



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## Estimación de asentamientos de edificios en suelos areno-limosos saturados de Concepción mediante ensayos CPTU y DMT

Maxwell Cáceres (1); Paulo Oróstegui (2); Ricardo Moffat (3); Felipe Villalobos (4)

(1) *Estudiante Magíster Ingeniería Civil, LGM, Universidad Católica de la Santísima Concepción*

(2) *Gerente General OITEC Geotecnia - Hidráulica – Topografía*

(3) *Gerente LMMG Geotecnia; Profesor Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez*

(4) *Profesor, LGM, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción*

*mcacereso@magister.ucsc.cl; UCSC, Alonso de Ribera 2850, Casilla 297, Concepción, Chile*

### Resumen

La estimación de asentamientos de edificios sobre suelos arenosos y limosos saturados representa una tarea relevante para asegurar la serviciabilidad y estabilidad de las estructuras. Las metodologías de cálculo de asentamientos mayoritariamente empleadas se basan en resultados de ensayos de penetración estándar SPT y ensayos de placa de carga. Los resultados del SPT pueden llegar a tener grandes dispersiones y las estimaciones de rigidez del suelo se obtienen mediante correlaciones sin base física y generalmente para suelos provenientes de geologías diferentes a las chilenas. Los ensayos de placa de carga están por lo general reducidos a profundidades de pocos metros. Es por ello que surge la necesidad de realizar ensayos que perturben menos al suelo en la medida que se explora a profundidades de hasta 30 m o más. Los ensayos CPT y DMT ofrecen la posibilidad de obtener resultados más confiables e ingenieriles de rigidez del suelo, es decir, en unidades ingenieriles de presión, además que son ensayos que no dependen de los operarios y los equipos son realmente estándar en todo el mundo. Se presentan resultados obtenidos con el equipo CPTU y DMT en un proyecto de edificios fundados en arenas y limos saturados de Concepción. Estos resultados permiten estimar y comparar los asentamientos de las estructuras obtenidos de los ensayos CPTU y DMT.

*Palabras-Clave: asentamientos, CPTU, DMT, módulo edométrico, arena limosa saturada*

### Abstract

The estimation of building settlements on saturated sandy and silty soils are a relevant task for the structure serviceability and stability assurance. The settlement calculation methodologies are mainly based on results from the standard penetration test SPT and plate-load tests. The SPT results can have significant dispersion and soil stiffness estimations are obtained from correlation without a physical meaning and in general for soils with different geologies to that of the Chilean. Moreover, plate-load tests are normally limited to shallow depths of a few metres. On these grounds, a need arises for the performance of in situ tests which disturb less the soil when it is explore to depths up to 30 m or more. CPT and DMT can obtain reliable soil stiffness results in engineering units, that is, in pressure units. Furthermore, these tests do not depend on the operator and the equipment is truly standard worldwide. Results obtained with the CPTU and DMT devices for an urban renovation project with buildings founded on saturated sands and silts in Concepción city, are presented. These results allow the estimation and comparison of structure settlements obtained from CPTU and DMT.

*Keywords: settlements, CPTU, DMT, constrained modulus, saturated silty sand*



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## 1 Introducción

La capacidad de soporte y los asentamientos constituyen parámetros básicos considerados en el diseño de fundaciones. La estimación de asentamientos implica habitualmente la determinación de un módulo de deformación referido al intervalo de cargas de diseño, cuyo valor se puede obtener a partir de ensayos de laboratorio. Por otro lado, es posible realizar ensayos in situ para sortear los obstáculos de muestreo (extracción, transporte y preparación en el laboratorio), ahorrándose tiempo y dinero en la obtención de resultados. Usualmente se realizan ensayos de penetración SPT o placa de carga, sin embargo, estos ensayos están limitados debido a la poca confiabilidad y continuidad de los resultados el primero [22] y a la poca profundidad de exploración el segundo.

El ensayo in situ de penetración de cono CPT es versátil puesto que permite obtener resultados confiables de forma continua [1]. Se ha propuesto un método de cálculo de asentamientos para fundaciones superficiales en arena basado en el CPT [2]. Este método requiere del uso del módulo de compresibilidad del suelo arenoso  $E_s$ , el cual se correlaciona con la resistencia de punta del cono  $q_c$ . Las correlaciones entre  $E_s$  y  $q_c$  fueron mejoradas por [3] a partir del aporte de [4] y [5], entre otros. La estimación de asentamientos mediante el CPT fue gradualmente mejorada y ampliada para distintos tipos de suelos [6].

El ensayo del dilatómetro plano DMT es otro ensayo in situ, el cual ha demostrado tener particular acierto en la estimación de asentamientos de fundaciones superficiales [7] [8] [9]. El cálculo del asentamiento se basa principalmente en la determinación del módulo de compresión unidimensional  $M_{DMT}$ . Se ha demostrado a través de 16 casos de estudio la precisión de este método, obteniendo una relación estimado/medido promedio igual a 1.18 [7]. También se han calculado los asentamientos para otros 5 casos demostrándose una notable precisión en las estimaciones [10]. Otras investigaciones recopilan un mayor número de casos de buenas estimaciones del DMT [11] [12]. Es por ello que resultados del CPT para estimar asentamientos es frecuentemente respaldada a partir de resultados del DMT [13] [14] [15].

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de recuperación urbana del sector Aurora de Chile en la ribera norte del río Bío Bío en Concepción (Fig. 1), cuyas obras se iniciaron en abril del 2016. El proyecto contempla la construcción de 8 edificios de 4 pisos que conforman un total de 128 departamentos y 78 casas de 2 pisos [16]. Como parte de la exploración geotécnica se realizaron dos ensayos CPT y un ensayo DMT. La interpretación estratigráfica coincide con estudios anteriores cercanos al lugar, detectando estratos de arena fluvial de gran espesor intercaladas por limos y arcillas. Los asentamientos son calculados a partir de la información de estos sondajes considerando un único módulo de compresión unidimensional por estrato, además de considerar una zapata flexible sometida a distintos incrementos de carga.

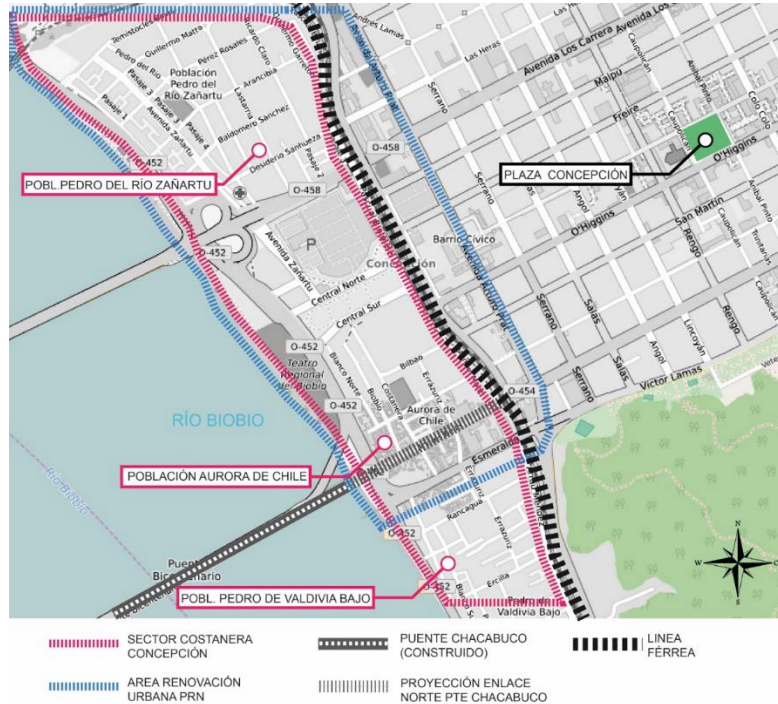


Fig. 1 – Población Aurora de Chile sector de renovación delimitado por borde azul [17]

## 2. Estimación de asentamientos

Los asentamientos son calculados en base a un único módulo de compresión unidimensional o edométrico  $M$ , obtenido comúnmente en ensayos de consolidación. El módulo  $M$  corresponde a la pendiente de una recta entre dos puntos de la curva esfuerzo-deformación unidimensional, válido para el nivel de incremento de esfuerzos impuesto por la estructura.

### 2.1 Asentamientos mediante CPTU

El ensayo CPT consiste en el empuje continuo a través del suelo de una barra de acero con punta cónica, el mecanismo de funcionamiento proporciona una medición continua en tres transductores de presión: resistencia de punta, fricción de fuste y presión de poros. El ensayo entrega un detallado registro para la evaluación de la estratigráfica de suelo (comportamiento del suelo), espesores de estrato, densidad del suelo, resistencia del material, nivel freático, etc. [6]. La estimación del asentamiento de una zapata en arena se realiza mediante un método que usa el módulo elástico drenado  $E$  [2] [18] [19]. Los asentamientos basados en el uso de  $M$  usando el ensayo CPT, establecen correlaciones entre parámetros normalizados del DMT y CPT, las cuales sugieren una relación entre  $M$  y la resistencia de punta neta ( $q_t - \sigma_{vo}$ ), de esta manera, se propuso la siguiente expresión [6] [20]:

$$M = \alpha_M (q_t - \sigma_{vo}) \quad (1)$$

donde  $\alpha_M$  toma los siguientes valores:

$$\text{Si } I_c > 2.2 : \quad \alpha_M = Q_{tn} \text{ cuando } Q_{tn} \leq 14 \quad (2a)$$

$$\alpha_M = Q_{tn} \text{ cuando } Q_{tn} > 14 \quad (2b)$$

$$\text{Si } I_c < 2.2 : \quad \alpha_M = 0.03 [10^{(0.55I_c+1.68)}] \quad (3)$$

donde  $I_c$  es un índice que representa las zonas en el gráfico  $Q_{tn} - F_r$  usando la ecuación de la circunferencia [21]:

$$I_c = [(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (4)$$

La relación de fricción  $F_r$  es calculada de acuerdo a:

$$F_r = [f_s/q_t - \sigma_{vo}] 100\% \quad (5)$$

La resistencia de punta normalizada se obtiene de acuerdo a la ecuación:

$$Q_{tn} = [(q_t - \sigma_{vo})/p_a](p_a/\sigma'_{vo})^n \quad (6)$$

Donde  $n$  es un exponente que varía en función del tipo de suelo [6]. El asentamiento es calculado bajo el mismo concepto del ensayo DMT, salvo por la forma de obtener el módulo de compresión unidimensional  $M$ , que en este caso se obtiene a partir de la resistencia de punta corregida  $q_t$ .

## 2.2. Asentamientos mediante DMT

El ensayo DMT proporciona a través de dos lecturas de presión de empuje horizontal, información del subsuelo. El DMT es reconocido por ser un ensayo adecuado para adquirir información ligada a la rigidez del suelo, además resulta ser sensible a la historia tensional, lo que hace que los parámetros como el coeficiente de empuje horizontal  $K_0$ , relación de pre-consolidación OCR y módulos de compresión unidimensional  $M$  sean adecuadamente estimados [9]. Este último parámetro, es estimado de acuerdo a la siguiente expresión propuesta [23]:

$$M_{DMT} = E_D R_M(K_D, I_D) \quad (7)$$

donde  $E_D$  es conocido como el módulo del dilatómetro, valor de transición calculado directamente desde las presiones corregidas de despegue y empuje del DMT, según la expresión:

$$E_D = 34.7 (p_1 - p_0) \quad (8)$$

donde  $p_0$  y  $p_1$  son las presiones corregidas de despegue y empuje, respectivamente.  $R_M$  es un factor de corrección aplicado a  $E_D$ , es función del índice de empuje horizontal  $K_D$  y el índice de material  $I_D$  por lo que es calculado en correspondencia al tipo de suelo. Los asentamientos son calculados mediante la relación unidimensional:

$$S_{DMT} = \sum \frac{\Delta\sigma_v}{M_{DMT}} \Delta z \quad (9)$$

donde  $\Delta\sigma$  es calculado generalmente de acuerdo a la teoría de Boussinesq al medio de un estrato de espesor  $\Delta z$ .

### 3. Programa de exploración geotécnica

Se realizaron 2 sondajes CPTU de 17.5 y 22 m y un sondaje DMT de 10 m de profundidad, respectivamente (Fig. 2, 3 y 4). El nivel freático fue detectado aproximadamente a los 5.5 m de profundidad desde el nivel de terreno. A grandes rasgos se detectan estratos de arena de origen fluvial con espesores máximos que alcanzan los 10 m e intercaladas por lentes de arcillas y limos con espesores que varían entre los 0.8 hasta 1.5 m. En la Fig. 4 se muestra el perfil obtenido con el sondaje DMT y los valores del índice de tensión horizontal  $K_D$ , el índice de material  $I_D$  y el módulo del dilatómetro  $E_D$ . La estratigrafía es comparable al perfil CPT-1, coincidiendo ambos en la presencia de un estrato blando de arcilla de aproximadamente 1.5 m de espesor desde los 4 m de profundidad.

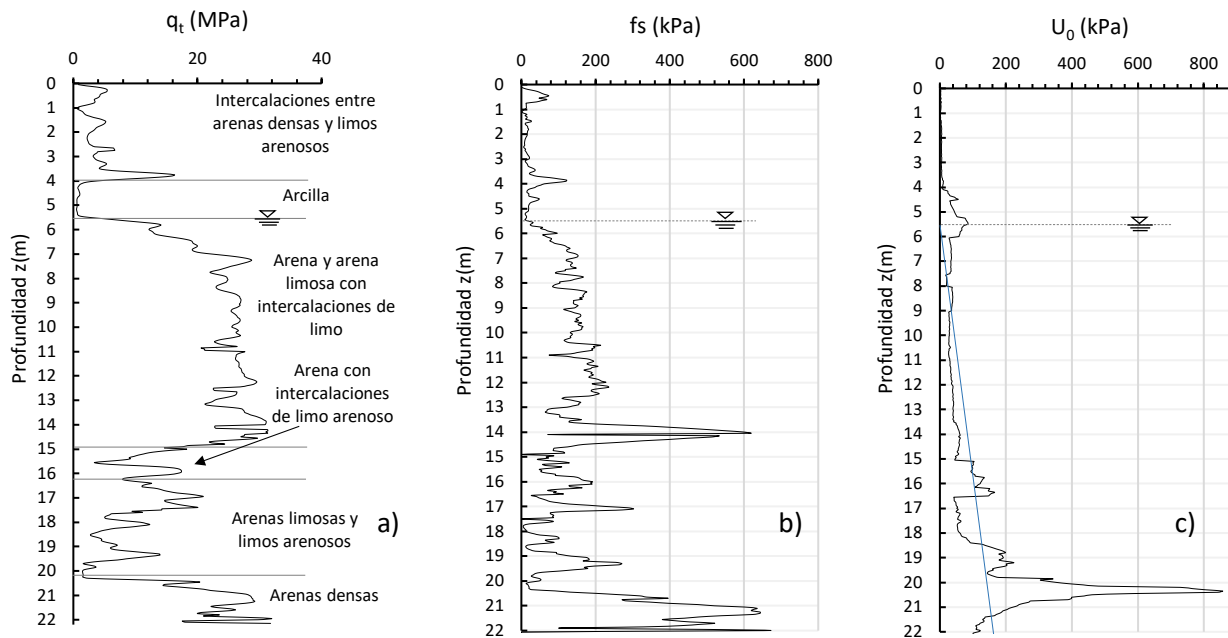


Fig. 2 – Estratificación determinada a partir de sondaje CPT-1: a) Resistencia de punta normalizada ( $q_t$ ); b) Resistencia de fuste ( $f_s$ ); c) Presión de poros ( $U_0$ ).

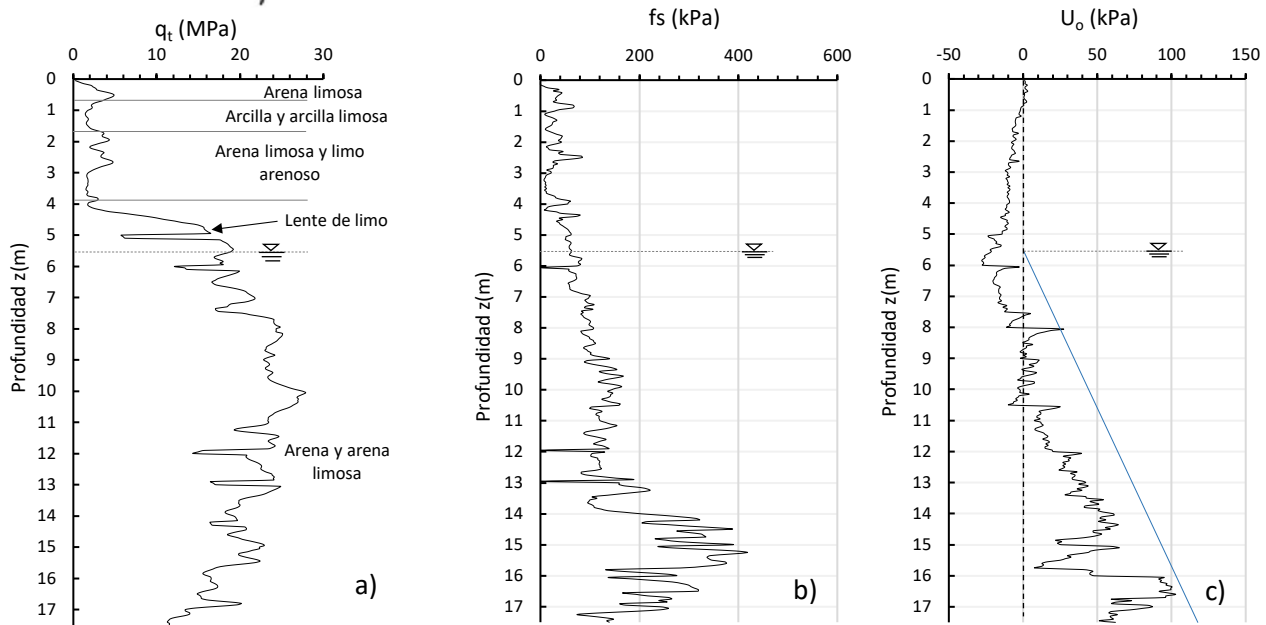


Fig. 3 – Estratificación determinada a partir de sondaje CPT-2: a) Resistencia de punta normalizada  $q_t$ ; b) Resistencia de fuste  $f_s$ ; c) Presión de poros  $U_0$ .

En las Fig. 5a y 5b se compara el ángulo de fricción  $\phi$  y el módulo de compresión unidimensional calculados en base a las mediciones de ambos instrumentos. Pueden apreciarse similitudes entre el DMT y el CPT-1 para los perfiles de ángulo de fricción  $\phi$  y módulo de compresión unidimensional  $M$ , por ejemplo ambos sondajes detectan un estrato de suelo blando entre los 4 y 5.5 m aproximadamente, donde  $M$  adquiere valores entre 2 y 6 MPa según el DMT y entre 2 y 12 MPa según el CPT-1.

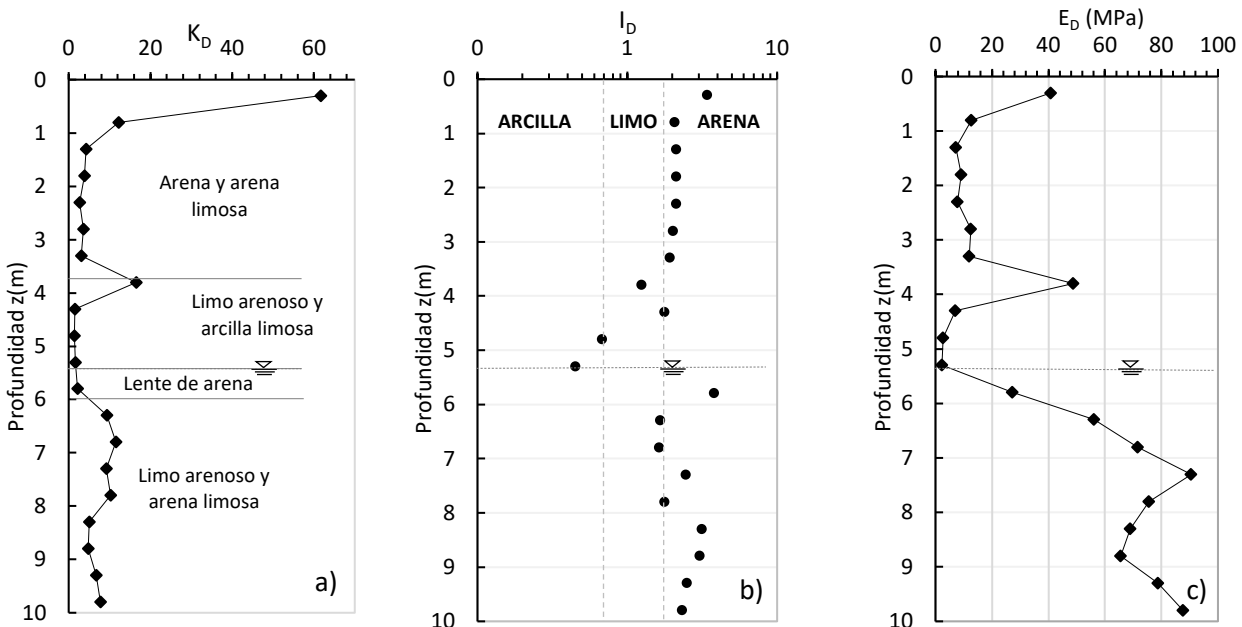


Fig. 4 – Sondaje DMT: a) Índice de empuje horizontal  $K_D$ ; b) Índice de material  $I_D$ ; c) Módulo de dilatómetro  $E_D$



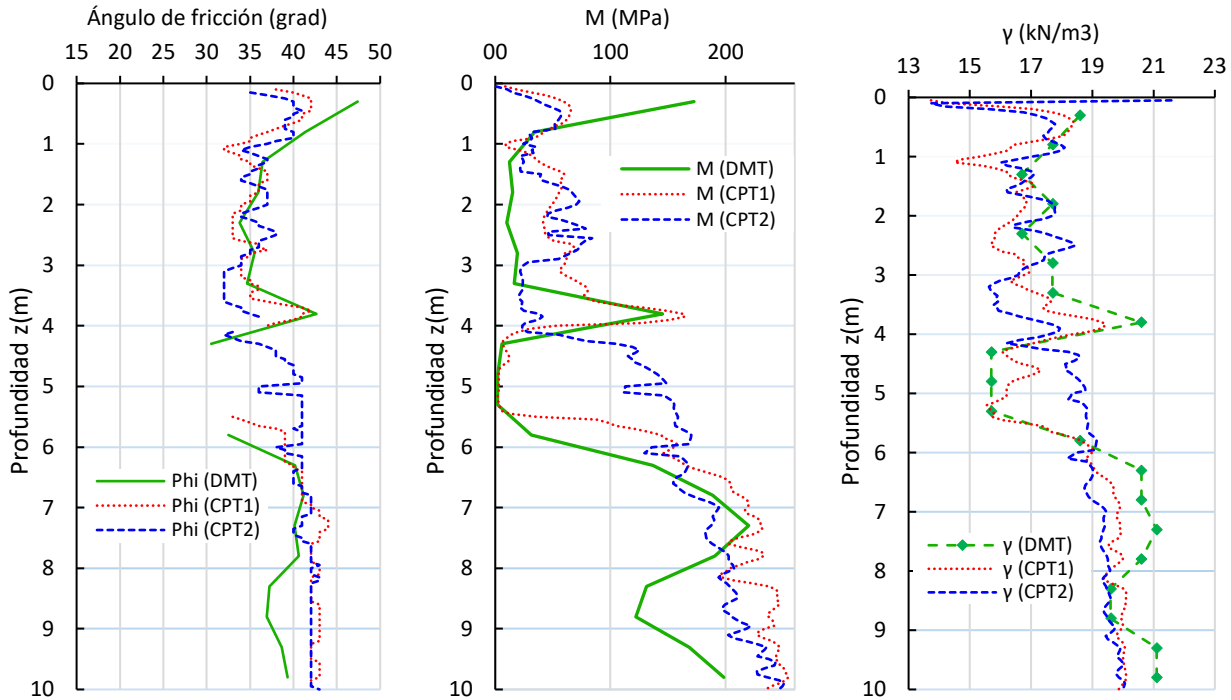


Fig. 5 – Parámetros de suelo estimados: a) Ángulo de fricción; b) Módulo de compresión unidimensional; c) Peso unitario del suelo.

La Fig. 6 muestra la relación  $M_{DMT}/M_{CPT}$  para el CPT-1, las estimaciones del CPT tienden a sobrestimar el valor de  $M$ , por lo menos entre 1.0 y 3.5 m. Desde los 4.0 hasta aproximadamente los 5.0 m las estimaciones muestran una buena congruencia al igual que entre los 6.3 y 8 m, donde ambas estimaciones rondan entre los 180 y 220 MPa.

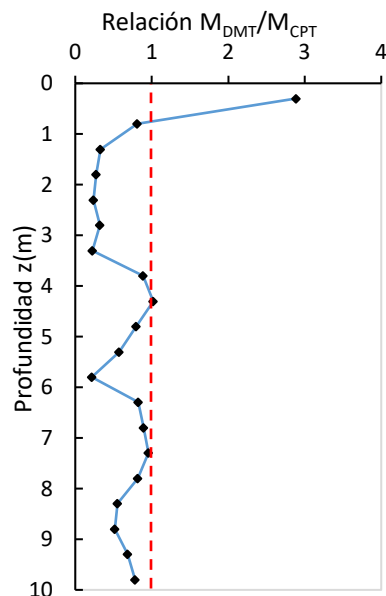
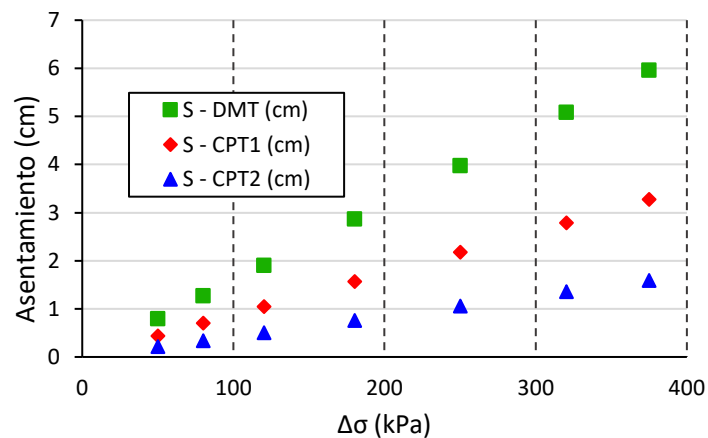


Fig. 6 – Relación  $M_{DMT}/M_{CPT}$  para el sondaje CPT-1

#### 4. Cálculo de asentamientos

Los asentamientos son calculados con el método anteriormente explicado considerando una zapata cuadrada de 2 m de ancho y flexible. La cual es soterrada a 1 m de profundidad desde el nivel de terreno original. Los incrementos de carga  $\Delta\sigma'$  considerados son entre 50 a 375 kPa y el incremento de esfuerzo es calculado de acuerdo a la teoría de Boussinesq. La Fig. 7 muestra los asentamientos calculados para cada sondaje, los asentamientos con DMT tienden a ser superiores a los estimados con CPT. Notar que los asentamientos para las casas con  $\Delta\sigma < 25$  kPa no supera los 5 mm y para los edificios con  $\Delta\sigma < 60$  kPa, el asentamiento resulta menor a 10 mm.



#### 5. Conclusiones

Se llevaron a cabo 3 sondajes con los equipos DMT y CPT en arenas limosas saturadas en el sector Aurora de Chile en Concepción. Se encontró que los resultados de ambos ensayos tienden a concordar en lo que concierne a interpretación estratigráfica (comportamiento del suelo), parámetros de rigidez y resistencia. La estimación de asentamientos se realizó a través del módulo de compresión unidimensional  $M$  obtenido de los ensayos CPT y DMT. Los asentamientos estimados con el DMT resultan aproximadamente 2 veces mayores que los estimados con el CPT. Tales diferencias pueden atribuirse en primer lugar a la forma de estimar  $M$  en ambos ensayos. Por un lado, este módulo estimado con el dilatómetro es producto de una medición directa de deformación del suelo, además según [9] la paleta del DMT genera una menor distorsión en el suelo que las barras cilíndricas y en combinación con el índice de empuje horizontal  $K_D$  considera efectos de historia tensional del suelo. El parámetro  $M$  estimado a través del CPT es correlacionado inicialmente con el módulo dilatométrico  $E_D$  por [14], luego se establece la correlación en base a la resistencia de punta normalizada  $q_t$  [6], lo que indicaría que  $M$  es obtenido en base a un cálculo de resistencia de penetración o dicho de otra manera, a partir de un valor de falla del suelo. Se requiere medir en terreno los asentamientos de los edificios.





SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## 6. Referencias

- [1] Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. 1<sup>th</sup> Ed. CRC Press. 1997.
- [2] Schmertmann, J. H. Static cone to compute static settlement over sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundations*. 1970. 96(3): 1011-1043.
- [3] Elton, D. J. Settlement of footings on sand by CPT data. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 1987. 1(2): 99-113.
- [4] Roth, W. H., Swantko, T. D., Patel, V. K. & Berry, S. W. Monorail piers on shallow foundations, settlement analysis based on Dutch cone data. Proc. 2nd Eur. Symp. on Penetration Testing. Amsterdam, The Netherlands. 1982. p. 821-826.
- [5] Webb, D. L., Mival, K. N. & Allison, A. J. A Comparison of the methods of determining settlements in estuarine sands from Dutch cone penetration tests. Proc. 2nd Eur. Symp. on Penetration Testing. Amsterdam, The Netherlands. 1982. p. 945-950.
- [6] Robertson, P. K. Interpretation of Cone Penetration Tests – a Unified Approach. *Canadian Geotechnical Journal*. 2009. 46: 1337-1355.
- [7] Schmertmann, J. H. Dilatometer to compute foundation settlement. Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf. on Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering. Virginia Tech, Blacksburg, USA. 1986. p. 303-321.
- [8] Schnaid, F. *In Situ Testing in Geomechanics: The main tests*. Ed. Taylor & Francis. 2009.
- [9] Marchetti, S. Some 2015 updates to the TC16 DMT report 2001. *Proceedings of 3rd International Conference on the Flat Dilatometer DMT 2015*, Rome, Italy. 2015. p. 43–65.
- [10] Hayes, J. A. Comparison of flat dilatometer in-situ test results with observed settlement of structures and earthwork. *Proceedings 39th Geotechnical Conference*. Ontario, Canada. 1986. p. 311-316.
- [11] Monaco, P., Totani G. & Calabrese M. DMT Predicted vs Observed Settlement: a Review of the Available Experience. Proc. DMT 2006, Washington D.C. 2006. p. 244-252.
- [12] Failmezger, R., Till, P. Frizzel, J. & Kight, S. Redesign of shallow foundations using dilatometer tests—more case studies after DMT'06 conference. *Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15*. Roma, Italy. 2015.



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

- [13] Kaggwa, W. S., Jha, R. K. & Jaksa, M. B. Use of Dilatometer and Cone Penetration Tests to Estimate Settlements of Footings on Calcareous Sand. *7th Australia New Zealand Conf. on Geomechanics*. Adelaide, Australia. 1996. p. 909-914.
- [14] Mayne, P. W. Equivalent CPT Method for Calculating Shallow Foundation Settlements in the Piedmont Residual Soils Based on the DMT Constrained Modulus Approach. *Civil & Environmental Engineering*, Georgia Institute of Technology, Atlanta. 2002.
- [15] Lehane, B. & Fahey, M. Using SCPT and DMT data for settlement prediction in sand. *Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Millpress, Rotterdam, 2004. p. 1673-1679.
- [16] Valenzuela, X. A fin de año Aurora de Chile será un barrio totalmente remozado, *Diario Concepción*. 6 de Julio, 2017.
- [17] Matus, C. & Barraza, C. Población Aurora de Chile: ¿La última frontera a derribar por un modelo expulsor? *Revista Planeo: Fronteras urbanas y territoriales*. 2016. 29, 9-13.
- [18] Lee, J. & Salgado, R. Estimation of Footing Settlement in Sand. *The International Journal of Geomechanics*. 2002. 2(1): 1-28.
- [19] Berardi, R., Jamiolkowski, M. & Lancellotta, R. Settlement of shallow foundations in sands selection of stiffness on the basis of penetration resistance. *Proc. of the Congress Sponsored by the Geotechnical Engineering*. 1991. 1(27): 185–200.
- [20] Robertson, P. K. CPT – DMT correlations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009. 135(11): 1762-1771.
- [21] Robertson, P. K. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*. 1997. 27: 151-158.
- [22] Robertson, P. K. Interpretation of in-situ tests - some insights. *4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, ISC 4*, Coutinho and Mayne eds., 2012, Vol.1, 3-24
- [23] Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. & Calabrese, M. The DMT in soil investigations. A report by the ISSMGE TC 16. *Proc., Int. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*. Bandung, Indonesia. 2001. p. 95–132.