



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

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE TÚNELES SUBMARINOS  
EN FIORDOS DE LA CARRETERA AUSTRAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GAIL RIDDELL ROBLES

PROFESOR GUÍA:  
WILLIAM WRAGG LARCO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS  
BJÖRN STUGE

SANTIAGO DE CHILE  
AGOSTO 2011

Resumen de la memoria para optar al título de Ingeniero Civil

Por: Gail Riddell Robles

Fecha: 02-08-2011

Prof. Guía: Sr. William Wragg Larco

## “ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE TÚNELES SUBMARINOS EN FIORDOS DE LA CARRETERA AUSTRAL”

La erupción del Volcán Chaitén el 6 de Mayo del año 2009 es un ejemplo de la necesidad de contar con vías de tránsito para la conexión entre ciudades, pueblos y localidades en el sur de Chile.

En esa oportunidad los residentes, ubicados dentro de los 20 km de radio decretados como zona de alerta máxima, fueron evacuados con buses provenientes de Argentina que trasladaron la población hacia San Carlos de Bariloche y luego a Osorno, en conjunto con algunas evacuaciones vía marítima en buques de la Armada Chilena y transbordadores a Puerto Montt.

Esta erupción dejó de manifiesto el problema de falta de conexión terrestre en la zona de Chiloé Continental, en la región de Los Lagos. Hoy la conexión con el continente se realiza, vía marítima con las consecuentes intermitencias debido al frecuente mal tiempo.

Sin Embargo, los desafíos al analizar alternativas de conexión terrestre no son menores ya que esta zona cuenta con diversos accidentes geológicos, tales como cerros, valles, cuencas, ríos y fiordos, entre otros.

En el marco de lo anterior, el presente estudio analiza la factibilidad técnica y económica de desarrollo de túneles submarinos como alternativa de conexión a los accidentes geográficos de mayor relevancia de Chiloé continental; los fiordos Quintupeu y Cahuelmó.

El estudio, de carácter preliminar, comprende un reconocimiento geológico general de ambos fiordos a nivel tanto regional como local, caracterización de macizo rocoso y un análisis de las estructuras influyentes en cada fiordo. Luego se analizaron diferentes alternativas de emplazamiento de túneles en ambos fiordos, determinando ubicaciones de portales, trazados y secciones en base a la topografía del sector, la geología de la zona y la experiencia de la tunelería submarina Noruega.

Finalmente se elaboró un prediseño de la fortificación necesaria en función de la estimación de la calidad del macizo rocoso y se estimaron los costos asociados.

Los resultados del estudio muestran que los túneles en Quintupeu y Cahuelmó son técnica y económicamente factibles. La alternativa de un túnel submarino para el cruce del fiordo Quintupeu es interesante y merece un mayor análisis y comparación con otras alternativas. La alternativa de un túnel submarino para el cruce del fiordo Cahuelmó es cuestionable, dada la topografía, morfología de la zona y en especial, la poca diferencia en longitud respecto de un trazado alternativo superficial.

Se espera que el presente informe sirva de apoyo para a los futuros estudios de conectividad de Chiloé continental y del país.

## Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a los profesores que me guiaron. A William Wragg por nunca hacerse problemas y su excelente disposición, cualidades que le bajaron la nota al factor stress. A Sofía Rebolledo, que con toda su paciencia maternal me acepto semanalmente en su oficina, aclarando mis dudas siempre con una sonrisa. A Björn Stugue le agradezco su voluntad por incorporarse animosamente.

También quiero agradecer a SKAVA, a todo su equipo por el apoyo y ánimo, particularmente a Marcos Allende por proponer el desafío y ser pilar fundamental de su desarrollo.

En relación al trabajo de título, no puedo dejar de agradecer a todos los actores indirectos que fueron de un gran aporte. A Dixie Rivera quien sin preguntar me acompañó al terreno donde pasamos un fin de semana inolvidable y me prestó apoyo en geología durante todo mi trabajo. A Diego Cruz quien invirtió tiempo y destreza en AutoCAD en mí.

Agradezco al gobernador de Palena Juan Alberto Pérez por su ayuda junto con la de la municipalidad de Hualaihué, en particular al encargado de máquinas don Víctor Salazar quien nos facilitó la barcaza; quisiera agradecer a su vez a Luciano Jara por recibirnos en sus cómodos departamentos en Central Plaza, Hornopirén.

Gracias a Felipe Beltrán por los primeros empujones y a Ramón Montecinos, que a pesar de que no pertenecía a su disciplina siempre prestó interés en mi desarrollo, junto con su amigo Gino Rivera que con mucho entusiasmo me orientó y apoyó.

Además quiero agradecer a todos mis amigos. Cota y Cami que me apoyaron a lo largo de toda la carrera; Lucho, Cami y *Los Cabros* que siempre me dieron ánimo. A los geotécnicos, que en ellos he encontrado tremendos amigos y compañeros, gran valor!

A la Fabi Aravena y la Dani Echeverría que me hicieron sufrir con ellas sus memorias, pero siempre entre risas.

Al área de comunicaciones y a la maravillosa gente que conocí ahí durante los 4 años que fui monitora, me llevo grandes amistades.

Cómo no agradecer a la familia Blas Olivares, me han hecho sentir como una más, a todos siempre atesoraré su apoyo y cariño. En especial un beso grande a Benjamín, mi partner, quien ha desafiado su paciencia todos estos años y me ha brindado nada más que amor y contención.

Finalmente quiero agradecer a mi familia por su amor incondicional a lo largo de todo mi paso por la escuela. A mis tías Kena y su familia e Isabel que siempre me motivaron preguntándome ¿Cuándo sales?

A Siguí por poner siempre la vara bien alta, a la Claire quien a pesar de no entender nada de lo que hago siempre muestra interés. A la Mami, que conmigo sufrió cada derrota y celebró cada logro. Sin ustedes no lo habría logrado, LOS AMO.

## TABLA DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Introducción General .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	Generales .....	2
1.2.2	Específicos.....	2
1.3	Descripción de la Zona. ....	3
1.3.1	Carretera Austral.....	3
1.3.2	Fiordos.....	5
1.4	Consideraciones Generales .....	8
1.5	Consideraciones Específicas .....	8
1.6	Método de Trabajo.....	8
1.6.1	Recopilación de Información.....	8
1.6.2	Evaluación de los Antecedentes.....	11
1.6.3	Elaboración de Pre Diseño y Estimación de Costos.....	11
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1	Tunelería Submarina en Noruega .....	12
2.2	Geología Estructural .....	16
2.3	Clasificación del Macizo Rocoso .....	18
2.3.1	Resistencia de la Roca Inalterada – Doruk 1991 and Hoek et al 1992 <sup>[9]</sup> .....	18
2.3.2	RQD – Deere (1967) <sup>[9]</sup> .....	19
2.3.3	RMR – Beniaowski (1989) <sup>[9]</sup> .....	20
2.3.4	GSI – Hoek (1994) <sup>[8]</sup> .....	21
2.3.5	Q – Barton (1974) <sup>[9]</sup> .....	22

III.	RECOPIACIÓN Y ESTUDIO DE INFORMACIÓN .....	24
3.1	Geología Regional <sup>[14]</sup> .....	24
3.1.1	Liquiñe-Ofqui <sup>[7]</sup> .....	26
3.2	Geología Local .....	27
3.2.1	Geomorfología .....	27
3.2.2	Geología .....	29
3.2.3	Estructura.....	32
3.2.4	Caracterización del Macizo Rocoso.....	37
IV.	CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO .....	46
4.1	Identificación y Selección de Emplazamientos .....	50
4.1.1	Quintupeu .....	52
4.1.2	Cahuelmó.....	55
4.2	Sección Transversal <sup>[15]</sup> .....	58
V.	ESTIMACIÓN DE FORTIFICACIÓN .....	61
5.1	Tipos de Roca a Fortificar .....	63
5.1.1	RMR.....	64
5.1.2	Q.....	65
5.2	Tipos de Roca por Tramo.....	71
VI.	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	72
6.1	Estadística de Costos <sup>[1]</sup> .....	72
6.2	Secciones.....	76
6.3	Número de Pernos.....	77
6.4	Shotcrete.....	78
6.5	Estimación de Costos .....	80

VII.	COMENTARIOS .....	81
8.1	Visita a terreno .....	81
8.2	Túneles submarinos .....	81
8.3	Asignación de puntaje en la clasificación RMR.....	81
8.4	Estimación de la clasificación Q.....	82
8.5	Conceptos básicos de diseño .....	82
8.6	Estimación de fortificación .....	83
8.7	Costos.....	84
VIII.	OBSERVACIONES .....	85
IX.	BIBLIOGRAFÍA.....	89
9.1	Túneles Submarinos.....	89
9.2	Geología.....	89
9.3	Métodos de Construcción y Normativas .....	90
9.4	Otros .....	90
X.	ANEXOS .....	91
10.1	Recopilación de Información .....	91
10.1.1	Recopilación Bibliográfica .....	91
10.1.2	Visita a Terreno .....	98
10.1.3	Clasificación de obras según flujo vehicular, longitud y equipamiento.....	107
10.1.4	Censo 2006 .....	108
10.2	Planos.....	109

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas Geográficas, fiordos.....	6
Tabla 2: Túneles Submarinos Noruegos <sup>[3]</sup> .....	13
Tabla 3: Túneles Submarinos Noruegos <sup>[3]</sup> .....	13
Tabla 4: Clasificación RQD .....	20
Tabla 5: Clasificación RMR.....	21
Tabla 6: Clasificación GSI .....	21
Tabla 7: Clasificación Q.....	23
Tabla 8: Muestras Quintupeu.....	30
Tabla 9: Puntaje Parámetros RMR 1 a 3, para Puntos de Terreno en Quintupeu .....	37
Tabla 10: Puntaje Parámetros RMR 4 y 5, para Puntos de Terreno en Quintupeu .....	38
Tabla 11: Clasificación RMR en Quintupeu .....	38
Tabla 12: Puntaje Parámetros RMR 1 a 3, para Puntos de Terreno en Cahuelmó.....	38
Tabla 13: Puntaje Parámetros RMR 4 y 5, para Puntos de Terreno en Cahuelmó.....	39
Tabla 14: Clasificación RMR en Cahuelmó .....	39
Tabla 15: Corrección para túneles, Quintupeu .....	40
Tabla 16: RMR corregido, Quintupeu.....	41
Tabla 17: Corrección para túneles, Cahuelmó.....	42
Tabla 18: RMR corregido, Cahuelmó .....	42
Tabla 19: Puntaje Parámetros Q para Puntos de Terreno en Quintupeu .....	43
Tabla 20: Puntaje Parámetros Q para Puntos de Terreno en Quintupeu .....	43
Tabla 21: Valores del Q para distintos valores y rangos en Quintupeu .....	44
Tabla 22: Puntaje Parámetros Q para Puntos de Terreno en Cahuelmó.....	44
Tabla 23: Valores del Q para distintos valores y rangos en Cahuelmó.....	45
Tabla 24: Clasificaciones Quintupeu .....	45
Tabla 25: Clasificaciones Cahuelmó.....	45
Tabla 26: Longitud crítica en pendiente $\Delta \approx 23 \text{Km/h}$ <sup>[15]</sup> .....	51
Tabla 27: Valores del ESR según tipo de Excavación .....	61
Tabla 28: Tipo de refuerzo o fortificación por categoría.....	62

Tabla 29: Guía para excavación y soporte de túneles de 10 m de diámetro de acuerdo al sistema RMR <sup>[10]</sup> .....	64
Tabla 30: Conversión de monedas .....	73
Tabla 31: Costos por metro lineal de túnel en NOK, CLP y USD, 2010 .....	73
Tabla 32: Rendimientos, Pernos y Shotcrete .....	74
Tabla 33: Optimización de $\Sigma \epsilon_i^2$ .....	75
Tabla 34: Valores de $\alpha$ y $\beta$ .....	75
Tabla 35: Varianza y desviación estándar .....	76
Tabla 36: Propiedades de las secciones S1 y S2.....	76
Tabla 37: Longitud total estimada, Quintupeu y Cahuelmó .....	76
Tabla 38: Longitud total por sección.....	77
Tabla 39: Pernos por contorno de sección.....	77
Tabla 40: Número de pernos por sección y longitud total.....	78
Tabla 41: Pernos No./m.....	78
Tabla 42: Espesores de Shotcrete.....	79
Tabla 43: Volumen de Shotcrete.....	79
Tabla 44: Volumen Shotcrete por metro lineal.....	79
Tabla 45: Pernos y Shotcrete por metro lineal.....	80
Tabla 46: Costo por metro lineal .....	80
Tabla 47: Costo y error total.....	80
Tabla 48: RMR Parámetros y Puntaje.....	91
Tabla 49: Condición de Discontinuidades.....	92
Tabla 50: Condiciones de RMR para Túneles.....	92
Tabla 51: Corrección de puntaje RMR para túneles.....	92
Tabla 52: Clasificación Según Q de Parámetros RQD y Jn .....	93
Tabla 53: Clasificación Según Q de Parámetro $J_n$ .....	93
Tabla 54: Clasificación Según Q de Parámetro $J_a$ .....	94
Tabla 55: Clasificación Según Q de Parámetro $J_w$ .....	94
Tabla 56: Clasificación Según Q de Parámetro SRF.....	95
Tabla 57: Estimación de Campo de Resistencia a la Compresión para Muestras de Roca Intacta.....	96

Tabla 58: Coordenadas puntos de terreno Quintupeu. ....	98
Tabla 59: Coordenadas puntos de terrenoCahuelmó.....	98
Tabla 60: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Quintupeu .....	104
Tabla 61: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Quintupeu .....	104
Tabla 62: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Cahuelmó.....	104
Tabla 63: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Cahuelmó.....	104
Tabla 64: Estructura Quintupeu .....	105
Tabla 65: Estructura Cahuelmó .....	106
Tabla 66: Equipamiento de seguridad y control en túneles mayores de 200m. ....	107
Tabla 67: Estudio estadístico de flujo vehicular año 2006 .....	108

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tramo interrumpido Ruta 7 .....	3
Figura 2: Mapa Ruta 7, Carretera Austral .....	4
Figura 3: Recorridos de Transbordadores .....	5
Figura 4: Ubicación Fiordos. ....	6
Figura 5: Imagen satelital de la zona.....	6
Figura 6: Ruta construida (continua) y por construir (discontinua) .....	7
Figura 7: Afloramientos en Quintupeu (izq) y Cahuelmó (der).....	9
Figura 8: Visita zarpando desde Pichicolo .....	10
Figura 9: Equipo de trabajo .....	10
Figura 10: Fiordos Chilenos y Noruegos.....	12
Figura 11: Perfil tipo de un túnel submarino <sup>[3]</sup> .....	14
Figura 12: Definición de Rumbo .....	16
Figura 13: Definición Manteo .....	16
Figura 14: Red Estereográfica .....	17
Figura 15: Ejemplo de plano en la red de Shmidt .....	17
Figura 16: Representación de un plano .....	18
Figura 17: Carta Geológica SERNAGEOMIN <sup>[14]</sup> .....	24
Figura 18: Liquiñe-Ofqui .....	26
Figura 19: Batimetría de Fiordos (Carta SHOA-7340) .....	28
Figura 20: Ubicación toma de muestras y falla Liquiñe-Ofqui .....	30
Figura 21: Imágenes de afloramientos, obtención de muestras Quintupeu. ....	31
Figura 22: Imágenes de afloramientos, obtención de muestras C-1 y C-2. ....	31
Figura 23: Imágenes de afloramientos, obtención de muestras C-3 y C-4. ....	32
Figura 24: Polos y densidades en Quintupeu .....	33
Figura 25: Polos y Planos de las Principales Concentraciones en Quintupeu y Falla Liquiñe-Ofqui .....	33
Figura 26: Polos y densidades en Cahuelmó .....	34
Figura 27: Polos y Planos de los Sets Estructurales en Cahuelmó y Falla Liquiñe-Ofqui .....	35

Figura 28: Polos y densidades en la zona .....	36
Figura 29: Polos y Planos de los Sets Estructurales en la zona y Falla Liquiñe-Ofqui.....	36
Figura 30: Puntos de Terreno .....	37
Figura 31: Plano gobernante de emplazamiento en Quintupeu. ....	40
Figura 32: Plano gobernante de emplazamiento en Cahuelmó.....	41
Figura 34: Clasificación de túneles según flujo vehicular y longitud <sup>[15]</sup> .....	48
Figura 34: Estadística de flujo <sup>[16]</sup> .....	49
Figura 35: Emplazamiento Quintupeu (Google Earth) .....	53
Figura 36: Perfil terreno, Quintupeu (Google Earth) .....	54
Figura 37: Trazado terrestre supuesto. ....	56
Figura 38: Emplazamiento Cahuelmó (Google Earth).....	57
Figura 39: Perfil terreno, Cahuelmó (Google Earth).....	58
Figura 40: Sección transversal básica <sup>[15]</sup> .....	59
Figura 41: Nichos de estacionamiento de emergencia <sup>[15]</sup> .....	59
Figura 42: Gráfico para estimación de fortificación sobre la base del índice Q .....	62
Figura 43: Gráfico de fortificación según Q de la sección S1 .....	66
Figura 44: Gráfico de fortificación según Q de la sección S2. ....	67
Figura 45: Rango de valores de Q para Quintupeu en la sección S1. ....	68
Figura 46: Rango de valores de Q para Quintupeu en la sección S2. ....	69
Figura 47: Valores de Q para Cahuelmó en la sección S1.....	70
Figura 48: Valores de Q para Cahuelmó en la sección S2.....	70
Figura 49: Costo por metro lineal de túnel en NOK <sup>[1]</sup> .....	72
Figura 50: Porción de contorno apernada.....	77
Figura 51: Alternativa terrestre en Cahuelmó, Google Earth. ....	86
Figura 52: Esquema de inyección de lechada .....	86
Figura 53: Geological Strength Index. ....	97
Figura 54: Muestra 2, Quintupeu .....	99
Figura 55: Muestra 3, Quintupeu .....	100
Figura 56: Muestra 359, Quintupeu. ....	101
Figura 57: Muestra 1, Cahuelmó.....	102
Figura 58: Muestra 3, Cahuelmó.....	103

# **I. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Introducción General**

La conexión entre las regiones de Los Lagos y Aysén se ve perjudicada por la inconclusa construcción de la Carretera Austral entre Puerto Montt y Chaitén. Esto mantiene la división del territorio chileno y ha confinado a la Región de Aysén a un aislamiento, con negativas consecuencias económicas y geopolíticas.

En la actualidad existe una conectividad combinada marítimo-terrestre, que no hace posible a los habitantes al sur de Puerto Montt llegar en forma rápida y segura al resto del territorio. Ante la falta de caminos chilenos, la alternativa es vía Argentina, con todo cuanto eso implica. Este problema, que forma parte de la realidad cotidiana para los habitantes de esa zona, se hizo más evidente en la crisis tras la erupción del volcán Chaitén los afectados por la emergencia no pudieron arribar a Puerto Montt en forma expedita.

La Carretera Austral es una de las grandes obras del siglo XX chileno. Además de su rentabilidad social actual, se debe considerar su potencial económico y su carácter estratégico. Terminar este camino no sólo significa bienestar para sus habitantes, sino que tiene también una importancia geopolítica fundamental. Además, es un activo riquísimo para aprovechar una de las regiones con más potencial turístico, de piscicultura y ganadero entre otros, como la Patagonia. Sus territorios inexplorados, su selva virgen y sus características únicas hacen de este territorio una zona cuyo turismo especial debiera crecer fuertemente en el futuro.

Es por las razones mencionadas, que la necesidad de conectar y generar un continuo de la carretera austral cobra relevancia, además que constituye un factor importante en el desarrollo de la zona.

Dada la difícil condición tanto climática como geográfica, una alternativa a considerar como solución en zonas cuyos accidentes geográficos se encuentran inundados es el túnel submarino. Bajo esta premisa, se presenta a continuación un estudio respecto a la factibilidad de la realización de estos proyectos como solución a la continuidad terrestre en estos puntos de mayor desafío.

Es por esto que de realizarse una continuidad en el camino terrestre, el análisis de túneles en zonas de cruce, como lo son los fiordos Quintupeu y Cahuelmó en la zona de Chiloé continental, se presentan como candidatos, ya que la puesta en servicio de túneles puede ser una manera expedita y segura la zona Norte de la Carretera Austral.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Generales**

Se busca analizar la factibilidad de que túneles submarinos en los fiordos Quintupeu y Cahuelmó en el tramo Norte de la carretera austral, sea la solución al problema de interconexión en ese tramo, bajo el supuesto de que exista un trazado terrestre en la zona.

### **1.2.2 Específicos**

Como objetivos específicos se incluye:

- Selección de alternativas de emplazamientos de los túneles.
- Clasificar el macizo rocoso de acuerdo a parámetros geotécnicos registrados en terreno, según el índice GSI (2000), RMR (1989) y Q de Barton (1974, 1993).
- Determinar/recomendar tipos de fortificación y costos asociados.

### 1.3 Descripción de la Zona.

#### 1.3.1 Carretera Austral

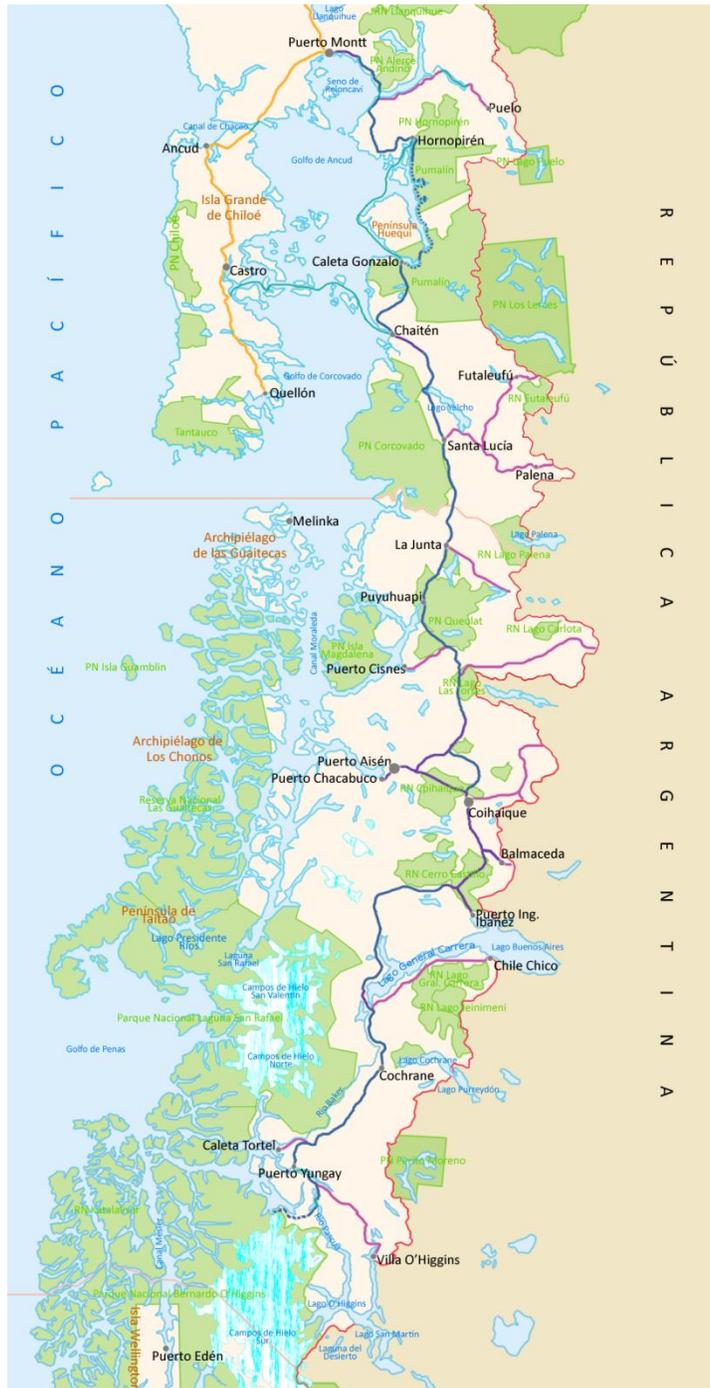
La carretera Austral se ubica en la zona sur de Chile y posee una longitud de 1.240 km, uniendo Puerto Montt con Villa O'Higgins, como muestra la Figura 2.

Sin embargo, como se aprecia con mayor claridad en la Figura 1, existe un tramo exento de camino terrestre, ubicado en el tramo Norte de la Carretera Austral entre las localidades de Pichanco y Leptepu.

Por otra parte, este tramo mencionado tiene una accesibilidad limitada, dada por la falta de caminos viales, que se ve suplida por la acción de transbordadores, los que tienen tarifas fluctuantes según temporada, sentidos de flujo, días de la semana y tipo de vehículo. La Figura 3 muestra los recorridos de éstos.



Figura 1: Tramo interrumpido Ruta 7



**Figura 2: Mapa Ruta 7, Carretera Austral**



*Figura 3: Recorridos de Transbordadores*

### 1.3.2 Fiordos

El sector desconectado se encuentra cruzado de Este a Oeste por dos fiordos, que en caso de enmendar el problema de conexión, será necesario cruzar.

El presente informe estudia de manera preliminar la posibilidad de cruzar dichos fiordos a través de túneles submarinos. Es por esto que el estudio de estos es primordial.

Los fiordos Quintupeu y Cahuelmó se encuentran ubicados en la región de los Lagos, Provincia de Palena, en el sector conocido como “Chiloé Continental”.

El fiordo Quintupeu se encuentra ubicado aproximadamente a unos 23 [Km] hacia el sur de Hornopirén, mientras que el fiordo de Cahuelmó se encuentra unos 10 [Km] al sur de este último, tal y como muestra la Figura 4



Figura 4: Ubicación Fjordos.



Figura 5: Imagen satelital de la zona.

Quintupeu se puede encontrar entre las coordenadas geográficas para la latitud Sur (latitud, longitud):

Tabla 1: Coordenadas Geográficas, fjordos

	Latitud (°)	Longitud (°)
Quintupeu	-42.166 / -42.171	-72,44° / -72.366
Cahuelmó	-42.260 / -42.253	-72.444 / -72.391

Tal y como muestra la Figura 5.

El acceso terrestre desde la localidad de Hornopirén hacia el sur es interrumpido en la localidad de Pichanco, para ser retomado en Leptepu aproximadamente 25 kilómetros más al sur, tal y como muestra la Figura 6.



Figura 6: Ruta construida (continua) y por construir (discontinua)

## **1.4 Consideraciones Generales**

Cabe señalar que a la fecha de concluido el presente estudio, la información disponible es escasa. Toda conclusión, evaluación y clasificación se ha llevado a cabo sobre la base de una observación superficial de afloramientos en terreno. Es por esto que los resultados contenidos en este estudio tienen un carácter preliminar y por consiguiente deberán ser ratificados, ajustados o corregidos una vez que dicha información sea obtenida de las exploraciones de terreno correspondientes.

## **1.5 Consideraciones Específicas**

- Dada la similitud geográfica entre la Patagonia Chilena y Noruega, en particular los fiordos del Sur de Chile, es posible considerar a dicho país como un comparativo de factibilidad, basándose en la experiencia registrada.
- Respecto a los conceptos básicos de diseño, se considerará el método empírico basado en la clasificación del macizo rocoso de Barton (índice Q).

## **1.6 Método de Trabajo**

### **1.6.1 Recopilación de Información**

La recolección de información constó de dos etapas:

#### **1.6.1.1 Investigación de Gabinete**

Correspondiente a revisión bibliográfica e investigación de material disponible, descripción que aparece de forma detallada en el capítulo II correspondiente a la revisión bibliográfica. El capítulo mencionado se encuentra clasificado en bibliografía en geología, túneles submarinos y métodos de construcción y diseño.

### 1.6.1.2 Visita a Terreno

Se realizó un mapeo superficial del macizo rocoso en ambos fiordos, lo que se llevó a cabo gracias a la marea baja, por lo que se pudo analizar afloramientos de roca fresca, tal y como muestra la Figura 7 en Quintupeu y Cahuelmó. Además, se efectuó una recolección de muestras de roca en los puntos de parada.

Para la caracterización geológica, la metodología de trabajo utilizada se encuentra basada en estudios observacionales y de medición de estructura utilizando instrumentos como regla, brújula, martillo geológico y GPS.



*Figura 7: Afloramientos en Quintupeu (izq) y Cahuelmó (der)*

Utilizando los datos otorgados por la carta geológica del Sernageomin, 2003 <sup>[14]</sup> y uno de los puntos mapeados por Náquira, 2009 en su trabajo de título <sup>[13]</sup>, se realizó una planificación de muestreo y toma de datos a modo de obtener muestras variadas.

La visita se realizó el día Sábado 22 de Enero del año 2011. El punto de salida fue desde la rampa de Pichicolo, en la localidad de Hualaihué, a las 6 am. Rumbo a los fiordos involucrados.

El siguiente mapa, muestra de forma más explicativa la proximidad de las localidades.



*Figura 8: Visita zarpando desde Pichicolo*

El equipo de trabajo (Figura 9) estuvo compuesto por un Ingeniero Civil, una estudiante de Geología, dos operarios de barcaza y la alumna memorista, estudiante de Ingeniería Civil.



*Figura 9: Equipo de trabajo*

A partir de la visita, fue posible recolectar datos preliminares e indicativos necesarios para realizar una descripción de la geología local, identificar las estructuras principales que gobiernan el sector en ambos fiordos y finalmente realizar caracterización del macizo rocoso según RMR de Beniaowski y según Q de Barton <sup>[9]</sup>. Todos los antecedentes y cálculos referentes a lo mencionado se encuentran detallados y especificados en el Capítulo III.

La caracterización del macizo es imperativa para determinar la fortificación necesaria del túnel en función de la sección de éste, por lo que es un parámetro fundamental a considerar en Quintupeu y Cahuelmó.

### **1.6.2 Evaluación de los Antecedentes**

Durante esta etapa se efectuaron las clasificaciones de macizo rocoso, descripción de muestras y el análisis de los datos medidos en terreno. Además se estudió las características topográficas de la zona.

### **1.6.3 Elaboración de Pre Diseño y Estimación de Costos**

De acuerdo a la evaluación de antecedentes se evaluaron alternativas de emplazamiento y tipo de soporte necesario para las clasificaciones y estructura del macizo.

Dado el análisis anterior se procedió a estimar los costos asociados a los proyectos propuestos.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tunelería Submarina en Noruega

Noruega tiene una vasta experiencia no solo en construcción de túneles subterráneos, sino que también submarinos. A lo largo de la zona costera Noruega, más de 40 túneles submarinos han sido construidos a partir de comienzos de la década de los 80.

El presente estudio se encontrará fuertemente basado en la experiencia Noruega, principalmente por la similitud en la geografía.



**CHILE**

**NORUEGA**

*Figura 10: Fiordos Chilenos y Noruegos*

Todos los túneles noruegos han sido excavados mediante el método perforación y tronadura que consiste en la utilización de equipos Jumbos que perforan un patrón determinado a profundidades dadas en el frente, para luego ser rellenas con explosivos.

El túnel más largo a la fecha corresponde al Bømlafjord y mide 7.9 Km y el más profundo es el Eiksund, pasando por una profundidad máxima de 287 m bajo el nivel del mar, tal y como se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2: Túneles Submarinos Noruegos <sup>[3]</sup>

Tunel	Longitud (m)	Profundidad max. (m)	Pend. max. (%)	Sección trans. (m <sup>2</sup> )	Mínima cobertura de roca (m)	Año Apertura
Vardø	2620	-88	8	46	35	1982
Nappstraumen	1780	-60	8	55	28	1990
Frøya	5200	-157	10	52	41	2000
Oslofjord	7200	-130	7	79	32	2000
Eiksund	7800	-287	9,6	71	50	2007

La gran mayoría de los túneles han sido excavados en rocas duras de origen precámbrico, mayoritariamente Gneis, como se aprecia en la Tabla 3. Sin embargo, algunos de ellos han sido construidos en sectores de roca débil (metamórfica) como esquistos, filitas y pizarras.

Un alto porcentaje de los túneles submarinos en Noruega cruzan zonas de debilidad en la roca o incluso fallas importantes.

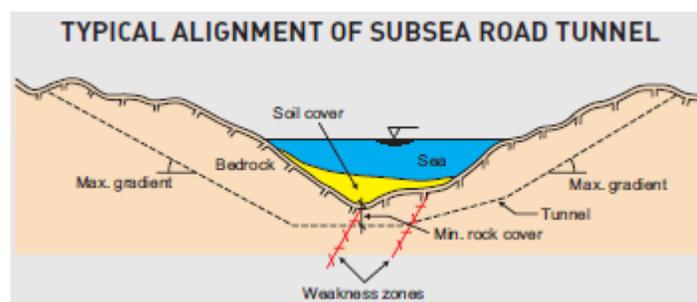
Tabla 3: Túneles Submarinos Noruegos <sup>[3]</sup>

No.	Project	Completed	Main rock type	Cross section m <sup>2</sup>	Length km
1	Vardø	1981	Shale, sandstone	53	2.6
	Kamsund (Statpipe)	1984	Greenstone, sandstone, phyllite, gneiss	27	4.7
	Hjartøy (Oseberg)	1986	Gneiss	26	2.3
2	Ellingsøy	1987	Gneiss	68	3.5
3	Valderøy	1987	Gneiss	68	4.2
4	Kvalsund	1988	Gneiss	43	1.6
5	Godey	1989	Gneiss	52	3.8
6	Hvaler	1989	Gneiss	45	3.8
7	Flekkerøy	1989	Gneiss	46	2.3
8	Nappstraumen	1990	Gneiss	55	1.8
9	Fannefjord	1990	Gneiss	54	2.7
11	Byfjord	1992	Phyllite	70	5.8
13	Fælfjord	1992	Gneiss	70	5.2
	Kollnes (Troll)	1994	Gneiss	45 - 70	3.8
14	Hilte	1994	Gneiss	70	5.6
15	Tromsøysund	1994	Gneiss	2 x 60	3.4
16	Bjowøy	1996	Gneiss	53	2.0
18	North Cape	1999	Shale, sandstone	50	6.8
19	Oslofjord	2000	Gneiss	79	7.2
20	Frøya	2000	Gneiss	52	5.2
22	Bermlafjord	2000	Greenstone, gneiss, phyllite	74	7.9
24	Eiksund	2007	Gneiss, gabbro, limestone	71	7.8
26	Nordåsstraumen	2008	Gneiss	2 x 74	2.6
27	Finnfast	2009	Gneiss, amphibolite	50	5.7 + 1.5
28	Atlantehavs tunnel	2009	Gneiss	71	5.7

En comparación con los túneles convencionales, los submarinos tienen características que los hacen ser especiales, tales como:

- La mayor parte de la superficie de terreno que compone el área del proyecto se encuentra sumergida, por lo que se necesitan métodos especiales de investigación.
- Generalmente los fiordos o estrechos se encuentran definidos por fallas regionales. Por lo que la máxima profundidad del túnel y menor recubrimiento suele coincidir con la localización de esas zonas.
- Si bien se utiliza la técnica del pre-grouting, como la fuente de infiltraciones es de origen ilimitado, y el túnel posee una pendiente, es necesario bombear el agua infiltrada hacia fuera de éste.
- Las sales y minerales suspendidas en el agua, tienen efectos corrosivos tanto en ámbitos de excavación como de soporte del túnel.

Uno de los factores más relevantes en el diseño es el recubrimiento de roca por sobre el eje del túnel. Existe un recubrimiento mínimo que depende de la calidad de la roca, un diseño será más económico conforme este recubrimiento sea menor, ya que un exceso de recubrimiento prolongará la longitud del túnel, aumentando costos no solo de construcción sino también de operación ya que afecta la mantención del proyecto a lo largo de toda su vida útil.



*Figura 11: Perfil tipo de un túnel submarino <sup>[3]</sup>*

De no satisfacer los requerimientos mínimos de recubrimiento, se pueden generar inestabilidades en la roca y altísimos riesgos en la construcción. Además, un menor recubrimiento puede facilitar mayores filtraciones que requerirán mayor cantidad de inyección de grout (lechada) y mayores bombeos de agua.

Generalmente, como se muestra en la Figura 11, el recubrimiento mínimo de roca por sobre el techo del túnel se encuentra ubicado en las zonas en que la combinación de profundidad y altura de sedimento es más crítica. Además, un factor importante que afecta también este recubrimiento son las zonas de falla o debilidad que se encuentren en el emplazamiento.

Según la normativa Noruega (*Norwegian Public Road*) un recubrimiento mínimo inferior a los 50 metros será aceptado siempre y cuando las prospecciones geotécnicas respalden una buena calidad del macizo rocoso. Sin embargo, muchos de los proyectos Noruegos han sido construidos con un recubrimiento mínimo de roca correspondiente a 30 metros, y, como mencionado, estas zonas corresponden a zonas de debilidad o zonas en que la velocidad de onda sísmica es menor.

El tipo de soporte utilizado en el túnel dependerá de las condiciones del macizo rocoso. Sólo en condiciones en que la resistencia del macizo es baja, se utiliza un sistema de refuerzo denominado “reforzamiento pesado” que corresponde a instalaciones de estructuras como marcos de acero, por lo que se puede inferir que la naturaleza del soporte varía a lo largo del túnel, manifestando la calidad de la roca.

Finalmente, se puede concluir que los principales puntos a considerar en la planificación de un túnel submarino son:

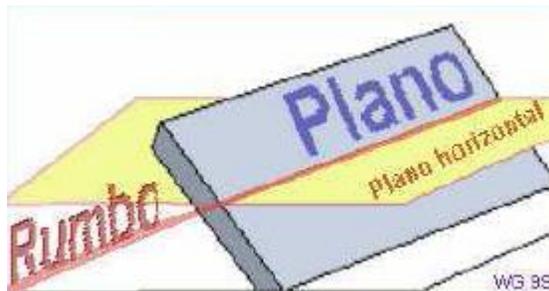
- Fallas distintivas y zonas de fallas, ya que causarán los mayores problemas.
- Presencia de salbanda en la falla, puesto que podría contener arcillas de tipo expansivas.
- La obtención de datos confiables respecto a las filtraciones son generalmente poco factibles, para muchos proyectos éstas corresponden a volúmenes similares o mayores a los encontrados en proyectos subterráneos.

## 2.2 Geología Estructural

Un macizo rocoso se encuentra compuesto por roca intacta y discontinuidades.

La orientación de las discontinuidades permite una visión general de la geometría del macizo rocoso. Estas son representadas como planos y se ubican espacialmente mediante sus propiedades llamadas Rumbo y Manteo o Dip y Dip Direction.

Como se puede apreciar en la Figura 12, el Rumbo de una discontinuidad corresponde al ángulo con respecto al norte de una recta formada por la intersección del plano de la discontinuidad con un plano horizontal imaginario.



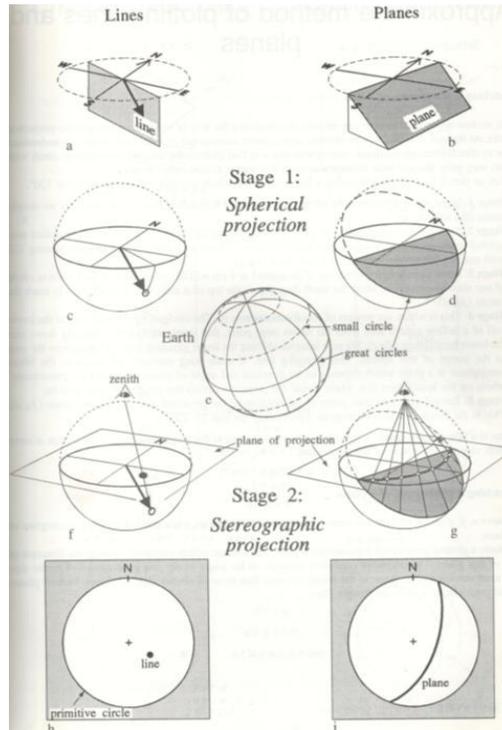
*Figura 12: Definición de Rumbo*

El Manteo corresponde al ángulo que se forma entre el plano de la discontinuidad con el plano horizontal imaginado medido perpendicular al rumbo, como se ilustra a continuación.



*Figura 13: Definición Manteo*

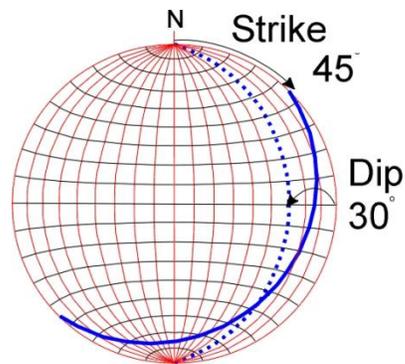
A partir de estos parámetros es posible ubicar el plano en una red estereográfica, como lo es la red de Schmidt, que básicamente corresponde a un plano de proyección de una esfera, tal y como se ve representado a continuación:



**Figura 14: Red Estereográfica**

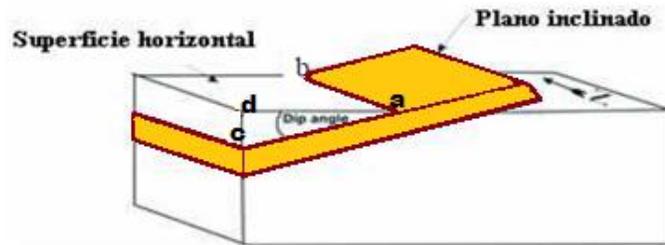
Los parámetros de Rumbo y Manteo son medidos en terreno con una brújula y utilizando el Norte como referencia.

Un ejemplo de plano es uno cuyo Rumbo y Manteo sean  $N45^{\circ}E/30^{\circ}S$ , éste se ve representado en la red de Shmidt en la siguiente figura:



**Figura 15: Ejemplo de plano en la red de Shmidt**

Se define a demás:



Rumbo: Angulo línea ab con el norte.

Dip Direction: Angulo línea ad con el norte (ortogonal al rumbo), medido en sentido horario (azimut).

Manteo (dip): Angulo línea ac con el plano horizontal.

*Figura 16: Representación de un plano*

## 2.3 Clasificación del Macizo Rocoso

Las clasificaciones tienen como objetivo proporcionar una evaluación geomecánica del macizo y se realizan mediante la observación de campo y ensayos simples.

Dado que los macizos rocosos constituyen un medio discontinuo complejo cuyas características pueden cambiar bruscamente, diversos autores han intentado establecer sistemas de clasificación del mismo. Muchos de estos métodos han sido mejorados subsecuentemente, sin embargo la mayoría de estos se basa en observaciones cualitativas y por ello se hace muy importante una interpretación correcta, y experta, de las observaciones en terreno. Se presenta a continuación una descripción de los más utilizados en la minería y proyectos de obras subterráneas: RQD, RMR, GSI y Q.

### 2.3.1 Resistencia de la Roca Inalterada – Doruk 1991 and Hoek et al 1992 <sup>[9]</sup>

Una buena estimación de campo de la resistencia de la roca inalterada, se basa en el análisis de los resultados de ensayos triaxiales sobre muestras de roca intacta. La estimación se encuentra indicada en la Tabla 57 de los anexos.

### 2.3.2 RQD – Deere (1967) <sup>[9]</sup>

El RQD (Rock Quality Designation Index) fue desarrollado por Deere et al. (1967), para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso basándose en la recuperación de un testigo de más de 10 cm de longitud en su eje. Depende del número de fracturas y del grado de alteración del macizo, sin considerar roturas correspondientes al proceso de perforación.

Existen tres opciones para determinar el RQD en la zona de estudio:

- 1) Sondajes: A partir de una muestra cuyo diámetro sea igual o superior a 57.4 mm, perforado con un doble tubo de extracción de testigo, se miden y suman los largos de cada trozo superior a los 10 [cm] que compongan un intervalo de 1.5 [m].

Se expresa:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud\_de\_fragmentos} \geq 10\_cm}{\text{longitud\_total\_perforada}} \cdot 100$$

- 2) Celdas Geotécnicas: Al realizar un levantamiento litológico-estructural, se calcula el RQD por alguna distancia en diversas direcciones del área a estudiar, para luego determinar un promedio ponderado.
- 3)  $J_v$ : Se utiliza la relación entre RQD y el número de fisuras por metro cúbico, obtenidas en el levantamiento.

$$RDQ = 115 - 3.3 \cdot J_v$$

Con  $0 < RQD < 100$  para  $35 > J_v > 4.5$

La clasificación del macizo de acuerdo al valor de RQD, se encuentra especificada en la Tabla 4.

*Tabla 4: Clasificación RQD*

RQD	DESCRIPCIÓN
0-25	Muy Pobre
25-50	Pobre
50-75	Regular
75-90	Buena
90-100	Excelente

### **2.3.3 RMR – Bieniawski (1989) <sup>[9]</sup>**

El RMR (Rock Mass Rating), introducido por Bieniawski 1976, es posiblemente la clasificación geomecánica más usada, inicialmente pensado para valorar la estabilidad y los soportes requeridos en túneles, ha resultado ser apto también para la valoración de la estabilidad en taludes.

Con el tiempo, éste parámetro ha sido perfeccionado, y su asignación de puntaje depende de las siguientes variables:

- 1) La resistencia del material intacto medido con un ensayo de carga puntual en terreno, o con un ensayo de compresión uniaxial en laboratorio.
- 2) El valor de RQD, en que se le asigna un puntaje desde 20 si el índice es mayor al 90% hasta 3 si es menor al 25%.
- 3) El espaciamiento de las discontinuidades.
- 4) La condición de las discontinuidades, tal como las asperezas y relleno.
- 5) La presencia de agua subterránea.

Los puntajes asociados a cada variable según su condición se presentan en la parte 10.1.1.1 de los anexos.

Luego el valor de RMR vendrá dado por la sumatoria de los puntajes asociados a las diversas variables mencionadas. Y su clasificación se muestra en la Tabla 5.

$$RMR = \sum_{i=1}^5 R_i$$

*Tabla 5: Clasificación RMR*

Clase	Descripción	RMR
I	Muy Buena	81-100
II	Buena	61-80
III	Regular	41-60
IV	Pobre	21-40
V	Muy Pobre	0-20

### 2.3.4 GSI – Hoek (1994) <sup>[8]</sup>

El GSI (Geological Strength Index) es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo.

Estas observaciones se encuentran basadas en la apariencia del macizo tanto a nivel de estructura como de la condición de las discontinuidades.

La intersección de estas dos propiedades en la cuadrícula de la Figura 53 de los anexos, entrega el rango de GSI, de acuerdo a las curvas que atraviesan cada casillero de la clasificación.

En la práctica es común definir el GSI en rangos de +/- 20 puntos, como indica la Tabla 6.

*Tabla 6: Clasificación GSI*

Clase	Calidad Macizo	GSI
I	Muy Buena	81-100
II	Buena	61-80
III	Regular	41-60
IV	Mala	21-40
V	Muy Mala	0-20

Además, es posible vincular el GSI con la versión de RMR de 1989 de Beniaowski, mediante la relación empírica:

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{89} - 5$$

Esta relación asigna 15 puntos a la condición de aguas subterráneas (condición seca), y en su condición in situ, sin ajuste por orientación de discontinuidades.

### 2.3.5 Q – Barton (1974) <sup>[9]</sup>

Barton (1974) del *Norwegian Geotechnical Institute*, definió el índice de calidad de Túneles (Q) para la caracterización geotécnica del macizo rocoso y para la determinación del sostenimiento requerido para túneles.

Los valores numéricos del índice de Q varían en escala logarítmica desde 0,001 hasta 1.000, y se obtienen a través de parámetros que se relacionan según la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde,

RQD : Índice de calidad de roca.

J<sub>n</sub> : Número de sistemas de discontinuidades (*Joint Set Number*).

J<sub>r</sub> : Número de rugosidad de discontinuidades (*Joint Roughness Number*).

J<sub>a</sub> : Número de alteración de las discontinuidades (*Joint Alteration Number*).

J<sub>w</sub> : Factor de reducción por agua (*Joint Water Reduction Factor*).

SRF : Factor de reducción por esfuerzos (*Stress Reduction Factor*).

El significado de los parámetros mencionados se puede explicar mediante la relación de cocientes:

- RQD/J<sub>n</sub>: Representa la estructura del macizo rocoso, como una medida rudimentaria del tamaño de los bloques o de las partículas.

- $J_r/J_a$ : Representa la rugosidad y las características de fricción de las paredes de las discontinuidades o de los materiales de relleno.
- $J_w /SRF$ : El SRF es una medida de la pérdida de carga en el caso de una excavación a través de una zona de falla y de roca con altos contenidos de arcilla; de esfuerzos en roca competente, y de las cargas compresivas en rocas plásticas no competentes. Es decir el SRF puede ser considerado como un parámetro que toma una corrección por esfuerzos efectivos, mientras que el parámetro  $J_w$  es una medida de presión del agua debido a la reducción del esfuerzo normal.

Es así, como el Índice de Calidad de la roca en túneles (Q), puede ser considerado en función de 3 parámetros, los que son una medida aproximada de:

- 1) Tamaño de bloques:  $RQD/J_n$
- 2) Resistencia al esfuerzo de corte entre bloques:  $J_r/J_a$
- 3) Esfuerzos activos:  $J_w/SRF$

La Clasificación del macizo y la descripción de la designación de puntaje para cada variable se presentan en la Tabla 7 y en la sección 10.1.2.3 de los anexos.

*Tabla 7: Clasificación Q*

Q	Descripción
< 0.01	Excepcionalmente Pobre
0.01 - 0.1	Extremadamente Pobre
0.1 - 1	Muy Pobre
1 - 0.4	Pobre
0.4 - 10	Regular
10 - 40	Buena
40 -100	Muy Buena
100 -400	Extremadamente Buena
> 400	Excepcionalmente Buena

### III. RECOPIACIÓN Y ESTUDIO DE INFORMACIÓN

#### 3.1 Geología Regional <sup>[14]</sup>

La geología regional, como se muestra en la Figura 17, se encuentra constituida principalmente por rocas intrusivas del Mioceno y Jurásico-Cretácico, y por rocas estratificadas y metamórficas pertenecientes al Paleozoico-Triásico. Las rocas intrusivas corresponden a granitos, granodioritas y tonalitas. Las rocas metamórficas corresponden a esquistos anfibolíticos y rocas máficas del complejo Metamórfico Liquiñe.

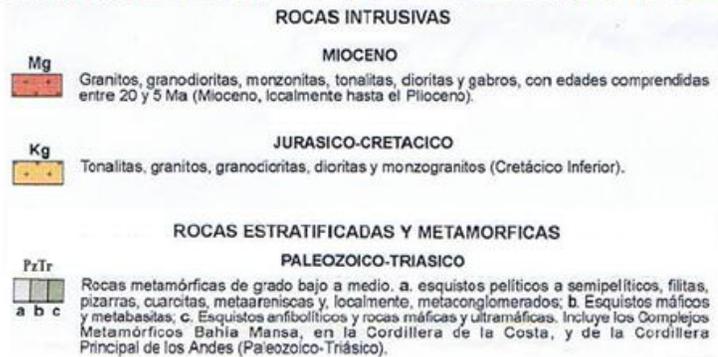
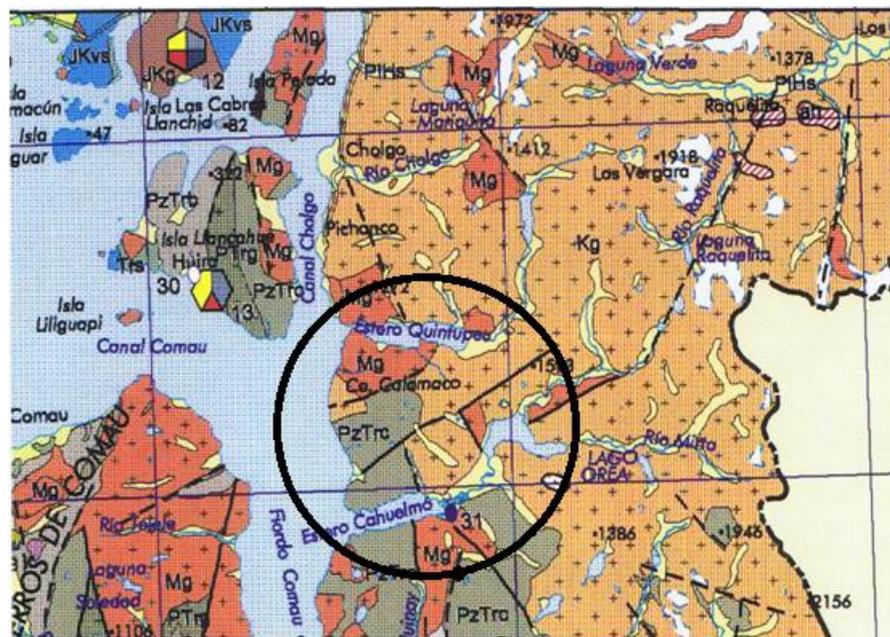


Figura 17: Carta Geológica SERNAGEOMIN <sup>[14]</sup>

En una menor pero importante medida, se pueden encontrar rocas y depósitos volcánicos cuaternarios correspondientes al Pleistoceno-Holoceno, junto con sedimentos no consolidados pertenecientes al Pleistoceno-Holoceno. Éstos corresponden a lavas y depósitos piroclásticos; depósitos fluviales, aluviales, de remociones de masa de playa y eólicos, respectivamente.

### 3.1.1 Liquiñe-Ofqui <sup>[7]</sup>

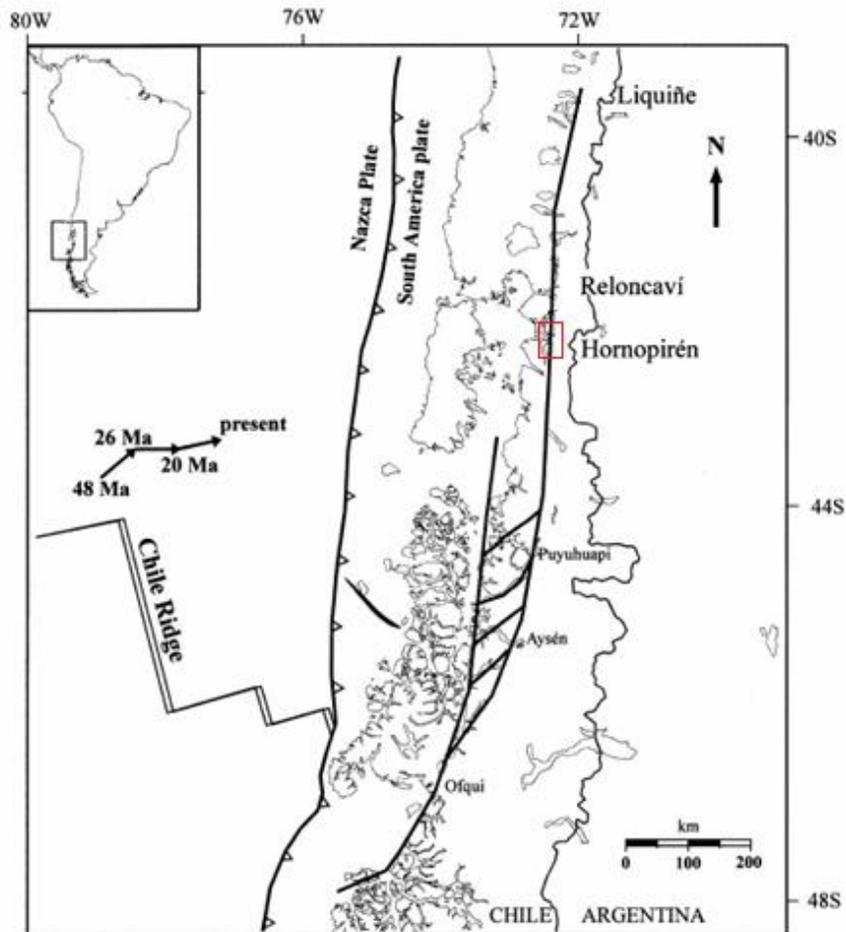


Figura 18: Liquiñe-Ofqui

La Falla de Liquiñe-Ofqui conocida como SFLO ó ZFLO y originalmente llamada Falla Liquiñe-Reloncaví, es un sistema de fallas de rumbo que se extiende por unos 1000 km desde la zona de Liquiñe en la provincia de Valdivia hasta el Golfo de Penas en el Sur donde se encuentra el punto triple, tal y como se muestra en la Figura 18 y la Figura 20.

El extremo norte de la ZFLO consiste en una rama principal de rumbo N10°E que tiene un desplazamiento transcurrente dextral, y un manteo subvertical.

Presenta un ancho de 4-5 km en la cual se encuentran granitoides heterogéneamente deformados y paredes con rocas metamórficas de relativamente bajo grado, presentando un aumento del metamorfismo hacia el oeste.

Es importante destacar que a escala local, la falla se encuentra constituida por subfallas o fallas menores, de las cuales la información disponible es escasa.

## **3.2 Geología Local**

### **3.2.1 Geomorfología**

- **Quintupeu:**  
El fiordo presenta una orientación de N40°W, con costas abruptas sin desarrollo de playas a excepción de su extremo Este, en la desembocadura del río Quintupeu, donde hay un depósito de playa. Tanto al Norte como hacia el Sur del fiordo se encuentran una serie de cumbres que se disponen paralelamente a sus costas, alcanzando alturas entre 1.200 y 1.300 [m s.n.m.].
- **Cahuelmó:**  
Presenta una orientación de N10°E, y al igual que Quintupeu, tiene costas abruptas, sin desarrollo de playas, con excepción de su extremo Este. Desde la línea de costa, sube bruscamente hasta alturas sobre los 1.000 [msnm]. En el extremo Este se encuentra un depósito de playa y una planicie fluvial, producida por el estero Cahuelmó.

#### **3.2.1.1 Batimetría**



Figura 19: Batimetría de Fiordos (Carta SHOA-7340)

Respecto a la superficie submarina, la Figura 19, muestra la batimetría de la zona, donde se puede apreciar que las profundidades oscilan entre los 25 y 136 metros bajo el nivel del mar.

Cahuelmó se caracteriza por presentar mayores profundidades las que se acentúan en su desembocadura con el fiordo Comau (Figura 6) al Oeste, donde se pueden encontrar profundidades de hasta 170 mts. Quintupeu presenta condiciones muy similares, sin embargo en su desembocadura al costado Oeste, se puede observar un estrecho donde las profundidades disminuyen, presentando en ese extremo profundidades tan bajas como 44 mts.

### **3.2.2 Geología**

Las muestras y mediciones en terreno se obtuvieron en distintos puntos, cuya ubicación se presenta en la Figura 20 tanto para el fiordo Quintupeu como para Cahuelmó.

La evaluación de las muestras fue realizada con la ayuda de instrumentos facilitadores como un rayador para determinar la dureza de los minerales, ácido clorhídrico para descartar la presencia de calcita en las muestras, una lupa para mejor apreciación de los minerales y finalmente se contó además con un imán, el que fue de utilidad en el reconocimiento de materiales ferromagnesianos.

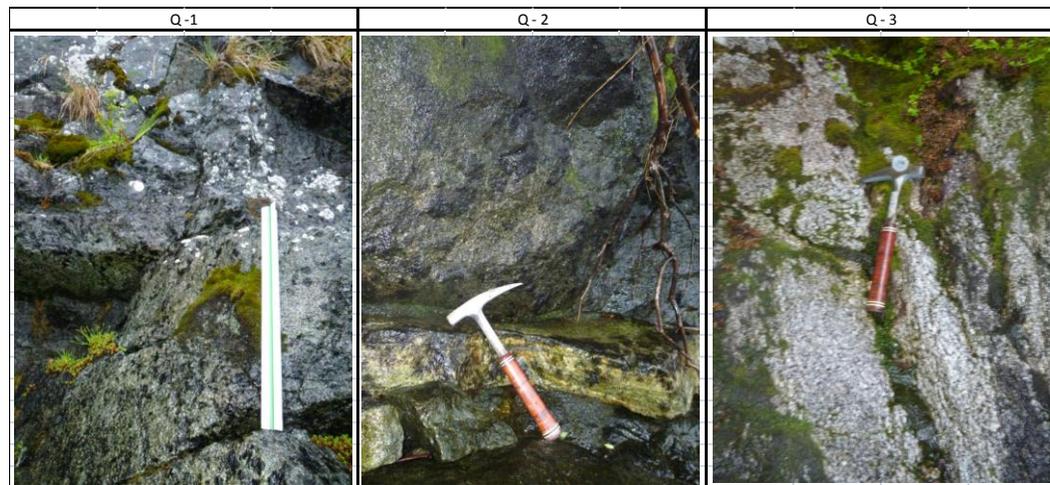


Figura 20: Ubicación toma de muestras y falla Liquiñe-Ofqui

Tabla 8: Muestras Quintupeu

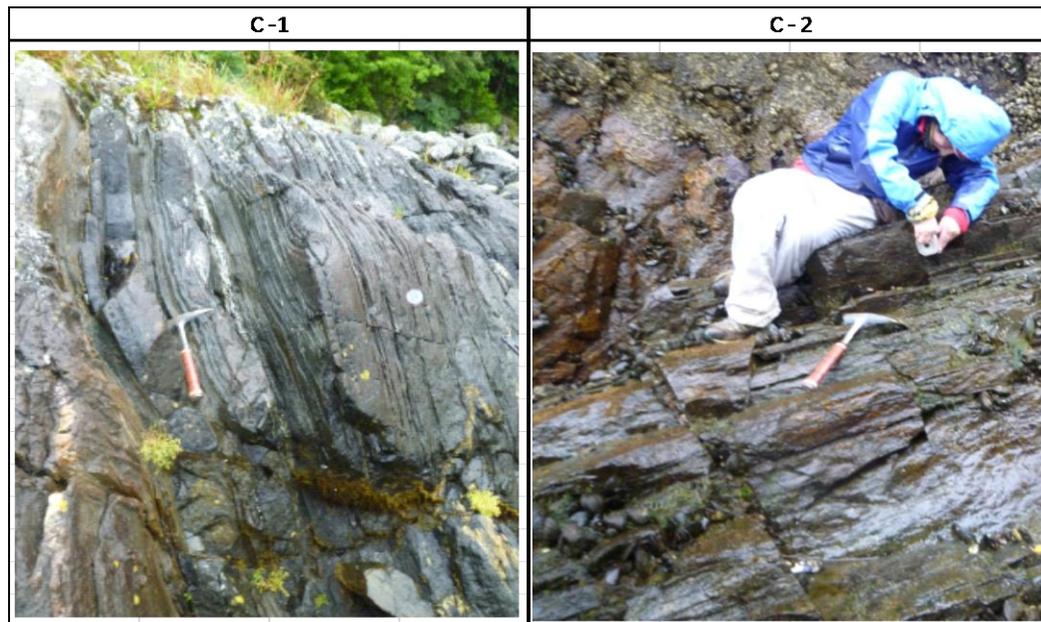
Muestra	2Q	3Q	359	1C	3C
Tipo de Roca	-	Ignea Intrusiva	Ignea Intrusiva	Metamórfica	Ignea Intrusiva
Grado de Meteorización	-	Moderadamente meteorizada a meteorizada	-	-	Roca fresca
Foliación	-	-	-	Esquistosidad fina	-
Nombre	Cuarcita	Granito	Cuarzo Monzodiorita de anfíbolas	Esquisto Micáceo	Grandiorita

### 3.2.2.1 Quintupeu

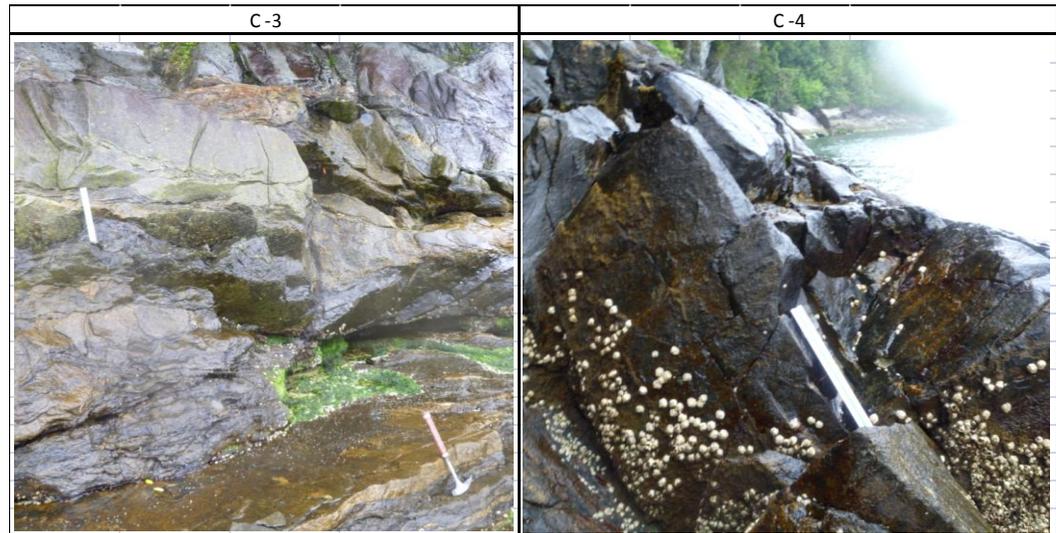


*Figura 21: Imágenes de afloramientos, obtención de muestras Quintupeu.*

### 3.2.2.2 Cahuelmó



*Figura 22: Imágenes de afloramientos, obtención de muestras C-1 y C-2.*



*Figura 23: Imágenes de afloramientos, obtención de muestras C-3 y C-4.*

### **3.2.3 Estructura**

La zona de estudio se encuentra al costado Este de la rama principal de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO). Esta falla presenta una dirección N10°E, se encuentra paralela a la costa del canal Cholgó y representada de color verde en la Figura 20.

En terreno se visitaron distintos puntos, como indicado anteriormente (Figura 20), donde se recogieron las orientaciones de las discontinuidades encontradas en afloramientos.

#### **3.2.3.1 Quintupeu**

Quintupeu presenta estructura más bien dispersa, tal como muestra la Figura 24.

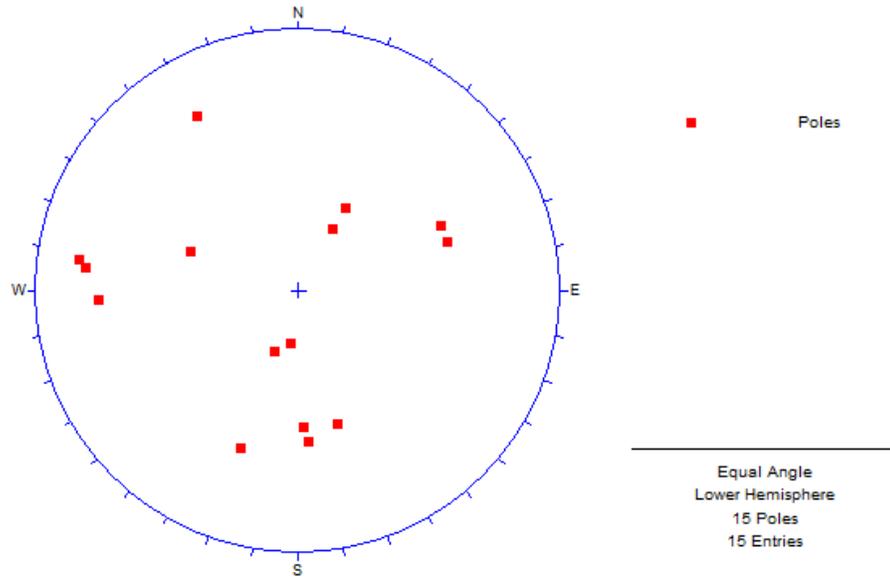


Figura 24: Polos y densidades en Quintupeu

Según las concentraciones de polos obtenidas en el diagrama superior, gracias a la utilización del software Dips, es posible determinar planos principales.

Se puede apreciar que existen cinco planos principales.

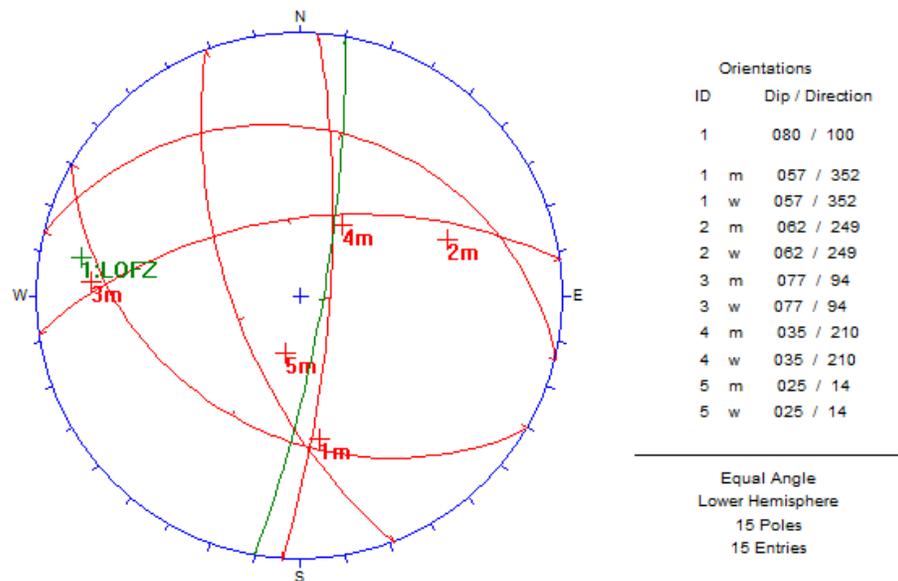
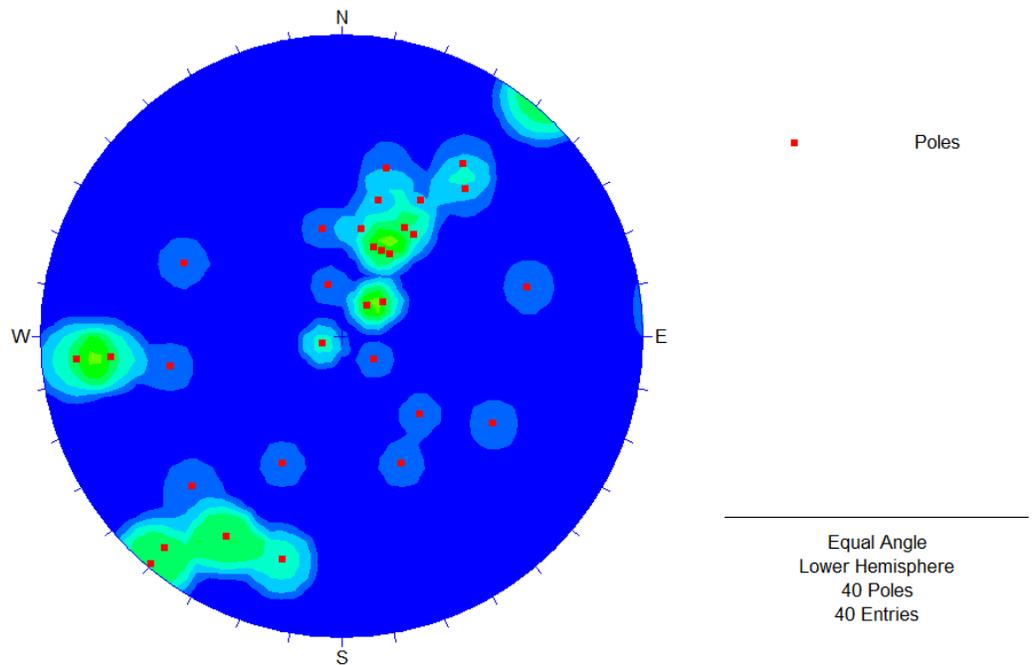


Figura 25: Polos y Planos de las Principales Concentraciones en Quintupeu y Falla Liquiñe-Ofqui

Al plotear los planos correspondientes a las concentraciones principales observadas, se puede ver en la Figura 25 que se exhiben estructuras subparalelas a la falla Liquiñe Ofqui que presenta un paralelismo con el Canal Cholgó (Figura 20) en la zona estudiada, en conjunto con estructuras de lineamientos paralelos al rumbo del fiordo.

### 3.2.3.2 Cahuelmó

En Cahuelmó se pueden definir sets principales, debido al mayor número de datos, como se puede apreciar en la Figura 26 y en la Figura 27.



*Figura 26: Polos y densidades en Cahuelmó*

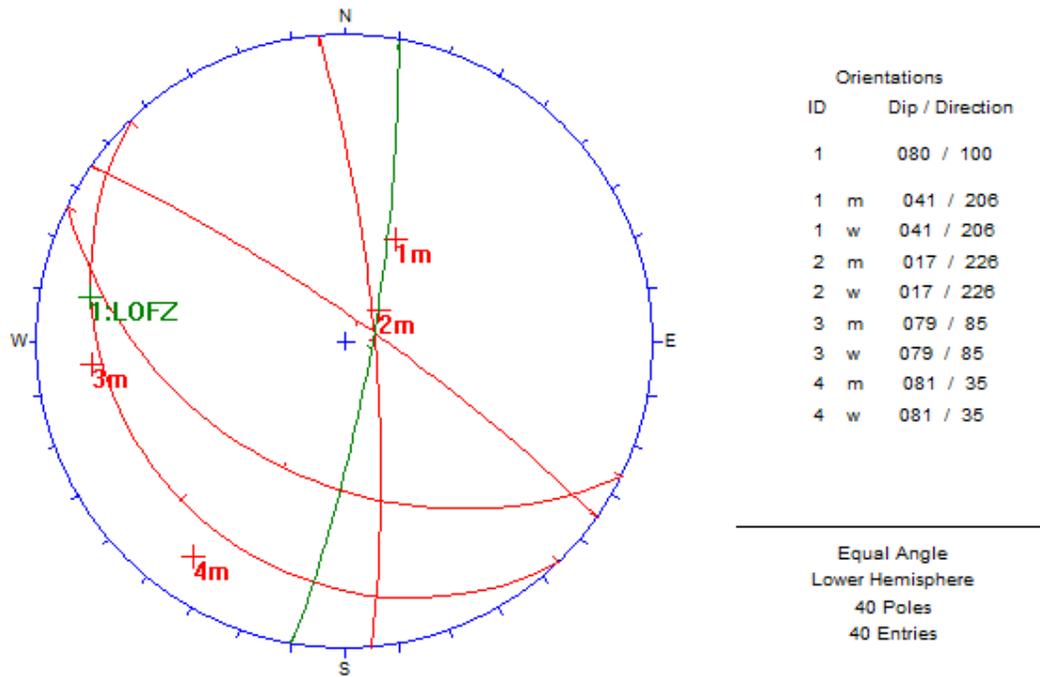
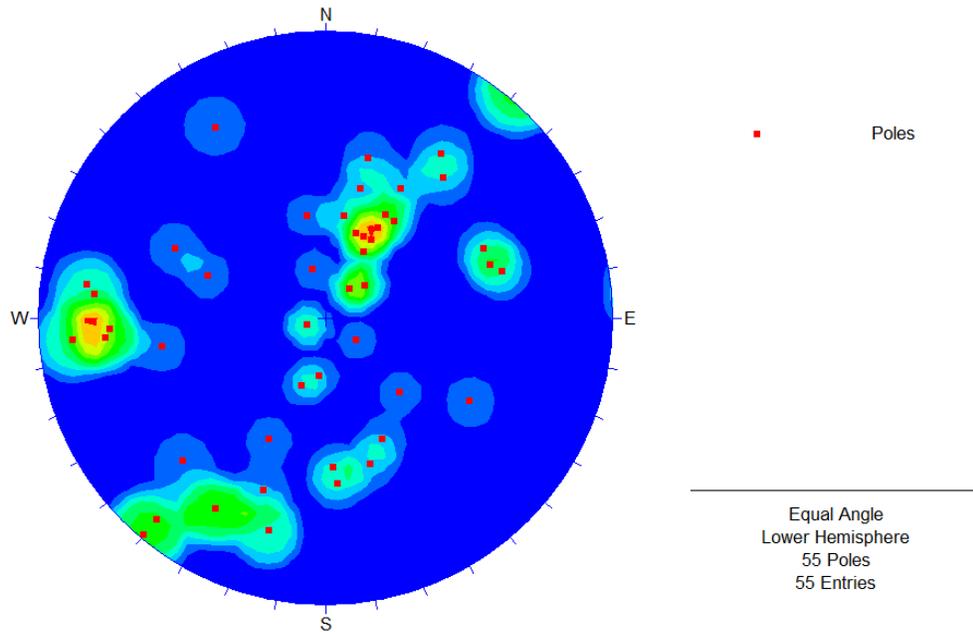


Figura 27: Polos y Planos de los Sets Estructurales en Cahuelmó y Falla Liquiñe-Ofqui

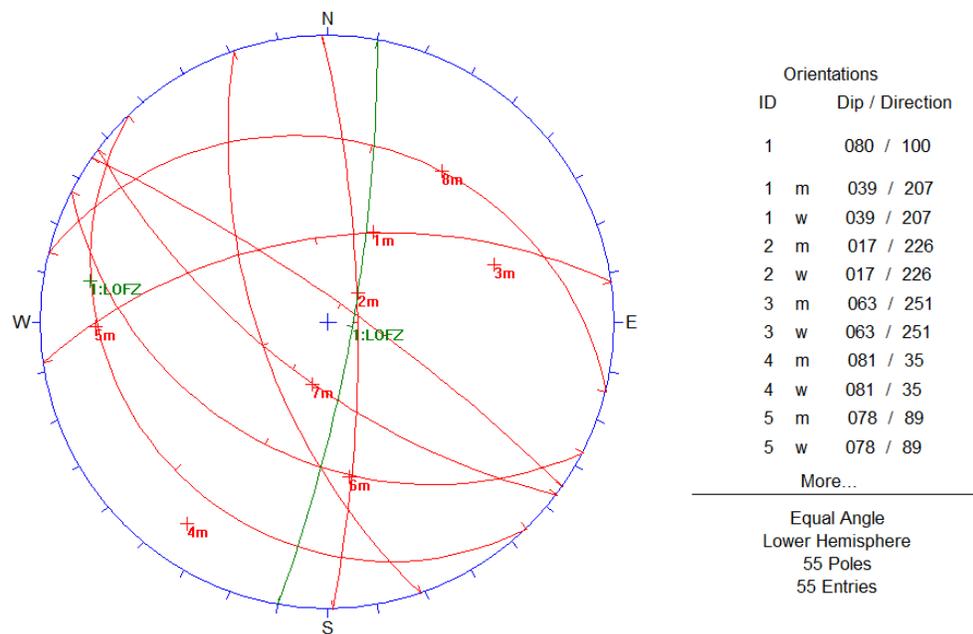
A partir de estas figuras, se puede determinar, que los planos de los sets principales corresponden a (Dip/Dir)  $41^\circ/206$ ,  $17^\circ/226^\circ$ ,  $81^\circ/35^\circ$ ,  $79^\circ/85^\circ$ . Este último presenta una suerte de paralelismo con la falla Liquiñe-Ofqui, lo que correlaciona la información obtenida de los papers con la obtenida en terreno.

### 3.2.3.3 Datos de estructura de ambos fiordos

Debido al número de datos, se presenta también la estructura zonal, contemplando las estructuras recogidas en ambos fiordos.



**Figura 28: Polos y densidades en la zona**

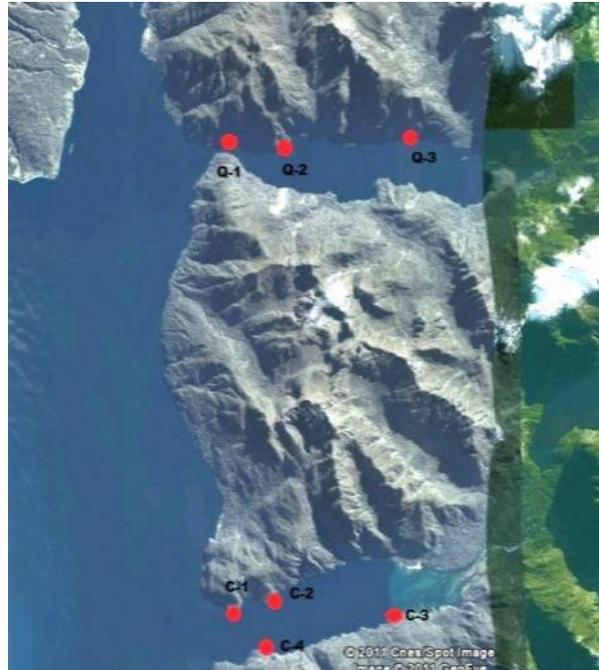


**Figura 29: Polos y Planos de los Sets Estructurales en la zona y Falla Liquiñe-Ofqui**

De la figura anterior, se puede apreciar que los planos principales corresponden a (Dip/Dir) 39°/207°, 63°/251° y 78°/89°.

### 3.2.4 Caracterización del Macizo Rocoso

La caracterización del macizo rocoso se llevó a cabo utilizando las mediciones realizadas en terreno en los puntos específicos que señala la Figura 30.



*Figura 30: Puntos de Terreno*

#### 3.2.4.1 RMR – Beniaowski (1989)

Para los puntos de terreno observados en la figura anterior, las mediciones allí realizadas permiten obtener una clasificación según RMR de Beniaowsky (1989).

*Tabla 9: Puntaje Parámetros RMR 1 a 3, para Puntos de Terreno en Quintupeu*

Punto	1.- Resistencia	2.- RQD	3.- Espaciamiento
Q - 1	12	17	20
Q - 2	12	20	10 - 15
Q - 3	7	13	10 - 15

*Tabla 10: Puntaje Parámetros RMR 4 y 5, para Puntos de Terreno en Quintupeu*

Punto	4.- Condición discontinuidades					5.- Condición de Agua
	Largo	Separación	Rugosidad	Relleno	Meteorización	
Q - 1	4	0	5	6	6	0
Q - 2	2	0	5	2	6	0
Q - 3	2	0	6	6	5	0

Luego se tiene que la clasificación para esos puntos en rango es:

*Tabla 11: Clasificación RMR en Quintupeu*

Punto	Rangos de RMR		Descripción	Clase
Q - 1	70	70	Buena	II
Q - 2	57	62	Regular	III
Q - 3	49	54	Regular	III

De la clasificación observada en la Tabla 11, se puede destacar que los rangos de RMR calculados, derivan en dos tipos de clasificación del macizo en Quintupeu, Tipo II y III, que corresponden a un macizo de Buena y Regular calidad.

En el caso de Cahuelmó, se obtienen los siguientes puntajes para los parámetros solicitados según Beniaowski:

*Tabla 12: Puntaje Parámetros RMR 1 a 3, para Puntos de Terreno en Cahuelmó*

Punto	1.- Resistencia	2.- RQD	3.- Espaciamiento
C - 1	15	8	5 - 8
C - 2	12	17	10
C - 3	12	17	5 - 8
C - 4	12	13 - 17	15

*Tabla 13: Puntaje Parámetros RMR 4 y 5, para Puntos de Terreno en Cahuelmó*

Punto	4.- Condición discontinuidades					5.- Condición de Agua
	Largo	Separación	Rugosidad	Relleno	Meteorización	
C - 1	1	0	3	2	5	0
C - 2	4 -6	0-1	3	6	5	0
C - 3	2	0	5	2	5	0
C - 4	4	0	5	2	5	0

*Tabla 14: Clasificación RMR en Cahuelmó*

Punto	RMR		Descripción	Clase
C - 1	39	42	Pobre	IV
C - 2	47	52	Regular	III
C - 3	48	51	Regular	III
C - 4	41	45	Regular	III

A partir de la Tabla 14, y al igual que en el caso de Quintupeu, se pueden observar rangos de clasificación según Beniaowski en Cahuelmó. La diferencia es que en este fiordo la calidad del macizo es más baja y aparece el Tipo IV, que corresponde a una calidad Pobre.

El parámetro RMR, contempla correcciones referentes al tipo de proyecto al que se aspira. En este caso, los valores de RMR obtenidos deben ser corregidos para cumplir con las restricciones de túneles utilizando la Tabla 51 del anexo.

En Quintupeu se encontraron dos tipos de roca, según la clasificación de RMR, roca buena y relativamente buena, con puntajes asignados entre 49 y 70 (Tabla 11).

Si se grafica el plano principal que gobierna el emplazamiento del túnel proyectado en Quintupeu, en conjunto con las discontinuidades graficadas, es posible realizar la corrección mencionada.

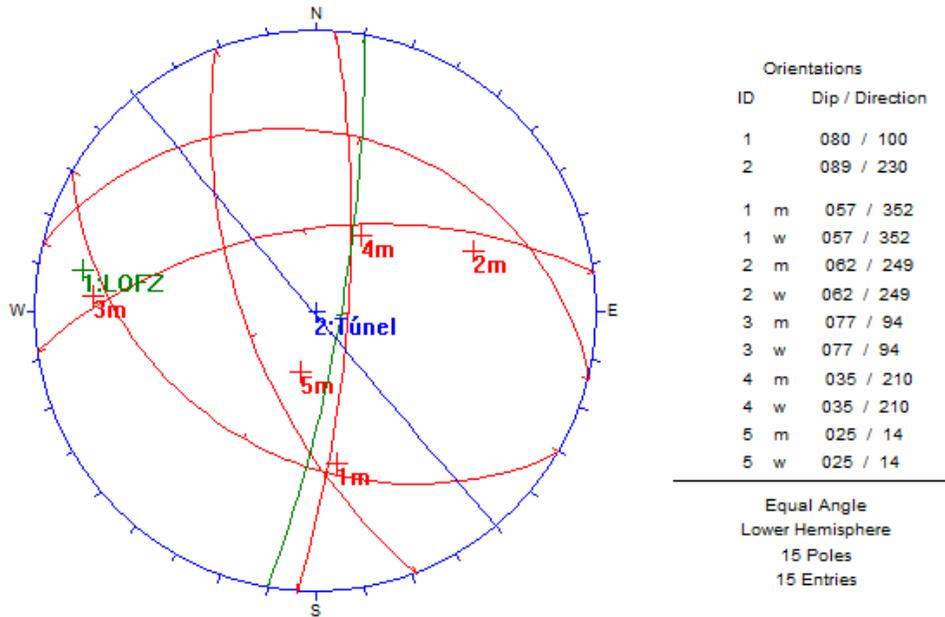


Figura 31: Plano gobernante de emplazamiento en Quintupeu.

Utilizando la Tabla 51 de los anexos, se puede clasificar cada una de las discontinuidades observadas en la Figura 31, según su grado de favorabilidad en cuanto a la construcción del túnel.

Tabla 15: Corrección para túneles, Quintupeu

Discontinuidad	Rumbo	Manteo		N° Polos
		a Favor	en Contra	
1m	Perpendicular al eje	Muy Favorable	Regular	3
2m	Paralelo al eje	Muy Desfavorable		2
3m	Perpendicular al eje	Muy Favorable	Regular	3
4m	Paralelo al eje	Regular		2
5m	Perpendicular al eje	Favorable	Desfavorable	2
LOFZ	Perpendicular al eje	Muy Favorable	Regular	-

Como la probabilidad de que se encuentren discontinuidades que presenten un paralelismo con la falla es alta, se ha considerado dentro de la corrección.

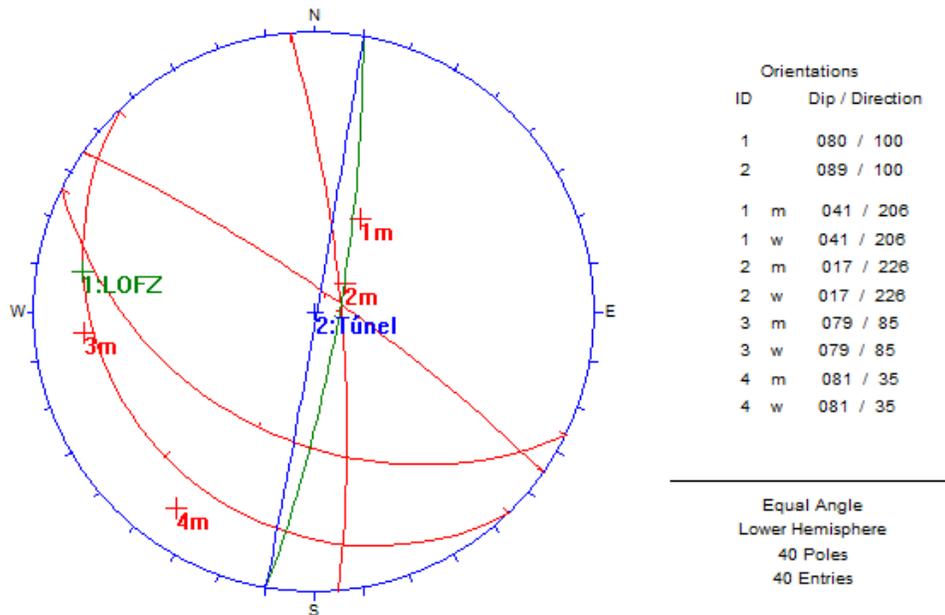
Se puede concluir que en el caso de Quintupeu las discontinuidades constituyen un elemento Regular a Favorable en cuanto a la constructibilidad, lo que corresponde a la resta de 2 a 5 puntos en el factor RMR calculado, por lo que la nueva Clasificación queda como se muestra en la Tabla 16.

**Tabla 16: RMR corregido, Quintupeu**

Punto	RMR		Descripción	Clase
Q - 1	68	65	Buena	II
Q - 2	55	52	Regular	III
Q - 3	47	44	Regular	III

Donde la ubicación de los puntos se encuentra ilustrada en la Figura 30.

En el caso de Cahuelmó, se observa la siguiente relación entre discontinuidades y emplazamiento sugerido:



**Figura 32: Plano gobernante de emplazamiento en Cahuelmó**

A diferencia de Quintupeu, Cahuelmó presenta una clasificación algo inferior, en que el tipo de roca gobernante corresponde a rocas de tipo Pobre a Regular.

La alternativa de emplazamiento que se ha propuesto se encuentra representada en la red estereográfica como se muestra en la Figura 32.

Al igual que en el caso de Quintupeu, se clasifican los sets principales según favorabilidad, considerando un paralelismo de discontinuidades con la LOFZ.

*Tabla 17: Corrección para túneles, Cahuelmó*

Discontinuidad	Rumbo	Manteo		N° Polos
		a Favor	en Contra	
1m	Perpendicular al eje	Favorable	Desfavorable	5
2m	Perpendicular al eje	Favorable	Desfavorable	2
3m	Paralelo al eje	Muy Desfavorable		2
4m	Perpendicular al eje	Muy Favorable	Razonable	3
LOFZ	Paralelo al eje	Regular		-

De la Tabla 17, se puede apreciar que en el caso de Cahuelmó los principales sets de discontinuidad presentan un escenario Regular a Desfavorable en materia de constructibilidad.

Esto último significa una disminución entre 5 y 10 puntos a la clasificación de RMR, tal y como se presenta en la siguiente tabla.

*Tabla 18: RMR corregido, Cahuelmó*

Punto	RMR		Descripción	Clase
C - 1	34	29	Pobre	IV
C - 2	42	37	Pobre	IV
C - 3	43	38	Pobre	IV
C - 4	36	31	Pobre	IV

Donde, al igual que en el caso de Quintupeu, la ubicación de los puntos se encuentra ilustrada en la Figura 30.

#### 3.2.4.2 Q – Barton (1974)

La caracterización de Barton se realizó según los rangos de los distintos parámetros medidos. A continuación se presentan las tablas de datos y cálculo del índice Q tanto para el fiordo Quintupeu como para Cahuelmó.

**Tabla 19: Puntaje Parámetros Q para Puntos de Terreno en Quintupeu**

Punto	RQD		Jn		Jr
Q - 1	80	75	9	15	2
Q - 2	90		9	15	2
Q - 3	75	65	9	15	3

**Tabla 20: Puntaje Parámetros Q para Puntos de Terreno en Quintupeu**

Punto	Ja	Jw	SRF
Q - 1	1	0,5	2,5
Q - 2	1	0,5	2,5
Q - 3	2	0,5	2,5

Se puede apreciar de la Tabla 19 que se tienen dos valores para el RQD en las mediciones realizadas en Q-1 y Q-3, al igual que el número de juntas, lo que deberá ser tomado en consideración para el cálculo del índice Q, tal y como muestra la Tabla 21.

**Tabla 21: Valores del Q para distintos valores y rangos en Quintupeu**

Punto	Jn y RQD	Q	Descripción
Q - 1	Jn = 9 RQD = 80	3,6	Pobre
	Jn = 15 RQD = 80	2,2	Pobre
	Jn = 9 RQD = 75	3,4	Pobre
	Jn = 15 RQD = 75	2,0	Pobre
Q - 2	Jn = 9 RQD = 90	4,1	Pobre
	Jn = 15 RQD = 90	2,5	Pobre
Q - 3	Jn = 9 RQD = 75	2,5	Pobre
	Jn = 15 RQD = 75	1,5	Pobre
	Jn = 9 RQD = 65	2,2	Pobre
	Jn = 15 RQD = 65	1,3	Pobre

De donde se puede observar que para los puntos de medición Q-1 el rango en el que se encuentra el índice Q se encuentra gobernado principalmente por valores entre 2 y 3.6, que corresponde a la clasificación de una roca pobre.

El punto Q-2 muestra valores de Q entre 2.5 y 4.1, lo que muestra un mayor rango, sin embargo ambos valores siguen perteneciendo a la clasificación de un roca pobre según Barton, al igual que en el caso del punto Q-3.

De la Tabla 22, se puede observar que en el caso de Cahuelmó, no se presenta variedad de rangos en los parámetros Jn y RQD.

**Tabla 22: Puntaje Parámetros Q para Puntos de Terreno en Cahuelmó**

Punto	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF
C - 1	50	9	1,5	2	0,5	2,5
C - 2	80	9	1,5	2	0,5	2,5
C - 3	80	12	2	2	0,5	2,5
C - 4	75	15	2	2	0,5	2,5

**Tabla 23: Valores del Q para distintos valores y rangos en Cahuelmó**

Punto	Q	Descripción
C-1	0,8	Muy Pobre
C-2	1,4	Pobre
C-3	1,4	Pobre
C-4	1,0	Muy Pobre

Observando la tabla anterior, se puede apreciar que todos los valores de Q obtenidos se encuentran entre 0.8 y 1.4, lo que corresponde a una clasificación según Barton a una Roca muy pobre.

Luego, se cumple que los valores obtenidos por el método de Q arroja un clasificación de la roca un poco menor a la obtenida por el método de RMR, que es lo que se espera.

En resumen:

- Quintupeu:

**Tabla 24: Clasificaciones Quintupeu**

Muestra	RMR		Q	
	Puntaje	Descripción	Puntaje	Descripción
Q - 1	65 - 68	Buena	2,0 - 3,6	Pobre
Q - 2	52 - 55	Regular	2,5 - 4,1	Pobre
Q - 3	44 - 47	Regular	1,5 - 2,5	Pobre

- Cahuelmó:

**Tabla 25: Clasificaciones Cahuelmó**

Muestra	RMR		Q	
	Puntaje	Descripción	Puntaje	Descripción
C - 1	29 - 34	Pobre	0,82	Muy Pobre
C - 2	37 - 42	Pobre	1,37	Pobre
C - 3	38 - 43	Pobre	1,37	Pobre
C - 4	31 - 36	Pobre	1	Muy Pobre

## IV. CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO

Los túneles se pueden clasificar según distintos aspectos que pueden variar en el tiempo. Los criterios generales para efectos de clasificación de túneles se presentan a continuación <sup>[15]</sup>:

- **Según ubicación:**

Según su ubicación respecto a las ciudades los túneles pueden ser definidos como:

- Rurales → Ubicados fuera del entorno urbano, destinados a atravesar obstáculos físicos como montañas o cuerpos de agua que resultan difíciles o inconvenientes de cruzar mediante puentes.
- Urbanos → Son túneles cuyos emplazamientos se encuentran dentro de los límites de la ciudad y están fuertemente constreñidos espacialmente por las redes de servicios propias de las urbes.

Un túnel tanto en Quintupeu como en Cahuelmó se clasifican como de tipo Rural, ya que se encuentran ubicados fuera del ambiente urbano, y como el manual de carreteras señala, su función es de cruzar obstáculos físicos que en ambos casos corresponden a fiordos.

- **Según características constructivas:**

- Túneles en roca
- Túneles en suelo
- Túneles falsos (construidos en hormigón armado y luego cubiertos con suelo)
- Trincheras cubiertas (estructuras de hormigón armado, construidas en suelo)
- Cobertizos (estructuras de hormigón armado, construidas en zonas montañosas)

Si bien no existe un estudio geotécnico preciso de las zonas, se pueden categorizar dichos túneles como túneles en roca, que usualmente cruzan cordones de cerro.

- **Según clima y altitud:**

La ubicación geográfica (fundamentalmente altitud) en donde se ubique la obra y el clima del sector constituyen factores de suma importancia.

La localización de los fiordos Quintupeu y Cahuelmó pertenecen según la Nch 1079 of 2008, a la zonificación climática SE (Sur Extremo), correspondiendo a zonas frías y muy lluviosas, con precipitaciones a lo largo del año. Nubosidad casi permanente y veranos cortos. Heladas y nieve en altura hacia el sur de la zona.

A partir de lo mencionado se desprende que en ambos proyectos será de suma importancia incorporar un adecuado sistema de ventilación, para evitar el empañamiento repentino en los parabrisas al ingresar al túnel, debido al choque de temperaturas y aire saturado.

- **Según flujo vehicular, longitud y equipamiento:**

La clasificación de túneles se realiza utilizando el factor TMDA (Tránsito Medio Diario Anual), que constituye un promedio anual del dato estadístico de flujo vehicular, en función de la longitud del túnel.

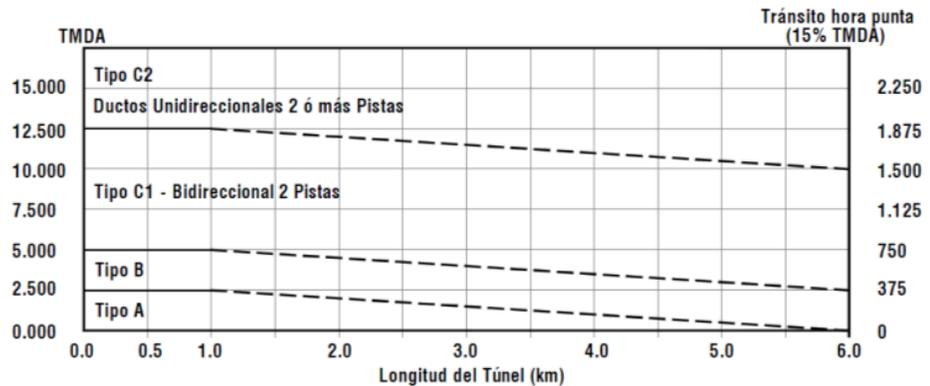


Figura 33: Clasificación de túneles según flujo vehicular y longitud <sup>[15]</sup>

Según ello, se clasifican los túneles en cuatro categorías, como se muestra en la Figura 33, donde las categorías A, B y C1 corresponden a ductos con tránsito bidireccional y C2 a uno unidireccional.

Las diferencias entre estas categorías radican en los equipamientos de seguridad y control necesarios, detalles que se encuentran en la Tabla 67 de los anexos.

Al no existir una vía de tránsito permanente, es imposible conocer el flujo que hay en las zonas en cuestión. Sin embargo se conocen valores estadísticos correspondientes al último censo realizado el año 2006 entre las localidades destacadas en la Figura 34, de color celeste en el sector Norte en que el TMDA se encuentra entre los valores 135 y 376, y verde en el sector Sur en que el TMDA se registró entre 77 y 409 (valores obtenidos de la tabla de censos del Servicio de Vialidad <sup>[16]</sup>, encontrados en la Tabla 67 de los anexos).



De lo anterior se puede inferir que el TMDA se encuentra en el orden de cientos, por lo que de realizarse un túnel, según lo mencionado en el capítulo IV, éste corresponderá a la clasificación tipo A o B, dependiendo de la longitud de diseño.

Por otra parte, la caracterización o descripción cuantitativa del macizo rocoso para el diseño y construcción de una excavación es probablemente el elemento más importante de geomecánica.

La necesidad de caracterizar la roca se percibe desde los puntos de vista de la economía, seguridad y obligaciones contractuales en la construcción de excavaciones subterráneas.

Una excavación subterránea es una estructura muy compleja, sin embargo existen 2 conceptos fundamentales en el diseño de un túnel:

#### **4.1 Identificación y Selección de Emplazamientos**

El emplazamiento de una obra subterránea se encuentra en directa relación con la topografía de la zona, propiedades del macizo rocoso y las zonas de falla que se presenten.

A la hora de buscar un propicio emplazamiento de la obra es muy importante considerar lo siguiente:

- A mayor longitud mayor costo de la obra.
- El paralelismo del eje con alguna falla aledaña es más perjudicial que cruzar un sector de debilidad en algún grado de perpendicularidad.
- Los radios de curva deben ser los suficientemente amplios como para que se mantenga siempre la visibilidad mínima de parada, ante un obstáculo en la calzada.

Es por esto que la clasificación del proyecto, según todos los criterios mencionados anteriormente, juega un rol fundamental.

La pendiente longitudinal de los túneles también es una variable crítica que influye sobre la velocidad de operación del conjunto de vehículos, en especial en túneles bidireccionales en que se prohíbe el adelantamiento, quedando la velocidad controlada por la de los camiones.

El concepto de velocidad crítica se refiere a la longitud en una pendiente que induce una caída de velocidad de  $\Delta V$  km/h para un camión tipo que ingresa a la pendiente a una velocidad de 88 km/h (rasante de aproximación prácticamente horizontal).

Luego:

$$\Delta V = 88 - 65 = 23 \text{ km/h}^{[15]} [15]$$

A partir de donde se construyó la siguiente tabla:

**Tabla 26: Longitud crítica en pendiente  $\Delta \approx 23 \text{ km/h}^{[15]}$**

i %	Longitud Crítica (m)
2	$\Delta V < 23 \text{ km/h}$ para cualquier L (m)
3	1000 m (sobre 2000 m $\Delta V \approx 28 \text{ km/h}$ )
4	560 m
5	380 m
6	300 m

En el caso de los proyectos que se analizan en el presente informe, los emplazamientos se encuentran gobernados por cuatro factores principales:

- Ubicación de la falla Liquiñe-Ofqui. Al ser una falla de rumbo el emplazamiento debe encontrarse a un costado de ésta, estando soportado en un bloque continuo. Además es necesario tener resguardo con las fallas aledañas o subfallas.
- Geografía del lugar.
- Batimetrías.
- Conexión con vías terrestres.

Es importante destacar que las sugerencias de emplazamientos observados tanto en Quintupeu, como en Cahuelmó, se encuentran ubicados en el costado Este de la falla principal Liquiñe-Ofqui.

#### **4.1.1 Quintupeu**

Se propone un emplazamiento que considera la continuación la carretera austral y la geomorfología de la zona.

Dada la distancia de aproximadamente 5 km, entre el punto de discontinuidad de la carretera en Pichanco (Figura 6) y el fiordo Quintupeu, para efectos de emplazamiento, se ha considerado como supuesto una continuidad de la ruta terrestre hacia el fiordo por el extremo Oeste. Se considera además que el portal de acceso se encuentra ubicado al noroeste del fiordo con una altimetría de 20 metros por sobre el nivel del mar (Google Earth).

Igualmente, se estipula una altura de 20 metros sobre el nivel del mar en el lado sur del fiordo, donde se contempla el portal de salida.

Además, este sector mencionado cuenta con dos propiedades ventajosas para el emplazamiento. Constituye la zona más angosta del fiordo, lo que implica una menor longitud de cruce, y, presenta alturas batimétricas menores (Figura 19), por lo que la mayor profundidad por la que pasaría el eje del túnel se minimizaría con respecto a posibles emplazamientos en otros sectores del fiordo, resultando una disminución de la longitud del túnel.

Si bien tanto Quintupeu como Cahuelmó se encuentran del lado oeste de la rama principal de la LOFZ, es importante mencionar que la probabilidad de que se encuentren dentro de una zona de influencia es considerable.



*Figura 35: Emplazamiento Quintupeu (Google Earth)*

La Figura 35 muestra en rojo la propuesta de trazado, en el costado superior izquierdo y de amarillo se observa el actual trazado de la carretera Austral (R7) y en verde se observa la dirección principal de la zona de falla de Liqueñe Ofqui<sup>[7]</sup>.

Gracias a la herramienta Google Earth, es posible conocer el perfil de la zona seleccionada (Figura 36) y a partir de la cual se obtienen las coordenadas para ingresarlas y trabajarlas en el programa AutoCAD. En este último y con los datos mencionados se construyó un plano (Plano 1) con la vista de perfil que se encuentra adjunto en la sección 10.2 de los anexos del presente informe.

A continuación se presenta el perfil de elevación de terreno en la zona de emplazamiento sugerida, donde cada coordenada vertical cero corresponde al nivel del mar.

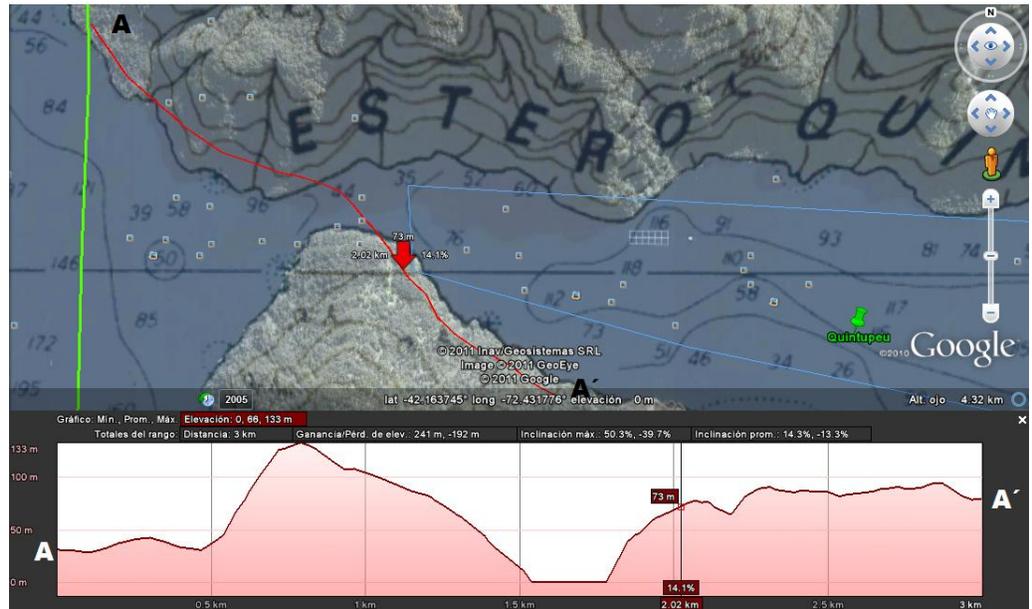


Figura 36: Perfil terreno, Quintupeu (Google Earth)

En base a mediciones en el fiordo Aysén, donde se reconocieron espesores de hasta aproximadamente 150 m para los sedimentos del fondo marino, se estima que para Quintupeu, que constituye un fiordo más pequeño, el espesor de sedimentos podría ser entre 20 m y 30 m en la zona más angosta y entre 20 m y 50 m para zonas más profundas. Estos valores son aproximados y deben ser evaluados con mediciones de terreno (G. Vargas, com. oral).

Luego, en consideración del gran factor de incertidumbre dada la falta de datos concretos, se opta por una profundidad de sedimentos más conservador, utilizando 30 metros.

#### 4.1.1.1 Definición de Tramos

Como se puede apreciar en la Tabla 21, existe una sola clasificación para todos los puntos de terreno, correspondiente a roca tipo pobre, según el sistema noruego de clasificación del macizo rocoso. Es por esto que no se clasifica el túnel por tramos según tipo de roca, sino que por geometría, donde los tramos principales de Quintupeu se encuentran definidos en el Plano 1 adjunto, donde el primer tramo constituye el de bajada al fiordo, el

segundo al horizontal central y el tercero al de subida a superficie, observando de izquierda a derecha.

#### **4.1.2 Cahuelmó**

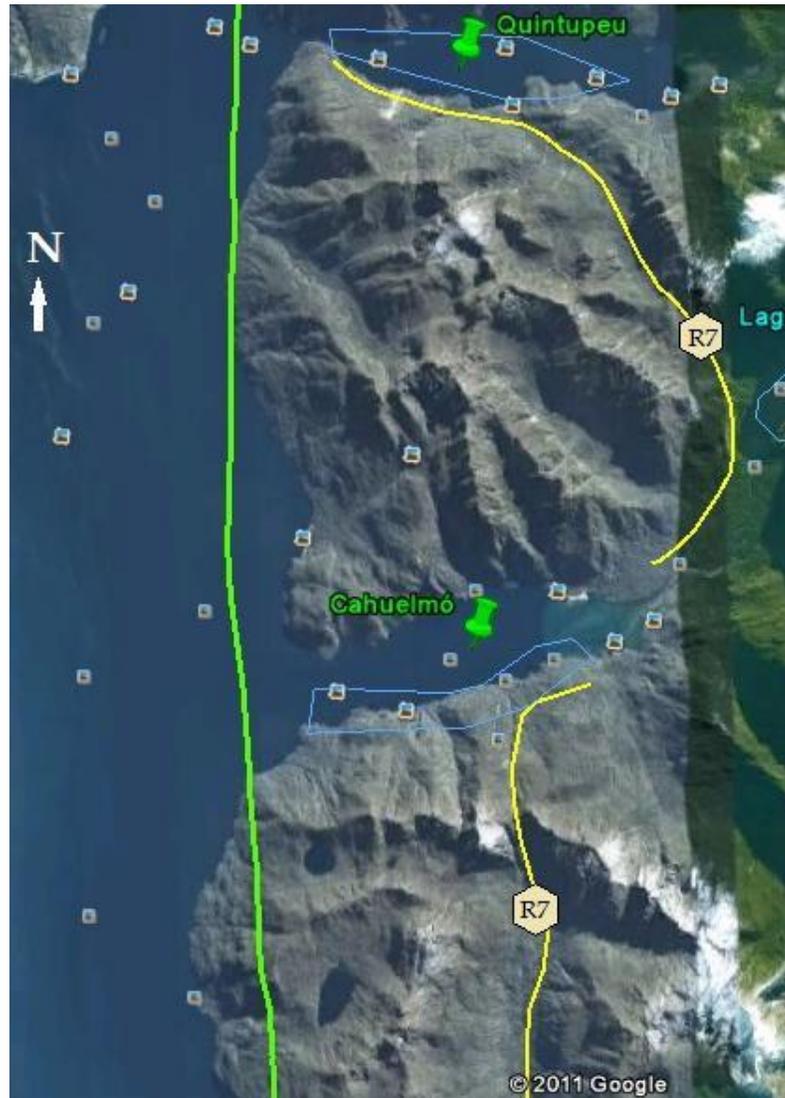
En el caso de Cahuelmó, no existe actualmente un acceso terrestre cercano, por lo que se presenta una amplia gama de posibles trazados. Sin embargo esta gama se ve acotada por 3 criterios primordiales:

- Batimetría y altimetría en el fiordo.
- Espesor del sedimento.
- Consideración de una continuidad en la carretera por tierra, según topografía del terreno.

Este fiordo presenta una batimetría caracterizada por mayores profundidades que Quintupeu, que se ven acrecentadas de oeste a este, por lo que es más conveniente mantener un emplazamiento cercano al lado oeste del fiordo.

Además, dada la batimetría, se esperan espesores de sedimentos de entre 40 a 100 metros para menores a mayores profundidades referentes al nivel del mar respectivamente. Luego, de existir un emplazamiento en la zona central del fiordo, el eje del túnel necesitará sumergirse a 100 m (batimetría, Figura 19) más 80 m de sedimento (aproximadamente), sumando además los 50 m de recubrimiento mínimo normados en Noruega, lo que da un resultado de 230 metros de profundidad. Esta profundidad se escapa de la experiencia Noruega en la que este estudio se basa.

Luego, dada las características batimétricas y supuestos presentados a continuación, se optó por ubicar el trazado del túnel Cahuelmó hacia el este del fiordo.



*Figura 37: Trazado terrestre supuesto.*

Respecto a la consideración de la continuidad de un trazado terrestre, es necesario para una sugerencia óptima de emplazamiento tomar ciertos supuestos que se presentan en la Figura 37.

En base al supuesto, el emplazamiento sugerido, visto en planta se presenta a continuación.



*Figura 38: Emplazamiento Cahuelmó (Google Earth)*

Donde La línea roja representa el emplazamiento del túnel sugerido.

De la Figura 38, se puede observar la proximidad del emplazamiento sugerido con la superficie al costado oeste del fiordo. Esto lleva a cuestionar el valor agregado de un túnel submarino en este sector, siendo que puede ser más económica y expedita la alternativa de continuar el trazado de forma terrestre bordeando el fiordo.

Al igual que en el caso de Quintupeu, es posible gracias a la vista de perfil que entrega Google Earth (Figura 39), obtener coordenadas y construir un plano de perfil del túnel submarino Cahuelmó, utilizando el software computacional AutoCAD. Dicho perfil se encuentra en el bolsillo de planos, junto al de Quintupeu.



Figura 39: Perfil terreno, Cahuelmó (Google Earth)

#### 4.1.2.1 Definición de Tramos

Al igual que en el caso de Quintupeu, Chaulemó solo presenta una clasificación del tipo pobre, cercano a la zona en que se estipula el emplazamiento.

## 4.2 Sección Transversal <sup>[15]</sup>

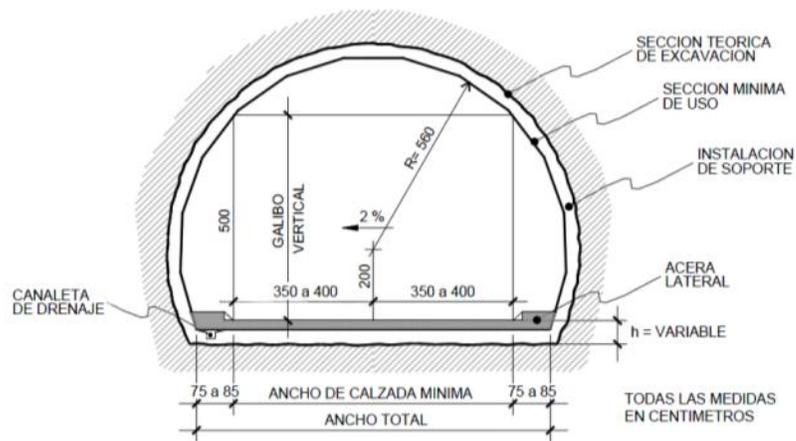
La sección transversal de un túnel bidireccional debe diseñarse con dos pistas como mínimo.

Como criterio general puede decirse que la capacidad de operación de un túnel es directamente proporcional al número de pistas que éste tiene. Mientras que, el costo de excavación, fortificación y riesgo geológico crece de forma mayor que lineal al ancho del túnel.

Las Dimensiones mínimas de la sección transversal (dos pistas) son:

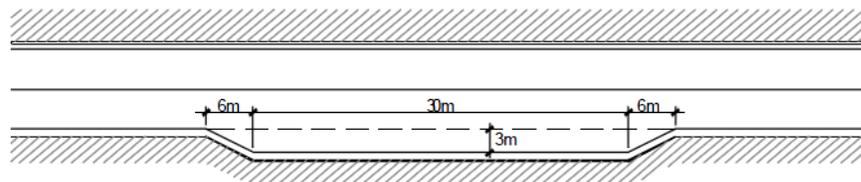
Gálibro vertical	: 5 m o mayor, si se requiere
Ancho de pistas	: 3,5 a 4,0 m c/u.
Bermas	: 0,5 m a cada lado de la calzada
Aceras laterales	: 0,75 a 0,85 m. Pueden aceptarse excepciones justificadas
Pendiente transversal única	: 2%

A continuación se presenta a modo ejemplificativo una ilustración de lo propuesto:



**Figura 40: Sección transversal básica** <sup>[15]</sup>

A demás, en la sección transversal es importante considerar por motivos de seguridad nichos de estacionamiento de emergencia, que eventualmente pueden ser utilizados para acomodar instalaciones técnicas. Su diseño debe considerarse de acuerdo a la Figura 41.



**Figura 41: Nichos de estacionamiento de emergencia** <sup>[15]</sup>

En ambos casos, dada la condición de la topografía, en que las costas son abruptas y rodeadas de altas cumbres, sumada a las condiciones de profundidad y de espesor de sedimentos esperados; es de esperar que a modo de disminuir la longitud de los túneles se emplee la mayor pendiente permitida, que corresponde a un 8%.

La pendiente mencionada, en conjunto con las longitudes estimadas, producirán entorpecimiento del tránsito provocado por el flujo de camiones y vehículos pesados.

Es por este motivo que el parámetro crítico de diseño no se encuentra gobernado por el flujo, en que se tiene un túnel de clasificación tipo B en ambos casos, sino que por la pendiente y longitud estimados de diseño.

A modo de evitar atochamientos en subida, se propone utilizar secciones de tres pistas, en que dos de ellas se encuentran en subida y una en bajada para ambos sectores de pendientes (Sur y Norte) para ambos túneles.

Por lo que las características de la sección transversal tipo y de emergencia e instalaciones, se muestran en los planos adjuntos de bolsillo y se supondrán iguales tanto para Quintupeu como para Cahuelmó.

Las secciones mostradas contemplan medidas de seguridad, como lo es el de estipular tres pistas considerando una pendiente de 8%, y la existencia de nichos de 3m de espesor y 30m de largo cada 1000m de distancia.

Se denomina la sección tipo de tres pistas S1, y S2 a la sección que contempla nicho.

## V. ESTIMACIÓN DE FORTIFICACIÓN

La formulación, en el diseño sistemático empírico de fortificación para excavaciones subterráneas, está basada en el sistema de clasificación geomecánica del NGI (Norwegian Geotechnical Institute), o de Barton, que adopta el Índice de Calidad de Túneles (Q), ampliamente difundida en el ámbito de la geomecánica. Dicha clasificación refleja tanto la experiencia práctica de condiciones de macizo rocoso, dimensionamiento de labores subterráneas, como el requerimiento y definición de fortificación, de una gran cantidad de casos. Esta experiencia recopilada y compilada en este Índice de Calidad de Túneles, al correlacionarla con las condiciones geotécnicas estimadas de Unidades Geotécnicas del túnel, permite entregar una definición de las recomendaciones genéricas de fortificación.

Para la definición de fortificación del túnel se ha adoptado el procedimiento empírico según el citado índice Q. En la aplicación de este procedimiento se establece para la excavación la Dimensión Equivalente  $D_e$ :

$$D_e = \frac{\text{Luz o Altura (m)}}{ESR}$$

*Tabla 27: Valores del ESR según tipo de Excavación*

Tipo de Excavación	ESR
Excavaciones mineras provisionales	2,0 - 5,0
Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con la excepción de cámaras de alta presión para compuertas), túneles pilotos y de exploración, excavaciones parciales para cámaras subterráneas grandes.	1,6 - 2,0
Cámaras de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarriles pequeños, cámaras de alta presión, túneles auxiliares.	1,2 - 1,3
Casas de máquinas, túneles carreteros y ferrocarrileros mayores, refugio de defensa civil, portales y cruces de túneles.	0,9 - 1,1
Plantas núcleo-eléctricas subterráneas, instalaciones para deportes y reuniones, fábricas, etc.	0,5 - 0,8

El  $D_e$  está asociado con la razón de soporte de la excavación (ESR), que a su vez guarda relación con el uso que se pretende dar a la excavación (y hasta dónde se puede permitir cierto grado de inestabilidad). Los valores del ESR según utilidad se encuentran en la Tabla 27.

Con las calidades geotécnicas definidas para el túnel, agrupada en nueve tipos de roca, y en conjunto con el valor de la luz del túnel, es posible definir la fortificación para dichos tipos de rocas, considerando las recomendaciones que se muestran en la Tabla 28 y se ilustran en la Figura 42 las necesidades estimadas de fortificación para la dimensión equivalente.

Tabla 28: Tipo de refuerzo o fortificación por categoría

Categoría	Reforzamiento
1.-	Sin reforzamiento.
2.-	Pernos Puntales, sb.
3.-	Pernos Sistemáticos, B.
4.-	Pernos Sistemáticos con Shotcrete, 40-100 mm, B (+S)
5.-	Shotcrete con fibras, 50-90 mm y Perno S(fr)+B
6.-	Shotcrete con fibras, 90-120 mm y Perno S(fr)+B
7.-	Shotcrete con fibras, 120-150 mm y Perno S(fr)+B
8.-	Shotcrete con fibras, >150 mm con Perno y marcos armados reforzados con shotcrete, S(fr)+RRS+B
9.-	Revestimiento de hormigón, CCA

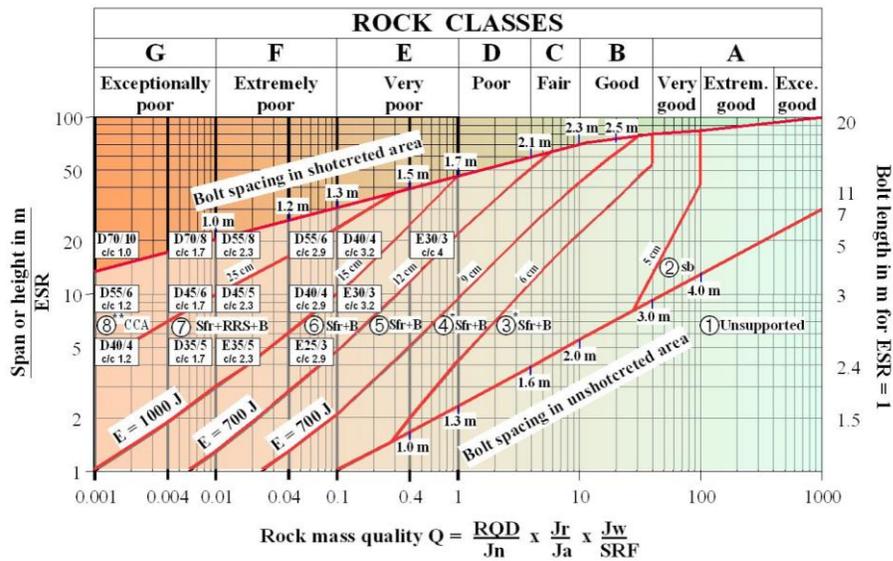


Figura 42: Gráfico para estimación de fortificación sobre la base del índice  $Q$

En caso que el ESR sea distinto de 1, la longitud teórica de los pernos puede estimarse mediante la relación:

$$L_{perno} = (0,35 \cdot B) + 1$$

Donde B es el valor máximo entre el ancho y la altura de la sección del túnel. El valor de  $L_{perno}$  siempre se aproxima al valor superior a las longitudes cada 0,5 m.

### **5.1 Tipos de Roca a Fortificar**

A partir de lo obtenido en la sección 3.2.4 se puede apreciar que el macizo, tanto en Quintupeu como en Cahuelmó, es más conservadora la caracterización de Barton que en la de Beniawsky, sin embargo esto es claro ya que Barton incluye una consideración de las características del proyecto en el valor de SRF, mientras que RMR no.

### 5.1.1 RMR

**Tabla 29: Guía para excavación y soporte de túneles de 10 m de diámetro de acuerdo al sistema RMR <sup>[10]</sup>**

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR: 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock RMR: 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

Si bien el sistema de fortificación en el cual el presente informe basará sus análisis en el Sistema Noruego, se evaluará también las recomendaciones de fortificación sugeridas a partir del valor de RMR para un túnel de diámetro 10 m, 1989 <sup>[10]</sup>, que se muestran en la Tabla 29.

Dada la clasificación RMR obtenida en Quintupeu (parte 3.2.4.1), en que Q-1 (mostrado en la Figura 20) se clasifica como Buena roca, el soporte sugerido es de pernos de 3m de longitud en la clave, espaciados a 2.5 m, con malla ocasional. Además, se sugiere una proyección de shotcrete de 50 mm en zonas donde sea necesaria.

Para los otros dos puntos de terreno en Quintupeu (Q-2 y Q-3) la clasificación obtenida corresponde a una roca Regular, por lo que la guía de fortificación sugiere pernos sistemáticos de 4m de longitud espaciados a 1.5 m -2 m tanto en la clave del túnel como en sus paredes. Además sugiere el soporte de malla y proyecciones de shortcrete de 50mm a 100 mm en la clave, y para los costados shotcrete de 30 mm.

En el caso de Cahuelmó, la clasificación corregida según RMR (parte 3.2.4.1), para todos los puntos medidos, muestra una roca Pobre, para lo que se sugieren pernos sistemáticos de 4 m a 5 m de longitud, espaciados entre 1m a 1.5 m y malla tanto en la clave como en las paredes. Además se sugiere shotcrete de 100 mm a 150 mm de espesor en la clave y 100 mm en los costados. Adicionalmente se propone el uso de marcos espaciados a 1.5 m.

### 5.1.2 Q

Utilizando los tramos definidos en la sección de Identificación y Selección de Emplazamientos, en conjunto con lo anterior, es posible realizar una estimación de acuerdo a los datos manejados respecto a la calidad de roca que gobierna cada tramo definido del túnel en ambos casos estudiados.

Para determinar un tipo de fortificación es necesario utilizar las características de la sección a considerar. Por lo que utilizando la Figura 42, para la sección S1 y S2, considerando nicho, se tiene que:

- S1:

$$D = 1200cm \text{ y } ESR = 1$$

$$D_e = \frac{12 m}{1} = 12$$

A partir de lo cual se construye la Figura 43, con una dimensión equivalente de 12, la que arroja en caso de ser necesarios, perno de 4 m de longitud.

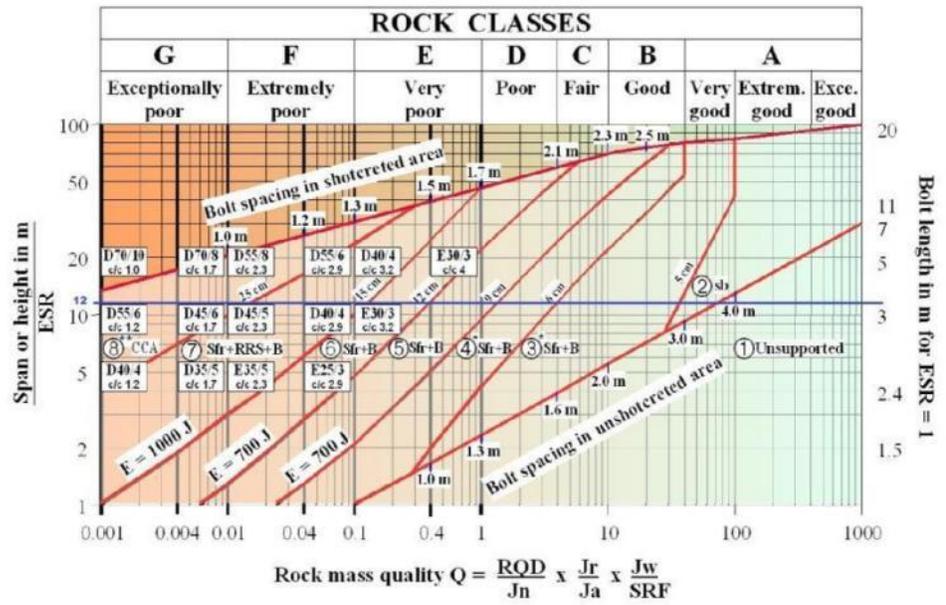


Figura 43: Gráfico de fortificación según Q de la sección S1

- S2:

$$D = 15000 \text{ cm} \text{ y } ESR = 1$$

$$D_e = \frac{15 \text{ m}}{1} = 15$$

Con lo que, al igual que en el caso de la sección S1, se construye la con una dimensión equivalente de 15, la que arroja en caso de ser necesarios, pernos de 4 m de longitud.

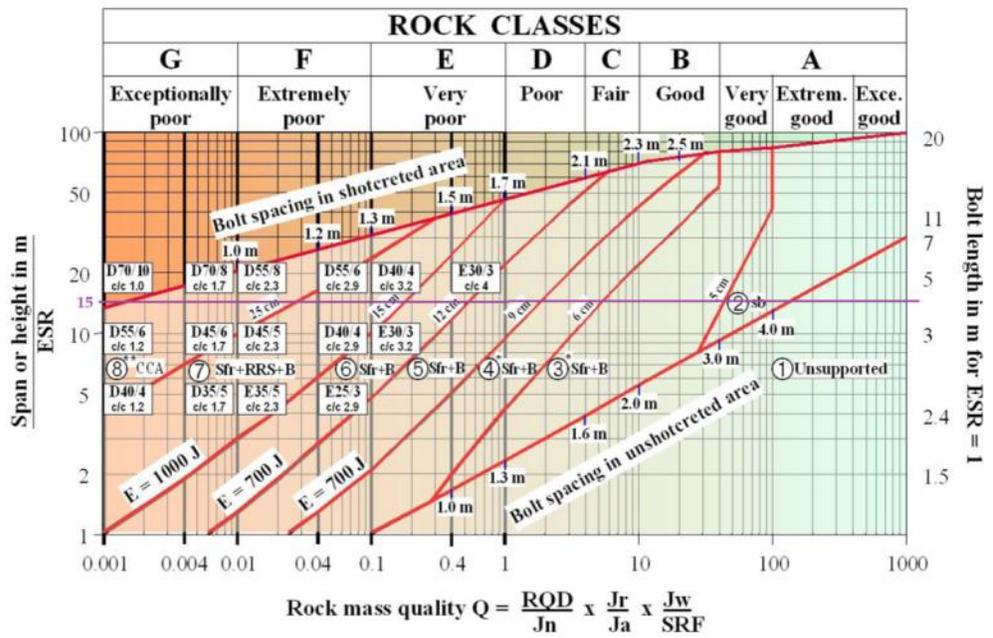


Figura 44: Gráfico de fortificación según  $Q$  de la sección S2.

### 5.1.2.1 Quintupeu

De la Tabla 21, se observa una uniformidad en la clasificación de las muestras obtenidas en Quintupeu como Roca Pobre, donde:

$$Q_{Q1} \in [2.01, 3.64]$$

$$Q_{Q2} \in [2.45, 4.08]$$

$$Q_{Q3} \in [1.31, 2.51]$$

La Figura 45 muestra la inclusión de este rango de valores en la Figura 43. Donde se puede apreciar que para los rangos de Q obtenidos la clasificación en cuanto a fortificación corresponde al tipo 4, en que son necesarios pernos sistemáticos en conjunto con shotcrete de entre 40 mm y 100 mm de espesor.

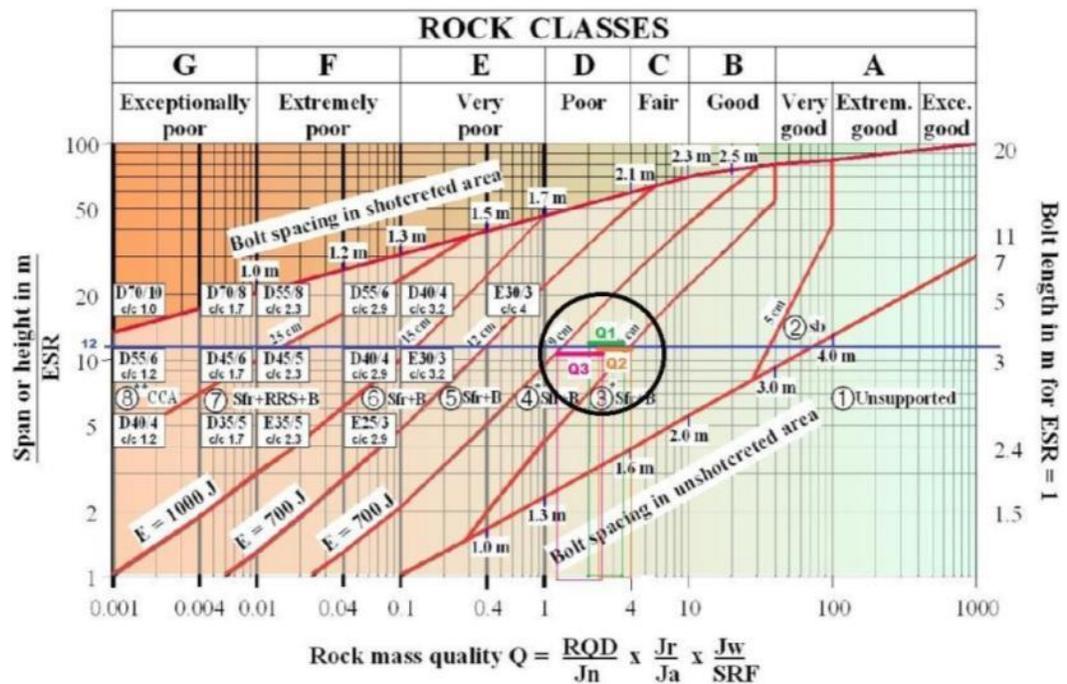


Figura 45: Rango de valores de Q para Quintupeu en la sección S1.

Para la sección S2, se también se puede observar que mayoritariamente los rangos de Q obtenidos para las muestras Q1, Q2 y Q3 pertenecen a la clasificación 4. Sin embargo se puede apreciar una leve inclinación hacia la clasificación 5 en la muestra Q3 y a su vez una hacia la clasificación 3 para la muestra Q2, tal y como indica la Figura 46.

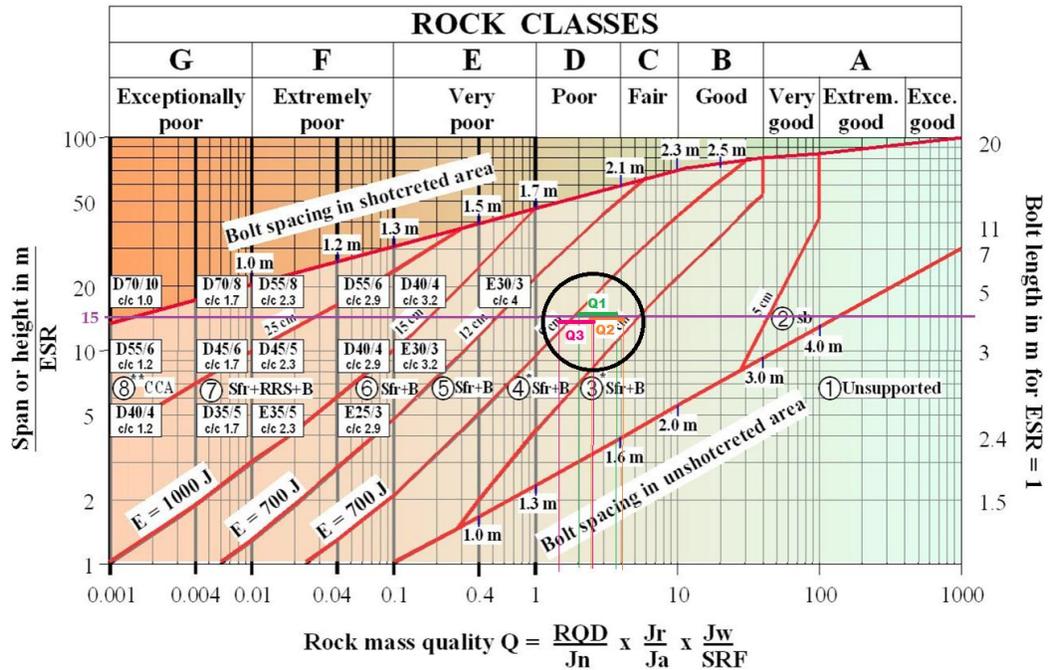


Figura 46: Rango de valores de Q para Quintupeu en la sección S2.

### 5.1.2.2 Cahuelmó

A partir de la Tabla 23, se puede apreciar que los valores de Q, para las muestras C1 y C4 corresponden a una clasificación de roca Muy Pobre, mientras que en el caso de C2 y C3 la clasificación corresponde a roca Pobre.

Al ubicar en la Figura 43 los valores de Q asociados a estas muestras se obtiene que la fortificación de la roca para la sección S1 corresponde al tipo 5 (Figura 47), en que es necesario utilizar shotcrete con fibras de entre 50mm y 90mm de espesor, junto con pernos de 4m de longitud.

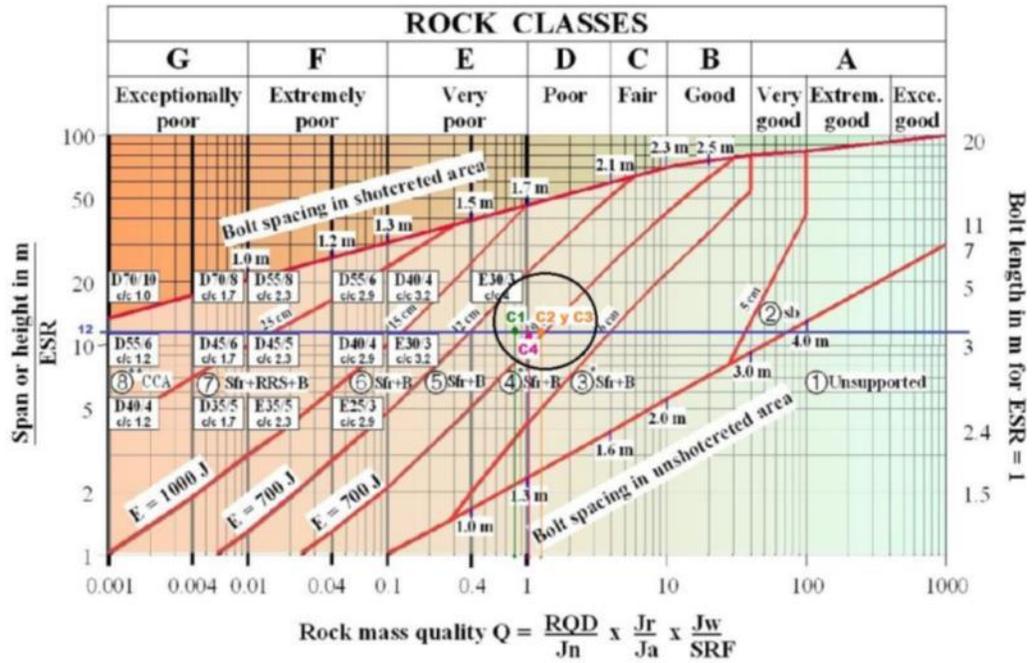


Figura 47: Valores de Q para Cahuelmó en la sección S1.

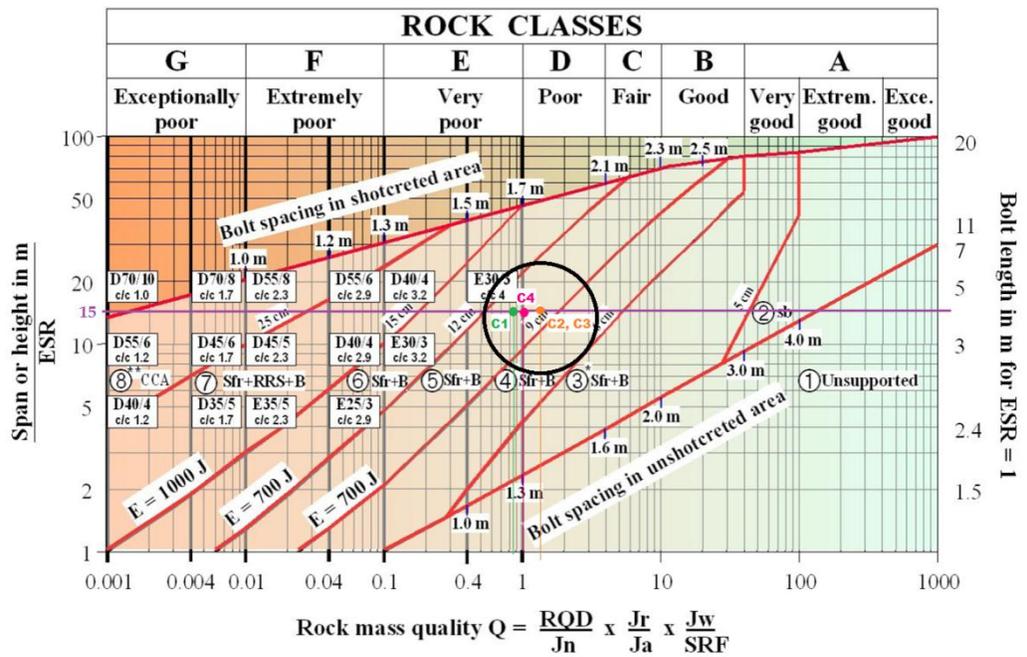


Figura 48: Valores de Q para Cahuelmó en la sección S2.

Respecto a la sección S2, como se puede comprobar de la Figura 48, tiene asociado según este método de fortificación, la clasificación 5, al igual que en la sección S1.

## **5.2 Tipos de Roca por Tramo**

Como se señalado previamente en la sección 5.1.2, en ambos fiordos se ha dado la situación de que a lo largo de sus emplazamientos supuestos, los resultados de los análisis realizados no arrojan variedad en cuanto a la clasificación del macizo, esto debido a la limitada información, por lo que es sólo de carácter indicativo.

Por la razón anterior, se asume un solo tipo de roca para todo el emplazamiento en ambos casos. Es decir Roca Pobre tanto para Quintupeu como para Cahuelmó.

## VI. ESTIMACIÓN DE COSTOS

### 6.1 Estadística de Costos <sup>[1]</sup>

La estimación de los costos se realizará en base a valores estadísticos de túneles submarinos construidos en Noruega.

A continuación se presenta un gráfico de barras para los valores de los túneles en Coronas Noruegas por metro lineal de avance, correspondiente a valores del año 2000.

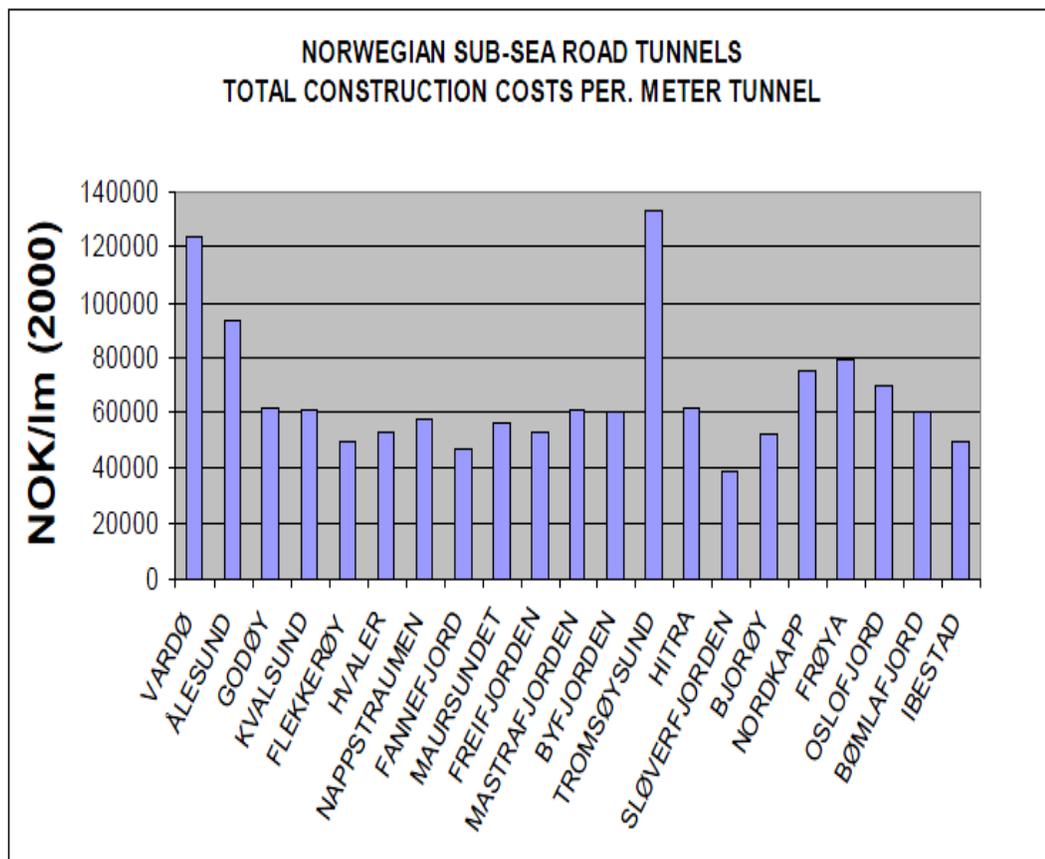


Figura 49: Costo por metro lineal de túnel en NOK <sup>[1]</sup>

A partir de estos datos, es posible determinar el valor presente al año 2010 en base al IPC en NOK/m <sup>[18]</sup>. Además se puede convertir este valor a la moneda nacional (CLP) y a dólares norteamericanos (USD), utilizando la conversión presentada a continuación <sup>[17]</sup>.

*Tabla 30: Conversión de monedas*

NOK	USD	CLP
1	0,19	86,97

Con lo que se tiene:

*Tabla 31: Costos por metro lineal de túnel en NOK, CLP y USD, 2010*

Túnel	Costo (2000)	Costo (2010)	Costo (2010)	Costo (2010)
	NOK/m	NOK/m	CLP/m	USD/m
Vardø	123.000	150.165	13.059.709	28.063
Freifjord	52.000	63.484	5.521.178	11.864
Kvalsund	61.000	74.472	6.476.766	13.917
Hitra	61.000	74.472	6.476.766	13.917
Frøya	79.000	96.447	8.387.943	18.024
Bømlafjord	60.000	73.251	6.370.589	13.689
Oslofjord	79.000	96.447	8.387.943	18.024
North Cape	76.000	92.785	8.069.413	17.340

Además, se cuenta con valores estadísticos de estos túneles respecto a los requerimientos de fortificación, particularmente el número de pernos y volumen de shotcrete utilizados por metro lineal, junto con los rendimientos asociados tal y como muestra la Tabla 32.

**Tabla 32: Rendimientos, Pernos y Shotcrete**

Tunel	Rendimientos	Pernos	Shotcrete
	m/semana	No. /m	m <sup>3</sup> /m
Vardø	17	6,9	0,95
Freifjord	45	5,3	1,44
Kvalsund	56	4	0,31
Hitra	46	4,2	1,44
Frøya	37	5	2,9
Bømlafjord	55	3,8	1,9
Oslofjord	47	4	1,7
North Cape	56	3,4	4

Las variables pernos y shotcrete contemplan de manera implícita las propiedades de sección y calidad del macizo rocoso, luego para estimar el costo de los túneles de Quintupeu y Cahuelmó, bastará con calcular estas variables y compararlas con las asociadas a costos conocidos a través de la siguiente relación:

$$Costo \approx \alpha \cdot Pernos \left[ N^o / m \right] + \beta \cdot Shotcrete \left[ m^3 / m \right]$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  corresponden a constantes ponderadoras que se estiman a través de un planteamiento de optimización de la función:

$$Costo = \alpha \cdot Pernos \left[ N^o / m \right] + \beta \cdot Shotcrete \left[ m^3 / m \right] + Error$$

Luego, se intentará minimizar el error, particularmente el cuadrado del error:

$$\begin{aligned} & \min \sum \epsilon_i^2 \\ / & C_i = \alpha \cdot x_{1i} + \beta \cdot x_{2i} + \epsilon_i \\ & \text{Con } \alpha, \beta > 0 \end{aligned}$$

Donde el índice  $i$  se utiliza para identificar los túneles.

Finalmente se tiene:

**Tabla 33: Optimización de  $\Sigma e_i^2$**

Tunel	Con VardØ			Sin VardØ		
	$C=\alpha x_1+\beta x_2$	€	€2	$C=\alpha x_1+\beta x_2$	€	€2
VardØ	23.528	4.534	20.560.236	-	-	-
Freifjord	18.841	-6.977	48.675.630	16.674	-4.810	23.135.945
Kvalsund	13.379	538	289.409	10.993	2.925	8.553.608
Hitra	15.254	-1.336	1.785.652	13.826	92	8.414
FrØya	19.441	-1.417	2.008.676	18.888	-864	746.772
Bømlafjord	14.447	-757	573.799	13.732	-43	1.856
Oslofjord	14.883	3.141	9.869.010	13.840	4.184	17.503.294
North Cape	15.413	1.926	3.710.664	16.999	341	116.162
		SUMA =	87.473.075		SUMA =	50.066.050

Para estos valores de  $\Sigma e_i^2$ :

**Tabla 34: Valores de  $\alpha$  y  $\beta$**

Con VardØ		Sin VardØ	
$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
3.261,03	1.081,46	2.589,39	2.048,72

Como se puede observar, se ha resuelto el problema de optimización con y sin consideración del túnel VardØ, ya que éste presenta rendimientos muy bajos y costos muy altos en comparación con el resto de los túneles.

Esto se ve reflejado en los resultados de la optimización, ya que el error al considerar dicho túnel es mayor que al no hacerlo.

Es por esto que para fines de estimación de costos se utilizarán los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  correspondientes a la exclusión de VardØ.

El error, en el caso de no considerar VardØ oscila entre un 0,3 y un 40%, por lo que se para estimar un error en ambos casos será necesario analizar la desviación estándar, la que corresponde a:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde  $x$  representa el error para los túneles  $i$ .

Se sabe además que el promedio de los cuadrados de los errores es igual a la varianza de de la predicción, por lo que se tiene que la desviación estándar y la varianza de los costos es:

**Tabla 35: Varianza y desviación estándar**

$\sigma^2$	$\sigma$
7.152.293	2.674

## 6.2 Secciones

Las propiedades de las secciones que se encuentran en el diseño preliminar de Quintupeu (Plano 1 adjunto) se presentan a continuación.

**Tabla 36: Propiedades de las secciones S1 y S2**

Sección	Area [m <sup>2</sup> ]	Contorno [m]
S1	86	23
S2	100	27

La longitud total estimada de ambos túneles se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 37: Longitud total estimada, Quintupeu y Cahuelmó**

$L_{\text{TúnelQuintupeu}}$ [m]	$L_{\text{TúnelCahuelmó}}$ [m]
4.004	4.400

En el caso de Quintupeu, el número de tramos con secciones contemplando nicho (sección S2) corresponden a 4, como se aprecia en el Plano 1, y tienen una longitud de 30 m cada una.

En Cahuelmó, en vez, este número corresponde a 5 (Plano 2).

Luego se tienen las longitudes totales asociadas a cada sección S1 y S2, como se muestra en la Tabla 38.

*Tabla 38: Longitud total por sección*

Sección	$L_{\text{quintupeu}}$ [m]	$L_{\text{cahuelmó}}$ [m]
S1	3.884	4.251
S2	120	150

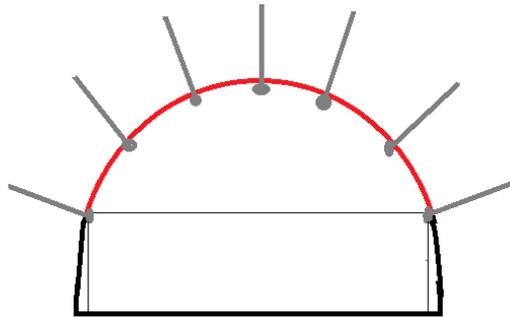
### 6.3 Número de Pernos

A partir del capítulo V, sección 5.1.2, se obtiene el espaciamiento entre pernos para cada sección y, junto con las propiedades geométricas de éstas, es posible determinar la cantidad de pernos necesarios en el contorno.

*Tabla 39: Pernos por contorno de sección*

Sección	Espaciamiento [m]	No. En Contorno
S1	1,7	6,76
S2	1,8	7,5

Luego, en el contorno de la sección S1 se necesitarán aproximadamente 7 pernos, mientras que en la sección S2 8. Esto considerando que sólo el 50% del contorno de arco principal necesitará fortificación de pernos, tal y como muestra la siguiente figura en rojo.



*Figura 50: Porción de contorno apernada*

El espaciamiento entre pernos obtenido de los gráficos de Barton y presentados en la Tabla 39, no solo corresponden a la vista en corte es decir de las secciones, sino que también al espaciamiento estimado de forma longitudinal.

Luego, el número total de pernos corresponderá a la cantidad esperada en el 50% del contorno por la longitud total asociada a esta sección, dividida en el espaciamiento respectivo.

*Tabla 40: Número de pernos por sección y longitud total*

Sección	Quintupeu	Cahuelmó
	No. Pernos	No. Pernos
S1	15.455	16.916
S2	500	648
<b>Total</b>	<b>15.955</b>	<b>17.564</b>

Finalmente el número de pernos por metro lineal de avance, corresponderá la razón entre el total de pernos en el túnel y la longitud total de éste.

*Tabla 41: Pernos No./m*

Quintupeu	Cahuelmó
Pernos No./m	Pernos No./m
3,98	3,99

#### **6.4 Shotcrete**

Como en el caso de los pernos, a partir del capítulo V se tiene que los espesores de shotcrete en el caso de Quintupeu, para ambas secciones se encuentran entre 6 y 9 cm, sin embargo, dada la experiencia Noruega en túneles de esta embergadura, se utilizará un recubrimiento de 10 cm para ambas secciones.

En el caso de Cahuelmó, los espesores para ambas secciones se encuentran entre 9 y 12 cm, por lo que se realizará el cálculo con 12 cm de espesor.

Finalmente se tiene:

*Tabla 42: Espesores de Shotcrete*

Sección	Quintupeu	Cahuelmó
	Espesor [cm]	Espesor [cm]
S1	10	12
S2	10	12

A diferencia de la fortificación con pernos, el shotcrete se utiliza para recubrir todo el contorno. Por lo que el volumen de shotcrete necesario estimado por sección corresponderá a el contorno por el espesor por la longitud correspondiente.

*Tabla 43: Volumen de Shotcrete*

Sección	Quintupeu	Cahuelmó
	Shotcrete m <sup>3</sup>	Shotcrete m <sup>3</sup>
S1	8933,2	11.733
S2	324	504
<b>Total</b>	<b>9257,2</b>	<b>12.237</b>

Luego el volumen por metro lineal de shotcrete será la razón entre el volumen total y la longitud total del túnel.

*Tabla 44: Volumen Shotcrete por metro lineal*

Quintupeu	Cahuelmó
Shotcrete m <sup>3</sup> /m	Shotcrete m <sup>3</sup> /m
2,3	2,8

## 6.5 Estimación de Costos

Finalmente, en base a lo calculado en 6.3 y 6.4, se puede elaborar una tabla resumen, como se presenta a continuación.

*Tabla 45: Pernos y Shotcrete por metro lineal*

Túnel	Pernos	Shotcrete
	No./m	m <sup>3</sup> /m
Quintupeu	3,98	2,31
Cahuelmó	3,99	2,78

Luego, es posible utilizar la función de costos creada a partir de los datos estadísticos de la sección 6.1, lo cual entrega los costos por metro lineal de túnel. Se utilizará para estos efectos un error de dos veces la desviación estándar.

*Tabla 46: Costo por metro lineal*

Túnel	Quintpeu	Cahuelmó
Costo USD/m	15.055	16.030
$\pm \epsilon_{2\sigma}$ USD/m	5.349	

A partir de los valores anteriores, y considerando las longitudes totales estimadas en ambos casos, es posible obtener una estimación del costo total de ambos proyectos, tal y como se presenta a continuación.

*Tabla 47: Costo y error total*

Tunel	Quintpeu	Cahuelmó
Costo MMUSD	60,28	70,55
$\pm \epsilon_{2\sigma}$ MMUSD	21,44	23,54

## **VII. COMENTARIOS**

### **8.1 Visita a terreno**

La visita a terreno constó de un día de recorrido, toma de muestra y datos en afloramientos encontrados. Esto se llevó a cabo con la ayuda de la alumna memorista Dixie Rivera Bernal, perteneciente al Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

### **8.2 Túneles submarinos**

Toda información estadística respecto de túneles submarinos Noruegos se obtuvo de publicaciones Noruegas referidas en el capítulo IX, correspondiente a bibliografía.

### **8.3 Asignación de puntaje en la clasificación RMR**

Respecto a la asignación de puntajes para parámetros de la clasificación RMR, se observa que la resistencia se estimó a partir de la información recolectada en los afloramientos existentes, clasificando la dureza de la roca bajo los parámetros de resistencia de roca inalterada. Los valores utilizados se encuentran en la Tabla 48 (anexos).

#### **8.4 Estimación de la clasificación Q**

Los valores escogidos para el factor de agua  $J_w$  y de reducción de fuerza  $SRF$ , tanto para Quintupeu como para Cahuelmó, corresponden a valores relativamente y no extremadamente conservadores tomando en consideración lo siguiente:

- El proceso constructivo de túneles submarinos contempla inyecciones de lechada delante de la frente como una medida de impermeabilización (*Pregrouting*).
- Como los análisis *per se* realizados corresponden a estimaciones basadas en los datos y valores existentes, a modo de obtener ideas gruesas, se optó por no realizar análisis tensionales debido a la falta de datos importantes como por ejemplo las características y profundidad del sedimento en los fiordos.
- Se consideró una sola zona de cizalle a causa de la falla Liquiñe-Ofqui.

#### **8.5 Conceptos básicos de diseño**

Respecto al flujo vehicular, como mencionado, los flujos actuales se presentan en la Tabla 67 de los anexos, donde se evidencia el estado de conectividad a través de bajas densidades de flujo entre localidades y ciudades de la zona estudiada.

Los trazados sugeridos se encuentran sujetos a supuestos referentes a trazados terrestres, los que deberán ser considerados en el momento de analizar los túneles propuestos como alternativa a la problemática del cruce de los fiordos.

Existen múltiples posibilidades para el diseño de sección transversal, lo que se presenta en este trabajo constituye una alternativa que facilita el estudio de factibilidad y obtención de un orden de magnitud de resultados.

La sección de nichos podría considerarse igual a la sección que no los considera (S1) pero con una expansión rectangular, y disminuir así la sección a excavar.

Otra observación referente a las secciones, es que la consideración de tres pistas responde a la posibilidad de generar tráfico expedito para vehículos livianos en subida, por lo que para

efectos de cálculo se consideró una sección de tres pistas a lo largo de ambos túneles, con excepción de los tramos con nicho. Sin embargo el tramo central podría no requerir tres pistas y podría reducirse a un tránsito bidireccional de dos pistas, disminuyendo así la magnitud de la obra.

## **8.6 Estimación de fortificación**

Respecto a la estimación de fortificación:

- Pernos:

En ambas secciones y fiordos, la longitud de perno obtenida se encuentra entre 3 y 5 metros. Los pernos estandarizados tienen longitudes de 2, 2.4, 3, 4, 5 y 6 metros (O. Kvammen de Skava, com. oral), por lo que los cálculos realizados se encuentran basados en una longitud de 4 metros de pernos.

Los pernos comerciales más utilizados en túneles en Chile y Noruega se encuentran en diámetros de 22 y 25 mm.

- Shotcrete:

En lo que al shotcrete compete, a pesar de que según el gráfico de fortificación de Barton arrojó un espesor de entre los 6 y 9 cm para el caso del túnel en Quintupeu, se optó por utilizar un espesor de 10 cm en los cálculos ya que la experiencia tanto chilena como noruega lo avalan (O. Kvammen de Skava, com. oral).

En el caso del túnel en Cahuelmó se utilizó un espesor de 12 cm ya que correspondía al caso más crítico para los rangos de Q obtenidos en el macizo del fiordo.

## 8.7 Costos

Dada la amplia gama de variables involucradas en el cálculo de costos de una obra como lo son:

- Costo Directo. Entre las que se consideran:
  - Personal
  - Equipos
  - Materiales
  
- Costo Indirecto. Entre las que se consideran:
  - Movilización y desmovilización de faena
  - Administración
  - Servicios
  - Personal

Para calcular un costo considerando todas las variables involucradas en una obra de las características planteadas es importante considerar supuestos que se escapan de los alcances del presente informe. Un ejemplo de esto son las maquinarias, que a modo de estimar un costo es para estimar un costo asociado es necesario tomar otros supuestos, como por ejemplo el rendimiento, para lo cual también es necesario estimar un plazo.

Por este motivo se optó por realizar una estimación en base a la estadística de costos conocida de proyectos noruegos, que si bien pueden diferir en algunos detalles como la disponibilidad de maquinarias y repuestos, accesibilidad a las zonas de trabajo, entre otros cumple con los requisitos para obtener una estimación de tipo orden de magnitud de costos que estarían involucrados en estos proyectos.

Estos costos obtenidos pueden ser perfeccionados en la etapa de Ingeniería Básica, complementando la información con estudios y cotizaciones.

## VIII. OBSERVACIONES

Es de suma relevancia destacar que todas las estimaciones y cálculos realizados en este informe se encuentran basados en los datos obtenidos en la visita de un día a terreno y los disponibles en los organismos públicos mencionados, tales como el SHOA y SERNAGEOMIN.

Estos datos no aportan información suficiente como para que las estimaciones realizadas sean concluyentes, sin embargo satisfacen los requerimientos mínimos para realizar un estudio preliminar en la zona, que pueda servir como referencia en un posterior desarrollo de proyecto.

A pesar de que el presente informe postula alternativas de trazado, éstos son sólo sugerencias, ya que los emplazamientos óptimos dependerán de los estudios geológicos de los fiordos. Además, los emplazamientos de los túneles se encuentran en directa relación con el trazado superficial el que a su vez dependerá de los estudios geológicos de la zona.

En base a lo estudiado, se concluye que el túnel en Quintupeu es económica y técnicamente factible de ser construido. Los resultados arrojados concuerdan con la experiencia noruega en términos de longitud esperada, tipo de sección y fortificación necesaria. Respecto a los costos, los valores obtenidos concuerdan con los valores esperados en Chile, en que un túnel minero de dos pistas tiene un costo aproximado de entre 20 y 40 MMUSD dependiendo de la longitud de éste y la calidad de la roca (O. Kvammen de Skava, com. oral).

Luego, la alternativa de un túnel submarino en Quintupeu puede considerarse en la evaluación de alternativas que estudien como solución al problema de interconexión en el sector de la provincia de Palena.

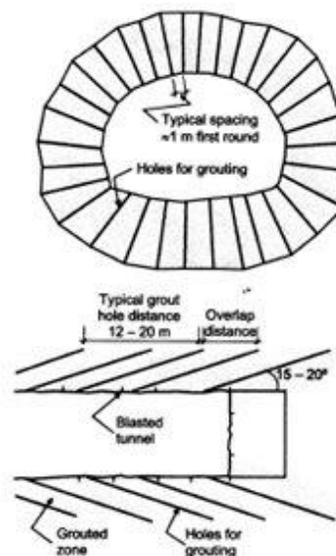
Respecto al emplazamiento sugerido en Cahuelmó, es necesario observar que dada la proximidad terrestre la conveniencia de éste se encontrará sujeta a la evaluación respecto a realizar un paso superficial al costado oeste. Es decir, será necesaria una comparación de la evaluación de un proyecto de ruta costera en el sector oeste de Cahuelmó (Figura 51), con la alternativa submarina, la que arrojó como resultado una peor calidad de roca, mayor longitud y por tanto mayor costo que el túnel estudiado en Quintupeu.



**Figura 51: Alternativa terrestre en Cahuelmó, Google Earth.**

Si bien no ha sido estudiado en el presente informe, un trazado superficial podría constituir una alternativa más económica y con menores plazos de construcción.

Una consideración que en materias de fortificación no se menciona es que en la construcción de túneles submarinos es común realizar un *pre-grouting*, que constituye una inyección de lechada con aditivos impermeabilizantes en la frente. Esto tiene como objetivo disminuir las infiltraciones a un rango controlable a modo de facilitar tanto el proceso constructivo como operativo del túnel. A continuación se presenta un esquema aclaratorio de lo explicado.



**Figura 52: Esquema de inyección de lechada**

Esta inyección de lechada se realiza en zonas críticas de infiltración, por lo general dictadas por la presencia de alguna reserva de subterránea como un acuífero o en túneles submarinos o bajo alguna reserva de agua.

Para la etapa de Ingeniería Básica del proyecto se sugiere:

- Realizar un análisis de la información disponible de la zona, incluyendo mapas geológicos y topográficos, además de cualquier otro estudio geológico que se haya realizado para algún proyecto.
  - Estudio de imágenes aéreas.
  - Realizar un estudio del terreno, entre las que se consideren:
    - Estudio Geológico. Debe contemplar un mapeo, descripción de las estructuras geológicas y estudio de fallas o zonas de falla.
    - Estudio de propiedades hidrogeológicas. Conocer las condiciones de agua subterránea (presiones de poros y variaciones de estos según estación) en términos de caudal. También estudiar la relación que existe entre la presión de agua en las discontinuidades y el campo de esfuerzos.
    - Investigación geofísica. Estos métodos se utilizan para investigar aéreas donde la roca no se encuentra expuesta, como por ejemplo zonas en que la roca se encuentra cubierta por sedimentos lo que arrojará ciertos parámetros característicos de estos y su espesor.
    - Sondajes con recuperación de muestra, en el que se mida RQD y se registre la presencia de suelos expansivos. Para ello, tener en consideración alcanzar la profundidad del túnel a modo de caracterizar la roca que será excavada.
- En el proceso de exploración geotécnica, es importante prestar atención a la posibilidad de encontrar arcillas expansivas provenientes de ciertas condiciones de meteorización de rocas básicas, es decir de alto contenido de feldespatos cálcicos, como los basaltos o andesitas. Teniendo presente los antecedentes geológicos del sector, la existencia o no de arcillas expansivas es un factor importante a considerar, ya que éstas al entrar en contacto con agua podrían generar deformaciones durante y luego del período constructivo, lo que puede constituir un riesgo a nivel de seguridad y aumento de costos en mantención.

Un ejemplo de esto es lo que ocurre en España, en tres túneles de Tarragona al sur de Cataluña, en que el hinchamiento de arcillas y yesos expansivos han provocado la deformación de las plataformas de las vías. La solución adoptada por el Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF) ha sido de demoler la losa de hormigón, excavar cinco metros de profundidad y construir un forjado más armado y resistente para impedir nuevos movimientos en la plataforma de las vías que se construyan por segunda vez.

- Construir un mapa estimativo de sedimentos. Estudiar el espesor de los sedimentos utilizando un *Sub Bottom Profiler* (Perfilador Acústico).
- Estudio de sismicidad local. Determinar el riesgo sísmico local debido a la actividad de la LOFZ. Determinar coeficiente sísmico.

Además para efectos de construcción de los túneles una etapa preponderante del proyecto será el estudio geológico, diseño y construcción de los portales de entrada. Estas zonas requerirán de un estudio pseudo estático de taludes considerando coeficientes sísmicos.

Finalmente se sugiere como medida cautelar considerar siempre la posibilidad de encontrar fallas en la zona pertenecientes al complejo LOFZ, por lo que el diseño se encontrará sujeto a la perpendicularidad de su eje con éstas o en algún ángulo que no implique un subparalelismo entre la discontinuidad principal y el eje del túnel, ya que el cruce perpendicular de una falla menor si bien genera dificultades constructivas, éstas son de carácter superable, no así el cruce longitudinal de una falla.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

### 9.1 Túneles Submarinos

- [1] Groev, E. (2001). *Sub sea tunnelling as an option for strait crossings*. SINTEF, Building and Infrastructure, Trondheim.
- [2] Juncá Ubierna, J. A. (1993). Túneles submarinos de carretera en Noruega: Un desafío de la ingeniería subterránea hecho realidad. *Revista de obras públicas N°3.319* .
- [3] Norwegian Tunnelling Society. (2009). Subsea Tunnels. *Publicación No. 18*.
- [4] Norwegian Tunnelling Society. (s.f.). Water control in Norwegian tunnelling. *Publicación No. 12* .
- [5] Stefaunussen, W. (2000). Túneles Submarinos. *Seminario Método Noruego de Tunelería*. Santiago de Chile.
- [6] Storås, I. (2000). Experiencias en la construcción de túneles submarinos de carretera en Noruega. *Seminario Método Noruego de Tunelería*. Santiago de Chile.

### 9.2 Geología

- [7] Cembrano, J., & Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone. *Tectonophysics* , 471.
- [8] D. Lange et al, J. C. (2008). *First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe-Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern Andes*.
- [9] Evert, H. (2006). Capítulo 3:“Rock mass classification”. En *Practical Rock Engineering*. Edición Electrónica.
- [10] Hoek, E. (2011). *Biblioteca Virtual Hoek’s Corner*. (R. Science, Productor) Obtenido de [http://www.roscience.com/education/hoek\\_s\\_corner](http://www.roscience.com/education/hoek_s_corner)

- [11] Morales, M. O. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en Yacimiento Franke*. Universidad de Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas.
- [12] N. Barton et al, E. G. (1992). Norwegian method of tunnelling. *World Tunnelling and surface excavation* .
- [13] Náquira, M. (2009). *Susceptibilidad de Remociones en masa en las costas de fiordos cercanos a Hornopirén, X región*. Universidad de Chile: Memoria para optar al título de Geólogo.
- [14] Ordoñez B., A., & Crignola G., P. (2003). Depósitos metalíferos, anomalías geoquímicas, rocas y minerales industriales y recursos energéticos del sector sur de la región de Los Lagos. Escala 1:500.000. *SERNAGEOMIN* , Santiago.

### **9.3 Métodos de Construcción y Normativas**

- [15] Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección de Vialidad. (2002). Manual de Carreteras. *Túneles* . Vol. 3.

### **9.4 Otros**

- [16] Tánsito, D. E. (s.f.). *Servicio de Vialidad*. Obtenido de <http://servicios.vialidad.cl/censo/index.htm>
- [17] Fusion Media. (s.f.). *FOREX PROS*. Obtenido de <http://www.forexpros.es/currencies>
- [18] Statistics Norway. (s.f.). Obtenido de <http://www.ssb.no>

## X. ANEXOS

### 10.1 Recopilación de Información

#### 10.1.1 Recopilación Bibliográfica

##### 10.1.1.1 RMR – Beniaowski (1989)

*Tabla 48: RMR Parámetros y Puntaje.*

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal $\sigma$ )	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing			
	Rating		15	10	7	4	0		

Donde las discontinuidades tienen una distribución de puntaje como se muestra en la Tabla 49.

**Tabla 49: Condición de Discontinuidades.**

<b>E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions</b>					
Discontinuity length (persistence) Rating	< 1 m 6	1 - 3 m 4	3 - 10 m 2	10 - 20 m 1	> 20 m 0
Separation (aperture) Rating	None 6	< 0.1 mm 5	0.1 - 1.0 mm 4	1 - 5 mm 1	> 5 mm 0
Roughness Rating	Very rough 6	Rough 5	Slightly rough 3	Smooth 1	Slickensided 0
Infilling (gouge) Rating	None 6	Hard filling < 5 mm 4	Hard filling > 5 mm 2	Soft filling < 5 mm 2	Soft filling > 5 mm 0
Weathering Ratings	Unweathered 6	Slightly weathered 5	Moderately weathered 3	Highly weathered 1	Decomposed 0

Adicionalmente, Beniawski (1989) propuso correcciones para casos especiales y recomendaciones de valores de resistencia del macizo y aplicaciones en túneles:

**Tabla 50: Condiciones de RMR para Túneles.**

<b>F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**</b>			
Strike perpendicular to tunnel axis		Strike parallel to tunnel axis	
Drive with dip - Dip 45 - 90°	Drive with dip - Dip 20 - 45°	Dip 45 - 90°	Dip 20 - 45°
Very favourable	Favourable	Very unfavourable	Fair
Drive against dip - Dip 45-90°	Drive against dip - Dip 20-45°	Dip 0-20 - Irrespective of strike°	
Fair	Unfavourable	Fair	

Donde la corrección de puntaje viene dada por:

**Tabla 51: Corrección de puntaje RMR para túneles.**

<b>B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)</b>						
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	

10.1.1.2 Q – Barton (1974)

*Tabla 52: Clasificación Según Q de Parámetros RQD y J<sub>n</sub>*

DESCRIPTION	VALUE	NOTES
<b>1. ROCK QUALITY DESIGNATION</b>	<b>RQD</b>	
A. Very poor	0 - 25	1. Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q.
B. Poor	25 - 50	
C. Fair	50 - 75	
D. Good	75 - 90	2. RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90 etc. are sufficiently accurate.
E. Excellent	90 - 100	
<b>2. JOINT SET NUMBER</b>	<b>J<sub>n</sub></b>	
A. Massive, no or few joints	0.5 - 1.0	
B. One joint set	2	
C. One joint set plus random	3	
D. Two joint sets	4	
E. Two joint sets plus random	6	
F. Three joint sets	9	1. For intersections use (3.0 × J <sub>n</sub> )
G. Three joint sets plus random	12	
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15	2. For portals use (2.0 × J <sub>n</sub> )
J. Crushed rock, earthlike	20	

*Tabla 53: Clasificación Según Q de Parámetro J<sub>r</sub>*

<b>3. JOINT ROUGHNESS NUMBER</b>	<b>J<sub>r</sub></b>	
<i>a. Rock wall contact</i>		
<i>b. Rock wall contact before 10 cm shear</i>		
A. Discontinuous joints	4	
B. Rough and irregular, undulating	3	
C. Smooth undulating	2	
D. Slickensided undulating	1.5	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m.
E. Rough or irregular, planar	1.5	
F. Smooth, planar	1.0	
G. Slickensided, planar	0.5	2. J <sub>r</sub> = 0.5 can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength.
<i>c. No rock wall contact when sheared</i>		
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
J. Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	

Tabla 54: Clasificación Según Q de Parámetro  $J_a$ .

4. JOINT ALTERATION NUMBER	$J_a$	$\phi_r$ degrees (approx.)	
<b>a. Rock wall contact</b>			
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75		1. Values of $\phi_r$ , the residual friction angle, are intended as an approximate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present.
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	25 - 35	
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0	25 - 30	
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0	20 - 25	
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 - 2 mm or less)	4.0	8 - 16	
<b>b. Rock wall contact before 10 cm shear</b>			
F. Sandy particles, clay-free, disintegrating rock etc.	4.0	25 - 30	
G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	6.0	16 - 24	
H. Medium or low over-consolidation, softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	8.0	12 - 16	
J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite, (continuous < 5 mm thick). Values of $J_a$ depend on percent of swelling clay-size particles, and access to water.	8.0 - 12.0	6 - 12	
<b>c. No rock wall contact when sheared</b>			
K. Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H and J for clay conditions)	6.0		
L. Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction, non-softening	5.0		
M. Thick continuous zones or bands of clay	10.0 - 13.0		
P. & R. (see G,H and J for clay conditions)	6.0 - 24.0		

Tabla 55: Clasificación Según Q de Parámetro  $J_w$ .

5. JOINT WATER REDUCTION	$J_w$	approx. water pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	
A. Dry excavation or minor inflow i.e. < 5 l/m locally	1.0	< 1.0	
B. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66	1.0 - 2.5	
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5 - 10.0	1. Factors C to F are crude estimates; increase $J_w$ if drainage installed.
D. Large inflow or high pressure	0.33	2.5 - 10.0	
E. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2 - 0.1	> 10	2. Special problems caused by ice formation are not considered.
F. Exceptionally high inflow or pressure	0.1 - 0.05	> 10	

Tabla 56: Clasificación Según Q de Parámetro SRF.

6. STRESS REDUCTION FACTOR		SRF	
<b>a. Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated</b>			
A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)		10.0	1. Reduce these values of SRF by 25 - 50% but only if the relevant shear zones influence do not intersect the excavation
B. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth < 50 m)		5.0	
C. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth > 50 m)		2.5	
D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)		7.5	
E. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation < 50 m)		5.0	
F. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation > 50 m)		2.5	
G. Loose open joints, heavily jointed or 'sugar cube', (any depth)		5.0	
<b>b. Competent rock, rock stress problems</b>			
	$\sigma_c/\sigma_t$	$\sigma_t/\sigma_1$	
H. Low stress, near surface	> 200	> 13	2.5
J. Medium stress	200 - 10	13 - 0.66	1.0
K. High stress, very tight structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2
L. Mild rockburst (massive rock)	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
M. Heavy rockburst (massive rock)	< 2.5	< 0.16	10 - 20
<b>c. Squeezing rock, plastic flow of incompetent rock under influence of high rock pressure</b>			
N. Mild squeezing rock pressure			5 - 10
O. Heavy squeezing rock pressure			10 - 20
<b>d. Swelling rock, chemical swelling activity depending on presence of water</b>			
P. Mild swelling rock pressure			5 - 10
R. Heavy swelling rock pressure			10 - 15

### 10.1.1.3 Resistencia de la Roca Inalterada – Doruk 1991 and Hoek et al 1992

**Tabla 57: Estimación de Campo de Resistencia a la Compresión para Muestras de Roca Intacta.**

Grado (*)	Término	Esfuerzo Compresión Uniaxial [Mpa]	Índice de Carga Puntual [Mpa]	Características	Ejemplos (**)
R6	Extremadamente Dura	> 250	> 10	Repetidos golpes de martillo, desprenden pequeños trozos de roca, sonido metálico.	Basalto fresco, cuarzita, gneis, granito.
R5	Muy Dura	100 - 250	04-oct	Para romper un espécimen de roca intacta, se requiere algunos golpes firmes de martillo.	Arenisca basalto, gabro, gneis, granodiorita, caliza, mármol.
R4	Dura	50 - 100	02-abr	Se requiere de pocos golpes de martillo para romper un espécimen.	Caliza, mármol, arenisca, esquisto.
R3	Medianamente Dura	25 - 50	01-feb	Un firme golpe de martillo puede marcar la roca, y un cortaplumas rayar la superficie.	Conglomerado, Carbón, hormigón, esquisto.
R2	Blanda	may-25	(***)	El material se puede cortar o rayar superficialmente con cortaplumas, pero es muy duro para formar una probeta triaxial.	Yeso, salpiedra, potasa.
R1	Muy Blanda	01-may	(***)	El material se desmenuza bajo un simple golpe del martillo, puede tallarse con cortaplumas.	Roca alterada.
R0	Extremadamente Blanda	0.25 - 1	(***)	Se puede marcar con la uña del pulgar.	Arcilla.

(\*) Grado de acuerdo a la ISRM (1981)

(\*\*) Las rocas presentan un rango amplio de esfuerzo de compresión uniaxial que reflejan la heterogeneidad en la composición y anisotropía en la estructura, las rocas duras se caracterizan por el arreglo de cristales bien trabados.

(\*\*\*) Rocas con resistencia a compresión inferior a 25 [Mpa], arrojan resultados muy ambiguos.

10.1.1.4 GSI – Hoek (1994)

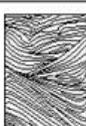
<b>Geological Strength Index</b> From the description of structure and surface condition of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value to Geological Strength Index (GSI) from the zones. Do not attempt to fit to cracks, quoting a range is more realistic.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		VERY GOOD - very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD - rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR - smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR - slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR - slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY →				
 <p><b>BLOCKY</b> - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets</p>	80	70				
 <p><b>VERY BLOCKY</b> - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets</p>		60	50			
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED</b> - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>			40	30		
 <p><b>DISINTEGRATED</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces</p>				20	10	
 <p><b>FOLIATED/AMINATED/SHEARED</b> - thinly laminated or foliated, tectonically sheared weak rocks; closely spaced schistosity prevails over any discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness</p>	N/A	N/A			5	
		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				

Figura 53: Geological Strength Index.

## 10.1.2 Visita a Terreno

### 10.1.2.1 Coordenadas geográficas de los puntos de terreno

- Quintupeu

*Tabla 58: Coordenadas puntos de terreno Quintupeu.*

Punto	Latitud	Longitud
Q-1	-42.162350°	-72.442144°
Q-2	-42.163693°	-72.424530°
Q-3	-42.162212°	-72.384162°
359	-42.172136°	-72.425955°

- Cahuelmó

*Tabla 59: Coordenadas puntos de terreno Cahuelmó.*

Punto	Latitud	Longitud
C-1	-42.258465°	-72.439343°
C-2	-42.256089°	-72.428154°
C-3	-42.261355°	-72.397175°
C-4	-42.266681°	-72.429020°

### 10.1.2.2 Muestras

- Quintupeu:

Muestra 2Q (Figura 20):

Cuarcita con signos de alteración leve de patina de epidota.



*Figura 54: Muestra 2, Quintupeu*

Muestra 3Q (Figura 20):

Roca holocristalina, inequigranular y fanerítico. Sus granos son de tamaño fino, sus cristales de forma panidiomórfica y estructura masiva.

No presenta morfologías especiales.

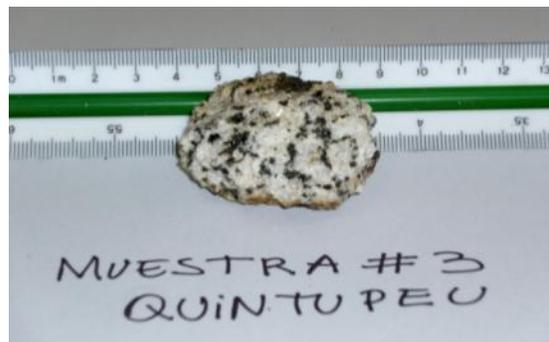
Es de fábrica isótropa y presenta un índice de color leucocrático.

Esta muestra corresponde a una roca moderadamente meteorizada a meteorizada.

Contiene:

- 50% de cuarzo
- 30% de plagioclasas
- 20% de feldespato potásico

Nombre de roca: Granito.



*Figura 55: Muestra 3, Quintupeu*

- Muestra 359 <sup>[13]</sup> (Figura 20):

Roca holocristalina, inequigranular, fanerítica, alotromórfica, con tamaño de grano fino a medio. Presenta una estructura homogénea, fábrica isotrópica, y un índice de color leucocrático.

Contiene:

- 35% de minerales máficos (20% anfíbolos, 15% piroxenos)
- 15% de cuarzo
- 50% de plagioclasas

*Nombre de roca:* Cuarzo Monzodiorita de anfíbolos.



**Figura 56: Muestra 359, Quintupeu.**

- Cahuelmó

Muestra 1C (Figura 20):

Fabrica planar, estructura homogénea y textura lepidoblastica.

Sus minerales:

- Cuarzo de tamaño de grano fino y hábito masivo. El cuarzo presenta una orientación preferencial alineada.
- Biotita de tamaño de grano fino y hábito micaseo.
- Muscovita de grano fino y hábito laminar.

Presenta una foliación de tipo esquistosidad fina.

*Nombre de roca:* Esquisto Micáceo.



*Figura 57: Muestra 1, Cahuelmó.*

Muestra 3C (Figura 20):

Roca holocristalina, equigranular y fanerítica. Posee un tamaño medio de grano y la forma de sus cristales es hipidiomórfica.

Es de estructura homogénea.

No presenta morfologías especiales.

De fábrica isótropa.

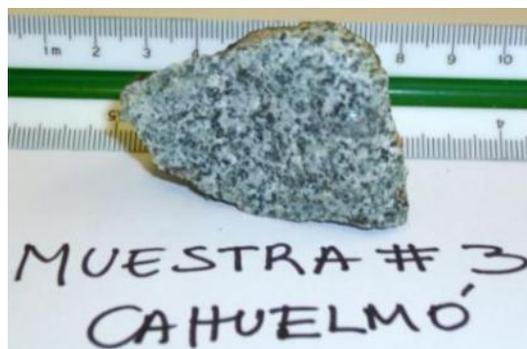
Roca sana.

Su índice de color es mesocrático.

Contiene:

- 10% de feldespato potásico
- 30% de cuarzo
- 60% de plagioclasas

Nombre de roca: Granodiorita.



*Figura 58: Muestra 3, Cahuelmó.*

### 10.1.2.3 Clasificación del Macizo Rocoso

- Quintupeu

**Tabla 60: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Quintupeu**

Punto	Grado de Dureza	Resistencia Aproximada [Mpa]	Grado de Meteorización
Q - 1	R5	100 - 250	I
Q - 2	R5	100 - 250	I
Q - 3	R4	50 - 100	II

**Tabla 61: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Quintupeu**

Punto	GSI	Jv		RQD		Jn	JRC
Q - 1	75 - 60	10	12	82	75,4	3 - 4	16 - 18
Q - 2	50 - 65	7		91,9		3 - 4	10 - 12
Q - 3	60 - 75	12	15	75,4	65,5	4 + 1 aleat	14 - 16

- Cahuelmó

**Tabla 62: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Cahuelmó**

Punto	Grado de Dureza	Resistencia Aproximada [Mpa]	Grado de Meteorización
C - 1	R6	> 250	II
C - 2	R5	100 - 250	II
C - 3	R5	100 - 250	II
C - 4	R5	100 - 250	II

**Tabla 63: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en Cahuelmó**

Punto	GSI	Jv	RQD	Jn	JRC
C - 1	40 - 55	20	49	3	4 - 6
C - 2	50 - 65	10	82	3	4 - 6
C - 3	40 - 55	10	82	3 y 1 aleat	8 - 10
C - 4	40 - 55	12	75,4	4	8 - 10

#### 10.1.2.4 Estructura

- Quintupeu

*Tabla 64: Estructura Quintupeu*

Muestra	Dip	Dip Direction
Q - 2	40	210
	65	20
Q - 3	75	150
	30	210
Punto 359 Náquira	28	20
	23	7
	62	246
	78	96
	47	110
	55	357
	74	87
	60	356
	56	343
	62	252
80	98	

- Cahuelmó

*Tabla 65: Estructura Cahuelmó*

Muestra	Dip	Dip Direction
C - 1	65	220
	45	210
	35	210
	50	195
	55	210
	60	195
	70	215
	89	40
	85	40
	70	45
	89	40
	60	300
	40	315
	75	30
C - 2	20	230
	15	305
	75	15
	15	220
	8	70
	83	85
	75	85
	50	335
	75	30
C - 3	45	215
	20	165
	40	190
	35	200
	40	170
	35	205
	65	255
	60	115
	60	80
C-4	20	230
	75	15
	15	220
	8	70
	83	85
	75	85
	50	385
	75	30

### 10.1.3 Clasificación de obras según flujo vehicular, longitud y equipamiento

*Tabla 66: Equipamiento de seguridad y control en túneles mayores de 200m.*

Equipamiento	A	B	C	Observaciones
Luces de evacuación de emergencia	○	○	●	Luces cada 50 m.
Extintores de incendio	○	●	●	Cada 100 m Tipo C Cada 200 m Tipo B
Teléfono de emergencia	○	○	●	Cada 200 m.
Señales de servicios	○	●	●	En cada servicio.
Marcas en pavimentos				
Ojos de gato	●	●	●	Continuas.
Red de control de incendio	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Vigilancia de TV.	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Iluminación interior	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Equipos eléctricos de emergencia	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Control de altura	●	●	●	200 m antes de portales. Con pista auxiliar para detención fuera de la carretera.
●	Obligatorio			
○	Recomendable			

**Nota:** Los requerimientos relativos a ventilación del túnel serán analizados para cada caso específico según los criterios establecidos en el punto 3.805.3 "Sistemas de Ventilación de Túneles".

## 10.1.4 Censo 2006

Tabla 67: Estudio estadístico de flujo vehicular año 2006

ESTACION DE CONTROL	NOMBRE DEL CAMINO	ROL	CAMINO ASIMILABLE	MUESTRA	AUTOS STATION	CAMIONETAS	CAMIONES SIMPLES DE 2 EJES	CAMIONES SIMPLES MAS DE 2 EJES	SEMI REMOLQUES	REMOLQUES	BUSES TAXIBUSES	TOTAL 24 HORAS	TRANSITO ANTERIOR
10-110-03- 1	CAMINO HACIA LENC		10-109-02-1	V	1,628	1,170	201	102	32	53	507	3,693	2,569
2	DE/A LENCA	7	10-109-02-2	I	900	966	183	36	8	28	513	2,634	1,985
3	LUGAR PTE CHAMIZ		10-109-01-3	P	1,112	1,023	254	28	20	31	526	2,994	2,388
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>3,107</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>39,05</b>	<b>33,89</b>	<b>6,84</b>	<b>1,78</b>	<b>0,64</b>	<b>1,20</b>	<b>16,58</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>15,87</b>
10-121-01- 1	CAMINO LONGITUDIN		MIN	V	166	62	44	5	---	1	16	294	646
2	DE/A CHAITEN	7	MIN	I	28	72	20	8	---	1	9	138	110
3	LUGAR BIF-RIO AMA		MIN	P	206	266	232	24	7	41	20	796	543
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>409</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>32,57</b>	<b>32,57</b>	<b>24,10</b>	<b>3,01</b>	<b>0,57</b>	<b>3,50</b>	<b>3,66</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>-2,82</b>
10-121-02- 1	CAMINO LONGITUDIN		MIN	V	106	40	17	5	---	1	9	178	417
2	DE/A PUERTO CA	7	MIN	I	18	52	16	7	---	---	7	100	88
3	LUGAR BIF-RIO AMA		MIN	P	166	184	145	14	7	41	17	574	289
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>284</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>34,03</b>	<b>32,39</b>	<b>20,89</b>	<b>3,05</b>	<b>0,82</b>	<b>4,92</b>	<b>3,87</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>3,51</b>
10-123-01- 1	CAMINO LONGITUDIN		MIN	V	74	28	5	6	---	---	9	122	140
2	DE/A CHAITEN	7	MIN	I	6	35	14	2	1	---	16	74	66
3	LUGAR BIF.PUERTO		MIN	P	24	55	15	8	1	1	7	111	73
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>102</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>33,87</b>	<b>38,43</b>	<b>11,07</b>	<b>5,21</b>	<b>0,65</b>	<b>0,32</b>	<b>10,42</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>4,72</b>
10-123-02- 1	CAMINO LONGITUDIN		MIN	V	75	35	5	3	---	---	5	123	98
2	DE/A PUYUHUAPI	7	MIN	I	3	28	8	2	1	---	12	54	33
3	LUGAR BIF.PUERTO		MIN	P	13	22	12	3	---	1	2	53	45
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>77</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>39,56</b>	<b>36,95</b>	<b>10,86</b>	<b>3,47</b>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	<b>8,26</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>14,23</b>
10-173-01- 1	CAMINO PTO.MONTT		MIN	V	140	163	58	13	---	3	52	449	383
2	DE/A DIRECTO	7	MIN	I	89	148	58	2	---	---	43	340	321
3	LUGAR A 46 KMS.DE		MIN	P	47	145	32	12	---	1	38	275	394
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>355</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>25,93</b>	<b>44,73</b>	<b>13,90</b>	<b>2,53</b>	<b>---</b>	<b>0,37</b>	<b>12,50</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>-1,52</b>
10-181-01- 1	CAMINO CALETA GOI		MIN	V	187	145	70	5	---	3	9	419	1,498
2	DE/A CALETA GOI	7	MIN	I	64	91	35	7	8	---	3	208	61
3	LUGAR BIF.A SANTA		MIN	P	16	21	3	2	---	---	6	48	46
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>225</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>39,55</b>	<b>38,07</b>	<b>16,00</b>	<b>2,07</b>	<b>1,18</b>	<b>0,44</b>	<b>2,66</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>-35,16</b>
10-181-03- 1	CAMINO CALETA GOI		MIN	V	154	58	13	---	---	---	---	225	1,155
2	DE/A SANTA BARI	7	MIN	I	32	35	---	---	---	---	---	67	44
3	LUGAR BIF.A SANTA		MIN	P	6	6	---	---	---	---	---	12	17
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>101</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>63,15</b>	<b>32,56</b>	<b>4,27</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>-50,08</b>
10-190-01- 1	CAMINO CONTAO-HO		MIN	V	114	131	54	23	6	2	68	398	288
2	DE/A PTO.MONTT	RUTA 7	MIN	I	79	93	49	14	---	---	25	260	403
3	LUGAR BIF.LA POZA		MIN	P	170	174	74	20	6	---	26	470	435
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>376</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>32,18</b>	<b>35,28</b>	<b>15,69</b>	<b>5,05</b>	<b>1,06</b>	<b>0,17</b>	<b>10,54</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>0,12</b>
10-190-02- 1	CAMINO CONTAO-HO		MIN	V	10	20	17	8	---	---	6	61	153
2	DE/A LA POZA	RUTA 7	MIN	I	52	51	16	2	---	---	6	127	159
3	LUGAR BIF.LA POZA		MIN	P	92	78	35	3	---	---	9	217	118
<b>TRANSITO MEDIO DIARIO ANUAL</b>		<b>135</b>	<b>DISTRIBUCION PORCENT</b>		<b>38,02</b>	<b>36,79</b>	<b>16,79</b>	<b>3,20</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>5,18</b>	<b>TASA CRECI</b>	<b>-2,85</b>

## 10.2 Planos