

INFORME GEOTECNICO CONSOLIDADO

EXPLORACIONES GEOTECNICAS PROYECTO DE EXPANSIÓN LINEA MAIPÚ-PUDAHUEL-LO PRADO

- ESTRATIGRAFIA Y PARAMETROS GEOTECNICOS DE LOS SUELOS
- ANALISIS HIDROGEOLÓGICO
- BASES DE DISEÑO DE PIQUES

SANTIAGO
REGION METROPOLITANA

VOLUMEN I

SOLICITADO POR: METRO S.A.



Junio 2006

INFORME Nº 2661-ING-SGC-439/2006

Santiago, 7 de Junio de 2006.

ING-SGC-439/2006

Señores

Metro S.A.

Alameda 1414 – 3 piso

Santiago

At.: Sr. Ing. Carlos Mercado y

Sr. Ing. Pablo Muñoz.

Ref.: Extensión L5 a Maipú, Metro de
Santiago.

Mat.: Informe Geotécnico Consolidado.

Estimados señores:

Adjuntamos a la presente el Informe Geotécnico Consolidado para la
Expansión de la Línea 5 a Maipú del Metro de Santiago.

Saluda atentamente a Uds.,

Pedro Ortigosa de Pablo
Ingeniero Civil

POP/saf

CONTENIDO VOL. I

1. INTRODUCCIÓN
2. ESTRATIGRAFIA
3. PARAMETROS GEOTECNICOS DE LOS SUELOS
 - 3.1 Propiedades índices
 - 3.1.1 Ubicación de los suelos finos en la carta de plasticidad
 - 3.1.2 Granulometrías
 - 3.1.3 Grados de saturación
 - 3.1.4 Pesos unitarios
 - 3.1.5 Índice de huecos
 - 3.1.6 Índices de penetración estándar
 - 3.1.7 Presión límite y módulos presiométricos
 - 3.2. Propiedades mecánicas para cargas estáticas
 - 3.2.1 Módulo de deformación para las Gravas
 - 3.2.2 Módulo de deformación para las Pumicitas
 - 3.2.3 Módulo de deformación para los suelos Finos
 - 3.2.4 Coeficiente de reposo in-situ para las Gravas
 - 3.2.5 Coeficiente de reposo in-situ para las Pumicitas
 - 3.2.6 Coeficiente de reposo in-situ para los Suelos Finos
 - 3.2.7 Parámetros resistentes para las Gravas
 - 3.2.8 Parámetros resistentes para las Pumicitas
 - 3.2.9 Parámetros resistentes para los Suelos Finos
 - 3.2.10 Módulos de Poisson y Ángulos de Dilatancia
 - 3.3 Propiedades mecánicas para cargas cíclicas (sismo)
 - 3.3.1 Coeficientes de deformación cíclica
 - 3.3.2 Módulo de deformación cíclica para las Gravas
 - 3.3.3 Módulo de deformación cíclica para las pumicitas
 - 3.3.4 Módulo de deformación cíclica para los suelos finos

FIGURAS 1 a 31

4. HIDROGEOLOGIA DEL SUBSUELO

- 4.1 Aspectos Geológicos Generales
- 4.2 Cuenca Hidrográfica
 - 4.2.1 Sistema Hidrográfico
 - 4.2.2 Cuadro Sedimentario General
 - 4.2.3 Aguas Subterráneas
- 4.3 Aspectos Geotécnicos
- 4.4 Modelo Estratigráfico
- 4.5 Prospecciones y Ensayes
- 4.6 Permeabilidad de los diferentes estratos

FIGURAS 1 y 2

5. BASES DE DISEÑO PIQUES

- Piques Tramo entre Estaciones General Bonilla – Estación el Descanso, Informe PETRUS N° 2661-319/2006, REV.A.
- Piques Tramo Plaza Maipú-Cola de Maniobras, Informe PETRUS N° 2661-322/2006, REV.A.
- Piques entre Calicatas C-3T a C-4T, Informe PETRUS N° 2661-327/2006, REV.A.
- Piques Pumicita entre Estación Lo Prado y Calicata C-6T, Informe PETRUS N° 2661-378/2006, REV.A.
- Piques Tramo entre la Calicata C-1T y la Estación Rafael Riesco, Informe PETRUS N° 2661-384/2006.
- Piques Tramo entre las Estaciones Sergio Valdovinos y Quinta Normal, Informe PETRUS N° 2661-404/2006.

En contratapa:

Lámina 1/2 UBICACIÓN DE CALICATAS Y SONDAJES

Lámina 2/2 PERFIL ESTRATIGRÁFICO

CONTENIDO VOL. II

- Tablas Estratigráficas
- Registros de Sondajes y pruebas de Infiltración
- Ensayos Presiométricos
- Pruebas de recuperación de la napa

CONTENIDO VOL. III

- Pruebas de Carga

CONTENIDO VOL. IV

- Ensayos de Laboratorio

1. INTRODUCCIÓN

Con motivo del Proyecto de la Expansión de la Línea 5 del Metro de Santiago hacia Maipú, entre la Estación Quinta Normal y la Plaza de Maipú, METRO S.A. encargó a PETRUS INGS. el Estudio de Mecánica de Suelos correspondiente.

En el presente Vol. I se entrega la estratigrafía obtenida con los sondajes y calicatas, así como la caracterización geotécnica de los suelos detectados a lo largo del trazado de la expansión. Estos suelos corresponden a:

- Gravas fluviales de las Depositaciones distales de los ríos Maipo y Mapocho.
- Arenas finas limosas de origen volcánico con cementación baja y baja a media (Pumicitas).
- Suelos Finos.

Adicionalmente, el presente Vol. I. incorpora los Análisis Hidrogeológicos y las Bases de Diseño geotécnicas para los Piques proyectados a lo largo de la Expansión de la Línea 5.

En los Volúmenes II a IV se entregan en detalle las Estratigrafías de las calicatas y sondajes, las Pruebas de Carga, las Pruebas de Infiltración y de Recuperación de napa, los Ensayos Presiométricos ejecutados en los sondajes y los resultados de los Ensayos de Laboratorio.

Con la finalidad de entregar una visión mas completa del comportamiento de los suelos detectados, se incluyen resultados de ensayos en las Gravas de la Expansión de la Línea 1 a Los Domínicos. También se incluyen propiedades geotécnicas para las Gravas y Suelos Finos de la Extensión de

la Línea 2 entre Cerro Blanco y Américo Vespucio y de los suelos Finos de la Línea 4 entre Príncipe de Gales y la Rotonda Quilín, lo cual es importante ya que en ambas líneas se cuenta con la experiencia constructiva y con los controles de desplazamiento en los túneles y estaciones.

2. ESTRATIGRAFIA

En la Lámina 1/2 inserta en la contratapa se despliega la ubicación en planta de las calicatas y sondajes ejecutados para la Expansión de la Línea 5 a Maipú, incluyendo además prospecciones ejecutadas para otras obras que sirvieron de base para programar las exploraciones de dicha expansión.

En la Lámina 2/2 se despliega el perfil estratigráfico generado con las calicatas y sondajes ejecutados para el Proyecto de Expansión de la Línea 5. En el perfil se incluye la ubicación de las muestras perturbadas y no perturbadas, las propiedades índices de los suelos, la ubicación de las pruebas de recuperación de la napa, las profundidades donde se efectuaron pruebas de carga y desde donde se extrajeron muestras no perturbadas para ejecutar triaxiales en carga y en descarga, ensayos de compresión no confinada y medición de velocidad de ondas de corte. En los sondajes se presentan los índices de penetración estándar, los resultados de los ensayos presiométricos (presión límite y módulo presiométrico) y los coeficientes de permeabilidad obtenidos con las pruebas de infiltración ejecutadas.

Dada la variabilidad de suelos detectada a lo largo del trazado, la estratigrafía se divide en tramos con las descripciones simplificadas que se describen como sigue:

2.1 Tramo Estación Lo Prado – Quinta Normal

Corresponde a depósitos de Gravas arenosas sin plasticidad con pasadas de espesor variable de suelos Finos constituidos por Arcillas y Arcillas Limosas de baja plasticidad.

Las Gravas presentan un tamaño máximo típico entre 5" y 8", son compactas, pero desgranables al impacto del martillo geológico (horizonte H-3) resultando mas resistentes al impacto en profundidad (horizonte H-4).

Los suelos Finos exhiben una consistencia alta y alta a muy alta en profundidad.

Hacia el Poniente del tramo el depósito de Gravas engrana con una formación de origen volcánico conformada por arenas limosas compactas, sin plasticidad y con gravas subangulares dispersas (Pumicita); la formación pumicítica exhibe cementación baja y baja a media, alcanzando una profundidad de 40m según antecedentes de pozos de captación de aguas subterráneas.

Dentro de la profundidad de 28m prospectada en el tramo no se detectó napa.

2.2 Tramo Estación Lo Prado – Estación General Bonilla

Corresponde al depósito de Pumicita ya descrito en el numeral (2.1) que se lo ha denominado Pumicita Pudahuel.

En el tramo no se detectó napa dentro de los 28m prospectados.

2.3 Tramo Estación General Bonilla – Calicata C-3T

La configuración estratigráfica de este tramo es similar a la ya descrita en el numeral (2.1) para el Tramo Estación Lo Prado – Quinta Normal, salvo que exhibe un espesor mayor de Grava arenosa desgranable al impacto.

En este tramo no se detectó napa dentro de los 28m prospectados, salvo en el sector Sur del tramo (entre las calicatas C-3T y C-4E) en donde la napa surge a profundidades variables entre 21m y 27m.

2.4 Tramo Calicata C-3T – Calicata C-1T

La configuración estratigráfica es similar a la del tramo anterior, salvo que ahora aparece el engrane con la Pumicita de Maipú la cual, para efectos de diseño, puede considerarse con características similares a la Pumicita Pudahuel.

Se detectó napa a profundidades variables entre 24m y 27m.

2.5 Tramo Calicata C-1T a Calicata C-0

Conformado por Gravas arenosas de la Depositación del río Maipo, sin plasticidad y con compacidad alta a muy alta. Hasta 12 – 13m de profundidad la grava es desgranable al impacto del martillo geológico (horizonte H-3), bajo la cual la resistencia al impacto aumenta (horizonte H-4).

Dentro de la profundidad de 28m prospectada no se detectó napa.

3. PARAMETROS GEOTECNICOS DE LOS SUELOS

3.1 Propiedades índices

3.1.1 Ubicación de los suelos finos en la carta de plasticidad

En la Fig. 1 se expone la ubicación de los suelos Finos en la carta de plasticidad, concluyéndose que se trata de arcillas y arcillas limosas de baja plasticidad. De hecho, las muestras ensayadas se ubican en el sector inferior del rango definido con otros suelos Finos de la ciudad de Santiago.

Se hace notar que ni en las Gravas ni en las Pumicitas se detectó plasticidad.

3.1.2 Granulometrías

En la Fig. 2 se ilustra las granulometrías de las Pumicitas a lo largo del trazado de la Línea 5 (Pumicita Pudahuel y Pumicita Maipú). Se concluye que se trata de arenas que exhiben típicamente 35% de finos, cuya granulometría se ubican en el centro de la banda para 7 empréstitos de Pumicita emplazados en diferentes localidades de la ciudad de Santiago.

En la Fig. 2 también se ilustran las granulometrías de las Gravas arenosas desgranables y no desgranables al impacto, observándose que caen dentro de la banda para las Gravas Maipo y Mapocho obtenidas en diferentes localidades de la ciudad de Santiago. También se observó que las Gravas para la Expansión de la Línea 5 a Maipú no exhiben plasticidad y que su porcentaje de finos fluctúa típicamente entre 1% y 3% (gravas limpias).

En la Fig. 3 se ilustran las granulometrías para los suelos finos.

3.1.3 Grados de saturación

De mayor importancia son los grados de saturación para las Pumicitas y los suelos Finos. La Fig. 4 muestra la variación en profundidad del grado de saturación de las Pumicitas ubicadas sobre la napa, insinuándose una tendencia al aumento con la profundidad, pero que no sobrepasa el 70%.

Para los suelos Finos el aumento del grado de saturación con la profundidad es más pronunciado que en las Pumicitas, siendo similar al detectado en la Línea 2 Cerro Blanco-Vespucio y al de la Línea 4 entre Príncipe de Gales y la Rotonda Quilín.

3.1.4 Pesos unitarios

En la Fig. 5 se ilustra la variación del peso unitario total con el grado de saturación incluyéndose como referencia resultados de otras obras.

Para las Pumicitas, considerando un grado de saturación promedio $S = 35\%$ en los primeros 10m de profundidad, se obtiene un peso unitario promedio $\gamma = 1.44 \text{ t/m}^3$. Para profundidades mayores a 10m se define $S=40\%$ como valor promedio con el que se obtiene $\gamma = 1.5 \text{ t/m}^3$. Aún cuando estos pesos unitarios son coherentes con los graficados en la Fig. 6, para efectos de diseño, ante variaciones estacionales del grado de saturación, se adoptará un valor único:

PUMICITA $\gamma = 1.5 \text{ t/m}^3$

Para los suelos Finos, adoptando un grado de saturación promedio $S = 55\%$ para los primeros 10m de profundidad, se obtiene un peso unitario promedio $\gamma = 1.70 \text{ t/m}^3$, mientras que para profundidades mayores a 10m se define $S = 85\%$ con el que se obtiene $\gamma = 1.88 \text{ t/m}^3$. Para efectos de diseño, ante variaciones estacionales del grado de saturación, se adoptará un valor único:

SUELOS FINOS $\gamma = 1.85 \text{ t/m}^3$

Para el caso de las Gravas se utiliza el peso unitario medido en las depositaciones Maipo y Mapocho. Ello debido a la similitud granulométrica y de compacidad con las Gravas de la Expansión de la Línea 5 a Maipú:

GRAVAS ARENOSAS $\gamma = 2.25 \text{ t/m}^3$

3.1.5 Índice de huecos

En la Fig. 7 se representa el índice de huecos de las Pumicitas insinuándose una ligera tendencia a disminuir con la profundidad. Los valores obtenidos están dentro del orden de magnitud para suelos finos.

La Fig. 7 incluye la variación en profundidad del índice de huecos para los suelos Finos, observándose que su promedio es menor al obtenido en las Líneas 2 y 4.

3.1.6 Indíces de penetración estándar

Se registraron en los sondeos ejecutados en la Pumicita Pudahuel y Maipú con los resultados expuestos en la Fig. 8.

En general se aprecia que los índices de penetración en la Pumicita Maipú son inferiores a los obtenidos en la Pumicita Pudahuel, siendo aventurado con solo dos sondajes extrapolar esta diferencia a toda la extensión de los tramos en pumicita. En todo caso, en ambas Pumicitas el índice de penetración estándar es elevado, típicamente superior a 30 golpes, alcanzando bajo los 15m de profundidad valores superiores a 40 golpes e incluso rechazo. A modo de comparación la Fig. 8 incluye valores del índice de penetración estándar para suelos Finos los que resultan ser iguales o inferiores a los de las Pumicitas.

Si bien se registraron índices de penetración en los sondajes ejecutados en los depósitos de Gravas, estos no son representativos por la distorsión generada por los clastos (normalmente +100 golpes o rechazo).

En los suelos Finos prácticamente no se registraron índices de penetración, pudiendo considerarse como representativos los ilustrados en la Fig. 8.

3.1.7 Presión límite y módulos presiométricos

En la Fig. 9 se despliega la variación en profundidad de la presión límite, p_L , obtenida con los ensayos presiométricos.

Para las Gravas de la Línea 5 a Maipú se obtienen valores elevados, $p_L > 24 - 48 \text{ kg/cm}^2$, haciendo notar que el ensayo no alcanzó a definir la presión límite por el excesivo volumen inicial de la cavidad del sondaje, so pena de inflar demasiado la membrana del presiómetro. Una situación similar se generó en las Gravas de la extensión de la Línea 1 a los Domínicos según se ilustra en la Fig. 9 ($p_L > 14 \text{ a } 48 \text{ kg/cm}^2$), o en la Grava de la Línea 2 Cerro Blanco – A. Vespucio en donde $p_L > 20 \text{ kg/cm}^2$.

Para las Pumicitas se obtuvo $p_L > 23 - 36 \text{ kg/cm}^2$ (Pudahuel) y $p_L > 28 - 44 \text{ kg/cm}^2$ (Maipú), resultando ser superiores a la presión límite $p_L = 19 \pm 7 \text{ kg/cm}^2$ para los suelos Finos de las Líneas 2 y 4.

En los suelos Finos de la Expansión de la Línea 5 a Maipú no se ejecutaron ensayos presiométricos, pudiéndose asignarles una presión límite $p_L = 19 \text{ kg/cm}^2$ como valor representativo.

En la Fig. 9 también se representan los módulos presiométricos, E_m , en función de la profundidad. Para las Gravas de la Línea 5 a Maipú se obtienen módulos crecientes en profundidad desde 900 kg/cm^2 a 2000 kg/cm^2 , valores que son comparables con los obtenidos para las Gravas de la Línea 1 a Los Domínicos.

Para la Pumicita Maipú se obtuvo $E_m = 350$ a 930 kg/cm^2 y para la de Pudahuel $E_m = 1100$ a 1470 kg/cm^2 , siendo aventurado extrapolar estas diferencias a toda la longitud de los tramos en Pumicita con valores de solo dos sondajes. En todo caso, los módulos presiométricos en la Pumicita Maipú resultan similares a los módulos presiométricos registrados en los suelos Finos de las Líneas 2 y 4, mientras que los de la Pumicita Pudahuel son 2.5 veces superiores.

En los suelos Finos de la Línea 5 a Maipú no se ejecutaron ensayos presiométricos, pudiéndose asignarles un módulo presiométrico $E_m = 500 \text{ kg/cm}^2$ como valor representativo.

En la Tabla I se resumen los valores de diseño de los índices presiométricos asignados a los distintos tipos de suelos.

TABLA I VALORES DE DISEÑO PARA LOS INDICES PRESIOMETRICOS

Suelo	Presión límite p_L (kg/cm ²)	Módulo presiométrico E_m (kg/cm ²)
Pumicita Pudahuel	30	1300
Pumicita Maipú	30	500
Gravas	40	1500
Suelos Finos	18	500
NOTA: Los valores de los módulos presiométricos se incorporan a los módulos obtenidos con otros tipos de ensayos según se expone en los numerales (3.2.1) a (3.2.3).		

3.2 Propiedades mecánicas para cargas estáticas

3.2.1 Módulos de deformación para las Gravas

En la Fig. 10 se resumen los módulos de deformación estáticos para las Gravas de la Depositación Mapocho, las que se han incluido como antecedente referencial.

Para la expansión de la Línea 5 a Maipú interesa la Fig. 11 en la cual se reproduce la variación en profundidad del módulo de deformación para las Gravas de la Depositación Maipo, la que fue definida con pruebas de carga y presiómetros para otras obras (círculos en blanco). Esta variación sirvió de apoyo para definir la correspondiente a las Gravas de la Línea 5 a Maipú

representadas por el horizonte H-3 (Grava desgranable al impacto) y el horizonte H-4.

De acuerdo a la Fig. 11, para efectos de diseño se utilizará un módulo de deformación en carga definido por las relaciones siguientes:

$$\text{HORIZONTE H-3} \quad E = 4200 Z^{0.55} \quad (1)$$

$$\text{HORIZONTE H-4} \quad E = 5500 Z^{0.53} \quad (2)$$

en (ton/m^2) si la profundidad Z , medida desde la superficie del terreno, se expresa en (m).

Para procesos de descarga o de recarga el módulo de deformación estático se obtendrá multiplicando por 2.0 los valores definidos con las expresiones (1) y (2).

3.2.2 Módulo de deformación para las Pumicitas

En la Fig. 12 se expone la variación en profundidad del módulo de deformación estático para las Pumicitas obtenido mediante pruebas de carga y ensayos presiométricos (Pudahuel) y solamente ensayos presiométricos (Maipú). Como referencia la Fig. 12 incluye la variación promedio en profundidad del módulo de deformación obtenida con ensayos triaxiales en probetas compactadas al 95% del Proctor Modificado provenientes de 6 empréstitos ubicados en diferentes lugares de Santiago.

De la Fig. 12 se desprende, como ya fue establecido en el numeral (3.1.7), que existe una diferencia entre el módulo presiométrico de la Pumicita Pudahuel con respecto al de la Pumicita Maipú. Sin embargo, es aventurado extrapolar esta diferencia a toda la longitud de los tramos en

Pumicita por estar basada en mediciones presiométricas en solo dos sondajes. Es por ello que se recurrió a ensayos triaxiales del tipo CID en probetas no perturbadas extraídas de los lugares indicados en la Fig. 13 con el fin, entre otras cosas, de verificar si se mantenía la diferencia de rigidez registrada con los módulos presiométricos.

En la Fig. 14 se resumen los módulos de deformación obtenidos con los ensayos triaxiales concluyéndose que:

- Existe dispersión aleatoria en los módulos de deformación tanto en planta como en profundidad, atribuible a variaciones del grado de cementación de la pumicita.
- La dispersión registrada con los triaxiales en carga coincide con la variación del módulo presiométrico obtenido con el sondaje en Maipú y con el sondaje en Pudahuel.
- Los módulos de deformación obtenidos con los triaxiales en la Pumicita de Maipú no exhiben diferencias con los obtenidos con los triaxiales en la Pumicita de Pudahuel.
- Los módulos de deformación obtenidos con los triaxiales en descarga resultan del orden de 2.5 veces los obtenidos con los triaxiales en carga.

En base a las conclusiones anteriores, para efectos de diseño se utilizará el módulo de deformación en carga definido con las pruebas de carga, el que se aplicará indistintamente a la Pumicita Pudahuel como a la Pumicita Maipú:

$$E = 2500 Z^{0.55} \quad \text{para } Z \leq 17.5\text{m} \quad (3)$$

$$E = 12.000 \text{ ton/m}^2 \quad \text{para } Z \geq 17.5\text{m} \quad (4)$$

en que E se expresa en (ton/m²) si la profundidad, Z, medida desde la superficie del terreno, se expresa en (m).

Para procesos de descarga o de recarga el módulo de deformación estático se obtendrá multiplicando por 2.5 los valores definidos con las expresiones (3) y (4).

3.2.3 Módulo de deformación para los suelos Finos

En la Fig. 15 se grafican los módulos de deformación estáticos para los suelos Finos de la Línea 5 a Maipú obtenidos mediante triaxiales en carga y, para profundidades reducidas, mediante ensayos de compresión no confinada. Estos resultados aparecen insertos dentro de la banda para los suelos Finos de la extensión Norte de la Línea 2 y del tramo entre Príncipe de Gales y Departamental de la Línea 4.

En base a los resultados de la Fig. 15 el módulo de deformación en carga a utilizar corresponderá al señalado como Diseño Línea 2 en dicha figura:

$$E = 2000 + 210 Z^{1.3} \quad \text{para } Z \leq 12\text{m} \quad (5)$$

$$E = 7300 + 308 (Z - 12) \quad \text{para } Z \geq 12\text{m} \quad (6)$$

en que E se expresa en (ton/m²) si la profundidad Z, medida desde la superficie del terreno, se expresa en (m).

En base a antecedentes obtenidos de la Línea 2, para procesos de descarga o de recarga el módulo de deformación estático se obtendrá multiplicando por 2.0 los valores definidos con las expresiones (5) y (6).

3.2.4 Coeficiente de reposo in-situ para las Gravas

En la Fig. 16 se grafica la variación con la profundidad del coeficiente de reposo in-situ para las Gravas de la Línea 1 a los Domínicos y de la Línea 5 a Maipú, incluyendo como dato referencial los valores obtenidos para otras líneas del Metro. Adicionalmente, la Fig. 16 incorpora el rango del coeficiente de reposo in-situ que mejor ajusta con las mediciones de presión y desplazamientos en dos secciones de la Línea 5 emplazadas en la Grava del Mapocho del Centro de Santiago.⁽¹⁾

Para efectos de diseño se propone utilizar las siguientes expresiones, en las que la profundidad z , medida desde la superficie del terreno, se expresa en (m):

$$(K_o)_{\text{in-situ}} = 0.90 \quad \text{para } Z \leq 6\text{m} \quad (7)$$

$$(K_o)_{\text{in-situ}} = 0.90 - 0.0533(Z - 6) \quad \text{para } 6\text{m} \leq Z \leq 18\text{m} \quad (8)$$

$$(K_o)_{\text{in-situ}} = 0.26 \quad \text{para } Z \geq 18\text{m} \quad (9)$$

3.2.5 Coeficiente de reposo in-situ para las Pumicitas

En la Fig. 17 se grafica la variación con la profundidad del coeficiente de reposo in-situ para las Pumicitas. Habida cuenta que los valores insertos

⁽¹⁾ Braga, P.I., R. Nicolau y A. Negro Jr. (2004). Coeficiente de Empuxo em Repouso do Cascalho de Santiago de Chile: Retroanálisis da Instrumentação de Tunel do Metrô .

en la Fig. 17 se obtuvieron con ensayos presiométricos empleando solo un sondaje en la Pumicita Pudahuel y solo un sondaje en la Pumicita Maipú, es aventurado discriminar entre ambas Pumicitas dado el limitado número de verticales prospectadas. Así entonces, considerando el análisis de los resultados de la Fig. 14 expuesto en el numeral 3.2.2, en que de una gran cantidad de ensayos triaxiales no se aprecian diferencias de rigidez entre la Pumicita de Maipú y la de Pudahuel, se optó por promediar los valores expuestos en la Fig. 17⁽²⁾. Este promedio se traduce en las expresiones siguientes:

$$(K_o)_{in-situ} = 1.8 \quad \text{para } Z \leq 6 \text{ m} \quad (10)$$

$$(K_o)_{in-situ} = 1.8 - 0.217 (Z-6) \quad \text{para } 6 \text{ m} \leq Z \leq 12 \text{ m} \quad (11)$$

$$(K_o)_{in-situ} = 0.5 - 0.007 (Z-12) \quad \text{para } 12 \text{ m} \leq Z \leq 30 \text{ m} \quad (12)$$

en que la profundidad Z, medida desde la superficie del terreno, se expresa en (m).

3.2.6 Coeficiente de reposo in-situ para los suelos Finos

No se ejecutaron ensayos presiométricos destinados a medir el coeficiente de reposo in-situ de los suelos Finos. Sin embargo, considerando la similitud de rigidez (ver Fig. 15) y de resistencia (ver numeral 3.2.9) entre los finos de la Línea 5 a Maipú y los Finos de las Líneas 2 y 4, se contempló el empleo de los coeficientes de reposo expuestos en la Fig. 18. Para la Expansión de la Línea 5 a Maipú se optó por emplear la variación de diseño para la Línea 2:

⁽²⁾ Como se verá en el numeral (3.2.8) tampoco se aprecian diferencias en la resistencia al corte entre las Pumicitas de Maipú y Pudahuel.

$$(K_o)_{\text{in-situ}} = 0.65 \quad \text{para } Z \leq 12 \text{ m} \quad (13)$$

$$(K_o)_{\text{in-situ}} = 0.45 \quad \text{para } Z \geq 12 \text{ m} \quad (14)$$

en que Z es la profundidad medida desde la superficie del terreno.

3.2.7 Parámetros resistentes para las Gravas

Existe similitud granulométrica y de compacidad entre las Gravas de los horizontes H-3 (desgranable) y H-4 de la Línea 5 a Maipú con las Gravas del Mapocho y del Maipo. Para estas últimas su resistencia al corte ha sido caracterizada mediante ensayos a gran escala en muestras no perturbadas. Así entonces, las similitudes permiten utilizar la variación con la deformación de la cohesión, c , y el ángulo de fricción, ϕ , deducida con dichos ensayos y que se expone en la Fig. 19. De esta figura se deducen los valores del par $c_{\text{máx}} - \phi_m$ y del par $c-\phi$ en que:

$c_{\text{máx}}$ = Cohesión máxima que se alcanza para una deformación $\varepsilon = 0.6\%$ (en carga) y $\varepsilon = 0.3\%$ en descarga.

ϕ_m = Angulo de fricción movilizado cuando la cohesión alcanza su valor máximo.

$c-\phi$ = Par cohesión fricción utilizado tradicionalmente en ingeniería geotécnica y que se define con el criterio de desviador máximo; se moviliza para $\varepsilon \approx 2.5\%$ (en carga) y $\varepsilon \approx 1.3\%$ en descarga.

En la Tabla II se resumen los diferentes valores de la cohesión-fricción recién definidos.

**TABLA II: VALOR DE LA COHESIÓN Y DEL ANGULO DE FRICCIÓN
PARA LAS GRAVAS**

Horizonte	Ensayos (Fig. 19)				Análisis retrospectivos		Diseño			
	c_{max} t/m ²	ϕ_m	c t/m ²	ϕ	c_{max} t/m ²	ϕ_m	c_{max} t/m ²	ϕ_m	c t/m ²	ϕ
H-3	2.0	45°	1.25	53°	2.0 a 2.2 ⁽³⁾	45°	2.0	45°	1.25	53°
H-4	3.7 a 4.5	45°	2.3 a 2.8	53°	---	---	3.5	45°	2.15	53°

3.2.8 Parámetros resistentes para Las Pumicitas

Los parámetros de resistencia al corte, c - ϕ , para las Pumicitas se definieron mediante ensayos de compresión no confinada y ensayos triaxiales. Teniendo en cuenta la variación del grado de cementación de las Pumicitas se programó una gran cantidad de ensayos para tener una visión de la distribución espacial de su resistencia. Para evitar sesgos durante el muestreo se prefijaron las profundidades de extracción de las muestras que, en el caso de las compresiones no confinadas, se fijaron rigurosamente cada 3m.

En la Fig. 20 se ilustra el mapa con la distribución de la resistencia a la compresión no confinada, q_u , observándose que dicha distribución es aleatoria, lo que hace concluir que la cementación promedio de la Pumicita Maipú es similar a la de Pudahuel. Se exceptúa la calicata C-12E de

⁽³⁾ Cohesión máxima obtenida de análisis retrospectivos en cortes de antiguos “pozos ripieros”, como fueron los cortes de 17m de altura del Vertedero Lo Errázuriz, y un corte existente de 10m y 75° con respecto a la horizontal ubicado cerca del cruce entre la Ruta 78 a San Antonio y la Avda. Américo Vespucio.

Pudahuel, en donde se aprecia una menor resistencia a la compresión no confinada.

La variación en profundidad de la resistencia a la compresión no confinada se ilustra en la Fig. 21 de la cual se concluye:

- La resistencia a la compresión no muestra una tendencia de variación con la profundidad, sino que normalmente se mantienen dentro del rango 0.5 a 2.5 kg/cm^2 .
- El rango $q_u = 0.5$ a 2.5 kg/cm^2 indica una variación relativamente importante en la cementación de la Pumicitas.
- Los valores de q_u deducidos con los ensayos triaxiales varían normalmente en el rango $q_u = 1.2$ a 3.0 kg/cm^2 , es decir son en promedio 40% superiores a los medidos directamente con los ensayos de compresión no confinada.
- Las muestras de la Pumicita Maipú exhiben valores de q_u distribuidos cuasi uniformemente dentro del rango de valores de la resistencia a la compresión no confinada; esto ratifica que no existen diferencias importantes entre la cementación de la Pumicita Maipú y Pudahuel.

Los ensayos triaxiales en las Pumicitas se ejecutaron en la modalidad en carga y en descarga sobre muestras no perturbadas extraídas de los lugares indicados en la Fig. 13.

En la Fig. 22 se ilustran las envolventes de falla para desviador máximo obtenidos de los triaxiales en carga (definen el tradicional par $c-\phi$) incluyendo como referencia las envolventes obtenidas para Pumicitas compactadas de 6 empréstitos diferentes.

En la Fig. 23 se ilustran las envolventes para desviador máximo obtenidas con los triaxiales en descarga resultando, como era esperable, similares a las definidas con los triaxiales en carga.

En la Fig. 24 se presenta la variación de la cohesión con la deformación (c vs ε) y del ángulo de fricción con la deformación (ϕ vs ε) lo que permitió definir el par $c_{\max} - \phi_m$ para las Pumicitas.

La Fig. 25 presenta un resumen de todos los triaxiales ejecutados en la que los puntos representan los diferentes pares $c-\phi$ obtenidos para desviador máximo así como los diferentes pares $c_{\max} - \phi_m$.

En la Tabla III se entrega el par cohesión fricción a utilizar en el diseño ya sea en la modalidad $c_{\max} - \phi_m$ o en la modalidad $c-\phi$. La elección de estos pares resistentes se efectuó utilizando la Fig. 25.

TABLA III VALORES DE DISEÑO PARA LA COHESIÓN Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LAS PUMICITAS

Promedio		Mínimo		Promedio		Mínimo	
$c_{\max} (t/m^2)$	ϕ_m	$c_{\max} (t/m^2)$	ϕ_m	$c (t/m^2)$	ϕ	$c (t/m^2)$	ϕ
3.8	42.5°	2.9	42.5	2	45°	1.1	45°
4.7	40°	3.6	40°	4	40°	2.9	40°
6.5	35°	4.6	35°	6	35°	4	35°
7.7	30°	5.0	30°				

El empleo del par $c_{\max} - \phi_m$ es válido en tanto la deformación en carga no sobrepase 1% y en descarga 0.5%.

Se verificará la estabilidad empleando las distintas combinaciones promedio $c_{m\acute{a}x} - \phi_m$ ó $c - \phi$.

Las secciones entre las calicatas C-11E a C11T se recomienda verificarlas con los valores mínimos.

3.2.9 Parámetros resistentes para los suelos Finos

En la Fig. 26 se muestra la variación de la resistencia a la compresión no confinada, q_u , con el grado de saturación, S , sin que se visualice una relación clara entre ambos parámetros. La figura indica además que la distribución de la resistencia q_u vs S para los suelos Finos de la Línea 5 a Maipú es tan errática como la registrada en las Líneas 2 y 4. Como antecedente adicional, la Fig. 26 compara la resistencia a la compresión obtenida cargando vertical y horizontalmente el suelo, sin que se observe una anisotropía de interés para el diseño.

De mayor interés es la Fig. 27 que compara la variación en profundidad de la resistencia q_u para los suelos Finos de la Línea a Maipú con la de los suelos Finos en las Líneas 2 y 4, sin que se aprecien diferencias significativas.

En la Fig. 28 se resumen las envolventes de falla para desviador máximo obtenidas mediante ensayos triaxiales con carga controlada y con deformación controlada, sin que se aprecien diferencias entre los resultados obtenidos con ambos tipos de ensayos. La figura incluye las envolventes de falla extremas para los suelos Finos de la Línea 2, las envolventes para los suelos finos de la propia Línea 5 a Maipú y la envolvente para los suelos

Finos en Américo Vespucio entre la Ruta 78 a San Antonio y el Paso Inferior Los Mares (tramo ubicado al Poniente de la Línea 5).

Para efectos de diseño se utilizará:

Cohesión	$c = 3 \text{ t/m}^2$
Angulo de fricción	$\phi = 31^\circ$

3.2.10 Módulo de Poisson y Ángulos de Dilatancia

Gravas Los ensayos triaxiales ejecutados en las Gravas del Maipo y del Mapocho permiten definir el módulo de Poisson instantáneo y secante en función de la deformación y de la tensión de confinamiento del suelo, con lo cual se incorpora automáticamente el efecto de la dilatación⁽⁴⁾. Sin embargo, esta forma de modelar el problema se podría traducir en un mayor esfuerzo computacional, lo que conduce a formular módulos a pequeñas deformaciones acoplados con el ángulo, ψ , utilizado por el programa FLAC para representar la dilatación. En consecuencia, para el diseño se utilizará:

Módulo de Poisson	$\nu = 0.25$
Angulo de Dilatancia	$\psi = 12^\circ$
Aplicables a los horizontes	H-3 y H-4

Pumicitas Los ensayos triaxiales drenados en carga ejecutados en las arenas limosas de origen volcánico (pumicita) muestran un comportamiento contractivo. Se exceptúan algunas probetas con bajas presiones de confinamiento ($\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$) que

⁽⁴⁾ Informe PETRUS N° 2191-930/2002.

exhiben dilatancia para deformaciones de 3% a 4%. Los triaxiales en descarga muestran comportamiento contractivo. Por consiguiente, para efectos de diseño, se adoptará:

Módulo de Poisson $\nu = 0.30$

Angulo de Dilatancia $\psi = 0$

Suelos Finos: Los ensayos triaxiales drenados ejecutados en los suelos Finos de la Línea 5 a Maipú arrojan un comportamiento contractivo. Esto queda refrendado por los triaxiales saturados no drenados en los suelos finos de Américo Vespucio (entre el Enlace Quilicura y El Salto) que sólo muestran comportamiento dilatante para deformaciones $\varepsilon \geq 5\%$. Por consiguiente, para efectos de diseño se adoptará:

Módulo de Poisson $\nu = 0.30$

Angulo de Dilatancia $\psi = 0$

3.3 Propiedades mecánicas para cargas cíclicas (sismo)

3.3.1 Coeficientes de deformación cíclica

Este coeficiente representa la magnitud de las deformaciones anelásticas (no recuperables) que experimenta el suelo debido a la aplicación de una carga a cíclica. Se utiliza en la definición de la rigidez cíclica del suelo tal como se expone en el numeral 3.3.2.

En la Fig. 29 se grafica la variación del coeficiente de deformación cíclica, m_c , con el número de ciclos de amplitud constante aplicados al suelo. De acuerdo a esta figura y teniendo en cuenta que al sismo de diseño se le asocian 30 ciclos equivalentes de amplitud constante, los valores de diseño para el coeficiente m_c son los siguientes.

Gravas	$m_c = 0.80$
Pumicitas	$m_c = 0.80$
Suelos finos	$m_c = 1.60$

3.3.2 Módulo de deformación cíclico para las Gravas

Para modelar la interacción sísmica de fundaciones se utilizará la constante de balasto para carga cíclica, k_c , obtenida como:

$$k_c = \frac{I_p}{F_1 F_2 m_c} k_e \quad (15)$$

k_e = Constante de balasto para carga estática definida con el módulo de deformación para carga estática (ver numerales 3.2.1, 3.2.2 ó 3.2.3 según se trate de Gravas, Pumicitas o Suelos Finos, respectivamente).

m_c = 0.80 según el numeral (3.3.1).

F_1 = 1.0 si la tensión cíclica varía simétricamente en torno a la tensión estática.

F_1 = 0.6 si la tensión cíclica varía asimétricamente en torno a la tensión estática (por ej. en la fundación de un muro de contención).

F_2 = 0.65 si las tensiones cíclicas se evalúan con la aceleración máxima del sismo de diseño.

F_2 = 1.0 si las tensiones cíclicas se evalúan con el coeficiente sísmico reducido.

I_p = 0.79 para fundaciones circulares.

I_p = $0.88 \left(\frac{1.5}{1+0.5 B/L} \right)$ siendo B el lado menor de una fundación rectangular y L el lado mayor.

Para el análisis sísmico de estructuras enterradas utilizando la modelación cinemática, los parámetros requeridos por dicho modelo tales como la desangulación sísmica del suelo en campo libre y los resortes horizontales de interacción entre el suelo y la estructura se determinarán empleando el módulo de deformación cíclico, E_c^* , dado por la relación siguiente:

$$E_c^* = 140 (1 + \nu) K_2 \sqrt{\sigma_c} \quad (16)$$

$$\sigma_c = \sigma_v \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \right) \quad (17)$$

en que E_c^* = Módulo de deformación cíclico en (ton/m²)

K_2 = Coeficiente de corte cíclico para las Gravas obtenido de la Fig. 30.

σ_v = Tensión vertical en (ton/m²) a la profundidad donde se está determinando el módulo E_c^* .

ν = Módulo de Poisson de las Gravas definido en el numeral (3.2.10).

K_o = Coeficiente de reposo in-situ definido en el numeral (3.2.4).

3.3.3 Módulo de deformación cíclico para las Pumicitas

Para modelar la interacción sísmica de fundaciones, la constante de balasto para carga cíclica, k_c , se obtendrá con la expresión (15). Los términos presentes en dicha expresión son los mismos establecidos para las gravas en el numeral (3.3.2).

Para el análisis sísmico de estructuras enterradas empleando la modelación cinemática se utilizarán las expresiones (16) y (17) en las que:

E_c^* = Módulo de deformación cíclico en (ton/m²)

K_2 = Coeficiente de corte cíclico para las Pumicitas obtenido con la curva de diseño de la Fig. 30

σ_v = Tensión vertical en (ton/m²) a la profundidad donde se está determinando el módulo E_c^* .

ν = Módulo de Poisson de las Pumicitas definido en el numeral (3.2.10).

K_0 = Coeficiente de reposo in-situ para las Pumicitas definido en el numeral (3.2.5).

3.3.4 Módulo de deformación cíclica para los suelos Finos

Para la interacción sísmica de fundaciones la constante de balasto para carga cíclica, k_c , se obtendrá con la expresión (15).

Los términos presentes en dicha expresión son los mismos establecidos para las Gravas en el numeral (3.3.2) con las siguientes excepciones:

m_c = 1.60 según el numeral (3.3.1).

F_2 = 0.45 si las tensiones cíclicas se evalúan con la aceleración máxima del sismo de diseño.

F_2 = 1.0 si las tensiones cíclicas se evalúan con el coeficiente sísmico

reducido.

Para la modelación cinemática destinada al análisis sísmico de estructuras enterradas se utilizarán las expresiones (16) y (17) en las que:

E_c^* = Módulo de deformación cíclico en (ton/m²)

K_2 = Coeficiente de corte cíclico para los suelos Finos generado empleando el $K_{2\text{máx}}$ de diseño indicado en la Fig. 31 y las curvas de Vucetic y Dobry para un índice de plasticidad 10 (ver Manual de Carreteras).

σ_v = Tensión vertical en (ton/m²) a la profundidad donde se determina el módulo E_c^* .

ν = Módulo de Poisson del suelo Fino definido en el numeral (3.2.10).

K_0 = Coeficiente de reposo in-situ del suelo Fino definido en el numeral (3.2.6).

4. HIDROGEOLOGIA DEL SUBSUELO

4.1 Aspectos Geológicos Generales

La cuenca de Santiago corresponde a una sucesión de rellenos aluviales de origen glaciofluvial, es decir, corresponden a sedimentos de origen glacial erodados por las aguas de los ríos y retransportados por estos hasta su nuevo lugar de depositación. No es extraño entonces el hecho, muy común en la cuenca, de encontrar junto con materiales gruesos bien redondeados (ripió), otros angulosos y con claras manifestaciones de su origen glacial; del mismo modo, con frecuencia se ubican bastante aguas abajo de los ríos Mapocho y Maipo, bloques con tamaño muy superior al de los rodados que los acompañan y que son restos, in situ, de morrenas rebajadas por aguas superficiales.

Durante el primer período interglacial, cuando el régimen de lluvias hizo posible la permanencia de los caudales superficiales, los ríos principales de la cuenca avanzaron en el valle a través de cauces bastantes diferentes de los que hoy les conocemos. Evidentemente, la depositación de materiales con menor contenido de finos arcillosos, más permeables y favorables para la existencia de acuíferos importantes, se habrá producido en o cerca de tales cauces.

Por lo mismo, se desarrollaron sectores donde el arrastre fluvial fue menor o más lento promoviendo la depositación de material fino lo que configuró lo que conocemos hoy como gravas fluviales con vías preferenciales de escurrimiento.

Estas llamadas vías preferenciales corresponden a tubificaciones de posición aleatoria por donde alguna vez percoló agua subterránea y/o superficial

4.2 Cuenca Hidrográfica

4.2.1 Sistema Hidrográfico

En términos generales la cuenca de Santiago se enmarca al sur por el paso de la Angostura de Paine, al norte por los cerros de la cuesta El Manzano y al oeste por la cordillera de la costa.

Esta cubre todos los conos de rodado de los ríos Maipo y Mapocho cuyos límites oeste exhiben sedimentos producto de antiguos y actuales cambios de curso, los que enfrentados a la cordillera de la costa, disminuyen su velocidad de escurrimiento.

4.2.2 Cuadro Sedimentario General

El río Mapocho fue capaz de erodar un amplio cauce a través de la Morrena Primera, el cual rellenó, en sus etapas de sedimentación, con un potente espesor de acarreos compuestos por materiales propios de la morrena.

Los materiales lavados de los depósitos morrénicos constituirían los últimos depósitos sedimentarios importantes que llegaron al valle en esta parte y presumiblemente corresponden a aquellos grandes bloques que se encuentran dispersos sobre toda la superficie del terreno.

En su último período el río Mapocho sometió a la región baja a la acción sedimentaria de los materiales lavados de los cerros cordilleranos

complementados además con los desbordes del río en períodos de precipitaciones muy grandes.

Fusiones violentadas por la actividad volcánica han producido acciones de relleno muy enérgicas dentro de la cuenca de Santiago, con llenado de vastas superficies con cenizas volcánicas mezcladas con arcillas y arenas las cuales se ubican bajo los rípios aluviales, emergiendo hacia el sur oeste de la cuenca.

4.2.3 Aguas Subterráneas

El agua proveniente de precipitaciones, en parte se adentra en el subsuelo exhibiendo una superficie freática bajo la cual los suelos presentan una condición de saturación. Esta superficie puede corresponder a un acuífero libre o acuíferos colgados que responden a acumulaciones locales de aguas sobre lentes de suelo impermeables.

En la cuenca de Santiago predominan los acuíferos libres, sin embargo, en el área de Pudahuel y Maipú existe una cubierta impermeable de ceniza volcánica que origina confinamientos locales de aguas subterráneas.

La forma de la superficie freática es similar a la superficie topográfica y se acercan hacia el oeste y suroeste llegando a aflorar hacia la parte occidental de la cuenca.

Hacia Las Condes el nivel freático se sitúa entre 25m y 50m, hacia el centro de Santiago en torno a 50m y hacia el sector de Maipú, cercano a los 30m

4.3 Aspectos Geotécnicos

Analizados los orígenes de la matriz de suelo que contiene el agua subterránea detectada en algunas de las calicatas, se analiza la influencia de esta agua principalmente durante la construcción del proyecto.

Las excavaciones en el terreno destinado al proyecto compromete suelos de permeabilidad variable y la distribución de las aguas estará controlada por la presencia de barreras impermeables o permeables. En efecto, cada una de las unidades de suelos presenta una configuración granulométrica en la cual la matriz, presenta una permeabilidad dispar con eventuales vías preferenciales o “dedos de agua” contenidas en el cuerpo del horizonte.

Resulta entonces relevante conocer la distribución estratigráfica en profundidad para el subsuelo en estudio que incluya mediciones de la permeabilidad del estrato atravesado. Para logra lo anterior se realizaron ensayos in-situ tendientes a conocer la permeabilidad (k) en profundidad. Cabe señalar que los valores del coeficiente de permeabilidad, si son efectuados sobre la matriz cerrada del depósito, no reflejan la existencia de vías preferenciales con permeabilidades muy superiores.

4.4 Modelo estratigráfico

La estratigrafía adoptada corresponde a suelos granulares cuya superficie freática se ubica por sobre un basamento impermeable de profundidad desconocida.

La figura 1 muestra un esquema del modelo estratigráfico adoptado para la estimación de la permeabilidad del horizonte granular por donde escurrirá la napa hacia la excavación.

4.5 Prospecciones y Ensayes

Para la presente campaña de exploración, se ejecutaron dos tipos de ensayos:

Ensayo de Recuperación en Calicatas

Se adoptó como procedimiento de trabajo estándar básico el siguiente:

- Medición de la cota del espejo de agua antes de iniciar el bombeo.
- Bombeo de la napa hasta la mayor profundidad posible al interior del pozo. Se registra el tiempo que demora el agote.
- Registro de la cota del espejo de agua correspondiente a la máxima depresión en régimen permanente al interior de la calicata.
- Detención del bombeo y registro, a intervalos de tiempo según una secuencia preestablecida, de la cota del espejo de agua conforme recupera su nivel original.

Adicionalmente se midió el gasto a extraer para mantener la napa deprimida a un nivel constante. Esto se hizo en este caso dado que es un dato necesario dada la estratigrafía detectada en este sector.

Una vez deprimida la napa en su interior, se realizó una inspección visual de las paredes por donde escurría el agua y se registró la sección promedio de la excavación en la altura mojada.

Ensaye tipo Le Franc

Se ejecuta en Sondajes y permite aprovechar la perforación de estos en una longitud predefinida. Básicamente se deprime el nivel de agua al interior de la perforación y se registra el ascenso en el tiempo. Resulta equivalente inyectar agua y medir su descenso en el tiempo.

La figura 2 esquematiza este ensayo en sondajes.

La Tabla I siguiente señala el tipo de ensaye, la ubicación y el tipo de suelo asociado al ensayo.

TABLA I

Tipo Ensaye	Ubicación	Profundidad	Tipo de Suelo
Recuperación	Calicata C4E	21.0	Arena gravosa
Recuperación	Calicata C7T	24.7	Pumicita
Le Franc	S1T	30.5	Pumicita
Le Franc	S2T	37.6	Arena gravosa
Le Franc	S3T	30.0	Pumicita
Le Franc	S7T	30.1	Pumicita

4.6 Permeabilidad de los diferentes estratos

Siguiendo la metodología señalada en 4.5, se procesó la información obtenida de los ensayos.

Para el caso de la recuperación de napa en calicatas lo que correspondió fue determinar la permeabilidad para un escurrimiento permanente, para ello se midió el gasto Q_p , dado un nivel de depresión de la napa conocido.

Así entonces, el cálculo viene dado por la siguiente expresión:

$$k = \frac{Q_p \cdot \ln(R/r_w)}{\pi \left[(H - S)^2 - t^2 \right] \left[1 + \left(0.30 + \frac{10r_w}{H} \right) \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{1.8 \cdot S}{H} \right) \right]}$$

Para el caso de los ensayos tipo Le Franc en sondajes, la permeabilidad se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$k = \frac{r^2}{2L} \operatorname{en} \left(\frac{L}{r} \right) \left[\frac{\ln(h_1/h_2)}{t_2 - t_1} \right]$$

La figura 2 esquematiza el ensayo e indica los parámetros involucrados en la expresión para el cálculo de k .

Las tablas siguientes II a V entregan los registros para cada uno de los ensayos ejecutados y el correspondiente cálculo de permeabilidad.

TABLA II
REGISTRO DE RECUPERACIÓN Y CÁLCULO DE PERMEABILIDAD EN GRAVA ARENOSA

Mediciones de Recuperación de napa									
b= 80 cm			ro= 42,2 cm						
L= 70 cm			Prof. Calicata 24 m						
H= 3,67 m			Ajuste cero huincha 80 cm						
Calicata C4E			t'= 4,5 min 270 seg						
Tipo de suelo		Arena Gravosa		Clasificación USCS		SP			
Tiempo	Tiempo	h	h	ho	H-ho	$\Delta h/\Delta t$	to		
min	seg	seg	m cm	cm	m	cm	cm/s	seg	
0	0	0	22 32	2152	2,48	119		270	
0	30	30	22 30	2150	2,50	117	0,067	300	
1	0	60	22 29	2149	2,51	116	0,033	330	
3	0	180	22 22	2142	2,58	109	0,058	450	
5	0	300	22 15	2135	2,65	102	0,058	570	
10	0	600	22 2	2122	2,78	89	0,043	870	
15	0	900	21 89	2109	2,91	76	0,043	1170	
30	0	1800	21 58	2078	3,22	45	0,034	2070	
46	0	2760	21 37	2057	3,43	24	0,022	3030	
60	0	3600	21 25	2045	3,55	12	0,014	3870	
75	10	4510	21 18	2038	3,62	5	0,008	4780	
90	5	5405	21 14	2034	3,66	1	0,004	5675	
100	0	6000	21 13	2033	3,67	0	0,002	6270	

Medición de caudal para $h_o = \text{cte.}$					
Volumen P_2	18,50 l	B	70 cm		
t_1	7,15 s	L	80 cm		
t_2	7,70 s	r_w	42,2 cm		
t_3	6,90 s				
Q_1	2,59E-03 m^3/s	Q_{prom}	2,56E-03 m^3/s		
Q_2	2,40E-03 m^3/s			2557 cm^3/s	
Q_3	2,68E-03 m^3/s				

Permeabilidad							
R	ln(R/r _w)	s	s	H	k	R	ΔR
cm		m	cm	cm	cm/s	cm	%
10000	5,47	0,01	1	168	0,23	10298	3,0
15000	5,87	0,71	71	238	0,13	14986	0,1
20000	6,16	1,20	120	287	0,12	19970	0,2
25000	6,38	1,65	165	332	0,13	25057	0,2
30000	6,57	2,05	205	372	0,13	29904	0,3
40000	6,85	2,83	283	450	0,14	39952	0,1
100000	7,77	6,90	690	857	0,19	99782	0,2
k=		1,53E-01 cm/s					

TABLA III
REGISTRO DE RECUPERACIÓN Y CÁLCULO DE PERMEABILIDAD EN CENIZA VOLCÁNICA

Mediciones de Recuperación de napa									
b= 89,5 cm			ro= 50,5 cm						
L= 89,5 cm			Prof. Calicata 25,7 m						
H= 0,36 m			Ajuste cero huincha 0 cm						
Calicata C7T			t'= 3,15 min 189 seg						
Tipo de suelo		Arena Limosa		Clasificación USCS		SM			
Tiempo	Tiempo	h	h	ho	H-ho	$\Delta h/\Delta t$	to		
min	seg	seg	m cm	cm	m	cm	cm/s	seg	
0	0	0	25 67	2567	0,03	33		189	
1	0	60	25 66	2566	0,04	32	0,017	249	
3	0	180	25 61	2561	0,09	27	0,042	369	
5	0	300	25 60	2560	0,10	26	0,008	489	
7	0	420	25 58	2558	0,12	24	0,017	609	
10	0	600	25 56	2556	0,14	22	0,011	789	
20	0	1200	25 53	2553	0,17	19	0,005	1389	
30	0	1800	25 46	2546	0,24	12	0,012	1989	
45	0	2700	25 41	2541	0,29	7	0,006	2889	
60	0	3600	25 40	2540	0,30	6	0,001	3789	
75	10	4510	25 39	2539	0,31	5	0,001	4699	
90	5	5405	25 37	2537	0,33	3	0,002	5594	
120	0	7200	25 34	2534	0,36	0	0,002	7389	
180	0	10800	25 27	2527	0,43	-7		10989	

Medición de caudal para $h_o = \text{cte.}$					
Volumen P_2	23,00 l	B	89,5 cm		
t_1	878,00 s	L	89,5 cm		
t_2	1050,00 s	r_w	50,5 cm		
t_3	1101,00 s				
Q_1	2,11E-05 m ³ /s	Q_{prom}	1,85E-05 m ³ /s		
Q_2	1,76E-05 m ³ /s			18 cm ³ /s	
Q_3	1,68E-05 m ³ /s				

Permeabilidad							
R	ln(R/r _w)	s	s	H	k	R	ΔR
cm		m	cm	cm	cm/s	cm	%
10000	5,29	10,00	1000	1167	0,000973	10011	0,1
15000	5,69	14,20	1420	1587	0,001121	14969	0,2
20000	5,98	18,30	1830	1997	0,001229	19980	0,1
25000	6,20	22,30	2230	2397	0,001311	24984	0,1
30000	6,39	26,20	2620	2787	0,001377	29948	0,2
40000	6,67	34,00	3400	3567	0,001480	40048	0,1
100000	7,59	78,00	7800	7967	0,001783	99685	0,3
k=		1,32E-03 cm/s					

TABLA IV
REGISTRO DE ENSAYES LEFRANC Y CÁLCULO DE PERMEABILIDAD

Sondaje	S1T		
Tipo de Suelo	Pumicita		
Clasificación USCS	SM		
Tramo ensaye desde	30,5 m		
Tramo ensaye hasta	31,3 m		
Longitud bajo zapata	0,8 m		
Longitud ensayo	0,75 m		
Diámetro perforación	0,0596 m		
Nivel agua en sondaje antes de ensayo	1 m		
Longitud del tubo sobre nivel de terreno	0 m		
Coefficiente de forma	1,46		
Altura inicial de carga	30,9 m		
gasto constante	0,27 l/min		

Tiempo	Descenso	Carga Hidráulica	Coefficiente de Permeabilidad
min	cm	m	cm/s
0	0,00	30,900	
1	5,00	30,850	5,15E-06
3	17,00	30,730	6,20E-06
5	28,00	30,620	5,71E-06
7	38,00	30,520	5,21E-06
10	57,00	30,330	6,63E-06
15	90,00	30,000	6,96E-06
20	115,00	29,750	5,33E-06
30	160,00	29,300	4,85E-06
45	230,00	28,600	5,13E-06
60	305,00	27,850	5,64E-06
90	395,00	26,950	3,49E-06

Sondaje	S2T		
Tipo de Suelo	Arena gravosa		
Clasificación USCS	SM		
Tramo ensaye desde	37,57 m		
Tramo ensaye hasta	38,12 m		
Longitud bajo zapata	0,55 m		
Longitud ensayo	0,5 m		
Diámetro perforación	0,0596 m		
Nivel agua en sondaje antes de ensayo	10 m		
Longitud del tubo sobre nivel de terreno	0,61 m		
Coefficiente de forma	1,11		
Altura inicial de carga	38,46 m		
gasto constante	1,22 l/min		

Tiempo	Descenso	Carga Hidráulica	Coefficiente de Permeabilidad
min	cm	m	cm/s
0	0,00	38,460	
1	20,00	38,260	2,18E-05
3	60,00	37,860	2,19E-05
5	102,00	37,440	2,33E-05
7	136,00	37,100	1,90E-05
10	189,00	36,570	2,00E-05
15	280,00	35,660	2,10E-05
20	337,00	35,090	1,35E-05
30	468,00	33,780	1,59E-05
45	644,00	32,020	1,49E-05
60	806,00	30,400	1,44E-05
90	1085,00	27,610	1,34E-05
120	1316,00	25,300	1,22E-05
150	1530,00	23,160	1,23E-05

TABLA V
REGISTRO DE ENSAYES LEFRANC Y CÁLCULO DE PERMEABILIDAD

Sondaje	S3T	
Tipo de Suelo	Pumicita	
Clasificación USCS	SM	
Tramo ensaye desde	30	m
Tramo ensaye hasta	31	m
Longitud bajo zapata	1	m
Longitud ensayo	0,95	m
Diámetro perforación	0,0596	m
Nivel agua en sondaje antes de ensayo	5,5	m
Longitud del tubo sobre nivel de terreno	0,55	m
Coeficiente de forma	1,72	
Altura inicial de carga	31,05	m
gasto constante	0,01	l/min

Tiempo	Descenso	Carga Hidráulica	Coeficiente de Permeabilidad
min	cm	m	cm/s
0	0,00	31,050	
1	0,20	31,048	1,74E-07
3	0,40	31,046	8,69E-08
5	0,60	31,044	8,69E-08
7	0,80	31,042	8,69E-08
10	1,00	31,040	5,79E-08
15	1,40	31,036	6,95E-08
20	1,80	31,032	6,95E-08
30	2,50	31,025	6,08E-08
45	3,80	31,012	7,53E-08
60	5,00	31,000	6,96E-08

Sondaje	S7T	
Tipo de Suelo	Pumicita	
Clasificación USCS	SM	
Tramo ensaye desde	30,1	m
Tramo ensaye hasta	31	m
Longitud bajo zapata	0,9	m
Longitud ensayo	0,85	m
Diámetro perforación	0,0958	m
Nivel agua en sondaje antes de ensayo	23,4	m
Longitud del tubo sobre nivel de terreno	0,4	m
Coeficiente de forma	1,86	
Altura inicial de carga	30,95	m
gasto constante	1,6	l/min

Tiempo	Descenso	Carga Hidráulica	Coeficiente de Permeabilidad
min	cm	m	cm/s
0	0,00	30,950	
1	0,50	30,945	1,05E-06
3	5,00	30,900	4,71E-06
5	8,40	30,866	3,56E-06
7	11,80	30,832	3,57E-06
10	17,00	30,780	3,64E-06
15	25,00	30,700	3,37E-06
20	34,00	30,610	3,80E-06
30	51,00	30,440	3,60E-06
45	76,00	30,190	3,56E-06
60	108,00	29,870	4,60E-06

Considerando todos los antecedentes y resultados obtenidos, se concluye que, según sea el tipo de suelo a atravesar con las excavaciones, los ordenes de magnitud de la permeabilidad a adoptar serán:

TABLA VI

Tipo de Suelo	Permeabilidad [cm/s]
Grava Arenosa	3.0×10^{-1}
Pumicita	1.0×10^{-3}

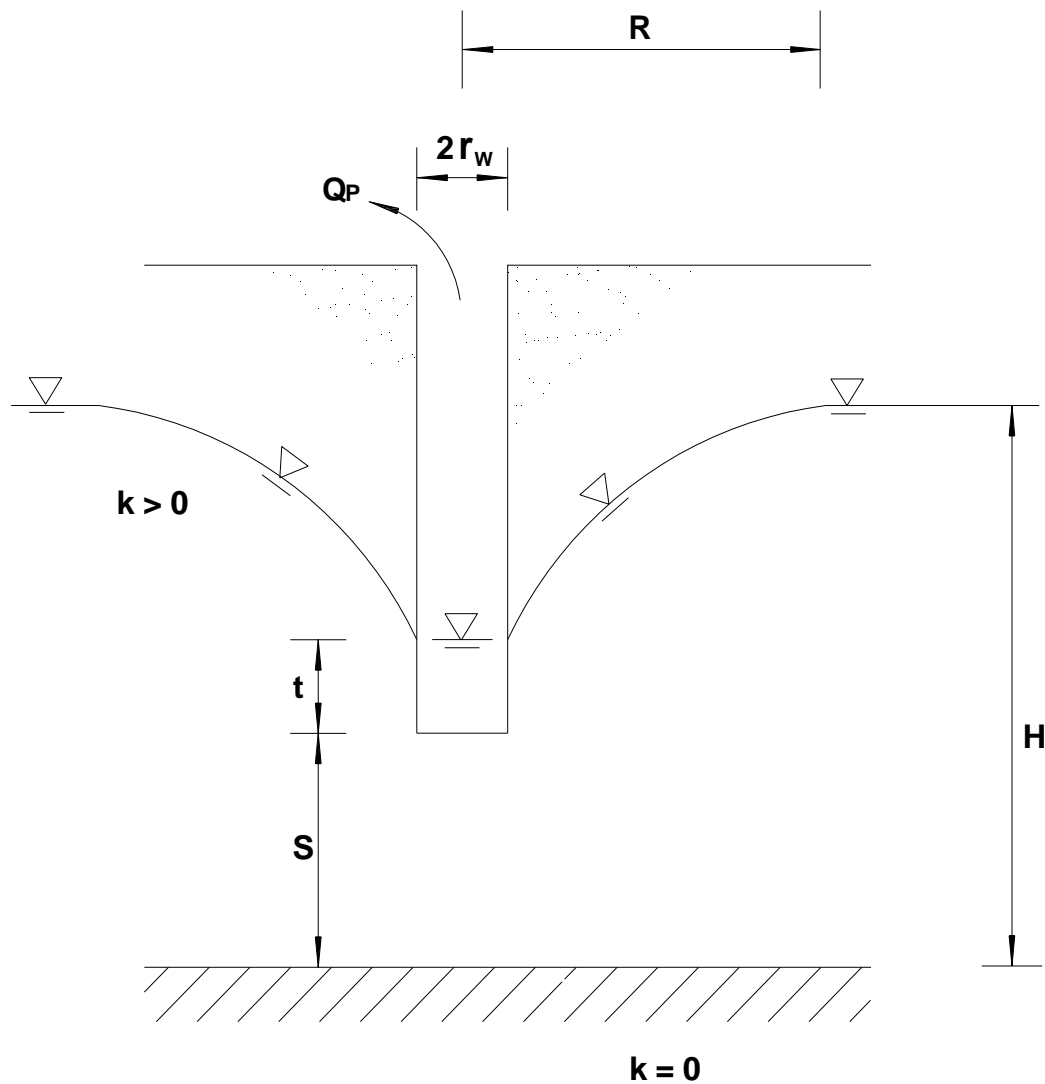
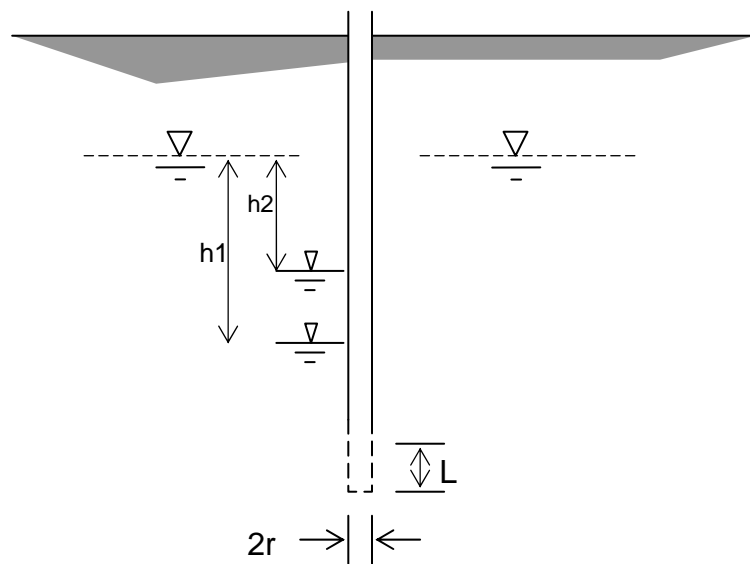


FIG. 1 GEOMETRIA PARA GASTO PERMANENTE Y PENETRACION PARCIAL EN ACUIFERO.



$$k = \frac{r^2}{2L} \cdot \ln\left(\frac{L}{R}\right) \cdot \frac{\ln(h_1 / h_2)}{t_2 - t_1}$$

FIG. 2 ESQUEMA DE CÁLCULO ENSAYO LE FRANC

FIGURAS