

ANEXO VII. ESTUDIO GEOTECNICO DE SUELO

CONCURSO DE ARQUITECTURA 2024 | MUSEO DE RAPA NUI



COLEGIO DE
ARQUITECTOS DE CHILE





ESTUDIO MECÁNICA DE SUELOS

MUSEO VAITEA RAPA NUI

Concepción, 7 de noviembre del 22



ESTUDIO MECÁNICA DE SUELOS

MUSEO VAITEA RAPA NUI

Concepción, 7 de noviembre del 22

Revisiones

C	07.11.22	Masgeotecnia	MPF	MPF
A	15.09.22	Masgeotecnia	MPF	MPF
Rev	Fecha	Masgeotecnia / Mandante	Revisó	Aprobó



Tabla de contenidos

1.	Introducción	6
2.	Estudios previos	6
3.	Antecedentes geológicos	7
4.	Prospecciones en terreno	9
4.1	Calicatas	9
4.2	Ensayos DCP	14
5.	Ensayos de Laboratorio	19
5.1	Granulometría	19
5.2	Humedad Natural	20
5.3	Densidad de las partículas sólidas	20
5.4	Límites de Atterberg	20
5.5	Proctor Modificado	21
5.6	Clasificación de Suelos	21
5.7	Compresión no confinada en roca	22
6.	Estudio Geofísico	24
6.1	Descripción de los equipos y software utilizados	24
6.2	Obtención del perfil de velocidad de ondas de corte	24
6.3	Curva de dispersión	25
6.4	Perfil stratigráfico y de velocidades de ondas de corte	27
7.	Modelo stratigráfico y parámetros de diseño	30
7.1	Modelo stratigráfico y parámetros de diseño	30
7.2	Capacidad de Soporte	31
7.3	Asentamientos elásticos admisibles	32
7.4	Clasificación sísmica del subsuelo	33
7.5	Sellos de excavación y de fundación	34
7.6	Fundación	34
8.	Especificaciones y recomendaciones	34
8.1	Mejoramiento de suelos	34
8.2	Especificaciones para Excavaciones y Fundaciones	35
8.3	Especificaciones para estructuras de retención	36
8.4	Especificaciones para escarpe, radieres y material de rellenos	36



8.5	Especificaciones generales	37
9.	Observaciones finales	37
10.	Bibliografía	38



1. Introducción

El terreno en estudio se encuentra ubicado en la comuna de Isla de Pascua, Región de Valparaíso, en la localidad de Vaitea en el centro de la isla.

La Figura 1 muestra la ubicación del sector donde se realizan mediciones mediante fuente activa y pasiva y geófonos verticales.

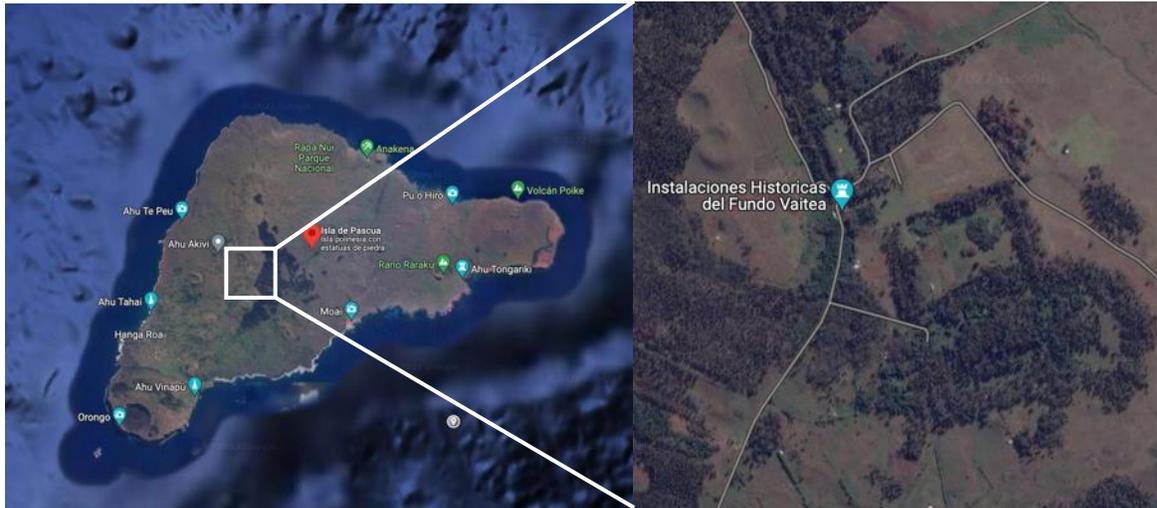


Figura 1. Ubicación del terreno en estudio.

2. Estudios previos

En abril del 16 (Acevedo, J., 2016) se ejecuta un estudio de Mecánica de suelos en Fundo Vaitea que consta de 5 prospecciones del tipo calicatas de hasta 1,3 m de profundidad desde las cuales se obtuvieron muestras de suelo y dos perfiles sísmicos para la medición de velocidades de ondas de corte y clasificación sísmica.

El perfil estratigráfico obtenido de dicho estudio da cuenta de dos estratos bien definidos:

- El primer estrato compuesto principalmente de limos plásticos heterogéneos, de humedad alta y compacidad variable. También se observa de forma aislada la presencia de arena, roca en descomposición y bolones aislados.
- Un segundo estrato que corresponde un depósito de roca volcánica muy porosa de baja densidad y baja dureza, fácil de excavar en superficie, por encontrarse en descomposición, color gris amarillento con abundantes oxidaciones y muy fracturada.

El espesor del primer estrato es variable pero no supera los 1,2 m. Tampoco se detecta nivel freático dentro de la profundidad explorada.

El estudio geofísico permite identificar unidades geotécnicas más profundas identificando 3 velocidades claramente definidas:

- La primera con velocidades de entre 175 m/s y 213 m/s y un espesor de entre 3 m y 4 m
- La segunda con velocidades de entre 457 m/s y 524 m/s y un espesor de entre 7 m y 10 m



- La tercera con velocidades de entre 768 m/s y 1.238 m/s y un espesor menor a los 30 m

El informe también presenta los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorio y que permiten definir tensiones admisibles de 1,2 kg/cm² para solicitaciones estáticas y de 1,5 kg/cm² para solicitaciones sísmicas.

Además, se clasifica sísmicamente el terreno de acuerdo con el D.S. 61 obteniendo un Suelo tipo E y zona sísmica 3.

El estudio recomienda fundar sobre la roca volcánica penetrando a lo menos 0,2 m en ella.

3. Antecedentes geológicos

La isla de Pascua está formada por tres centros eruptivos, cuyas edades fluctúan entre el Plioceno Superior (~3 Ma) y el Pleistoceno Medio (160 a 320 Ma) (Gonzalez et al, 1974). La evolución de estos centros ha determinado la actual configuración de la isla, mediante la génesis de distintas formas, algunas de ellas descritas por González (1995).

La Isla de Pascua, está bordeada por acantilados activos, cuyas alturas varían desde 200 m. Característica es la verticalidad de sus paredes, en muchas de las que se observan cuevas producidas por lavas tubo, como Ana O Keke en el acantilado norte del estratovolcán Poike. El acantilado que rodea al estratovolcán Poike tiene alturas que varían desde los 80 m en el sector de Hanga Nui hasta los 180 m en el sector de la fisura de los domos extrusivos.

Por su parte, en la vertiente sur del Rano Kao se encuentra la mayor altura entre los acantilados activos, llegando a los 290 m. Los valores mínimos son inferiores a 10 m en el sector de Mataverí Otai y Vinapu. La presencia de acantilados en toda la isla se asocia a la friabilidad del material volcánico frente a la acción marina, acción que va reduciendo paulatinamente la superficie, como es el caso de Poike y Rano Kao, los que al proyectar la curvatura de sus conos se obtiene una superficie mayor a la actual, lo que no deja de ser relevante al considerar a la isla como un sistema cerrado.

Según Araya, J. (2004), la acción volcánica modela la isla a través de coladas de lava emitidas de los diferentes cráteres, y varían su composición derivando en dermolíticas o pahoehoe y clastolíticas o aa. Las coladas de lava se diferencian entre dermolíticas, clastolíticas e indeterminadas. Las coladas dermolíticas o pahoehoe están presentes en gran parte de la superficie de la isla, sobre todo en el escudo volcánico, de preferencia en el sector centro-norte y en algunos sectores de la costa sur, entre el Maunga Orito y Hanga Te'e, al occidente del sector de Akahanga, desde el centro de la isla y hasta Maunga Anamarama y Anakena por el oriente. Este flujo se asocia a la baja pendiente y menor rugosidad, es decir, a menor rugosidad mayor flujo en forma laminar. Este tipo de colada se presenta en forma de cordón, por lo que también se le conoce como cordada. Por su parte, las coladas de lava clastolíticas o aa provienen de los centros eruptivos Maunga Koe Koe, Maunga Te Kahurea en el sector sur de la isla y Maunga Vaka Kipu, y la fisura de Hiva Hiva en el sector occidental, al norte de Hanga Roa. Se asocia este tipo de flujo a coladas recientes, como es el caso de Hiva Hiva.

Además, Araya, J. (2004), menciona la existencia de conos tipo cinerita que se encuentran constituidos principalmente por lapilli, escorias y bombas de colores negros y rojos, algunos de estos conos tienen forma de herradura, esta característica se debe al escurrimiento y derramamiento de escorias. Muchos de



4. Prospecciones en terreno

Se ejecutan 11 prospecciones que corresponden a 4 calicatas y 7 ensayos DCP (Dinamic Cone Penetrometer). Además, se realizan 2 tendidos geofísicos.

La ubicación de las prospecciones se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Ubicación de las prospecciones en terreno

4.1 Calicatas

Se ejecutan 4 calicatas en terreno de similares características geotécnicas. A continuación, se muestran imágenes y se describe su estratigrafía.





Figura 4. Perfil estratigráfico de la calicata 1

E0: Estrato vegetal de 5 cm de espesor

E1: Se observan limos arenas color café y abundantes raicillas con presencia de gravas aisladas. Humedad baja a media y compactidad baja. Espesor: 40 cm

E2: Roca volcánica meteorizada color amarillo y gris en superficie e imposible de excavar a pocos cm de profundidad. Espesor indefinido.





Figura 5. Perfil estratigráfico de la calicata 2

E0: Estrato vegetal de 5 cm de espesor

E1: Se observan limos arenas color rojizo y raicillas en superficie y presencia de gravas aisladas. Humedad media y compacidad baja. Espesor: 50 cm

E2: Roca volcánica meteorizada color negro y gris en fácil de excavar en superficie e imposible de excavar a los 20 cm de profundidad. Espesor indefinido.





Figura 6. Perfil estratigráfico de la calicata 3

E0: Estrato vegetal de 5 cm de espesor

E1: Se observan limos arenas color café y abundantes raicillas con presencia de gravas aisladas. Humedad baja a media y compacidad baja. Se observan también algunas raíces de mayor tamaño por la cercanía de eucaliptos en el sector. Espesor: 60 cm

E2: Roca volcánica meteorizada color amarillo y gris en superficie e imposible de excavar a pocos cm de profundidad. Espesor indefinido.





Figura 7. Perfil estratigráfico de la calicata 5

E0: Estrato vegetal de 5 cm de espesor

E1: Se observan limos arenas color café claro y gris y abundantes raicillas con presencia de una capa de gravas en matriz de limo color café claro. Humedad baja y compacidad baja. Espesor: 85 cm.

E2: Roca volcánica meteorizada color gris en superficie e imposible de excavar a pocos cm de profundidad. Espesor indefinido.



4.2 Ensayos DCP

El ensayo DCP permite caracterizar tanto suelos inalterados como materiales compactados y esto de manera simple y rápida. Permite esencialmente estimar un valor de CBR in situ y además permite detectar el grado de heterogeneidad de un estrato, la uniformidad de compactación del material, cuando se trata de un relleno, entre muchos otros beneficios como detectar cavidades y socavaciones.

El instrumento utilizado consiste básicamente en un cono de 60° y 20 mm de diámetro que se introduce en el suelo al ser golpeado por una masa de 8 kg que cae libremente de 575 mm de altura (Figura 8).

Se ejecutan 7 ensayos DCP en terreno (Figuras 8 a 14). La ubicación de los ensayos se muestra en la Figura 3. Las profundidades máximas alcanzadas varían según el ensayo.



Figura 8. Ensayo DCP 1





Figura 9. Ensayo DCP 2



Figura 10. Ensayo DCP 3





Figura 11. Ensayo DCP 5



Figura 12. Ensayo DCP 9





Figura 13. Ensayo DCP 11



Figura 14. Ensayo DCP 12



La curva DCP es la representación gráfica de la penetración acumulada del equipo respecto del número de golpes acumulados y se muestra en el Anexo 1 para cada uno de los ensayos realizados.

El Índice de Penetración (IP) representa la penetración obtenida por golpe y se expresa en mm/golpe, dicho valor corresponde a la pendiente de la curva DCP para cada estrato identificado.

Las correlaciones entre los resultados obtenidos con el ensayo DCP y algunos parámetros geotécnicos, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Correlaciones Índice de Penetración (IP) / Propiedades del suelo

Ecuación	Autor
$CBR(\%)=292/IP^{1.12}$	AmericanStandard Testing Material (ASTM)
$\text{Log}(CBR(\%))=2.60-1.26*\text{Log}(IP)$	Manual de Carreteras Volumen 8 (MC)

Los resultados de los 7 DCP realizados se resumen a continuación en la Figuras 15. Se puede observar que la resistencia del suelo a ser penetrado varía con la profundidad. Se muestra la correlación propuesta para la Densidad relativa (DR) a partir del IP. Los valores obtenidos para el CBR son bastante similares entre ambos ensayos y dan cuenta de un suelo natural medianamente suelto a suelto.

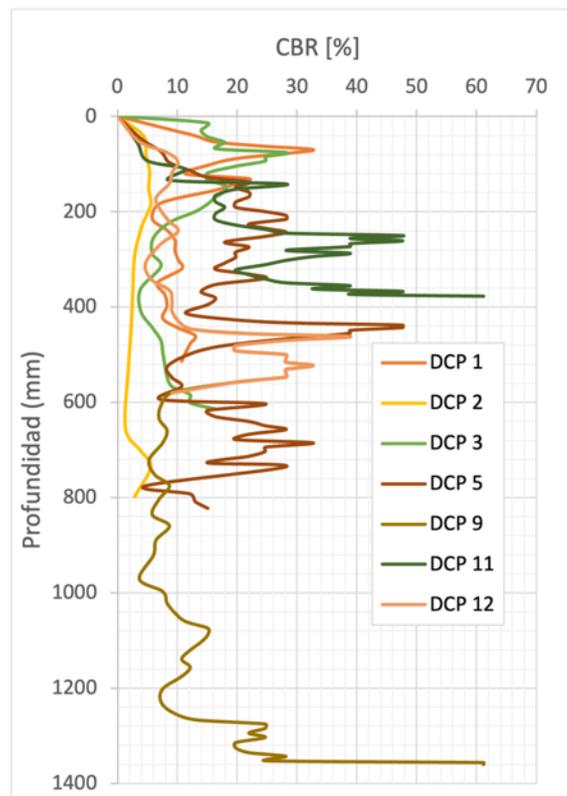


Figura 15. Resultados de los ensayos DCP. Correlación con el CBR



5. Ensayos de Laboratorio

De las calicatas se obtienen muestras del estrato 1 (suelo) para realizar ensayos de clasificación completa que incluye: Granulometría, Límites de Atterberg, Densidad de las partículas sólidas, humedad natural. También se realizan ensayos de Proctor Modificado. Además del estrato 2 (roca) se obtienen muestras para realizar ensayos de compresión no confinada. A continuación, se muestran tablas con el resumen de los ensayos realizados. En el anexo correspondiente se incluyen los informes de Laboratorio.

A continuación, se describe la ubicación y profundidad de las muestras ensayadas:

- M2469 C1 de 0,2m a 0,4m,
- M2470 C2 de 0,15m a 0,3m,
- M2471 C2 de 0,3m a 0,5m,
- M2472 C2 de 0,5m a 0,85m,
- M2474 C3 de 0,4m a 0,75m,
- M2475 C5 de 0,2m a 0,5m,
- M2476 C5 de 0,5m a 0,9m,
- M2477 C5 de 0,9m a 1,0m,
- M2478 C1 0,4m.

5.1 Granulometría

La Tabla 2 resume los resultados de los ensayos de granulometría ejecutados.

Tabla 2. Resultados ensayos de Granulometría

Muestra N°		2469	2470	2471	2472
Ubicación de la muestra		-	-	-	-
Fecha Ensayo		07-10-2022	12-10-2022	13-10-2022	18-10-2022
Abertura	Tamiz	Que Pasa	Que Pasa	Que Pasa	Que Pasa
mm		(%)	(%)	(%)	(%)
% Sobre tamaño		0%	0%	0%	0%
150	(6")	--	--	--	--
100	(4")	--	--	--	--
80	(3")	--	--	--	--
63	(2 1/2")	--	--	--	--
50	(2")	--	--	--	96
40	(1 1/2")	95	--	--	92
25	(1")	82	--	--	85
20	(3/4")	77	--	--	79
10	(3/8")	70	100	--	72
5	(N° 4)	66	100	100	68
2	(N° 10)	65	100	100	67
0,5	(N° 40)	63	100	99	66
0,08	(N° 200)	53	98	95	57



5.2 Humedad Natural

La Tabla 3 resume los resultados de los ensayos de humedad natural

Tabla 3. Resultados ensayos de Humedad Natural

Muestra N°	2469	2470	2471	2472
Ubicación	-	-	-	-
Fecha del Ensayo	07-10-2022	07-10-2022	07-10-2022	07-10-2022
% de humedad	47,2	37,4	53,5	69,4
Muestra N°	2474	2475	2476	2477
Ubicación	-	-	-	-
Fecha del Ensayo	07-10-2022	07-10-2022	07-10-2022	07-10-2022
% de humedad	53,8	39,5	32,6	86,9

5.3 Densidad de las partículas sólidas

La Tabla 4 resume los resultados de los ensayos de densidad de las partículas sólidas

Tabla 4. Resultados ensayos Densidad de las partículas sólidas

Muestra N°	2469	2470	2471	2472
Ubicación de la muestra, indicando faja, Pk, distancia al eje o UTM	-	-	-	-
Fecha del ensayo	02-10-2022	02-10-2022	17-10-2022	17-10-2022
Resultado del ensayo, Densidad de los sólidos (g/cm ³)	2,234	2,475	2,822	2,487
Cualquier otra información específica respecto de la muestra o del ensayo	--	--	--	--
Muestra N°	2474	2475	2476	2477
Ubicación de la muestra, indicando faja, Pk, distancia al eje o UTM	-	-	-	-
Fecha del ensayo	17-10-2022	14-10-2022	14-10-2022	14-10-2022
Resultado del ensayo, Densidad de los sólidos (g/cm ³)	1,922	2,524	2,519	2,334
Cualquier otra información específica respecto de la muestra o del ensayo	--	--	--	--

5.4 Límites de Atterberg

La Tabla 5 resume los resultados de los ensayos de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad.



Tabla 5. Resultados ensayos de Límites de Atterberg

Muestra N°	2469	2470	2471	2472
Fecha del ensayo	14-10-2022	07-10-2022	07-10-2022	19-10-2022
Valor del Límite Líquido (%)	No se puede determinar	54	50	No se puede determinar
Valor del Límite Plástico (%)	No se puede determinar	42	41	No se puede determinar
Valor del Índice de Plasticidad	N.P.	12	9	N.P.
Tipo de acanalador empleado (Casagrande o ASTM)	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM
Método de ensayo utilizado (mecánico o puntal)	Mecánico	Mecánico	Mecánico	Mecánico
Otras informaciones específicas relativas al ensayo o al suelo en estudio	--	--	--	--

Muestra N°	2474	2475	2476	2477
Fecha del ensayo	19-10-2022	17-10-2022	18-10-2022	18-10-2022
Valor del Límite Líquido (%)	No se puede determinar	62	42	No se puede determinar
Valor del Límite Plástico (%)	No se puede determinar	No se puede determinar	33	No se puede determinar
Valor del Índice de Plasticidad	N.P.	N.P.	9	N.P.
Tipo de acanalador empleado (Casagrande o ASTM)	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM
Método de ensayo utilizado (mecánico o puntal)	Mecánico	Mecánico	Mecánico	Mecánico
Otras informaciones específicas relativas al ensayo o al suelo en estudio	--	--	--	--

5.5 Proctor Modificado

La Tabla 6 resume los resultados del ensayo de Proctor Modificado

Tabla 6. Resultados ensayo de Proctor Modificado

Muestra N°	2473
Ubicación (faja, lado, distancia al eje, PK o UTM)	--
Fecha del ensayo	18-10-2022
Método empleado (A - B - C - D)	A
Humedad óptima (%)	29,7
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1,120
Descripción de Pisón (manual o mecánico)	manual

5.6 Clasificación de Suelos

Con los antecedentes anteriores se pueden clasificar las muestras ensayadas como se muestra en la Tabla 7.



Tabla 7. Clasificación de las muestras ensayadas

Muestra N°	2469	2470	2471	2472
(*) Clasificación USCS	ML-Limos inorgánicos de baja compresibilidad	MH Limos inorgánicos de alta compresibilidad	ML-MH Mezcla de limos inorgánicos de alta y baja compresibilidad	ML-Limos inorgánicos de baja compresibilidad
(*) Clasificación AASHTO	A-4 Suelos limosos	A-7-5 Suelos arcillosos	A-5 Suelos limosos	A-4 Suelos limosos

Muestra N°	2474	2475	2476	2477
(*) Clasificación USCS	GM Gravas limosas	GM Gravas limosas	ML-Limos inorgánicos de baja compresibilidad	ML-Limos inorgánicos de baja compresibilidad
(*) Clasificación AASHTO	A-4 Suelos limosos	A-5 Suelos limosos	A-5 Suelos limosos	A-4 Suelos limosos

5.7 Compresión no confinada en roca

De la calicata 1 en el estrato 2 se obtienen muestras de roca. En laboratorio se prepara la muestra para obtener una geometría cilíndrica (Figura 16) y luego ser ensayada.

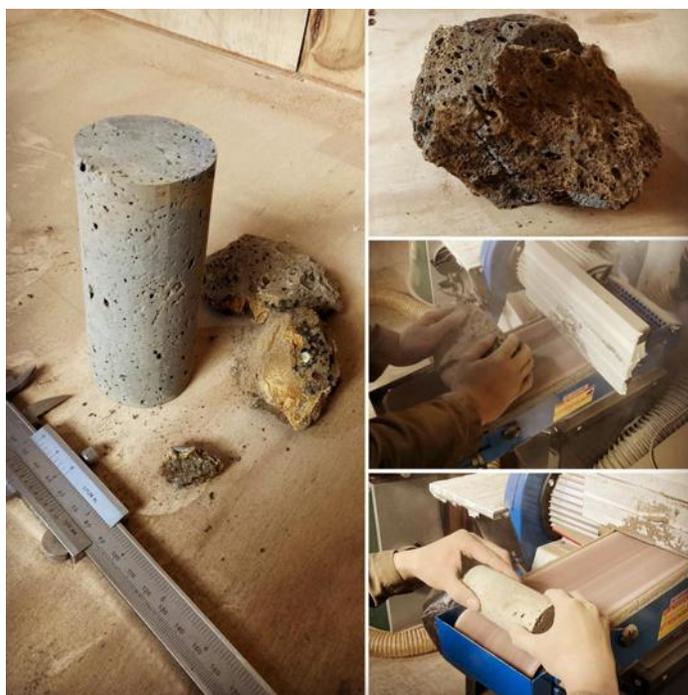


Figura 16. Muestra cilíndrica obtenida a partir de muestra de roca volcánica.

La Tabla 8 presenta los resultados obtenidos del ensayo.



Tabla 8. Resultados de ensayo de compresión no confinada en roca

Parámetros	Inalterada
Peso Inicial Muestra	588,6 g
Densidad aparente	1598,70 kg/m ³
Altura de la muestra (promedio tres lecturas)	134,67 mm
Diámetro de la muestra (promedio seis lecturas: dos arriba, dos centrales dos abajo)	59,07 mm
Relación altura-diámetro	2.2
Área	27,40 cm ²
Resistencia máxima a la compresión no confinada	29,89 kgf/cm ²
Deformación promedio en la falla: (%)	1,42%

La Figura 17 muestra la curva tensión de formación obtenida.

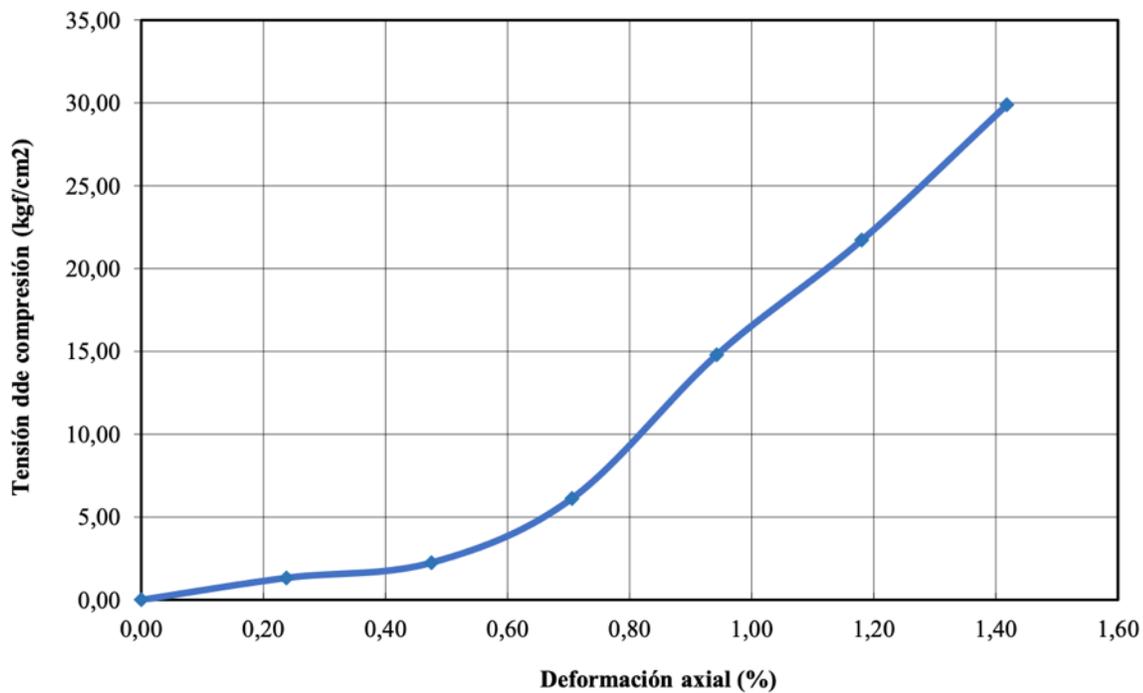


Figura 17. Resistencia a la compresión axial.



6. Estudio Geofísico

Se realizan dos tendidos con geófonos verticales. La ubicación de los tendidos se muestra en la Figura 3.

- Tendido 1 con 15 geófonos espaciados a 5 m
- Tendido 2 con 18 geófonos espaciados a 4 m

Se utiliza la energización del arreglo mediante mazo de 18 libras.

6.1 Descripción de los equipos y software utilizados

Los ensayos se realizan utilizando equipos marca Sara Electronics Instruments (www.sara.pg.it). Para el análisis de los datos recolectados se emplea el software Park Seis de Shon Park. A continuación, una lista de los equipos y software utilizados:

- GeoExplorer HVSR, Sara Instruments
- DoReMi – Cable Seismograph, Sara Instruments
- Field Geophones, Sara Instruments
- SR04 GeoBox – Digital Sensor, Sara Instruments
- Park Seis
- Geopsy
- DoReMi, Sara Instruments
- Seismowin, Sara Instruments

6.2 Obtención del perfil de velocidad de ondas de corte

Para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte y el promedio de estas velocidades en los primeros 30 m (V_{s30}). Se realizan una combinación de ensayos con fuente activa y mediante la utilización de micro-vibraciones (ensayo pasivo).

La metodología activa y pasiva se registra mediante arreglos de geófonos verticales espaciados a distancias regulares. Los elementos utilizados para los ensayos son los siguientes:

- Geófonos de 4.5 Hz (sensibilidad vertical)
- Línea de comunicación
- Equipo colector de datos
- Software de recolección de datos

Además, se utilizan huinchas y otras herramientas menores para determinar la ubicación de los geófonos.

La Figura 18 muestra imágenes de los arreglos utilizados.





Figura 18. Arreglos lineales mediante geófonos verticales (izquierda arreglo 1, derecha arreglo 2).

El proceso utilizado en los métodos activo y pasivo es similar. Este sigue los siguientes pasos:

- Determinación del lugar en que se instalará el arreglo
- Instalación de los equipos
- Recolección de datos en terreno
- Determinación de la curva de dispersión
- Determinación del perfil estratigráfico
- Determinación del perfil de ondas de corte

En el método activo, para se aplica un golpe en el terreno mediante un mazo o martillo de 20 libras. En cambio, en el caso pasivo se miden vibraciones ambientales por varios periodos de 40 segundos cada uno.

Mediante el software de procesamiento de datos Park Seis se pueden analizar ambos ensayos activo y pasivo, por separado y en conjunto. Esto permite la determinación de la curva de dispersión, y consecuentemente la estimación del perfil de velocidades de ondas de corte. El método utilizado para la obtención de la curva de dispersión es el análisis de frecuencia – número de onda (i.e., F-K) propuestos por Lacoss et. al 1969 y Kvaerna & Ringdahl 1986.

A partir de la curva de dispersión lograda con F-K es posible obtener el perfil de velocidades de ondas de corte a través de la inversión de la curva de dispersión mediante el algoritmo del vecindario (Sambridge, 1999). Este explora exhaustivamente las posibles combinaciones de los parámetros (Wathelet, 2008).

6.3 Curva de dispersión

Para cada ensayo analizado se obtiene una curva de dispersión. Esta curva muestra la relación entre las frecuencias de las ondas y su velocidad de fase. Se analizan diferentes espectros para obtener la curva de



dispersión definitiva mediante “picking”, que es el método de selección de los pares de frecuencia-velocidad de fase con mayor potencia. Esto permite posteriormente, determinar la curva de dispersión a utilizar en cada caso.

La curva de dispersión representa la respuesta dinámica del suelo y al invertirla se obtiene la su estratigrafía.

Las Figuras 19 y 20 presentan ejemplos de las curvas de dispersión, que corresponden a los registros activos y pasivos. Para obtener las curvas de dispersión se consideraron los resultados de fuente activa y pasiva, ensayos MASW y ReMi respectivamente.

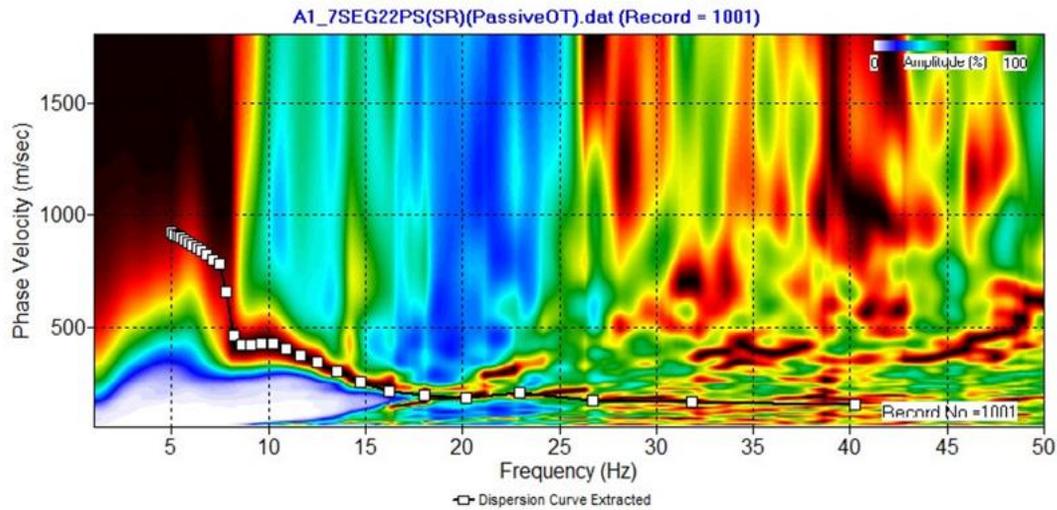


Figura 19. Ejemplo de las curvas de dispersión del arreglo 1 (Pasivo)

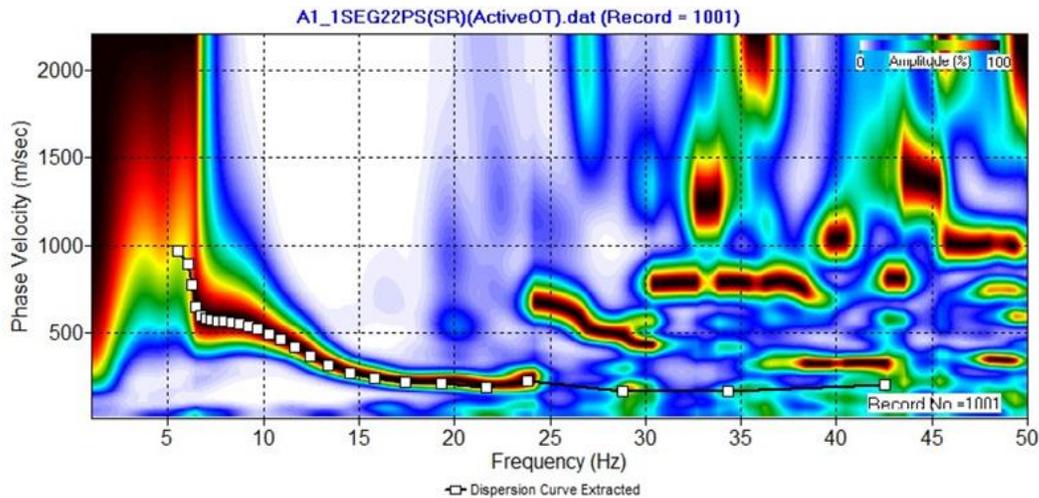


Figura 20. Ejemplo de las curvas de dispersión del arreglo 1 (Activo)



6.4 Perfil estratigráfico y de velocidades de ondas de corte

A partir de la inversión de las curvas de dispersión se obtienen perfiles de velocidades de ondas de corte para cada caso. Las Figuras 21 y 22 muestran los perfiles de velocidades de ondas de corte obtenidas en los análisis realizados para los arreglos 1 y 2 respectivamente utilizando las técnicas activas pasivas y combinadas.

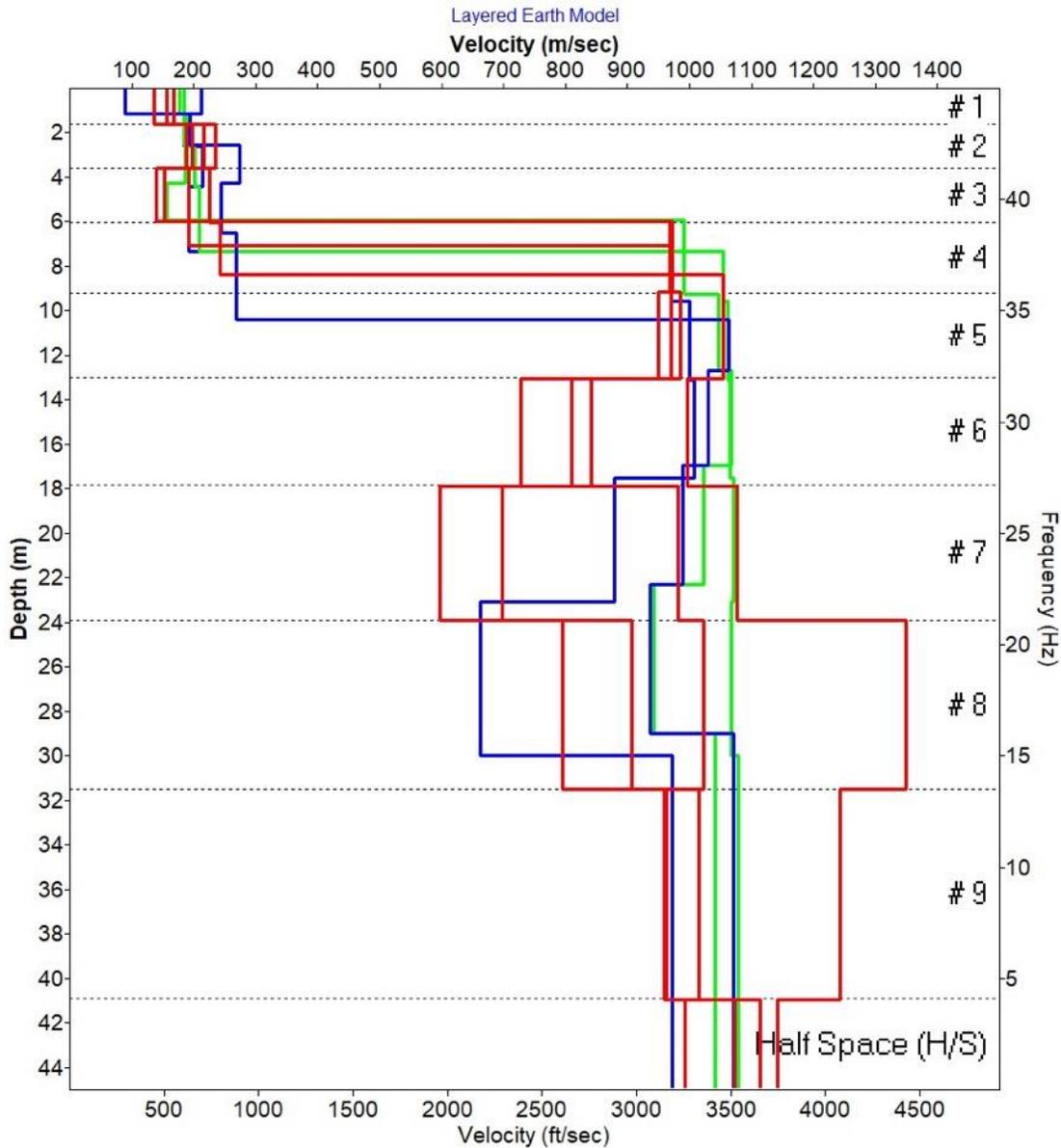


Figura 21. Perfil de velocidades de ondas de corte Arreglo1. Azul: Fuente activa. Rojo: Fuente pasiva. Verde: Fuente combinada.



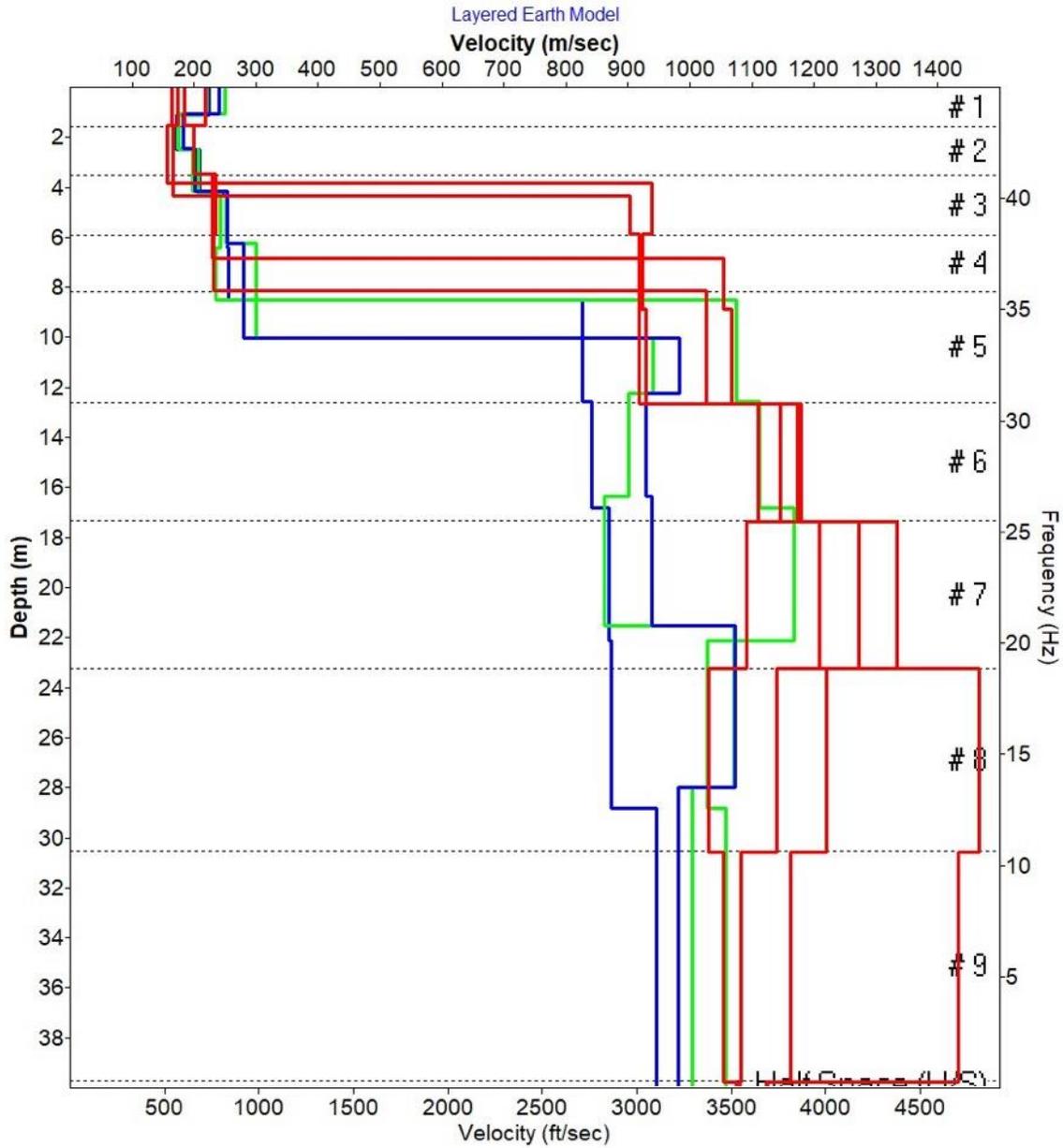


Figura 22. Perfil de velocidades de ondas de corte Arreglo 2. Azul: Fuente activa. Rojo: Fuente pasiva. Verde: Fuente combinada.

El V_{s30} corresponde al promedio de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m y se obtiene a partir de la siguiente expresión (promedio armónico):

$$V_{sH} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (1)$$



Donde V_{sH} es la velocidad de ondas de corte promedio en los primeros H metros, V_{si} es la velocidad de ondas de corte del estrato i en m/s, h_i es el espesor del estrato i en metros y n la cantidad de estratos existentes entre la cota de terreno y los H metros. Para la obtención del V_{s30} , H es igual a 30 m.

Las velocidades determinadas para los arreglos 1 y 2 se muestran en las Tablas 9 y 10 respectivamente.

Tabla 9. Velocidades de ondas de corte en base a ensayos activos, pasivos y combinados para el arreglo 1

Horizonte	Prof. Ini.	Prof. Final	Espesor (H)	Vs	H/Vs	Vs30
[-]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[s]	[m/s]
H1	0	1	1	150	0,007	440
H2	1	4	3	200	0,015	
H3	4	8	4	220	0,018	
H4	8	10	2	250	0,008	
H5	10	30	20	980	0,020	
Suma			30		0,068	

Tabla 10. Velocidades de ondas de corte en base a ensayos activos, pasivos y combinados para el arreglo 2

Horizonte	Prof. Ini.	Prof. Final	Espesor (H)	Vs	H/Vs	Vs30
[-]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[s]	[m/s]
H1	0	2	2	180	0,011	444
H2	2	4	2	200	0,010	
H3	4	8	4	250	0,016	
H4	8	10	2	290	0,007	
H5	10	30	20	850	0,024	
Suma			30		0,068	

La Figura 23 presenta el perfil estratigráfico correspondiente a ambos arreglos escogidos en base a los ensayos realizados cada ubicación.

Se alcanza la profundidad de exploración de 30 m obteniendo un V_{s30} mínimo de **440 m/s**.



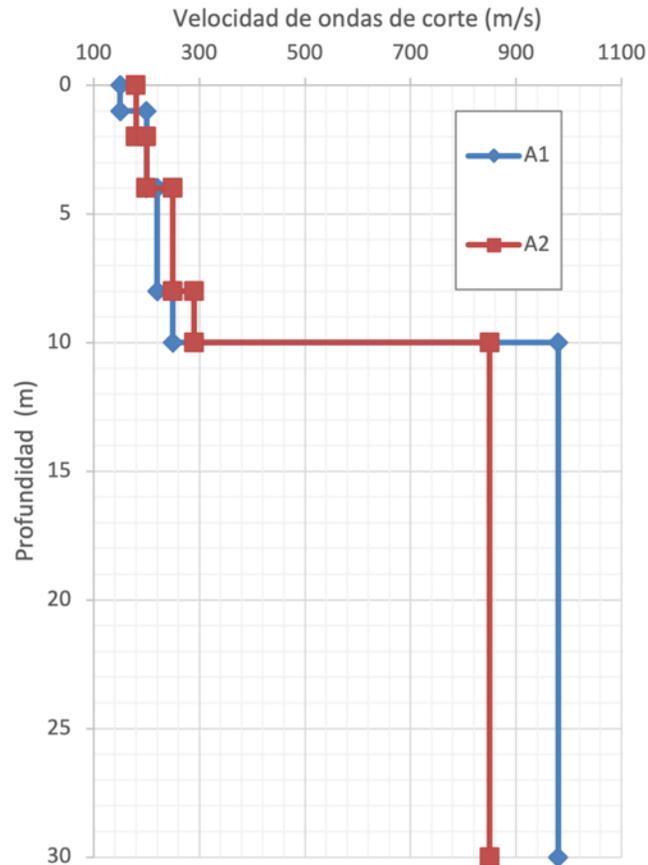


Figura 23. Perfil de velocidades de ondas de corte Arreglos 1 y 2

7. Modelo estratigráfico y parámetros de diseño

A partir de la inspección visual de las calcatas y ensayos ejecutados en terreno y de los ensayos de laboratorio se propone un modelo estratigráfico del subsuelo y parámetros geotécnicos

7.1 Modelo estratigráfico y parámetros de diseño

Se definen perfiles estratigráficos para el terreno en estudio compuesto por 2 estratos.

- Estrato 0:** Suelo orgánico, compuesto por vegetación y arbustos. Su espesor es de y 0,05 m
- Estrato 1:** Limos de baja plasticidad de espesor variable ($20 \text{ cm} < e < 80 \text{ cm}$) con porcentaje de finos entre 44 % y 98% y humedades entre el 33 % y 87 % y plasticidad de la fracción fina cercana al 10%. Presencia de arenas y gravas aisladas y gravas en descomposición.
- Estrato 2:** Rocas volcánicas fracturadas en los primeros centímetros fáciles de excavar manualmente pero rápidamente más compactas y resistentes. Resistencia a la compresión alcanza los 30 kg/cm^2 . Velocidad de ondas de corte entre los 250 m/s y 290 m/s. Espesor estimado de 10 m



Estrato 3: Rocas compactas de origen volcánico con velocidades de ondas de corte superiores a los 850 m/s. Espesor indefinido.

7.2 Capacidad de Soporte

La capacidad de soporte admisible en una fundación puede estar controlada por la resistencia de esta o por los asentamientos que se generan. En forma general, la capacidad admisible será la menor de las siguientes dos expresiones:

$$q_{adm} = \{q_{adm} \text{ (capacidad última o resistencia)} \text{ o } q_{adm} \text{ (asentamiento)}\}$$

La capacidad de soporte última de un suelo depende de la profundidad de fundación, forma geométrica de la fundación, inclinación del terreno, pesos unitarios y parámetros de resistencia al corte de los estratos de suelo. Considerando, la expresión de capacidad de carga última sugerida por Meyerhof (1963), se tiene que:

$$q_{ult} = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i}$$

donde,

c : cohesión

q : sobrecarga efectiva en el sello de fundación

γ : peso unitario del suelo bajo el sello de fundación

B : ancho de la fundación

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$: factores de forma

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$: factores de profundidad

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$: factores de inclinación

N_c, N_q, N_γ : factores de capacidad de soporte en función del ángulo de fricción

Considerando un factor de seguridad apropiado tanto para el caso estático como sísmico, la capacidad de soporte admisible para cada caso se puede estimar mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Caso Estático: } q_{adm \text{ resist}} = \frac{q_{ult}}{FS, \text{con } FS=3}$$

$$\text{Caso Sísmico: } q_{adm \text{ resist}} = \frac{q_{ult}}{FS, \text{con } FS=2}$$

Considerando la estratigrafía presentada anteriormente, se estima que se debe fundar sobre el Estrato 2.



Los sellos de fundación deben ser recibidos en terreno por un especialista geotécnico previo a la instalación de las fundaciones.

La carga última para el Estrato 2 tanto para la grava arenosa como para la arenisca se estima en 30 kg/cm^2 por lo que se proponen las siguientes capacidades de soporte admisibles

$$\text{Caso Estático: } q_{adm \text{ resist}} = \frac{q_{ult}}{3=10 \text{ kg/cm}^2}$$

$$\text{Caso Sísmico: } q_{adm \text{ resist}} = \frac{q_{ult}}{2=15 \text{ kg/cm}^2}$$

7.3 Asentamientos elásticos admisibles

Dado que se trata de un material rocoso sin finos plásticos, se descartan asentamientos por consolidación en todos los estratos.

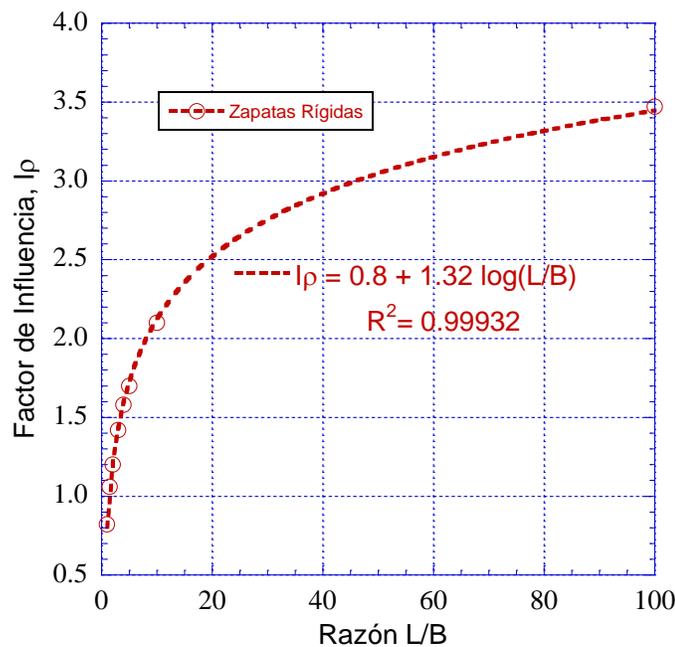


Figura 24. Factor de Influencia I_p versus L/B (datos obtenidos por Skempton, 1951; Giroud, 1968; Whitlow, 1996)

En el caso de los asentamientos elásticos, estos pueden estimarse según la siguiente expresión:

$$\rho = q_0 \frac{B(1-\nu^2)}{E} I_p \quad \text{donde,}$$

ρ : Asentamiento Elástico

q_0 : Sobrecarga admisible por asentamiento o sobrecarga de trabajo



- B : Ancho de la fundación
 ν : Coeficiente de Poisson
 \underline{E} : Módulo de deformación ponderado
 $I\rho$: Factor de Influencia (ver Figura 24)

Reescribiendo la ecuación anterior, se tiene:

$$q_{adm\ asent} = \rho \frac{\underline{E}}{B(1 - \nu^2) \cdot I\rho}$$

A partir de lo anterior se puede estimar rápidamente el asentamiento elástico dependiendo del tipo de fundación a realizar.

El asentamiento total máximo admisible de cada fundación individual (corrida y/o aislada) se recomienda que no sea superior a 1/400 de la distancia entre ejes paralelos de los muros considerados, con el objetivo de garantizar una distorsión angular máxima de muros en su plano vertical inferior a 1/600, asumiendo que el asentamiento máximo diferencial es 2/3 del máximo total.

7.4 Clasificación sísmica del subsuelo

Considerando las mediciones de velocidad de ondas de corte obtenidas a partir de los ensayos geofísicos se obtienen V_{s30} que varían 440 y 444 m/s.

Según lo estipulado en el decreto supremo DS61 Of. 2011, el suelo del sitio del proyecto clasifica sísmicamente como Suelo Tipo C (Tabla 11). Sin embargo, al no contar con el sondaje se debe degradar la clasificación a **Suelo tipo D**.

Tabla 11. Clasificación de Suelo según el DS61 del 2011

Suelo Tipo	V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	N_1 (golpes/p ies)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20
F	Suelos Especiales	*	*	*	*



7.5 Sellos de excavación y de fundación

Se debe considerar como sello de excavación el Estrato 2 a una profundidad mínima de 0,3 m bajo el dentro de la roca meteorizada asegurando una superficie homogénea de roca. No se acepta fundar parte de la zapata en suelo.

No se recomienda utilizar suelo del estrato 1 como relleno.

7.6 Fundación

Para este proyecto se recomienda utilizar zapatas corridas bajo todos los muros principales y perimetrales.

No se recomienda dejar zapatas corridas sin amarrar, si este fuera el caso deben utilizarse vigas de fundación que conecten las zapatas.

No se recomienda la utilización de zapatas aisladas.

8. Especificaciones y recomendaciones

8.1 Mejoramiento de suelos

El mejoramiento consiste el retiro del material existente y su reemplazo por un relleno compactado controlado. Los rellenos deben estar formados por materiales seleccionados provenientes de empréstitos o excavaciones.

Las características del material requerido para el relleno son las que se listan a continuación.

Composición: Suelo granular gravo arenoso, con un contenido de finos en el rango de 5% a 15% (% en peso que pasa bajo la malla N° 200 ASTM).

Límites de Atterberg: El límite líquido de la fracción que pasa bajo la malla ASTM N° 40 no será superior a 50% y su índice de plasticidad $\leq 15\%$.

Tamaño Máximo: El tamaño máximo de partículas dependerá del espesor de capa a compactar y el tamaño y peso del equipo de compactación que se utilice. Se establece como límite un tamaño máximo de 2".

Sobre tamaño: No se acepta.

Banda Granulométrica: La composición granulométrica del material a usar deberá tener una granulometría dentro de la banda granulométrica especificada en la Tabla 12.



Tabla 12. Composición granulométrica del material a utilizado como relleno compactado

Malla	% en peso que pasa	Plasticidad	Razón de Soporte California (C.B.R.) a 0,2" de penetración	Compactación
2"	100	Límite Líquido (LL) < 20% & Índice de Plasticidad < 6%	%CBR > 40%	Porcentaje Óptimo Próctor Modificado OPM ≥ 95 % Densidad Relativa (DR): 80%
1"	75- 95			
3/8"	40- 75			
N°4	30- 60			
N°10	20- 45			
N°40	15- 30			
N°200	5- 15			

8.2 Especificaciones para Excavaciones y Fundaciones

1. Las excavaciones de las fundaciones se podrán ejecutar en forma mecanizada, sin embargo, los últimos 30 cm deberán ser en forma manual.
2. El perfilado de la excavación deberá asegurar la horizontalidad del sello.
3. Se deberá remover del sello todo material suelto y/o extraño que pudiera haberse depositado durante las faenas de excavación.
4. La profundidad del sello de excavación deberá ser ajustado en terreno, para cumplir con el establecido en los planos de diseño, además de remover cualquier terreno heterogéneo que se pudiera presentar. Lo anterior podrá ser obviado, bajo pregunta previa y la correspondiente aceptación del mecánico de suelos.
5. La profundidad del Sello de Fundación será variable dependiendo del proyecto, asegurando que el edificio quede fundado por completo sobre el estrato definido como estrato 2 en el presente estudio, siempre y cuando este cumpla con las propiedades indicadas, para lo cual siempre será necesaria la visita de un especialista que recepsione dicho sello.
6. La profundidad del sello de excavación deberá ser ajustado en terreno, para cumplir con el establecido en los planos de diseño, además de remover cualquier terreno heterogéneo que se pudiera presentar. Lo anterior podrá ser obviado, bajo pregunta previa y la correspondiente aceptación del mecánico de suelos.
7. Se recomienda utilizar zapatas aisladas o corridas para fundar las estructuras livianas.

La Tabla 13 detalla las pendientes recomendadas para las excavaciones temporales en los diferentes estratos encontrados en terreno.



Tabla 13. Pendiente de excavación temporal para cada estrato

Propiedad/Parámetro	Estratos		
	E1	E2	E3
Pendiente de excavación temporal	30º	40º	80º

8.3 Especificaciones para estructuras de retención

1. Todas las excavaciones deberán protegerse con una estructura de retención en el caso de que las mismas no sean estables verticalmente. Es el caso de las arenas silíceas del estrato 2 cuando se encuentran secas y expuestas al ambiente.
- 2.- Se podrán utilizar diferentes alternativas de retención, como muro berlinés anclado, puntales, tablaestacas muros de hormigón armado etc. La elección de la solución dependerá de la profundidad de la excavación y del proyecto a ejecutar.
- 3.- Para estructuras temporales se utilizará un factor de seguridad de 1,2 y para estructuras permanentes los factores de seguridad indicados en la Tabla 14.

Tabla 14. Factores de seguridad permanentes

F.S.	Estático	Sísmico
Volcamiento	2,0	1,3
Deslizamiento	2,0	1,2

8.4 Especificaciones para escarpe, radieres y material de rellenos

Para el caso de construcciones de pavimentos superficiales o radieres, estos se podrán ejecutar sobre los terrenos naturales o rellenos siempre y cuando sean homogéneos.

En el caso de requerirse rellenos estos deberán cumplir como mínimo con las siguientes especificaciones técnicas:

1. El material a utilizar deberá estar constituido por una grava arenosa homogénea, en términos de graduación de partículas (bien graduado) y en términos del contenido de humedad. Evidentemente, este material no puede contener materiales orgánicos, escombros o cualquier otro elemento perjudicial para el relleno.
2. La curva granulométrica del material que será utilizado como relleno deberá estar comprendida en el rango de las siguientes granulometrías propuestas:
3. La capacidad de soporte de los materiales que se dispongan como base de los pavimentos, deberá tener un valor de C.B.R. mayor o igual al 60% (penetración de 0,2”).
4. Se requiere que los rellenos sean compactados al 95% del proctor modificado o a al 80% de la densidad relativa, según corresponda. Se deberán considerar capas de no más de 20 cm de espesor de material suelto, y deben ser compactados con un equipo tal que permita alcanzar las densidades antes señaladas. Ante la eventualidad de utilizar máquinas vibratorias con rodillos lisos de no menos



de 10 ton, se debe considerar que la compactación entre paños consecutivos considere un traslape de un 30% del largo del rodillo.

- El control de compactación deberá ser realizado por un Laboratorio de Mecánica de Suelos acreditado según norma de calidad NCh-ISO 17.025, quién será responsable de certificar los materiales y realizar los ensayos necesarios para asegurar una correcta materialización de los rellenos.

Tabla 15. Granulometría Material de Relleno.

Tamiz	% que pasa en peso
2"	100
1"	75 – 95
3/8"	40 – 75
Nº 4	30 – 60
10	20 – 45
40	15 – 30
200	5 – 15

8.5 Especificaciones generales

- En caso de ser requeridas, las especificaciones constructivas para el sistema de entibación deberán ser detalladas por el contratista responsable.
- El diseñador del sistema de entibación deberá entregar un plano con todos los detalles del muro berlinés y/o muro pantalla, además de las especificaciones constructivas.
- Los rellenos estructurales deberán ser controlados por un laboratorio especializado tanto en su grado de compactación como en su composición.
- Cualquier duda referente al suelo en estudio o a lo tratado en el presente informe deberá ser consultado directamente con algún consultor de esta oficina.

9. Observaciones finales

En visita a terreno se ejecutan 4 calicatas 7 ensayos DCP y 2 tendidos geofísicos. Además, se toman muestras las cuales se analizan en laboratorio.

A partir de los resultados obtenidos se obtiene un modelo estratigráfico único para todo el terreno en estudio y se determinan las capacidades de soporte estáticas y sísmicas.



Se recomienda fundar sobre el estrato 2 compuesto por roca volcánica, asegurando una superficie homogénea sobre la cual se puede instalar directamente un emplantillado y la fundación corrida recomendada.

10. Bibliografía

Acevedo, J. y Pinochet, A. (2016). Informe Mecánica de Suelos, Fundo Vaitea. Informe 150715-0172 Revisión 0. Santiago, Abril 2016.

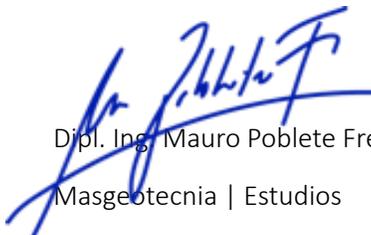
Kvaerna, T. and F. Ringdahl (1986). Stability of various fk-estimation techniques, in Semiannual Technical Summary, 1 October 1985- 31 March 1986, In NORSAR Scientific Report, 1-86/87, Kjeller, Norway, 29-40.

Lacoss, R. T., E. J. Kelly and M. N. Toksoz (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays, Geophysics 34, 21-38.

Sambridge, M. (1999). "Geophysical inversion with neighborhood algorithm- I. Searching the parameter space". Geophysical Journal International, 138, 479-494.

SESAME Project, "Site EffectS assessment using Ambient Excitations", 2001-2004, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.

Wathelet, M. (2008). "An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling". Geophysical Research Letters, 35, L09301



Dipl. Ing. Mauro Poblete Freire
Masgeotecnia | Estudios



