

Filosofía del ensaye y puesta en tensión de anclajes en suelo de acuerdo con la normatividad internacional

Rogelio MONROY^{a,1}, José GONZÁLEZ^a, Sergio VILLAR^a y Juan PAULÍN^a
^a Soletanche Bachy México (CIMESA)

Resumen. Los anclajes en suelo son elementos estructurales con una característica particular: su capacidad para soportar una carga y sostenerla sin pérdida apreciable en el tiempo debe verificarse individualmente mediante un ensaye antes de la puesta en servicio. Así se garantiza un buen funcionamiento a lo largo de su vida útil pese a las condiciones variables del suelo y los cambios en el procedimiento constructivo. Entre las normas existentes se destacan las europeas y las estadounidenses que, a pesar de sus diferencias, buscan alcanzar objetivos muy similares. Por ello, el seguimiento estricto de cualesquiera de ellas generalmente dará resultados confiables en la práctica.

Palabras Clave. Anclaje, ensayo, tensión, fluencia, carga última, carga crítica, normas.

1. Introducción

Los anclajes postensados en suelo forman parte importante de sistemas de retención o estabilización junto con muros estructurales en las excavaciones profundas con paredes verticales. Ayudan en el cumplimiento de los estados límite de falla y servicio al quedar firmemente sujetos fuera de la zona potencial de deslizamiento y ejercer una fuerza activa estabilizante que limita las deformaciones. Cada anclaje debe resistir estructural y geotécnicamente las acciones a las que se vea sometido durante su vida de servicio. La capacidad estructural se verifica usando una sección de acero tal que el esfuerzo de trabajo no rebase un porcentaje del límite elástico. El diseño geotécnico presenta mayores dificultades porque las propiedades mecánicas del suelo varían espacialmente. Más aún, las ecuaciones de la mecánica de suelos no son suficiente para determinar la capacidad al no tomar en cuenta el efecto del método constructivo. No obstante, dichos obstáculos pueden salvarse por medio de ensayos en anclajes representativos de los de proyecto, con base en alguna de las normas y recomendaciones de las que se hablará más adelante.

¹ Autor correspondiente, Cimentaciones Mexicana, S.A. de C.V., Av. Paseo de la Reforma 300 piso, C.P. 06600, Ciudad de México, México; E-mail: monroy.rogelio@cimesa.net.

2. Comportamiento ante la aplicación de carga

2.1. Carga última

Ante una fuerza de tensión un anclaje reacciona inicialmente con una deformación elástica del tendón sin que el bulbo sufra apenas deslizamiento. Conforme la fuerza aumenta, una longitud cada vez mayor del bulbo es movilizada. Si la fuerza continúa incrementándose llega un momento en que el conjunto desliza, lo que denominamos falla o carga última. En la práctica se manifiesta como una caída en la presión del manómetro del equipo de aplicación de carga o como la imposibilidad de incrementar la presión más allá del punto en que ocurrió la falla. Para garantizar que cada uno de los anclajes de proyecto soportará la carga de servicio sin fallar, las distintas normas y recomendaciones establecen la aplicación de cargas de prueba de entre 1.15 y 1.33 veces la carga de diseño.

2.2. Fluencia y carga crítica

La fluencia o “*creep*” de un anclaje en suelo es el deslizamiento del bulbo en dirección de la fuerza de tensión, función del tiempo. Los suelos cohesivos son más propensos a dicho fenómeno que los friccionantes. Sin embargo, en la naturaleza lo más común es encontrar terrenos heterogéneos. Por ello, se debe verificar en cada caso que la fluencia quede dentro los límites establecidos normativamente. Así se asegura que el anclaje mantendrá su carga durante el servicio. Lo anterior es de suma importancia porque la fluencia implica una disminución en la tensión del anclaje y la pérdida de su capacidad para ejercer una fuerza activa estabilizante. Cuando por un mal diseño o ejecución se pierde tensión durante el servicio, no es posible recuperarla retensado como muchas veces se pretende; ya que se ha comprobado por medio de anclajes instrumentados que a pesar de una recuperación inicial de la tensión el fenómeno reinicia nuevamente. La capacidad de carga solo puede recuperarse mediante reinyección en anclajes de Inyección Repetitiva Selectiva (IRS) o en su defecto construyendo un anclaje adicional para suplir la deficiencia. Para evitar que la fluencia cobre dimensiones que comprometan el funcionamiento del anclaje la carga de servicio debe ser menor que la “carga crítica”. Esta marca un límite para el comienzo de un deslizamiento progresivo que conduce a la falla. Todas las normas y recomendaciones establecen métodos para determinar la carga crítica o su equivalente en términos de una velocidad de deformación.

3. Efecto del procedimiento constructivo en la capacidad de carga

La capacidad de carga de un anclaje se relaciona directamente con el tipo de suelo; los friccionantes generan capacidades mucho mayores que los cohesivos. No obstante, se ve grandemente influida por el procedimiento constructivo, principalmente la presión de inyección. Entre los tipos de anclajes existentes (Littlejohn, 1979 [1]), los de “alta presión” dan las mayores capacidades de carga al sobrepasar la presión límite del suelo y fracturar el terreno; lo que resulta en un bulbo de grandes dimensiones, aunque de geometría difícil de determinar “a priori”. En estos casos la capacidad de carga se puede estimar de forma muy aproximada con una metodología que tome en cuenta el método constructivo (e.g Bustamante, 1985 [2]). En todo caso, para conocer con exactitud la capacidad y características de fluencia lo mejor es realizar un ensayo de investigación.

4. Tipos de ensayos

Existen tres tipos de ensayos (EN1537, 2013 [3]): Investigación, Adecuación y Aceptación (Tabla 1). Algunas normas como la DIN 4125 (1990) y la PTI (2014 [4]) presentan un cuarto tipo denominado “en servicio” o “levantamiento” (“*lift-off*”); se llevaba a cabo en anclajes ya en servicio con el fin de conocer la carga actuante. Los ensayos de investigación se hacen en anclajes representativos antes o durante la ejecución del proyecto para determinar las cargas última y crítica. Los de adecuación se efectúan en anclajes que forman o no parte del proyecto y no es necesario llevarlos a la falla. Sirven para verificar que el método de ejecución es adecuado para desarrollar la capacidad necesaria en el suelo del sitio. Las pruebas de aceptación se hacen a todos de los anclajes del proyecto para verificar el cumplimiento de los criterios establecidos por la norma de referencia antes del bloqueo de la carga y puesta en servicio.

Tabla 1. Denominación de los tipos de ensayos de acuerdo con las diferentes normas y recomendaciones

DIN 4125 (1990)	T.A. 95 (1995)	FHWA (1999)	EN 1537 (2013)	PTI DC35.1 (2014)	BS 8081 (2015)
Prueba	Ruptura	-	Investigación	Pre-producción	Investigación
Adecuación	Control	Desempeño	Adecuación	Desempeño	Adecuación
Aceptación	Recepción	Prueba	Aceptación	Prueba	Aceptación
En servicio	-	Levantamiento	-	Levantamiento	-

5. Métodos de prueba

5.1. Norma DIN 4125 (Alemania)[4]

Los ensayos de prueba y de adecuación en sitio consisten en la aplicación de cargas cíclicas incrementales hasta una carga de prueba que no exceda 0.9 del esfuerzo de fluencia del tendón (F_s). En cada máximo hay un tiempo de observación para medir la fluencia del bulbo (Figura 1a). En los anclajes permanentes se hacen 20 ciclos de carga y descarga adicionales. Hecho lo anterior, se descarga y se aplica una carga de bloqueo inicial. La carga crítica puede considerarse como el valor de la carga antes de aquella que presenta una velocidad de deformación de 2 mm/min. Los ensayos de aceptación se hacen con incrementos de carga continuos hasta 1.25 veces la carga de servicio (F_w) si es un anclaje temporal o 0.9 F_s si es permanente. La carga máxima se sostiene para un periodo de observación con el fin de medir la fluencia del bulbo (Figura 1b). Este tiempo se extiende si el desplazamiento entre 2 y 5 min excede de 0.20 mm (suelos no cohesivos) o 0.25 mm entre 5 y 10 min (suelos cohesivos). Si los resultados son satisfactorios se bloquea la carga. La curva carga-deformación debe quedar dentro de los límites definidos para la longitud libre aparente máxima y mínima.

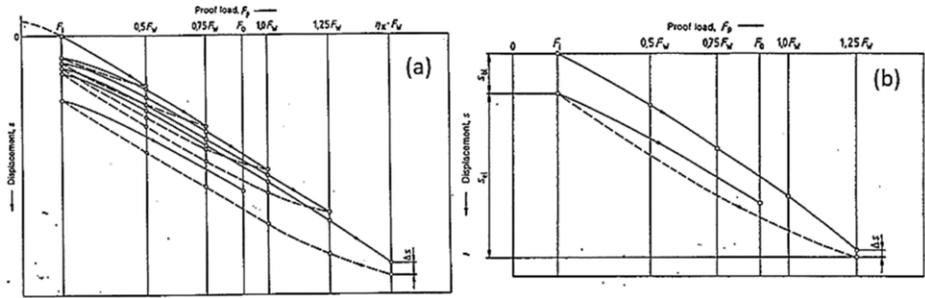


Figura 1. Métodos de prueba DIN 4125 (1990) [4]. “Prueba” y “Adecuación en sitio” (a); y “Aceptación” (b).

5.2. Recomendaciones T.A. 95 (Francia)[5]

Para los ensayos de ruptura se refiere a la norma (NF P94-153, 1993[6]). Se carga en escalones hasta un máximo de 0.9 del límite elástico del tendón (T_p). En cada escalón la carga se sostiene para medir la fluencia del bulbo (Figura 2a). Para cada uno de ellos se dibuja la curva tiempo-deformación en escala semilogarítmica y se calcula la velocidad de deformación (α). Los valores de α se grafican versus la carga aplicada para obtener una curva representativa del ensayo. En el cruce de las tangentes a dicha curva se ubica una carga llamada T'_c que al multiplicarse por 0.9 da la carga crítica (T_c) [Figura 2b]. Los ensayos de Control siguen una metodología similar, salvo que la carga de prueba (T_e) se limita para no llegar a la falla (Figura 3a) y se emplean menos escalones. Los ensayos de recepción se hacen con cargas incrementales hasta T_e cuyo valor esta entre 1.15 o 1.25 T_s (carga de servicio) dependiendo si es un anclaje temporal o permanente. Al llegar al máximo se mide la fluencia del bulbo (Figura 3b); si está dentro de los límites permisibles se disminuye a la carga inicial de bloqueo (T_b) que al descontarle las pérdidas da la carga residual (T_r). En este documento no se indica la obligatoriedad de hacer un ciclo en el caso de las pruebas de recepción, sin embargo, recomienda aplicar el “método de ciclo” (Fenoux, 1972 [7]) para conocer con mayor exactitud la carga residual.

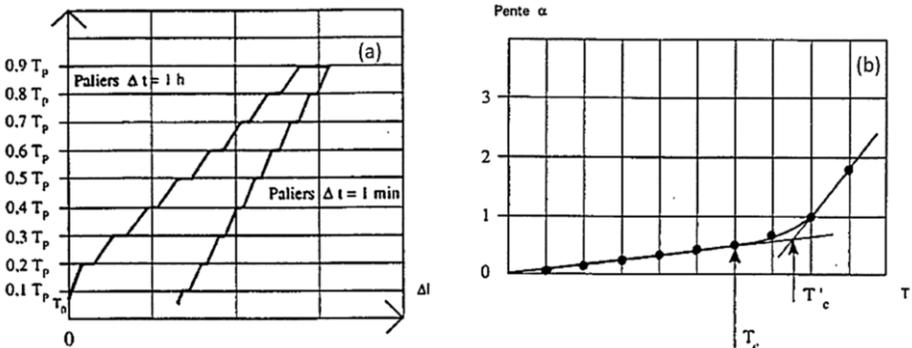


Figura 2. Ensayo de ruptura (a) y curva para determinación de carga crítica (b) según NF P94-153 (1993) [6].

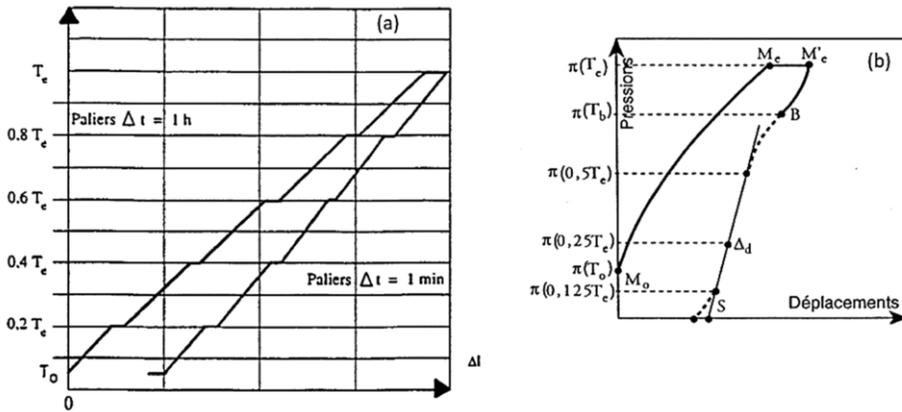


Figura 3. Ensayo de control según NF P94-153 [6] (a) y prueba de recepción (b) según T.A. 95 (1972) [5].

5.3. Circular FHWA-IF-099-015 (Estados Unidos)[8]

El método para las pruebas de desempeño consiste en ciclos incrementales de carga y descarga hasta 120% la carga de diseño (DL) en anclajes temporales y 133% en permanentes (Figura 4a). La carga máxima se sostiene para medir la fluencia hasta un máximo de 60 min. Si ésta es aceptable se bloquea una carga que puede estar entre 75 y 100% de DL. La carga crítica (T_c) puede determinarse graficando las pendientes finales (α) de las curvas tiempo-deformación obtenidas para cada incremento de carga versus la carga aplicada. El valor de T_c corresponde a la carga para la cual la curva muestra un quiebre pronunciado. Los ensayos de prueba se hacen en un ciclo sencillo hasta la misma carga de los ensayos de desempeño. La fluencia también se mide de acuerdo con lo establecido para dichos ensayos (Figura 4b). Cuando el suelo donde queda alojado el bulbo tiene un índice de plasticidad mayor de 20% o un límite líquido mayor de 50% se debe llevar a cabo una prueba de “creep” extendida. Para cada incremento se grafica la deformación en función del logaritmo del tiempo.

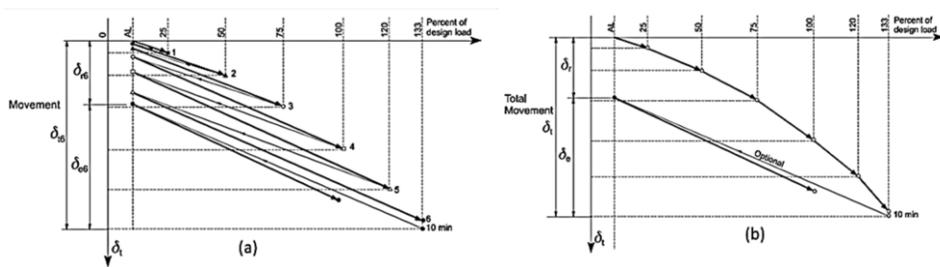


Figura 4. Ensayo de desempeño (a) y aceptación (b) según FHWA (1999) [8].

5.4. Norma EN 1537 (Unión Europea) [3]

Contempla el uso de uno de tres métodos de prueba definidos en prEN ISO 22477-5 (2012) [9]. Método 1. Los ensayos de “Investigación” (Figura 5a) se lleva hasta una carga de prueba (P_m) diseñada para lograr la falla, sin exceder 0.8 de la resistencia característica del tendón (P_{tk}). En cada máximo se sostiene la carga para medir la fluencia del bulbo.

Se considera que se ha alcanzado la falla cuando la velocidad de deformación llega a 2 mm/min. Los ensayos de adecuación (Figura 5b) son similares a los anteriores, excepto que el valor de P_m se limita para no llegar a la falla. También se verifica que la fluencia del bulbo no exceda de 2 mm/min. Las pruebas de aceptación (Figura 5c) consisten en un ciclo de carga incremental con sostenimiento en la carga máxima para un periodo de observación en el que la fluencia no debe exceder 0.20 mm en suelos no cohesivos o 0.25 en suelos cohesivos. De ser necesario un periodo de observación extendido ahora se verificará que la pendiente de la curva tiempo-deformación (α_1) no exceda 2 mm/min.

Método 2. Los ensayos de investigación (Figura 6a) también se llevan hasta una carga de prueba diseñada para lograr la falla, pero sin exceder $0.8 P_{tk}$. En cada máximo se sostiene la carga para medir la pérdida por fluencia. Los ensayos de adecuación (Figura 6b) son similares a los anteriores, excepto que ahora la carga de prueba se limita para no llegar a la falla y también se mide la pérdida por fluencia. A partir de las pruebas anteriores se puede determinar la carga crítica. Para ello se determina primero el valor P'_c que corresponde al punto de la curva donde el porcentaje de pérdida (k_1) es igual a 1% y este valor se multiplica por 0.9 para obtenerla carga crítica (P_c). Las pruebas de aceptación (Figura 5c) consisten en dos ciclos de carga para llegar a la carga de prueba, con un periodo de observación para medir la pérdida por fluencia. Una vez concluido se baja a $0.80 P_p$ para un segundo periodo de observación que puede extenderse hasta que la velocidad de deformación sea aceptable.

Método 3. Los ensayos de investigación (Figura 6a) se llevan hasta una carga de prueba (P_p) diseñada para llegar a la falla, sin exceder $0.8 P_{tk}$. En cada máximo se sostiene la carga para medir la fluencia. Para cada escalón se dibuja una curva tiempo-deformación y para cada una de éstas se calcula la velocidad de deformación (α). Con los valores de α y las cargas correspondientes se dibuja una curva, en cuyo cruce de tangentes se encuentra un valor denominado P'_c que al multiplicarse por 0.9 da el valor de la carga crítica (P_c). Los ensayos de adecuación (Figura 6b) son similares a los anteriores, excepto que ahora P_p se limita para no llegar a la falla y se emplean menos escalones. Las pruebas de aceptación se llevan hasta una carga P_p que no debe exceder P_c . En la carga máxima se mide la fluencia cuyos límites están en función de la preexistencia de pruebas de investigación. Cuando las hay el valor de α_3 puede ser hasta 1.5 o 1.8 mm para anclajes permanentes y temporales respectivamente, y cuando no 1.2 mm en cualquier caso. Después de la prueba de fluencia puede o no hacerse un ciclo parcial o total antes de bloquear la carga.

Para cualquiera de los métodos descritos debe verificarse que la longitud libre quede dentro de los límites siguientes: mínimo 0.8 longitud tendón + longitud tensado, y máximo longitud tensado + longitud tendón + 0.5 longitud bulbo.

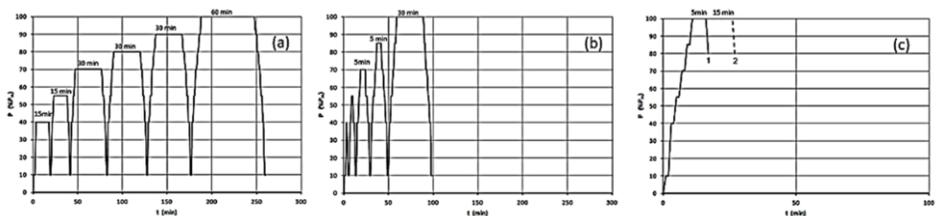


Figura 5. Método 1 (prEN ISO 22477-5, 2012) [9]. Investigación (a), Adecuación (b) y Aceptación (c).

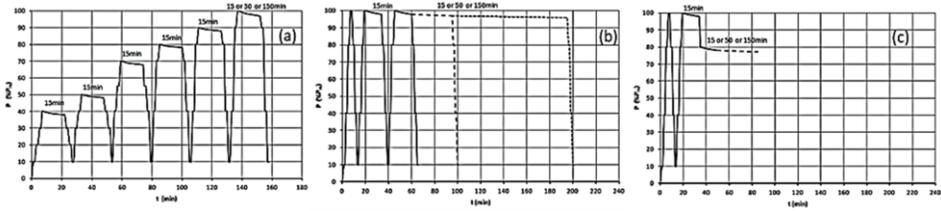


Figura 6. Método 2 (prEN ISO 22477-5, 2012) [9]. Investigación (a), Adecuación (b) y Aceptación (c).

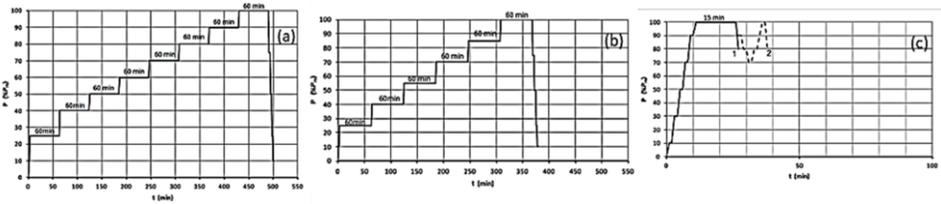


Figura 7. Método 3 (prEN ISO 22477-5, 2012) [9]. Investigación (a), Adecuación (b) y Aceptación (c)..

5.5. Recomendaciones PTI DC35-1 (Estados Unidos) [10]

El método de prueba para los ensayos de pre-producción y de desempeño consiste en ciclos incrementales de carga y descarga hasta llegar a 1.33 DL sin exceder 0.80 del límite elástico (F_{pu}) [Figura 4a]. A continuación, la carga de prueba se mantiene para medir la fluencia que no debe exceder 1 mm en 10 min; de lo contrario se continúa la prueba hasta los 60 min. No se indica cual es el criterio para este tiempo de medición adicional, pero podría usarse el criterio de la prueba de “creep” extendido que se describe más adelante. La curva carga deformación obtenida sirve para verificar que ésta se encuentre dentro de los límites establecidos para la longitud libre, a saber, mínimo 0.80 longitud libre y máximo la longitud libre más 50% de la longitud del bulbo. Si se juzgan satisfactorios los resultados se bloquea la carga. Los ensayos de “prueba” se realizan incrementando continuamente la carga hasta llegar a 1.33 DL (Figura 4b). Ahí se tienen un periodo de observación para medir la fluencia con el mismo criterio descrito anteriormente. También se verifica que la longitud libre esté dentro de los límites mencionados anteriormente. Si la prueba se juzga satisfactoria se hace el bloqueo de la carga. Cuando las anclas se construyen en un suelo con un IP mayor a 20 se deben hacer al menos dos pruebas de “creep” extendido. Consisten en hacer un solo ciclo de carga incremental y sosteniendo la carga en cada uno para medir la fluencia. Para cada periodo de observación se dibuja una curva tiempo-desplazamiento en escala semilogarítmica y la fluencia no debe exceder de 2 mm por ciclo logarítmico.

5.6. Norma BS 8081:2015 (Inglaterra) [11]

Las pruebas de investigación se hacen con ciclos de carga incrementales hasta una carga de prueba (P_p) que no debe superar 0.8 f_{pk} . En cada máximo la carga se sostiene para medir la fluencia (Figura 8a). Las pruebas de conformidad se efectúan llevando a cabo menos ciclos hasta alcanzar la carga de prueba establecida (P_p) [Figura 8b]. La fluencia se verifica ahora a la carga de servicio ($F_{serv;k}$). El método para la prueba de aceptación consiste en efectuar dos ciclos de carga-descarga (Figura 8c). Concluido lo anterior se carga hasta $F_{serv;k}$ con el fin de llevar a cabo la prueba de fluencia. A partir de la

publicación de la norma BS EN ISO 22477-5 [9] los métodos de prueba antes descritos deberán ajustarse para corresponder con el método 2 de la norma EN 1537 (2013) [3].

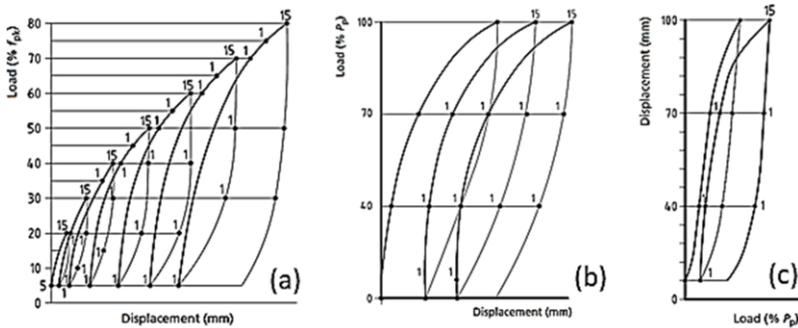


Figura 8. Métodos de prueba (BS 8081, 2015) [11]: Investigación (a), Conformidad (b) y aceptación (c).

6. Conclusiones

Todos los anclajes de proyecto deben ensayarse con alguna de las metodologías descritas anteriormente para garantizar que soportarán la carga de trabajo en condiciones de seguridad y que la mantendrán sin pérdida apreciable en su vida útil.

En ninguno caso se debe exceder el límite elástico del tendón para que las deformaciones plásticas del acero no se confundan las del bulbo dificultando la interpretación de la fluencia.

El procedimiento constructivo -principalmente la presión de inyección- influye directamente en la capacidad de carga. De haber algún cambio debe hacerse un ensayo de adecuación para asegurar que el anclaje continuará cumpliendo con las expectativas de capacidad de carga y fluencia.

Conocer la carga crítica permite saber con exactitud el valor de la carga que no debe rebasarse a fin de que el fenómeno de fluencia no se desarrolle a tal grado que el anclaje pierda su tensión y capacidad de ejercer una fuerza activa.

Referencias

- [1] Littlejohn G. S. (1979), « Design estimation of the load holding capacity of ground anchors », Symposium on prestressed ground anchors, Concrete society, Johannesburg, South Africa.
- [2] Bustamente M (1985), « Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés »
- [3] NF EN 1537 (2013), European standard, « Execution of geotechnical special Works – Ground anchors ».
- [4] DIN 4125 (1990)=, « Ground anchorages design construction and testing », Deutsche norm
- [5] T.A.95 (1995), « Tirants d’ancrage recommandations concernant la conception, le calcul, l’execution et le contrôle », Comité français de la mécanique de sols et des travaux de fondations
- [6] NF P 94-153 (1993), « Essai statique de tirant d’ancrage », sols : reconnaissance et essais, norme française
- [7] Fenoux (1972), « La mise en précontrainte de tirants », Travaux, Vol. 54, No. 449/450, páginas 33-43
- [8] FHWA-IF-99-015 (1999), « Geotechnical engineering circular 4. Ground anchors and anchored systems », U.S. Department of transportation, Federal highway administration
- [9] prEN ISO 22477-5 (2012), « Geotechnical investigation and testing » Testing of pre-stressed anchors
- [10] PTI DC35.1-14 (2014), « Recomendations for prestressed rock and soil anchors », PTI
- [11] BS 8081 (2015), « Code of practice for grouted anchors », BSI Standards publication