este valor unido al cemento y el material fino que aportan las adiciones podría aumentar hasta un 12 % o 20 %.

### 5.1.2.1. Granulometrías utilizadas en presas de HCR

En seguida en la tabla 5.1 se presentó un rango común de granulometrías combinadas utilizadas en mezclas de HCR con una alta trabajabilidad, por lo general se busca que la curva granulométrica sea continua y suave, esto con el fin de obtener una mezcla más uniforme.:

Tabla 5.1: Granulometrías combinadas de áridos típicas en mezclas de HCR de alta trabajabilidad, Fuente: Boletín 177. Comisión Internacional de Grandes Presas

Tamiz (mm)	50	40	25	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,6	0,3	0,15	0,075
Tamiz (ASTM)	#2"	#1 1/2"	#1"	#3/4"	#1/2"	#3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Limites del huso	100 %	86-100 %	69-85 %	60-76 %	48-64 %	41-57 %	28-43 %	19-33 %	13-25 %	9-19 %	6-14 %	4-11 %	3-8 %

A continuación en la tabla 5.2, podemos observar distintas granulometrías combinadas de áridos utilizados en algunas presas de HCR construidas alrededor del mundo, entre ellas se encuentra la presa de HCR Pangué construida en Chile.

Tabla 5.2: Granulometrías combinadas utilizadas en presas de HCR alrededor del mundo, Fuente: Boletín 126. Comisión Internacional de Grandes Presas

	Zintel Canyon	Jordao	Shimajigawa	Miyagase	Copperfield	Petit Saut	De Mist Kraal	Upper Stillwater	Santa Eugenia	New Victoria	Pangué	Platanovryssi
Tamaño del tamiz (mm)												
150	-	-	-	100	-			-	-	-	-	-
100	-	-	-	82	-			-	-	-	-	-
75	-	-	100	76	-		100	-	100	-	-	-
62	100	100	-	74	-	-	91	-	94	-	-	-
50	98	98	-	70	100	100	81	100	84	-	100	-
38	91	89	76	65	90	90	67	95	74	100	99	100
25	77	78	-	58	-	73	54	-	61	-	86	-
19	70	-	58	51	68	67	46	66	52	70	76	66
9.5	50	62	43	39	54	52	35	45	34	48	61	48
<b>4.75</b>	<b>39</b>	<b>51</b>	<b>33</b>	<b>30</b>	<b>44</b>	<b>37</b>	<b>29</b>	<b>35</b>	<b>24</b>	<b>33</b>	<b>41</b>	<b>37</b>
2.4	25	40	30	26	36	30	22	26	12	26	24	29
1.2	18	26	23	19	28	25	18	21	6	21	20	21
0.6	15	18	14	11	21	20	16	17	3	15	15	-
0.3	12	15	8	6	15	14	14	10	2	7	6	8
0.15	11	10	3	2	10	11	6	2	1	3	2	-
0.075	9	8	0	0	7	7	2	0	0	0	1	-

Podemos observar en la tabla de granulometrías que el porcentaje de árido grueso (gravas) en promedio es del orden del 64 %, el promedio de porcentaje de árido fino (arenas) es del 33 %, mientras que el porcentaje de finos, es de alrededor del 3 %. Con esta información podemos obtener una aproximación cercana de la cantidad de arenas y gravas que se utilizan en la construcción de una presa de HCR.

## 5.2. Dosificación del HCR

Para la definición de la dosificación del HCR, hay que tener en cuenta que a pesar de tener una distinta composición en comparación a un hormigón convencional, el HCR endurecido tiene propiedades similares a un hormigón convencional, pese a esto existen algunas diferencias, debido a que una mezcla de HCR debe contener una consistencia que le permita soportar un rodillo vibratorio que la compacte. Las mezclas de HCR suelen utilizar un mayor porcentaje de puzolana, lo cual demora la velocidad de ganancia de resistencia, además su trabajabilidad y calor en la mezcla también varían entre el HCR y un hormigón convencional. A manera general una mezcla de HCR utiliza menor contenido de cemento que un hormigón convencional, y los agregados que contiene pueden variar desde áridos mínimamente procesados hasta áridos completamente procesados, lo que amplía el rango de las propiedades mecánicas que alcanza el HCR endurecido. Cabe recalcar que al momento de diseñar las proporciones de la mezcla para cumplir con los requisitos de resistencia, durabilidad y permeabilidad se deben considerar las propiedades in situ del HCR, por sobre las propiedades obtenidas en laboratorio.

Es claro que al momento de diseñar una presa de HCR su dosificación depende mucho de los requisitos particulares de cada lugar, pese a aquello se pueden estimar rangos de resistencia alcanzados por distintas dosificaciones. Se han construido presas de HCR con un contenidos de material cementicio muy variados, que van desde 59 kg/m<sup>3</sup> hasta 297 kg/m<sup>3</sup>, para la construcción de la presa Ralco en Chile se utilizaron dosificaciones con un conteni-

do de material cementicio de entre 135 kg/m<sup>3</sup> y 189 kg/m<sup>3</sup>, y gran cantidad de proyectos alrededor del mundo se han construido con contenidos de material cementicio de entre 105 kg/m<sup>3</sup> y 180 kg/m<sup>3</sup> los cuales han alcanzado resistencias a la compresión del orden de 14 MPa y 21 MPa a una edad de 90 días a 1 año.

Tal y como se mencionó previamente, el tipo de mezcla de HCR que se desee implementar en el proyecto afectará directamente en las resistencias que se alcancen, es por esto que a continuación se presenta la tabla 5.3 con las resistencias tipo dependiendo del tipo de mezcla:

Tabla 5.3: Parámetros indicativos de resistencias de presas de HCR, Fuente: Boletín 177, Comisión Internacional de Grandes Presas

Resistencia a 365 días (Mpa)	Tipo de HCR			
	LCRCC	MCRCC	HCRCC	RCD
Compresión				
Típica	12,5	17	23,5	17,3
Rango	7,5-16	7,5-30	11,0-40	12,0-25
Tracción directa de la matriz				
Típica	0,6	0,9	1,5	-
Rango	0,3-1,2	0,5-2,0	0,7-2,9	0,8-1,8
Traccion directa en juntas				
Típica	0,4	0,65	1,1	-
Rango	0,2-0,7	0,3-1,1	0,6-1,9	-

A pesar de lo anterior, las resistencias no son el único parámetro que se considera para dosificar una mezcla de HCR, es por esto que a continuación se presentaran los factores principales al momento de dosificar una mezcla de HCR:

### 5.2.1. Factores principales

Para obtener una mezcla óptima de HCR se debe lograr un equilibrio entre que la mezcla tenga buenas propiedades mecánicas y a su vez que la trabajabilidad sea lo suficientemente buena para facilitar la colocación del HCR. Es por esto que se deben considerar los siguientes factores:

- **Trabajabilidad:** Una trabajabilidad suficiente es clave para lograr la compactación del HCR. La trabajabilidad de las mezclas de HCR se mide normalmente en una mesa vibratoria con un aparato Vebe, que es una variación del cono de Abrams. Se estima que una mezcla de HCR con una consistencia Vebe de entre 10 a 45 segundos tiene la trabajabilidad suficiente para su compactación. En caso de que la mezcla de HCR no pueda medirse mediante un aparato Vebe (Esto puede ocurrir cuando el contenido de cemento de la mezcla es muy bajo), la trabajabilidad debe medirse mediante observaciones durante la colocación y compactación del HCR. Cuando los tiempos Vebe son del orden de 10 a 26 segundos, significa que el HCR tiene una buena fluidez y trabajabilidad, esta va disminuyendo a medida que aumenta el tiempo Vebe.

- **Resistencia:** Las resistencias del HCR dependen principalmente de tres factores fundamentales, estos son: la calidad y gradación de los agregados, la proporción de cemento, puzolana y agua, y el grado de compactación de la mezcla. En la mayoría de las mezclas de HCR, al igual que en un hormigón convencional, la resistencia a la compresión es una función de la relación agua/cemento. Cabe mencionar que la resistencia de diseño no está determinada por las tensiones de compresión de la presa, sino más bien por la resistencia a la tracción y al corte. A pesar de esto, la resistencia a la compresión del HCR es considerada el método más adecuado para medir la uniformidad y calidad del hormigón, esta se mide a través de probetas cilíndricas o cúbicas, por lo que finalmente se diseña una resistencia a la compresión en función de la resistencia necesaria para satisfacer las tensiones de compresión, tracción y corte. Es importante mencionar que la mezcla debe ser capaz de cumplir la resistencia de diseño más un margen basado en la variación esperada de la resistencia.
- **Segregación:** Evitar la segregación de las mezclas de HCR es de vital importancia, ya que si el material se segrega durante el transporte, el extendido y la colocación, las propiedades de esta se verán reducidas, por lo que serán inferiores a los valores de diseño. Para evitar la segregación es muy importante producir una mezcla cohesiva y tomar todas las precauciones para minimizar la segregación durante la manipulación del HCR. Una mezcla con agregados bien graduados, y una cantidad de contenido fino mayor que la cantidad de hormigón convencional es clave para evitar la segregación. Las mezclas con mayor contenido de pasta suelen ser más cohesivas y menos propensas a segregarse, que las mezclas con menor contenido de pasta.
- **Permeabilidad:** Una mezcla de HCR con un volumen de pasta más finos del 18 al 22 % en masa alcanzará un nivel de impermeabilidad similar al de un hormigón convencional. El principal problema con respecto a la permeabilidad en las presas de HCR, se encuentra en la filtración en las juntas entre las capas. Conseguir una estanqueidad entre las juntas de las capas, vale decir, la capacidad de mantener el agua en su superficie, y que esta no penetre, es vital. Las mezclas con alto contenido cementante o alta trabajabilidad se adhieren bien a las otras capas frescas, en cambio, las mezclas con un bajo contenido de cementante o baja trabajabilidad tienen problemas para esto, por lo que se hace necesario el uso de mortero de relleno entre capas.
- **Generación de Calor:** Debido a que el HCR se utiliza generalmente en obras civiles de gran envergadura, donde los materiales cementates generan calor de hidratación, es de suma importancia minimizar este. Para esto es clave realizar pruebas de calor de hidratación en diferentes porcentajes de cemento y puzolana, para así, escoger la combinación que genere el mínimo calor de hidratación. Es importante mencionar que no debe utilizarse más cemento del necesario para alcanzar la resistencia requerida.

### 5.2.2. Metodologías de dosificación del HCR

Existen distintas formas de dosificar una mezcla de HCR, en general estas formas difieren principalmente debido a la ubicación, materiales, requisitos de diseño, equipo, colocación y tiempo de cada uno. A manera general se emplean métodos por aproximaciones sucesivas, estas sucesiones inician en base a una dosificación tentativa la cual se va modificando dependiendo de los resultados, con estos parámetros se realizan terraplenes de prueba con los que

se van verificando los distintos requisitos de diseño.

A manera general, todas las metodologías de dosificación se basan en dos grandes tendencias de diseño, las cuales son la filosofía de suelos o geotecnia y la filosofía del hormigón.

- **Filosofía de suelos:** Esta tendencia de diseño se basa principalmente en considerar al HCR como un suelo enriquecido con cemento, por lo tanto, su diseño se enfoca en las relaciones de humedad y densidad de este. Por esta razón, este método se basa en determinar el contenido de humedad óptimo del HCR para una determinada energía de compactación. Generalmente, los contenidos de material cementicio obtenidos con esta filosofía son menores a 100 kg/m<sup>3</sup>, se obtienen valores de cohesión en gran medida menores a 1,4 MPa. Con este método no se llenan todos los huecos de la mezcla dejados por la combinación de áridos.
- **Filosofía del hormigón:** Esta tendencia de diseño se basa principalmente en considerar al HCR como un hormigón, y que contiene suficiente pasta para llenar todos los huecos de la mezcla dejados por la combinación de áridos, logrando que esté completamente compactada. Por lo anterior, su criterio de diseño es minimizar la razón agua/cemento, así como también otras propiedades de un hormigón convencional. Generalmente, los contenidos de material cementicio obtenidos con esta filosofía son mayores a 100kg/m<sup>3</sup>, se obtienen valores de cohesión en gran medida mayores a 1,4 MPa.

### 5.2.3. Dosificaciones tipo utilizadas en presas de HCR

A continuación en la tabla 5.4 y 5.5 se puede observar la dosificación inicial utilizada en la presa Pangue en Chile y la dosificación con la mezcla de mayor contenido cementicio en la presa Ralco en Chile. Mientras que en la tabla 5.6 se puede observar la resistencia de compresión y tracción alcanzada a los 7, 28, 90, 180 y 365 días, de distintas muestras de HCR la presa Pangue, y en la tabla 5.7 se pueden observar las tracciones alcanzada en la presa Ralco.

Tabla 5.4: Dosificación Inicial Presa Pangue, Fuente: Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del HCR, Luis Uribe

Presa	Año	Tamaño Máximo Árido (mm)	Agua	Cemento	Puzolana	Árido Fino	Árido Grueso
			(kg/m <sup>3</sup> )				
Pangue	1996	40	145	125	55	603	1431

Tabla 5.5: Dosificación mezcla de HCR con más contenido cementicio en la Presa Ralco, Fuente: Características del diseño y construcción de la presa Ralco en Chile, Luis Uribe

Presa	Año	Tamaño Máximo Árido (mm)	Agua	Cemento	Puzolana	Filler	Árido Fino	Árido Grueso
			(kg/m <sup>3</sup> )					
Ralco	2004	40	145	133	57	60	755	1177

Tabla 5.6: Resistencias a Compresión y Tracción Presa Pangué, Fuente: Evaluación y análisis teórico-práctico de una metodología para el diseño del HCR, Luis Uribe

Muestra	Resistencias Cilíndricas (Mpa)									
	Compresión					Tracción				
HCR 1	7	28	90	180	365	7	28	90	180	365
$n^\circ$ muestras	67	67	67	67	6	67	67	67	67	6
$\bar{x}$	6.9	11.0	18.0	21.9	24.2	0.97	1.50	2.38	2.87	3.27
$\sigma$	1.54	2.22	2.76	3.42	4.13	0.23	0.32	0.43	0.54	1.02
HCR 2										
$n^\circ$ muestras	104	104	104	104	10	104	104	104	104	10
$\bar{x}$	8.4	12.9	19.5	21.8	27.1	1.10	1.67	2.45	2.93	3.50
$\sigma$	1.44	2.09	2.79	2.94	3.50	0.22	0.31	0.39	0.45	0.68
HCR 3										
$n^\circ$ muestras	9	9	9	9	-	9	9	9	9	-
$\bar{x}$	7.6	12.5	19.7	24.6	-	1.01	1.63	2.51	3.04	-
$\sigma$	0.86	1.59	1.52	2.58	-	0.13	0.25	0.25	0.50	-

Tabla 5.7: Resistencias a Tracción Presa Ralco, Fuente: Características del diseño y construcción de la presa Ralco en Chile, Luis Uribe

Proporción Material Cementicio (kg/m <sup>3</sup> )	Valores promedio resistencia tracción (Mpa)					
	Edad (días)					
	7	28	56	90	180	365
135	1,06	1,55	1,78	2,02	2,51	2,59
165	1,52	2,02	2,19	2,47	2,95	3,30
190	1,67	2,20	-	2,46	2,83	3,65

En las tabla 5.9 y 5.8, podemos observar algunas dosificaciones y resistencias alcanzadas por presas alrededor del mundo.

Tabla 5.8: Dosificaciones utilizadas en presas alrededor del mundo, Fuente: ACI 207.5R-11

Presa	Año	Tamaño Máximo Árido (mm)	Agua	Cemento	Puzolana	Árido Fino	Árido Grueso	Densidad
Al Wehdah	2006	50	25	70	60	910	1365	2530
Al Wehdah	2006	50	25	60	60	910	1370	2525
Camp Dyer	1994	37.5	90	82	81	750	1344	2347
Concepcion	1990	75	93	90	0	813	1220	2217
Cuchillo Negro	1991	75	135	77	59	944	1213	2429
Galesville	1985	75	113	53	51	777	1519	2513
Galesville	1985	75	113	65	68	765	1495	2513
Middle Fork	1984	75	95	66	0	683	1268	2113
Santa Cruz	1989	50	101	76	75	728	1365	2345
Siegrist	1992	37.5	96	47	47	1140	1216	2548
Siegrist	1992	37.5	96	53	42	1141	1217	2549
Siegrist	1992	37.5	96	59	42	1139	1215	2551
Stacey Spillway	1989	37.5	154	125	62	2076	-	
Stagecoach	1988	50	138	71	77	686	1459	2431
Upper Stillwater	1985	50	94	79	173	729	1292	2367
Upper Stillwater	1985	50	89	94	207	695	1292	2377
Upper Stillwater	1986	50	99	79	173	682	1316	2349
Upper Stillwater	1986	50	100	93	206	682	1264	2345
Urugua-I	1988	75	100	60	0	1247	1297	2705
Victoria	1991	50	107	67	66	810	1505	2555
Willow Creek	1982	75	110	104	0	657	1958	2559
Willow Creek	1982	75	110	104	47	645	1625	2531
Willow Creek	1982	75	107	47	19	666	1681	2520
Willow Creek	1982	37.5	109	187	80	825	1238	2438
Zintel Canyon	1992	63	101	74	0	901	1357	2434
Zintel Canyon	1992	63	112	74	0	941	1407	2533
Zintel Canyon	1992	63	101	178	0	800	1417	2496

En la tabla 5.8, la columna cilindro indica el método de fabricación de la probeta, siendo estos Vebe (VB), Proctor modificado (MP) y Tamper neumático (PT).

Tabla 5.9: Resistencias alcanzadas en presas alrededor del mundo, Fuente: ACI 207.5R-11

Presa	Año	Cilindro	Resistencia compresion (Mpa)				
			7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	365 dias
Al Wehdah	2006	VB	4.1	7.5	14.6	17.3	22.6
Al Wehdah	2006	VB	3.0	5.5	9.8	12.1	18.8
Camp Dyer	1994	VB	6.1	10.1	-	-	25.4
Concepcion	1990	PT	4.0	5.5	7.6	8.8	-
Galesville	1985	PT	2.1	4.0	7.0	-	11.2
Galesville	1985	PT	2.9	5.7	9.4	-	-
Middle Fork	1984	PT	-	8.8	11.4	-	-
Santa Cruz	1989	VB	7.5	18.8	22.2	-	30.5
Siegrist	1992	PT	5.8	9.4	14.6	18.1	20.0
Stacey Spillway	1989	MP	-	18.1	21.4	-	-
Stagecoach	1988	PT	1.5	2.4	-	6.8	8.6
Upper Stillwater	1985	VB	10.8	17.7	24.8	38.5	48.1
Upper Stillwater	1985	VB	14.1	23.6	29.0	38.1	51.0
Upper Stillwater	1985	VB	7.4	12.6	17.9	-	44.1
Upper Stillwater	1985	VB	9.2	15.4	21.4	-	46.5
Urugua-I	1988	PT	-	6.4	8.1	-	9.6
Willow Creek	1982	PT	6.9	12.8	18.3	-	26.1
Willow Creek	1982	PT	7.9	14.2	27.3	-	28.6
Willow Creek	1982	PT	4.0	8.1	11.9	-	18.1
Willow Creek	1982	PT	14.0	23.5	30.8	-	39.9

## 5.3. Mezcla de HCR para presas La Tranca y Murallas Viejas

### 5.3.1. Supuesto general

Con respecto a las dosificaciones de HCR que se definirá para la construcción de las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, debo a que este estudio es a nivel de ingeniería conceptual y además no se tiene acceso a las propiedades mecánicas específicas del sitio en el cual se emplazarán las presas, ni acceso a laboratorios para ensayar posibles mezclas y comenzar un proceso iterativo de la obtención óptima de la mezcla de HCR a utilizar en el proyecto; se decidió utilizar el siguiente supuesto. Se definirá una dosificación tipo en base a las que se han utilizado en la presa Ralco en Chile, esto en parte debido a la disponibilidad de información respecto a sus costos, como también similitud en altura, y solicitudes de diseño, ya que al estar construida en Chile, podemos afirmar que el factor sísmico estuvo muy considerado al momento de diseñarla.

Además, tal y como se ha mencionado a través de este capítulo, la cantidad de materiales cementicios presentes en la mezcla de HCR de la presa Ralco es de un alto contenido, por lo que este tipo de mezcla correspondería a una mezcla tipo HCRCC, el tipo de mezcla más usada en el resto del mundo para presas de estas características y también la mezcla que alcanza mejores propiedades de resistencia y trabajabilidad, por lo que utilizar una dosificación similar sería lógico para las presas de HCR de los embalses La Tranca y Murallas Viejas.

Igualmente, hay que considerar que para muchos proyectos de presas de HCR en el mundo, no solo se ha utilizado un único tipo de HCR, por lo general el contenido cementicio suele disminuirse a medida que se construye la presa, separando la sección en zonas distintas, donde la región basal de la presa es la que contiene mayores cantidades de material cementicio, y la región superior la que contiene menos. Lo que eventualmente reduciría los costos de la construcción de la presa.

También se debe considerar el supuesto de que la mezcla llevara aditivos retardadores de fraguado, ya que en proyectos recientes de construcción de presas de HCR se ha conseguido una mejor unión entre las capas de HCR, esto debido principalmente a la colocación de capas sucesivas de HCR antes de que se alcance el inicio del fraguado, lo que aumenta las tasas de colocación del HCR, y por lo tanto, se reducen los tiempos de construcción.

### 5.3.2. Metodología de dosificación

A pesar de lo anterior, si continuamos trabajando bajo el supuesto de utilizar la dosificación utilizada en la presa Ralco, podemos definir una metodología general de dosificación del HCR para ambas presas, con la cual optimizar la dosificación inicial de Ralco. Esta consiste en considerar un enfoque del HCR como un hormigón (debido a que se tiene en mente utilizar una dosis de cemento mayor a  $100 \text{ kg/m}^3$ ), esta metodología definida en el boletín 126 de la comisión internacional de grandes presas, a grandes rasgos, consistiría en:

1. Optimizar la gradación de los áridos finos y gruesos, con el fin de minimizar los vacíos en cada uno utilizando finos en los áridos finos caso de ser necesario.

2. Elegir una relación pasta/mortero apropiada para que los vacíos existentes en el árido fino estén llenos, o ligeramente sobrellenos.
3. Proporcionar el cemento Portland, el aditivo mineral, el agua y los aditivos para obtener la resistencia requerida.
4. Definir un volumen de árido grueso para obtener la trabajabilidad requerida.
5. Comprobar que exista suficiente material cementicio y una proporción de finos, para proporcionar la permeabilidad requerida.
6. Asegurarse que la proporción árido grueso/fino sea la óptima.
7. Verificar que el calor de hidratación este dentro del rango esperado.
8. Realizar los ajustes y volver a verificar el diseño.

Por lo general, otro factor importante es considerar mezclas de cemento más económicas, esto modificará las proporciones de cemento y aditivo mineral, las cuales se pueden combinar para obtener los mismos requisitos de resistencia pero más económicos.

Es importante mencionar que las presas La Tranca y Murallas Viejas se encuentran muy cercanas a yacimientos de arenas y gravas, tal como se mencionó en el capítulo 3 de este trabajo de título, lo cual facilitaría la elaboración de los áridos de la mezcla de HCR. En caso que estos no fuesen suficientes, se deberá estudiar nuevos yacimientos cercanos para su explotación.

### 5.3.3. Dosificación Final para las presas de HCR de La Tranca y Murallas Viejas

Finalmente, considerando lo expuesto en este capítulo, se escogió la siguiente dosificación para las presas de HCR de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, la cual corresponde a una de las 3 dosificaciones que se utilizaron en la construcción de Ralco (la segunda con el contenido cementicio más alto), esta se puede observar a continuación en la tabla 5.10:

Tabla 5.10: Dosificación mezcla de HCR para los embalses La Tranca y Murallas Viejas

Material	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	145
Cemento	116
Puzolana	49
Filler	85
Árido Fino	755
Árido Grueso	1117

Cabe mencionar que el tamaño máximo del árido grueso será de 40 mm.

# Capítulo 6

## Metodología de Construcción presa de HCR

Una presa de HCR es una obra de ingeniería civil que retiene grandes volúmenes de agua, dado su gran tamaño resulta crucial desarrollar una buena metodología de construcción para su ejecución. Pese a que las presas de HCR y de hormigón convencional pueden tener diseños geométricos y secciones transversales muy similares, la construcción de una presa de HCR es muy diferente a la de una presa de hormigón convencional, ya que a diferencia de estas donde se construye verticalmente en monolitos independientes, la construcción con HCR implica colocar capas delgadas de manera rápida y sucesivamente sobre una gran área, debido a esto y a la utilización de maquinaria pesada para esparcir y compactar las capas, la construcción con HCR contempla tiempos de construcción menores y más eficientes que el hormigón tradicional. En la figura 6.1 se puede observar una comparación gráfica de ambos métodos constructivos.



(a) Construcción presa Pangue con hormigón compactado con rodillo



(b) Construcción presa Sarvsfossen con hormigón convencional

Figura 6.1: Comparativa construcción, HCR vs Hormigón Convencional.

Una de las principales fortalezas de las presas de HCR es su velocidad de construcción, es por esto que los ingenieros se han centrado en desarrollar y perfeccionar métodos y técnicas para la colocación de manera secuencial de capas de HCR. A modo general, estos métodos de colocación se enfocan en colocar las capas antes que el hormigón alcance su fraguado inicial, lo cual mejora la unión entre las capas. También es de suma importancia minimizar los requerimientos energéticos de la transportación de HCR, vale decir que las distancias totales y la exposición al ambiente del HCR sea minimizada, esto se logra ubicando las plantas de

HCR lo más cercanas al eje de emplazamiento de la presa. Es de suma importancia que las tasas de colocación sean respaldadas por las plantas de HCR. Cualquier imprevisto en las plantas puede afectar muy negativamente las tasas de colocación y, por lo tanto, afectar el tiempo de construcción final de la presa, es por esto que hay que tener muy en cuenta todos los factores recién mencionados.

Por las razones anteriores, en el presente capítulo se desarrolla la metodología de construcción de una presa de HCR, en esta se definirán los distintos factores y actividades a tener en cuenta para que la construcción de esta se realice de la mejor manera posible. Para realizar todo lo anterior se utilizó el reporte ACI 207.5R-11 del Instituto Americano del Concreto para presas de Hormigón Compactado con Rodillo, el boletín informativo 126 y 177 de la Comisión Internacional de Grandes Presas y la experiencia nacional en la construcción de la presa de HCR Pangue y Ralco. Los factores que se analizarán y explicarán más en profundidad se presentan a continuación:

- **Producción de áridos, material cementicio y HCR**
- **Sistema de transporte del HCR**
- **Construcción de la presa de HCR**
- **Ensayos recomendados para los materiales y el HCR**
- **Tiempos de construcción**

## **6.1. Producción de áridos, material cementicio y HCR**

En el capítulo anterior se definieron los materiales a utilizar en la construcción de las presas de HCR. Considerando esto, es importante pensar de dónde se obtendrán estos mismos. En general, los proyectos de HCR involucran la explotación de yacimientos cercanos a la obra, así como la instalación de plantas de áridos y HCR cercanas a la misma.

Para la construcción de la presa Ralco y Pangue en Chile, se explotaron yacimientos fluviales cercanos a los lugares del proyecto, de los cuales se obtuvieron los áridos gruesos y finos requeridos para el HCR, estos fueron trasladados a grandes acopios de almacenamiento que existían en la obra. En la presa Pangue el cemento fue proporcionado por la fábrica de cementos Polpaico S.A, quienes estuvieron encargados de elaborar y transportar el cemento hasta la planta de HCR en la obra, donde se fabrica el HCR in situ.

Considerando esto, para las presas de HCR de los embalses La Tranca y Murallas Viejas se tiene considerado realizar un procedimiento similar, ya que, según los estudios previos realizados por la consultora MN ingenieros, específicamente los mencionados en los puntos 3.1.5 y 3.2.5, se puede garantizar la existencia de depósitos fluviales suficientes, que si bien su granulometría considera una gran cantidad de materiales gruesos como bolones y gravas, luego de ser tratados en la planta de áridos que se instalará aportarán con los áridos necesarios para la elaboración del HCR. Las cantidades disponibles en los yacimientos mencionados se presentan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Cantidades disponibles en los Yacimientos

Presa de HCR	Cantidad de áridos disponibles en yacimientos (m3)
La Tranca	3.600.000
Murallas Viejas	6.200.000

Con respecto al material cementicio, se deberá contactar con una fábrica de cemento, quienes puedan elaborar y transportar este hasta la planta de HCR en la obra. Podría estudiarse la posibilidad de analizar posibles canteras cercanas a los lugares de ambos proyectos, como también la instalación momentánea de una fábrica de cemento en la obra, pero esta idea solo se menciona como una alternativa, ya que con la información previa otorgada por MN Ingenieros, no se puede garantizar esto, además que esta práctica no suele ser común en la construcción de presas de HCR; por lo tanto, se aplicará el mismo método utilizado en la construcción de la presa Pangué.

Es importante mencionar que el material cementicio en muchas ocasiones ha afectado directamente en la producción de HCR, es por esto que se recomienda -sobre todo considerando que este será proporcionado por una fábrica de cementos, que transportará desde un lugar lejano a la presa- que se tenga material cementicio ensilado, equivalente a lo que se utilizaría en 2 semanas de producción de HCR. Estos se almacenarán en silos.

Cabe mencionar que la logística de transporte del cemento desde la fábrica hacia las plantas de almacenamiento es un proceso muy complejo, principalmente debido a las distancias y la ubicación de la obra, por lo que el fabricante deberá considerar abastecer la obra a través de distintos métodos de transporte en caso de ser necesario tal y como se hizo en la construcción de Pangué en donde se utilizaron carros ferroviarios y camiones.

Basándonos en lo anterior, para la construcción de las presas de HCR en los proyectos La Tranca y Murallas Viejas se deberán instalar plantas de áridos y de HCR en las obras, estas deben ubicarse muy cercanas al lugar de emplazamiento de la presa para facilitar el transporte, y minimizar los posibles riesgos de segregación.

En la figura 6.2 se puede observar la construcción de la presa Pangué, en esta se puede ver en la esquina superior derecha la planta de HCR, mientras que en la esquina inferior izquierda la presa de HCR. Podemos notar que es muy importante ubicar la planta de áridos y de HCR en las laderas de la presa tal y como se hizo acá, ya que con esto se logran minimizar los riesgos de segregación y la variabilidad granulométrica, como también los tiempos de construcción.



Figura 6.2: Construcción Presa Pangué, Planta de HCR, Fuente: Adolfo Ochoa

### 6.1.1. Planta de áridos

La planta de áridos debe tener un buen almacenamiento, ya que en la mayoría de proyectos de este tipo se suelen tener acopios muy grandes, incluso antes de comenzar con la colocación del HCR. Esto se tiene en cuenta, dado que pueden ocurrir percances debido a algunos factores como: problemas con el control de la temperatura de los áridos en los almacenamientos, o una tasa de colocación de HCR muy rápida, la cual supere la capacidad de producción de los áridos, por lo que es preferible tener una buena cantidad de áridos en los acopios en caso de cualquier problema. También otra razón por la que se tiene grandes cantidades de almacenamiento, es que la producción de áridos se puede comenzar fácilmente en etapas tempranas del proyecto, en donde aún no se comienza la colocación de HCR.

Para la producción de HCR los áridos se suelen separar en cuatro o cinco tamaños, en la figura 6.3 se pueden observar silos y tolvas en los cuales se suelen almacenar los áridos.



Figura 6.3: Almacenamiento de áridos, Fuente: Asamach

Tal como se mencionó en el capítulo 5 de este trabajo, las granulometrías utilizadas por los áridos del HCR en La Tranca y Murallas Viejas alcanzan tamaños de hasta 40 mm. En este proyecto se considera explotar yacimientos fluviales que contienen arenas, gravas y bolones. Para separar los distintos tamaños se utilizarán harneros para el lavado. También para elaborar distintos tipos de áridos con el material obtenido de los yacimientos, debido a que estos presentan en su mayoría un tamaño superior al necesitado, dependiendo del tamaño que se necesite en la granulometría definida, se utilizaran máquinas chancadoras.

Las plantas de áridos estarán compuestas de distintas máquinas chancadoras, existen distintos tipos de ellas, entre estas se encuentran los chancadores primarios de mandíbula y los chancadores secundarios de cono, los primeros pueden ser alimentados con áridos de tamaño 1.219 mm y generar áridos de hasta 127 mm, mientras que los segundos tiene la capacidad de generar áridos mucho más pequeños. También la planta tendrá harneros para el lavado y separación de áridos, como también clasificadores de arena. Para la producción de finos se utilizará un molino de bolas como se hizo en la construcción de la presa Ralco. Estas máquinas fueron utilizadas en la construcción de la presa Pangué, y lograron producir en promedio 100.000 m<sup>3</sup> de material mensualmente. Es por esto que también se tiene contemplado para los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas utilizar máquinas similares. En la figura 6.4 y 6.5, podemos observar imágenes de la maquinaria recién mencionada.



Figura 6.4: Ejemplo de Harnero, Fuente: Metso



(a) Ejemplo Chancador primario de mandíbula



(b) Ejemplo Chancador de cono

Figura 6.5: Maquinas Chancadoras

Para lograr la dosificación definida en el punto 5.3.3 del capítulo 5 se deberán generar áridos de 4 tamaños distintos, estos serán: Grava, Gravilla, Arena Gruesa y Arena Fina, las cuales deberán tener los siguientes tamaños máximos:

- **Grava:** deberá tener un tamaño máximo de 40 mm. Bajo tamiz #1 1/2"
- **Gravilla:** deberá tener un tamaño máximo de 20 mm. Bajo tamiz #3/4"
- **Arena Gruesa:** deberá tener un tamaño máximo de 5 mm. Bajo tamiz #4
- **Arena Fina:** deberá tener un tamaño máximo de 1,25 mm. Bajo tamiz #16

Se debe tener en cuenta que debe existir un control granulométrico individual para cada tamaño de árido, y sus acopios deben estar bien organizados, esto con el fin de evitar posibles problemas.

A manera general, considerando las dosificaciones definidas en el capítulo 5, las plantas de áridos de La Tranca y Murallas Viejas deberán producir aproximadamente las toneladas de áridos que se muestran en la tabla 6.2 :

Tabla 6.2: Cantidad de toneladas a producir por la planta de áridos

Producción de Áridos necesarios		
Árido	<b>La Tranca</b>	<b>Murallas Viejas</b>
Grava 1 1/2 (ton)	925.000	1.630.000
Gravilla 3/4 (ton)	510.000	900.000
Arena Gruesa (ton)	250.000	430.000
Arena Fina (ton)	70.000	120.000
Finos (ton)	6.000	10.000

### 6.1.2. Planta de HCR

Para fabricar HCR es de suma importancia tener una planta con las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. Esta se abastece, tal y como se mencionó anteriormente, por la planta de áridos y la fábrica de cemento contratada para el proyecto. La planta de áridos debe estar en lo posible muy cerca de la planta de HCR, esto con el fin de permitir el correcto transporte de los áridos desde los acopios de esta misma hasta la planta de HCR. El transporte de áridos hasta la planta de HCR se realizará a través de camiones tolva, tal y como se realizó en la construcción de la presa Pangué.

A su vez, el cemento será transportado por el fabricante de cementos a través de camiones a granel. Es importante mencionar que para la construcción de la presa Pangué, se realizó una gran gestión logística por parte del fabricante para el transporte del cemento hasta la planta de HCR, esta incluyó a manera general distintos medios de transporte, como ferrocarril desde la planta principal hasta plantas intermedias, y luego camiones granel hasta la obra.



Figura 6.6: Ejemplo Camión Tolva, Fuente: Hino

La planta de HCR tendrá la capacidad suficiente para permitir la constante producción de HCR para la continua colocación de capas de este en la obra, es por esto que es de suma importancia evitar fallos en la misma, para esto se realizará proceso de mantenimiento programado. En la construcción de la presa Pangue se presentaron problemas debido a la no mantención de los equipos en la planta, por lo que en base a esto se tendrá mucha consideración para los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas.

Para los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas se tiene contemplado la instalación de dos plantas de HCR, debido a que la mayoría de proyectos de presas de HCR grandes se ha preferido utilizar dos plantas operando al 50 % de la capacidad total de la producción necesaria.

La planta de HCR deberá dosificar y mezclar los materiales del HCR, es por esto que una planta de HCR se compone principalmente por dos sub-plantas, las cuales son la planta de dosificación y la planta de mezclado.

#### **6.1.2.1. Planta de dosificación**

La planta de dosificación será la encargada de dosificar los materiales, para realizar esto se pueden utilizar distintas técnicas de dosificación, entre ellas una dosificación convencional por peso o una dosificación volumétrica continua. Pero para este proyecto se utilizará una dosificación continua por peso, utilizando un sistema de cintas pesadoras. En la figura 6.7 se pueden apreciar las cintas pesadoras:



Figura 6.7: Ejemplo Cintas Pesadoras, Fuente: Arco Electrónica

#### 6.1.2.2. Planta de mezclado

Hoy en día a nivel mundial en proyectos de este tipo se suelen utilizar más mezcladoras de hormigón discontinuas, por sobre las mezcladoras continuas, es por eso que para la mezcla del HCR de ambos proyectos, se utilizarán dos plantas mezcladoras de proceso discontinuo forzadas de doble eje, estas tendrán una capacidad de producción de entre 400 y 500 m<sup>3</sup>/h cada una, y estarán encargadas de mezclar adecuadamente los ingredientes del HCR.

Las mezcladoras son un factor principal en la construcción de cualquier presa de HCR, ya que en base a estas se logrará una rápida producción de HCR. Considerando esto resulta vital para los proyectos que involucren HCR realizar mantenencias y reparaciones rápidas y precisas en estas, ya que interrumpir la producción de HCR puede implicar grandes pérdidas de tiempo y retrasos en la colocación de HCR. Es por lo anterior, que se recomienda que las mezcladoras operen con poco o ningún tiempo de inactividad, así como también una programación precisa sobre las mantenencias que se realizarán durante lo que dure la construcción de la presa, además también se recomienda que exista la disponibilidad inmediata de piezas de repuesto en caso de ser necesarias.

Cabe destacar que la planta de HCR se irá modificando y mejorando a medida que se comience la producción de HCR de los proyectos, ya que se estará buscando la continua optimización de la producción de este mismo.

Los materiales para la planta de HCR se almacenarán también en silos, estos estarán destinados para áridos finos, áridos gruesos, y cemento. Es importante mencionar que debe existir una coordinación entre los silos de almacenamiento general y los silos de la planta, para evitar problemas de congestión entre estos. En la presa Ralco se utilizaron seis silos de cemento con una capacidad total de 3000 toneladas, esto se tendrá muy en cuenta para los proyectos estudiados en este trabajo.

En la figura 6.8 se puede apreciar la imagen de la planta de HCR utilizada en la construcción de la presa Pangué.

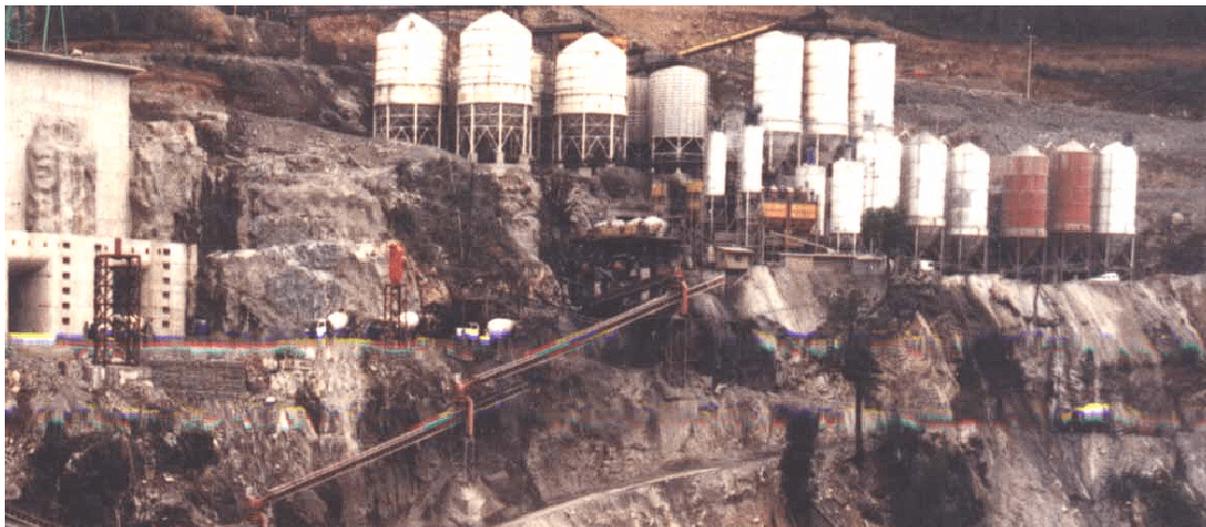


Figura 6.8: Planta de HCR utilizada en la construcción de la presa Pangué,  
Fuente: Adolfo Ochoa

## 6.2. Sistema de transporte del HCR

En la mayoría de los casos, en proyectos similares se han utilizado distintos métodos de transporte, ya que la elección particular de uno depende de la topografía entre la ubicación de la planta de HCR y el lugar de emplazamiento de la presa. La mayor complicación que suele suceder al momento de transportar el HCR es la segregación, es por esto que el tipo de transporte que se escoja debe intentar minimizar esta misma.

En la construcción de la presa Pangué inicialmente se utilizaron camiones tolva para transportar las mezclas, con este tipo de transporte se produjeron muchos problemas de segregación, esto debido principalmente a la segregación durante el carguío de los camiones, un mayor tiempo de transporte y más segregación durante la descarga del camión. Es por esta razón que para los proyectos de este trabajo se va a descartar utilizar camiones tolva para transportar la mezclas de HCR. Luego de alcanzar una cierta altura en la construcción de Pangué se comenzó a utilizar cintas transportadoras, lo que mejoró los problemas de segregación y aumento las tasas de colocación de HCR. En la construcción de la presa Ralco también se utilizó un sistema de cintas transportadoras.

Considerando los problemas de segregación que suele causar la utilización de camiones para el transporte, se decidió utilizar para los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas un sistema integral de cintas transportadoras, ya que estas ofrecen una mayor velocidad y continuidad, y para proyectos muy masivos en donde los volúmenes de HCR sean superiores a 1 millón de m<sup>3</sup>, suele ser una alternativa muy económica.

Los sistemas integrales de cintas transportadoras se componen por distintos tramos de cintas, los que dependerán directamente de la topografía del lugar. Con respecto al ancho de banda de las cintas, estas pueden variar desde los 610 mm hacia arriba, en las presas Pangué y Ralco se utilizaron cintas con ancho de banda de 910 mm. No se descarta utilizar ancho de bandas mayores para el proyecto de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, ya que

un mayor ancho de banda aumentaría las tasas de colocación de HCR. El último tramo del sistema de transporte debe conectar con un equipo distribuidor de la mezcla de HCR, este equipo es denominado Crawler Placer, y está compuesto por orugas y una cinta telescópica la cual le permite distribuir y descargar la mezcla de HCR a cualquier punto del área de construcción de la presa.

En la figura 6.9 se pueden apreciar las cintas transportadoras utilizadas en la construcción de la presa Pangué, mientras que en la figura 6.10 se puede apreciar la máquina Crawler Placer en operación en la construcción de la presa Pangué



Figura 6.9: Cintas Transportadoras de 910 mm utilizadas en la construcción de la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa



Figura 6.10: Máquina Crawler Placer operando en la construcción de la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa

Si se logra realizar un sistema de transporte rápido y continuo, se podrían alcanzar ritmos de colocación de hasta 1000 m<sup>3</sup>/h (ICOLD, 2020) , lo cual sería muy beneficioso para el proyecto.

### **6.3. Construcción de la presa de HCR**

La construcción de una presa de HCR se debe realizar en base al conocimiento, y enfoque meticuloso en la colocación y compactación de la mezcla de HCR. A grandes rasgos, la característica principal de este tipo de presas es su simpleza y rapidez al momento de construirlas, esto debido a las características del HCR, que permiten que este se pueda manipular mediante maquinaria que comúnmente se utiliza para movimiento de tierras. Considerando lo anterior es que la mayoría de metodologías de construcción de presas de HCR se han desarrollado en base a maximizar esto. A continuación, se presentarán la metodología de construcción:

#### **6.3.1. Excavaciones**

Lo primero que se debe realizar antes de comenzar con la colocación del HCR, es la remoción de sedimentos del cauce del río y sus laderas, esto con el fin de excavar lo suficiente hasta dejar expuesta la roca sana en la cual se cimentará la presa. Como se ha mencionado, durante este trabajo se debe cimentar la presa de HCR en una roca sana, ya que solamente una roca de buena calidad tendrá la capacidad de soportar una presa de gravedad de HCR. La profundidad a la cual se encuentra la roca sana fue presentada para ambos proyectos, y en base a esto será la cantidad de material excavado. A diferencia de una presa de enrocados rellenos (CFRD), los volúmenes excavados suelen ser mayores, esto principalmente porque

las presas CFRD solo necesitan construir su muro impermeable en la roca, por lo que las cantidades a remover son menores que en una presa de HCR.

Luego de alcanzada la roca para la cimentación de la presa, antes de comenzar con la colocación del HCR se debe crear una plataforma horizontal nivelada entre el contacto del terreno y la presa de HCR, para esto se utiliza un hormigón de nivelación. Este hormigón de nivelación tiene propiedades similares al HCR.

### **6.3.2. Control de temperatura en la mezcla**

El HCR diseñado tendrá un rango de temperaturas en el cual pueda ser colocado sin problemas, es por esto que resulta de importancia considerar las condiciones climáticas del proyecto. En el caso de los embalses La Tranca y Murallas Viejas son proyectos de la comuna de Combarbala en la región de Coquimbo, la cual se caracteriza por ser una zona que tiene un clima semiárido donde apenas llueve (precipitación media anual es 126 mm) y en donde la temperatura promedio es de 20° C, con mínimas de 6° C y máximas de 27° C, se estima que no se presentarán grandes problemas de temperatura en la colocación del HCR, esto debido a que generalmente se considera que el HCR no debe ser colocado cuando se presenten temperaturas menores a 1° C, las cuales en este proyecto no debiesen presentarse. Con respecto a las temperaturas máximas de colocación, se estima que con temperaturas por sobre los 26° C y 27° C se acelera la tasa de pérdida de humedad del HCR, por lo que en los días que se supere esta temperatura, deberán tomarse medidas para disminuir la temperatura, como por ejemplo riegos permanentes a la mezcla de HCR. Por lo general, en la zona no suelen alcanzarse temperaturas mayores a 26° por lo que tampoco en este proyecto se deberían presentar mayores problemas por esto.

### **6.3.3. Colocación y Extensión del HCR**

El tipo de colocación de HCR que se utilizará en ambos proyectos, corresponderá a la colocación en capas horizontales consecutivas, desde una ladera a la otra, esta técnica resulta ser la más efectiva cuando se presentan condiciones climáticas ideales. En nuestro caso, como se mencionó previamente debido a la zona de los proyectos, las condiciones climáticas no presentaran un mayor problema, por lo que utilizar esta técnica de colocación es lo más beneficioso.

Las capas por colocar tendrán un espesor de 30 cm, en la construcción de Pangue y Ralco se utilizaron estos espesores, en general cerca del 80 % de las presas de HCR construidas alrededor del mundo han utilizado espesores entre 26 y 35 cm. No se recomienda el uso de capas mayores a 30 cm debido a que pueden provocar problemas de consolidación en las partes más bajas de las capas.

Cuando se está construyendo presas demasiado grandes, el ancho de esta suele separarse en varias calles para la colocación de las capas horizontales. Considerando que las presas de La Tranca y Murallas Viejas contienen grandes cantidades de volumen, se definirán distintas calles en el ancho de la presa, estas calles tendrán un ancho de entre 10 y 15 metros. En general la colocación del HCR se puede comenzar trabajando desde aguas abajo hacia aguas arriba. En la figura 6.11 se puede apreciar un esquema de colocación de capas horizontales.

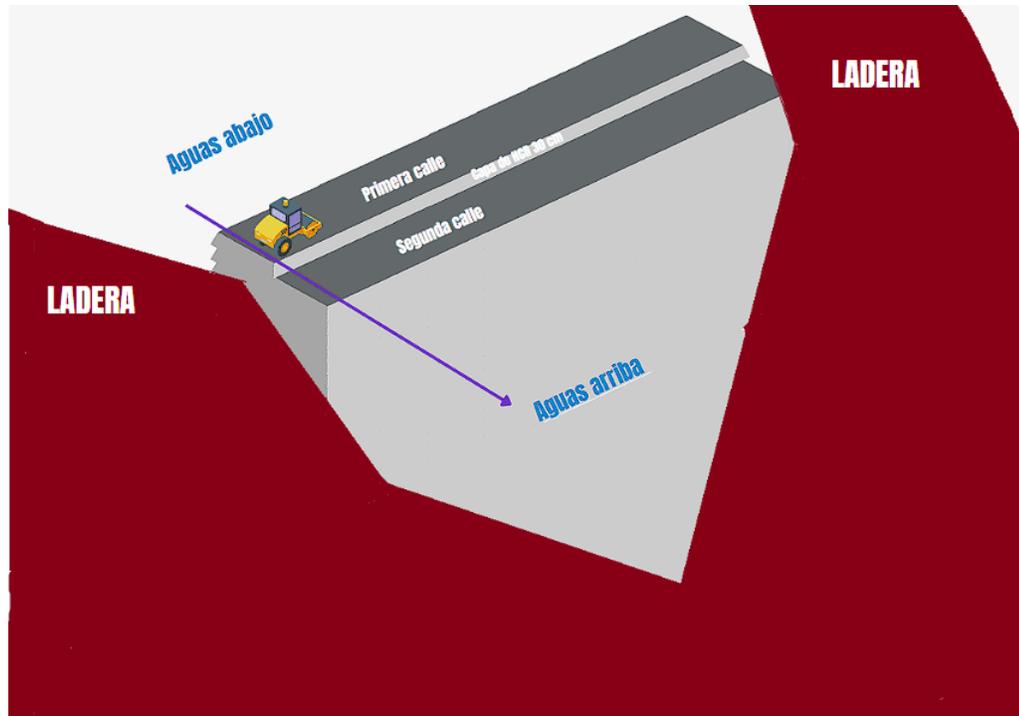


Figura 6.11: Colocación horizontal de capas de HCR con dos calles, Fuente: Elaboración propia

Para extender el HCR, se utilizarán bulldozers con orugas, ya que esta maquinaria ha demostrado a través de distintos proyectos alrededor del mundo, ser la mejor opción para extender el HCR debido a que tienen la capacidad de remezclar el HCR, lo que minimiza la segregación de este.

Dentro de las características que se recomiendan para los bulldozers están: Tener un tamaño D4 al D6 y que estén equipados con una hoja de empuje en forma de U, como también que tenga garras de poca altura. No se debe guiar el esparcido del bulldozer solo con marcas topográficas ya que se ha comprobado que, con esto, se producen problemas con los espesores obtenidos, para evitar esto se debe equipar con un control de nivelación mediante láser. Es importante mencionar que los bulldozers sólo deben operar sobre HCR fresco y sin compactar. En la figura 6.12 se puede apreciar una máquina bulldozer D6.



Figura 6.12: Bulldozer Caterpillar D6, Fuente: truck1

#### 6.3.4. Compactación del HCR

La compactación del HCR es una de las etapas más importantes en la construcción, principalmente porque las resistencias y propiedades para las que fue diseñada la mezcla de HCR se alcanzan cuando esta logra su densidad máxima. Es por esto que resulta esencial alcanzar esta densidad en las capas de HCR, esto se logra a través de la fuerza que aplican los rodillos vibratorios sobre la superficie de las capas, las cuales deben estar uniformes y niveladas para que este proceso se realice de la mejor manera.

Considerando que se tiene previsto colocar capas de 30 cm, en base a lo que se menciona en la bibliografía estudiada, la densidad esperada se conseguirá luego de que el rodillo pase entre 4 y 6 veces a una velocidad máxima de 2,5 km/h, cabe mencionar que se considera una pasada cuando el rodillo recorre el largo de una calle en una dirección. A pesar de esto, cada mezcla de HCR tendrá sus propios comportamientos dependiendo de todos los factores que se han mencionado previamente en este documento, como su cantidad de material cementicio, su tamaño máximo de árido, la cantidad de áridos, las condiciones climáticas, etc. Este comportamiento se determinará a través de ensayos previos de las mezclas de HCR diseñadas. En esta memoria se trabajará bajo el supuesto de que las capas de 30 cm se comportaran como lo menciona la bibliografía.

Es muy importante que la compactación se realice lo más rápido posible después que el HCR haya sido extendido, específicamente en los primeros 45 minutos luego de ser mezclado y dentro de los 15 minutos siguientes luego de ser extendido, esto se tiene que tener muy en cuenta, debido a que en climas en donde la temperatura es mayor a 21° grados se pueden producir pérdidas en la resistencia del HCR si este se compacta después de 45 minutos desde que se mezcló. En el caso de Murallas Viejas y La Tranca la temperatura podría superar los 21° grados en múltiples ocasiones, por lo que se deberá compactar la mezcla de HCR lo más rápido posible. No se debe sobre compactar una capa de HCR con múltiples pasadas, ya que esto podría afectar reducir la densidad en la parte superior de las capas.

Es importante planificar una buena coordinación entre los bulldozers y los rodillos vibra-

torios, ya que esto habilitará a estos últimos para operar detrás de los bulldozers y a su vez optimizar las tasas de colocación. Con respecto a las características que deben tener los rodillos vibratorios, se debe tener en cuenta lo siguiente: se pueden utilizar rodillos vibratorios de doble tambor, como los que se utilizaron para la construcción de Ralco y Pangué, pero las tendencias actuales en la construcción recomiendan el uso de un rodillo vibratorio de un solo tambor, principalmente por su mejor maniobrabilidad especialmente con mezclas de alta trabajabilidad. El rodillo debe ser de 10 a 12 toneladas, con una carga dinámica de al menos 70 kg/cm de ancho del tambor, además debido a que los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas se utilizará un HCR de alta trabajabilidad, el rodillo deberá trabajar en un modo de alta frecuencia/baja amplitud. En la figura 6.13 se puede apreciar un rodillo vibratorio de un solo tambor, mientras que en la figura 6.14 se pueden apreciar un rodillo vibratorio compactando el HCR en la construcción de la presa Pangué.



Figura 6.13: Rodillo Vibratorio de un solo tambor, Fuente: Sinomach



Figura 6.14: Rodillo Vibratorio compactando capa de HCR, Fuente: Adolfo Ochoa

Para verificar las densidades de cada capa se utilizará un densímetro nuclear, la densidad teórica sin aire del HCR debe ser de un mínimo de 98%. Debido a que los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas se trabajara con una mezcla de HCR con alto contenido cementicio, no debiese ser problema alcanzar estas densidades. En la figura 6.15 se puede observar un densímetro nuclear.



Figura 6.15: Densímetro Nuclear, Fuente: Protección Radiológica Chile

### 6.3.5. Juntas de construcción entre capas de HCR

El tratamiento de juntas entre capas de HCR corresponde a uno de los procesos más importantes en la construcción de una presa de HCR, principalmente porque el comportamiento final de la presa, vendrá determinado por el comportamiento entre las juntas de las capas.

Dentro de las presas de HCR se presentan principalmente dos tipos de juntas: las juntas de construcción horizontal las cuales siempre están presentes debido a que se producen cada vez que se coloca una capa de HCR encima de otra, y las juntas de construcción vertical, las cuales se producen en los bordes frontales o laterales de una calle de una capa de HCR. En la figura 6.16 y 6.17 se presentan diagramas con la representación de las juntas de construcción.

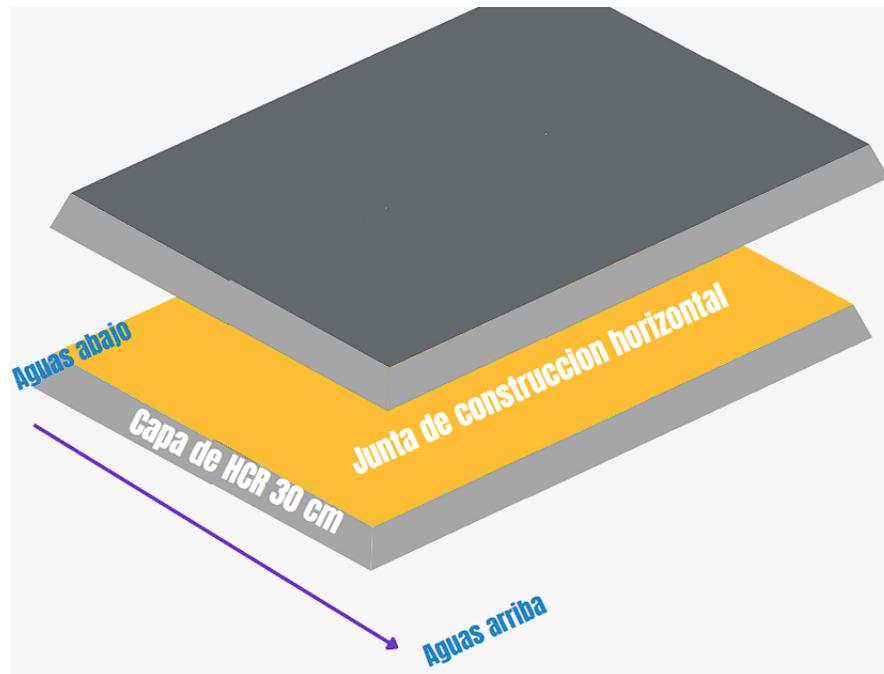


Figura 6.16: Diagrama junta de contracción horizontal, Fuente: Elaboración propia

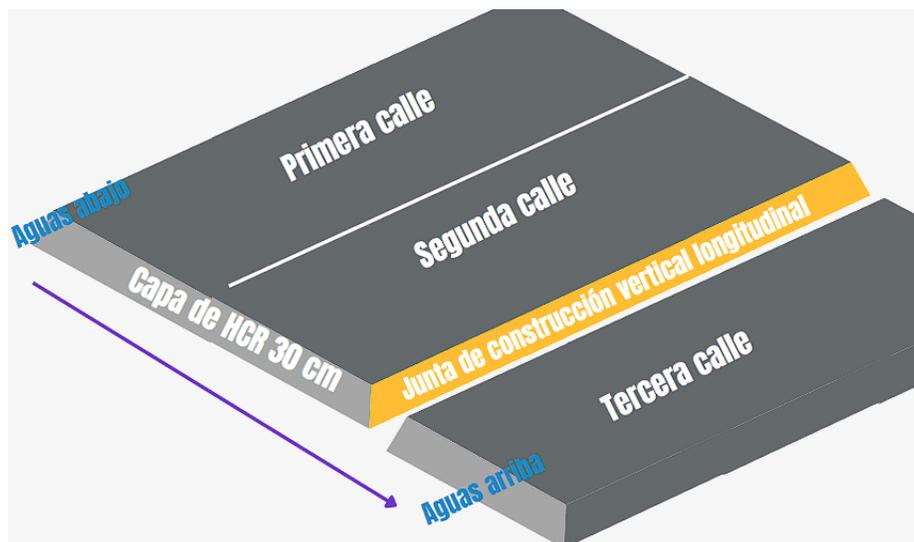


Figura 6.17: Diagrama junta de contracción vertical, Fuente: Elaboración propia

### 6.3.5.1. Juntas de construcción horizontales

La unión entre capas horizontales de HCR se produce por la unión cementicia y la penetración de los áridos de la capa superior de HCR en la capa inferior de HCR, si las condiciones son ideales, vale decir, no ha existido segregación y aún no ha iniciado el proceso de fraguado de la capa inferior, las capas de HCR se van a comportar como una sola. El problema puede ocurrir cuando estas condiciones ideales no se presentan, y por lo tanto se dificultará la unión entre las capas, lo que generará problemas en la resistencia final de la presa. Es por lo anterior que debe realizarse un correcto tratamiento entre juntas horizontales dependiendo de las distintas condiciones que presenten estas.

Los tipos de juntas se pueden clasificar en tres dependiendo del tiempo que haya transcurrido desde la colocación de la última capa de HCR, estos son: junta caliente, junta templada y junta fría:

1. **Junta Caliente:** Corresponde cuando la capa inferior de HCR todavía es trabajable si se coloca la siguiente capa, y su inicio de fraguado aún no se ha alcanzado. Este tipo de junta suele ocurrir cuando se están colocando capas seguidas de HCR.
2. **Junta Templada:** Corresponde a un término medio entre la junta caliente y la junta fría, y ocurre cuando ya comenzó el fraguado en la capa inferior, pero aún no ha finalizado. Este tipo de junta suele ocurrir cuando se ha detenido la colocación por un tiempo corto.
3. **Junta Fría:** Corresponde cuando la capa inferior de HCR ya no es trabajable si se coloca la siguiente capa, y su fraguado ya ha finalizado, lo que quiere decir que la capa superior no penetrará el árido de la capa inferior. Este tipo de junta suele ocurrir cuando se ha detenido la colocación de capas por un largo tiempo debido a problemas que pueden ser climáticos, de producción, etc.

Los tiempos de fraguado variarán dependiendo de las condiciones del clima, y de la mezcla de HCR, a pesar de esto se puede dar un rango de tiempos los cuales se presentarán a continuación:

- **Tiempo inicial de Fraguado:** En muchos casos se han utilizado tiempos de inicio de fraguado de entre 20 y 24 horas, por lo que se tomara este como referencia
- **Tiempo final de Fraguado:** En muchos casos el tiempo final de fraguado con aditivos retardantes ha ocurrido a las 40 o 50 horas, por lo que se tomara este como referencia

El tratamiento a realizar en la junta dependerá del tiempo que ha transcurrido desde que se colocó la última capa de HCR, dependiendo de la cantidad de material cementicio que contenga la mezcla, los métodos utilizados también van a variar, en el caso de este trabajo para La Tranca y Murallas Viejas se definió una mezcla de HCR con alto contenido de materiales cementicios, por lo que a continuación se presentan los principales tratamientos de juntas para este tipo de mezclas:

1. **Tratamiento para junta caliente:** La capa inferior debe estar dentro de lo posible en una condición saturada con superficie seca, por lo tanto, los charcos superficiales de la capa inferior producidos por el exceso de agua de curado, y los residuos, deben

eliminarse antes de que se extienda la siguiente capa, para esto se debe limpiar la capa inferior con un camión aspirador.

2. **Tratamiento para junta templada:** Al igual que en la junta caliente, la capa inferior debe estar en lo posible en una condición de saturada con superficie seca, y en esta se debe crear rugosidad, utilizando para ello un equipo con cepillo. Se pueden utilizar cepillos con cerdas de plástico o acero, en algunos casos se puede poner una capa de retoma de mortero o lechada, antes de colocar la siguiente capa.
3. **Tratamiento para junta fría:** Nuevamente, La capa inferior debe estar dentro de lo posible en una condición saturada, se debe descarnar la superficie de la capa inferior, esto debe realizarse con un equipo de hidrodemolición, la cantidad a descarnar dependerá de la mezcla de HCR, pero por lo general solo se deben eliminar pequeñas cantidades de mortero para exponer la parte superior de los áridos gruesos. En algunos casos se puede poner una capa de retoma de mortero o lechada, antes de colocar la siguiente capa.

Algunos proyectos más conservadores prefieren considerar todas las capas como frías, independiente del tiempo que haya ocurrido desde su colocación. En proyectos actuales, debido a la incorporación de aditivos retardadores de fraguado, se ha logrado la consecución de hasta un 90 % de juntas calientes, por lo que se recomienda fuertemente la utilización de estos para la construcción de La Tranca y Murallas Viejas.

Con respecto al mortero de retoma, debido a que se utilizará una mezcla con alto contenido cementicio, las juntas calientes no deberán utilizar este. En el caso de juntas templadas y frías se puede utilizar en capas de 0,6 a 1 cm.

#### **6.3.5.2. Juntas de construcción verticales**

Las juntas de construcción verticales se producen en los bordes longitudinales o frontales de una calle de HCR. Debido a que en el proyecto estudiado se realizará una colocación horizontal en distintas calles, se deberá tener mucha consideración con las juntas de construcción laterales que se producirán en la presa. De igual forma, en caso de que ocurra cualquier percance con la colocación de HCR, y una calle no alcance a colocarse por completa a lo largo de toda la presa, también se deberán considerar juntas de construcción frontales. En mayor medida, este tipo de juntas suele tener una pendiente de entre 2H:1V y 3:H:1V.

Al igual que las juntas de construcción horizontales, estas podrían ser calientes, templadas o frías, y la manera de ejecutarlas consiste en: luego de extender el HCR de la calle que se está colocando, se deberá recortar el borde la calle adyacente ya compactada, para luego compactar el borde de la junta con un pequeño rodillo vibratorio de doble tambor de máximo 2,5 toneladas. Bastará con 3 o 4 pasadas con vibración del rodillo para lograr la compactación en la junta. En general es una buena práctica utilizar lechada o mortero de retoma en las juntas verticales frontales antes de cubrirla con el HCR de la calle siguiente, esto no es necesario realizarlo en las juntas verticales longitudinales. Para finalizar se debe tener muy en cuenta que una única junta vertical frontal no debe cruzar el ancho de la presa, por lo que se deben desfasar en caso de que ocurran en diferentes calles de una misma capa. A su vez, con respecto a las juntas verticales longitudinales se debe evitar que estas se alineen en el mismo plano vertical con el resto de juntas de las demás capas de HCR, por lo que variar el ancho de las calles de una capa de HCR podría ser una buena solución.

### 6.3.6. Juntas de Contracción

Las juntas de contracción se realizan con la función de evitar la formación de grietas en el HCR, cumplen la función de romper la configuración continua del hormigón y facilitar su libre movimiento. A diferencia de los hormigones convencionales, las juntas de contracción en el HCR generalmente permiten un espaciamiento mayor del orden de 20 metros. Esto se realiza luego de la compactación del HCR, y consisten en cortar una entalladura en el HCR con una cuchilla vibratoria instalada en una retroexcavadora, y posteriormente insertar en el HCR una lámina de acero galvanizado.

### 6.3.7. Construcción del paramento aguas arriba

Como se mencionó en el diseño conceptual de las presas de HCR de La Tranca y Murallas Viejas, en el paramento aguas arriba de la presa de HCR se utilizará una pared de hormigón convencional. Es muy común que cuando el HCR se coloca directamente contra un moldaje, se generen muchos problemas tanto estéticos como técnicos. Distintos expertos en el área mencionan que para obtener una buena interfaz entre el HCR y el hormigón convencional se debe colocar primero el hormigón convencional entre su moldaje y el HCR, luego se debe vibrar el hormigón convencional del paramento, el cual estará contenido entre su moldaje y el HCR, y finalmente se deben compactar simultáneamente ambos con un rodillo vibratorio, haciendo énfasis en compactar la interfaz con un rodillo pequeño. En la figura 6.18 se puede apreciar los moldajes utilizados en el paramento aguas arriba en la construcción de la presa Pangué.



Figura 6.18: Moldajes utilizados en la construcción del paramento aguas arriba en la presa Pangué, Fuente: Adolfo Ochoa Llangato

## 6.4. Ensayos recomendados para los materiales y el HCR

Por lo general, al igual que en cualquier proyecto de ingeniería civil, se suelen realizar ensayos para el control de calidad de los materiales. Los áridos que componen el HCR suelen pasar los mismos controles de calidad que los áridos de los hormigones convencionales, aunque se le suele aplicar algunos controles adicionales debido a la importancia de evitar problemas de segregación en estos. A su vez, el HCR fresco antes del inicio del fraguado también debe ser controlado mediante distintos ensayos, en los cuales se analizará su consistencia, Vebe, granulometría, humedad y densidad en estado fresco, entre otros. También debe verificarse que el HCR endurecido, cumpla con las propiedades de diseño requeridas.

Considerando lo anterior, la Comisión Internacional de Grandes Presas y el Instituto Americano del Concreto, recomiendan que se realicen los siguientes ensayos típicos para el control de calidad de los materiales, del HCR fresco y del HCR endurecido. En las tablas 6.3, 6.4 y 6.5, se pueden observar los ensayos típicos para los materiales que componen el HCR, el HCR fresco y el HCR endurecido respectivamente.

Tabla 6.3: Ensayos típicos de control de calidad de los materiales que componen al HCR, Fuente: ICOLD boletín 177 y ACI 2011

Ensayos típicos de control de calidad de materiales			
Material ensayado	Procedimiento del ensayo	Norma de ensayo	Frecuencia
Cemento	Propiedades físicas y químicas	ASTM C150	Certificado del fabricante o precalificación
Material Cementicio Suplementario	Propiedades físicas y químicas	ASTM C618	Certificado del fabricante o precalificación
Aditivo		ASTM C494 ASTM C260	Certificado del fabricante
Áridos	Densidad Relativa y Absorción	ASTM C127 ASTM C128	Un ensayo al mes o cada 50.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Partículas planas y alargadas	BS812	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Ensayo de Abrasion Los Angeles	ASTM C131	Un ensayo al mes o cada 50.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Granulometría	ASTM C117 ASTM C136	Un ensayo por turno o Uno al día
Áridos	Humedad	ASTM C566 ASTM C70	Antes de cada turno o cuando sea necesario
Áridos	Densidad compactada	ASTM C29	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Equivalente de arena	ASTM D2419-2	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Coeficiente de flujo	EN 933-6	Un ensayo al mes o cada 50.000 m <sup>3</sup>

Tabla 6.4: Ensayos típicos de control de calidad del HCR fresco ,Fuente: ICOLD boletín 177 y ACI 2011

<b>Ensayos típicos de control de calidad de HCR fresco</b>		
<b>Procedimiento del ensayo</b>	<b>Norma de ensayo</b>	<b>Frecuencia</b>
Consistencia y densidad Vebe	ASTM C1170	Cada 500 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Granulometria	ASTM C117 ASTM C136	Cada 1.000 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Densidad in situ y humedad	ASTM C1040	Cada 1.000 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Tiempos de fraguado	ASTM C403	Tres veces por turno
Humedad-Secado en horno	ASTM C566	Cada 1.000 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Temperatura	ASTM C1064	Cada 100 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Variabilidad del proceso de mezclado	ASTM C172 ASTM C1078 ASTM C1079	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>

Tabla 6.5: Ensayos típicos de control de calidad del HCR endurecido,Fuente: ICOLD boletín 177

<b>Ensayos típicos de control de calidad de HCR fresco</b>		
<b>Procedimiento del ensayo</b>	<b>Norma de ensayo</b>	<b>Frecuencia</b>
Resistencia a compresión	ASTM C39 o ASTM C42	Dos ensayos al día o cada 1.000 m <sup>3</sup>
Resistencia a compresión en probetas con curado acelerado	Especial	Dependiendo de las circunstancias. Normalmente cada aprox 5.000 m <sup>3</sup>
Resistencia a traccion (directa y/o indirecta)	Especial p e.j USBR CRD-C-164 o ASTM C496	Un ensayo al dia o cada 2.000 m <sup>3</sup>
Resistencia a traccion directa en testigos con junta	Especial p e.j USBR CRD-C-164	Según se indique
Modulo de elasticidad	ASTM C469	Un ensayo cada 10.000 m <sup>3</sup>
Permeabilidad	DIN 1048	Un ensayo cada dos meses, o cada 100.000 m <sup>3</sup>

## 6.5. Tiempos de Construcción

Uno de los factores más críticos en cualquier proyecto de ingeniería civil son los tiempos en los que se llevaran a cabo la construcción de las obras involucradas. Una de las principales características de las presas de HCR es su capacidad para construirse en períodos de tiempo relativamente cortos. Los rendimientos de colocación de HCR han variado en función del tipo de proyecto que se esté construyendo. Por lo general, se ha observado una tendencia de mayor rendimiento de colocación en presas de mayor volumen.

En la construcción de la presa Pangué se alcanzó una tasa de colocación máxima de 95.000 m<sup>3</sup> mensual y una tasa promedio de 40.000 m<sup>3</sup> por mes. En Ralco se alcanzó una tasa de colocación máxima récord para la época de 149.000 m<sup>3</sup> y una tasa promedio de 70.000 m<sup>3</sup> por mes. La Comisión Internacional de Grandes Presas menciona que hasta el momento no han existido presas que hayan superado una tasa de colocación mensual mayor a 200.000 m<sup>3</sup>.

### 6.5.1. Rendimientos de colocación La Tranca y Murallas Viejas

Considerando lo anterior y en base a los rendimientos promedios que se han alcanzado en la construcción de presas de HCR alrededor del mundo, se definieron tres rendimientos

mensuales de colocación de HCR, un rendimiento bajo, medio y alto, para estimar los tiempos de construcción de las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas. Estos rendimientos y tiempos de construcción mensuales se pueden apreciar en las tablas 6.6 y 6.7:

Tabla 6.6: Rendimientos de colocación La Tranca

Colocación La Tranca		
Rendimiento	Colocación HCR mensual (m3)	Tiempo (meses)
Bajo	50.000	30
Medio	75.000	20
Alto	150.000	10

Tabla 6.7: Rendimientos de colocación Murallas Viejas

Colocación Murallas Viejas		
Rendimiento	Colocación HCR mensual (m3)	Tiempo (meses)
Bajo	75.000	35
Medio	100.000	26
Alto	150.000	18

En las figuras 6.19 y 6.20 se puede apreciar la representación gráfica de los rendimientos.

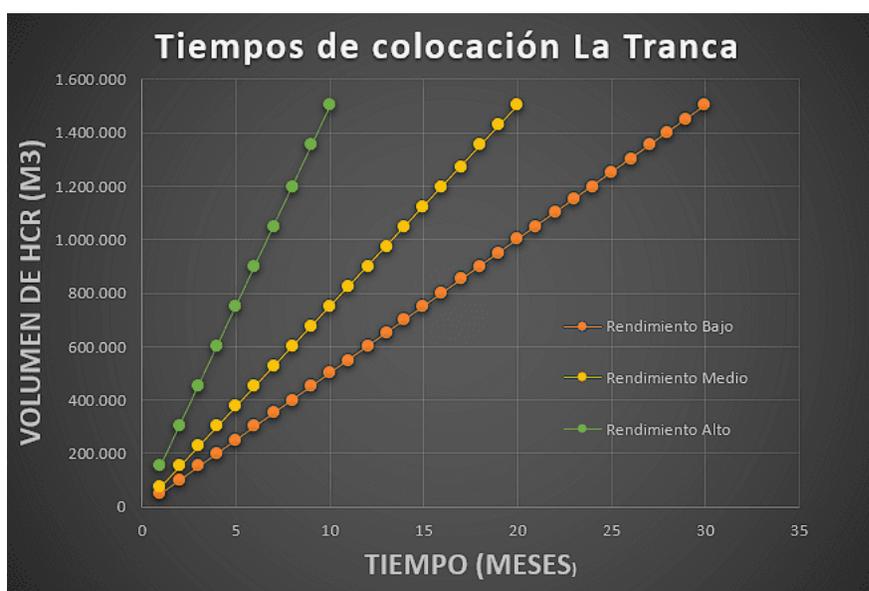


Figura 6.19: Colocación de HCR, La Tranca

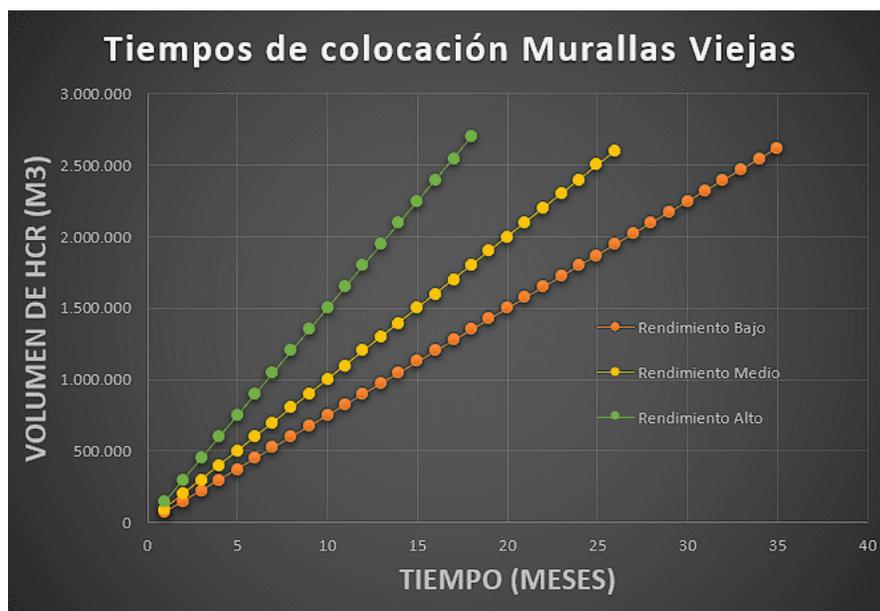


Figura 6.20: Colocación de HCR, Murallas Viejas

Se estima que, considerando las buenas condiciones climáticas tanto del sitio donde se emplazará la presa de La Tranca y Murallas Viejas, se podrían alcanzar los rendimientos de colocación mensual medios fácilmente. Teniendo en cuenta esto, la presa de La Tranca se construiría en 1 año y 8 meses o menos, mientras que la presa de Murallas Viejas en 2 años y 2 meses o menos.

### 6.5.2. Rendimiento de producción de áridos y cemento

Para lograr los rendimientos mensuales medios, la planta de áridos tendrá que producir 89.000 toneladas de áridos como mínimo por mes para La Tranca, en cambio, para Murallas Viejas 120.000 toneladas de áridos como mínimo por mes, la producción específica de cada árido se puede observar en la tabla 6.8.

Tabla 6.8: Cantidad de áridos producidos por mes

	La Tranca	Murallas Viejas
Árido	Cantidad mensual (toneladas)	
Grava 1 1/2	46.250	62.700
Gravilla 3/4	25.500	34.650
Arena Gruesa	12.500	16.550
Arena Fina	3.500	4.650
Finos	300	390
<b>Total</b>	<b>88.050</b>	<b>118.940</b>

A su vez, la fábrica de cementos en el caso de La Tranca deberá proveer de 12.500 toneladas mensuales de cemento portland puzolanico como mínimo. Para el caso de Murallas Viejas, la fábrica deberá abastecer con 16.500 toneladas mensuales de cemento portland puzolanico como mínimo.

Estos cálculos fueron realizados en base a la dosificación definida en el capítulo 5.3.3, con la cual se calcularon las toneladas necesarias por metro cúbico. Cabe mencionar que los rendimientos de producción de áridos no consideran las pérdidas que pudiesen producirse, por lo que los valores calculados solo son estimativos.

# Capítulo 7

## Estimación de costos

En el presente capítulo se realizó la estimación de costos de la construcción de las presas de HCR de los embalses La Tranca y Murallas Viejas, esto con el fin de comparar los costos de las presas de HCR con los de las presas de tierra CFRD. Para realizar esto se utilizarán los estudios de factibilidad elaborados por la consultora MN Ingenieros, el Informe de Anteproyecto de la central Ralco realizado por INGENDESA, el Estudio de Prefactibilidad de la Construcción de un Embalse de Riego en el Río Chillan elaborado por SMI Ingenieros, el estudio RCC cost comparison of data from various jobs, de Blinder, Krempel y Andriolo, Los costos de la construcción de dos presas de HCR en Estados Unidos entregados por la Asociación del Cemento Portland (PCA) y los precios de la fábrica de hormigón Unicon Chile. En base a los documentos mencionados se podrá estimar el precio de la construcción de las presas de HCR de los embalses estudiados en este trabajo.

### 7.1. Costo presa CFRD

A continuación se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de los embalses La Tranca y Murallas Viejas para una presa CFRD. Si bien la consultora MN Ingenieros estimó un costo total para la construcción de una presa CFRD para ambos proyectos, este costo no se utilizará directamente para la comparación con el costo de la presa de HCR, esto principalmente por lo expuesto en el capítulo 4 donde se menciona que la topografía utilizada para la cubicación de la presa de HCR presenta pequeñas diferencias con la utilizada por la consultora. Debido a lo anterior y a la vez para realizar una mejor comparación, se utilizará la cubicación para la presa CFRD obtenida en el capítulo 4, la cual se realizó con la misma topografía que la cubicación de la presa de HCR. Finalmente, se utilizarán los mismos precios unitarios que utilizó la consultora para su estudio, estos incluyen los presupuestos de las excavaciones, rellenos e impermeabilizaciones, y fueron calculados en base a la experiencia de la consultora con obras similares tales como Puntilla del Viento, El Bato, Corrales y Ancoa. Cabe mencionar que los precios unitarios se aumentaron un 40 %, esto para incluir gastos generales, instalación de plantas, utilidades e imprevistos.

Además, los costos del evacuador de crecidas y las obras de desvío y entrega, serán los mismos que plantearon los estudios de MN Ingenieros.

### 7.1.1. Costo presa CFRD La Tranca

Tal y como se mencionó en el punto 3.1.4 del capítulo 3 de este trabajo, la presa CFRD definida por la consultora MN Ingenieros para el embalse La Tranca contempla 6 tipos de materiales de relleno, y también la construcción de una pantalla de hormigón con 2 tipos de relleno aguas arriba y un plinto. A continuación en la tabla 7.1 se presentarán los precios unitarios estimados por la consultora durante julio del 2009 para las partidas recién mencionadas:

Tabla 7.1: Costos Unitarios para presa CFRD La Tranca estimados a Julio del año 2009, Fuente: MN ingenieros

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Zona N 2A de la presa	m3	\$ 14.759
Zona N 2B de la presa	m3	\$ 21.064
Zona N 3A de la presa	m3	\$ 10.504
Zona N 3B de la presa	m3	\$ 4.900
Zona N 3C de la presa	m3	\$ 4.900
Zona N 3D de la presa	m3	\$ 4.546
Pantalla Impermeable	m3	\$ 117.740
Plinto	m3	\$ 238.000
Excavaciones en material común	m3	\$ 2.344
Excavaciones en roca	m3	\$ 15.120

Debido a que tenemos la información de precios estimados para el año 2009, debemos obtener la inflación total en Chile entre julio del año 2009 y julio del año 2023. Utilizando información del Instituto Nacional de Estadística podemos observar que la inflación total de Chile entre julio del 2009 y julio del 2023 fue de 73.5%. Considerando lo anterior se aplicará la inflación correspondiente a los datos de la tabla 7.1, obteniéndose la tabla 7.2 con los respectivos precios unitarios actualizados.

Tabla 7.2: Costos Unitarios para presa CFRD La Tranca estimados a Julio del año 2023, Fuente: Elaboración propia

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Zona N 2A de la presa	m3	\$ 25.607
Zona N 2B de la presa	m3	\$ 36.547
Zona N 3A de la presa	m3	\$ 18.225
Zona N 3B de la presa	m3	\$ 8.502
Zona N 3C de la presa	m3	\$ 8.502
Zona N 3D de la presa	m3	\$ 7.887
Pantalla Impermeable	m3	\$ 204.279
Plinto	m3	\$ 412.930
Excavaciones en material común	m3	\$ 4.066
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233

Para estimar las cantidades correspondientes a cada partida de relleno con respecto a la cantidad total calculada en el punto 4.5.4 del capítulo 4, se utilizó la siguiente proporción presentada en la tabla 7.3. Además los costos asociados a la pantalla y plinto también se realizaron proporcionalmente.

Tabla 7.3: Proporción de materiales presa CFRD La Tranca

Zona N 2A de la presa	0,192 %
Zona N 2B de la presa	3,212 %
Zona N 3A de la presa	0,004 %
Zona N 3B de la presa	42,495 %
Zona N 3C de la presa	51,889 %
Zona N 3D de la presa	2,208 %

Finalmente en la tabla 7.4 se puede observar el costo directo total de la presa de tierra CFRD La Tranca.

Tabla 7.4: Costo Presa CFRD La Tranca

La Tranca				
Presa CFRD	Unidad	Precio Unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Zona N 2A de la presa	m3	\$ 25.607	7.932	\$ 203.123.067
Zona N 2B de la presa	m3	\$ 36.547	132.449	\$ 4.840.586.559
Zona N 3A de la presa	m3	\$ 18.225	161.381	\$ 2.941.141.786
Zona N 3B de la presa	m3	\$ 8.502	1.752.399	\$ 14.898.020.063
Zona N 3C de la presa	m3	\$ 8.502	2.139.791	\$ 18.191.432.327
Zona N 3D de la presa	m3	\$ 7.887	91.062	\$ 718.202.610
Pantalla Impermeable	m3	\$ 204.279	16.975	\$ 3.467.541.958
Plinto	m3	\$ 412.930	2.227	\$ 919.532.193
Excavaciones en material común	m3	\$ 4.066	145.048	\$ 589.786.878
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	8.431	\$ 221.182.902
				<b>\$ 46.990.550.342</b>

El costo del evacuador de crecidas, ya presenta la inflación calculada y se presenta a continuación en la tabla 7.5:

Tabla 7.5: Costo Evacuador de Crecidas Presa CFRD La Tranca

Evacuador de Crecidas	Total CLP
Obras Relacionadas con el Vertedero Lateral	<b>\$11.662.416.904</b>

El costo de las obras de desvío y entrega, ya presenta la inflación calculada y se presenta a continuación en la tabla 7.6:

Tabla 7.6: Obras de Desvío y Entrega, Presa CFRD La Tranca

La Tranca	Total CLP
Obras de Desvío y Entrega	<b>\$ 6.768.140.071</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa CFRD mas el vertedero lateral y las obras de desvío y entrega asociadas a la presa CFRD, se presentan a continuación en la tabla 7.7.

Tabla 7.7: Costo Final Presa CFRD + Vertedero Lateral La Tranca + Obras de Desvío y Entrega

Costo Total
<b>\$ 65.421.107.317</b>

### 7.1.2. Costo presa CFRD Murallas Viejas

Tal y como se mencionó en el capítulo 3 de este trabajo, la presa CFRD de definida por la consultora MN Ingenieros para el embalse Murallas Viejas contempla 7 tipos de materiales de relleno, y también la construcción de una pantalla de hormigón y un plinto. A continuación en la tabla 7.8 se presentarán los precios unitarios estimados por la consultora durante noviembre del 2009 para las partidas recién mencionadas:

Tabla 7.8: Costos Unitarios para presa CFRD Murallas Viejas estimados a noviembre del año 2009, Fuente: MN ingenieros

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Zona N 1	m3	\$ 5.095
Zona N 2A de la presa	m3	\$ 9.586
Zona N 2B de la presa	m3	\$ 15.140
Zona N 3A de la presa	m3	\$ 4.182
Zona N 3B de la presa	m3	\$ 4.182
Zona N 3C de la presa	m3	\$ 4.182
Zona N 3D de la presa	m3	\$ 4.042
Pantalla Impermeable	m3	\$ 117.740
Plinto	m3	\$ 185.123
Excavaciones en material común	m3	\$ 1.960
Excavaciones en roca	m3	\$ 15.400

Utilizando información del Instituto Nacional de Estadística podemos observar que la inflación total de Chile entre noviembre del 2009 y julio del 2023 fue de 73.3%. Considerando lo anterior se aplicara la inflación correspondiente a los datos de la tabla 7.8, obteniéndose la tabla 7.9 con los respectivos precios unitarios actualizados.

Tabla 7.9: Costos Unitarios para presa CFRD Murallas Viejas estimados a Julio del año 2023, Fuente: Elaboración propia

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Zona N 1	m3	\$ 8.829
Zona N 2A de la presa	m3	\$ 16.612
Zona N 2B de la presa	m3	\$ 26.237
Zona N 3A de la presa	m3	\$ 7.247
Zona N 3B de la presa	m3	\$ 7.247
Zona N 3C de la presa	m3	\$ 7.247
Zona N 3D de la presa	m3	\$ 7.004
Pantalla Impermeable	m3	\$ 204.043
Plinto	m3	\$ 320.819
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688

Para estimar las cantidades correspondientes a cada partida de relleno con respecto a la cantidad total calculada en el punto 4.5.4 del capítulo 4, se utilizó la siguiente proporción presentada en la tabla 7.10. Además los costos asociados a la pantalla y plinto también se realizaron proporcionalmente.

Tabla 7.10: Proporción de materiales presa CFRD Murallas Viejas

Zona N 1	1,164 %
Zona N 2A de la presa	0,128 %
Zona N 2B de la presa	2,412 %
Zona N 3A de la presa	2,568 %
Zona N 3B de la presa	31,490 %
Zona N 3C de la presa	61,497 %
Zona N 3D de la presa	0,741 %

Finalmente en la tabla 7.11 se puede observar el costo directo total de la presa de tierra CFRD Murallas Viejas.

Tabla 7.11: Costo Presa CFRD Murallas Viejas

La Tranca				
Presa CFRD	Unidad	Precio Unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Zona N 1	m3	\$ 8.829	73.715	\$ 650.827.626
Zona N 2A de la presa	m3	\$ 16.612	8.118	\$ 134.852.158
Zona N 2B de la presa	m3	\$ 26.237	152.705	\$ 4.006.510.270
Zona N 3A de la presa	m3	\$ 7.247	162.578	\$ 1.178.213.568
Zona N 3B de la presa	m3	\$ 7.247	1.993.454	\$ 14.446.676.258
Zona N 3C de la presa	m3	\$ 7.247	3.893.059	\$ 28.213.231.021
Zona N 3D de la presa	m3	\$ 7.004	46.888	\$ 328.425.607
Pantalla Impermeable	m3	\$ 204.043	15.285	\$ 3.118.787.135
Plinto	m3	\$ 320.819	3.625	\$ 1.163.016.763
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	887.427	\$ 3.014.306.429
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	33.959	\$ 906.292.330
				<b>\$ 57.161.139.166</b>

El costo del evacuador de crecidas, ya presenta la inflación calculada y se presenta a continuación en la tabla 7.12:

Tabla 7.12: Costo Evacuador de Crecidas Presa CFRD Murallas Viejas

Evacuador de Crecidas	Total CLP
Obras Relacionadas con el Vertedero Frontal	<b>\$1.859.733.453</b>

El costo de las obras de desvío y entrega, ya presenta la inflación calculada y se presenta a continuación en la tabla 7.13:

Tabla 7.13: Obras de Desvío y Entrega, Presa CFRD Murallas Viejas

Murallas Viejas	Total CLP
Obras de Desvío y Entrega	<b>\$ 2.536.958.153</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa CFRD mas el vertedero lateral y las obras de desvío y entrega asociadas a la presa CFRD, se presentan a continuación en la tabla 7.14:

Tabla 7.14: Costo Final Presa CFRD + Vertedero Frontal Murallas Viejas + Obras de Desvío y Entrega

Costo Total
<b>\$ 61.557.830.772</b>

## 7.2. Costo presa HCR

A continuación se presentan distintas estimaciones de los costos asociados a la construcción de la presa de los embalses La Tranca y Murallas Viejas mediante el HCR. Para realizar esto, se investigaron distintos precios unitarios de presas de HCR construidas alrededor del mundo, donde finalmente se obtuvieron las siguientes estimaciones:

1. **Estimación en base al Informe de Anteproyecto de la Central Ralco:** Se emplearán los precios unitarios que se utilizaron en la construcción de la central Ralco. Estos precios fueron proporcionados por la empresa INGENDESA en el informe de Anteproyecto de la central Ralco. Dentro de las principales razones para escoger la información proporcionada por INGENDESA como referencia se encuentran: que Ralco es una de las tres presas de HCR que se han construido en Chile y que tiene muchas similitudes con las presas definidas en este trabajo, como su diseño, pendiente, altura y volumen de HCR, además el estudio realizado por INGENDESA tomó como referencia los costos unitarios de la presa Pangue, de la que también se han tomado consideraciones para elaborar el presente texto. Cabe mencionar que los precios unitarios que presentó INGENDESA los aumentó un 53 %, para incluir gastos generales, instalación de plantas, talleres, instalaciones de construcción, utilidades e imprevistos.
2. **Estimación en base al Estudio de Prefactibilidad de la Construcción del Embalse Chillán:** Se tomarán en cuenta los precios unitarios utilizados en el Estudio de Prefactibilidad del Embalse Chillán, elaborado por SMI Ingenieros. Este estudio se presentó en el 2015, y estimó los costos de construcción de una presa de HCR y CFRD. Cabe mencionar que los precios unitarios que presentó SMI Ingenieros los aumentó un 45 %, para incluir gastos generales, instalación de plantas, talleres, instalaciones de construcción, utilidades e imprevistos.
3. **Estimación en base al Estudio de Simão, Krempel y Rodriguez:** Se considerará el estudio: RCC Cost Comparison of data from Various Jobs, de Simão, Krempel y Rodriguez, en el cual se presenta un análisis sobre distintos precios de HCR utilizados en la construcción de presas de Sudamérica. Los gastos generales, instalación de plantas, talleres, instalaciones de construcción, utilidades e imprevistos están incluidos en el costo final.
4. **Estimación en base a la información de la Asociación de Cemento Portland acerca de los costos de construcción de presas de HCR:** Se realizará una estimación en base a presas recientes construidas de HCR en Estados Unidos, la PCA maneja distintos costos sobre esto. Los gastos generales, instalación de plantas, talleres, instalaciones de construcción, utilidades e imprevistos están incluidos en el costo final.
5. **Estimación en base a Central Ralco y fábrica de hormigones Unicon Chile:** Se contactó al ingeniero civil Jacques Bornand, jefe de desarrollo y calidad de la empresa de hormigones Unicon Chile, quien estimó posibles precios unitarios del cemento que se utilizaría en la construcción de La Tranca y Murallas Viejas. Por lo que en conjunto con los precios de la Central Ralco, se realizará una nueva estimación. Debido a que esta estimación también se hará en base a los costos de la Central Ralco, se aumentarán

un 53 %, para incluir gastos generales, instalación de plantas, talleres, instalaciones de construcción, utilidades e imprevistos.

### 7.2.1. Supuestos Generales

En relación a los costos de excavación, evacuador de crecidas y obras de desvío y entrega, estos serán los mismos para las cinco estimaciones, ya que se enfocarán en calcular el costo del cuerpo de la presa de HCR y no de esas obras. Por lo tanto se tomarán los siguientes supuestos:

- Con respecto a los costos por excavaciones, se utilizaron los mismos precios unitarios definidos en los estudios realizados por MN Ingenieros para las presas CFRD.
- El costo del evacuador de crecidas se estimó en base al estudio Estudio de Prefactibilidad de la Construcción del Embalse Chillán, en donde los precios fueron estimados en diciembre del 2013. Se tomó el supuesto de que el vertedero frontal será con perfil tipo USBR. Considerando esto se obtiene la tabla 7.15 con el precio para el Vertedero por m3:

Tabla 7.15: Costos Unitarios Vertedero en el cuerpo de la presa de HCR estimados a diciembre del año 2013, Fuente: SMI Ingenieros

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Vertedero	m3	\$ 206.234

Considerando la Inflación en Chile durante diciembre del 2013 y julio del 2023 fue de un 54,6 %, se obtiene la tabla 7.16 con el precio unitario actualizado:

Tabla 7.16: Costos Unitarios Vertedero en el cuerpo de la presa de HCR estimados a julio del año 2023, Fuente: Elaboración propia

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Vertedero	m3	\$ 318.837

La cantidad de m3 del vertedero corresponderá al 1 % del volumen de HCR de la presa, esta estimación se realizó en base otras presas que se han construido con HCR.

- En lo que concierne a las obras de desviación y entrega, el informe realizado por SMI Ingenieros comparó una presa de HCR y otra de CFRD de las mismas características geométricas que las que se están comparando en este proyecto, determinó que las obras de desviación y entrega asociadas a la presa de HCR, correspondían al 45 % de las equivalentes en la presa CFRD. Teniendo en cuenta la información recién mencionada y que estas obras son de menor longitud para presas de HCR, se considerará que para las presas de HCR los costos de las obras de desviación y entrega serán el 45 % de los costos de estas mismas para las presas CFRD.

### 7.2.1.1. Costos Evacuador de Crecidas y Obras de Desvío y Entrega, Presa de HCR La Tranca

Considerando lo anterior para La Tranca se obtienen los siguientes costos en las tablas 7.17 y 7.18 :

Tabla 7.17: Costo Evacuador de Crecidas, Presa HCR La Tranca

Evacuador de Crecidas				
Item	Unidad	Precio Unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Vertedero	m3	\$ 206.234	14.688	<b>\$ 4.683.218.012</b>

Tabla 7.18: Costo Obras de Desvío y Entrega, Presa HCR La Tranca

La Tranca	Total CLP
Obras de Desvío y Entrega	<b>\$ 3.045.663.032</b>

### 7.2.1.2. Costos Evacuador de Crecidas y Obras de Desvío y Entrega, Presa de HCR Murallas Viejas

Considerando lo anterior para Murallas Viejas se obtienen los siguientes costos en las tablas 7.19 y 7.20 :

Tabla 7.19: Costo Evacuador de Crecidas, Presa HCR Murallas Viejas

Evacuador de Crecidas				
Item	Unidad	Precio Unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Vertedero	m3	\$ 206.234	25.855	<b>\$ 8.243.578.228</b>

Tabla 7.20: Costo Obras de Desvío y Entrega, Presa HCR Murallas Viejas

Murallas Viejas	Total CLP
Obras de Desvío y Entrega	<b>\$ 1.141.631.169</b>

En base a esto se realizaron las 5 estimaciones mencionadas para los cuerpos de las presas de La Tranca y Murallas Viejas con HCR. Las cuales se presentan a continuación:

## 7.2.2. Estimación Costos 1, en base a la Central Ralco

La estimación de costos 1, realizada en base a los costos de la presa de HCR de la central Ralco. A continuación en la tabla 7.21 se presentarán los precios unitarios estimados por INGENDESA durante julio de 1993 para las partidas recién mencionadas:

Tabla 7.21: Costos Unitarios para presa HCR Central Ralco Julio de 1993,  
Fuente: INGENDESA

Item	Unidad	Precio Unitario CLP
Hormigón Rodillado	m3	\$ 9.016
Hormigón Convencional	m3	\$ 22.304
Cemento hormigón rodillado	t	\$ 64.408
Cemento hormigón convencional	t	\$ 66.176

Utilizando información del Instituto Nacional de Estadística podemos observar que la inflación total de Chile entre julio del 1993 y julio del 2023 fue de 264.6 %. Considerando lo anterior se aplica la inflación correspondiente a los datos de la tabla 7.21, obteniéndose la tabla 7.22 con los respectivos precios unitarios actualizados.

Tabla 7.22: Costos Unitarios para presa HCR Central Ralco Julio de 2023,  
Fuente: Elaboración propia

Item	Unidad	Precio Unitario
Hormigón Rodillado	m3	\$ 32.871
Hormigón Convencional	m3	\$ 81.322
Cemento hormigón rodillado	t	\$ 234.832
Cemento hormigón convencional	t	\$ 241.279

#### 7.2.2.1. Estimación 1 Costo presa HCR La Tranca

En la tabla 7.23 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR La Tranca, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios de la central Ralco.

Tabla 7.23: Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 1

La Tranca				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Hormigón Rodillado	m3	\$ 32.871	1.468.844	\$ 48.282.202.048
Hormigón Convencional	m3	\$ 81.322	42.542	\$ 3.459.579.549
Cemento hormigón rodillado	t	\$ 234.832	230.928	\$ 56.913.729.197
Cemento hormigón convencional	t	\$ 241.279	12.762	\$ 3.079.207.407
Excavaciones en material común	m3	\$ 4.066	99.414	\$ 404.232.708
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	5.779	\$ 151.596.054
				<b>\$ 112.290.551.703</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa HCR mas el vertedero en el cuerpo de la presa y las obras de desvío y entrega, se presenta a continuación en la tabla 7.24:

Tabla 7.24: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 1

Costo Total
<b>\$ 120.019.432.747</b>

### 7.2.2.2. Estimación 1 Costo presa HCR Murallas Viejas

En la tabla 7.25 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR Murallas Viejas, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios de la central Ralco.

Tabla 7.25: Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 1

Murallas Viejas				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Hormigón Rodillado	m3	\$ 32.871	2.487.277	\$ 84.988.165.952
Hormigón Convencional	m3	\$ 81.322	72.554	\$ 5.900.200.617
Cemento hormigón rodillado	t	\$ 234.832	410.401	\$ 100.181.707.890
Cemento hormigón convencional	t	\$ 241.279	21.765	\$ 5.251.445.636
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	830.730	\$ 2.821.723.976
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	31.789	\$ 848.391.190
				<b>\$ 199.991.635.261</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa HCR mas el vertedero en el cuerpo de la presa y las obras de desvío y entrega, se presenta a continuación en la tabla 7.26:

Tabla 7.26: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega Murallas Viejas, Estimación 1

Costo Total
<b>\$ 209.376.844.658</b>

### 7.2.3. Estimación Costos 2, en base al Estudio de Prefactibilidad del Embalse Chillán

La estimación de costos 2, se realiza en base a los costos del estudio de prefactibilidad del embalse Chillán. A continuación en la tabla 7.27 se presentarán el precios unitario estimados por SMI Ingenieros durante diciembre de 2013 por m3 de HCR:

Tabla 7.27: Estimación de Costos Presa por m3 de HCR CLP Diciembre 2013, Fuente: SMI Ingenieros

Estimación de Costos por m3 en 2013	Costo 2013 CLP
HCR	\$ 61.988

Utilizando información del Instituto Nacional de Estadística podemos observar que la inflación total de Chile entre diciembre del 2013 y julio del 2023 fue de 154.6%. Considerando

lo anterior se aplicó la inflación correspondiente al dato de la tabla 7.27, obteniéndose la tabla 7.28 con el respectivo precio unitario actualizado.

Tabla 7.28: Estimación de Costos Presa por m3 de HCR CLP Julio 2023,  
Fuente: Elaboración propia

Estimación de Costos por m3 en 2023	Costo 2013 CLP
HCR	\$ 95.833

### 7.2.3.1. Estimación 2 Costo presa HCR La Tranca

En la tabla 7.29 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR La Tranca, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios del Estudio de Prefactibilidad del Embalse Chillán.

Tabla 7.29: Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 2

La Tranca				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR	m3	\$ 95.833	1.468.844	\$ 140.763.249.678
Excavaciones en material común	m3	\$ 4.066	99.414	\$ 404.231.838
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	5.779	\$ 151.601.663
				<b>\$ 141.319.083.179</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa HCR más el vertedero en el cuerpo de la presa y las obras de desvío y entrega, se presenta a continuación en la tabla 7.30:

Tabla 7.30: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa  
+ Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 2

Costo Total
<b>\$ 149.047.964.223</b>

### 7.2.3.2. Estimación 2 Costo presa HCR Murallas Viejas

En la tabla 7.31 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR Murallas Viejas, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios del Estudio de Prefactibilidad del Embalse Chillán.

Tabla 7.31: Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 2

Murallas Viejas				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR	m3	\$ 95.833	2.585.515	\$ 247.782.614.652
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	830.730	\$ 2.821.723.976
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	31.789	\$ 848.391.190
				<b>\$ 251.452.729.818</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa HCR más el vertedero en el cuerpo de la presa y las obras de desvío y entrega, se presenta a continuación en la tabla 7.32:

Tabla 7.32: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega Murallas Viejas, Estimación 2

Costo Total
<b>\$ 260.837.939.215</b>

#### 7.2.4. Estimación Costos 3, en base al trabajo de Blinder, Krempel y Andriolo

La estimación de costos 3, se realizara en base al trabajo realizado por Blinder, Krempel y Andriolo.

El estudio “RCC Cost Comparasion of Data From Various Jobs”, realizado por Blinder, Krempel y Andriolo, presenta una estimación de costos por metro cúbico para la construcción de presas de HCR. Para realizar este estudio, los ingenieros utilizaron como referencia algunas presas construidas en sudamerica, específicamente presas de Brasil y Argentina a través de la tecnología del HCR.

Para la estimación de costos por metro cúbico en este estudio se consideraron distintos gastos que influyen en el costo de la construcción de una presa de HCR. Entre los gastos que se consideraron encontramos los costos de la planta de áridos, planta de HCR, explotación y transporte del material de los yacimientos, transporte del HCR, colocación y compactación del HCR, preparación de las juntas, vertederos y galerías, materiales, mano de obra, gastos generales imprevisto y utilidades.

También en este estudio se determinó el porcentaje de incidencia en el valor del metro cúbico de HCR de los 4 componentes o partidas principales del costo total. Los componentes considerados son el equipo, los materiales, la mano de obra y los auxiliares o costos indirectos. En la tabla 7.33 podemos observar la incidencia de los componentes principales en una presa de HCR en la cual se utilizan cintas transportadoras para trasladar el HCR.

Tabla 7.33: Incidencia en la construcción de presas de HCR, Fuente: Blinder, Krempel y Andriolo

Porcentaje de incidencia en la elaboración de una Presa de HCR			
Equipo	Materiales	Mano de obra	Auxiliares
35 %	46 %	14 %	5 %

Se estimaron distintos valores por metro cúbico de HCR en el estudio de Blinder, Krempel y Andriolo, principalmente estos varían dependiendo de la distancia a la cual se encuentre la arena natural y las cenizas volantes (puzolana) del proyecto, estos costos unitarios se encuentran en dólares y los costos fueron estimados en 1998 y se presentan a continuación

en la tabla 7.34:

Tabla 7.34: Estimación de Costos Presa por m3 de HCR USD 1998, Fuente: Blinder, Krempel y Andriolo

Estimación de Costos por m3 de HCR en dolares 1998	Costo 1998 USD
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 50Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 41
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 100Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 42
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 150Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 43
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 200Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 43

Consideramos que el dólar tuvo un inflación entre 1998 y julio del 2023 total de 87.86 %, y teniendo en cuenta la transformación de dolares a pesos chilenos, donde el cambio en julio de 2023 fue de 813 pesos chilenos. Se obtiene la tabla 7.35.

Tabla 7.35: Estimación de Costos Presa por m3 de HCR CLP 2023

Estimación de Costos por m3 de HCR actualizados a Julio del 2023	USD 2023	CLP 2023
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 50Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 77	\$ 62.879
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 100Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 79	\$ 63.963
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 150Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 80	\$ 64.971
HCR Agregados Gruesos Triturados+ Arena Natural a 200Km+ Cenizas Volantes a 1000Km	\$ 81	\$ 65.964

#### 7.2.4.1. Estimación 3 Costo presa HCR La Tranca

Para la estimación de costos se utilizó el caso más conservador con el precio unitario más caro de este estudio, en la tabla 7.36 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR La Tranca, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios del estudio “RCC Cost Comparison of Data From Various Jobs”, de Blinder, Krempel y Andriolo.

Tabla 7.36: Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 3

La Tranca				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR con Vertedero Incluido	m3	\$ 65.964	1.468.844	\$ 96.891.067.596
Excavaciones en material comun	m3	\$ 4.066	99.414	\$ 404.231.838
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	5.779	\$ 151.601.663
				<b>\$ 97.446.901.097</b>

Solo se consideró el costo extra de las obras de desvío y entrega, ya que este estudio contempla el coste del vertedero incluido. se presenta a continuación el costo total en la tabla 7.37:

Tabla 7.37: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 3

Costo Total
<b>\$ 100.492.564.129</b>

### 7.2.4.2. Estimación 3 Costo presa HCR Murallas Viejas

Para la estimación de costos se utilizó el caso más conservador con el precio unitario más caro de este estudio, en la tabla 7.38 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR Murallas Viejas, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios del estudio “RCC Cost Comparison of Data From Various Jobs”, de Blinder, Krempel y Andriolo.

Tabla 7.38: Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 3

Murallas Viejas				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR con Vertedero Incluido	m3	\$ 65.964	2.585.515	\$ 170.551.337.403
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	830.730	\$ 2.821.723.976
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	31.789	\$ 848.391.190
				<b>\$ 174.221.452.569</b>

Solo se consideró el costo extra de las obras de desvío y entrega, ya que este estudio contempla el coste del vertedero incluido. se presenta a continuación el costo total en la tabla 7.39:

Tabla 7.39: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega Murallas Viejas, Estimación 3

Costo Total
<b>\$ 175.363.083.738</b>

### 7.2.5. Estimación Costos 4, en base a la información de la Asociación de Cemento Portland acerca de los costos de construcción de presas de HCR

La estimación de costos 4, se realizó en base a la información aportada por la CPA sobre los costos finales de la construcción de dos presas de HCR en Estados Unidos, Las presas Olivenhain y Duck River, de 1.070.000 m<sup>3</sup> y 120.000 m<sup>3</sup> respectivamente. Los precios unitarios están estimados en 2001 para la presa Olivenhain y 2015 para la presa Duck River. Estas presas se escogieron debido a que Duck River es una de las presas más recientes construidas con HCR, mientras que Olivenhain corresponde a una presa similar en términos de volumen a las estudiadas en este trabajo. En la tabla 7.40, se pueden observar los costos de ambas presas.

Tabla 7.40: Costos estimados por la PCA, Fuente: Asociación del Cemento Portland

Presa	Año	Item	Unidad	Costo USD en su respectivo año
Duck River	2015	HCR	m3	\$ 79
Olivenhain	2001	HCR	m3	\$ 68

Consideramos la inflación del dolar para ambas fechas, las cuales son un 29,61 % para 2015 y un 73,4% para 2001, y también teniendo en cuenta la transformación de dólares a pesos chilenos, donde el cambio en julio de 2023 fue de 813 pesos chilenos. Se obtiene la tabla 7.41

Tabla 7.41: Costos estimados por la PCA, en 2023, Fuente: Elaboración propia

Presa	Item	Unidad	Costo USD 2023	Costo CLP 2023
Duck River	HCR	m3	\$ 102	\$ 83.203
Olivenhain	HCR	m3	\$ 118	\$ 95.747

#### 7.2.5.1. Estimación 4 Costo presa HCR La Tranca

En las tablas 7.42 y 7.43 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR La Tranca, con los precios de las presas Duck River y Olivenhain respectivamente. Los costos relativos al evacuador de crecidas y las obras de desvío, están incluidos dentro del precio unitario, por lo tanto no se adicionarán.

Tabla 7.42: Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 3

La Tranca				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR Duck River	m3	\$ 83.203	1.468.844	\$ 122.212.899.496
Excavaciones en material común	m3	\$ 4.066	99.414	\$ 404.231.838
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	5.779	\$ 151.601.663
				<b>\$ 122.768.732.997</b>

Tabla 7.43: Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 3

La Tranca				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR Olivenhain	m3	\$ 95.747	1.468.844	\$ 140.636.861.586
Excavaciones en material comun	m3	\$ 4.066	99.414	\$ 404.231.838
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	5.779	\$ 151.601.663
				<b>\$ 141.192.695.087</b>

#### 7.2.5.2. Estimación 4 Costo presa HCR Murallas Viejas

En las tablas 7.44 y 7.45 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR Murallas Viejas, con los precios de las presas Duck River y Olivenhain respectivamente. Los costos relativos al evacuador de crecidas y las obras de desvío, están incluidos dentro del precio unitario, por lo tanto no se adicionarán.

Tabla 7.44: Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 4.1

Murallas Viejas				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR Duck River	m3	\$ 83.203	2.585.515	\$ 215.123.787.713
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	830.730	\$ 2.821.723.976
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	31.789	\$ 848.391.190
				<b>\$ 218.793.902.879</b>

Tabla 7.45: Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 4.2

Murallas Viejas				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
HCR Olivenhain	m3	\$ 95.747	2.585.515	\$ 247.554.345.582
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	830.730	\$ 2.821.723.976
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	31.789	\$ 848.391.190
				<b>\$ 251.224.460.748</b>

### 7.2.6. Estimación Costos 5, en base a la central Ralco y Unicon Chile

La estimación de costos 5, se realizó en base a los precios unitarios de la central Ralco presentados anteriormente, y los costos unitarios por tonelada de cemento estimados por el profesor e ingeniero civil Jacques Bornand quien trabaja en la empresa de hormigón Unicon Chile.

El profesor Bornand estimó el costo unitario por tonelada de cemento por el cual Unicon Chile podría abastecer la construcción de las presas La Tranca y Murallas Viejas con HCR en base a la ubicación de estos proyectos.

Se puede notar que las principales partidas del informe de anteproyecto elaborado por INGENDESA para la central Ralco, consideran el costo del cemento en toneladas y el costo de la producción, colocación y compactación del HCR por metro cúbico. El principal inconveniente al momento de estimar el costo de una presa de HCR se dificulta principalmente por esto último, ya que debido a la poca cantidad de proyectos que se han realizado en el país es difícil estimar este. Este problema no ocurre al momento de estimar los costos del cemento, ya que se puede obtener el costo de este contactando a una fabrica de cementos.

Considerando lo anterior esta última estimación de costos se realizará en base a los costos de cemento entregados por Unicon y los costos de producción, colocación y compactación del HCR utilizados en la central Ralco. Hay que mencionar que el costo unitario por tonelada de cemento entregado por Unicon se aumentó un 53 %, esto con el fin de incluir gastos generales, instalación de plantas, talleres, instalaciones de construcción, utilidades e imprevistos.

Considerando esto se obtuvo el siguiente precio unitario para el cemento Portland puzolánico.

Tabla 7.46: Costos de cemento Unicon Chile aumentados un 53%

Cemento hormigón rodillado	t	<b>\$ 160.650</b>
Cemento hormigón convencional	t	<b>\$ 164.988</b>

### 7.2.6.1. Estimación 5 Costo presa HCR La Tranca

A continuación en la tabla 7.47 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR La Tranca, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios de la central Ralco y Unicon Chile.

Tabla 7.47: Costo Presa HCR La Tranca, Estimación 5

La Tranca				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Hormigón Rodillado	m3	\$ 32.871	1.468.844	\$ 48.282.202.048
Hormigón Convencional	m3	\$ 81.322	42.542	\$ 3.459.579.549
Cemento hormigón rodillado	t	\$ 160.650	230.928	\$ 38.935.015.119
Cemento hormigón convencional	t	\$ 164.988	12.762	\$ 2.105.571.113
Excavaciones en material común	m3	\$ 4.066	99.414	\$ 404.232.708
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.233	5.779	\$ 151.596.054
				<b>\$ 93.338.201.331</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa HCR mas el vertedero en el cuerpo de la presa y las obras de desvío y entrega, se presenta a continuación en la tabla 7.48:

Tabla 7.48: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 5

Costo Total
<b>\$ 101.067.082.375</b>

### 7.2.6.2. Estimación 5 Costo presa HCR Murallas Viejas

A continuación en la tabla 7.49 se presentan los costos asociados a la construcción de la presa de HCR Murallas Viejas, con los valores calculados en el capítulo 4 y los precios unitarios de la central Ralco y Unicon Chile.

Tabla 7.49: Costo Presa HCR Murallas Viejas, Estimación 5

Murallas Viejas				
Presa HCR	Unidad	Precio unitario CLP	Cantidad	Total CLP
Hormigón Rodillado	m3	\$ 32.871	2.487.277	\$ 84.988.165.952
Hormigón Convencional	m3	\$ 81.322	72.554	\$ 5.900.200.617
Cemento hormigón rodillado	t	\$ 160.650	410.401	\$ 68.534.892.484
Cemento hormigón convencional	t	\$ 164.988	21.765	\$ 3.590.954.026
Excavaciones en material común	m3	\$ 3.397	830.730	\$ 2.821.723.976
Excavaciones en roca	m3	\$ 26.688	31.789	\$ 848.391.190
				<b>\$ 166.684.328.244</b>

Finalmente el costo de la construcción de la presa HCR mas el vertedero en el cuerpo de la presa y las obras de desvío y entrega, se presenta a continuación en la tabla 7.50:

Tabla 7.50: Costo Final Presa HCR + Vertedero en el Cuerpo de la presa + Obras de desvío y entrega La Tranca, Estimación 5

Costo Total
<b>\$ 176.069.537.641</b>

### 7.3. Resumen costos HCR vs CFRD

A continuación en la tabla 7.51, se presenta un resumen de los costos calculados. Podemos observar que la alternativa tipo CFRD con gravas compactadas resulta más económica en ambos proyectos.

Tabla 7.51: Resumen estimación de costos, La Tranca y Murallas Viejas

Tipo de Presa	La Tranca	Murallas Viejas
	Costo CLP	
CFRD Gravas Compactadas	<b>\$ 65.421.107.317</b>	<b>\$ 61.557.830.772</b>
HCR Estimación 1	<b>\$ 120.019.432.747</b>	<b>\$ 209.376.844.658</b>
HCR Estimación 2	<b>\$ 149.047.964.223</b>	<b>\$ 260.837.939.215</b>
HCR Estimación 3	<b>\$ 100.492.564.129</b>	<b>\$ 175.363.083.738</b>
HCR Estimación 4.1	<b>\$ 122.768.732.997</b>	<b>\$ 218.793.902.879</b>
HCR Estimación 4.2	<b>\$ 141.192.695.087</b>	<b>\$ 251.224.460.748</b>
HCR Estimación 5	<b>\$ 101.067.082.375</b>	<b>\$ 176.069.537.641</b>

Gráficamente, los resultados se pueden observar en la figura 7.1 y 7.2:

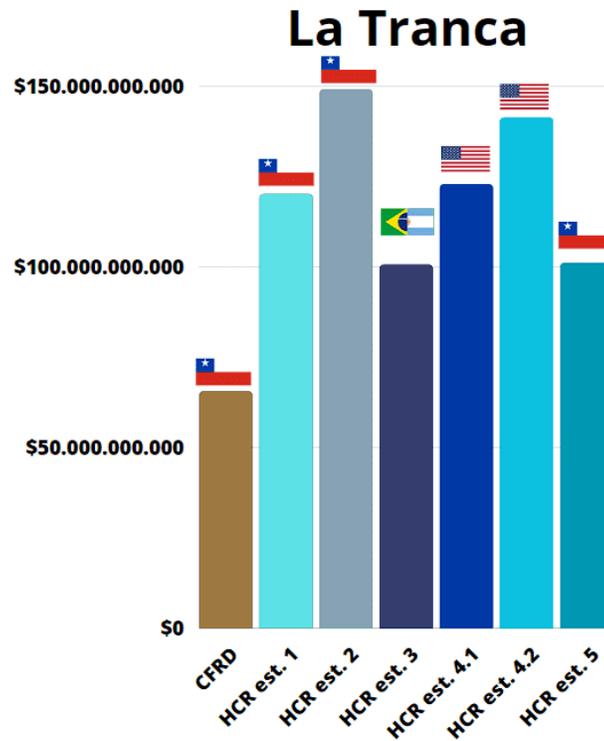


Figura 7.1: Costos presa CFRD y HCR, La Tranca, Fuente: Elaboración propia

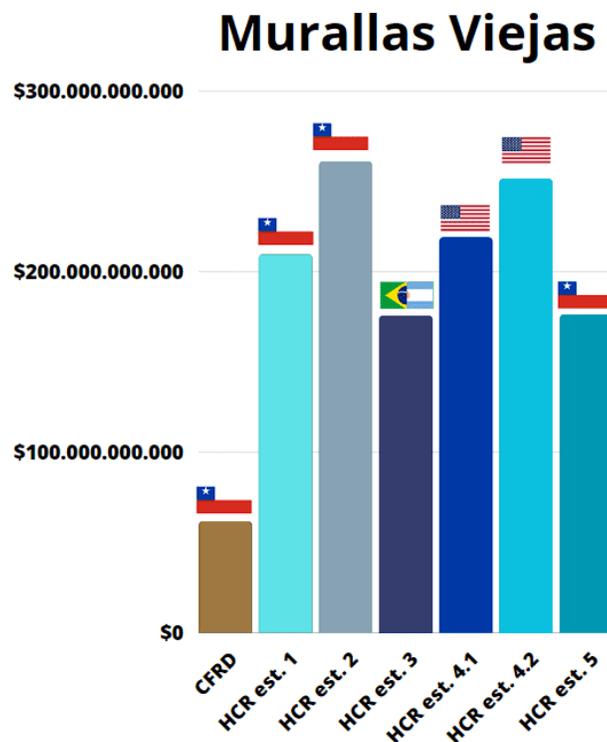


Figura 7.2: Costos presa CFRD y HCR, Murallas Viejas, Fuente: Elaboración propia

### **7.3.1. Comentarios respecto a la estimación de costos**

Podemos observar que, para ambos proyectos, la presa CFRD resulta más económica. Con respecto a los precios de la presa de HCR de La Tranca podemos notar que estos varían entre 1,54 y 2,28 veces el costo de la presa CFRD. Para el caso de la presa de HCR de Murallas Viejas los precios varían entre 2,85 y 4,24 veces el costo de la presa CFRD.

Debido a la poca información disponible respecto a la construcción de presas de HCR en Chile, se decidió considerar distintas estimaciones. La principal estimación corresponde a la primera, basada en la central Ralco con los precios actualizados a día de hoy. Esta estimación tiene mucho sentido, debido a que la central Ralco es la presa de HCR más grande construida en Chile y tiene volúmenes del mismo orden que los proyectos estudiados en este trabajo, además de que para el estudio de La Tranca y Murallas Viejas con HCR se consideraron muchas prácticas similares que se hicieron en la construcción de Ralco.

La principal duda respecto a los costos estimados en función de la central Ralco, vienen dadas por el año en el cual se calcularon originalmente (1993), que, si bien se actualizaron a día de hoy, no dan la total certeza de ser la mejor estimación. Es por esto que se decidió estimar también los costos en base al estudio de prefactibilidad del embalse Chillán, ya que este se realizó en una época mucho más reciente (2013), y además también considerar los costos de las presas de Estados Unidos Olivenhain (2001) y Duck River (2015), la primera corresponde a una presa de volumen del mismo orden, y la segunda a una de las presas más recientes construidas con HCR.

Considerando lo anterior podemos notar que los precios calculados para la estimación 1, 2, 4.1 y 4.2 son todos del mismo orden. Así, cualquier incertidumbre acerca de la precisión de los costos estimados basados en la central Ralco se despeja. Con esto en cuenta podemos decir que la estimación 1 en base a la central Ralco sería correcta y por lo tanto se considerará esta como la estimación final para los proyectos de La Tranca y Murallas Viejas.

Con respecto a la estimación de costos 3 en base al estudio de Blinder, Krempel y Andriolo, y la estimación 5 con los costos de la producción de cemento Unicon Chile, estas probablemente sean las menos fiables debido a las siguientes razones: En la estimación 3, los precios se encuentran subestimados significativamente debido a que este estudio consideró una mano de obra mucho más barata que la que existe hoy en día, mientras que en la estimación 5 existe la posibilidad que el costo unitario por cemento no abarque todos los gastos asociados a este. Por las razones anteriores se descartaron.

## **7.4. Costos Definitivos**

Finalmente se consideraron los costos en base a la central Ralco como los definitivos. En la tabla 7.52 podemos observar los costos definitivos.

Tabla 7.52: Estimación Final, La Tranca y Murallas Viejas

	La Tranca	Murallas Viejas
Tipo de Presa	Costo CLP	
CFRD Gravatas Compactadas	<b>\$ 65.421.107.317</b>	<b>\$ 61.557.830.772</b>
HCR	<b>\$ 120.019.432.747</b>	<b>\$ 209.376.844.658</b>

En la tabla 7.53 podemos observar el costo por metro cúbico de ambas presas de HCR.

Tabla 7.53: Costo por m3, La Tranca y Murallas Viejas

Presa de HCR	La Tranca	Murallas Viejas
Costo de HCR por m3	<b>\$ 81.710</b>	<b>\$ 80.981</b>

En la figura 7.3, podemos observar la representación gráfica de los costos. Podemos notar que para La Tranca, la presa de HCR cuesta **1,83** veces el costo de la presa CFRD. Mientras que para Murallas Viejas el precio de la presa de HCR es **3,40** veces el costo de la presa CFRD.

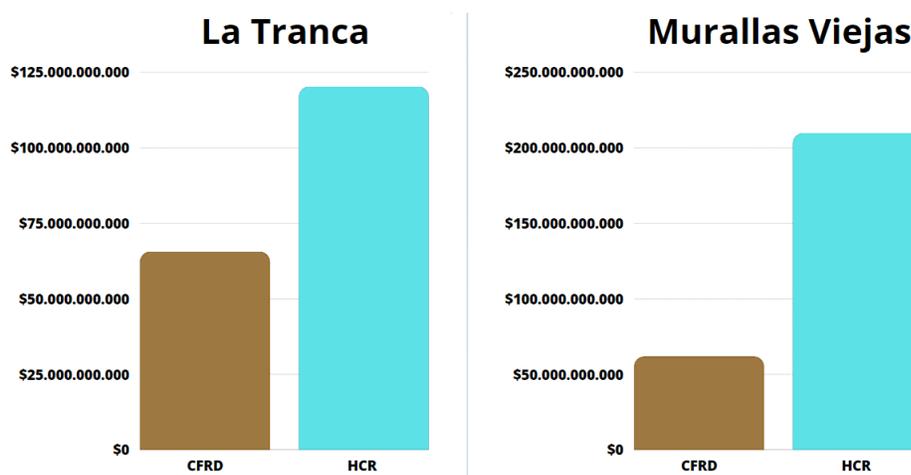


Figura 7.3: Costos presa CFRD vs HCR, Fuente: Elaboración propia

Finalmente considerando que los embalses son de 50 hm<sup>3</sup>, podemos calcular el precio de cada m<sup>3</sup> embalsado para ambas alternativas. En la tabla 7.54 se presenta esta información.

Tabla 7.54: Precio del m3 embalsado para ambas alternativas

Tipos de Presa	La Tranca	Murallas Viejas
Presa de HCR, Costo por m3 Embalsado	<b>\$ 2.400</b>	<b>\$ 4.188</b>
Presa de CFRD, Costo por m3 Embalsado	<b>\$ 1.308</b>	<b>\$ 1.231</b>

## 7.5. Comparación Presas HCR vs CFRD

A continuación, se comparan las principales ventajas generales de la construcción de presas de hormigón compactado con rodillo y presas de materiales sueltos con pantalla de hormigón (CFRD).

### 7.5.1. Ventajas HCR

- El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), menciona que una de las principales ventajas de las presas de HCR es su construcción rápida. Esto debido a la continua colocación de material, lo que permite a las presas de HCR tener tasas de producción muy altas, acortando significativamente los tiempos necesarios de construcción, lo cual podría notarse en la reducción de meses o incluso años en comparación con otros métodos. La reducción de tiempos de construcción trae beneficios adicionales, como la reducción de costos administrativos, la generación temprana de beneficios del proyecto y la posibilidad de utilizar sitios con temporadas de construcción limitadas. Además se debe mencionar que la disminución de tiempos de construcción reduce los tiempos de exposición a riesgos y la utilización de áreas temporales durante la construcción de la presa.
- El Instituto Americano del Concreto menciona que una gran ventaja del HCR muy relacionada con los tiempos de construcción, es que se puede implementar rápidamente ante cualquier imprevisto. Por ejemplo, para proyectos de emergencia como la construcción de una nueva presa aguas abajo de otra que este en peligro de colapsar, o una emergencia nacional de suministro de agua en donde se deba construir rápidamente una presa, se han diseñado y construido presas de HCR para solucionarlos.
- Tanto USACE como ACI, mencionan que las presas de HCR ofrecen ventajas económicas en las obras de desviación de ríos durante la construcción. Esto debido a que una presa de HCR puede ser sobrepasada con un impacto mínimo, y la altura de la presa de HCR puede superar rápidamente la altura del dique provisional. También en las presas de HCR los evacuadores de crecidas se pueden construir directamente en el cuerpo de la presa.

### 7.5.2. Ventajas CFRD

- El libro Diseño de Pequeñas Presas, menciona que por lo general las presas CFRD suelen tener un costo de colocación más barato que otros tipos de presas. Además de que se pueden emplazar en roca y en un suelo de gravas.
- También menciona que las presas CFRD presentan un excelente comportamiento, y la subpresión y la erosión causada por la filtración no suelen ser un gran problema para su diseño.
- El libro también indica que las presas CFRD suelen ser la alternativa más económica cuando se dispone de una gran cantidad de piedras cercanas al sitio de emplazamiento. También son una alternativa muy competitiva cuando los periodos estacionales de construcción son cortos o existe excesiva humedad por las condiciones climáticas en el sitio de emplazamiento.

- Son una gran alternativa cuando el dique será recrecido en una fecha posterior.
- A diferencia de otro tipo de presas, estas pueden colocarse a en cualquier época del año, incluso a lo largo del invierno.

### 7.5.3. Comparación general Proyectos La Tranca y Murallas Viejas

A continuación, se presenta un cuadro comparativo entre las alternativas de presas CFRD y HCR, para los embalses La Tranca y Murallas Viejas. Se compararán distintas características de estas. Debido a la poca información respecto a los tiempos de construcción de presas CFRD disponibles, se realizó una estimación en base a los tiempos de construcción del embalse Puclaro, utilizando el informe de INGENDESA Proyecto Embalse Puclaro.

En las tablas 7.55 y 7.56 se pueden apreciar estos cuadros.

Tabla 7.55: Cuadro Comparativo HCR vs CFRD, La Tranca

<b>La Tranca</b>		
<b>Presa</b>	<b>HCR</b>	<b>CFRD</b>
<b>Volumen de la Presa m3</b>	1.468.844	4.285.015
<b>Costo Presa CLP</b>	\$ 120.019.432.747	\$ 65.421.107.317
<b>Costo por m3 Embalsado</b>	\$ 2.400	\$ 1.308
<b>Tiempo de Construcción meses</b>	20	30
<b>Disponibilidad de Materiales</b>	Si	Deben seguir estudiándose

Tabla 7.56: Cuadro Comparativo HCR vs CFRD, Murallas Viejas

<b>Murallas Viejas</b>		
<b>Presa</b>	<b>HCR</b>	<b>CFRD</b>
<b>Volumen de la Presa m3</b>	2.585.515	6.330.517
<b>Costo Presa CLP</b>	\$ 209.376.844.658	\$ 61.557.830.772
<b>Costo por m3 Embalsado</b>	\$ 4.188	\$ 1.231
<b>Tiempo de Construcción meses</b>	26	43
<b>Materiales Disponibles</b>	Si	Si

# Capítulo 8

## Conclusiones y Comentarios Finales

Durante el desarrollo de este trabajo, se evaluó la factibilidad técnica y económica de construir las presas de los embalses La Tranca y Murallas Viejas con hormigón compactado con rodillo (HCR), con el fin de comparar esta técnica con la de gravas compactadas (CFRD) realizada previamente por la consultora MN Ingenieros. Este trabajo se realizó desde la etapa de diseño conceptual hasta la estimación de costos y su respectiva comparación con las presas CFRD.

### 8.1. Cumplimiento de objetivos

Respecto a los objetivos planteados en este trabajo, podemos mencionar que estos se cumplieron, se logró definir un diseño de presa de HCR para ambos embalses, verificar su estabilidad y cubicar esta misma para definir las cantidades necesarias.

Se definieron los materiales necesarios para construir una presa de HCR en base a textos de normas internacionales y organismos expertos en la construcción de presas y obras civiles, como lo son la ICOLD, la ACI y la USACE. También se describieron las principales obras que se realizan en la construcción de una presa de HCR como lo son: las plantas de áridos, HCR y la metodología de transporte. Se investigaron experiencias nacionales en la construcción de presas de HCR haciendo un enfoque en los aprendizajes que dejaron estas.

Se desarrolló una metodología de construcción, destacando la importancia de las especificaciones técnicas mencionadas en la ICOLD y la ACI. Además, se estimaron los tiempos de construcción, considerando la experiencia nacional e internacional en las tasas de colocación de HCR.

Se estimó un precio para los proyectos en base a la central Ralco, la cual también se comparó con otras estimaciones, para tener más certeza de los precios finales calculados, y finalmente se pudo realizar una comparación de costos con la presa CFRD.

### 8.2. Perspectiva Técnica

Desde la perspectiva técnica, esta memoria ha evidenciado que la construcción de la presa La Tranca es factible, ya que el diseño propuesto y las condiciones generales del sitio de

emplazamiento son altamente favorables para la construcción de una presa de HCR. Dentro de los factores positivos del lugar de emplazamiento de La Tranca, encontramos en primer lugar las condiciones climáticas, estas son ideales y permitirían alcanzar tasas de colocación de HCR muy altas, haciendo que esta alternativa se construyese en menor tiempo. Otro factor positivo es que se cuenta con yacimientos cercanos para el suministro de materiales. Además, la garganta del valle es relativamente angosta y la presencia de roca no se encuentra muy profunda, lo que permitiría construir esta presa sin dificultades. Considerando esto sería técnicamente factible construir una presa de HCR para este proyecto.

Para el caso de la presa Murallas Viejas, la presencia de la roca a 30 metros de profundidad introduce un desafío significativo para emplazar la presa de HCR en el lugar. Excavar estas cantidades no es algo usual en la construcción de presas de HCR. Además, el sitio de emplazamiento considera una separación entre laderas del río Combarbalá muy ancha, lo que afecta directamente las cantidades de HCR que se utilizarán para construir la presa. Si bien el lugar de emplazamiento considera condiciones climáticas similares a La Tranca, las características geométricas del lugar hacen que técnicamente sea más difícil emplazar una presa de HCR en Murallas Viejas.

### 8.3. Perspectiva Económica

Desde la perspectiva económica, ambos proyectos en HCR resultan más caros que su alternativa en CFRD. Para la alternativa de HCR de La Tranca se estima que el costo de construcción de esta misma sea 1,83 veces el costo de la alternativa en CFRD. La mayor diferencia de precios se encuentra en el cuerpo de la presa, ya que el evacuador de crecidas y las obras de desviación y entrega son más económicas para la alternativa de HCR, esto debido a que para presas CFRD este tipo de obras suele ser de mayor envergadura como se ha explicado a lo largo de este trabajo. Si bien el costo de este proyecto en HCR es más caro, se podrían obtener otros beneficios que no están cuantificados en este trabajo, estos se deben principalmente a los menores tiempos de construcción de la presa de HCR en comparación a la CFRD, ya que se estimó que los tiempos de construcción para La Tranca de la presa de HCR son alrededor del 67 % de los de la presa CFRD. Considerando esto, el proyecto estaría generando beneficios desde mucho antes.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, no se debería descartar la alternativa con HCR para La Tranca, ya que si bien presenta costos más caros, también genera beneficios asociados a los tiempos de construcción, pero además en estudio previos se menciona que podrían existir problemas con la cantidad de yacimientos disponibles para una presa CFRD, por lo que en caso que se realicen nuevos estudios considerando nuevos yacimientos podría aumentar el costo de esta misma, y la alternativa de HCR podría volverse más competitiva.

Para el caso de Murallas Viejas, la alternativa con HCR es 3,40 veces el costo de la alternativa en CFRD, esto debido principalmente a las características geométricas del sitio, las cuales hacen que se deba utilizar mucha cantidad de HCR. Además, para el caso particular de Murallas Viejas el evacuador de crecidas y las obras de desviación resultan muy económicas para la alternativa CFRD por lo que económicamente bajo ninguna circunstancia es factible realizar la presa de Murallas Viejas con HCR.

Finalmente, considerando un análisis técnico económico, podemos concluir que la presa de HCR La Tranca, es una alternativa viable, aunque más costosa que la presa CFRD. Por el contrario, la presa de HCR Murallas Viejas es una alternativa inviable principalmente por los elevados costos que se alcanzarían.

## 8.4. Discusión

Es importante mencionar que este trabajo se realizó en base a sitios que fueron escogidos para emplazar presas CFRD, por lo que la profundidad de la roca y el ancho de la garganta del valle no necesariamente eran los ideales para emplazar una presa de HCR, por consiguiente surge la siguiente duda: ¿qué sucedería si se eligiera un sitio donde la roca estuviese expuesta y la garganta fuera muy angosta, y se comparara una presa de HCR con una CFRD en estas condiciones?.

Si bien esta pregunta, no se puede responder considerando una garganta más angosta para este trabajo en específico, sí se puede realizar el ejercicio de considerar que para los sitios estudiados la roca se encontraba expuesta en la superficie. Realizando un procedimiento similar a los del capítulo 4.6 y 7, podemos notar que los costos disminuyeron notablemente en el caso de Murallas Viejas de 3,4 veces el costo de la presa CFRD a 2,53 veces (ya que la cantidad a remover en el embalse Murallas Viejas era muy considerable), y levemente en el caso de La Tranca de 1,83 veces a 1,72 veces (principalmente porque las cantidades a remover no eran significativas). Estos resultados sugieren que el HCR podría ser mucho más competitivo cuando se escogen sitios con las características recién mencionadas, por lo que realizar un estudio de sitios ideales para presas de HCR podría ser un trabajo que aportase mayor información sobre la factibilidad económica de construir presas de HCR.

También se realizó el cálculo numérico considerando una comparación teórica, en la cual se definió un sitio teórico particular con una garganta más angosta y la roca expuesta en la superficie. Considerando esto y definiendo una presa de HCR y otra CFRD, con la misma cota de coronamiento, una longitud de 150 metros y una altura de 140 metros, se estimaron los costos y se obtuvo los siguientes resultados en la tabla 8.1:

Tabla 8.1: Comparación Teórica

	HCR	CFRD
Volumen m3	2.264.500	8.192.750
Costo CLP	\$ 185.032.587.161	\$ 125.082.123.860

Notamos que el costo de la presa de HCR es aproximadamente 1,48 veces el costo de la presa CFRD. Iterando la longitud y la altura para comparar las presas nuevamente, se obtuvieron valores que rondaban el mismo número, las presas de HCR son alrededor de 1,5 veces el costo de la presa CFRD, esto se debe principalmente al costo unitario de las presas CFRD, ya que este es mucho más bajo que el de las presas de HCR considerando la información entregada en el capítulo 7. Cabe mencionar que el costo unitario de las presas CFRD está directamente relacionado con la disponibilidad de yacimientos y canteras en las cercanías del sitio de emplazamiento, y debido a la gran cantidad de volúmenes que requieren

este tipo de presas es un factor muy importante a considerar. Por el contrario, las presas de HCR no requieren tal cantidad de materiales, por lo que la disponibilidad de estos, si bien es importante, no es tan crucial como lo es en el caso de las presas CFRD. Por lo tanto, en una ubicación donde los yacimientos sean escasos, las presas de HCR pueden presentar una alternativa más competitiva.

La mayoría de las estimaciones de presas de HCR en Chile se basan en la experiencia de la construcción de la central Ralco, tanto el estudio del Embalse Chillán como otros estudios que se plantean con HCR en Chile, han considerado esta de base. Sin embargo, para obtener estimaciones más precisas y actuales, es necesario que se construyan nuevas presas de HCR en el país. Para esto es necesario investigar sitios específicos adecuados e ideales para presas de HCR, en los que estas puedan ser mucho más competitivas que las presas CFRD. Considerando las crecientes restricciones ambientales que se están implementando alrededor del mundo, cada vez será más importante la utilizar una menor cantidad de materiales, lo que eventualmente también sería una ventaja importante en el futuro de las presas de HCR.

# Bibliografía

- 1 Asociación del Cemento Portland (PCA). Water Resources Projects, Duck River Phase II & Olivenhain
- 2 Bureau of Reclamation (2007). Diseño de pequeñas presas.
- 3 Comisión Internacional de Grandes Presas, ICOLD (2003). Barrages En Béton Compacté Au Rouleau, Bulletin 126.
- 4 Comisión Internacional de Grandes Presas, ICOLD (2020). Presas de Concreto Compactado con Rodillos, Boletín 177.
- 5 Comité Español de Grandes Presas, SPANCOLD (2012). Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas, TOMO I Actualización en los referente a HCR.
- 6 Consorcio de Ingeniería INGENDESA (1993). Proyecto Embalse Puclaro.
- 7 Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, USACE (2000). Roller-Compacted Concrete Manual, EM 1110-2-2006.
- 8 Dirección de Obras Hidráulicas Plan Nacional de Embalses, Ministerio de Obras Publicas [doh.mop.gob.cl/publicacionesyestudios/Documents/\\_\\_.pdf](http://doh.mop.gob.cl/publicacionesyestudios/Documents/__.pdf)
- 9 ENDESA (1983). Guía de Diseño Estructural
- 10 ICOLD European Club, SPANCOLD, IECA y CHICOLD (2012). 6to Simposio Internacional Sobre Presas de Hormigón Compactado con Rodillo.
- 11 INGENDESA (1993). Informe de Anteproyecto Central Ralco.
- 12 Instituto Americano del Concreto, ACI (2011). ACI 207.5R-11.
- 13 Luis Pinilla (2006). Nuevas Aplicaciones Hormigon Rodillado.
- 14 Luis Uribe Crisostomo (1998). Evaluación y análisis teórico-practico de una metodología para el diseño del hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas.
- 15 Luis Uribe Crisostomo (sin fecha). Características del diseño y construcción de la presa Ralco en Chile.
- 16 Luis Uribe Crisostomo y David Bosshart (2002). Challenging RCC dam construction on the Ralco project in Chile.

- 17 Luz Elena Santaella Valencia (1999). Comentarios sobre el Concreto Compactado Con Rodillo, Revista de Ingeniería Universidad Militar Nueva Granada.
- 18 MN Ingenieros Ltda (2011). Estudio de Factibilidad Construcción Embalse Murallas Viejas, Región de Coquimbo.
- 19 MN Ingenieros Ltda (2011). Estudio de Factibilidad Construcción Embalse La Tranca, Región de Coquimbo.
- 20 Simão Blinder, Antonio Fernando Krempel y Francisco Rodrigues Andriolo (1998). RCC Cost Comparison of Data From Various Jobs.
- 21 SMI Ingenieros Ltda (2015). Estudio de Prefactibilidad Construcción de Riego en Rio Chillan, Región del Bío-Bío.