

Influencia de la granulometría en las propiedades dinámicas de suelos no cohesivos bajo pequeñas deformaciones

Rafael A. Martínez^{1,2}

¹Arcadis Geotécnica, Eliodoro Yáñez 1893, Providencia, Santiago, Chile. rafael.martinez@arcadis.cl

²Anteriormente, Institut für Grundbau, Ruhr Universität Bochum, Alemania.

Resumen

La elevada complejidad y el alto costo de la medición de parámetros dinámicos en los suelos, induce la utilización de fórmulas empíricas para la estimación de éstos. A pesar de no existir abundante ni sistemática información sobre la influencia de la curva granulométrica en las propiedades dinámicas de los suelos, existen publicaciones donde se exhibe la falta de precisión de estas fórmulas frente a algunos tipos de suelos. Este trabajo estudia la influencia del diámetro medio de las partículas sobre las propiedades dinámicas de los suelos no cohesivos. El estudio se basa en ensayos de columna resonante empleando 8 arenas con distinto diámetro medio de partículas, igual coeficiente de uniformidad y sin contenido de finos. Se miden las ondas P, se obtiene información del módulo de corte, el amortiguamiento y el módulo de elasticidad. Se encuentra así un rango para el diámetro medio de las partículas donde el módulo de corte máximo G_{max} y el módulo de elasticidad $E_{s,max}$ son independientes de éste. Así mismo se encontró un rango para el diámetro medio de las partículas donde las curvas $GI/G_{max}(\gamma^{ampl})$ y $D(\gamma^{ampl})$ para presión constante pueden ser descritas mediante una única expresión. Se concluye así que los parámetros dinámicos en estudio, son independientes, en un rango dado, del diámetro medio de las partículas.

Palabras clave: amortiguamiento, columna resonante, deformación angular, granulometría, módulo de corte.

INTRODUCCIÓN

La determinación de las propiedades dinámicas de los suelos es necesaria para el cálculo dinámico de estructuras, en especial el módulo dinámico de corte.

Los ensayos de laboratorio y en terreno para la determinación de estas propiedades dinámicas son técnicamente complejos y en muchos casos, como para el cálculo de fundaciones de pequeñas máquinas, económicamente inviables. En estos casos se determina el módulo dinámico de corte dinámico con fórmulas empíricas simples, que en el caso de suelos no cohesivos consideran la tensión media, el índice de vacíos, la amplitud de la deformación angular y la forma de los granos. Hasta la fecha no se ha considerado la influencia de la curva granulométrica. Sin embargo, ensayos de laboratorio (Triantafyllidis et al., 2004a y 2004b; Wichtmann y Triantafyllidis, 2004a y 2004b), muestran que para tensiones e índices de vacíos constantes el módulo dinámico de corte decae con coeficientes de uniformidad y contenido de finos crecientes. El módulo dinámico de corte de un suelo con coeficiente de uniformidad alto puede ser sobreestimado hasta en un 70 % con las fórmulas típicamente utilizadas, es decir,

se pronosticaría un comportamiento demasiado rígido del suelo.

La presente investigación se realizó junto al departamento de mecánica de suelos de la Universidad de Bochum, Alemania, bajo el marco de un proyecto financiado por la Sociedad de investigación alemana (Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG). La meta de este proyecto apunta a considerar la influencia de la curva granulométrica (en especial el coeficiente de uniformidad y el contenido de finos), en las fórmulas empíricas, en base a ensayos de columna resonante. En este proyecto se realizaron distintas series de ensayos para estudiar el efecto separado del diámetro medio de las partículas d_{50} , el coeficiente de uniformidad C_u y el contenido de finos CF . Finalmente se analizó la influencia de los resultados en arenas naturales.

En este trabajo se estudió la influencia del d_{50} sobre el módulo de corte G y el amortiguamiento D . Ocho arenas mezcladas artificialmente fueron ensayadas con distinto d_{50} , idéntico C_u y sin contenido de finos. La columna resonante fue modificada para medir también la velocidad de las ondas de compresión (ondas P). De esta forma se obtiene importante información adicional, ya que la

influencia de la curva granulométrica sobre la velocidad de las ondas P y, en consecuencia, el módulo de elasticidad bajo pequeñas deformaciones E , no han sido investigados hasta ahora.

De esta forma se necesita buscar el rango para d_{50} donde el módulo de corte máximo G_{max} y el módulo de elasticidad $E_{s,max}$ sean independientes del d_{50} . Para ello, se debe presentar una ecuación para cada parámetro que describa su comportamiento. Asimismo se requiere encontrar un rango para el d_{50} donde las curvas $G/G_{max}(\gamma^{ampl})$ y $D(\gamma^{ampl})$ y para una presión media p constante, puedan ser descritas mediante una única expresión, donde γ^{ampl} corresponde a la amplitud de la deformación angular. De esta manera se podrá concluir si los parámetros dinámicos en estudio, son o no independientes, en un rango dado del d_{50} .

Este artículo parte describiendo los principales resultados referentes a la influencia de la curva granulométrica en las propiedades dinámicas de los suelos no cohesivos.

Se realiza luego una descripción de la metodología de trabajo empleada para la determinación de los objetivos; se describe el equipo de columna resonante y los ensayos realizados en éste.

A continuación se presentan los principales resultados encontrados. Las ya mencionadas fórmulas empíricas son ajustadas a los datos medidos. Los resultados de los ensayos y el ajuste de curvas son evaluados y discutidos considerando especialmente la influencia del d_{50} .

Finalmente se entregan las conclusiones de este trabajo y líneas de trabajo futuras.

INVESTIGACIONES PREVIAS

El módulo dinámico de corte o módulo secante de corte G y el amortiguamiento D son dos de los parámetros más importantes que pueden ser determinados con el equipo de columna resonante. Estos parámetros se determinan aplicando una torsión cíclica a una probeta cilíndrica, induciendo así pequeñas deformaciones angulares en ésta. Ya que se trata de una carga cíclica, el módulo dinámico de corte G se determina de la pendiente del diagrama histerético de tensión de corte versus deformación angular (Figura 1a). Para amplitudes

de deformación angular menores a aproximadamente $\gamma^{ampl} \approx 10^{-5}$ (Figura 1b), se define el módulo dinámico de corte G como módulo dinámico de corte máximo G_{max} .

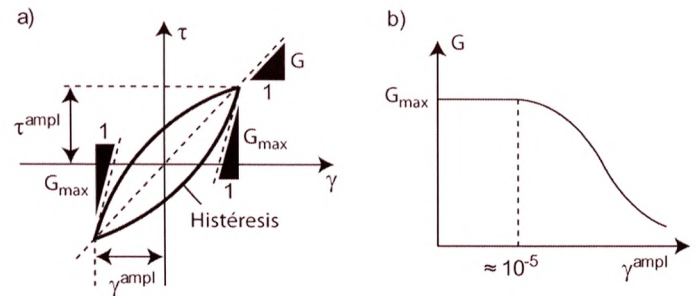


Figura 1: a) Definición de G en el diagrama histerético τ - γ b) degradación de G a partir de G_{max} con el aumento de γ^{ampl} .

Las fórmulas típicamente utilizadas para la determinación de G consideran la tensión media $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ (los σ_i denotan las tensiones efectivas en las 3 direcciones principales), el índice de vacíos e y la amplitud de la deformación angular γ^{ampl} , y tienen la forma relacionadas mediante la siguiente expresión:

$$G = G_{max}(p, e) F(\gamma^{ampl}) \quad (1)$$

En la expresión (1) $F(\gamma^{ampl})$ describe la degradación de G con γ^{ampl} . Para la determinación de G_{max} se utilizan generalmente las expresiones empíricas propuestas por Hardin y Black (1966), estas son:

para granos redondeados:

$$G_{max} = 6,9 \cdot \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \quad (2)$$

para granos angulosos:

$$G_{max} = 3,23 \cdot \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e} \quad (3)$$

Hardin y Drenech (1972) propusieron también una ecuación empírica para la degradación de G con γ^{ampl} :

$$F(\gamma^{ampl}) = \frac{1}{1 + \frac{\gamma^{ampl}}{\gamma_r}} \quad (4)$$

Con la deformación angular de referencia γ_r dada por:

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \quad (5a)$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1+K_0}{2} \sigma_1 \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi\right)^2 - \left(\frac{1-K_0}{2} \sigma_1\right)^2} \quad (5b)$$

donde $\tau_{\max}$ es el esfuerzo de corte máximo, K_0 es el coeficiente de empuje lateral en reposo, σ_1 es la tensión principal, c es la cohesión y φ es el ángulo interno de roce. A pesar de que los efectos de la tensión, del índice de vacíos y de la amplitud de la deformación angular han sido intensamente estudiados, el efecto de la curva granulométrica no ha sido sistemáticamente ni profundamente investigado.

Sin embargo, existe evidencia experimental que la curva granulométrica afecta fuertemente el módulo dinámico de corte. Iwasaki y Tatsuoka (1977), determinaron que en arenas con coeficientes de uniformidad C_u bajos ($C_u < 1,8$), y sin contenido de finos $FC_{0,074}$ ($FC_{0,074}$ es el contenido de finos definido en la norma chilena NCh165, donde el diámetro de las partículas d debe ser menor que 0,074 mm), el módulo dinámico de corte máximo $G_{\max}$ no depende de d_{50} , esto para presiones p e índices de vacíos e constantes. Asimismo, Iwasaki y Tatsuoka (1977), no pudieron encontrar un claro efecto de la forma de los granos (Figura 2).

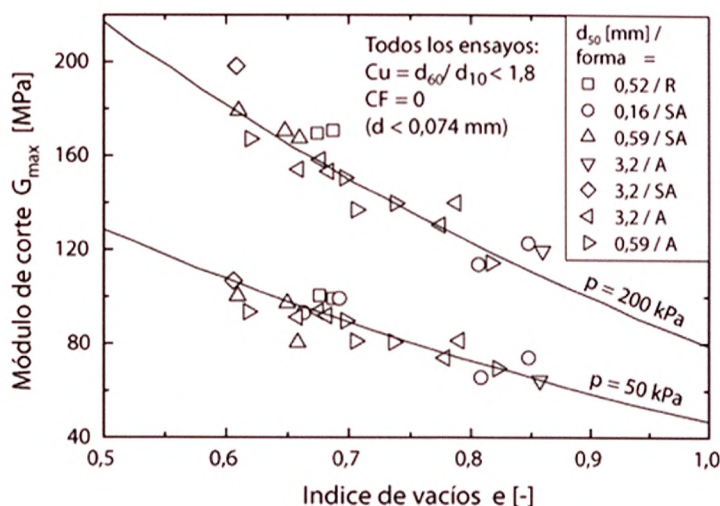


Figura 2: Independencia de $G_{\max}$ de d_{50} según Iwasaki y Tatsuoka (1977). R: granos redondeados, SA: granos redondeados y angulosos y A: granos angulosos.

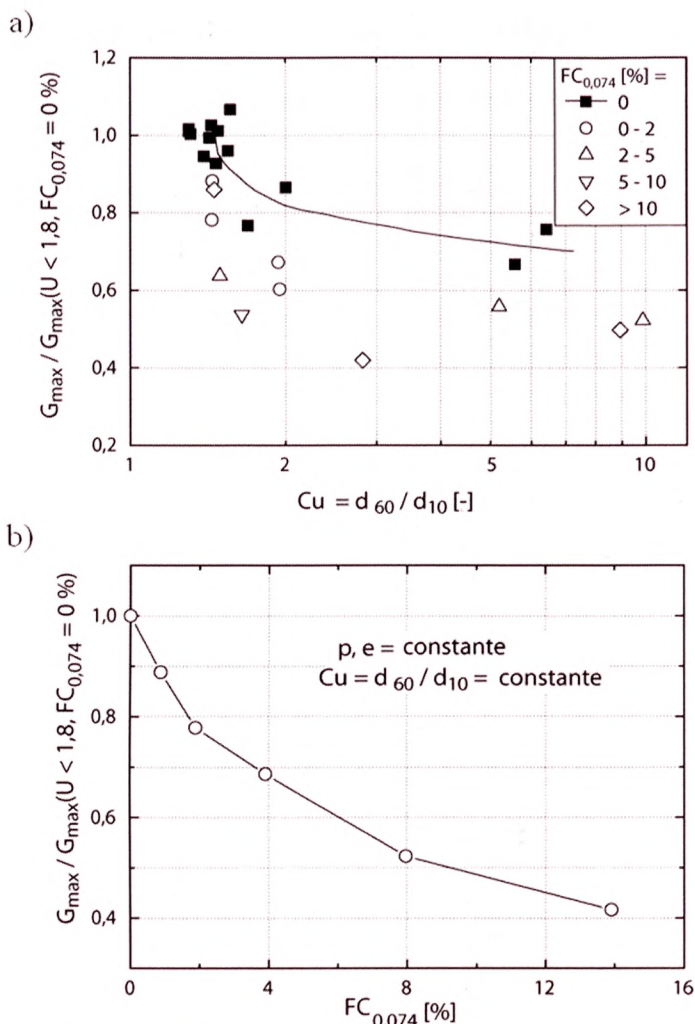


Figura 3: a) Decaimiento de $G_{\max}$ con C_u para arenas con distintos contenidos de finos. b) Decaimiento de $G_{\max}$ con el contenido de finos para arenas con $C_u = \text{constante}$, según Iwasaki y Tatsuoka (1977).

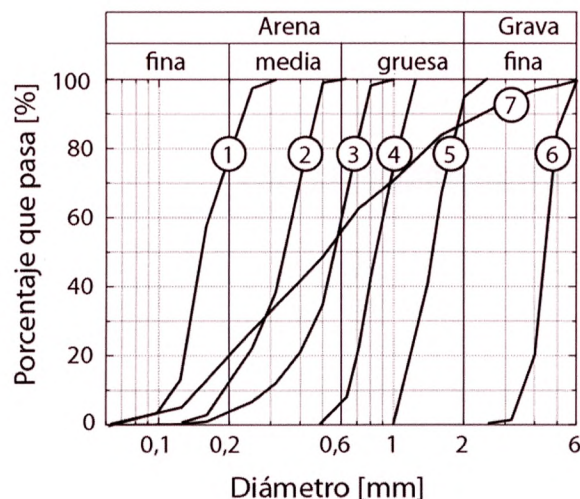


Figura 4: Curvas granulométricas.

Suelo	1	2	3	4	5	6	7
d_{50}	0,15 mm	0,35 mm	0,55 mm	0,84 mm	1,45 mm	4,4 mm	0,52 mm
C_u	1,4	1,9	1,8	1,4	1,4	1,3	4,5
C_c	0,9	1,2	1,2	1,0	0,9	1,1	0,7
e_{max}	0,992	0,930	0,874	0,878	0,886	0,851	0,691
e_{min}	0,679	0,630	0,577	0,590	0,623	0,669	0,422
Φ_c	31,3°	33,3°	31,2°	33,7°	33,9°	35,1°	33,3°
Foto							

Figura 5: Características geotécnicas de los 7 suelos ensayados.

La Figura 3a muestra los resultados ensayos realizados a arenas con curvas granulométricas con distintos C_u y distintos contenidos de finos $CF_{0,074}$. Estas arenas fueron confeccionadas a partir de arenas naturales.

Los módulos de corte G_{max} medidos fueron normalizados con los valores de G_{max} de las arenas con bajos C_u y sin contenidos de finos ($C_u < 1,8$; $CF_{0,074} = 0\%$), para los mismos valores de p y e . En la Figura 3 se aprecia que el módulo de corte G_{max} decrece para arenas sin contenido de finos con el aumento del coeficiente de uniformidad, además se observa una pérdida de rigidez adicional con el aumento del número de partículas con $d < 0,074$ mm.

La Figura 3b muestra el efecto del contenido de finos para $C_u =$ constante. Así, el aumento del contenido de finos produce en forma independiente una clara pérdida de rigidez. Por ejemplo, para un $CF_{0,074} = 14\%$ el módulo de corte representa sólo un 40 % del valor para un $CF_{0,074} = 0\%$. Iwasaki y Tatsuoka (1977), describieron un reducido efecto de la curva granulométrica sobre el amortiguamiento. Además los autores no incluyeron en las ecuaciones (2) y (3) los importantes efectos aquí descritos.

Ensayos previos realizados en la Universidad de Bochum, (Wichtmann *et al.*, 2001; Triantafyllidis *et al.*, 2004a y 2004b; Wichtmann y Triantafyllidis, 2004a y 2004b; Triantafyllidis y Wichtmann, 2005), muestran la importancia de ampliar las ecuaciones (2) y (3).

La Figura 4 muestra las curvas granulométricas de 7 arenas con alto contenido de cuarzo con granos redondeados y angulosos, ensayadas y luego comparadas

con las ecuaciones ya mencionadas. Se observan importantes discrepancias entre los datos medidos y los valores pronosticados por las ecuaciones (2) y (3) (Figura 6).

Por ejemplo, para $e = 0,6$ las ecuaciones (2) y (3) sobreestiman el comportamiento medido hasta en un 70 %. Las propiedades de las 7 arenas, así como también fotos se encuentran en la Figura 5.

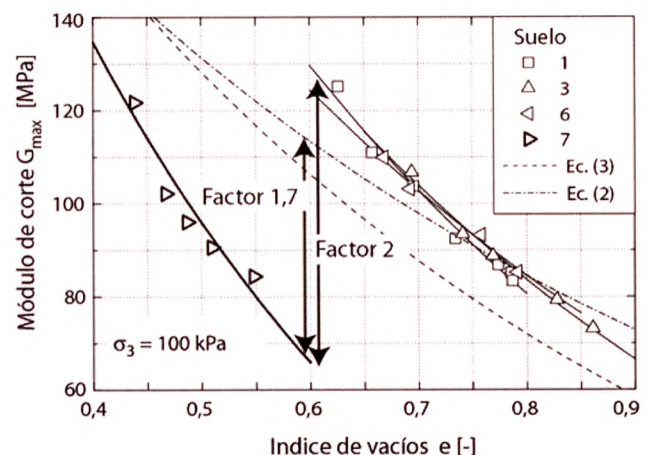


Figura 6: Comparación de las arenas ensayadas con las ecuaciones (2) y (3).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para determinar el efecto de d_{50} sobre G y D , se prepararon 8 muestras de arenas. Dichas arenas se mezclaron artificialmente a partir de arenas naturales de alto contenido de cuarzo con granos redondeados y angulosos. De esta forma se obtuvieron las 8 curvas granulométricas que se muestran en la Figura 7.

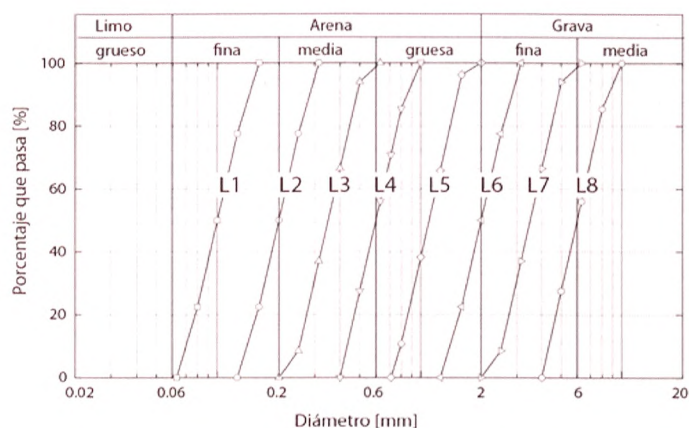


Figura 7: Curvas granulométricas de las 8 arenas ensayadas.

La tabla 1 muestra las propiedades geotécnicas de dichas arenas. Los métodos con que fueron obtenidas las densidades máximas y mínimas corresponden a los especificados para la norma DIN 18126, donde:

Tr.12,To.71: Probeta preparada con embudo de diámetro 12 mm y recipiente de diámetro 71 mm.

Tr.25,To.100: Probeta preparada con embudo de diámetro 25 mm y recipiente de diámetro 100 mm.

K.,To.100: Probeta preparada con paleta y recipiente de diámetro 100 mm.

S.g.: Tenedor de compactación.

S.g.*: Para estas arenas se utilizó el tenedor de compactación, a pesar que es necesario utilizar una mesa vibratoria. El método del tenedor de compactación fue utilizado para obtener valores aproximados de $\rho_{d,max}$ y consiguientemente valores de la densidad relativa media.

Las arenas fueron ensayadas en el equipo de columna resonante mostrado en la figura 8. Una columna resonante sirve para la determinación de parámetros dinámicos de un suelo dispuesto en forma de cilindro

lleno. La probeta, sujeta por una delgada membrana de látex, posee en ambos extremos placas de sujeción.

Estas placas están enarenadas para permitir la adherencia libre de deslizamiento con la probeta de arena. La placa inferior se monta sobre una masa relativamente pesada provista de rodamientos que permiten el libre giro de ella. A la placa superior se le monta una unidad excitadora que produce pequeñas oscilaciones sinusoidales. Dichas oscilaciones son medidas mediante un osciloscopio y la frecuencia de éstas se varía hasta alcanzar la frecuencia de resonancia del sistema. Para el drenaje de la probeta, así como también, para la fase de construcción y transporte de ésta, existen válvulas en la base que permiten la aplicación de vacío. La probeta junto a su unidad excitadora van montadas en una celda hermética que permiten aplicar presión de confinamiento a lo largo del ensayo. El cambio en el diámetro de la probeta, producto de, por ejemplo, cambios en la presión de confinamiento, puede ser medido mediante 5 sensores de desplazamiento dispuestos horizontalmente en 2 ejes.

El cambio en la altura es medido mediante un sensor dispuesto en forma vertical. Conocidas las masas y geometría del sistema, es decir, de la probeta y de los cuerpos en los extremos de ésta, y las oscilaciones producto de la unidad excitadora, es posible determinar los parámetros dinámicos mencionados. La columna resonante fue modificada para medir además el módulo de elasticidad confinado $E_{s,max}$ mediante la incorporación de elementos piezoeléctricos en los extremos de la probeta.

La figura 8 muestra una fotografía y un esquema explicativo de la columna resonante del laboratorio de

Suelo	d_{50} [mm]	Cu [-]	CF [-]	$\rho_{d,min}$		$\rho_{d,max}$		e_{max} [-]	e_{min} [-]
				Método	Valor [g/cm ³]	Método	Valor [g/cm ³]		
L1	0.1	1.5	0	Tr.12,To.71	1,243	S.g.*	1,585	1,132	0,672
L2	0.2	1.5	0	Tr.12,To.71	1,329	S.g.	1,661	0,994	0,596
L3	0.35	1.5	0	Tr.12,To.71	1,372	S.g.	1,666	0,931	0,591
L4	0.6	1.5	0	Tr.12,To.71	1,401	S.g.	1,687	0,879	0,571
L5	1.1	1.5	0	Tr.12,To.71	1,410	S.g.	1,678	0,877	0,580
L6	2	1.5	0	Tr.25,To.100	1,412	S.g.*	1,666	0,817	0,591
L7	3.5	1.5	0	K.,To.150	1,458	S.g.*	1,630	0,799	0,626
L8	6	1.5	0	K.,To.150	1,473	S.g.*	1,622	0,764	0,634

Tabla 1: Propiedades geotécnicas de las 8 arenas ensayadas.

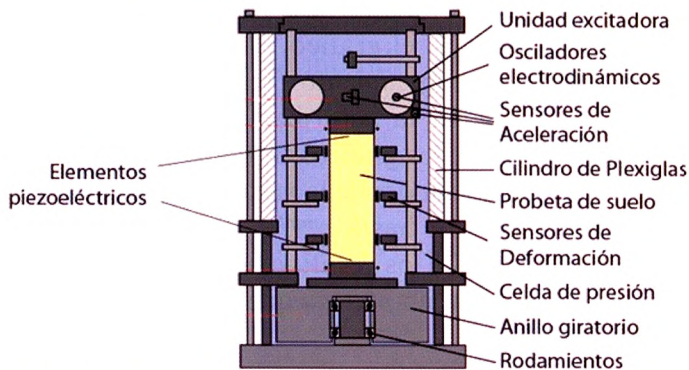
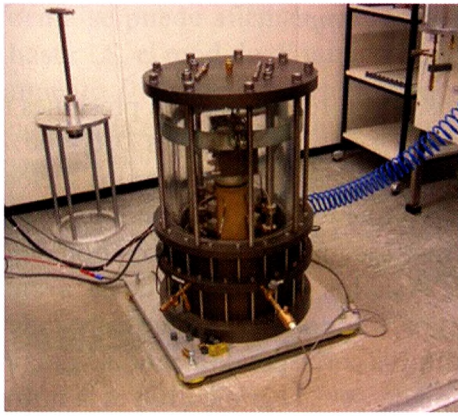


Figura 8: Fotografía y esquema de la columna resonante del laboratorio de Dinámica de Suelos de la Universidad de Bochum.

Dinámica de suelos de la Universidad de Bochum.

Se realizaron 2 tipos de ensayos:

- Tipo A: En este ensayo se estudia fundamentalmente la dependencia de G_{max} del índice de vacíos e y la presión p . La dependencia de $E_{s,max}$ de estos 2 últimos parámetros también es estudiada.

Se ajusta la presión media de confinamiento σ_3 a 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 kPa. Para cada paso se espera un tiempo de 5 minutos para que se estabilicen las deformaciones en la probeta. Además, se define de esta forma un tiempo constante, asegurando que los efectos de reacomodo entre partículas sea uniforme para todos los casos. Para cada uno de estos niveles de presión se induce mediante la unidad excitadora en la parte superior de la probeta, una amplitud de deformación angular γ^{ampl} de aproximadamente 10^{-6} , la frecuencia de las oscilaciones se varía hasta alcanzar la resonancia y se obtiene así el módulo de corte máximo G_{max} . Además, mediante los elementos piezoeléctricos, se mide para cada etapa de presión, el módulo de elasticidad $E_{s,max}$. Finalmente, para el último nivel de presión, i.e., $\sigma_3 = 400$ kPa, se varía como en un ensayo

Tipo B (ver abajo) de tal forma de obtener las curvas $G(\gamma^{ampl})$, $D(\gamma^{ampl})$ y $\Delta h(\gamma^{ampl})$. Para cada tipo de arena se realizan de 6 a 8 ensayos Tipo A. De esta forma se arman las probetas con una densidad relativa inicial DR_0 de tal forma de tener densidades relativas entre 20% y 100% en intervalos de 10% aproximadamente.

- Tipo B: En este ensayo se estudia la dependencia del módulo secante de corte G , el amortiguamiento D y la deformación vertical Δh de la amplitud de la deformación angular γ^{ampl} .

Las probetas se arman con una densidad relativa inicial DR_0 media ($\approx 60\%$) y se incrementa para una presión fija σ_3 (50, 100, 200 kPa) la amplitud de la deformación angular mientras se mide G , D y Δh . El ensayo se detiene cuando se alcanzan amplitudes de deformación del orden de 10^{-3} , donde por razones del equipamiento ya no era posible medir la frecuencia de resonancia.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Módulo de corte máximo G_{max}

Para mejorar los resultados entregados por las ecuaciones (2) y (3) se ajustaron a los resultados medidos curvas de la siguiente forma:

$$G_{max} = A \frac{(a-e)^2}{1+e} p_{atm}^{1-n} p^n \quad (6)$$

donde p_{atm} es la presión atmosférica igual a 100 kPa, las constantes A , a y n fueron determinadas utilizando un programa de regresión lineal. Todos los G_{max} de las arenas fueron satisfactoriamente aproximadas por la ecuación (6). A modo de ejemplo se muestra en la Figura 9a el ajuste de curvas $e-G_{max}$ para la arena L4. En la figura 9b se observa que la mayoría de las arenas presentan el mismo comportamiento para presiones e índices de vacíos iguales con excepción de las arenas L1 y L8, para el caso de 300 kPa. Se presume que el comportamiento ligeramente menos rígido de la arena L8 se debe a la relación entre el diámetro de la probeta d_p y el diámetro medio de las partículas d_{50} (o diámetro máximo d_{max}). Así, para la arena L8: $d_p/d_{50} = 100/6 = 16,7$ ó $d_p/d_{max} = 100/10 = 10$. Futuros ensayos con diámetros de probeta mayores serán necesarios para aclarar o refutar esta hipótesis. Por otra parte, para el caso de la arena L1, los bajos valores de G_{max} podrían deberse al contenido de algunas partículas finas.

Ya que se aprecia un comportamiento común entre las arenas L2 hasta L7 se ajustó una curva con la forma de la ec. (6) a las 6 arenas mencionadas. La figura 9c muestra la buena aproximación que este procedimiento entrega.

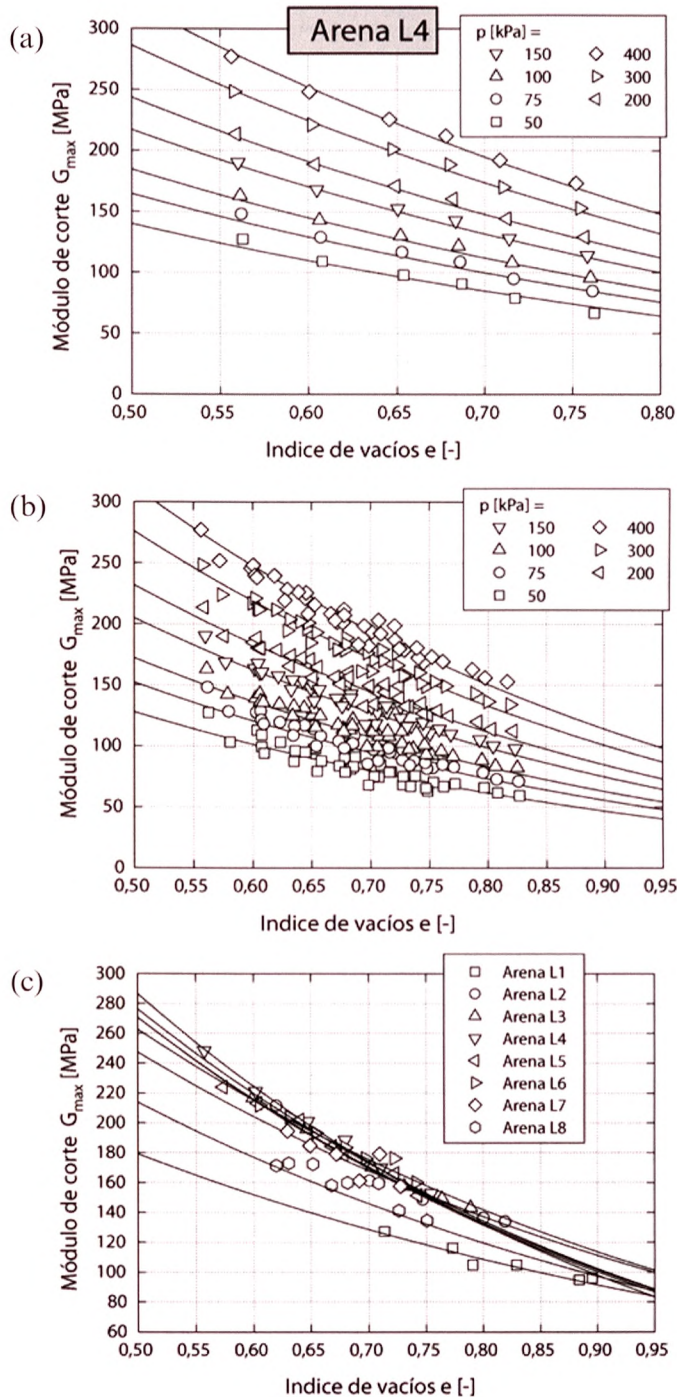


Figura 9: Resumen de resultados medidos de G_{max} .

La ecuación deducida es:

$$G_{max} = 22,81 \frac{(1,75 - e)^2}{1 + e} p^{0,43} \quad (8)$$

Variación de γ^{ampl}

Los ensayos tipo B realizados con presiones medias de confinamiento p distintas e iguales $DR_0 \approx 60\%$, exhiben una alta dependencia de γ^{ampl} . Para los suelos L3 hasta L8 se observa que los resultados no dependen del d_{50} . En la figura 10 se muestran gráficos obtenidos para la arena L5. Así, los resultados de la arena L5 son extensibles para todo el grupo de arenas, de L3 hasta L8. La figura 10a corresponde al módulo de corte secante G en función de γ^{ampl} , el gráfico 10b es la normalización de este último con el módulo de corte máximo G_{max} para los mismos ensayos, el gráfico 10c corresponde a la variación del amortiguamiento D con γ^{ampl} y el gráfico 10d la variación de la deformación vertical Δh con γ^{ampl} . Se observa de los gráficos $G(\gamma^{ampl})$, $G/G_{max}(\gamma^{ampl})$ y $D(\gamma^{ampl})$ un *plateau* donde la variable en la ordenada permanece constante hasta $\gamma^{ampl} \approx 10^{-5}$. Por otro lado, las arenas L1 y L2 (los resultados no se encuentran graficados) exhiben un *plateau* que se desarrolla hasta $\gamma^{ampl} \approx 2 \times 10^{-5}$.

Los ensayos Tipo B realizados al término de los ensayos Tipo A, es decir, ensayos con presión media de confinamiento p constante e igual a 400 kPa y distintas DR_0 , exhiben resultados de similares G , D y Δh a los recién descritos. Las arenas L3 hasta L8 no presentan diferencias entre sus resultados, por lo que G , D y Δh serían independientes de d_{50} . Como ejemplo se presenta en la Figura 11 los resultados G , D y Δh para la arena L3. La Figura 11a muestra la variación de G con γ^{ampl} y se aprecia como el módulo de corte máximo G_{max} depende fuertemente de DR_0 . En la figura 11b se normalizan estas últimas curvas con G_{max} y se aprecia que todas las curvas pueden ser representadas por una única curva.

En el gráfico 11c ocurre algo similar con $D(\gamma^{ampl})$, ya que todos los puntos caen sobre una misma curva, por lo que todos los ensayos podrían ser representados por una misma ecuación. En el gráfico 11d) se ve como también la deformación vertical Δh es prácticamente independiente de la densidad relativa inicial DR_0 . Al igual que en el caso de los ensayos con DR_0 constante, las arenas L1 y L2 (no graficadas), exhiben para los gráficos $G(\gamma^{ampl})$, $G/G_{max}(\gamma^{ampl})$, y $D(\gamma^{ampl})$ un *plateau* donde las variables G , D y Δh permanecen constantes hasta $\gamma^{ampl} \approx 10^{-5}$, mientras que en los casos el *plateau* se desarrolla sólo hasta $\gamma^{ampl} \approx 2 \times 10^{-5}$.

De esta forma se puede afirmar que para las arenas desde L3 hasta L8, el módulo dinámico de corte G y el amortiguamiento D pueden ser determinados teniendo G_{max} definido por la ecuación (7), una buena descripción de las curvas $G(\gamma^{ampl})$ y $D(\gamma^{ampl})$ y características de las sollicitaciones y del suelo un estado definido por γ^{ampl} , p y e (o DR_0).

Módulo de elasticidad $E_{s,max}$

Las ondas P fueron medidas para las arenas L1, L2, L3, L5 y L7 mediante elementos piezoeléctricos, de esta forma se calculó el módulo de elasticidad con deformación lateral restringida $E_{s,max}$ como:

$$E_{s,max} = \rho v_p^2 \quad (8)$$

Se ajustó a los datos medidos una ecuación análoga a

la ecuación (6) y se observó que los suelos L2 hasta L7 presentaban un comportamiento similar. Así, se ajustó una curva que aproxima estos 4 suelos:

$$E_{s,max} = 61,09 \frac{(2,08 - e)^2}{1 + e} p^{0,36} \quad (9)$$

CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de columna resonante con medición de la velocidad de las ondas P a 8 muestras de arenas con alto contenido de cuarzo. Las 8 muestras presentaban distintos diámetros medios de partículas, distintos coeficientes de uniformidad y no poseían de finos ($FC=0$).

Se determinó que G_{max} es independiente de d_{50} en el rango $0,2 \leq d_{50} \leq 3,5$ mm para presiones p e índices de

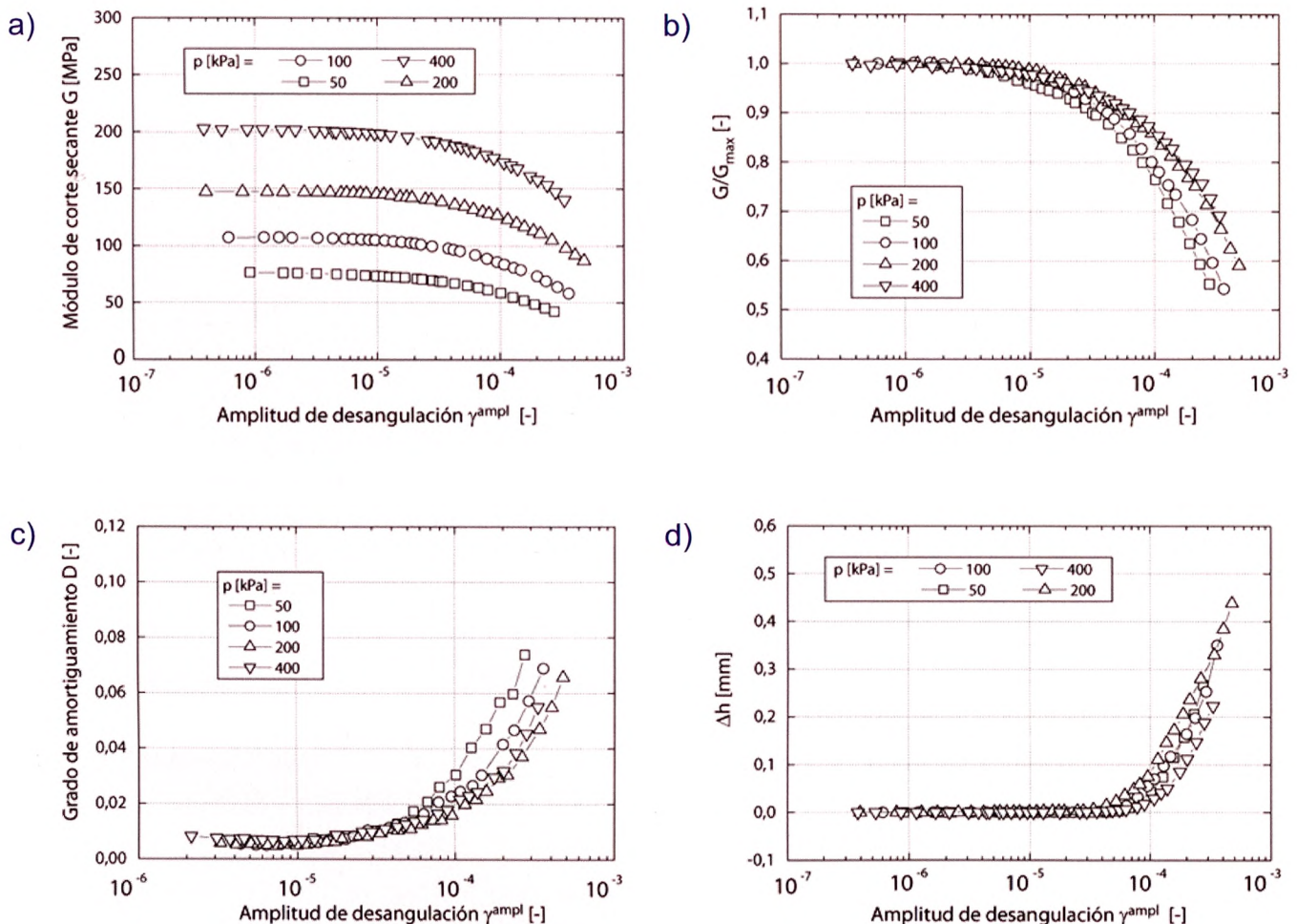


Figura 10: Propiedades dinámicas medidas en la muestra de arena L5 con $DR_0 \approx 60\%$

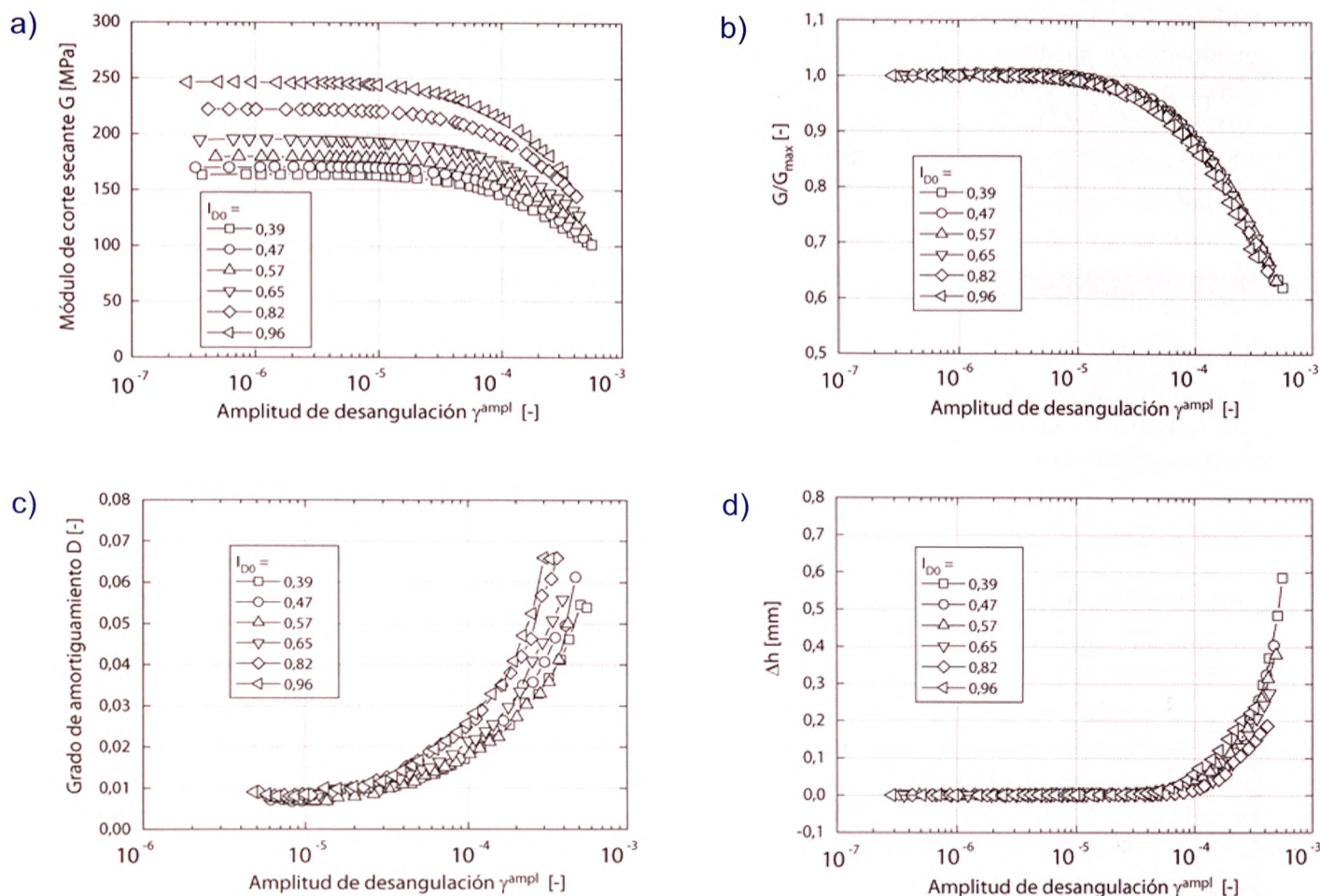


Figura 10: $G(\gamma^{ampl})$, $G/G_{max}(\gamma^{ampl})$, $D(\gamma^{ampl})$ y $\Delta h(\gamma^{ampl})$ para la arena L5 con $p = 400$ kPa.

vacío e iguales. Se definió una ecuación empírica ajustada a los datos que permite estimar G_{max} en función de e y p .

También se determinó que las curvas $G/G_{max}(\gamma^{ampl})$ y $D(\gamma^{ampl})$ para p constante y distintos valores de densidad inicial DR_0 pueden ser descritas con una única curva en el rango de $0,35 \leq d_{50} \leq 3,5$ mm.

En el rango $0,2 \leq d_{50} \leq 3,5$ se puede aproximar $E_{s,max}$ con la misma formulación adoptada para describir G_{max} .

Finalmente, es posible afirmar que las ecuaciones obtenidas para estimar las propiedades dinámicas de los suelos no cohesivos bajo pequeñas deformaciones no necesitan considerar el diámetro medio de las partículas en cuando $d_{50} \geq 0,2$ mm. Futuras investigaciones sobre

otros parámetros de la curva granulométrica, es decir, el coeficiente de uniformidad C_u , el coeficiente de curvatura C_c y el contenido de finos CF , son necesarias para complementar este estudio, y en el que caso que fuese necesario, estos parámetros deberían ser incluidos en futuras formulaciones empíricas.

REFERENCIAS

- Hardin, B.O. and Black, W.L. (1966) Sand stiffness under various triaxial stresses. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 92(SM2):27-42.
- Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972) Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,

98(SM7):667-692.

Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. (1977) Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. *Soils and Foundations*, 17(3):19-35.

Martínez, R. (2007) Influencia de la curva granulométrica en las propiedades dinámicas de suelos no cohesivos. Memoria de título para optar al título de ingeniero civil. Departamento de ingeniería civil, Universidad de Concepción.

Triantafyllidis, T., Wichtmann, T. and Niemunis, A. (2004a) On the determination of cyclic strain history. In Triantafyllidis, editor, *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, Proc. of CBS04, Bochum, pages 321-332. Balkema, 31 March - 02 April.

Triantafyllidis, T. and Wichtmann, T. (2005) Dynamische Steifigkeit und Dämpfung von Sand bei kleinen Dehnungen. *Bautechnik*, 82(4):236-246.

Triantafyllidis, T., Wichtmann, T. and Niemunis, A. (2004b)

Kumulatives und dynamisches Verhalten von Böden. In F. Rackwitz, editor, *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik*, Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Professor Dr.-Ing. habil. Stavros A. Savidis, pages 173-191. Springer.

Wichtmann, T., Sonntag, T. and Triantafyllidis, T. (2001) Über das Erinnerungsvermögen von Sand unter zyklischer Belastung. *Bautechnik*, 78(12):852-865.

Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2004a) Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: cyclic and dynamic torsional prestraining. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(2):127-147.

Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2004b) Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part II: cyclic axial preloading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11):789-803.



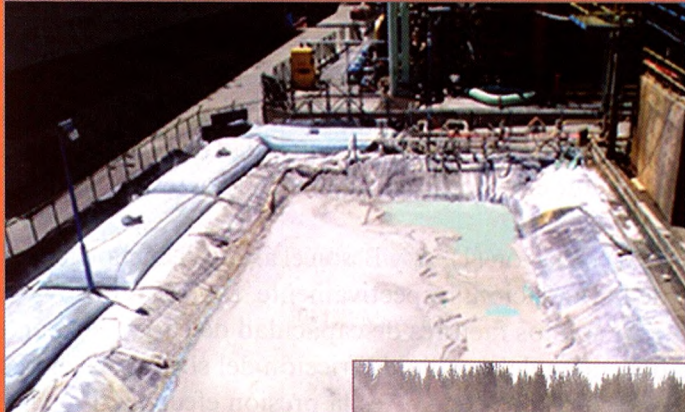
EMIN
SISTEMAS
GEOTECNICOS S.A.

TUBOS DE GEOTEXTIL



Almacenamiento y Deshidratación de RILES

- Sedimentos Marinos
- Aguas Servidas
- Contaminados
- Lodos Industriales
- Lodos de Procesos Mineros
- Residuos de Celulosas
- Lodos Biológicos



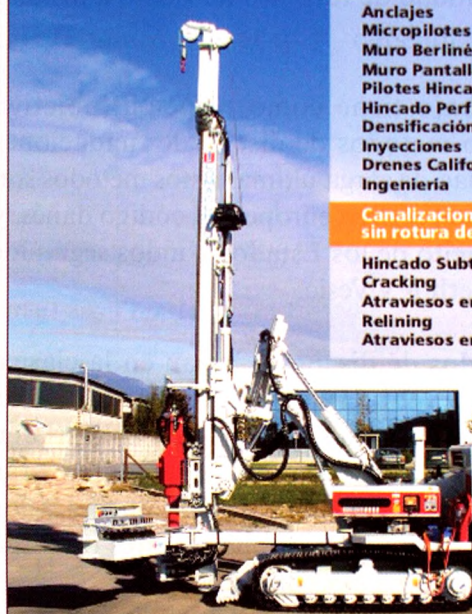

- Gran volumen de almacenamiento
- Deshidratación eficiente
- Bajos costos
- Fabricación a medida
- No requiere equipamiento especial
- Mínimo impacto ambiental

www.sistemasgeotecnicos.cl - geoemin@emin.cl
 Fono (56-2) 299 8001 - Fax (56-2) 206 6468



**CONSTRUCTORA
LANCUYEN**
S.A.

Trabajando a lo largo de todo Chile



Fundaciones Especiales

- Anclajes
- Micropilotes
- Muro Berlín
- Muro Pantalla
- Pilotes Hincados
- Hincado Perfiles H y Tablestacas
- Densificación de Terrenos
- Inyecciones
- Drenes Californianos
- Ingeniería

Canalizaciones Subterráneas sin rotura de pavimentos

- Hincado Subterráneo
- Cracking
- Atravesos en PVC, HDPE
- Relining
- Atravesos en Roca

Barros Arana 492 Of: 63 • Concepción
Teléfono: (41) 246 77 41 • Fax: (41) 246 77 42
www.lancuyen.cl ✉ lancuyen@lancuyen.cl