

Estimación del coeficiente de empuje lateral de tierra K_0 y resistencia no drenada residual en suelo residuales a partir de ensayos DMT y CPTu

Estimation of the lateral earth pressure coefficient K_0 and residual undrained shear strength in residual soils from DMT and CPTu tests

Fecha de entrega: 10 de marzo 2025

Fecha de aceptación: 5 de mayo 2025

Guillermo González¹, Christian Barrueto¹, José Campaña¹, Javiera González¹, Priscilla Torres¹ y Marcelo González²

¹ Arcadis, Chile, guillermo.gonzalez@arcadis.com, christian.barrueto@arcadis.com, jose.campana@arcadis.com, javiera.gonzalez@arcadis.com, priscilla.torres@arcadis.com

² CODELCO, Chile, mgonz108@odelco.cl

En este artículo se presenta la interpretación realizada para los resultados obtenidos en cuatro ensayos de dilatómetro plano DMT y tres perforaciones CPTu realizadas en suelos residuales en la zona central de Chile. La interpretación fue efectuada para estimar la razón de la resistencia no drenada residual (S_u/σ'_{v0}) mediante ensayos triaxiales y correlaciones existentes en la literatura para el DMT y CPTu. Dada la incertidumbre en la estimación del coeficiente de empuje lateral de tierra en reposo (K_0), el cual es necesario para estimar la razón S_u/σ'_{v0} en ensayos triaxiales, se evaluó la capacidad del ensayo DMT para estimar este parámetro. Se concluye que el ensayo DMT, en conjunto con el CPTu, permiten estimar de buena manera el parámetro K_0 y, de esta forma, determinar la razón de resistencia residual mediante el ensayo triaxial. Se debe tener precaución ya que ambos ensayos in situ tienen limitaciones en sus correlaciones al momento de estimar la resistencia residual no drenada.

Palabras clave: suelo residual, resistencia no drenada, DMT, CPTu, K_0

This paper presents the interpretation carried out for the results obtained in four dilatometer tests DMT and three cone penetration tests CPTu carried out in residual soils located in the central zone of Chile. The interpretation was carried out to estimate the residual undrained shear strength ratio (S_u/σ'_{v0}) through triaxial tests, and existing correlations in the literature for DMT and CPTu. Due to uncertainty in the estimation of the at rest lateral earth pressure coefficient (K_0), which is necessary to estimate the S_u/σ'_{v0} in triaxial tests, the capacity of the DMT to estimate this parameter was evaluated. It is concluded that DMT, complemented with CPTu, allows a good estimation of the K_0 parameter and, in this way, the determination of the residual undrained shear strength ratio through triaxial test. However, caution should be taken since both in situ tests have limitations in their correlations when estimating the undrained residual shear strength.

Keywords: residual soil, undrained strength, DMT, CPTu, K_0

Introducción

Uno de los desafíos más relevantes que se presentan al momento de diseñar una obra de ingeniería es la identificación del suelo de fundación donde se emplazará dicha obra, junto a la definición de los parámetros que permitan caracterizar el comportamiento geotécnico que presentarán las diferentes unidades litológicas que lo componen.

Para caracterizar una unidad geotécnica se hacen ensayos de laboratorio y/o in situ. Para definir los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción, cohesión y resistencia no drenada) en el laboratorio, es común

realizar el ensayo triaxial, mientras que para hacerlo in situ el ensayo de penetración de cono (CPTu) ha ido tomando más relevancia en los últimos años. Por otro lado, una desventaja que se presenta en ambos ensayos es la incertidumbre al momento de estimar el coeficiente de empuje lateral de tierra en reposo (K_0), el cual es necesario para hacer las estimaciones de la razón de resistencia no drenada (S_u/σ'_{v0}).

Este artículo presenta los resultados obtenidos a partir de ensayos triaxiales, CPTu y DMT ejecutados en suelos residuales ubicados en la zona central de Chile, con el objetivo de determinar los valores de coeficiente de empuje

en reposo y resistencia al corte no drenada, destacando la complementariedad de los ensayos y el aumento de la certidumbre en los resultados.

Metodología

Resistencia al corte no drenada

Para la estimación de la resistencia al corte no drenada S_u , existen diferentes metodologías, las cuales dependerán de los tipos de ensayos disponibles.

Ensayo triaxial

El ensayo triaxial se trabaja generalmente en el plano de trayectorias de tensiones q - p' . Para efectos de este estudio, se define el esfuerzo medio efectivo p' , como:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (1)$$

donde σ'_1 y σ'_3 corresponden a las tensiones principales, que para un suelo horizontal se pueden asociar a las tensiones efectivas verticales y horizontales, respectivamente. Por otro lado, el desviador de tensiones $q = \Delta\sigma$ se define como:

$$q = \Delta\sigma = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2)$$

Para definir la resistencia no drenada residual en un ensayo triaxial, se suele considerar la resistencia S_u , es decir, aquella que se alcanza para altos niveles de deformación (cercaos al 20% de deformación unitaria axial), definida como:

$$S_u = \frac{\Delta\sigma_u}{2} \quad (3)$$

Cuando el material presenta un comportamiento contractivo y normalmente consolidado, este parámetro puede ser caracterizado por una constante que depende del confinamiento vertical efectivo inicial (σ'_{v0}), el cual puede ser obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma'_{v0} = \frac{3p'_g}{1 + 2K_0} \quad (4)$$

donde K_0 corresponde al coeficiente de empuje lateral de tierra en reposo y p'_g corresponde al esfuerzo medio

efectivo p' en que la curva odométrica (o geostática) intercepta a la trayectoria de tensiones en el plano q - p' (Figura 1).

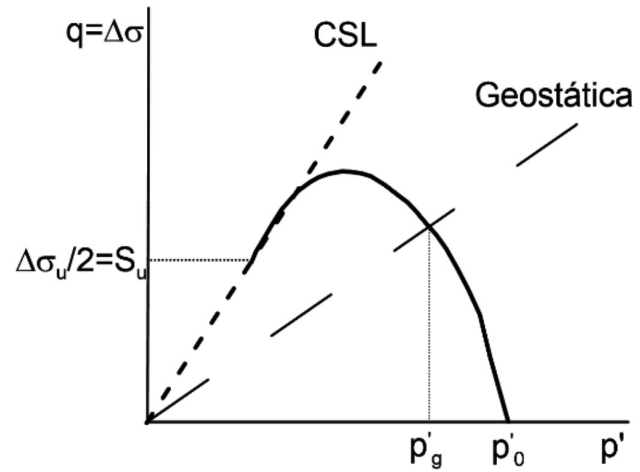


Figura 1: Presentación gráfica de p'_0 , S_u y p'_g , para la estimación de la resistencia residual no drenada S_u a partir de ensayo triaxial. CSL corresponde a la línea de estado último (CSL: critical state line)

Dilatómetro

El ensayo del dilatómetro DMT permite estimar la resistencia no drenada a partir de la correlación de Marchetti (1980):

$$S_u = 0.22\sigma'_{v0}(0.5K_D)^{1.25} \quad (5)$$

donde K_D corresponde al índice de tensión horizontal, definido por:

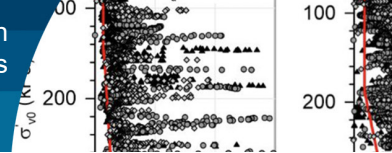
$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (6)$$

donde p_0 corresponde a un índice de corrección de lectura del ensayo y u_0 a la presión de poros inicial. Cabe destacar que esta correlación para obtener S_u es válida siempre y cuando el índice del material, I_D , sea menor a 2.0.

CPTu

Para estimar la resistencia no drenada peak a través del CPTu, es común utilizar la fórmula propuesta por Robertson y Cabal (2016), que indica que:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (7)$$



donde el parámetro q_t corresponde a la resistencia de punta corregida por efecto de presión de agua, σ_v al esfuerzo vertical total y N_{kt} un parámetro que varía de 10 a 18, tendiendo a incrementar con el aumento de la plasticidad y a disminuir con el aumento en la sensibilidad del suelo.

Por otro lado, la resistencia no drenada residual para arcillas se suele asumir igual a la resistencia de fuste, f_s .

Coeficiente de empuje de tierra en reposo K_0

El coeficiente de empuje lateral de tierra en reposo K_0 se define como la razón entre los esfuerzos horizontal y vertical efectivos, en una condición que no ocurren deformaciones, a través de la siguiente expresión:

$$K_0 = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} \quad (8)$$

Este valor para suelos sobre consolidados no es constante, por lo que en la práctica habitual es común estimarlo a través de la siguiente expresión (Meyerhof, 1976):

$$K_0 = (1 - \sin(\phi))(OCR)^{0.5} \quad (9)$$

El valor del OCR se puede determinar a través del ensayo de consolidación.

En caso de tener un material normalmente consolidado, $OCR = 1.0$, se obtiene la clásica ecuación sugerida por Jaky (1944):

$$K_0 = 1 - \sin(\phi) \quad (10)$$

Por otro lado, para arcillas sin cementación, este parámetro se puede estimar directamente a través del ensayo DMT mediante la siguiente expresión (Marchetti, 1980):

$$K_{0,DMT} = \left(\frac{K_D}{1.5} \right)^{0.47} - 0.6 \quad (11)$$

Este parámetro también puede ser obtenido a partir de la resistencia de punta q_c obtenido del CPTu y del índice de tensión horizontal K_D obtenido del DMT (Baldi *et al.*, 1986):

$$K_0 = C_1 + C_2 K_D + C_3 \frac{q_c}{\sigma'_v} \quad (12)$$

donde C_1 , C_2 y C_3 dependen del tipo de suelo. De acuerdo con da Fonseca *et al.* (2003) para suelos con características similares a un suelo residual, estas constantes pueden tomar valores de $C_1 = 0.736$, $C_2 = 0.024$ y $C_3 = -0.00172$.

Información analizada

Características del suelo residual estudiado

Los suelos residuales corresponden a materiales que se originan por la meteorización y descomposición in situ de los macizos rocosos. Los suelos residuales estudiados corresponden a rocas de la edad Cretácico, presentes en la zona central de Chile. Las partículas que lo componen consisten, con frecuencia, en agregados o cristales de minerales meteorizados que se disgregan, presentando una textura principalmente arenosa o fina, cuando proceden de areniscas o tobas, y gruesa, cuando provienen de conglomerados. En el área de estudio se observaron suelos residuales asociados a afloramientos de rocas volcánicas (lavas y tobas) y sedimentarias (areniscas y conglomerados), los cuales no han sufrido erosión ni transporte, con porcentaje de finos sobre el 35%, límite líquido entre 50% y 70% e índice de plasticidad (IP) en el rango entre 15 y 35.

Concretamente, en el sector analizado las rocas presentan una zona superficial intensamente meteorizada (W5 y W6) de espesor variable, que en algunos sectores alcanza los 35 m de profundidad. Lo anterior confiere a esta zona superficial del macizo rocoso un comportamiento geotécnico asimilable al de un suelo y texturas arcillosas, arenosas y gravosas, debido a la baja cementación producida por la meteorización.

Antecedentes de los ensayos triaxiales, CPTu y DMT

Se contó con ensayos triaxiales CIU ejecutados en muestras “inalteradas” extraídas desde sondajes mediante tubos Shelby. Se ejecutaron 8 series de ensayos triaxiales, cuyas características se resumen en la Tabla 1.

Por otro lado, se cuenta con 3 perforaciones CPTu y 4 DMT ejecutados en la misma unidad del suelo residual de donde se extrajeron las muestras para realizar los ensayos triaxiales. Cabe destacar que estos ensayos in situ fueron ejecutados al lado de los sondajes de donde se extrajo las muestras analizadas en laboratorio.

Tabla 1: N° de probetas y confinamientos iniciales definidos para cada serie de ensayos triaxial CIU ejecutados.

Serie triaxial	N° probetas	Confinamientos iniciales p'_0 , kPa
Trx-1	3	1250 – 1800 - 2800
Trx-2	3	1200 - 1800 - 2500
Trx-3	2	100 - 500
Trx-4	1	300
Trx-5	1	200
Trx-6	2	50 - 100
Trx-7	2	500 - 2000
Trx-8	1	900

Resultados

Razón de resistencia residual a partir de ensayos triaxiales

Las Figuras 2 a 5 presentan los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales considerados, en términos de trayectorias de tensiones efectivas. Para cada muestra ensayada se ha destacado en gris el punto donde se evalúa la resistencia al corte residual S_u , correspondiente al valor registrado para una deformación del 20%, y que por el tipo de respuesta tensión-deformación, en general, coincide con la resistencia máxima, exceptuando las series Trx-1 y Trx-2, que son las únicas que muestran una resistencia máxima y luego una caída importante hacia un valor residual. De estos ensayos, se obtiene un ángulo de fricción de 31°, el cual se utiliza para calcular K_0 de las muestras con comportamiento contractivo (normalmente consolidado) y el K_0 promedio para las que presentan un comportamiento dilatante (sobreconsolidado). Para estas últimas, el valor de OCR fue estimado a través de ensayos de consolidación ejecutados en muestras extraídas de los mismos sondajes, obteniéndose un valor de OCR promedio de 3.75.

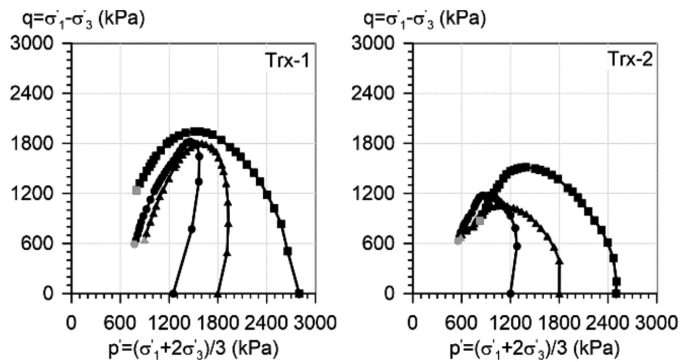


Figura 2: Trayectorias de tensiones efectivas series Trx-1 y Trx-2

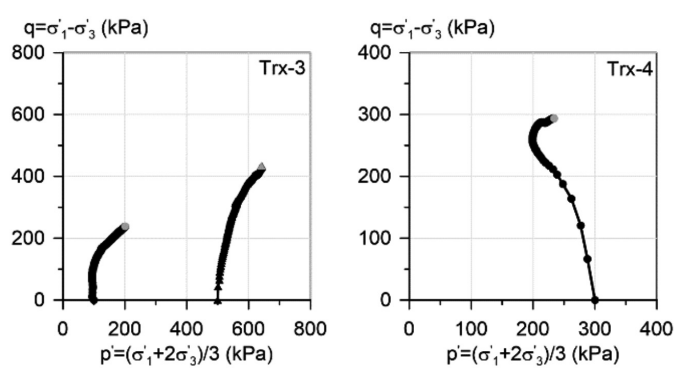


Figura 3: Trayectorias de tensiones efectivas series Trx-3 y Trx-4

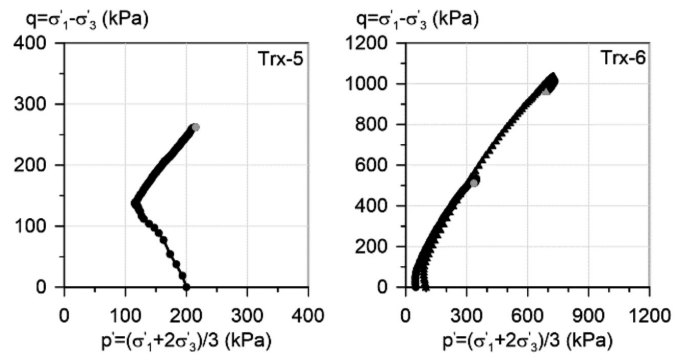


Figura 4: Trayectorias de tensiones efectivas series Trx-5 y Trx-6

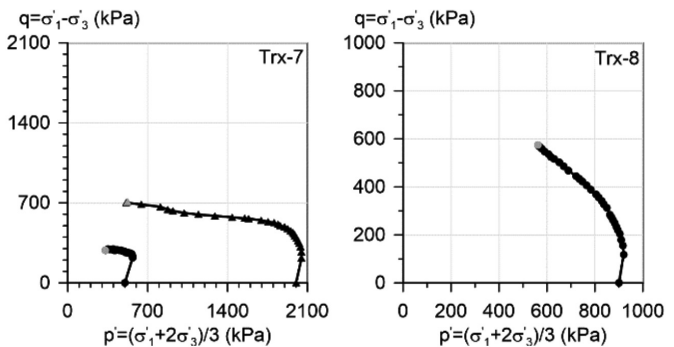


Figura 5: Trayectorias de tensiones efectivas series Trx-7 y Trx-8

Los valores de K_0 obtenidos, considerando las diferentes metodologías descritas en la sección Coeficiente de empuje de tierra en reposo K_0 , se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de K_0 obtenidos mediante la metodología de Jaky (1944) (NC) y Meyerhof (1976) (OC)

K_0	Ecuación	Valor
$(1 - \sin(\phi))(OCR)^{0.5}$	(9)	1.03
$1 - \sin(\phi)$	(10)	0.53

La Figura 6 presenta los valores de K_0 obtenidos en profundidad utilizando correlaciones a partir del DMT (ecuación (11)) y en conjunto con el CPT (ecuación (12)). Se observa que la primera tiene una alta dispersión, con un valor promedio de 1.66 y desviación estándar de 0.63, mientras que la segunda posee una dispersión bastante baja, con un promedio de 0.84 y desviación estándar de 0.09.

Para definir la razón de resistencia no drenada residual S_u/σ'_{v0} , se considerarán tres curvas geostáticas, obtenidas a partir de las 3 metodologías presentadas en la sección de K_0 . Para las series donde el comportamiento observado es dilatante, el K_0 considerado corresponde al obtenido a través de Meyerhof (1976), ecuación (9). Para las series con comportamiento contractivo, se consideró la de Jaky (1944), ecuación (10).

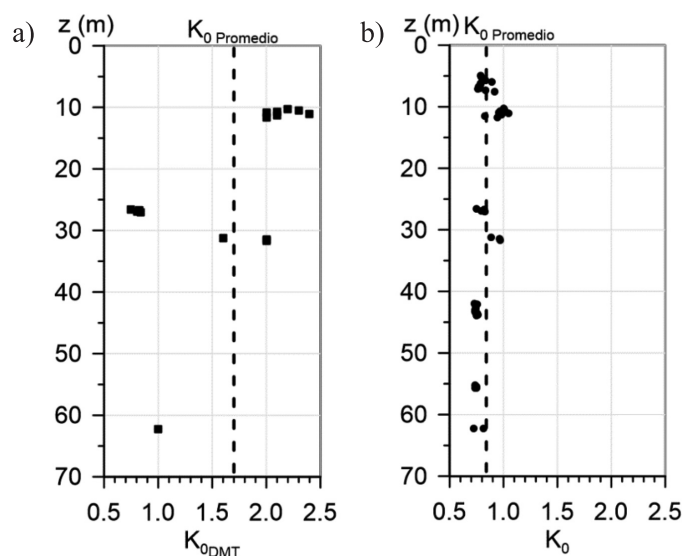


Figura 6: K_0 obtenido mediante correlaciones con el dilatómetro, en profundidad, a) de la ecuación (11) y b) de la ecuación (12)

En la Figura 7 se pueden observar las diferencias al momento de obtener el valor “ p_g ” en la probeta con $p'_0 = 2800$ kPa de la serie Trx-1, con el cual se determina σ'_{v0} . La Tabla 3 resume los valores de S_u/σ'_{v0} obtenidos considerando diferentes valores de K_0 , donde los valores para esta probeta varían desde 0.19 a 0.36, considerando el mismo valor de resistencia residual representado por el punto gris de la Figura 7.

Aplicando la misma metodología para el resto de las series de ensayos triaxiales, se obtiene la Figura 8, donde el

Tabla 3: S_u/σ'_{v0} obtenido considerando diferentes valores de K_0

K_0	p'_g , kPa	S_u/σ'_{v0}
K_0 Jaky	2191	0.19
K_0 DMT	2453	0.36
K_0 CPT	2668	0.21

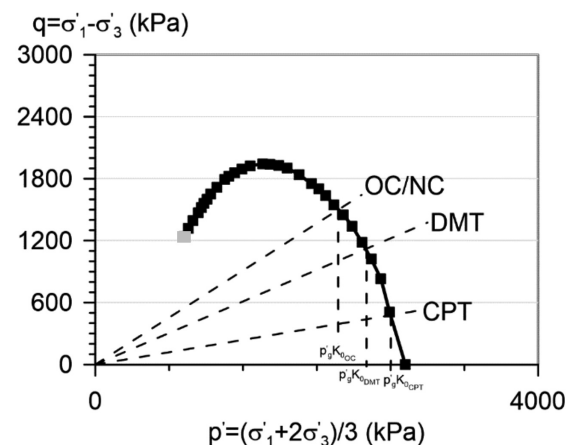


Figura 7: p'_{0g} obtenidos para cada curva geostática definidas a partir de los ensayos triaxiales (curva OC/NC), DMT y CPT

gráfico de la izquierda corresponde al S_u obtenido a partir de la ecuación (9) o (10) (dependiendo del comportamiento de la probeta), el gráfico central a partir de la ecuación (11) y el de la derecha a partir de la ecuación (12). Se observa que hasta confinamientos de 500-650 kPa la envolvente de la resistencia no drenada es de 100 kPa, independiente de la metodología aplicada. Para confinamientos mayores, se comienzan a observar diferencias entre cada metodología.

Cuando S_u se obtiene a partir de K_0 de Jaky y/o Meyerhof, la envolvente corresponde a 200 kPa hasta los 1750 kPa; para el S_{uDMT} es de 270 kPa hasta 1300 kPa; y para el S_{uCPT} es de 270 kPa hasta los 2000 kPa.

Por último, la envolvente del S_u para confinamientos mayores a los mencionados anteriormente se encuentran en función del confinamiento, donde se observa que el $S_{uK0Jaky/Meyerhof}$ presentan una razón S_u/σ'_{v0} igual a 0.11, lo cual es conservador y es un valor común en relaves depositados en cubeta (Been y Jefferies, 2016), mientras que la obtenida a través de la correlación con el DMT, S_{uDMT} , es igual a 0.79, valor propio de materiales fuertemente dilatantes. Además, de acuerdo con Machetti (1980), esta correlación sobreestima los valores de K_0 para arcillas cementadas.

Por último, al correlacionarse el dilatómetro con el CPT, $S_{u\text{CPT}}$, se obtiene una razón igual a 0.21, que es un resultado esperable para el tipo de material que compone el suelo de fundación.

La Tabla 4 resume las resistencias no drenadas obtenidas en los ensayos triaxiales a partir de los valores de K_0 obtenidos con cada metodología, en función del confinamiento σ'_{v0} .

Tabla 4: Resumen de las resistencias no drenadas obtenidas en los ensayos triaxiales a partir de diferentes valores de K_0

K_0	S_u , kPa	Rango σ'_{v0} , kPa
Jaky/Meyerhof	100	0-670
	200	670-1750
	$0.11\sigma'_{v0}$	>1750
DMT	100	0-500
	270	500-1300
	$0.79\sigma'_{v0}$	>1300
DMT con CPTu	100	0-600
	270	600-2000
	$0.21\sigma'_{v0}$	>2000

Razón de resistencia no drenada a partir del DMT

Al calcular la resistencia no drenada a partir del ensayo DMT, utilizando la ecuación (5) y solo para aquellos puntos que se cumple una condición de índice del material, I_D , menor a 2.0, se obtiene la Figura 9. Se observa que los valores de S_u obtenidos son sobreestimados, y se asocian fuertemente a un comportamiento dilatante con una razón S_u/σ'_{v0} igual a 0.36, presentando el mismo efecto que el observado en la interpretación del ensayo triaxial. De acuerdo con Marchetti (1980), esta correlación ha presentado otras variantes propuestas por otros autores, y que finalmente depende del diseño y condiciones de terreno su aplicación.

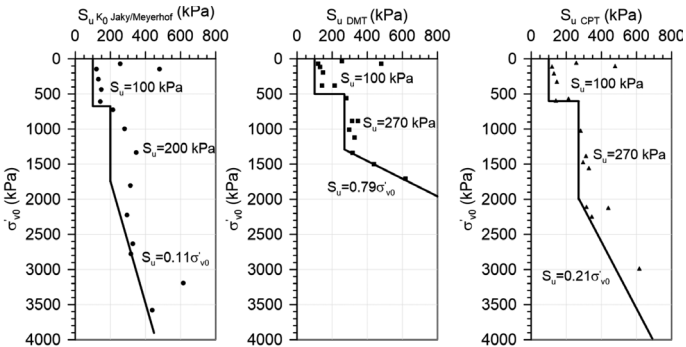


Figura 8: Valores de resistencia no drenada residual en función de σ'_{v0} , en ensayos triaxiales considerando diferentes valores de K_0 obtenidos a partir de las metodologías descritas en sección de K_0

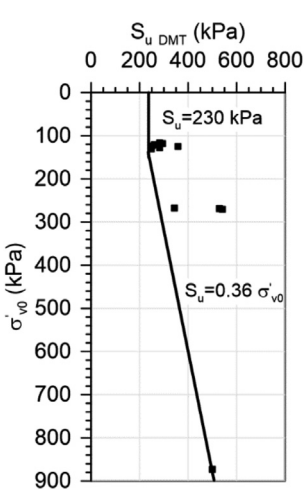


Figura 9: Valores de resistencia no drenada residual en función de σ'_{v0} a partir del DMT

Razón de resistencia no drenada a partir del CPTu

Se determinó la resistencia no drenada a partir del CPTu considerando un N_{kt} igual a 18. Al igual que con el ensayo triaxial, para confinamientos bajos (menores a 200 kPa) la envolvente de la resistencia no drenada residual tiene un valor de 110 kPa, y para confinamientos mayores la envolvente puede ser representada por la razón de S_u/σ'_{v0} igual a 1.29, como se observa en la Figura 10(a). Este valor es alto para este tipo de material, y que la correlación dependa de un parámetro N_{kt} que depende de las propiedades del material, no la hace la más adecuada para estimar, por sí sola, la resistencia no drenada en materiales residuales. Por otro lado, al calcular la resistencia no

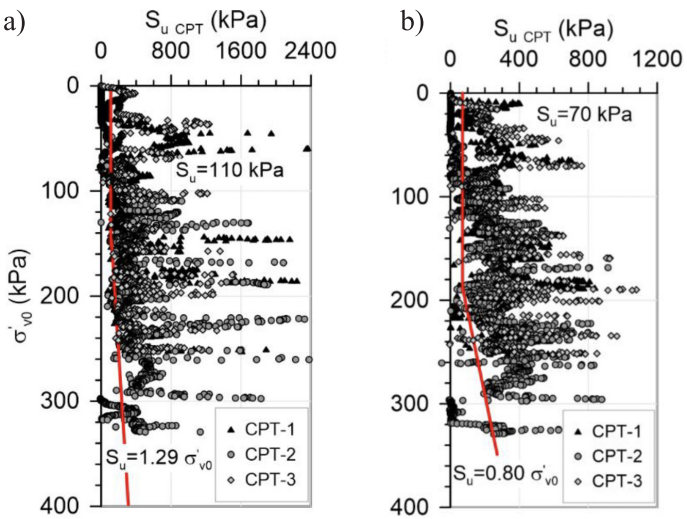
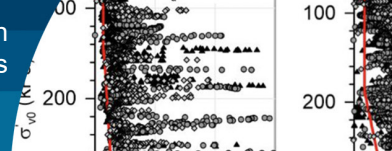


Figura 10: Valores de resistencia no drenada residual en función de σ'_{v0} a partir del CPTu: a) Resistencia no drenada peak a partir del N_{kt} y b) resistencia no drenada residual a partir de la resistencia de fuste



drenada a partir de la resistencia de fuste (f_s), se obtiene la Figura 10(b). Se observa que la resistencia no drenada residual se puede considerar con valor constante de 70 kPa hasta confinamientos de 200 kPa. Para confinamientos mayores, se tiene una razón de resistencia no drenada igual a 0.80, valor cercano a lo obtenido con la fórmula del DMT, correspondiente a un valor propio de materiales fuertemente dilatantes.

Conclusiones

Una de las mayores desventajas al momento de determinar la resistencia no drenada de un material es la incertidumbre existente al momento de estimar el coeficiente de empuje lateral de tierra en reposo (K_0). El trabajo realizado estimó el valor de K_0 a partir de diferentes metodologías, con el objetivo de determinar y comparar las razones de resistencia no drenada residuales que se obtienen para cada una de ellas. Al estimar esta razón a partir de la correlación de Jaky (1944) o Meyerhof (1976), se observa que los valores de la razón de resistencia no drenada residual son bajos. Por otro lado, cuando se estiman a partir de solo el ensayo de dilatómetro DMT, los valores son sobreestimados, obteniendo resultados propios de materiales fuertemente dilatantes. Sin embargo, cuando se utiliza la correlación entre el dilatómetro DMT y el ensayo de penetración de cono CPTu, los valores de esta razón son esperables para el tipo de material analizado en este estudio, lo cual se debe a que el parámetro K_0 puede ser bien estimado a partir de un ensayo de dilatómetro plano DMT complementado con el CPTu. Por lo tanto, del estudio realizado se concluye que, para suelos residuales ubicados en la zona central de Chile, la ejecución de ensayos in situ como el dilatómetro DMT y CPTu son importantes para complementar los resultados de ensayos triaxiales, lo que permite definir una razón de resistencia residual coherente para las propiedades del material analizado, sin presentar valores que la subestimen o sobreestimen.

Referencias

- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S., and Pasqualini, E. (1986). Flat dilatometer tests in calibration chambers. *Specialty Conference In Situ '86 Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, ASCE Geotechnical Special Publication 6, 431-446
- Been, K. and Jefferies, M. (2016). *Soil liquefaction a critical state approach*. 2nd ed., Taylor & Francis Group
- da Fonseca, A.V., de Sousa, J.F.V. and Cruz, N.B. (2001). Parametrical correlations between SPT, CPT, DPL, PMT, DMT, CH and PLT tests results on a typical profile of saprolitic soils from Granite. *International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*, 577-584
- Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. (A nyugalmi nyomas tenyezoe). *Journal of the Society of Hungarian Engineers and Architects* 78(22), 355-358 (in Hungarian)
- Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 106(3), 299-321
- Meyerhof, G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 102(3), 197-228
- Robertson, P.K and Cabal, K.L. (2016). *Guide to cone penetration testig for Geotechnical Engineering*. 6th ed., Gregg Drilling & Testing, Inc., USA