



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## Estudio experimental de la interacción bulbo-suelo en anclajes postensados inyectados en arenas eólicas del sector Reñaca-Concón

Felipe Kuncar García (1); Catalina Mancilla Labrín (2); Oscar Taiba Miranda (3)

(1) Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Ingeniero de Proyectos, Ferrara

(2) Ingeniero Civil, Postítulo en Mecánica de Suelos Aplicada, Ingeniero de Proyectos, Ferrara

(3) Ingeniero Civil, Máster en Mecánica de Suelos, Gerente de Ingeniería, Ferrara  
felipe.kuncar@ferrara.cl; catalina.mancilla@ferrara.cl; oscartaiba@ferrara.cl

### Resumen

En las localidades de Reñaca y Concón se presenta la unidad geológica denominada Depósitos Eólicos Subactuales, conformada por arena fina mal graduada con compacidad creciente en profundidad (arena de duna). Los tipos de estructuras de contención más utilizados en la zona utilizan arriostramientos (anclaje postensados o pernos) inyectados al terreno con lechada de cemento, para transferir las cargas al suelo.

En el presente artículo se estudió la capacidad de carga y el mecanismo de transferencia de esta al terreno en anclajes postensados inyectados en arenas, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los métodos de diseño tradicionales y determinar la distribución de tensiones a lo largo del bulbo. Para esto se analizaron siete ensayos de arrancamiento realizados por Ferrara, dentro de los cuales dos fueron especialmente instrumentados con strain gauges a lo largo del bulbo, lo que permitió medir la distribución de deformaciones que experimentaron los cables a través de los ciclos de carga y descarga hasta llegar a la falla, y estimar la distribución de la tensión de adherencia entre el bulbo y el suelo. Los resultados de estos ensayos fueron complementados con resultados de ensayos SPT disponibles, para correlacionar la capacidad de adherencia bulbo-suelo con la compacidad del terreno.

**Palabras-Clave:** Anclaje, Arena eólica, Ensayo de carga, Strain gauge, Instrumentación, Adherencia bulbo-suelo

### Abstract

The geological unit called Modern Eolian Deposits located in Reñaca and Concón is composed of poorly graded fine sand with increasing density in depth (dune sand). The most typical retaining structures used in the zone use post-tensioned anchors or nails, grouted to the ground.

In this article the load capacity and the transfer mechanism of the load to the ground in post-tensioned anchors, grouted in sands have been studied with the aim of comparing the obtained results with the traditional design methods, and to determine the stress distribution along the anchor bond length. For this purpose, seven pull-out capacity tests performed by Ferrara have been analyzed, among which, two tests were specially instrumented with strain gauges along the anchor bond length, which have allowed to measure the strain distribution through loading and unloading cycles until fault, and to estimate the skin friction distribution between soil and grout. These tests results have been supplemented by SPT measurements available, in order to correlate the skin friction capacity with the density of soil.

**Keywords:** Anchor, Dune sand, Pull-out test, Strain gauge, Instrumentation, Skin friction

## 1 Introducción

Los métodos convencionales de diseño de anclajes ([1], [2], [3]), que son utilizados normalmente en la práctica chilena, trabajan bajo el supuesto de que la transferencia de carga desde la lechada al terreno se produce a través de una tensión de adherencia bulbo-suelo equivalente,  $q_s$ , que se distribuye uniformemente a lo largo del bulbo. Esto implica que la carga última ( $P_{últ}$ ) del anclaje es considerada como proporcional a la longitud del bulbo (LB), es decir:

$$P_{últ} = \pi \cdot d \cdot LB \cdot q_{smáx} \quad (1)$$

Donde  $d$  es el diámetro del bulbo (ver Fig. 1) y  $q_{smáx}$  la tensión de adherencia bulbo-suelo máxima.

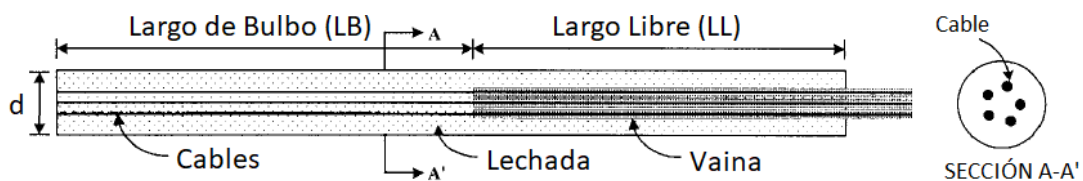


Fig. 1 – Configuración típica de anclaje temporal (adaptada de [4]).

Sin embargo, la evidencia empírica muestra que la adherencia bulbo-suelo tiene una distribución no uniforme a lo largo del bulbo, especialmente en el caso de suelos de mayor compacidad [5], y que la carga última no es proporcional a longitud de este, existiendo una longitud máxima para la cual no se esperan incrementos notorios de la capacidad [6]. Esta no uniformidad en la distribución de la adherencia se debe, en términos generales, a la incompatibilidad entre el módulo elástico de los cables, de la lechada y del suelo [7].

Las observaciones indican que cuando se aplica una carga sobre el anclaje, la adherencia bulbo-suelo se concentra inicialmente en la zona proximal del bulbo. A medida que la carga se incrementa, la adherencia crece hasta movilizarse un valor peak. Si la carga continúa creciendo este valor disminuye hasta un valor residual y la zona de concentración de adherencia comienza a progresar hacia la zona distal del anclaje. En la Fig. 2 se muestra una distribución idealizada de la adherencia a lo largo del bulbo cuando el anclaje se encuentra sometido a un nivel inicial de carga y cuando se acerca a la carga última que provoca la falla por arrancamiento.

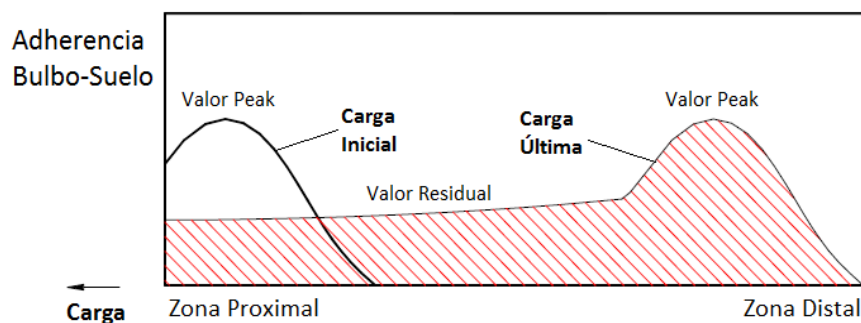


Fig. 2 – Distribución idealizada de la tensión de adherencia bulbo-suelo (adaptada de [7]).

El mecanismo de transferencia de carga ha sido observado en ensayos de arrancamiento con anclajes instrumentados para tal efecto (ver por ejemplo [5] y [4]), sin embargo, son pocos los estudios de este tipo que se han reportado en suelos chilenos ([8], [9]), y particularmente en arenas de Chile los autores desconocen estudios previos.

En la práctica ingenieril se ha optado por utilizar los métodos convencionales de diseño, obviando los efectos que puede tener la no uniformidad en el mecanismo de transferencia de carga y considerando altos factores de seguridad para compensar el elevado grado de incertidumbre que se tiene respecto del comportamiento real del anclaje. Sin embargo esto no garantiza un diseño óptimo.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la capacidad de carga y el mecanismo de transferencia de carga del anclaje al terreno en anclajes postensados inyectados en arenas no cohesivas presentes en el sector Reñaca - Concón. Este suelo pertenece a la unidad geológica denominada Depósitos Eólicos Subactuales [10], conformada por arena fina mal graduada con compacidad creciente en profundidad (arena de duna).

Para lograr lo anterior se analizaron siete ensayos de arrancamiento realizados por Ferrara en la zona, dentro de los cuales dos fueron especialmente instrumentados para medir la deformación a lo largo de los cables, lo que permitió estimar la distribución de la tensión de adherencia bulbo-suelo.

## 2 Metodología empleada

Se realizaron siete ensayos de arrancamiento en anclajes inyectados en arena eólica, ubicados en tres obras ejecutadas por Ferrara en el sector Reñaca - Concón. En la Fig. 3 se puede observar la ubicación de cada obra considerada en el análisis. La compacidad de la arena en profundidad fue determinada a través de ensayos SPT realizados en cada sitio.



Fig. 3 – Ubicación de ensayos de arrancamiento.

Los anclajes fueron instalados en una perforación vertical, ejecutada con sistema ODEX 90 o CGR 140, y posteriormente inyectados con sistema IGU (Inyección Global Única) con una lechada de cemento con relación A/C=0,40 a 0,50.

En la Tabla 1 se presentan las principales características de los ensayos realizados.

Tabla 1 – Ensayos analizados.

Ensayo	Obra	Ubicación	Profundidad [m]	LL [m]	LB [m]	NC [un.]	Φperf [mm]	Instrumentación
A1	1) Edificio Bordemar	Reñaca	1,50	6,0	4,0	7	123	-
A2			1,50	10,0	4,0	7	123	-
A3			0,50	6,0	4,0	7	123	-
A4			1,50	10,0	4,0	7	123	-
A5	2) Edificio Dunas de Montemar	Concón	3,00	4,5	3,0	6	140	-
A6	3) Edificio	Concón	2,63	3,5	4,0	9	140	8 SG (LB) + 1 SG (LL)
A7	Eco Costa		2,28	4,5	3,0	9	140	6 SG (LB) + 1 SG (LL)

Como se muestra en la Tabla 1, los anclajes ensayados tuvieron largos libres (LL) de entre 3,5 y 10,0 [m], y largos de bulbo (LB) de entre 3,0 y 4,0 [m]. El diámetro de perforación fue de 123 [mm] en el caso de los anclajes A1 a A4 y de 140 [mm] en el caso de los ensayos A5 a A7. El número de cables (NC) varió entre 6 y 9, y fue determinado con el objetivo de asegurar que la falla del anclaje se produzca por arrancamiento del bulbo y no por fluencia en los cables en el largo libre. Los cables utilizados tienen un diámetro nominal de 15,24 [mm] y cumplen con las exigencias de la norma ASTM A416 [11].

Los ensayos fueron realizados mediante un sistema de reacción, consistente en una viga de acero instalada sobre una cama doble de durmientes de madera (ver Fig. 4). Sobre el punto medio de la viga se posiciona una placa de acero rígida para reparto de carga y sobre esta una placa calota que permite la adecuada acomodación del sistema. Sobre esta placa se posiciona el cilindro hidráulico utilizado para tensar el anclaje. Se instalan cuatro relojes de control de desplazamiento de 0,01 [mm] de precisión en una estructura cuyos apoyos se encuentran aislados del sistema de reacción, constituyendo un marco de referencia absoluto no sujeto a las deformaciones del suelo. Dos de estos relojes se utilizan para monitorear el desplazamiento vertical de la cabeza del anclaje y los otros dos para medir el desplazamiento vertical de la viga de reacción.



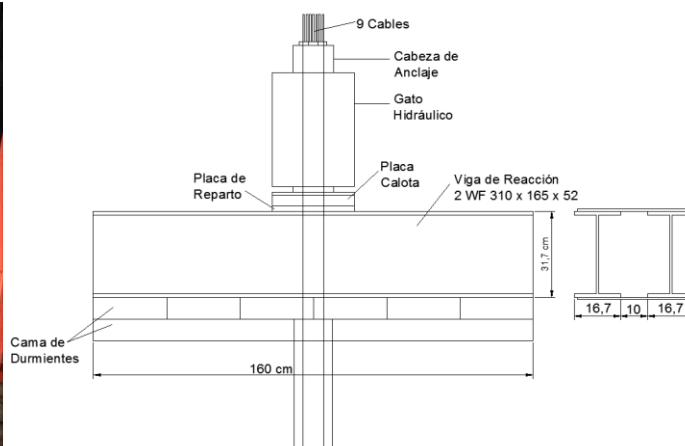


Fig. 4 – Montaje de ensayos de arrancamiento, Obra 3) Edificio Eco Costa.

De modo particular, los ensayos A6 y A7 fueron realizados con anclajes instrumentados para medir las deformaciones unitarias producidas en el largo libre y a lo largo del bulbo a medida que se desarrolla el ensayo. La instrumentación consistió en la instalación de strain gauges (SG) a lo largo del bulbo con una separación 50 [cm] y un strain gauge adicional en el largo libre, todos dispuestos en un único cable (ver Fig. 5).

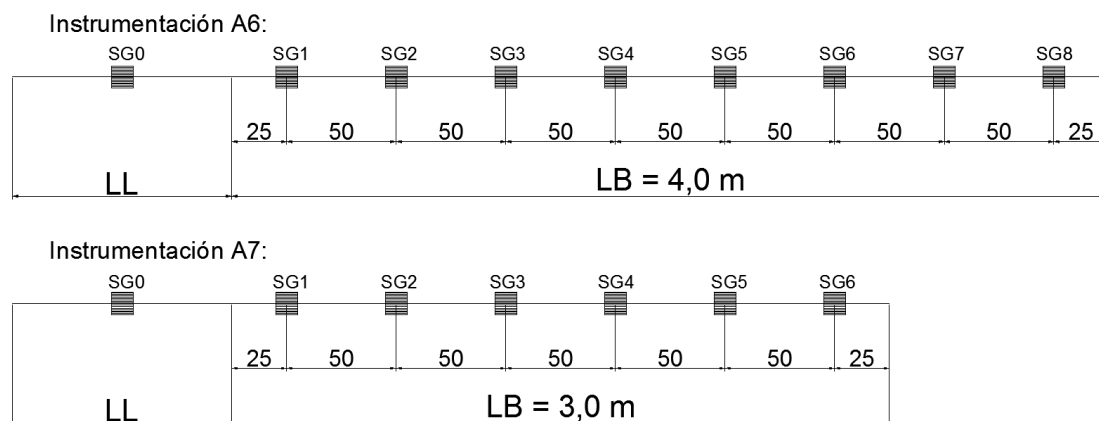


Fig. 5 – Disposición de strain gauges en ensayos A6 y A7.

Los strain gauges utilizados fueron marca Excel Sensores tipo PA-06-125RB-120-L, los cuales poseen una resistencia de 120  $\Omega$ . Estos fueron adheridos directamente al cable mediante adhesivo instantáneo y protegidos con una capa de silicona. Los cables eléctricos conectados a cada strain gauge fueron canalizados a través de un único tubo de PVC flexible (ver Fig. 6). La resistencia de cada strain gauge fue medida en cada etapa de la instalación para verificar su correcto funcionamiento.



Fig. 6 – Instalación de strain gauges.

En el caso de estos ensayos (A6 y A7) se contó con una medición continua de la carga mediante un sistema hidráulico paralelo al utilizado para cargar los anclajes. Este consistió en una celda de carga de 100 [kN] de capacidad, cargada por un cilindro hidráulico de la misma capacidad, con su propio sistema de reacción, obteniéndose la carga sobre el anclaje mediante la razón entre las áreas efectivas de los cilindros hidráulicos utilizados. La adquisición de datos de los strain gauges fue realizada por la empresa I3 Pro con un equipo HBM Quantum MX1615B de 16 canales.

### 3 Resultados

#### 3.1 Capacidad de carga

En la Fig. 7 se emplazan los anclajes ensayados A1 a A7 y los sondajes realizados en cada obra. En base al ensayo SPT del sondaje más cercano a cada anclaje ensayado, se estimó un  $N_{60}$  (número de golpes corregido por energía según [12]) promedio a lo largo del bulbo de cada anclaje (ver Fig. 8).



Fig. 7 – a) Emplazamiento Obra 1. b) Emplazamiento Obras 2 y 3.

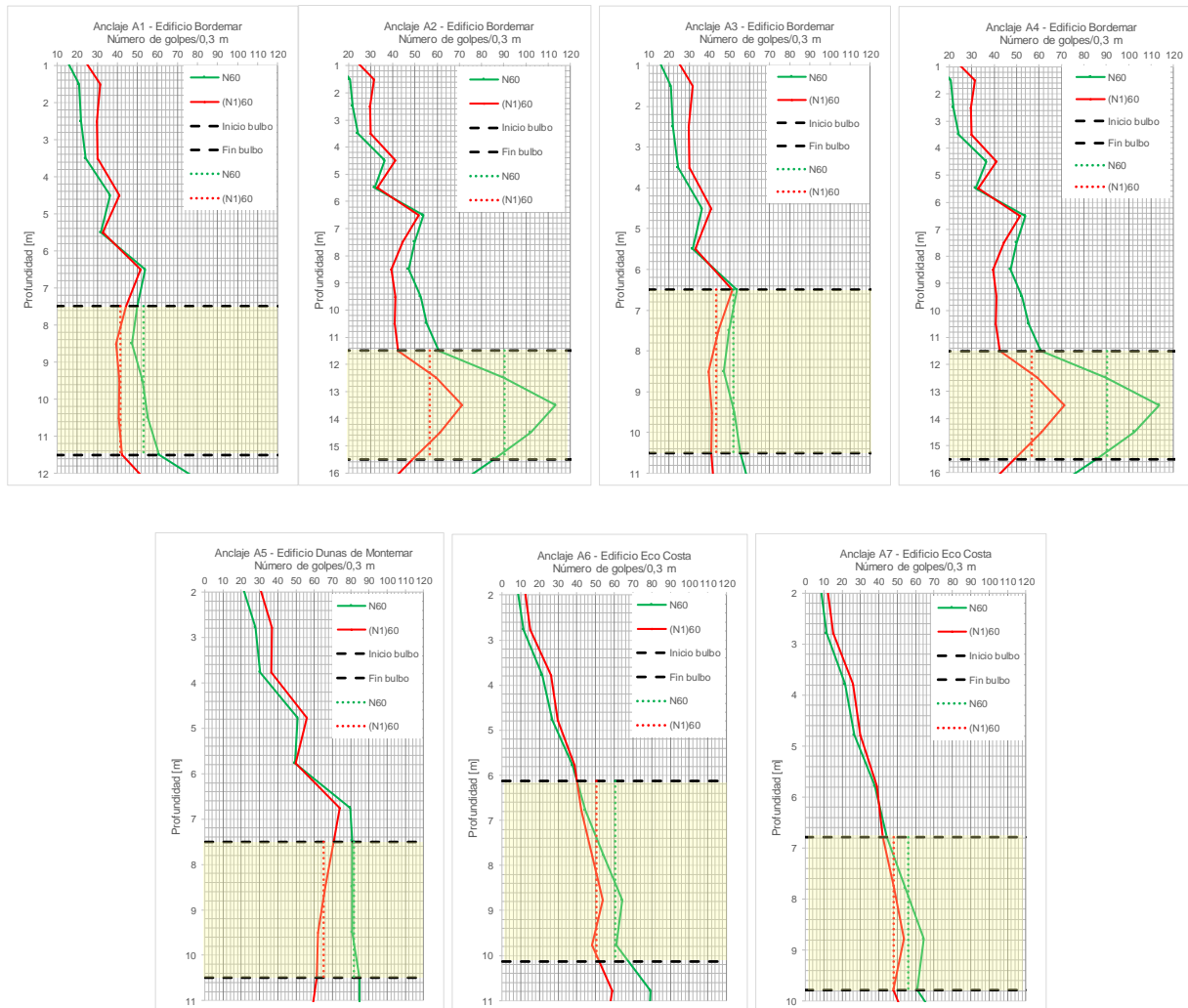


Fig. 8 –  $N_{60}$  promedio en el bulbo en anclajes A1 a A7.

Cabe destacar que los sondeos realizados en el sitio de los anclajes A1 a A4 y A6 a A7 fueron realizados con SPT de tipo automático, cuya energía de energía SPT es de 84% (sondeos de anclajes A1 a A4) y 70% (sondeos de anclajes A6 y A7).

En la Tabla 2 se presenta para cada anclaje la carga última obtenida ( $P_{\text{últ}}$ ), la carga máxima por unidad de largo ( $Q_{\text{máx}}$ ) y la estimación de la adherencia bulbo-suelo máxima ( $q_{\text{smáx}}$ ) según la ecuación (1).

Tabla 2 – Resultados de capacidad de carga anclajes A1 a A7 y estimación de adherencia.

Anclaje	P <sub>últ</sub> [kN]	Q <sub>máx</sub> [kN/m]	q <sub>smáx</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]
A1	377,0	94,3	212,0
A2	800,0	200,0	449,9
A3	377,0	94,3	212,0
A4	600,0	150,0	337,4
A5	1080,0	360,0	382,0
A6	879,6	219,9	388,9
A7	440,1	146,7	274,7

En la Fig. 9 se compararon los resultados de  $q_{smáx}$  obtenidos en cada anclaje, con tres métodos de estimación de capacidad de adherencia: Método Bustamante [2], Guía para el diseño y ejecución de anclajes al terreno de España [3] para el tipo de inyección IGU (inyección global única) y la correlación sugerida por Fujita et al. (1978) [6].

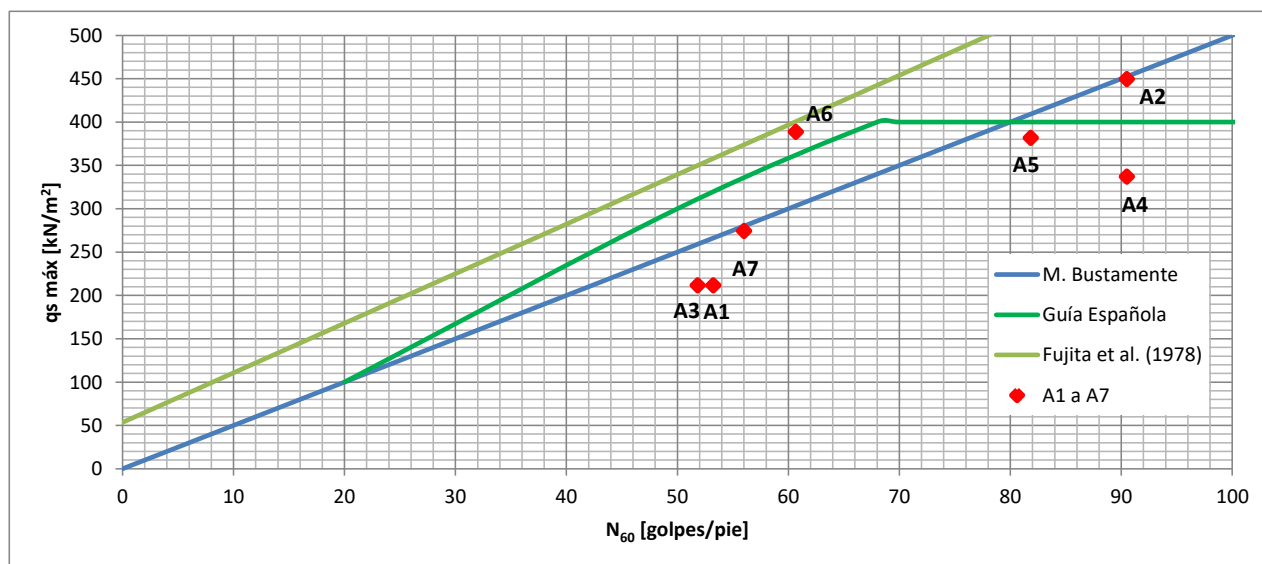


Fig. 9 – Relación entre  $q_{smáx}$  y  $N_{60}$ .

En base a los resultados obtenidos, presentados en la Fig. 9, se puede observar que existe una tendencia de los  $q_{smáx}$  medidos similar a las curvas de diseño del Método Bustamante y la Guía Española. Se aprecia, sin embargo, que la mayor parte de los datos se encuentran bajo las curvas. Respecto a estos datos, se registran diferencias máximas de 25% en el caso del Método de Bustamante (ensayo A4), 34% en el caso de la Guía Española (ensayo A1) y 40,9% en el caso de la correlación Fujita et al. (1978) (ensayo A4).



### 3.2 Distribución de la tensión de adherencia bulbo-suelo

Con fecha 26 de agosto de 2018 los anclajes A6 y A7, instrumentados con strain gauges, fueron ensayados hasta la falla. Los ensayos se iniciaron con una pre-carga igual al 10% de la carga de prueba (CP), según recomendaciones de la literatura [13] (reseteando las deformaciones en cero). Posteriormente se iniciaron los 3 ciclos de carga, aumentando la fuerza en escalones de 10% de la CP, llegando al 50% de la CP en el ciclo 1, 100% de la CP en el ciclo 2 y a la falla en el ciclo final. En la Fig. 10 se presentan las curvas carga-desplazamiento de cada anclaje. Cabe destacar que este desplazamiento fue medido en la cabeza del anclaje a través de los relojes comparadores.

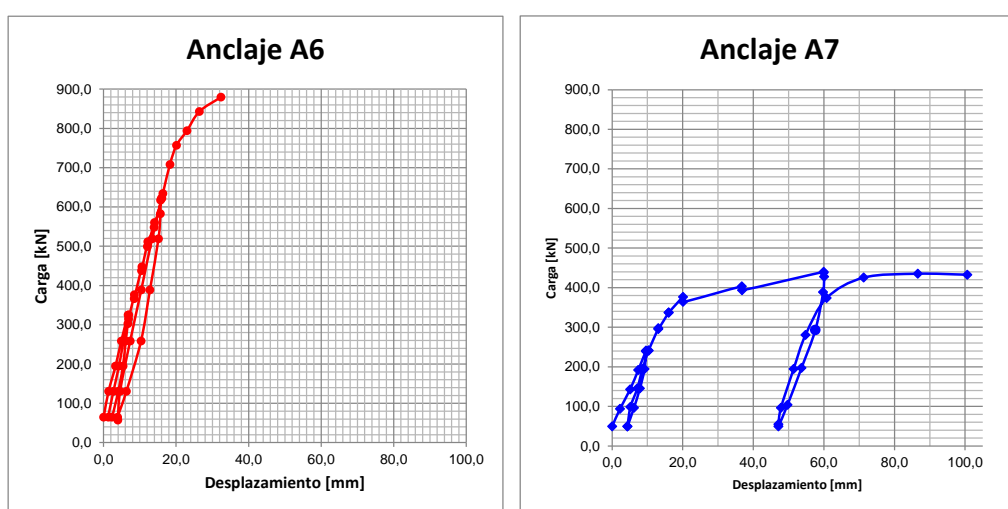


Fig. 10 – a) Curva Carga – Desplazamiento Anclaje A6. b) Curva Carga – Desplazamiento Anclaje A7.

En base al criterio de [14], que define la carga última del anclaje como aquella en la que el desplazamiento residual es igual al 10% del diámetro del anclaje, se puede observar que el anclaje A7 llega a la falla en el segundo ciclo de carga (donde se obtiene un desplazamiento residual de 47,1 [mm], equivalente al 29,3% del diámetro del anclaje). Por este motivo, no se consideraron en el análisis las mediciones asociadas al tercer ciclo de carga del anclaje A7.

Bajo el supuesto de que todos los cables sufren la misma deformación a medida que el anclaje es cargado, y correlacionando la carga aplicada con la deformación obtenida en el SG0 (largo libre), se pudo estimar la distribución de fuerzas en los cables a lo largo de la longitud de bulbo (ver Fig. 11).

Cabe destacar que durante la inyección de los anclajes, el SG6 del anclaje A6 y SG2 del anclaje A7 (ver Fig. 5) sufrieron daños, por lo que no se consideraron en el análisis. Del mismo modo, el SG3 del anclaje A6 fue descartado del análisis por presentar deformaciones con un comportamiento errático.

En la Fig. 11 no se presentan los resultados del ciclo 3 para el anclaje A6 y tampoco los resultados del ciclo 2 para el anclaje A7, debido a que para dichos ciclos se obtuvieron algunos resultados que no parecen ser confiables. Esto tiene dos posibles explicaciones:

- El supuesto de que todos los cables se deforman de igual manera dejó de ser válido para cargas mayores.
- Los SG se dañaron cuando el anclaje fue sometido a cierto nivel de deformación.

Bajo el supuesto de que la fuerza a lo largo de los cables se transmite íntegramente a la interface bulbo-suelo, se puede estimar la tensión de adherencia bulbo-suelo promedio entre dos SG consecutivos mediante la relación entre la diferencia de fuerza asociada a cada uno y el área del manto del bulbo. En la Fig. 12 se muestran las distribuciones de tensión obtenidas a lo largo del bulbo.

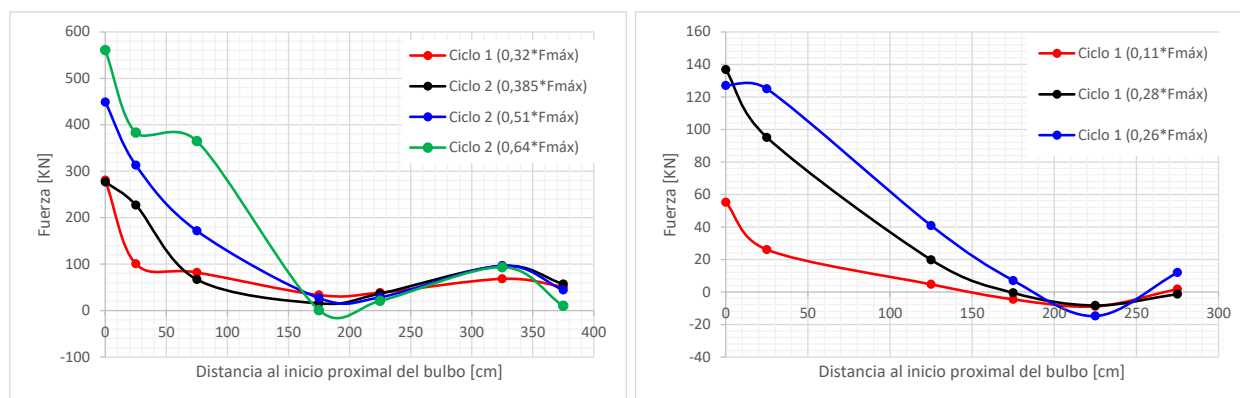


Fig. 11 – Distribución de fuerza en los cables a lo largo de la longitud de bulbo en anclaje a) A6. b) A7.

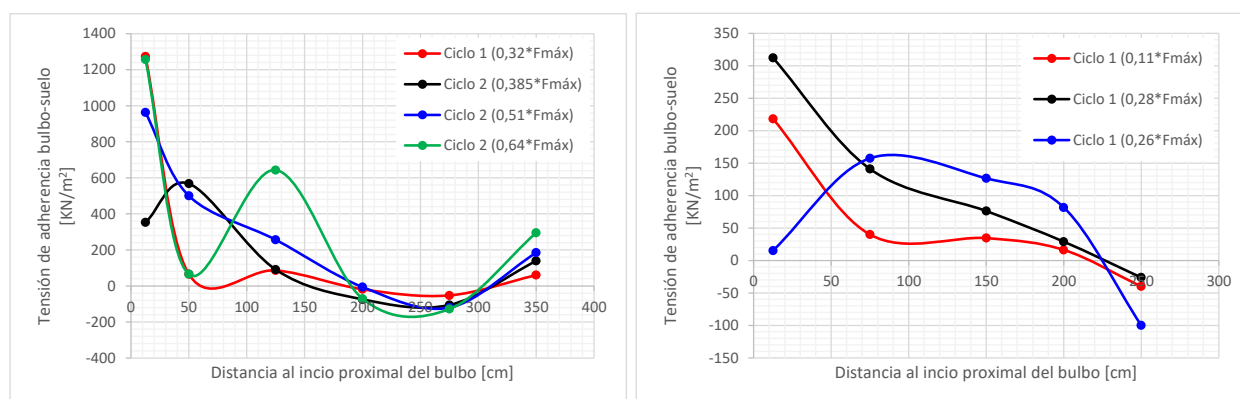


Fig. 12 – Distribución de tensión de adherencia bulbo - suelo en anclaje a) A6. b) A7.

## 4 Conclusiones

De los resultados de la sección 3.1 (Fig. 9) se concluye que los métodos tradicionales de diseño permiten estimar la tensión de adherencia bulbo-suelo máxima dentro de los rangos admisibles, considerando los factores de seguridad exigidos por la normativa, que compensan con cierta

holgura las diferencias observadas. Particularmente, no se recomienda el uso de la correlación propuesta por Fujita et al. [6] para arenas del sector Reñaca – Concón, debido a que sobrestima considerablemente los valores de  $q_{smáx}$  en relación a la compacidad del terreno.

De los resultados de la sección 3.2 (Fig. 11 y 12), se visualiza que la distribución de adherencia bulbo-suelo es altamente no uniforme, lo cual corrobora lo observado por [5] para arenas densas. Para cargas menores se genera una mayor concentración de esfuerzos en la zona proximal del bulbo. En el caso del anclaje A6 (Fig. 12a) se evidencia un progreso de la concentración de esfuerzos hacia la zona distal del bulbo, mientras que en el anclaje A7 (Fig. 12b) se observa el comienzo de este fenómeno. Sin embargo, se debe considerar que en el anclaje A7 los ciclos 2 y 3 fueron descartados del análisis.

Para la determinación de la distribución de adherencia bulbo-suelo se trabajó bajo el supuesto de que la fuerza a lo largo de los cables se transmite íntegramente a la interface bulbo-suelo, sin embargo, en los ensayos realizados por [4] y [14] se pudo medir la contribución de la fuerza resistida por la lechada y esta no es despreciable. De acuerdo a estos resultados, la lechada trabaja a tracción en la zona distal del bulbo y a compresión en la zona proximal. Por lo anterior, se recomienda, en futuros trabajos, instrumentar la zona de la lechada. De esta manera se podrá obtener una estimación más precisa de la distribución de la adherencia en la interface bulbo-suelo.

A partir de los supuestos y la técnica de instrumentación utilizadas en el presente trabajo no fue posible monitorear de manera confiable las tensiones de adherencia bulbo-suelo para cargas cercanas a la falla. Es por esto que se recomienda, en futuros trabajos, instrumentar el anclaje utilizando sensores de cuerda vibrante (del tipo vibrating wire strainmeters para los cables y vibrating wire embedment gauges para la lechada), los cuales entregaron buenos resultados en los trabajos realizados por [4] y [14].

Para generar recomendaciones de diseño en base a los resultados obtenidos, estos deben ser complementados con una mayor cantidad de datos experimentales en arenas, siguiendo la metodología recomendada en esta investigación, variando los largos de bulbo y compacidad del terreno.

## 5 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Gerencia de Construcción de Ferrara, quienes colaboraron con el montaje de los ensayos e hicieron posible su ejecución. En especial nuestros agradecimientos van dirigidos a Jaime Chiuminatto (Gerente de Construcción) y Cristian Sánchez (Subgerente de Construcción).



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## 6 Referencias

- [1] Littlejohn, G. Design estimation of the ultimate load-holding capacity of ground anchors. *Ground Engineering*; 1980, Vol. 13, N°8, p. 25 – 39.
- [2] Bustamante M. Un método para el cálculo de los anclajes y los micropilotes inyectados. *Boletín de la Sociedad Española de Mecánica de Suelo y Cimentaciones*; 1986, p. 3 – 23.
- [3] Dirección General de Carreteras de España. Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera; 2001
- [4] Kim N. Performance of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; 2003, Vol. 129, N°12, p. 1138 – 1150.
- [5] Ostermayer H, Scheele F. Research on ground anchors in non-cohesive soils. *Revue Française de Géotechnique*; 1978, N°3, p. 92 – 97.
- [6] Fujita K, Ueda K, Kusabuka M. A method to predict the load-displacement relationship of ground anchors. *Revue Française de Géotechnique*; 1978, N°3, p. 58 – 62.
- [7] Barley A, Windsor C. Recent advances in ground anchor and grout reinforcement technology with reference to the development of the art. *ISRM International Symposium, Melbourne*; 2000.
- [8] Taiba O, Soto C. Ensayos de aptitud en anclajes postensados ejecutados en la grava de Santiago. *VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Santiago, Chile*; 2014.
- [9] Christiansen I, Meeder W. Evaluación del comportamiento de elementos mecánicos de estabilización en condición de servicio y rotura. *Memoria para optar al título de ingeniero civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*; 2017.
- [10] Baquedano F, Leyton F, Sepúlveda S. Frecuencia predominante de los suelos de Valparaíso-Viña del Mar y propuesta de microzonificación preliminar. *VII Congreso Chileno de Geotecnia, Concepción, Chile*; 2012.
- [11] ASTM A416 / A415M-17a. Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete. *ASTM International*; 2017.
- [12] NCh 3364: Geotecnia – Ensayo de Penetración Estándar. *Instituto Nacional de Normalización*; 2014.
- [13] Recomendaciones para el diseño, ejecución y control de anclajes inyectados y postensados en suelos y rocas. *Grupo de Desarrollo Tecnológico Cámara Chilena de la Construcción*; Octubre 2001.
- [14] Briaud JL, Powers W, Weatherby D. Should Grouted Anchors Have Short Tendon Bond Length?. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; 1998, 124, p. 110-119.