

Caracterización de Mezclas Cementicias para Micropilotes

Daniel Bascoy¹; Fabio Gebert¹; Juan Domínguez Rubén¹; Marcelo Masckauchan¹; Maaian Brzostowski¹

1 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Civil. Mozart 2300 (C1407) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

bascoy@frba.utn.edu.ar

Recibido el 6 de julio de 2024, aprobado el 29 de julio de 2024

Resumen

Los micropilotes son estructuras de fundación indirectas de pequeño diámetro cuyo cuerpo está constituido por una pasta o mortero de cemento. En la mayoría de las aplicaciones el cuerpo del micropilote se moldea en dos etapas: una primaria al momento de efectuar la perforación misma (de carácter estructural) y una secundaria a las pocas horas (de carácter geotécnico, ejecutada en fase única o en varias fases). En ambos casos las mezclas son colocadas por inyección a presión. El objeto de este estudio es conocer el comportamiento en etapa de inyección y resistente de las mezclas que se utilizan para conformar los micropilotes, tanto las de moldeo primario como secundario. De las composiciones posibles de esas mezclas, este trabajo se circunscribe a aquellas que son más corrientemente utilizadas en la práctica: pastas de cemento con distintas relaciones agua/cemento, sin agregados ni aditivos fluidificantes. La metodología del estudio se basó en lo establecido para mezclas de inyección de vainas para estructuras de hormigón postesado, adaptándola al caso en estudio. Los resultados obtenidos aportan al conocimiento de la selección de las mezclas para el diseño estructural de micropilotes y para el control de ejecución de las mezclas con que se los construye, optimizando el uso racional de los materiales constituyentes sin merma en la seguridad de la estructura.

PALABRAS CLAVE: MICROPILOTES - PASTAS DE CEMENTO - COMPORTAMIENTO REOLÓGICO RESISTENTE - DISEÑO

Abstract

Micropiles are indirect foundation structures of small diameter whose body is made of a cement paste or mortar. In most applications the body of the micropile is moulded in two stages: a primary one at the time of drilling (of a structural nature) and a secondary one a few hours later (of a geotechnical nature, executed in a single phase or in several phases). In both cases the mixtures are placed by injection under pressure. The object of this study is to know the behaviour in the injection and resistance stage of the mixtures used to form the micropiles, both those of primary and secondary moulding. Of the possible compositions of these mixtures, this work is limited to those that are most currently used in practice: cement pastes with different water/cement ratios, without aggregates or water-reducing admixtures. The methodology of the study was based on that established for injection mixtures of sheaths for post-reinforced concrete structures, adapting it to the case under study. The results obtained contribute to the knowledge of the selection of mixtures for the structural design of micropiles and for the control of the execution of the mixtures with which they are built, optimizing the rational use of the constituent materials without compromising the safety of the structure.

KEYWORDS: MICROPILES - CEMENT PASTES - RHEOLOGICAL STRENGTH BEHAVIOR - DESIGN

Introducción

Las mezclas que se utilizan para el conformado de micropilotes, tanto en su fase primaria (moldeo del cuerpo) como fase secundaria (inyección a través de la primaria), requieren cumplir con ciertas propiedades en estado fresco (para moldeo y/o inyección) y en estado endurecido (resistencia, a los fines de la capacidad estructural del micropilote al ser sometidos a las acciones estructurales para lo cual se los construye).

El conocimiento actual del problema, en cuanto al comportamiento resistente y de moldeo de pastas cementicias, está avanzado en aquellas mezclas destinadas a la inyección de vainas de estructuras de hormigón postesado ya que se encuentra ampliamente difundido y normalizado (CIRSOC 201-1996 y CIRSOC 201-2005). Sin embargo, no es tan amplio con relación al comportamiento requerido a las mezclas que se utilizan en el conformado de los micropilotes. No está normalizada la metodología de la dosificación de estas mezclas y sólo muy escuetamente especificado el control de calidad de su ejecución.

A falta de reglamentos de diseño y control de estas mezclas con fin específico, la construcción de micropilotes ha avanzado basándose en el análisis del comportamiento experimental de mezclas obtenidas en obras ejecutadas.

Esa interpretación, sumado a la extrapolación de ensayos efectuados para mezclas similares con destino a la inyección de vainas de piezas de hormigón postesado (o bajo la normativa aplicable a ese caso), han dado patrones y ámbitos de comportamiento no verificados específicamente, tal como se establece al respecto en la Guía del Ministerio de Fomento de España. En esa Guía se especifica un valor requerido mínimo de resistencia de 25 MPa a los 28 días y una resistencia a 7 días no menor al 60% de la de 28 días (15 MPa).

Existen pocos trabajos internacionales publicados con estudios de laboratorio y ensayos del comportamiento de mezclas destinadas a conformar micropilotes (ejemplo Hernández del Pozo y otros) y ninguno con materiales disponibles en Argentina, aunque se dispone de alguna información aislada con datos publicados obtenidos de la experiencia en obras (Consejo Profesional de Ingeniería Civil).

La relevancia del problema es que al disponerse de un patrón de diseño para su uso en micropilotes, basado en ensayos específicos con ese fin, el extrapolar los resultados del comportamiento de mezclas para inyección de vainas de hormigón postesado, cuyos requisitos de comportamiento resistente y de moldeo son distintos a los de las mezclas para micropilotes, ha llevado al diseño de mezclas no económicas y en algunos casos tampoco adecuados.

Objetivos de la investigación

El objetivo principal de este trabajo es determinar el comportamiento resistente y en estado fresco de mezclas cementicias en las proporciones y con los constituyentes que se utilizan en forma corriente en la ejecución de micropilotes en obras.

Un segundo objetivo se centra en el hecho de que las actuales mezclas en uso han surgido como extrapolación de recomendaciones extranjeras y experiencias acumulativas de los propios ejecutantes, pero no cuentan con un sustento razonable que permita optimizarlas basándose en ensayo de laboratorio utilizando materiales disponibles en el ámbito local. Es mas, en pocas ocasiones se conoce el real comportamiento que esas mezclas tienen en los micropilotes construidos.

Para alcanzar esos objetivos se analizaron mezclas desde las más resistentes y muy consistentes hasta las muy fluidas y menos resistentes, pero todas ellas dentro del espectro de las que se utilizan habitualmente, (Ministerio de Fomento España y Consejo Profesional

de Ingeniería Civil) considerando para ello como variable a la reconocida relación agua/cemento en peso de cada tipo de mezcla.

En el presente, no se cuenta con un procedimiento de diseño ni curvas aplicables a materiales constituyentes de producción nacional que permitan optimizar las proporciones de los materiales constituyentes a utilizar en cada mezcla, con relación al comportamiento requerido para cada caso de micropilote específico, situación a la que este estudio aporta información relevante.

Descripción de la metodología aplicada

El problema planteado se estudió experimentalmente con siete distintos ensayos realizados en cada mezcla para evaluar el impacto de la variable adoptada en la dosificación de las pastas y su comportamiento en estado fresco y endurecido.

Las pastas estudiadas en su este trabajo (mezclas de agua y cemento, sin aditivos) abarcaron el rango de su uso habitual en la construcción de micropilotes que incluyen valores de razón agua-cemento en peso entre 0,40 y 0,55. (Ministerio de Fomento de España y Consejo Profesional de Ingeniería Civil)

Los materiales constituyentes utilizados se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalle de las materias primas utilizadas

Material	Origen	Características	Especificación
CPN50	Producción Argentina. Fábrica L'Amalí LOMA NEGRA	Blaine = 440 m ² /kg Comp. 28D = 55 MPa	IRAM 50000-24
Agua	Red Pública Potable	----	IRAM 1601-12

Los equipos y dispositivos empleados incluyeron lo necesario para ejecutar la serie de ensayos de caracterización de cada pasta en estado fresco (fluidez a distintos intervalos luego del mezclado y exudación total) y en estado endurecido (resistencia a compresión y resistencia a tracción por flexión, ambas a distintas edades) según el plan definido.

Los procedimientos utilizados en la ejecución de los ensayos de laboratorio siguieron los lineamientos establecidos en las normas IRAM aplicables y lo definido en los reglamentos CIRSOC 201-1996 y CIRSOC 201-2005 para mezclas de inyección.

En cuanto a la fabricación de las pastas, se buscó establecer un método de mezclado eficiente de los materiales, basándose en antecedentes de estudios en el laboratorio y en la disponibilidad de equipos. Al efecto se adoptó el método establecido en la norma IRAM 1622 para elaborar morteros de cemento para su control de calidad y certificación de partidas.

Las especificaciones de los procedimientos de los ensayos realizados se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Listado de ensayos realizados

Ensayo	Especificación
Mezclado - Moldeo - Compactación - Curado	IRAM 1622-06
Fluidez Cono de Marsh	Ap. 27.8.1 CIRSOC 201-1996
Exudación	Ap. 23.13. CIRSOC 201-2005
Rotura a Compresión	IRAM 1622-06

En la Figura 1 se muestra el cono de Marsh utilizado en la evaluación de la fluidez de las pastas en estado fresco de moldeo.

La elaboración de las mezclas y los ensayos en estado fresco y endurecido se realizaron en el ambiente controlado de laboratorio.

El curado de las probetas para ensayos de resistencia se efectuó según lo establecido al respecto por la norma IRAM 1622 hasta la edad de prueba.

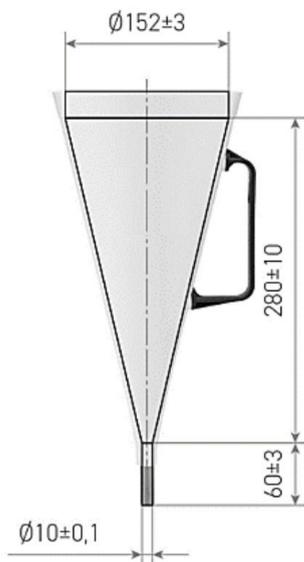


Fig. 1. Cono de Marsh

Resultados obtenidos

Se incluyen en las Tablas 3 y 4 los resultados de ensayos realizados, tanto de comportamiento en estado fresco resistente como de las mezclas estudiadas. Los valores consignados son el promedio de los obtenidos para cada tipo de mezcla de distinta relación agua/cemento.

La representación gráfica de los resultados de resistencia se efectuó para la variable principal (relación agua/cemento) en todos los casos, más la edad como variable secundaria en cuanto a resistencia a compresión y para la evaluación de la fluidez el tiempo transcurrido desde el mezclado. En el caso de la exudación solo se determinó la exudación total alcanzado al cabo de 24 hs del mezclado de la pasta y la condición del agua reabsorbida al finalizar ese periodo.

Esos gráficos se incluyen las Figuras 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3. Resultados de ensayos de Fluidez y Exudación de pastas cementicias

Relación a/c	Ensayo de fluidez		Ensayo de exudación	
	Tiempo de ensayo [min]	Tiempo de escurrimiento en cono [s]	Exudación [%]	Reabsorbe
0,40	0	Mezcla viscosa, no pasa por el cono	0,76%	Si
	15			
	30			

0,40	0	36,5	No se realizó exudación	
	15	Mezcla viscosa, no pasa por el cono		
	30			
0,45	0	15,7	2,33%	Si
	15	21,5		
	30	32,1		
0,50	0	13,9	3,08%	Si
	15	16,6		
	30	17,2		
0,55	0	10,2	3,08%	Si
	15	11,6		
	30	11,8		

Tabla 4. Resultados de ensayos de Resistencia a Compresión de pastas cementicias

Relación a/c	Edad [días]	f'c [MPa]
0,40	7	33,3
0,40	28	45,2
0,45	7	25,5
0,45	28	34,4
0,50	7	22,9
0,50	28	31,6
0,55	7	21,7
0,55	28	25,3

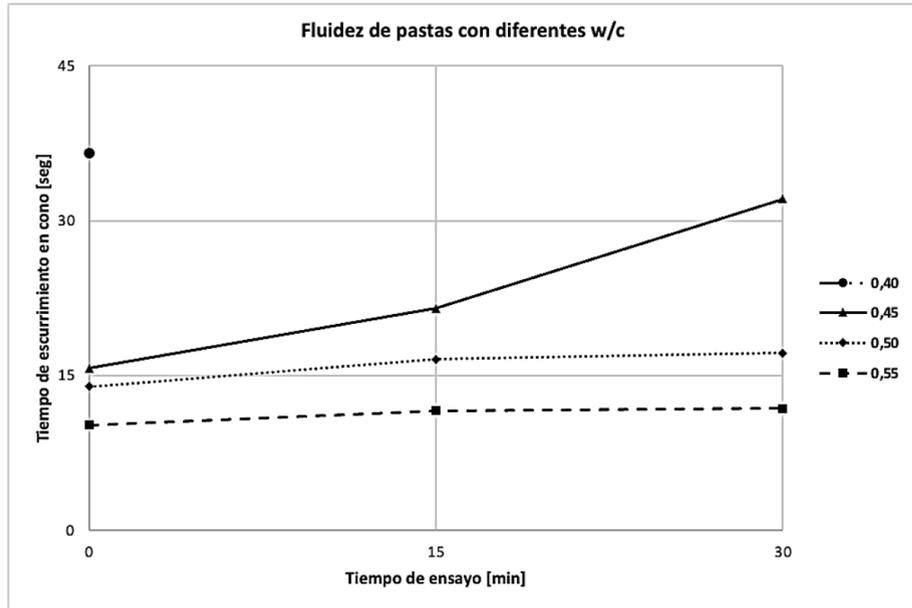


Fig. 2. Fluidez en Cono de Marsh para pastas cementicias con diferentes relaciones agua/cemento (w/c)

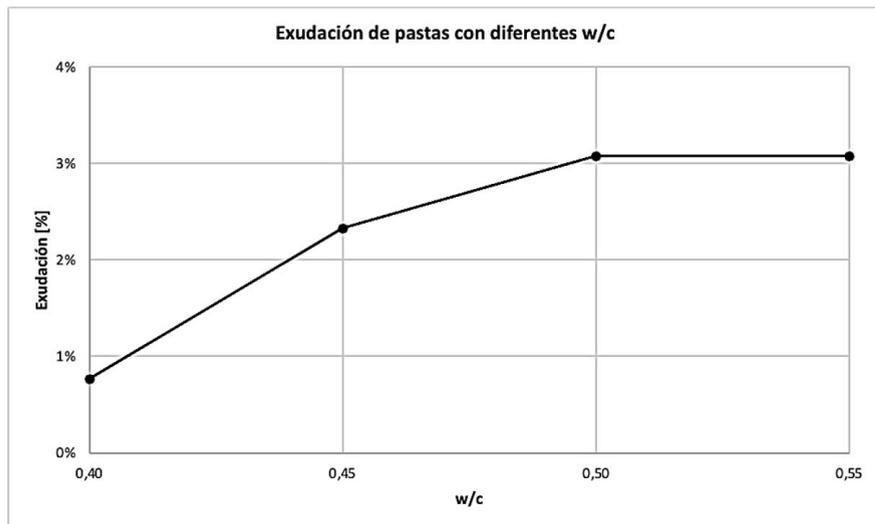


Fig 3. Exudación total a 24 h para pastas cementicias con diferentes relaciones agua/cemento (w/c)

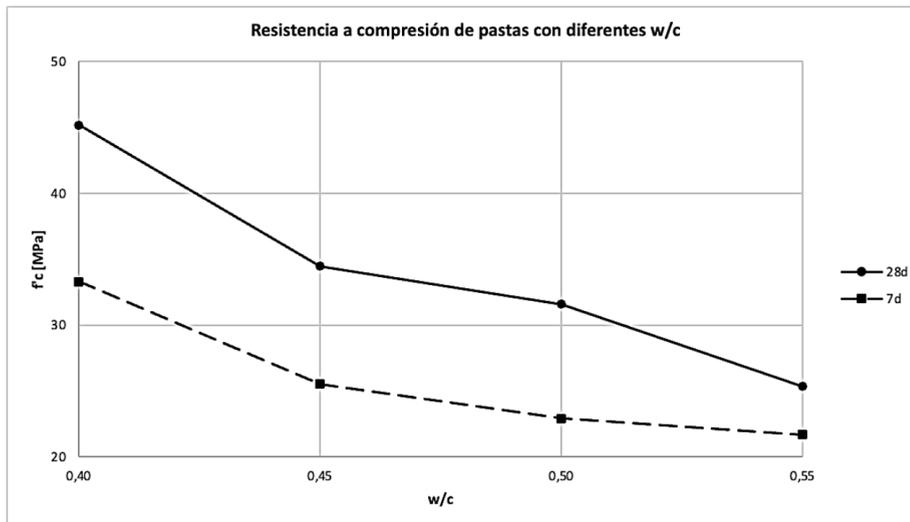


Fig 4. Resistencia a Compresión para pastas cementicias con diferentes relaciones agua/cemento (w/c)

La adopción de edades de ensayo de resistencia a compresión de 7 y 28 días, más allá de ser las habituales en el estudio de mezclas en base a cemento portland, para el caso de micropilotes resultan edades representativas para las mezclas de inyección en fase primaria como resistencia a edad temprana a los 7 días (de importancia para los micropilotes que se utilizan como anclajes) y de mediano y largo plazo con la resistencia a los 28 días (para los micropilotes que se utilizan como elementos de fundación).

Discusión de resultados

Resistencia

La Resistencia a compresión obtenida en las mezclas resultó coherente con lo esperado: la resistencia aumentó con la disminución de relación agua/cemento para igual edad de ensayo y también aumentó con la edad de la mezcla para igual relación agua/cemento.

En las experiencias se verificó que todas las mezclas cumplen con los requisitos de resistencia mínima de valor absoluto a los 28 días de edad y de valor relativo a los 7 días de edad, especificados por la Guía Ministerio de Fomento de España.

Respecto del único valor de resistencia informado con materiales locales, si bien sin especificar el tipo de cemento utilizado ni la edad de ensayo (Consejo Profesional de Ingeniería Civil -CPIC-, resistencia de 22 MPa para mezcla de relación agua-cemento 0,50) sería congruente con el obtenido en este estudio a la edad de ensayo de 7 días y del orden del 70% de la obtenida a 28 días para igual relación agua/cemento.

Fluidez

A falta de especificación de límites de fluidez mínimos y/o máximos para permitir la inyección de mezclas para micropilotes, en este estudio se considera como referencia lo establecido por el CIRSOC 201-1996 ya que la determina con el Cono de Marsh, igual al utilizado en estas experiencias. Para esa especificación el tiempo de escurrimiento de la mezcla debe estar comprendido entre 13 y 25 segundos.

Los valores de fluidez obtenidos en los ensayos muestran que mezclas de relación agua/

cemento 0,40 no son aptas de colocar sin el uso de aditivos y que el resto de las mezclas (con razón agua/cemento igual o superior a 0,45) tienen tiempos de escurrimientos entre 10 y 16 segundos aptos para su inyección.

Sin embargo, como las mezclas no se inyectan inmediatamente de elaboradas toma importancia la reducción de fluidez con el tiempo transcurrido desde su mezclado. En ese sentido, no hay especificación límite superior de fluidez, pero considerando el máximo de 25 segundos establecido por el CIRSOC 201-1996 (aunque es para el caso de colocación en vainas) las mezclas de relación agua/cemento de 0,50 y 0,55 resultan inyectables aún a los 30 minutos después del mezclado, no así en la de 0,45 que para usarse en inyección secundaria debería incluir un aditivo fluidificante.

Exudación

Respecto de la exudación de las mezclas, como evaluación de su estabilidad en estado fresco, los valores obtenidos experimentalmente para las mezclas de relación agua/cemento igual o menores a 0,45 cumplen holgadamente con el requisito de CIRSOC 201-2005 (máxima exudación 3% y reabsorción total del agua exudada a las 24 horas).

En cuanto a las mezclas más fluidas, con relación agua/cemento igual o superior a 0,50 se cumple con la reabsorción total de agua al cabo de 24 horas, pero con resultados de exudación total levemente superiores al límite de 3% (con una diferencia no superior al 3%).

La especificación de exudación del CIRSOC 201-2005, es para mezclas contenidas dentro de vainas, no siendo así el caso de las mezclas para micropilotes. Particularmente, en las mezclas de segunda inyección para las que se utilizan las pastas con mayores relaciones agua/cemento, esa posible agua excedente es absorbida por el suelo circundante por lo que puede considerarse que las mezclas resultan adecuadas para el uso previsto.

Como dato experimental importante debe señalarse que, en todas las mezclas, el agua exudada fue reabsorbida en su totalidad al cabo de 24 horas (requisito CIRSOC 201-2005), aun sin incluir aditivos a ese efecto.

Conclusiones

En función de los ensayos realizados y del análisis desarrollado en las secciones precedentes, para el rango de mezclas estudiadas (pastas sin aditivos con relaciones agua/cemento entre 0,40 y 0,55, utilizando cemento portland normal según IRAM 50.000) se emiten las siguientes conclusiones:

- a) Resistencia: todas las mezclas alcanzan valores que cumplen con lo especificado por la Guía del Ministerio de Fomento de España, tanto a 28 como a 7 días de edad (mínimos de 25 MPa y 15 MPa respectivamente) por lo que resultan aptas para el uso en todo el rango estudiado. En cada proyecto deberá adoptarse la relación mínima necesaria agua/cemento de la pasta a utilizar como inyección primaria, ya que su carácter estructural está definida por la resistencia mínima que se establezca por requerimiento estructural en cada caso.
- b) Fluidez en estado fresco: Todas las mezclas resultan moldeables por inyección cuando la relación agua/cemento es igual o superior a 0,45, aunque sólo las con un mínimo de 0,50 relación agua/cemento serían inyectables cuando la operación se demora 30 minutos desde el fin del mezclado.
- c) Exudación: en todas las mezclas la exudación a 24 horas no resultó mayor que la especificada para el caso de mezclas para inyección de vainas y con reabsorción total del agua a las 24 horas por lo que en el rango de las composiciones estudiadas todas resultan conformes en ese aspecto.

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo desean expresar su agradecimiento al Centro Técnico Loma Negra por el préstamo de equipos de ensayo, a la empresa Loma Negra por la provisión de cemento certificado para la realización de los pastones, al personal del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil, a la Ingeniera Civil Lorena Godoy por su apoyo a las tareas de laboratorio y particularmente a los estudiantes becarios Lucía Alonso y Tomás Velázquez Reyes por su participación y dedicación en la ejecución de los ensayos. Todos ellos fueron fundamentales para el éxito de este proyecto de investigación.

Referencias

- Consejo Profesional de Ingeniería Civil (CPIC), Buenos Aires, (2016). “Anclajes de tracción – Aspectos fundamentales de la ley 4.580” – Modulo 1: “Fundamentos Teóricos de los anclajes” – Leoni A. J. Páginas 46 a 52. “Determinación de las tensiones en la estructura resistente del anclaje”.
- HERNÁNDEZ DEL POZO, J. C.; OCETE RUIZ, I.; HERNÁNDEZ GARVAYO, J. C. y LAMAS FERNÁNDEZ, F., (s/f). “Micropilotes inyectados. Técnica y Calculo” – España. Capítulo 2: “Fundamento Técnico”. 2.3: “Clasificación de micropilotes”. 2.3.3: “Clasificación basada en procedimiento de la inyección: Inyección repetitiva y selectiva e inyección global unificada”. Páginas 24 y 25. Capítulo 3: “Métodos de cálculo para micropilotes”. 3.2.: “Resistencia del micropilote”. 3.2.a: “Resistencia estructural”. Páginas 57 y 58.
- HERNÁNDEZ DEL POZO, J. C.; OCETE RUIZ, I.; HERNÁNDEZ GARVAYO, J. C. y RUBIO GARCÍA F., (s/f). “El Control de Calidad en las Obras con Micropilotes Inyectados. Parámetros de cálculo en suelos Alpujárrides” – España. Inciso 3: “Control de Calidad aplicado a materiales”. 3.2: “Control de la lechada”. Páginas 3 a 6; Inciso 6: “Conclusiones”. Página 12.
- Ministerio de Fomento de España, (2005). Secretaria de Estado de Infraestructuras y Planificación – Dirección general de Carreteras – “Guía para el Proyecto y la Ejecución de Micropilotes en Obras de Carretera” – Capítulo 2: “Materiales y Productos”. 2.2: “Lechadas y Morteros de Cemento”. Páginas 14 y 15.
- Norma Brasileira ABNT, NBR 5629, (2016). “Execução de Tirantes ancorados no terreno” - Associação Brasileira De Normas Técnicas, Brasil, (2016). Capítulo 5: “Execução”. 5.6: “Injeção”. 5.6.5: “Calda”. Página 11.
- Norma Brasileira ABNT, NBR 7681, (1983). “Calda de cimiento para injeção” - Associação Brasileira De Normas Técnicas, Brasil, (1983). Inciso 4: “Condições gerais”. Página 2; Inciso 5: “Condições específicas”. Página 3.
- Reglamento CIRSOC 201-1996 (1996). “Proyecto, Calculo y ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado para Obras Privadas Municipales” – INTI-CIRSOC, Buenos Aires, (1996). Capítulo 27 – “Hormigón Pretensado. Inyección de Vainas”. Páginas 327 a 337.
- Reglamento CIRSOC 201-2005, (2005). “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón” – INTI-CIRSOC, Buenos Aires, (2005). Capítulo 23 – “Hormigón Pretensado. Inyección de Vainas”. Páginas 449 a 470.
- ROJAS SOLANO, C. M., (2017), “Análisis y correlación entre pruebas de carga sobre micropilotes y tres metodologías usadas para calcular capacidad de carga axial a compresión” – Tesis de Maestría. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (2017). Capítulo 2: “Marco teórico y antecedentes”. 2.2: “Micropilotes”. Página 17.
- U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institution. Publication No. FHWA NHI-05-039, “Micropile Design and Construction” – Estados Unidos, (2005). Capítulo 4: “Construction techniques and materials”. 4.3: “Grouting”. Páginas 4-14 y 4-15.