

4. Mecánica de Suelos

4.1 Antecedentes Generales

4.1.1 Alcances y Objetivos

El presente informe corresponde al diagnóstico geotécnico de las oquedades del puerto de Arica.

Se hace necesario examinar los posibles problemas relacionados con la geotecnia que existe en ese lugar debido a las oquedades que se han presentado en el sector norte del puerto.

Se compararán los resultados de la geotecnia con los análisis geofísicos de tomografía eléctrica y REMI realizados también en la zona afectada.

Como en la explanada existe un tránsito importante de camiones se hace muy necesario examinar los posibles problemas que causaron estas oquedades, para poder mitigar una futura generación de estas anomalías en el lugar.

Este estudio se basa en los sondajes realizados en octubre del 2012 desarrollados por Asistecsa Ltda. Para la elaboración de este informe se consideró la información de los resultados de tomografía eléctrica y REMI adjuntados en el informe N°1 ya entregado

4.1.2 Ubicación de Sondajes

El área de estudio se encuentra en la explanada del patio de camiones hasta el sector acceso sitio 7. En el recinto se ejecutaron dos sondajes terrestres, ubicado en el patio de los camiones y en el acceso al sitio 7 respectivamente. En el Anexo D, se adjunta planta con la ubicación de los sondajes.

Figura 4-1 Imagen satelital ubicación sondajes





4.1.3 Antecedentes Geológicos

El puerto de Arica se caracteriza por presentar conglomerados de arenisca, limolitas y arcillolitas, generalmente consolidados, de fases principalmente aluviales, subordinadamente lacustres y eólicas de Edad Cenozoica de la Cordillera de la Costa, también con brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional.

4.1.4 Normativa de aplicación y bibliografía

Las actividades a realizar estarán sujetas a las especificaciones de la normativa en vigor y que es conocida y experimentada por el personal técnico y del laboratorio:

- Manual de Carreteras - Volumen N°3 - “Instrucciones y Criterios de Diseño” de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- Manual de Carreteras – Volumen N°5 - “Especificaciones técnicas generales de construcción”
- Braja M. Dass, Principio de Ingeniería de Cimentaciones, Quinta Edición.
- Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan. Ministry of Transports. Tokio, 1979.
- Rutlland Dujisin, Mecánica de suelos en la ingeniería vial, Santiago 1974.
- Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report From the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil. T.L. Youd and I.M. Idriss. ASCE.
- Normativa nacional e internacional para procedimiento de ensayos:
 - Series de normas LNV
 - Series de normas NCh
 - Series de normas AASHTO, ASTM.

4.2 Campaña de Exploraciones y Estudio Geotécnico

4.2.1 Prospecciones de suelos con ensayos de campo

Se ejecutaron 2 prospecciones en el puerto de Arica realizadas en octubre del 2012, la primera exploración ST-1, cuenta con un sondaje de 15.15 m de profundidad y se realizó en la explanada del patio de camiones y la segunda prospección ST-2, cuenta con un sondaje de 15.45 m de profundidad y se realizó en el sector de acceso al sitio 7. En ambos sondajes se realizaron ensayos de clasificación de suelos al material extraído.

Con estos datos del suelo fue posible realizar una caracterización de los parámetros de resistencia del subsuelo del sector en análisis. Se adjunta en el Anexo D el informe con el resultado de los ensayos geotécnicos ejecutados.

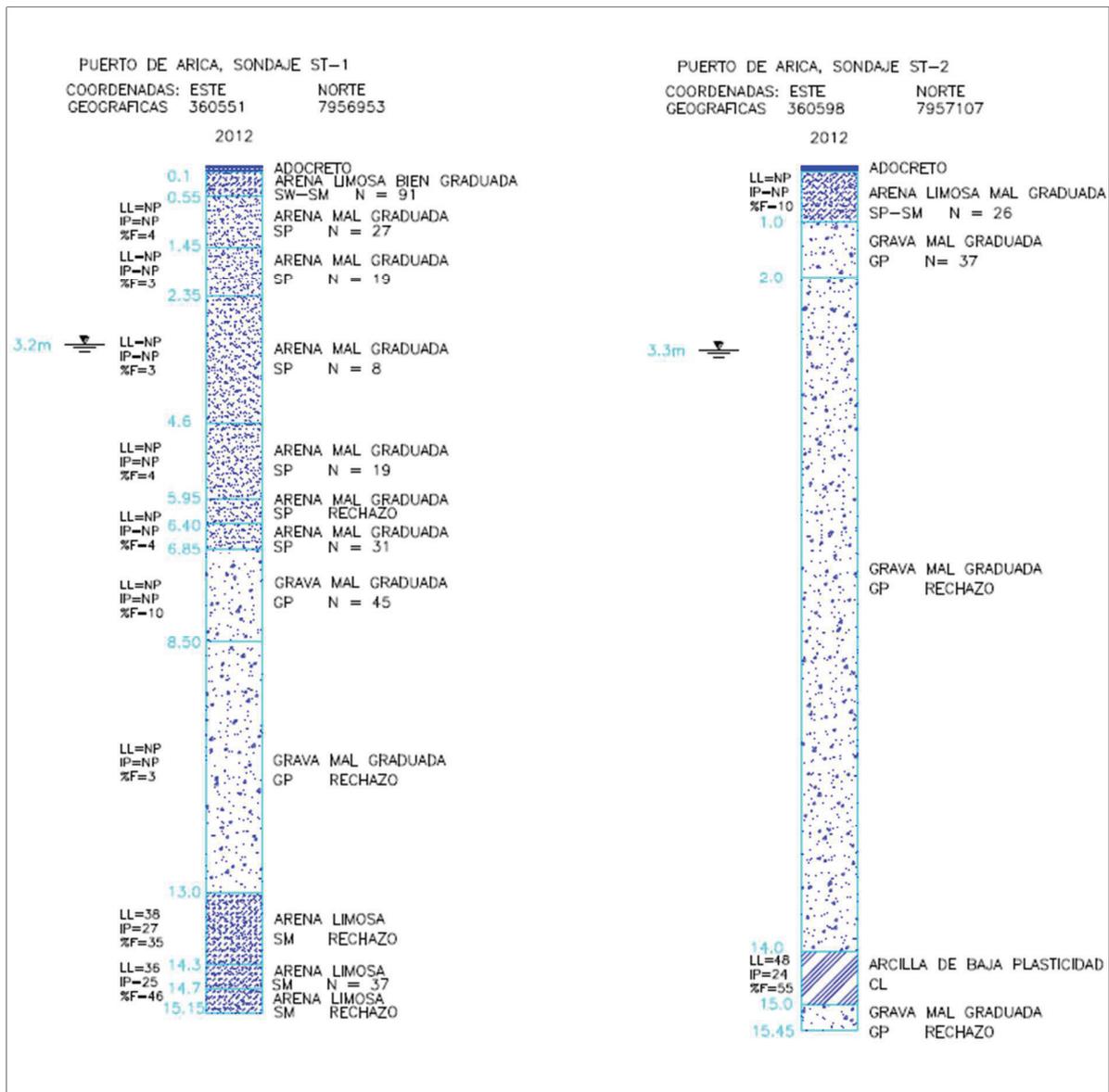


4.2.2 Antecedentes del Suelo en Estudio

Sondaje ST-1: en él se encuentran arenas mal graduadas de baja compacidad hasta los 6.5 m de profundidad, luego hasta los 13 m aparecen gravas y bolones con índice de golpes N_{spt} de rechazo y bajo este material aparecen arenas limosas de compacidad firme a muy densa.

Sondaje ST-2: en el primer metro el sondaje acusa una arena limosa mal graduada de compacidad firme, bajo este suelo aparecen gravas mal graduadas en su mayoría con índice N_{spt} de rechazo, a continuación en la figura 2 se muestra la estratigrafía encontrada en el lugar.

Figura 4-2 Perfil estratigráfico de terreno





En la estratigrafía de los sondajes se indica que el nivel de agua al interior del sondaje ST-1 se encuentra a una profundidad de 3.2 m y en el ST-2 esta se ubica a los 3.3 m, pero para un análisis de licuefacción se considerara una napa freática a 2 m de profundidad adoptada como una situación desfavorable.

4.3 Análisis Licuefacción

Se analiza la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la fundación de la estructura de pavimento del puerto de Arica, para ello se utilizaran los métodos simplificado y el de la norma Japonesa.

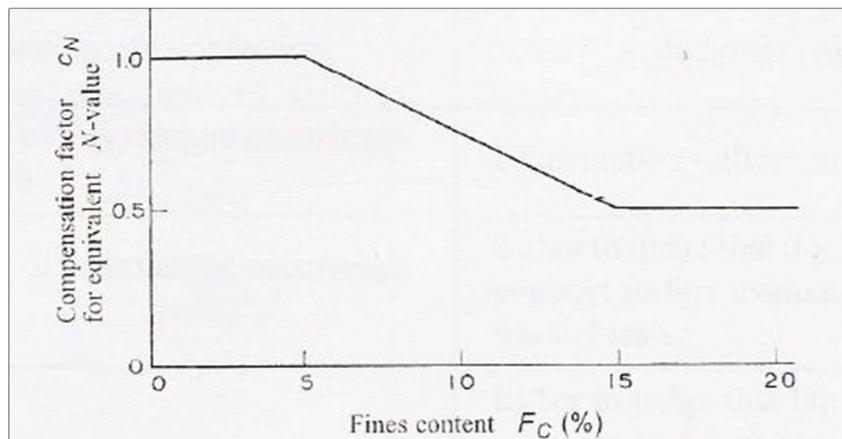
4.3.1 Análisis de Licuefacción Mediante el Método Simplificado

Este análisis se basa en la comparación de la razón de esfuerzo cíclico resistente (CRR) y la razón de esfuerzo cíclico solicitante (CSR), el primero en función del número de golpes y el segundo en función del esfuerzo efectivo vertical y la aceleración máxima.

4.3.2 Análisis de Licuefacción con Método de la Norma Japonesa.

Este análisis considera un factor CN que es un factor de compensación por contenido de finos. Se obtiene del siguiente gráfico mostrado en la Figura 4-3.

Figura 4-3 Gráfico CN v/s FC



En las siguientes tablas, se muestran los análisis de licuación mediante los dos métodos antes mencionados, en la cual se consideró una napa freática máxima a los 2 m de profundidad



Tabla 4-1 Análisis de licuación mediante método simplificado para el sondaje ST-1

Cotas [m]		Puerto de Arica, Sondaje ST-1						
Inicial	Final	Clasificación	N _{med}	(N ₁) ₆₀	CSR	CRR	CRR/CSR·0.84	Condición
0.00	0.10	ADOCRETO	120	180	-	-	-	No Licuable
0.10	0.55	SW-SM	59	91	-	-	-	No Licuable
0.55	1.00	SP	20	30	-	-	-	No Licuable
1.00	1.45	SP	16	24	-	-	-	No Licuable
1.45	1.90	SP	11	17	-	-	-	No Licuable
1.90	2.35	SP	12	18	0.256	0.19	0.630	Potencialmente licuable
2.35	2.80	SP	4	6	0.303	0.08	0.221	Potencialmente licuable
2.80	3.25	SP	5	8	0.327	0.09	0.235	Potencialmente licuable
3.25	3.70	SP	7	11	0.348	0.12	0.284	Potencialmente licuable
3.70	4.15	SP	2	3	0.366	0.06	0.133	Potencialmente licuable
4.15	4.60	SP	7	10	0.381	0.11	0.251	Potencialmente licuable
4.60	5.05	SP	10	14	0.393	0.15	0.321	Potencialmente licuable
5.05	5.50	SP	17	23	0.404	0.26	0.545	Potencialmente licuable
5.50	5.95	SP	15	20	0.412	0.21	0.436	Potencialmente licuable
5.95	6.40	SP	120	155	-	-	-	No Licuable
6.40	6.85	SP	25	31	-	-	-	No Licuable
6.85	7.50	GP	120	143	-	-	-	No Licuable
7.50	8.00	GP	120	135	-	-	-	No Licuable
8.00	8.50	GP	120	128	-	-	-	No Licuable
8.50	9.10	GP	120	123	-	-	-	No Licuable
9.10	10.00	GP	120	118	-	-	-	No Licuable
10.00	11.00	GP	120	112	-	-	-	No Licuable
11.00	12.00	GP	120	106	-	-	-	No Licuable
12.00	13.00	GP	120	101	-	-	-	No Licuable
13.00	13.20	SM	120	112	-	-	-	No Licuable
13.20	13.67	SM	120	120	-	-	-	No Licuable
13.67	14.27	SM	120	116	-	-	-	No Licuable
14.27	14.72	SM	34	36	-	-	-	No Licuable
14.72	15.05	SM	120	112	-	-	-	No Licuable
15.05	15.15	SM	120	88	-	-	-	No Licuable



Tabla 4-2 Análisis de licuación mediante método simplificado para el sondaje ST-2

Cotas [m]		Puerto de Arica, Sondaje ST-2						
Inicial	Final	Clasificación	N _{med}	(N ₁) ₆₀	CSR	CRR	CRR/CSR-0.84	Condición
0.00	0.10	ADOCRETO	-	-	-	-	-	No Licuable
0.10	0.55	SP-SM	16	25	-	-	-	No Licuable
0.55	1.00	SP-SM	18	27	-	-	-	No Licuable
1.00	1.45	GP	19	29	-	-	-	No Licuable
1.45	2.00	GP	30	45	-	-	-	No Licuable
2.00	2.50	GP	120	180	-	-	-	No Licuable
2.50	3.29	GP	120	175	-	-	-	No Licuable
3.29	4.00	GP	120	164	-	-	-	No Licuable
4.00	4.85	GP	120	154	-	-	-	No Licuable
4.85	5.50	GP	120	145	-	-	-	No Licuable
5.50	6.10	GP	120	139	-	-	-	No Licuable
6.10	6.75	GP	120	133	-	-	-	No Licuable
6.75	7.13	GP	120	120	-	-	-	No Licuable
7.13	7.83	GP	120	120	-	-	-	No Licuable
7.83	8.53	GP	120	118	-	-	-	No Licuable
8.53	9.23	GP	120	114	-	-	-	No Licuable
9.23	10.00	GP	120	109	-	-	-	No Licuable
10.00	10.93	GP	120	104	-	-	-	No Licuable
10.93	11.53	GP	120	100	-	-	-	No Licuable
11.53	12.26	GP	120	97	-	-	-	No Licuable
12.26	13.00	GP	120	93	-	-	-	No Licuable
13.00	14.05	GP	120	120	-	-	-	No Licuable
14.05	15.00	CL	50	48	-	-	-	No Licuable
15.00	15.45	GP	34	24	-	-	-	No Licuable



Tabla 4-3 Análisis de licuación mediante método N. Japonesa para el sondaje ST-1

Cotas		Clasf.	Puerto de Arica, Sondaje ST-1						
Inicial	Final	USCS	N _{med}	% Finos	(N) ₆₅	N _{value}	Clasf. Final	Comentario	
0,00	0,10	ADOCRETO	120	0	164	(N)65/CN = 164	Tipo IV	No ocurrira licuación	
0,10	0,55	SW-SM	59	9	79	(N)65/CN = 99	Tipo IV	No ocurrira licuación	
0,55	1,00	SP	20	4	27	(N)65/CN = 27	Tipo IV	No ocurrira licuación	
1,00	1,45	SP	16	2	21	(N)65/CN = 21	Tipo III	No ocurrira licuación	
1,45	1,90	SP	11	3	14	(N)65/CN = 14	Tipo II	No ocurrira licuación	
1,90	2,35	SP	12	2	14	(N)65/CN = 14	Tipo II	Posibilidad de licuacion	
2,35	2,80	SP	4	3	5	(N)65/CN = 5	Tipo I	Ocurrira licuación	
2,80	3,25	SP	5	2	6	(N)65/CN = 6	Tipo I	Ocurrira licuación	
3,25	3,70	SP	7	3	8	(N)65/CN = 8	Tipo I	Ocurrira licuación	
3,70	4,15	SP	2	3	3	(N)65/CN = 3	Tipo I	Ocurrira licuación	
4,15	4,60	SP	7	4	8	(N)65/CN = 8	Tipo I	Ocurrira licuación	
4,60	5,05	SP	10	5	11	(N)65/CN = 11	Tipo I	Ocurrira licuación	
5,05	5,50	SP	17	6	18	(N)65/CN = 19	Tipo III	Posibilidad de licuacion baja	
5,50	5,95	SP	15	4	16	(N)65/CN = 16	Tipo II	Posibilidad de licuacion	
5,95	6,40	SP	120	5	122	(N)65/CN = 122	Tipo IV	No ocurrira licuación	
6,40	6,85	SP	25	4	25	(N)65/CN = 25	Tipo III	Posibilidad de licuacion baja	
6,85	7,50	GP	120	2	116	(N)65/CN = 116	Tipo IV	No ocurrira licuación	
7,50	8,00	GP	120	4	112	(N)65/CN = 112	Tipo IV	No ocurrira licuación	
8,00	8,50	GP	120	2	109	(N)65/CN = 109	Tipo IV	No ocurrira licuación	
8,50	9,10	GP	120	3	106	(N)65/CN = 106	Tipo IV	No ocurrira licuación	
9,10	10,00	GP	120	3	103	(N)65/CN = 103	Tipo IV	No ocurrira licuación	
10,00	11,00	GP	120	4	100	(N)65/CN = 100	Tipo IV	No ocurrira licuación	
11,00	12,00	GP	120	3	96	(N)65/CN = 96	Tipo IV	No ocurrira licuación	
12,00	13,00	GP	120	2	93	(N)65/CN = 93	Tipo IV	No ocurrira licuación	
13,00	13,20	SM	120	23	91	(N)65+ΔN = 105	Tipo IV	No ocurrira licuación	
13,20	13,67	SM	120	48	90	(N)65+ΔN = 104	Tipo IV	No ocurrira licuación	
13,67	14,27	SM	120	48	88	(N)65+ΔN = 102	Tipo IV	No ocurrira licuación	
14,27	14,72	SM	34	46	24	(N)65+ΔN = 38	Tipo IV	No ocurrira licuación	
14,72	15,05	SM	120	46	85	(N)65+ΔN = 100	Tipo IV	No ocurrira licuación	
15,05	15,15	SM	120	46	84	(N)65+ΔN = 99	Tipo IV	No ocurrira licuación	



Tabla 4-4 Análisis de licuación mediante método N. Japonesa para el sondaje ST-2

Cotas		Clasf.	Puerto de Arica, Sondaje ST-2					
Inicial	Final	USCS	N _{med}	% Finos	(N) ₆₅	N _{value}	Clasf. Final	Comentario
0.00	0.10	ADOCRETO	120	0	164	(N)65/CN = 164	Tipo IV	No ocurrira licuación
0.10	0.55	SP-SM	16	10	23	(N)65/CN = 30	Tipo IV	No ocurrira licuación
0.55	1.00	SP-SM	18	4	24	(N)65/CN = 24	Tipo IV	No ocurrira licuación
1.00	1.45	GP	19	2	24	(N)65/CN = 24	Tipo IV	No ocurrira licuación
1.45	2.00	GP	30	3	36	(N)65/CN = 36	Tipo IV	No ocurrira licuación
2.00	2.50	GP	120	4	140	(N)65/CN = 140	Tipo IV	No ocurrira licuación
2.50	3.29	GP	120	2	137	(N)65/CN = 137	Tipo IV	No ocurrira licuación
3.29	4.00	GP	120	2	132	(N)65/CN = 132	Tipo IV	No ocurrira licuación
4.00	4.85	GP	120	5	127	(N)65/CN = 127	Tipo IV	No ocurrira licuación
4.85	5.50	GP	120	3	123	(N)65/CN = 123	Tipo IV	No ocurrira licuación
5.50	6.10	GP	120	4	119	(N)65/CN = 119	Tipo IV	No ocurrira licuación
6.10	6.75	GP	120	3	116	(N)65/CN = 116	Tipo IV	No ocurrira licuación
6.75	7.13	GP	120	2	113	(N)65/CN = 113	Tipo IV	No ocurrira licuación
7.13	7.83	GP	120	1	111	(N)65/CN = 111	Tipo IV	No ocurrira licuación
7.83	8.53	GP	120	2	108	(N)65/CN = 108	Tipo IV	No ocurrira licuación
8.53	9.23	GP	120	3	105	(N)65/CN = 105	Tipo IV	No ocurrira licuación
9.23	10.00	GP	120	2	102	(N)65/CN = 102	Tipo IV	No ocurrira licuación
10.00	10.93	GP	120	3	99	(N)65/CN = 99	Tipo IV	No ocurrira licuación
10.93	11.53	GP	120	1	96	(N)65/CN = 96	Tipo IV	No ocurrira licuación
11.53	12.26	GP	120	2	94	(N)65/CN = 94	Tipo IV	No ocurrira licuación
12.26	13.00	GP	120	2	91	(N)65/CN = 91	Tipo IV	No ocurrira licuación
13.00	14.05	GP	120	3	88	(N)65/CN = 88	Tipo IV	No ocurrira licuación
14.05	15.00	CL	50	55	35	(N)65/CN = 70	Tipo IV	No ocurrira licuación
15.00	15.45	GP	34	2	23	(N)65/CN = 23	Tipo IV	No ocurrira licuación

4.3.3 Resumen de Licuación

Mediante el método simplificado y el método japonés se aprecia un potencial de licuación desde el comienzo de la napa freática considerada (condición desfavorable a 2 m, como se dijo anteriormente) hasta aproximadamente unos 6 m de profundidad para el sondaje ST-1 realizado en la explanada del patio de camiones, por lo cual se considera el fenómeno de licuación para los primeros 6 m de profundidad después de la napa freática, mientras que para el sondaje ST-2 realizado en el acceso al sitio 7 no se observó presencia del fenómeno de licuación por ninguno de los dos métodos, dado que solo en ese sector se encontró bolones y gravas.

4.4 Estudio Geofísico de Oquedades

4.4.1 Tomografía Eléctrica

El estudio de tomografía eléctrica nos sirve para conocer o detectar huecos bajo caminos o edificios. Para el puerto de Arica se realizaron ensayos de tomografía eléctrica que cubrieron la totalidad de la explanada del estacionamiento de camiones, así como la conexión de esta con el acceso al sitio 7 ubicada más al norte junto con la explanada de accesos al ya mencionado sitio.



En este estudio se encontraron anomalías de baja resistividad, asociadas a saturación u oquedades rellenas de material saturado que eventualmente podrían provocar hundimiento, donde las más importantes se detectaron en la mitad sureste de los perfiles P1 y P2 del sector acceso sitio 7, en el centro de los perfiles P17 y en la mitad de los perfiles P19 al P21 del patio de camiones. También se encontraron Zonas de baja resistividad, asociadas a saturación del terreno por filtraciones de cañerías, y se detectaron al sureste de los perfiles P1 y P4 en el sector de acceso sitio 7 y entre los 39 y 42 m de los perfiles P20 y P31 en el sector explanada del patio de camiones. Por último se detectaron anomalías de alta resistividad asociadas a zonas o núcleos de alta resistividad que se manifiestan a poca profundidad de la superficie, es decir al interior del material de base del pavimento superficial y pueden estar asociadas a materiales muy compactos u oquedades vacías o rellenas con material de alta resistividad como gravas grandes, piedras y bolones con índice de huecos alto.

Las anomalías de alta resistividad más importantes se detectan en la mitad sureste del perfil P1 y al centro del perfil P2 en el sector Acceso Sitio 7, en el extremo sureste de los perfiles P14 y P15 y en el centro del perfil P18 del sector Patio de Camiones. Es importante destacar que dos de estas anomalías del perfil P18 se corresponden con los hundimientos H1 y H2 que se encontraban reparados al momento de realizar estos estudios geofísicos.

4.4.2 Microtemores

El método sísmico de microtemores (REMI) forma parte de los métodos pasivos unidimensionales que utilizan ondas superficiales, y consiste básicamente en determinar la distribución de los valores de velocidad de propagación de las ondas sísmicas de corte u onda S bajo el subsuelo, a partir del análisis espectral de los ruidos sísmicos del ambiente provenientes del tráfico, máquinas, fábricas, oleaje oceánico, etc., y en general todo tipo de vibraciones de distintas frecuencias, a las que se les denomina microtemores. Finalmente se calcula un parámetro que representa a la velocidad promedio de las ondas de corte para los primeros 15 o 30 m de profundidad, en el que de acuerdo a las nuevas normativas, se obtiene de la siguiente expresión ponderada:

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n d_i / V_{si}}$$

Donde n corresponde al número de estratos, d_i es el espesor del estrato, V_{si} es la velocidad de la onda sísmica de corte en el estrato i.

En el sector explanada patio de camiones, en el extremo noreste del perfil P17 se encontraron velocidades promedio ponderadas de ondas sísmicas de corte, VS_{30} de 410 m/s para los primeros 30 m del subsuelo, pero en los primeros 6 m se observaron leves variaciones de velocidad de onda que van entre los 240 m/s y 250 m/s, asociados a arenas sueltas mal compactadas, ya en los próximos metros de profundidad comienza un aumento paulatino de la velocidad asociado a aumentos en la rigidez.

En el sector acceso sitio 7, se obtuvo un valor promedio ponderado de ondas sísmicas de corte, VS_{30} de 430 m/s para los primeros 30 m del subsuelo. En los primeros 6 m se observaron muy leves variaciones de



velocidad de onda que van entre 230 y 280 m/s, posiblemente asociado a arenas sueltas, ya en los próximos metros de profundidad comienza un aumento de rigidez asociado a una calidad geomecánica regular a buena.

Se adjunta en el Anexo C el informe completo del estudio Geofísico desarrollado.

4.5 Comparación de Análisis Geofísico y Geotécnico

Como comparación entre los ensayos geotécnicos y geofísicos podemos decir que son bastante coincidentes, ya que para el análisis de licuefacción realizado en la explanada del patio de camiones con el ensayo SPT se obtuvieron índices de penetración bastante bajos en los primeros 6 m, con suelos potencialmente licuables. El análisis geotécnico para el sector del patio de camiones es coincidente con los análisis de ondas de corte, que confirma que en este sector se produjeron velocidades de ondas de corte asociadas a arenas sueltas mal compactadas, y coincidente también al análisis de tomografía eléctrica, que nos dice que existen anomalías de baja resistividad y zonas de baja resistividad.

El análisis geotécnico para el sector acceso sitio 7 presentó suelos que no son licuables y con índices de penetración bastante altos, al tratarse de bolones y gravas, lo que coincide con algunas anomalías de alta resistividad de tomografía eléctrica ubicadas en la mitad sureste del perfil P1 y al centro del perfil P2.

El análisis de tomografía eléctrica y REMI también son coincidentes en el perfil P1 del sector noreste del acceso al sitio 7, ya que se presentan anomalías de baja resistividad y zonas de baja resistividad que coinciden con velocidades de ondas de corte bajas asociadas a arenas sueltas mal compactadas en los primeros 6 m de profundidad.

Por lo tanto los análisis de geotecnia y geofísica son coincidentes para dar diferentes tipos de soluciones.