



Influencia del contenido de finos no plástico en la rigidez y el amortiguamiento a bajas amplitudes de deformación en arenas cuarzosas

Fecha de entrega: 10 de Septiembre 2009

Fecha de aceptación: 20 de Noviembre 2009

Miguel Navarrete

Electroandes Geotecnia Minera, Fidel Oteiza 1921, of. 601, Providencia, Santiago, Chile, mnavarrete@electroandes.cl (anteriormente en el Instituto de Fundaciones y Mecánica de Suelos de la Ruhr-Universität Bochum)

Este artículo presenta un estudio sobre la influencia que tiene el contenido de finos en suelos no cohesivos sobre los parámetros dinámicos de arenas finas como el módulo de corte dinámico G_{max} , el módulo edométrico M_{max} y la razón de amortiguamiento D . Para este propósito fueron ensayadas arenas finas con diferentes contenidos de polvo de cuarzo. Fueron realizados alrededor de 80 ensayos de columna resonante con medición de la velocidad de onda de compresión P en suelos con 8 diferentes curvas granulométricas que contenían diferente porcentaje de finos. Los resultados del estudio determinaron la fuerte disminución del módulo de corte dinámico G_{max} y del módulo edométrico M_{max} cuando se aumenta el contenido de finos hasta un 10%. Después estos módulos dinámicos tienden a ser constantes. Además los resultados de esta investigación demostraron que la razón de amortiguamiento para arenas con mayor contenido de finos disminuye ante una misma amplitud de deformación por corte.

This article presents a study about the influence of the cohesionless fines content on the dynamic parameters of fine sands. The dynamic shear modulus G_{max} , the constrained modulus M_{max} and the damping ratio D are studied. To this purpose, fine sands were tested with different content of quartz powder. A series of 80 resonant column tests were carried out in eight soils with different grain size distributions, measuring in each test the compression wave velocity. Results of the study showed the strong reduction of the dynamic shear modulus G_{max} and the constrained modulus with the increase of the fines content up to 10%. Above the 10% the moduli become constant. Furthermore, results of this research showed that the damping ratio for sands, with the same shear strain amplitude, reduces with the increase of fines content.

Palabras clave: amortiguamiento, amplitud de deformación de corte, columna resonante, módulo de corte dinámico, módulo edométrico, coeficiente de Poisson

Keywords: damping, shear strain amplitude, resonant column, dynamic shear modulus, constrained modulus, Poisson's ratio

Introducción

Para los cálculos dinámicos de una obra de construcción, como por ejemplo aquellas relacionadas con fundaciones de máquinas, se requiere necesariamente de parámetros dinámicos de los suelos. Estos parámetros son principalmente el módulo de corte, el módulo edométrico y la razón de Poisson. Para la obtención de estos parámetros se pueden realizar mediciones a través de ensayos in situ o de laboratorio, pero estos pueden ser muy costosos e incluso difíciles de realizar. Es por eso que se usan fórmulas empíricas, las cuales deben ser confiables, y aplicables a la mayor cantidad de suelos posibles.

En el caso del módulo de corte, existen fórmulas simples para arenas, las cuales incluyen la influencia

de la relación de vacíos, la tensión media, la forma de los granos y la amplitud de la deformación angular, pero no incluyen la influencia de parámetros como el coeficiente de uniformidad y el contenido de finos. Las investigaciones de Iwasaki y Tatsuoka (1977) muestran una gran influencia de estos parámetros en el módulo de corte.

Muy poca información existe sobre la influencia de la curva granulométrica en los parámetros dinámicos. Además no existe una fórmula que incluya parámetros referentes a la granulometría. El presente estudio apunta a la obtención de fórmulas empíricas para los parámetros dinámicos que incluyan el efecto de la curva granulométrica. Ya se han realizado trabajos para la obtención de fórmulas que incluyen el efecto del coeficiente de uniformidad y el diámetro

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1} (p[\text{kPa}])^n$$

medio (Martínez, 2008), faltando estudiar el efecto del contenido de finos. Este artículo presenta la influencia del contenido de finos en el módulo de corte, además de proponer fórmulas empíricas. Para aquello se realizaron ensayos de columna resonante a ocho suelos con distintas curvas granulométricas, con un coeficiente de uniformidad casi constante y variando el contenido de finos, además de medir paralelamente la velocidad de la onda P a través de elementos piezoeléctricos para poder así observar el efecto del contenido de finos en el módulo de corte dinámico y en el módulo edométrico. A partir de la obtención de estos módulos, también se pudo obtener la razón de Poisson. Además se incluye el efecto de la amplitud de deformación de corte en el módulo de corte y el amortiguamiento.

Descripción de la columna resonante

El aparato de columna resonante fue modificado para medir la velocidad de onda P (ver Figura 1). Este aparato es del tipo *free - free*, es decir, la masa superior como la inferior son libremente rotables. La masa superior cuboidal (llamada unidad de excitación) está equipada con dos excitadores electrodinámicos, acelerando cada uno una pequeña masa. Esta aceleración es medida con un acelerómetro. Así, la fuerza $F(t)$ en el eje del excitador electrodinámico puede ser determinada. El par de fuerzas resulta en un momento torsional actuando en la parte superior del espécimen cilíndrico. Otro acelerómetro mide la aceleración de la unidad de excitación. El sistema compuesto de la masa basal, el espécimen y de la masa superior está encerrado en una celda a presión, la cual puede sostener presiones de celda σ_3 hasta 800 kPa. Una señal eléctrica sinusoidal es generada, amplificada y aplicada por los excitadores electrodinámicos. La frecuencia de excitación es variada hasta encontrar la frecuencia de resonancia f_R del sistema compuesto de dos masas (inferior y superior) y el espécimen. Por definición, este es el caso cuando el giro ϕ y $F(t)$ tienen un desfase de $\phi/2$ en un tiempo t . Si el desplazamiento $u(t)$ en el eje de los excitadores electrodinámicos es dibujado versus $F(t)$, se obtiene una figura en forma de elipse, la cual es llamada figura de Lissajous. En el caso de resonancia los ejes de la elipse son paralelos a los ejes u y F . El módulo de corte secante definido en la ecuación (1) es calculado a partir de la frecuencia de resonancia con la altura h del espécimen y una densidad ρ del suelo.

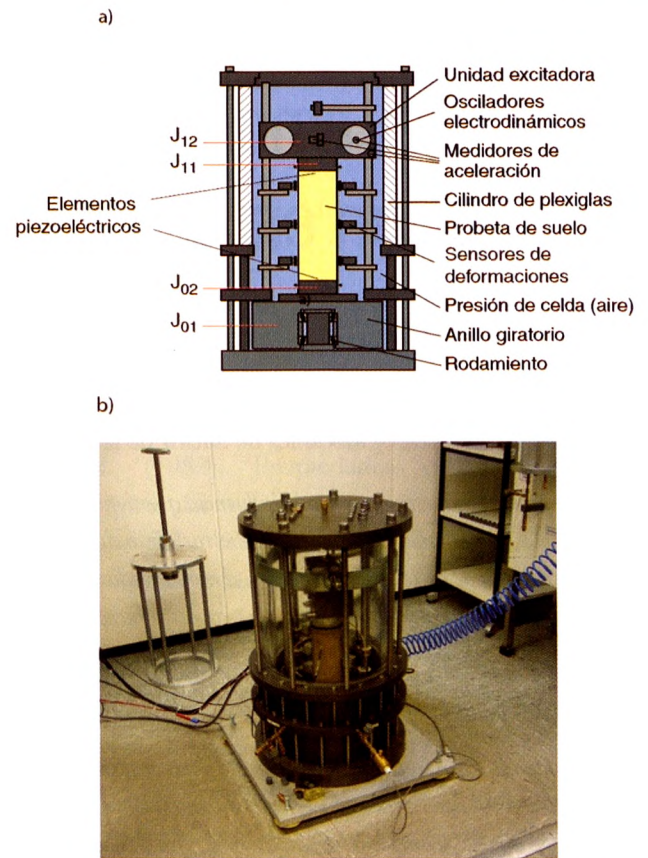


Figura 1: Esquema y foto del aparato de Columna Resonante

$$G = \left(\frac{2 \pi h f_R}{a} \right)^2 \rho \quad (1)$$

El parámetro a es obtenido de la ecuación implícita de valores propios y las respectivas condiciones de borde (Navarrete, 2009):

$$a \tan(a) - \frac{J^2}{J_0 J_L} \cdot \frac{\tan(a)}{a} = \frac{J}{J_0} + \frac{J}{J_L} \quad (2)$$

En la ecuación (2) J , J_0 y J_L son momentos de inercia polares del espécimen, de la masa basal y de la masa superior respectivamente. Para especímenes cilíndricos, el momento de inercia polar queda como lo indica la ecuación (3), donde d es el diámetro.

$$J = 1/32 \pi h d^4 \rho \quad (3)$$

La amplitud de la deformación de corte γ^{amp} es calculada como un valor promedio geométrico sobre el volumen del espécimen. Diferentes amplitudes de deformación de corte γ^{amp} pueden ser ensayadas variando la amplitud de la señal de excitación. La razón de amortiguamiento D es determinada como la relación de la energía W_D , la cual es disipada en un ciclo, y la energía elástica W_E :

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{W_D}{W_E} \quad (4)$$

$$G_{max} = A \frac{1}{(p[\text{kPa}])^n}$$

La energía disipada W_D es obtenida del área de la figura de Lissajous. La energía elástica es calculada de la ecuación (5), donde V es el volumen del espécimen.

$$W_E = \frac{1}{2} G \gamma^{ampl} V \quad (5)$$

Para la medición de la velocidad de onda de propagación de compresión, el espécimen posee en su parte inferior y superior elementos piezoeléctricos. Estos elementos se deforman cuando un voltaje eléctrico es aplicado y generan una señal eléctrica cuando son deformados mecánicamente. El elemento de compresión ocupado se deforma de manera vertical. En el ensayo, un impulso eléctrico sinusoidal es generado, amplificado y aplicado al elemento piezoeléctrico que se encuentra en la parte inferior del espécimen. La deformación del elemento resulta en la generación de una onda. La onda se propaga en la dirección axial del espécimen de suelo. Si la onda alcanza el elemento piezoeléctrico en la parte superior, la deformación del elemento genera una señal eléctrica. Esta señal es amplificada y mostrada en un osciloscopio. El tiempo de propagación t de la onda en el espécimen es determinado de la señal transmitida, en el punto A , y de la señal recibida en el punto A' (Figura 2).

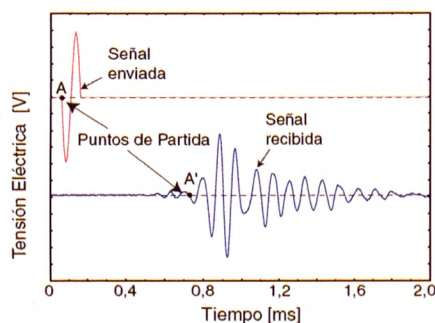


Figura 2: Señales de entrada y salida para la medición del tiempo de propagación de la onda P a través de la probeta de suelo

Luego la velocidad de propagación de onda es determinada con el tiempo t medido anteriormente y la altura de la probeta h según la ecuación (6).

$$v_p = \frac{h}{t} \quad (6)$$

Luego el módulo edométrico (en inglés *Constrained Modulus* M_{max}) se calcula según la ecuación (7):

$$M_{max} = \frac{v_p^2}{\rho} \quad (7)$$

En este ensayo las deformaciones laterales y verticales también son medidas a través de sensores, los cuales detectan los cambios de distancia entre el sensor y el objetivo que se encuentra adherido a la probeta de suelo.

Metodología de trabajo

Dado que el objetivo de este estudio fue investigar la influencia del contenido de finos en la rigidez de un suelo a bajas amplitudes de deformación, se realizaron dos tipos de ensayos que se describen a continuación:

Ensayo Tipo A: En este ensayo se investigó principalmente la dependencia del módulo de corte para pequeñas deformaciones G_{max} de la relación de vacíos e y también la dependencia del módulo edométrico M_{max} de la relación de vacíos e . En este ensayo se aumenta la presión de celda o confinamiento como sigue: 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 kPa. Cuando se varía la presión, se debe esperar unos cinco minutos antes de tomar los datos para que la deformación sea constante. Una vez estabilizada la deformación por el cambio de presión, se procede a buscar la frecuencia de resonancia, la cual es obtenida colocando de manera vertical la figura de Lissajous en el osciloscopio; y se mide el tiempo de propagación de la onda de compresión. Así se pueden determinar el módulo de corte y el módulo edométrico respectivamente. En la última presión de celda (400 kPa), se aumenta la deformación de corte y luego se obtienen el módulo de corte, la razón de amortiguamiento y la deformación vertical para cada amplitud de deformación.

Ensayo tipo B: En este tipo de ensayo se investiga la dependencia del módulo de corte, la razón de amortiguamiento y la deformación vertical de la deformación de corte. Para una densidad relativa promedio de 60% y diferentes presiones de celda (50, 100 y 200 kPa) se va variando la deformación de corte, mientras se van midiendo los tres parámetros a investigar. El ensayo se termina cuando la forma de la figura de Lissajous ya no corresponde a una elipse.

Luego, a partir de los datos medidos, se ajustan los datos a curvas que describen la respuesta dinámica del suelo y así obtener las correlaciones necesarias para la estimación del módulo de corte y el módulo edométrico en base a la forma de la ecuación de Hardin y Richart (1963).

Material ensayado

Los ensayos fueron realizados con arenas cuarzosas, que en su contenido de finos lo componían principalmente polvo de cuarzo, cuya curva granulométrica es presentada

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} (p[\text{kPa}])^n$$

en la Figura 3. Estas arenas son procedentes de Dorsten (Alemania). Las curvas granulométricas fueron construidas artificialmente y son presentadas en la Figura 4. Su clasificación se realizó según la norma DIN 18196, que a diferencia con la norma Estadounidense las partículas son consideradas finas bajo la malla con abertura de 0,063 mm (y no 0.074 mm). Para la determinación de las densidades máximas y mínimas se utilizaron los procedimientos de la norma DIN 18126. La Tabla 1 muestra las propiedades e índices característicos de las curvas granulométricas ensayadas. Para todas las arenas ensayadas, la densidad específica de las partículas G_s fue de 2.65.

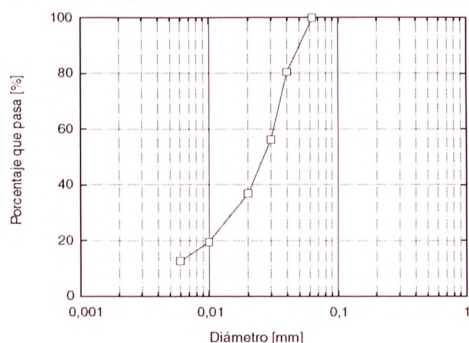


Figura 3: Curva granulométrica del polvo de cuarzo

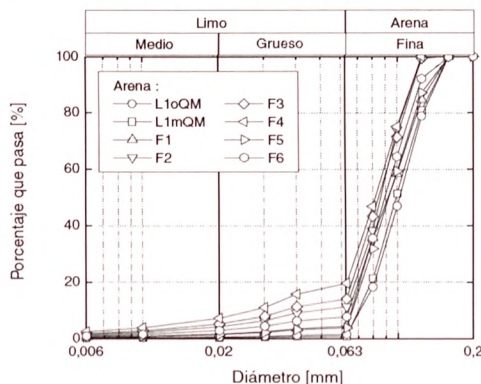


Figura 4: Curvas granulométricas de los materiales ensayados

Tabla 1: Características de las curvas granulométricas (coeficiente de uniformidad $C_u = d_{60}/d_{10}$), densidades mínima y máxima, relación de vacíos mínima y máxima, CF contenido de finos y d_{50} diámetro medio

Arena	d_{50} [mm]	C_u [-]	CF [%]	$\rho_{d,min}$ [g/cm ³]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	e_{min} [-]	e_{max} [-]
L1oQM	0,10	1,52	0,8	1,248	1,603	0,653	1,123
L1oQM	0,10	1,54	1,5	1,249	1,583	0,674	1,122
F5	0,08	1,51	3,8	1,257	1,568	0,690	1,108
F1	0,11	1,54	4,4	1,258	1,528	0,734	1,107
F6	0,07	1,51	7,8	1,261	1,576	0,682	1,102
F2	0,13	1,86	11,3	1,252	1,536	0,726	1,117
F3	0,10	2,54	14,0	1,219	1,538	0,723	1,174
F4	0,12	3,27	19,6	1,267	1,518	0,746	1,091

Investigaciones previas

En una arena el módulo de corte dinámico G_{max} a pequeñas amplitudes de deformación $\gamma^{ampl} < 10^{-5}$ es principalmente una función de la relación de vacíos e

y la tensión media p . Hardin y Richart (1963) y Hardin y Black (1966) proponen estimar el módulo de corte máximo (también llamado módulo de corte dinámico) a través de la siguiente ecuación:

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} (p[\text{kPa}])^n \quad (8)$$

Esta ecuación se obtuvo a través de ensayos realizados en arena Ottawa y en arenas cuarzosas con granos angulares. Basado en los resultados de Hardin y Richart (1963) y Hardin y Black (1966), las constantes A , a y n de la expresión (8) fueron determinadas, resultando:

$$G_{max} = 6,9 \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} p^{0,5} \quad \text{Arenas con granos redondeados} \quad (9)$$

$$G_{max} = 3,2 \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e} p^{0,5} \quad \text{Arenas con granos angulares} \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) son usadas habitualmente para una estimación de G_{max} .

Sin embargo, la ecuación (8) en sus constantes no refleja la fuerte dependencia del módulo de corte con los índices granulométricos (C_u , CF). Iwasaki y Tatsuoka (1977) presentaron evidencia de la influencia de la curva granulométrica en el módulo de corte. En esta investigación se observó como disminuye el módulo de corte dinámico con el aumento del coeficiente de uniformidad, además de también observar como disminuye el módulo de corte con el aumento del contenido de finos. Wichtmann y Triantafyllidis (2009a) lograron verificar la disminución del módulo de corte con el aumento del coeficiente de uniformidad, además de verificar que el cambio del diámetro medio d_{50} no influye en G_{max} (Martínez 2008). Así también se logró obtener las siguientes expresiones de las constantes A , a y n en función de C_u :

$$a = 1,94 \exp(-0,066 C_u) \quad (11)$$

$$n = 0,40 C_u^{0,18} \quad (12)$$

$$A = 1563 + 3,13 C_u^{2,98} \quad (13)$$

Con respecto al módulo edométrico M_{max} , Wichtmann y Triantafyllidis (2009b), a través de mediciones de ondas P con elementos piezoeléctricos, observaron como disminuye M_{max} con el aumento de C_u . Se obtuvo una expresión para M_{max} con la forma de la ecuación de Hardin que contiene la influencia de C_u en las constantes A , a y n . Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$a = 2,16 \exp(-0,055 C_u) \quad (14)$$

$$n = 0,344 C_u^{0,126} \quad (15)$$

$$A = 3655 + 26,7 C_u^{2,42} \quad (16)$$

$$G_{max} = A \frac{1}{(p[kPa])^n}$$



Resultados experimentales

Módulo de corte G

Para mejorar los resultados se ajustaron a los datos medidos para cada arena curvas con la forma de la ecuación de Hardin (8). De la ecuación (8), las constantes A , a y n fueron determinadas a través de regresiones.

Las constantes para cada arena son mostradas en la Tabla 2. De los resultados obtenidos y mostrados en las Figuras 5 y 6 puede observarse la influencia que tienen la relación de vacíos y la presión de confinamiento en el módulo G_{max} .

Tabla 2: Valores obtenidos para las constantes A , a y n de la ecuación de Hardin para cada una de las ocho arenas

Arena	CF [%]	Constantes ajustadas		
		A	a	n
L1oQM	1,48	636,5	2,34	0,44
L1mQM	0,80	347,8	2,81	0,45
F5	3,80	441,1	2,48	0,48
F1	4,40	571,4	2,197	0,51
F6	7,80	313,5	2,48	0,55
F2	11,30	81,6	3,83	0,58
F3	14,04	71,5	4,09	0,57
F4	19,60	17,9	7,19	0,57

Se puede observar además como pierden influencia a medida que el contenido de finos aumenta. De manera independiente, se observó que el módulo de corte puede describirse de la manera $G \sim p^n$. El efecto del contenido de finos en el módulo de corte máximo es significativo. Al aumentar el contenido de finos el módulo de corte disminuye notoriamente. Esta disminución comienza a desaparecer para contenidos de finos mayores al 10%. Para deducir una ecuación que incluya el efecto del contenido de finos, se ajustaron curvas a los valores de las constantes de la ecuación de Hardin (Figura 7). Las ecuaciones para las constantes A , a y n son las siguientes:

$$a = \frac{c_1 \exp(-c_2 C_u)}{1,76 \text{ para } C_u = 1,5} \exp(0,065 CF) \quad (17)$$

$$n = \frac{c_3 C_u^{c_4}}{0,43 \text{ para } C_u = 1,5} [1 + 0,116 \ln(1 + CF)] \quad (18)$$

$$A = \frac{(c_5 + c_6 C_u^{c_7})}{1573 \text{ para } C_u = 1,5} \cdot \frac{1}{2} [\exp(-c_{F3} CF^{c_{F4}}) + \exp(-c_{F5} CF^{c_{F6}})] \quad (19)$$

Las constantes de las ecuaciones anteriores son obtenidas para arenas con un coeficiente de uniformidad equivalente al de las arenas ensayadas $C_u = 1,5$ y un contenido de finos nulo tal como las obtenidas por Wichtmann *et al.* (2008) y Wichtmann y Triantafyllidis

(2009a y 2009b). Este valor fue adoptado puesto que casi todas las arenas tenían un coeficiente de uniformidad $C_u = 1,5$, salvo las arenas con $CF > 10\%$, pero dado que los módulos de corte G_{max} no fueron influenciados por C_u para contenidos de finos altos, se optó por dejar el factor igual para todas las arenas. Para una mejor aproximación se tuvo que omitir los valores de las arenas L1oQM y L1mQM que poseían un contenido de finos casi nulo. Las aproximaciones encontradas resultaron ser buenas y son mostradas en la Figura 8 para una relación de vacíos y presión de confinamiento constante. De igual manera, la buena aproximación es mostrada en la Figura 9 en donde se comparan los datos medidos con las curvas obtenidas de las ecuaciones ajustadas.

Módulo edométrico M_{max}

Los resultados de las mediciones de la velocidad de onda P mostraron que la relación de vacíos e y la tensión media p influyen en M_{max} , en donde al aumentar e disminuye el valor del módulo G mientras que al aumentar p aumenta el módulo M_{max} . Al igual que con G_{max} , el módulo edométrico puede ser expresado de la forma $M_{max} \sim p^n$ (Figura 10). Con respecto a la influencia de la relación de la tensión media, M_{max} va disminuyendo con el aumento del contenido de finos y esto se puede observar en la Figura 11. Además con el aumento de e disminuye el módulo edométrico M_{max} . Para obtener la fórmula empírica para M_{max} en base a la forma de la ecuación de Hardin, se determinaron las constantes A , a y n para cada arena (mostradas en la Tabla 3) a través de ajustes de curvas, para luego ajustar esas constantes a una curva que incluya el efecto del contenido de finos. De este último ajuste, y al igual que en G_{max} , se optó por omitir los valores de las arenas L1oQM y L1mQM. Las ecuaciones y curvas finales obtenidas para las constantes de la ecuación de Hardin en función del contenido de finos se presentan a continuación (Figura 12):

$$a = \frac{c_1 \exp(-c_2 C_u)}{1,99 \text{ para } C_u = 1,5} (1 + c_{MF1} CF) \quad \text{con } c_{MF1} = 0,116 \quad (20)$$

$$n = \frac{c_3 C_u^{c_4}}{0,36 \text{ para } C_u = 1,5} [1 + c_{MF2} \ln(1 + CF)] \quad \text{con } c_{MF2} = 0,125 \quad (21)$$

$$A = \frac{(c_5 + c_6 C_u^{c_7})}{3726 \text{ para } C_u = 1,5} \cdot \frac{1}{2} [\exp(-c_{MF3} CF^{c_{MF4}}) + \exp(-c_{MF5} CF^{c_{MF6}})] \quad (22)$$

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} (p[kPa])^n$$

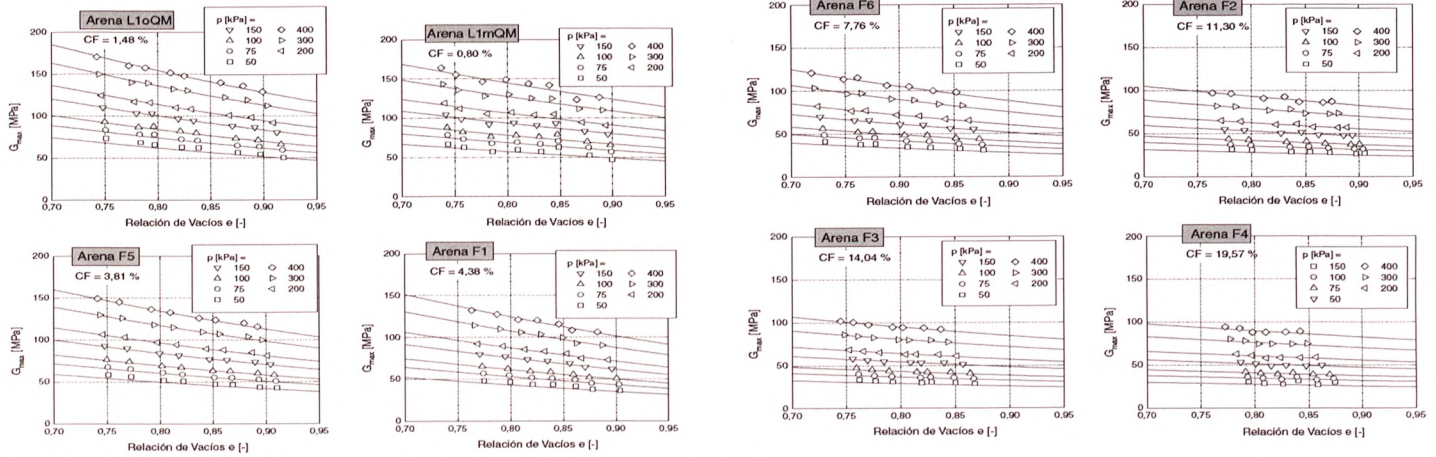


Figura 5: $G_{max}(p, e)$ medidos mostrando el ajuste de la ecuación de Hardin

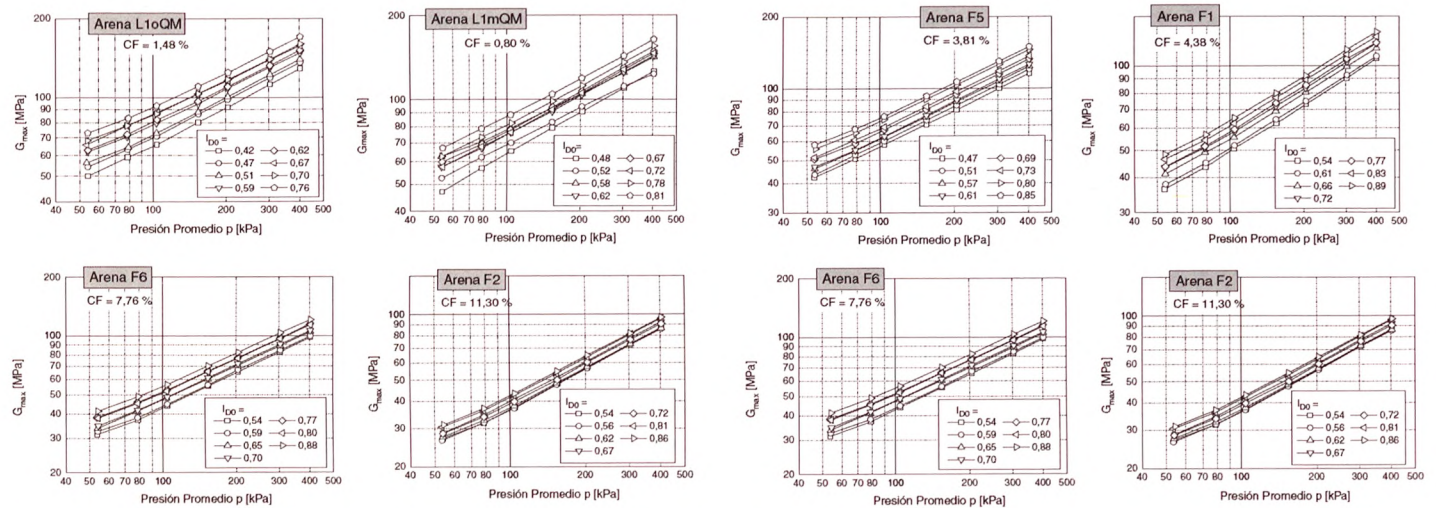


Figura 6: Módulo de corte G_{max} como función de p , la densidad relativa y el contenido de finos

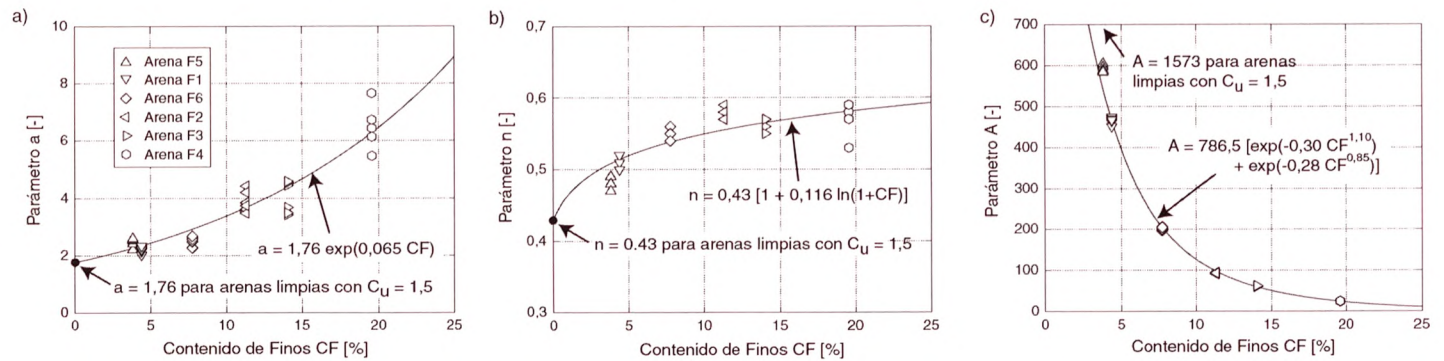


Figura 7: Constantes A , a y n para el cálculo de G_{max} como función del contenido de finos CF

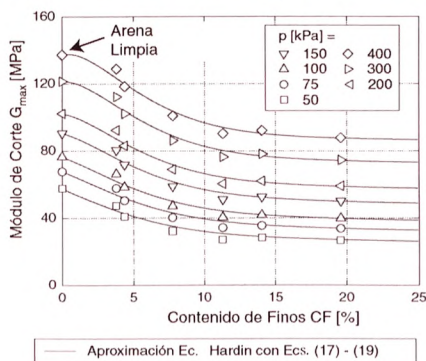


Figura 8: Módulo de corte como función del contenido de finos

$$G_{max} = A \frac{1}{(p[kPa])^n}$$

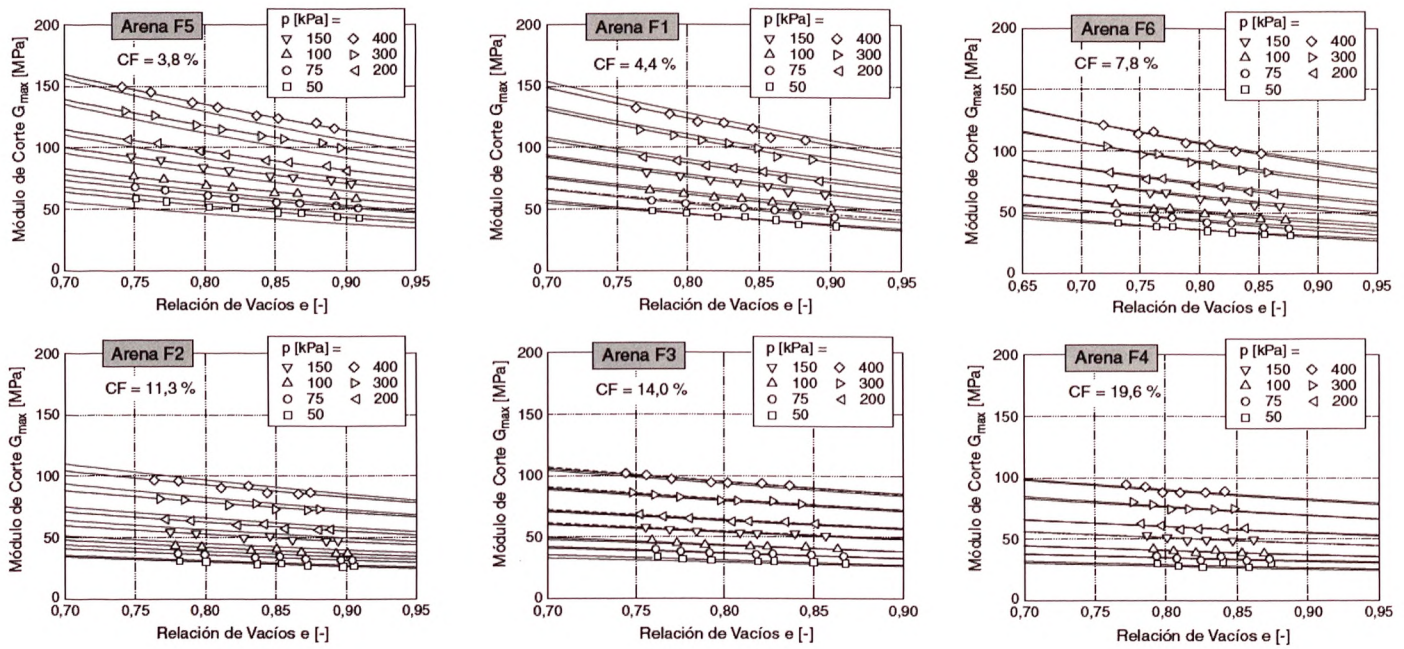


Figura 9: Módulo de corte G_{max} como función de la relación de vacíos e y la presión p . Las curvas negras corresponden al ajuste para cada grupo de puntos y la curva azul corresponde a la ecuación de Hardin con el efecto del contenido de finos usando a , n y A de la Figura 7

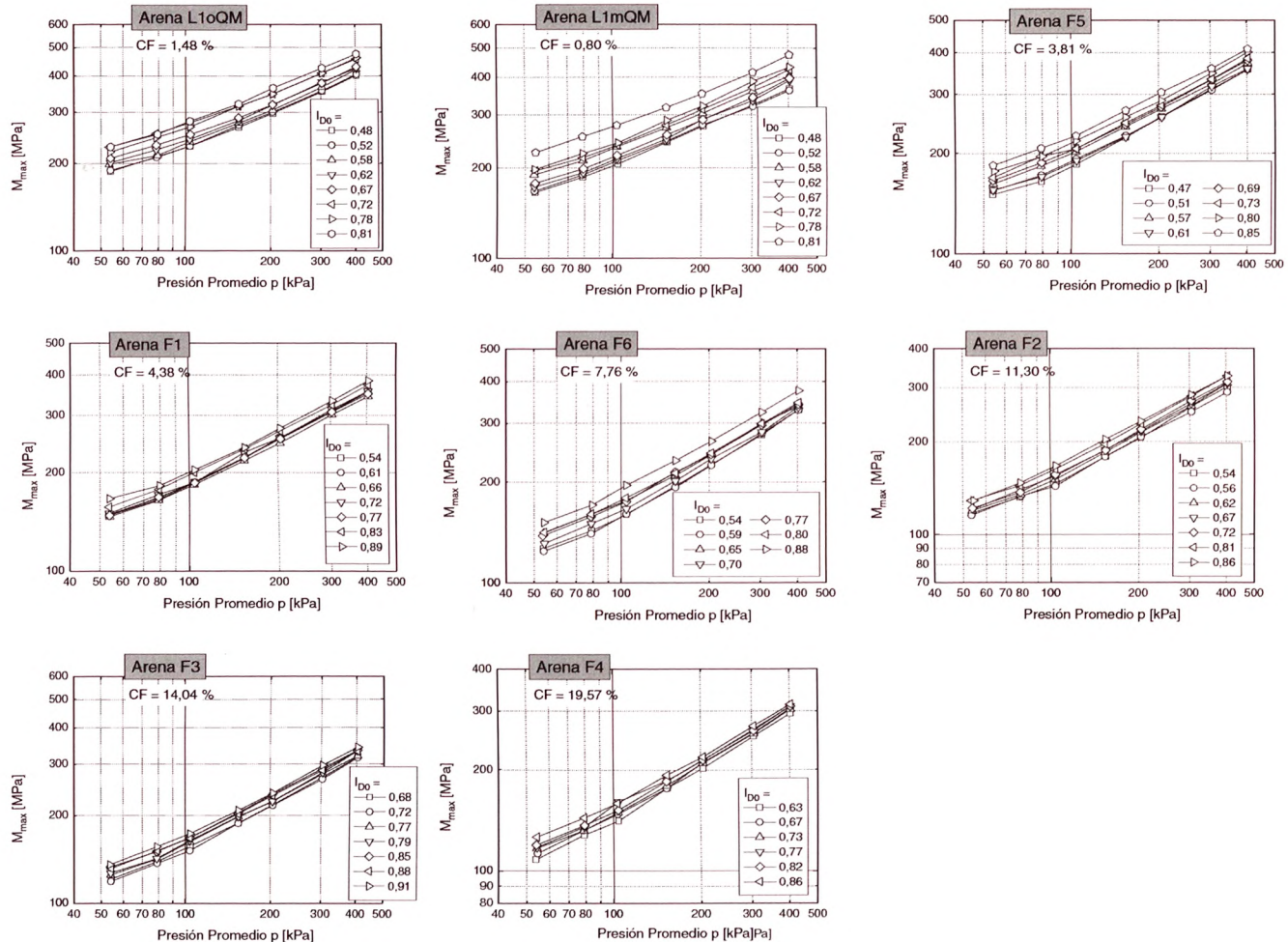


Figura 10: M_{max} como función de la presión promedio p

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1} (p[\text{kPa}])^n$$

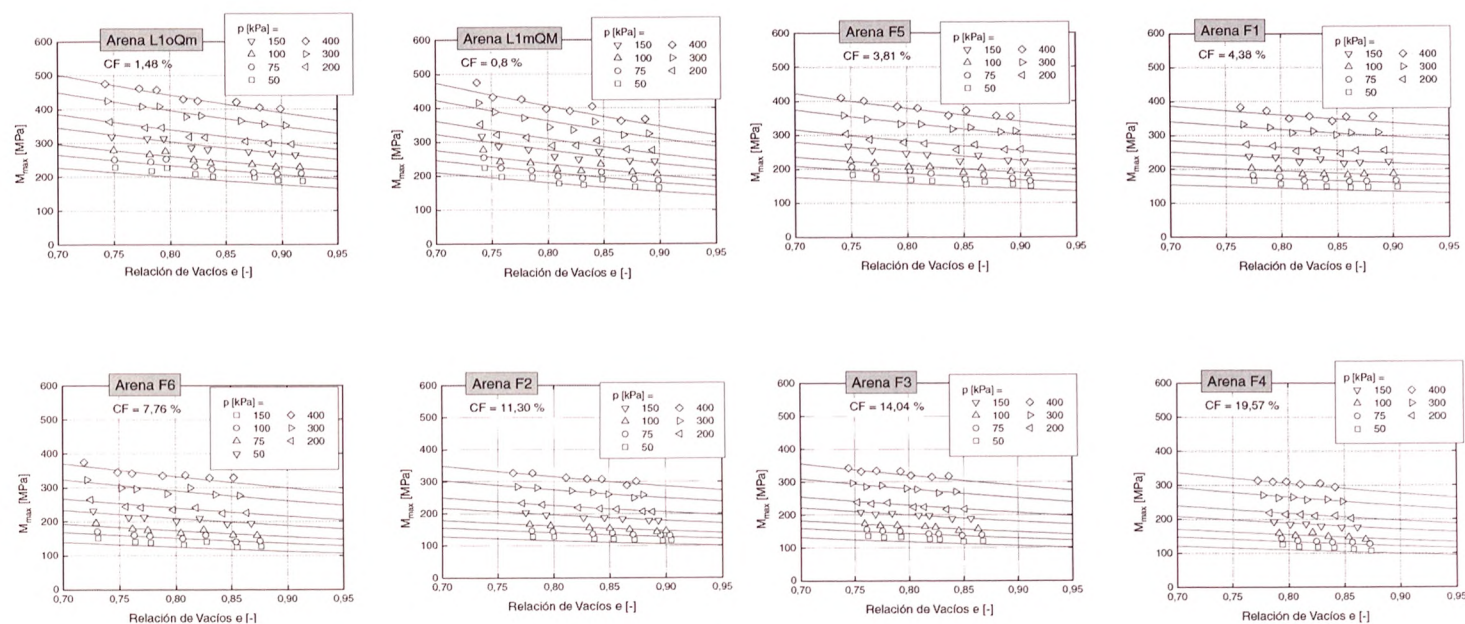
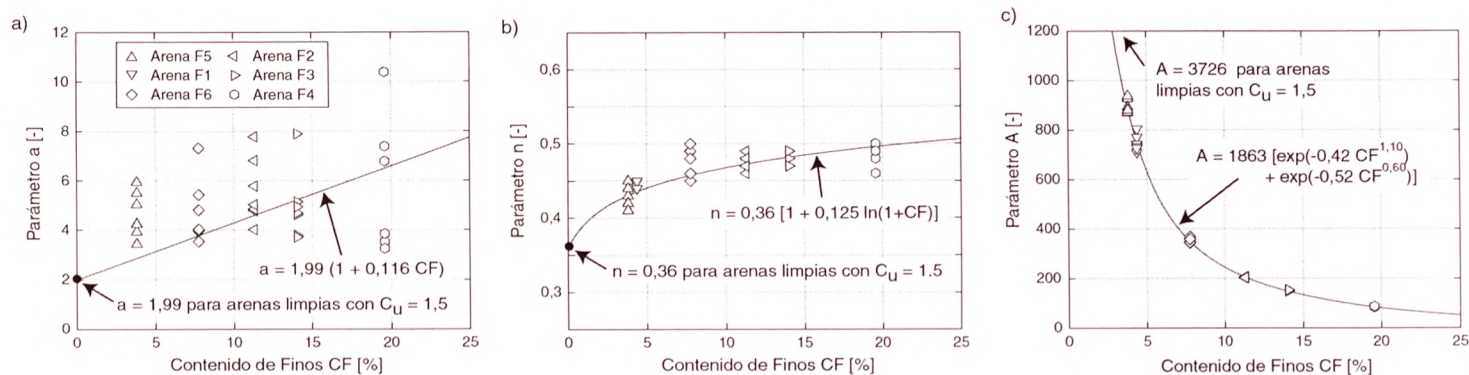

 Figura 11: $M_{max}(p, e)$ medidos mostrando el ajuste de la ecuación de Hardin

 Figura 12: Constantes A , a y n para el cálculo de M_{max} como función del contenido de finos CF

 Tabla 3: Valores obtenidos para las constantes A , a y n de la ecuación de Hardin para M_{max} para cada una de las ocho arenas ensayadas

Arena	CF [%]	Promedio de las Constantes		
		A	a	n
L1oQM	1,48	582,5	3,64	0,38
L1mQM	0,80	1072,6	2,79	0,39
F5	3,80	260,6	4,62	0,42
F1	4,40	14,70	16,27	0,44
F6	7,80	203,1	4,72	0,47
F2	11,30	127,7	5,58	0,48
F3	14,04	170,4	4,97	0,48
F4	19,60	132,2	5,39	0,49

$$G_{max} = A \frac{1}{(p[\text{kPa}])^n}$$

La Figura 13 muestra en línea punteada las curvas logradas con las constante a , n y A (Figura 12), las cuales se comparan relativamente bien con los valores de M_{max} en función del contenido de finos CF. De igual manera la Figura 14 muestra la comparación de las curvas calculadas con los puntos medidos.

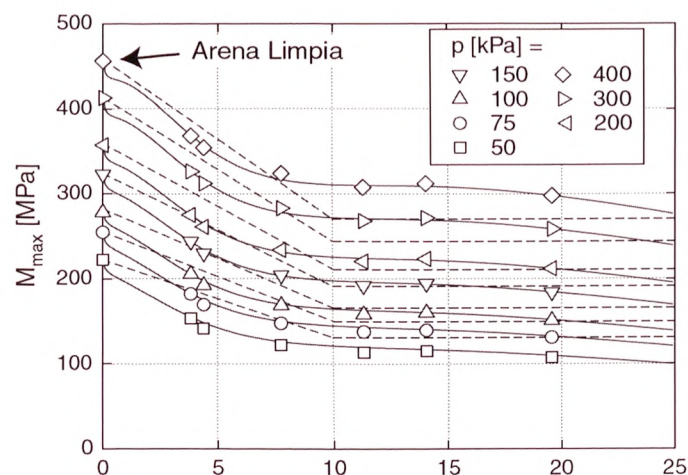


Figura 13: Módulo edométrico como función del contenido de finos

Variación de la amplitud de deformación de corte γ^{ampl}

Esta investigación tuvo también como objetivo estudiar la influencia de la amplitud de la deformación de corte en los parámetros dinámicos del suelo. Para ello se construyen curvas G versus γ^{ampl} , razón de amortiguamiento D versus γ^{ampl} y deformación vertical versus γ^{ampl} . Se efectuaron ensayos tipo B anteriormente descrito.

Las curvas $G(\gamma^{ampl})$ que muestran la influencia de la presión de confinamiento en el módulo de corte no se incluyen (ver Navarrete 2009). Sin embargo, se puede resumir que la tensión media p tiene un efecto significativo en G , dado que a mayor p mayor es G independiente del contenido de finos y para densidades relativas DR alrededor del 60%. Mientras que la densidad relativa DR (entre 60% y 90%) tiene un leve efecto en G cuando el $CF < 8\%$. El módulo G permanece constante hasta amplitudes de deformación del orden de 10^{-5} para diferentes presiones de confinamiento.

En las curvas $G/G_{max}(\gamma^{ampl})$ se puede observar que la

disminución del módulo de corte se produce más rápidamente en arenas sin contenido de finos que en arenas con contenido de finos; este efecto nombrado anteriormente comienza a disminuir a altas presiones (Figura 15). A presiones más bajas la razón de amortiguamiento aumenta más rápidamente (Figura 16). Esto significa que para una misma amplitud γ^{ampl} a bajas presiones se disipa más energía que a altas presiones. La influencia de la presión en D disminuye con el aumento del contenido de finos. La comparación de las curvas $D(\gamma^{ampl})$ para las distintas arenas muestra que la razón de amortiguamiento disminuye con el aumento del contenido de finos. La influencia de CF es mayor a pequeñas presiones.

Para las arenas con bajo contenido de finos, los asentamientos Δh en la zona $\gamma^{ampl} > 10^{-4}$ son mayores para pequeñas presiones que para presiones más altas. Esta diferencia disminuye con el aumento del contenido de finos.

Coefficiente de Poisson ν

Este coeficiente se obtuvo a partir de la medición de las velocidades de onda de corte y compresión. Los coeficientes Poisson obtenidos para todas las arenas se encontraron en el rango de 0.2 y 0.35. Los resultados obtenidos para este parámetro mostraron el aumento que tiene este coeficiente con el aumento del contenido de finos hasta el límite de $CF \approx 10\%$ (ver Figura 18). Esto se debe a que los módulos G_{max} y M_{max} permanecen casi constantes para $CF > 10\%$.

Conclusiones

Se han realizado ensayos de columna resonante, con medición de ondas P a través de elementos piezoeléctricos, a suelos no cohesivos con 8 diferentes curvas granulométricas y con diferentes contenidos de finos que variaron entre 0% y 20%. Los resultados mostraron que el módulo de corte a bajas amplitudes de deformación G_{max} , bajo una misma tensión media p y relación de vacíos e , es influenciado fuertemente por el aumento del contenido de finos. El módulo G_{max} disminuye de manera considerable si el contenido de finos aumenta hasta en un 10%. Para contenido de finos mayores al 10% el módulo G_{max} permanece casi

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1} (p[\text{kPa}])^n$$

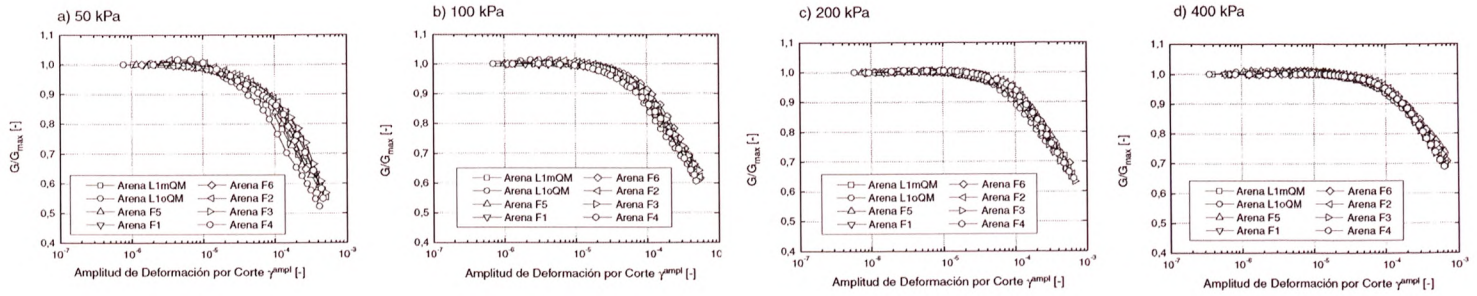


Figura 15: Comparación de las curvas $G/G_{max}(\gamma^{amp})$ para las arenas con diferente contenido de finos y con $DR_0 \approx 60\%$

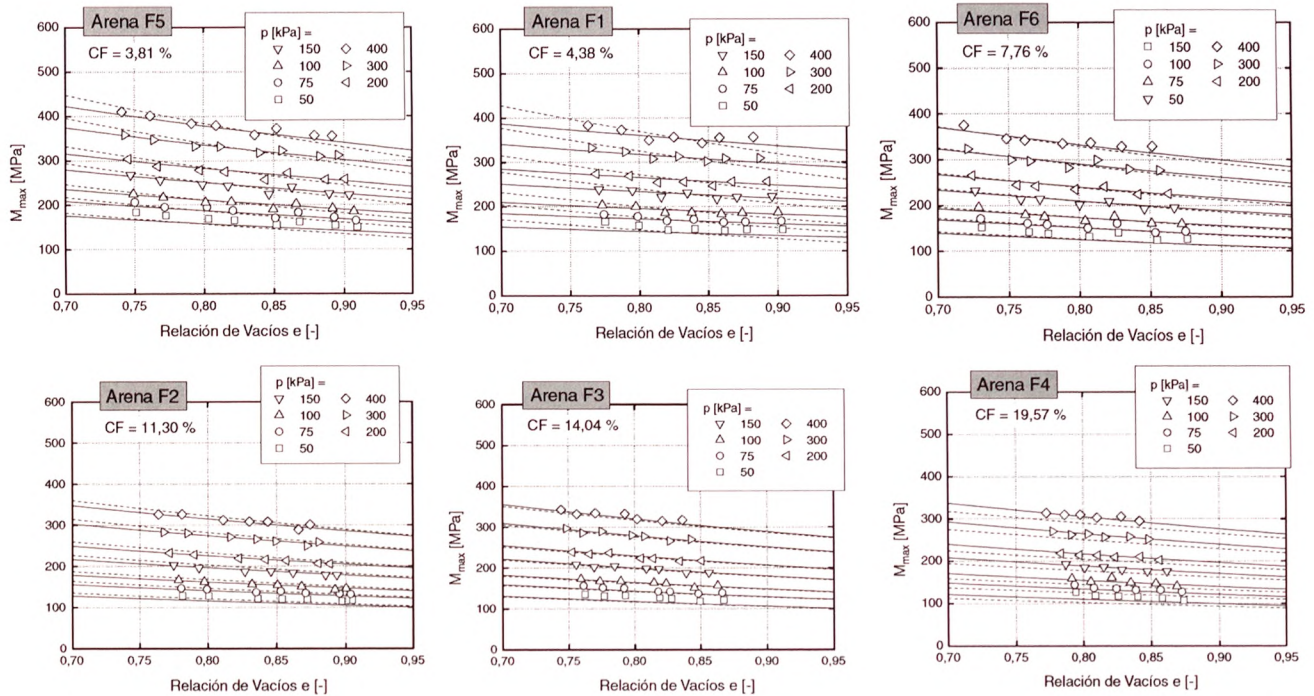


Figura 14: Módulo edométrico M_{max} como función de la relación de vacíos e y la presión media p . Las curvas negras corresponden al ajuste para cada grupo de puntos y la curva azul corresponde a la ecuación de Hardin con el efecto del contenido de finos usando a , n y A de la Figura 12

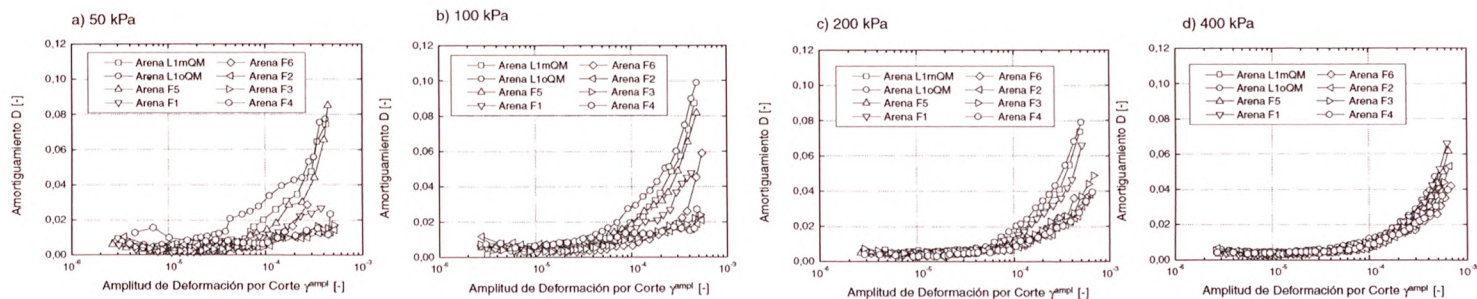


Figura 16: Comparación de la razón de amortiguamiento entre arenas con diferentes contenido de finos y con $DR_0 \approx 60\%$

$$G_{max} = A \frac{1}{(p[kPa])^n}$$

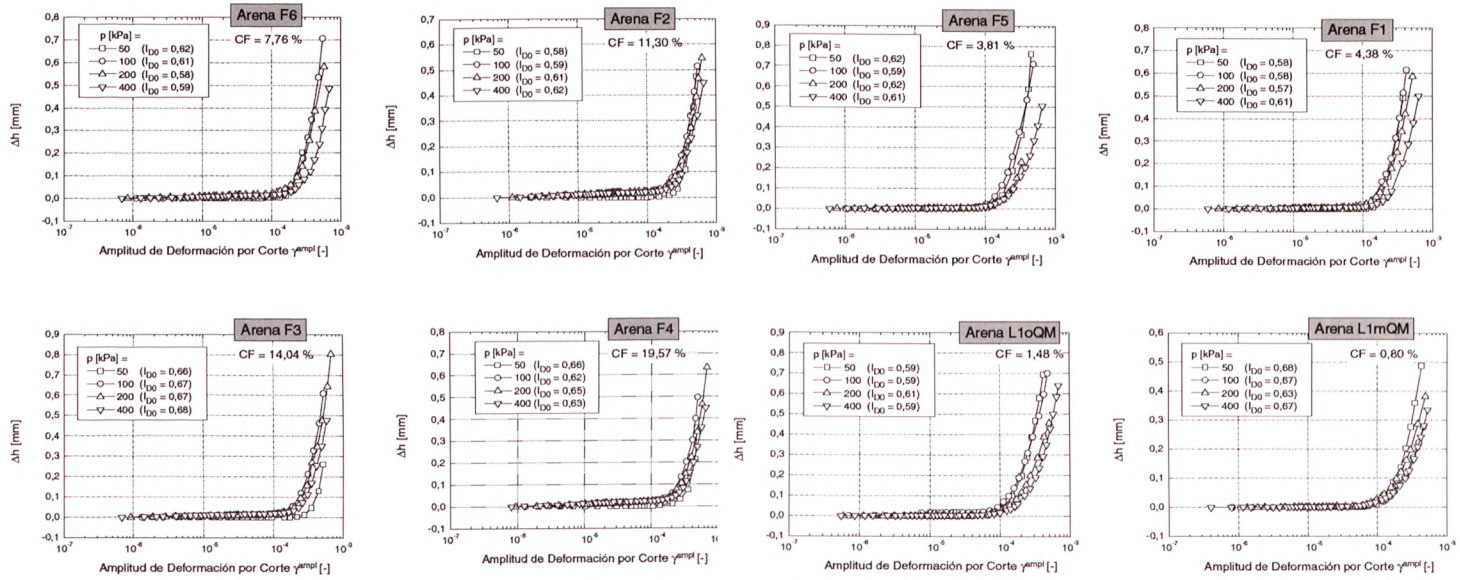


Figura 17: Curva $\Delta h(\gamma^{ampl})$ para diferentes presiones y con $DR_o \approx 60\%$

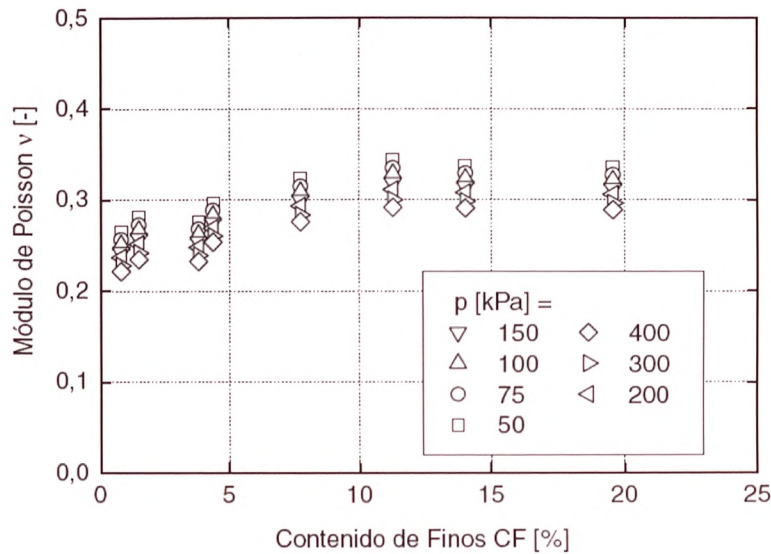


Figura 18: Coeficiente de Poisson v en función del contenido de finos CF

constante. Este comportamiento del módulo de corte dinámico para un mismo coeficiente de uniformidad C_u y diferentes contenidos de finos pudo ser modelado a través de la ecuación de Hardin.

Para amplitudes de deformación de corte $\gamma^{ampl} > 10^{-5}$, con una misma tensión media p y densidad relativa, la

disminución del módulo de corte por el aumento de la amplitud de deformación de corte es mayor para arenas con menor contenido de finos. Además la razón de amortiguamiento D disminuye con el aumento del contenido de finos. Estas diferencias a mayores presiones de confinamiento o tensión media p va disminuyendo.

$$G_{max} = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} (p[\text{kPa}])^n$$

El módulo edométrico a bajas amplitudes de deformación M_{max} es influenciado por la relación de vacíos e y la tensión media p al igual que el módulo de corte G_{max} . El módulo edométrico M_{max} disminuye si aumenta el contenido de finos hasta en un 10% y luego comienza a permanecer casi constante. También el módulo M_{max} pudo ser aproximado con la misma forma de la ecuación de Hardin.

La relación de Poisson aumenta con el aumento del contenido de finos de hasta un 10%. Después este coeficiente comienza a permanecer constante.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto “Influencia del coeficiente de uniformidad de la curva granulométrica y el contenido de finos en las propiedades dinámicas de suelos no cohesivos”, respaldado por el German Research Council (DFG, project No. TR218/11-1). El autor pudo hacer esta investigación gracias a la beca otorgada por el DAAD y la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Se agradece especialmente la supervisión y apoyo del Dr. Wichtmann y también a las personas del laboratorio de Dinámica de Suelos de la Ruhr Universität Bochum.

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 Richart Jr., F.E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 89(SM1): 33-65

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.A. (2008). Influencia de la granulometría en las propiedades dinámicas de suelos no cohesivos bajo pequeñas deformaciones. *Obras y Proyectos* 3, 22-31

Navarrete, M.A. (2009). Einfluss des Feinkornanteils eines nichtbindigen Bodens auf die Steifigkeit und die Dämpfung bei kleinen Dehnungsamplituden. Diplomarbeit Instituto de Fundaciones y Mecánica de Suelos, Ruhr Universität Bochum.

Wichtmann, T. and Triantafyllidis, Th. (2009a). On the influence of the grain size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{max} . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 135(10), 1404-1418

Wichtmann, T. and Triantafyllidis, Th. (2009b). On the influence of the grain size distribution curve on the P-Wave velocity, constrained elastic modulus M_{max} and Poisson's ratio of quartz sands (submitted). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.

Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th., Martínez, R., Duran, F., Giolo, E. and Navarrete, M. (2008). On the influence of the grain size distribution curve on the secant stiffness of quartz sand under cyclic loading. In *11th Baltic Sea Geotechnical Conference: Geotechnics in Maritime Engineering, Gdansk, Poland, 15-18 September 2008*.