

# Predicción de la velocidad de onda cortante de depósitos marinos arcillosos

Víctor M. Taboada & Xingnian Chen  
*Fugro GeoConsulting Inc*  
Catalina Cardona & K.C. Gan  
*Fugro McClelland Marine Geosciences, Inc.*  
Diego Cruz & Procoro Barrera  
*Instituto Mexicano del Petróleo, México.*  
Esteban Espinosa, Carlos Gonzalez & Daulet Carrasco.  
*Petróleos Mexicanos, México.*



## ABSTRACT

The predicting capability of in situ shear wave velocity ( $V_s$ ) of three empirical correlations with basic soil properties such as shear strength, plasticity, void ratio, overconsolidation ratio ( $OCR$ ), cone penetration test (PCPT) tip resistance, and effective stress for clay, and resonant column test data adjusted to account for aging effects is verified. In a shallow water site the correlations generate an envelope around the in situ measurements of  $V_s$  and the best estimate is given by the correlation based on shear strength. When the correlations are applied to a deepwater site it is found that the estimated  $V_s$  falls within a narrow band of 10 %. For the shallow water and deepwater sites, the estimated  $V_s$  with resonant column data adjusted to account for aging effects with an aging factor of 4 fall within the envelope generated by the empirical correlations and in situ measurements.

## RESUMEN

La capacidad de predicción de la velocidad de onda de cortante ( $V_s$ ) de tres correlaciones empíricas con propiedades básicas del suelo tales como resistencia al esfuerzo cortante, plasticidad, relación de vacíos, relación de sobreconsolidación ( $OCR$ ), resistencia de punta del cono (PCPT) y esfuerzos efectivos para arcillas, y datos de columna resonante es verificada. En un sitio en aguas someras las correlaciones empíricas generan una envolvente alrededor de las mediciones in situ de  $V_s$  y la mejor estimación es dada por la correlación con la resistencia al esfuerzo cortante. Cuando se aplican a un sitio en aguas profundas se tiene que los valores estimados de  $V_s$  caen dentro de una banda muy estrecha de un 10 %. Para los sitios en aguas someras y profundas, las estimaciones de  $V_s$  a partir de datos de columna resonante, ajustados por el efecto de envejecimiento utilizando un factor de envejecimiento de 4.0, caen justo dentro de la envolvente generada por las correlaciones empíricas y las mediciones in situ.

## 1 INTRODUCCION

### 1.1 Descripción del Proyecto

Uno de los retos más importantes en la realización de un análisis de respuesta sísmica de depósitos marinos arcillosos es la determinación de la velocidad de onda cortante in situ. Por tal motivo, se realizó una investigación geotécnica en aguas someras en el Golfo de México con objeto de medir la velocidad de onda cortante in situ y posteriormente comparar esta medición con las velocidades estimadas a través de correlaciones empíricas y pruebas de laboratorio. Una vez que las correlaciones empíricas se validaron para depósitos marinos arcillosos en aguas someras, éstas se usaron en la determinación de la velocidad de corte de un depósito arcilloso en aguas profundas.

### 1.2 Objetivos y Alcances

Determinar la velocidad de onda cortante con correlaciones empíricas disponibles en la literatura basadas en la información disponible del suelo tales

como pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades índice y de resistencia del suelo y pruebas in situ de Piezocono Penetrómetro (PCPT), veleta remota y registros de velocidades sísmicas P-S de sonda suspendida.

Comparar la velocidad medida in situ de onda cortante para el caso de un depósito arcilloso en aguas someras, con aquella determinada a partir de correlaciones empíricas y pruebas de laboratorio, y aplicar estas correlaciones empíricas a un sitio en aguas profundas.

## 2 INVESTIGACION DE CAMPO

Las condiciones del suelo en estudio, se investigaron mediante la perforación, muestreo y pruebas in situ de un sondeo geotécnico realizado costa afuera en el Golfo de México, hasta una profundidad de 121.9 m debajo del fondo marino, con un tirante de agua de 98.5 m.

Las muestras de suelo fueron obtenidas a través de la tubería de perforación generalmente a intervalos de 0.9 m desde el fondo marino hasta una penetración de 12.5 m, a intervalos de 1.5 m de 12.5 a 24.7 m y a

intervalos aproximados de 4.0 m desde la penetración anterior hasta la profundidad final del sondeo.

Además de la perforación y muestreo, se realizaron pruebas in situ de Piezocono Penetrómetro (PCPT) a profundidades seleccionadas a partir de 3.4 m de penetración y hasta la profundidad final del sondeo para medir la resistencia al esfuerzo cortante in situ de suelos cohesivos. Adicionalmente, se realizaron pruebas in situ de Veleta Remota de Pozo a profundidades seleccionadas en arcillas normalmente consolidadas a ligeramente sobreconsolidadas hasta una profundidad de 25.6 m debajo del fondo marino. Debajo de esta profundidad no se realizaron pruebas in situ de veleta remota debido a la presencia de arcillas muy firmes a duras. Inmediatamente después de las actividades de perforación, muestreo y pruebas in situ, se realizaron registros P-S desde 122.5 m hasta 10.4 m de penetración por debajo del fondo marino para medir las velocidades in situ de onda cortante horizontal y de compresión en el suelo, un dibujo esquemático de la sonda de registro P-S se presenta en la Figura 1. En la proximidad inmediata de la localización del sondeo, se realizaron pruebas de Veleta Remota de Fondo para medir la resistencia al esfuerzo cortante en los suelos cohesivos cercanos al fondo marino hasta una profundidad de 6.1 m.

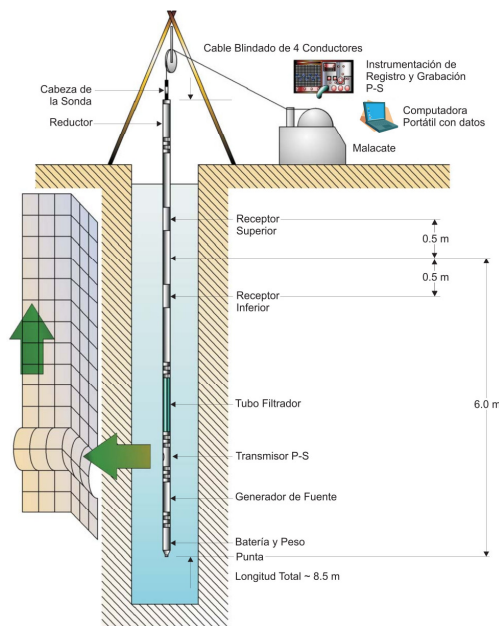


Figura 1. Sistema de registro de velocidades sísmicas P-S de sonda suspendida

### 3 PRUEBAS ESTATICAS DE LABORATORIO

El programa de pruebas estáticas de laboratorio para este estudio fue diseñado con el fin de: (a) evaluar las propiedades índice, (b) medir la resistencia al esfuerzo cortante y (c) obtener los esfuerzos de preconsolidación del suelo. Para los suelos encontrados en el sitio, se realizaron las siguientes pruebas de clasificación: a)

límites de Atterberg, b) contenido de carbonatos y c) gravedad específica.

Además de las pruebas de clasificación antes mencionadas, se realizaron pruebas adicionales de veleta miniatura (VM), y triaxiales UU, en muestras seleccionadas inalteradas y remodeladas de suelos cohesivos. Se realizaron pruebas de consolidación por deformación constante (CRS) en muestras seleccionadas de suelo cohesivo para estimar los esfuerzos de preconsolidación del suelo en el sitio del sondeo.

### 4 CONDICIONES GENERALES DEL SUELO

El primer paso en un análisis de respuesta sísmica es el desarrollo de un perfil del subsuelo que describa la estratigrafía del suelo encontrada en el sitio. Esto requiere información sobre la clasificación, el espesor y la elevación de cada capa del suelo. La estratigrafía generalizada de los suelos en la localización del sondeo se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Estratigrafía generalizada de los suelos en la localización del sondeo.

Estrato	Penetración, m		Descripción
	De	A	
I	0.0	8.5	Arcilla calcárea muy blanda a blanda
II	8.5	77.4	Arcilla calcárea media a muy firme
III	77.4	121.9	Arcilla calcárea dura

### 5 INTERPRETACION DE LAS PROPIEDADES ESTATICAS DEL SUELO

Las siguientes secciones se concentran en la interpretación y evaluación de los resultados de las pruebas in situ y pruebas de laboratorio para el desarrollo de los perfiles de índice de plasticidad, peso volumétrico sumergido, relación de vacíos, resistencia al esfuerzo Cortante sin drenaje, relación de sobreconsolidación (OCR), coeficiente de empuje de tierras en reposo y esfuerzo efectivo medio, necesarios en la aplicación de correlaciones empíricas utilizadas para estimar la velocidad de onda de cortante in situ.

#### 5.1 Perfil Interpretado del Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad se define como la diferencia entre los límites líquido y plástico ( $IP = LL - LP$ ). La Figura 2 muestra la variación del índice de plasticidad en función de la profundidad debajo del fondo marino y presenta el perfil del índice de plasticidad (IP) interpretado para los estratos de arcilla. Este perfil se usó en la interpretación de la velocidad de onda de corte de los estratos arcillosos.

#### 5.2 Perfil Interpretado del Peso Volumétrico Sumergido

Durante la investigación de campo, se midió el peso volumétrico total de todas las muestras de suelos

cohesivos. Se restó el peso volumétrico del agua salada, aproximadamente 10 kN/m<sup>3</sup>, del peso volumétrico total medido para obtener un estimado del peso volumétrico sumergido de la muestra. La Figura 3 muestra la variación del peso volumétrico sumergido y el perfil interpretado en función de la profundidad debajo del fondo marino.

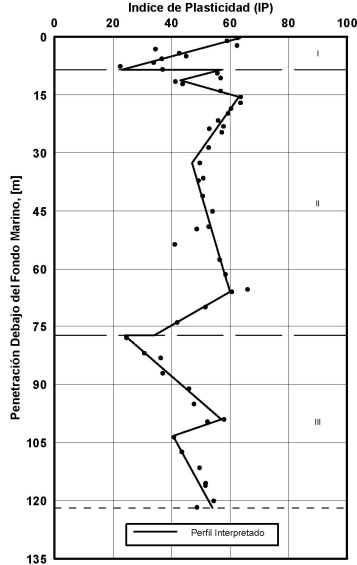


Figura 2. Perfil interpretado del índice de plasticidad.

### 5.3 Perfil Interpretado de la Relación de Vacíos

El perfil interpretado de la relación de vacíos se obtuvo a partir de los perfiles interpretados de contenido de humedad y gravedad específica asumiendo un grado de saturación del 100 %. La Figura 4 muestra la variación de la relación de vacíos y el perfil interpretado en función de la profundidad debajo del fondo marino.

Perfil Interpretado de Resistencia al Esfuerzo Cortante sin Drenaje

Para las arcillas encontradas en el sondeo, se puede estimar la resistencia al esfuerzo cortante sin drenaje in situ de los datos del PCPT utilizando la siguiente relación:

$$S_u = q_{net} / N_{kt} \quad [1]$$

donde:

$S_u$  = resistencia al esfuerzo cortante sin drenaje;  $q_{net}$  = resistencia neta del cono; y  $N_{kt}$  = factor empírico de capacidad de carga o el factor del cono.

Para una aplicación más específica a la localización, se puede obtener el factor  $N_{kt}$  para la reducción de los datos del PCPT mediante una calibración contra los datos de las resistencias al esfuerzo cortante determinadas de las pruebas de VM, triaxial UU y de las pruebas in situ de veleta remota. En la Figura 5, se presentan los límites superior e inferior de la resistencia al esfuerzo cortante sin drenaje interpretados a partir de

los datos del PCPT junto con las resistencias al esfuerzo cortante sin drenaje obtenidas de las pruebas de laboratorio de VM, triaxial UU y de las pruebas in situ de veleta remota. Para las estimaciones de los límites superior e inferior en la localización del sondeo se utilizó un  $N_{kt} = 12$  a 16 por arriba de los 8.5 m de profundidad y un  $N_{kt} = 15$  a 20 por debajo de los 8.5 m. El perfil interpretado de la resistencia al esfuerzo cortante presentado en la Figura 5 se usó en la interpretación de la velocidad de onda de corte de los estratos arcillosos.

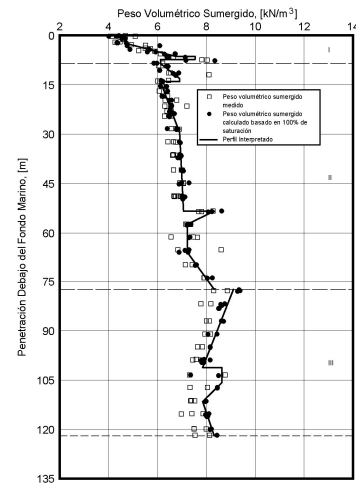


Figura 3. Perfil interpretado del peso volumétrico sumergido

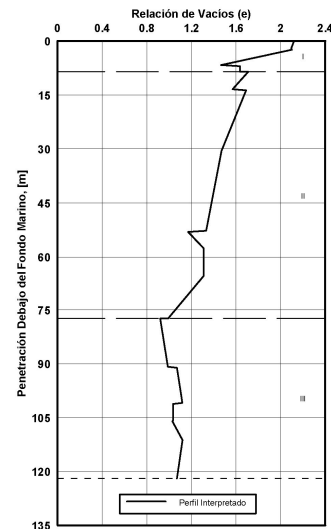


Figura 4. Perfil interpretado de la relación de vacíos.

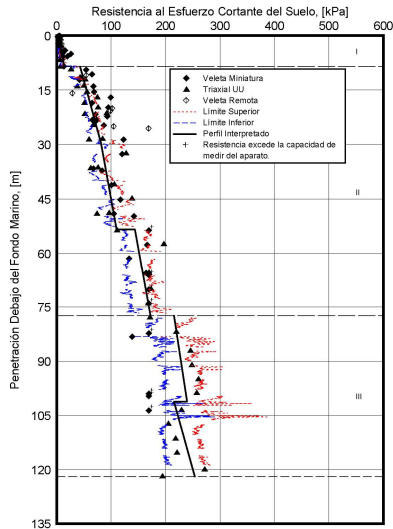


Figura 5. Perfil interpretado de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo inalterado.

#### 5.4 Perfil Interpretado de Relación de Sobreconsolidación (OCR)

La historia de esfuerzos de un perfil de suelo está definida por su OCR, la cual es la relación entre la carga de preconsolidación ( $\sigma'_{vm}$ ) y el esfuerzo vertical efectivo in situ ( $\sigma'_{vm}$ )

El perfil del esfuerzo vertical efectivo in situ o de sobrecarga efectiva fue estimado de la interpretación del perfil de peso volumétrico sumergido. Las cargas de preconsolidación (o cargas anteriores máximas) fueron interpretadas de los resultados de las pruebas de consolidación usando el Método de Casagrande (1936) y el Método de Trabajo por Unidad de Volumen propuesto por Becker et al. (1987). Adicionalmente, las cargas de preconsolidación se estimaron de los datos del PCPT usando la siguiente correlación empírica:

$$\sigma'_{vm} = 0.33 * q_{net} \quad [2]$$

donde:  $\sigma'_{vm}$  = carga de preconsolidación o carga anterior máxima; y  $q_{net}$  = resistencia neta del cono.

La correlación empírica antes mencionada, fue desarrollada a partir de valores medidos de  $q_{net}$  obtenidos de las pruebas de PCPT y de valores interpretados de  $\sigma'_{vm}$ , obtenidos de pruebas de consolidación realizadas en más de cien sitios en el Golfo de México. Una correlación similar fue desarrollada por Mayne y Kulhawy (1995).

Basándose en la comparación del perfil de esfuerzo vertical efectivo in situ estimado y el perfil de las cargas de preconsolidación interpretado se determinó el perfil de OCR, el cual se presenta en la Figura 6.

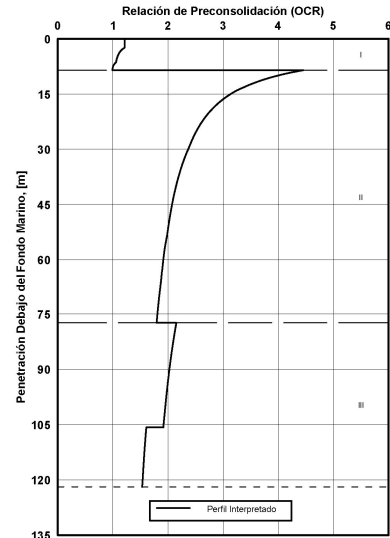


Figura 6. Perfil interpretado del OCR.

#### 5.5 Perfil Interpretado del Esfuerzo Efectivo Medio In Situ

Perfil Interpretado del Coeficiente de Empuje de Tierras en Reposo

Se sabe que el coeficiente de empuje de tierras en reposo ( $K_0$ ) está relacionado con la historia de esfuerzos del suelo al igual que con el tipo de suelo (Booker e Ireland, 1965, y Mayne y Kulhawy, 1982). En este estudio  $K_0$  se estima para arcillas normalmente consolidadas (NC), usando las siguientes correlaciones (Das, 1990):

$$K_{o\_NC} = 0.4 + 0.007(IP) \quad \text{para } 0 \leq IP \leq 40 \quad (3)$$

y

$$K_{o\_NC} = 0.64 + 0.001(IP) \quad \text{para } 40 \leq IP \leq 80 \quad [4]$$

donde:  $K_{o\_NC}$  = coeficiente de empuje de tierras en reposo para arcillas normalmente consolidadas, e IP = índice de plasticidad.

Para arcillas preconsolidadas (OC), donde  $K_{o\_OC}$  es mayor que  $K_{o\_NC}$ , los valores de  $K_{o\_OC}$  se estiman mediante la siguiente relación dada por Alpan (1967):

$$K_{o\_OC} = K_{o\_NC} * OCR^n \quad [5]$$

donde:  $K_{o\_OC}$  = coeficiente de empuje de tierras en reposo para arcillas preconsolidadas; OCR = relación de  $n=0.54 * 10 - (IP/281)$  preconsolidación del suelo; y, dado por Bowles (1996).

La Figura 7 muestra el perfil interpretado de  $K_0$  estimado por los procedimientos descritos en función de la profundidad debajo del fondo marino.

Se estimó el esfuerzo efectivo medio in situ ( $\sigma'_m$ ) utilizando la Ecuación 6 recomendada por Seed y Peacock (1971).

$$\sigma'_m = \left[ \frac{(1 + 2K_o)}{3} \right] * \sigma'_{vo} \quad [6]$$

Donde  $\sigma'_{vo}$  := esfuerzo vertical efectivo in situ estimado a partir del perfil interpretado del peso volumétrico sumergido; y  $K_o$  = coeficiente de empuje de tierras en reposo calculado a partir de las ecuaciones indicadas en la sección 5.6.

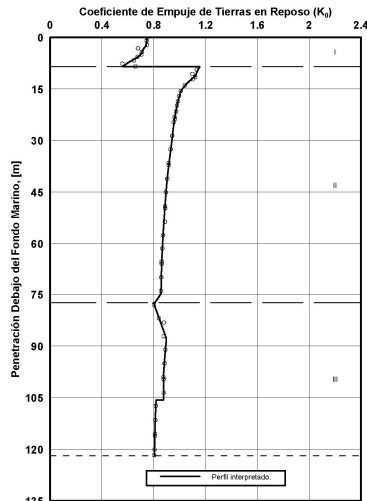


Figura 7. Perfil interpretado del  $K_o$

El perfil interpretado del esfuerzo efectivo medio in situ se presenta en la Figura 8.

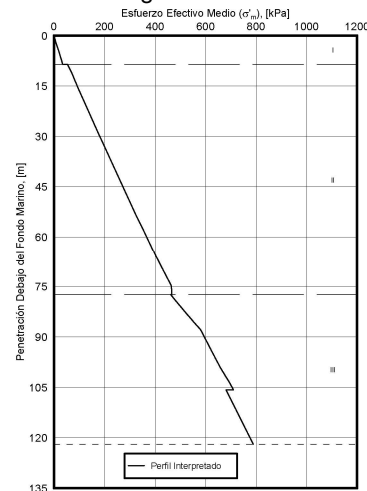


Figura 8. Perfil interpretado del esfuerzo efectivo medio in situ

## 6 PRUEBAS DINAMICAS DE LABORATORIO

El programa de pruebas de columna resonante se desarrolló para determinar el módulo de rigidez al corte ( $G_{max}$ ) de los suelos a deformaciones al corte bajas (menos de 0.0001 %). Se realizaron cuatro pruebas de

columna resonante en especímenes de suelo cilíndricos sólidos de aproximadamente 38 mm de diámetro con una longitud de 76 mm. Cada una de las muestras se saturó a una contrapresión de aproximadamente 140 kPa y luego se consolidó isotrópicamente usando tres presiones efectivas de confinamiento,  $\sigma'_{co}$  sucesivas (pruebas en tres etapas), con valores del orden de  $0.5\sigma'_m$ ,  $\sigma'_m$  y  $2.0\sigma'_m$ . Los valores resultantes de  $K_o$ ,  $\sigma'_m$  y  $\sigma'_{co}$  se presentan en la Tabla 2. Asimismo, en la Tabla 2 se reportan los valores del contenido inicial de agua ( $W_o$ ), la relación de vacíos inicial ( $e_o$ ), el tiempo al final de la consolidación primaria ( $T_{100}$ ), el módulo de rigidez al corte al final de la consolidación primaria ( $G_{100}$  o  $G_{max\_lab}$ ), el módulo de rigidez al corte máximo al final de las mediciones de amplitud baja de 0.0001% ( $G_{max}$ ) y el incremento del coeficiente del módulo de rigidez al corte con el tiempo ( $I_G$ ) de cada una de las pruebas de columna resonante.

## 7 INTERPRETACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DEL SUELO

Para desarrollar el perfil de velocidad de onda de cortante de los suelos en la localización del sondeo se utilizaron tres diferentes métodos: a) correlaciones empíricas, b) datos de pruebas de columna resonante ajustados para tomar en cuenta el efecto de envejecimiento y c) mediciones in situ usando la sonda suspendida. Las secciones siguientes presentan para el caso del depósito arcilloso en aguas someras, la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos con estos tres métodos. Finalmente, para el caso de un depósito arcilloso en aguas profundas se presentan las velocidades de onda de corte obtenidas al aplicar las correlaciones empíricas y los resultados de pruebas de columna resonante.

Tabla 2. Resumen de resultados de las pruebas de columna resonante

Profundidad [m]	$\sigma'_m$ [kPa]	$\sigma'_{co}$ [kPa]	$W_o$ [%]	$e_o$	$T_{100}$ [min]	$G_{100}$ [MPa]	$G_{max}$ [MPa]	$I_G$ [MPa]
10.53	1.13	31.0	61.8	1.762	48.0	15.93	19.17	1.98
	67.61	62.1	61.8	1.762	91.0	21.02	23.90	1.89
		124.1	61.8	1.762	200.0	26.42	28.98	2.80
23.64	0.96	68.3	56.7	1.630	101.0	19.68	24.24	3.81
	144.24	135.8	56.7	1.630	301.0	29.25	33.36	3.48
		271.7	56.7	1.630	700.0	39.51	46.41	7.18
49.55	0.89	140.7	49.4	1.408	15.0	46.39	55.80	4.13
	301.59	281.3	49.4	1.408	39.0	63.01	70.67	4.88
		562.6	49.4	1.408	85.0	75.27	92.00	9.50
99.53	0.88	308.9	42.4	1.220	33.0	79.58	98.54	9.48
	662.87	618.5	42.4	1.220	85.0	116.96	133.83	9.36
		1,235.5	42.4	1.220	175.0	154.65	172.92	20.72

El módulo de rigidez al corte ( $G_{max}$ ) a deformaciones bajas (menores que 0.0001 %) se puede calcular en

función de la densidad total de masa ( $\rho_{tot}$ ) y de la velocidad de onda de cortante ( $V_s$ ) como:

$$G_{max} = \rho_{tot} * V_s^2 \quad [7]$$

Debido a que el perfil de densidad total de masa puede ser estimado con una precisión razonable, los perfiles de velocidad de onda de cortante o del módulo de rigidez al corte a deformaciones bajas, en esencia, pueden ser usados el uno por el otro. El  $G_{max}$  o  $V_s$  para los suelos encontrados en la localización del sondeo se estimaron a partir de:

Mediciones de la velocidad de onda de cortante in situ, efectuadas con el sistema de registro de velocidades sísmicas P-S de sonda suspendida;

Correlaciones empíricas con propiedades básicas del suelo tales como resistencia al esfuerzo cortante, OCR, plasticidad, relación de vacíos y esfuerzos efectivos, y resistencia de punta del PCPT para arcillas;

Datos de pruebas de columna resonante ajustados para tomar en cuenta los efectos de envejecimiento.

### 7.1 Mediciones In Situ de la Velocidad de Onda de Cortante

El sistema de registro de velocidades sísmicas P-S de sonda suspendida se utilizó para medir la velocidad de onda de cortante en el suelo. Estos datos proporcionan mediciones directas de la velocidad de onda de cortante, la cual se puede usar en combinación con las estimaciones de densidad total de masa para calcular el módulo de rigidez al corte in situ ( $G_{max\_campo}$ ). Para propósitos de comparación, la velocidad medida de onda de cortante ( $V_s$ ) se presenta en la Figura 9.

### 7.2 Correlaciones Empíricas

Tres correlaciones empíricas fueron utilizadas para la estimación de  $G_{max}$  o  $V_s$ . Estas correlaciones empíricas utilizadas en este estudio se resumen en la Tabla 3. La correlación empírica de Dickenson (1994) para los suelos arcillosos relaciona la resistencia al corte no drenada con la velocidad de onda de corte como se indica en la Tabla 3. El perfil interpretado de la resistencia al esfuerzo cortante presentado en la Figura 5 se utilizó en la aplicación de esta correlación y los resultados se incluyen en la Figura 9. La correlación de Mayne y Rix (1993) relacionan el módulo de rigidez al corte ( $G_{max}$ ) a deformaciones bajas con la resistencia en la punta del cono corregida por efectos de presión de poros, la relación de vacíos y la presión atmosférica como se indica en la Tabla 3. Para la aplicación de esta correlación se usaron los datos de los ensayos de PCPT y la relación de vacíos determinada a partir de perfiles interpretados de contenido de humedad y gravedad específica asumiendo un grado de saturación del 100%. Para propósitos de comparación, los resultados fueron posteriormente convertidos a valores de velocidad de onda cortante y se presentan en la Figura 9. La correlación de Jamiolkowski et al., (1991), relaciona  $G_{max}$  con la relación de sobreconsolidación (OCR), la

relación de vacíos, el esfuerzo efectivo medio, la presión atmosférica y un parámetro,  $k$ , que es una función del índice de plasticidad. Para su aplicación se usaron los perfiles interpretados del índice de plasticidad, relación de vacíos, relación de sobreconsolidación y esfuerzo efectivo medio in situ incluidos en las Figuras 2, 4, 6 y 8, respectivamente. Los resultados obtenidos con la correlación de Jamiolkowski et al., (1991) convertidos a valores de velocidad de onda cortante se presentan en la Figura 9.

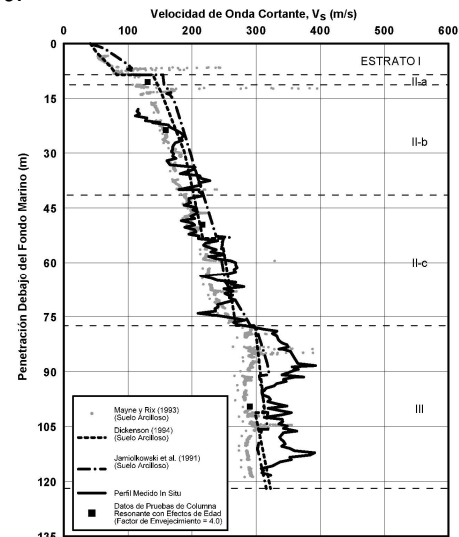


Figura 9. Velocidad de onda de cortante en un sitio en aguas someras.

### 7.3 Datos de las Pruebas de Columna Resonante

Como se describe a continuación, el módulo de rigidez al cortante determinado a bajas deformaciones (menos de 0.0001 %) durante los ensayos de columna resonante, pueden ser utilizados para desarrollar perfiles de velocidad de onda cortante in situ.

Para desarrollar el valor de  $V_s$  in situ, los valores del módulo de rigidez al cortante de laboratorio al final de la consolidación primaria ( $G_{max\_lab}$ ) deben ser ajustados para tomar en cuenta el efecto a largo plazo (envejecimiento) o la historia de esfuerzos de la capa analizada. El efecto de envejecimiento fue incorporado empleando la metodología proporcionada por Anderson y Stokoe (1978), donde el  $G_{max}$  de campo ( $G_{max\_campo}$ ) se expresa como:

$$G_{max\_campo} = G_{max\_lab} + I_G * F_A \quad [10]$$

donde:  $I_G$  = cambio en  $G_{max}$  por ciclo logarítmico de tiempo después de la consolidación primaria; y  $F_A$  = factor de envejecimiento de una capa determinada en un sitio.

El factor de envejecimiento de una capa en un sitio se estima como:

$$F_A = \text{Log}_{10} \left[ \frac{t_c}{t_p} \right] \quad [11]$$

donde:  $t_c$  = tiempo desde el comienzo del más reciente cambio significativo en la historia de esfuerzos para la capa en el sitio; y  $t_p$  = tiempo para completar la consolidación primaria de la capa como resultado del cambio de esfuerzos.

La edad e historia geológica de las capas de suelo deben ser conocidas para ajustar el  $G_{\text{max,lab}}$  a fin de incorporar el efecto de envejecimiento utilizando el procedimiento mencionado anteriormente. Aunque en general, la edad de las distintas capas del subsuelo en la localización de sondeo varía entre miles y cientos de miles de años, no hay estimaciones precisas disponibles de la edad de cada estrato. Los tiempos  $t_c$  y  $t_p$  son usualmente difíciles de determinar. Por ejemplo, variaciones de nivel medio del mar, erosión y sismos, pueden causar cambios en el esfuerzo que destruyen los efectos previos de confinamiento a largo plazo.

Los valores interpretados de  $I_G$  a partir de los datos obtenidos de las pruebas de columna resonante se presentan en la Tabla 2. Según Anderson y Stokoe (1978), los valores típicos del  $F_A$  varían entre 4 a 8, que corresponden a sitios de 20 a 200,000 años de edad.

Debido a que no se encuentra información detallada con relación a la historia de esfuerzos del sitio y estimaciones precisas del factor de edad de cada capa, un valor apropiado de  $F_A$  (entre 4 y 8) fue seleccionado para ajustar lo mejor posible el  $G_{\text{max,campo}}$  estimado utilizando la expresión anterior (y los valores de  $G_{\text{max,lab}}$  e  $I_G$  interpretados de las pruebas de columna resonante) a las velocidades correspondientes de onda cortante medidas con la sonda suspendida y las velocidades de onda cortante estimadas a partir de correlaciones empíricas con la resistencia de punta del PCPT y propiedades básicas del subsuelo. En este sitio, se determinó que un valor de  $F_A$  de 4.0 se ajustaba mejor a los valores de  $G_{\text{max,campo}}$  obtenidos de las pruebas de columna resonante a las velocidades correspondientes de onda de cortante medidas in situ realizadas con la sonda suspendida y tanto como aquellas estimadas a partir de correlaciones empíricas. En la Figura 9 se reportan los cuatro valores de  $V_s$  estimados a partir de los datos de columna resonante y un valor de  $F_A$  de 4.0. Este procedimiento de estimación no toma en cuenta variaciones del módulo debido a efectos tales como alteración de la muestra o la inhabilidad del confinamiento en el laboratorio para representar con exactitud el confinamiento in situ.

Tabla 3. Correlaciones empíricas utilizadas en este estudio.

Referencia	Parámetros de Rigidez	Tipo de Suelo	Parámetros Correlacionados	Correlaciones
Dickenson (1994)	$V_s$	Arcilla	Resistencia al corte no drenada, $S_u$	$V_s = 18(S_u)0.475$ Donde $S_u$ está en lb/pie <sup>2</sup> y $V_s$ está en pies/s.
Mayne and Rix (1993)	$G_{\text{max}}$	Arcilla	Resistencia en la punta del cono corregida por efectos de presión de poros, $q_t$ Esfuerzo vertical efectivo, $\sigma'_{vo}$ Relación de vacíos, $e$	$G_{\text{max}} = 99.5(\text{Pa})0.305(q_t)0.695/e^{1.13}$ Donde $G_{\text{max}}$ y $q_t$ están en kPa, y Pa es la presión atmosférica en kPa.
Jamiolkowski et al. (1991)	$G_{\text{max}}$	Arcilla	Relación de vacíos, $e$ Relación de Sobreconsolidación (OCR) Esfuerzo efectivo medio, $\sigma'_m$ Plasticidad del suelo, PI	$G_{\text{max}} = [625/(e^{1.3})](\text{Pa} \cdot \sigma'_m)0.50\text{CRk}$ Donde k es una función de PI y Pa es la presión atmosférica en unidades consistente con $\sigma'_m$ .

#### 7.4 Interpretación del Perfil de Velocidad de Onda Cortante

La Figura 9 muestra la velocidad de onda de cortante estimada a partir de: a) las mediciones in situ de la velocidad de onda de cortante realizadas con la sonda suspendida, b) las pruebas de columna resonante ajustadas por efecto de envejecimiento y c) tres correlaciones empíricas con los datos del PCPT y propiedades básicas del suelo. La comparación entre las mediciones de velocidad de onda de cortante in situ y las estimaciones de velocidad de onda de cortante obtenidas de correlaciones empíricas revela que los estimados de velocidad de onda de cortante de correlaciones empíricas concuerdan muy bien con las mediciones in situ. Entre los 18.0 y 77.4 m de penetración debajo del fondo marino, la velocidad de

onda cortante medida in situ se encuentra delimitada por las correlaciones empíricas de Jamiolkowski et al., (1991) y de Mayne y Rix (1993), las cuales actúan como límites superior e inferior, respectivamente. La correlación empírica de Dickenson (1994) es la que se encuentra más cercana a las mediciones de velocidad de onda cortante. Por debajo de los 77.4 m de penetración, en general todas las correlaciones empíricas subestiman los valores de la velocidad de onda cortante medida in situ hasta en un 25 %, aunque en algunas puntos la correlación de Mayne y Rix (1993) sobre estima los valores medidos in situ. En la Figura 9, también se presentan las velocidades de onda cortante estimadas a partir de los datos de pruebas de columna resonante ajustados para tomar en cuenta el efecto de envejecimiento. Como se mencionó anteriormente, para este sitio, se determinó que un factor de envejecimiento

( $F_A$ ) de 4.0 se ajustaba mejor a las velocidades de onda de cortante medidas in situ con la sonda suspendida y estimadas con correlaciones empíricas. Los valores de  $V_s$  estimados con los datos de columna resonante caen justamente sobre aquellos estimados con los datos de PCPT, muy cercanos a las mediciones in situ  $\pm 5\%$  por arriba de 77.4 m y  $10\%$  inferior por debajo de los 77.4 m.

### 7.5 Aplicación de las Correlaciones Empíricas y datos de columna resonante a un Sitio en Aguas profundas

En este caso se tiene un depósito compuesto por una arcilla calcárea muy blanda a muy firme ubicado en aguas profundas (tirante de agua de 477 m), en donde se realizó un sondeo con pruebas in situ de PCPT, alternadas con muestreo hasta una penetración de 100.0 m debajo del fondo marino. Adicionalmente, se realizó una prueba continua de PCPT desde el fondo marino hasta una penetración de 42.0 m. En las muestras de suelo obtenidas se llevaron a cabo pruebas de identificación y resistencia costa afuera, y en tierra pruebas adicionales de identificación y de resistencia, consolidación y de columna resonante. Con toda esta información se determinaron perfiles interpretados específicos para el sitio en aguas profundas, de resistencia al esfuerzo cortante no drenada, peso volumétrico sumergido, relación de vacíos, índice de plasticidad,  $K_o$ , OCR y esfuerzo efectivo medio in situ. Utilizando estos perfiles interpretados, las tres correlaciones empíricas y datos de columna resonante se estimaron la velocidad de onda cortante in situ, los resultados se presentan en la Figura 10.

Para este sitio en aguas profundas, se determinó que un factor de envejecimiento ( $F_A$ ) de 4.0 aplicado a los datos de las pruebas de columna resonante se ajustaba mejor a las velocidades de onda de cortante estimadas con las tres correlaciones empíricas. En la Figura 10 se tiene que las predicciones de  $V_s$  a partir de las correlaciones empíricas generan un límite inferior y superior, con un rango de variación entre estos límites de entre 7 y 14%. Las velocidades estimadas a partir de los datos de PCPT (Mayne y Rix, 1993) y de la resistencia al esfuerzo cortante (Dickenson, 1994) son para fines prácticos idénticas y conforman el límite inferior de  $V_s$ .

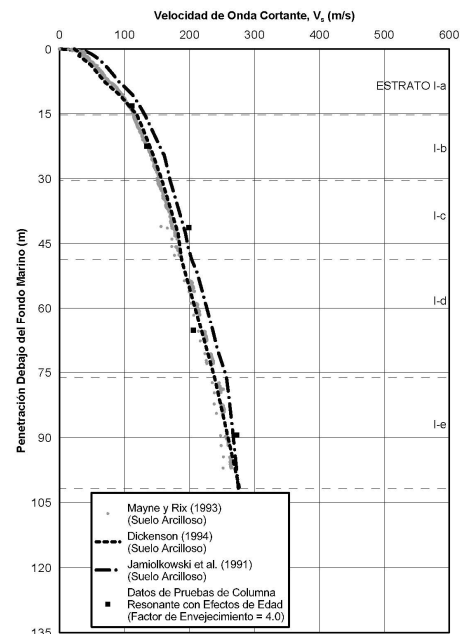


Figura 10. Velocidad de onda de cortante en un sitio en aguas profundas.

El límite superior de  $V_s$  está dado por los valores estimados a partir de los datos de índice de plasticidad, relación de vacíos, OCR y esfuerzo efectivo medio, y la correlación empírica de Jamiolkowski et al., 1991. Los valores estimados de  $V_s$  a partir de los datos de columna resonante ajustados por efectos de envejecimiento caen prácticamente en los límites superior e inferior de  $V_s$  definidos por las correlaciones empíricas.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los retos más importantes en el análisis de respuesta sísmica de depósitos arcillosos en aguas profundas es la determinación de la velocidad de onda de cortante in situ debido a los grandes retos que se deben enfrentar para realizar mediciones in situ. Para solventar este problema práctico en aguas profundas, se propone la utilización de tres correlaciones empíricas y datos de columna resonante ajustados para considerar el efecto de envejecimiento con un Factor de Envejecimiento de 4.0. Las estimaciones de  $V_s$  de las tres correlaciones empíricas envuelven las mediciones in situ realizadas en aguas someras, en donde la correlación basada en propiedades índice de Jamiolkowsky et al., (1991) genera el límite superior, la basada en datos de PCPT de Mayne y Rix (1993) genera el límite inferior y la basada en la resistencia al corte no drenada de Dickenson (1994) es la que proporciona la mejor estimación de la velocidad de onda de cortante in situ, proporcionando el valor medio. Para los sitios en aguas someras y profundas, las estimaciones de la velocidad de onda de cortante a partir de datos de columna resonante, ajustados por el efecto de



envejecimiento utilizando un factor de envejecimiento de 4.0, caen justo dentro de los límites inferior y superior de  $V_s$  generados por las correlaciones empíricas. Debido a que los cambios de las propiedades índice y de resistencia son más sutiles en el caso de depósitos arcillosos en aguas profundas, el ancho de la banda de  $V_s$  definida por los límites inferior y superior de las correlaciones empíricas disminuye a un 10 %.

## 9 REFERENCIAS

- Alpan, I. (1967), *The Empirical Evaluation of the Coefficient  $K_0$  and  $K_{0,OCR}$* , Soils and Foundations, Tokio, Vol. 7, No. 1, Enero, pp. 31-40.
- Anderson, D.G. y Stokoe, K.H., (1978), *Shear Modulus: A Time-Dependent Soil Property*, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 66-90.
- Becker, D.E., Crooks, J.H.A., Been, K. y Jefferies, M.G. (1987), *Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 549-564.
- Booker, E.W. e Ireland, H.O. (1965), "arth Pressures at Rest Related to Stress History," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 1-15.
- Bowles, J.E. (1996) *Foundation Analysis and Design*, Quinta edición, McGraw-Hill Companies, Inc., pp. 40-43.
- Casagrande, A. (1936), *Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance*, Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass., Vol. 3, pp. 60-64.
- Das, B.M. (1990) *Principles of Foundation Engineering*, Segunda edición, PWS-KENT Publishing Company, 252 p.
- Dickenson, S. (1994), *Dynamic Response of Soft and Deep Cohesive Soils During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989*, Tesis doctoral, University of California, Berkeley.
- Jamiolkowski, M., Leroueil, S., y LoPresti, D.C.F. (1991), *Theme Lecture: Design Parameters from Theory to Practice*, Proceedings, Geo-Coast '91, Yokohama, Japón, pp. 1-41.
- Mayne, P.W. y Kulhawy, F.H. (1982),  *$K_0$ -OCR Relationships in Soil*, Journal, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, No. GT6, pp. 851-872.
- Mayne, Paul W. y Kulhawy, Fred (1995), *First Order Estimate of Field Stresses in Clays by Cone and Piezocone*, Proceedings, International Symposium on Cone Penetration Testing, Liukoping, Suecía, Oct. 4-5, 1995.
- Mayne, P.W., y Rix, G.J. (1993),  *$G_{max}$ - $q_c$  Relationships for Clays*, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 16, No. 1, pp. 54-60.
- Seed, H.B. y Peacock, W.H. (1971), *Test Procedure for Measuring Soil Liquefaction Characteristics*, Journal, Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM8, Proc. Paper 8330, Agosto, pp. 1099-11