

REDUCCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS ARCILLOSOS DESPUÉS DE INYECTAR RESINA EXPANSIVA DE POLIURETANO

PERMEABILITY REDUCTION OF CLAYEY SOILS AFTER INJECTIONS OF EXPANDING POLYURETHANE RESIN

Nicolas FAURE¹, Virgile ORSETTI²

¹ URETEK France, Serris, Francia

² ESIRIS Ingénierie, Saint-Pierre-du-Perray, Francia

RESUMEN – Con el fin de concretar los efectos de las inyecciones de resina expansiva de poliuretano sobre la permeabilidad de los suelos arcillosos, hemos llevado a cabo un trabajo experimental. En el seno de los terrenos de asentamiento de una estructura provisional de hormigón cargado con 0,1 MPa, se han efectuado ensayos in situ y en laboratorio antes y después de las inyecciones de resina expansiva de poliuretano.

ABSTRACT – In order to clarify the effects of expansive polyurethane resin injections on clayey soils permeability, an experimental site was performed. Within the soils under foundations of a temporary concrete structure loaded to 0,1 MPa, in situ tests as well as laboratory tests were carried out before and after injections of expansive polyurethane resin.

1. Introducción

Desde hace algunos años, hemos visto como han aparecido, en el mercado de las cimentaciones, nuevos procedimientos que proponen una alternativa más o menos interesante en relación con las soluciones tradicionales. Algunas de estas soluciones, como las inyecciones de resina expansiva, tienen la capacidad de limitar los riesgos de movimientos de terreno en suelos arcillosos sensibles al fenómeno de hundimiento/hinchamiento.

El principio o fundamento de esta técnica, consiste en reducir la porosidad eficaz (poros y fisuras interconectadas) del suelo inyectando a poca presión resina de poliuretano con mucho poder expansivo. Bajo el efecto del hinchamiento de la resina, el suelo se comprime, densificado por la compresión del esqueleto, lo que conlleva una reducción del índice de vacíos de la masa estructurada del suelo y por lo tanto de su porosidad.

Si consideramos que la amplitud de los fenómenos de desecación y rehidratación de las arcillas está estrechamente vinculada con la naturaleza y acondicionamiento de los suelos que constituyen el asentamiento de los cimientos de un edificio, el impacto de estos fenómenos sobre las estructuras podrá quedar considerablemente limitado jugando con la permeabilidad de la masa estructurada del suelo.

Como ciertos estudios ya han mostrado que las inyecciones de resina expansiva de poliuretano pueden reducir significativamente la permeabilidad de un suelo arcilloso (Buzzi et al., 2010), parece interesante confirmar estos resultados siguiendo un protocolo normalizado y controlado.

2. Presentación del trabajo experimental

Situado al norte de Sologne, a 10 km al sur de Sully-sur-Loire (Francia), el lugar elegido se encuentra en la "formación de Sologne" constituida por alternancias de arenas arcillosas más o menos gruesas y por arcillas más francas. La estratificación es lenticular de laminación oblicua.



Foto 1. Estado de la estructura antes de las inyecciones

La parcela con cerca de 3000 m² aparece de manera subhorizontal. Su situación privilegiada ha permitido la fácil puesta en obra de una estructura provisional de 5,0 metros de largo y 1,0 metro de ancho. Esta estructura está apoyada en una zapata de hormigón armado (2x2 m, armadura 15/35) cimentada a -1,2 m y cargada con 20 bloques de hormigón de 2,2 toneladas cada uno (Foto 1).

2.1. Sucesión litológica e hidrogeológica

Para precisar la columna litológica y determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos superficiales presentes, se han llevado a cabo previamente una serie de sondeos. Los reconocimientos geomecánicos se han organizado de la siguiente manera:

- 10 sondeos con barrena helicoidal que han bajado hasta la cota de -3,0 y -5,0 m,
- 2 perforaciones con sacamuestra triple que han bajado hasta la cota de -4,0 m,
- 4 ensayos penetrométricos pesados tipo B (norma NF P 94-115) que han bajado hasta la cota de -5,0 m,

Algunos ensayos de laboratorio se han asociado a los sondeos para precisar las características físicas de los suelos estudiados. Finalmente, algunos ensayos de permeabilidad in situ (2 unidades) como en laboratorio (3 unidades) se han repartido a lo largo de los 5,0 m que mide la estructura, en el seno de los suelos a inyectar (Formaciones nº 1 y nº 2).

La sucesión litológica presente en la obra es la siguiente:

Tabla 1. Sucesión litológica debajo de la estructura experimental.

Nº Form.	Descripción	Profundidad mínima del techo (m)	Profundidad máxima del techo (m)	Espesor mínimo (m)	Espesor máximo (m)
0	TV + Arcilla arenosa oscura	0,0	0,0	0,8	1,3
1	Arena gruesa arcillosa de color ocre tirando a gris	0,8	1,3	0,7	1,5
2	Arcilla verde oscuro	2,0	2,3	0,9	>1,0
3	Arena arcillosa gris	3,0	>3,2	--	--

El nivel freático fluctúa mucho en función de las estaciones. Globalmente, se queda bastante cerca de la superficie, a cotas que oscilan entre -3,6 m en periodo estival y -0,1 m en periodo invernal.

2.2. Características físicas y químicas

A nivel de las formaciones 1 y 2, una serie de ensayos de laboratorio nos ha permitido precisar su naturaleza y su estado.

Tabla 2. Características físicas y químicas de las formaciones 1 y 2

Nº de formación	Descripción	w (%)	<80 µm (%)	VBS (g/100g)	w _L	I _p	CaCO ₃ (%)
1	Arena gruesa arcillosa de color beige	14,3	34,7	3,75	52,2	32,9	3,6
2	Arcilla verde oscuro	21,3	57,5	7,30	58,7	34,8	4,1

Estos resultados permiten clasificar los suelos de la formación nº1 en B6 y los de la formación nº2 en A3 en referencia a la norma NF P11-300 del mes de septiembre de 1992. Cada uno de estos suelos presenta un plasticidad elevada. La tasa de carbonato, por su parte, sigue siendo débil.

Finalmente, los contenidos de agua natural son débiles. Sin embargo, cabe destacar, para que el lector lo entienda perfectamente, que el conjunto de estos ensayos ha sido efectuado durante el periodo estival de 2013.

Ahora bien, este periodo ha registrado mucho sol (hasta 33% superior a la tasa normal) y precipitaciones conformes con la estación. Este fenómeno ha tenido como consecuencia un aumento de ETP (evapotranspiración) del orden del 17%.

2.3. Características mecánicas

Para evaluar la resistencia mecánica de cada una de las capas que son objeto de este test, cuatro ensayos (PD1, PD2, PD3 y PD4) de penetración dinámica pesada tipo B (norma NF P 94-115) se han efectuado en el perímetro de la obra. Este tipo de ensayo ha sido elegido por su medida continua y su logística limitada. Habiendo bajado hasta una profundidad de 5,0 m, se han puesto de manifiesto los siguientes resultados :

Tabla 3: Características penetrométricas de formaciones situadas debajo de la estructura

Nº de formación	Descripción	qd min. (MPa)	qd máx. (MPa)	qd med. (MPa)
0	TV + Arcilla arenosa oscura	2	5	3.4
1	Arena gruesa arcillosa de color ocre tirando a gris	8	14	9.3
2	Arcilla verde oscuro	1,5	6,5	3,1
3	Arena arcillosa gris	8	24	10,4

Estas cuatro capas presentan características mecánicas muy distintas. Si los niveles arcillosos presentan una resistencia relativamente débil, los niveles arenosos se caracterizan, por su parte, por resistencias dinámicas elevadas. Esto nos permite tener una sucesión geomecánica muy contrastada.

2.4. Medidas de permeabilidad

La determinación de la permeabilidad de los suelos que nos hemos encontrado ha consistido en medidas in situ emparejadas con medidas de laboratorio. Las dos capas de suelo inyectado han sido testadas de esta manera.

Los valores de permeabilidad esperados en los suelos en cuestión eran inferiores o iguales a 10^{-6} m/s. La ley de Darcy para los flujos laminares se pone teóricamente en tela de juicio con estas débiles permeabilidades.

Para caracterizar estas bajas permeabilidades, se recurre a nuevos métodos de permeabilidades desarrollados en los años 90 en Francia. Estos métodos permiten garantizar el papel de estanqueidad de las capas de suelos finos para garantizar la protección de la capas freáticas con relación al almacenamiento de residuos.

A raíz de una campaña de mediciones realizadas bajo la supervisión de ADEME (Cassan et De Marsily, 1998) se han revisado y normalizado varios métodos in situ que utilizan infiltrómetros de superficie (con anillo simple o doble) y medidas durante las perforaciones así como métodos de laboratorio con muestras inalteradas (AFNOR, 1998 a 2014). Como los residuos se almacenan lejos de la capa freática, estos métodos se han elaborado para realizar medidas sobre suelos no saturados. Por lo tanto, estos métodos se han adaptado a los objetivos del presente pliego experimental.

2.4.1. Ensayos in situ

Se han utilizado métodos de medida in situ con ayuda de infiltrómetros de superficie de carga variable tipo CERAS. Para poner en marcha medidas sobre suelos no saturados, una fase previa de saturación seguida por una investigación del suelo después del ensayo, nos permite garantizar que la medida de flujo se efectúa en una franja de suelo saturado de 30 a 40 mm aproximadamente.

La ley de Darcy se aplica con la condición de que la curva experimental sea comprobada y que el espesor de esta franja saturada sea continuo. El límite de determinación de las permeabilidades es de alrededor de 10^{-9} m/s para el anillo doble (NF X 30 418) y de 10^{-10} a 10^{-11} m/s para el anillo simple cerrado (NF X 30 420). En efecto, el anillo cerrado permite aplicar una carga hidráulica más elevada adaptada a las medidas con permeabilidades muy bajas.

La formación N°2, de permeabilidad media, ha sido testada por lo tanto con un anillo doble abierto y la formación N°3 muy poco permeable con un anillo simple cerrado.

2.4.2. Ensayos en laboratorio

Se han extraído a través de sondeos con recuperación de testigo algunas muestras inalteradas antes de ser analizadas en laboratorio. El método utilizado es la medida con célula triaxial de pared flexible con saturación y presión de confinamiento bajo carga hidráulica constante (NFX 30 443). Este método permite disponer de una amplia gama de medidas de permeabilidad hasta alcanzar valores cercanos a 10^{-11} m/s.

Como el objetivo del laboratorio es la representación y el acondicionamiento de la muestra extraída, se han realizado dos ensayos con diferentes muestras extraídas en la misma formación n° 2 a través de dos extracciones diferentes. Estas muestras inalteradas de 50 mm de diámetro han sido extraídas a lo largo de dos sondeos diferentes.

Las medidas de permeabilidad se han limitado a las formaciones n° 1 y n° 2, formaciones elegidas debido a su naturaleza y a sus características.

La tabla 4. Programa de ensayos realizados antes y después de la inyección:

Tipo de sondeos	Código del ensayo	Profundidad del ensayo	Formación del ensayo	Tipo de ensayo de permeabilidad	Norma correspondiente
Excavación	K1 antes - K11 después ---	1,20 m	1 – arena gruesa arcillosa	Infiltrómetro CERAS in situ	Anillo doble abierto NF X 30-418
	K2 antes - K22 después	2,10 m			Anillo simple abierto NF X 30-420
Sondeo con muestra inalterada	K10&K10bis antes – K101 después --- K20 antes - K202 después	4,0 m --- 4,0 m	2 – arcilla verde	Laboratorio	Célula triaxial con carga constante NF X 30 443

Las siguientes fotografías presentan los dos tipos de infiltrómetro al final del muestreo en la excavación.



Foto 2[a]. Infiltrómetro anillo doble abierto-formación n°1 (1,2 m de profundidad)

Foto 2[b]. Infiltrómetro anillo doble abierto-formación n°2 (2,1 m de profundidad)

3. Mejora del suelo con la ayuda de la tecnología Uretek

3.1. El procedimiento Uretek Deep Injections®

El procedimiento Uretek Deep injections® es un procedimiento de mejora por inyección de resina de poliuretano muy expansiva, Consiste en inyectar, a nivel de los suelos de asentamiento de los cimientos superficiales (o semi-profundos), resina con una presión de hinchado fuerte que presente una buena resistencia a la compresión (Figuras 1[a] y 1[b]).

Durante la inyección, las características de la resina de poliuretano expansivo (polimerización rápida) permiten controlar y limitar su difusión en el suelo. En los suelos finos y en particular en las arcillas, la difusión se lleva a cabo por "claquage" (ruptura) pero también por impregnación a nivel de las fisuras y otras intercalaciones de grano más grueso. La ruptura o distensión se obtiene principalmente gracias a la presión de expansión de la resina que se difunde pues según una red de fracturas en expansión y cuyo núcleo se centra en el punto de inyección (Dominijanni A. y Manassero M., 2014).

Después viene una consolidación de los suelos por reducción del índice de vacíos y el levantamiento de la estructura que se controla en tiempo real a través del láser.

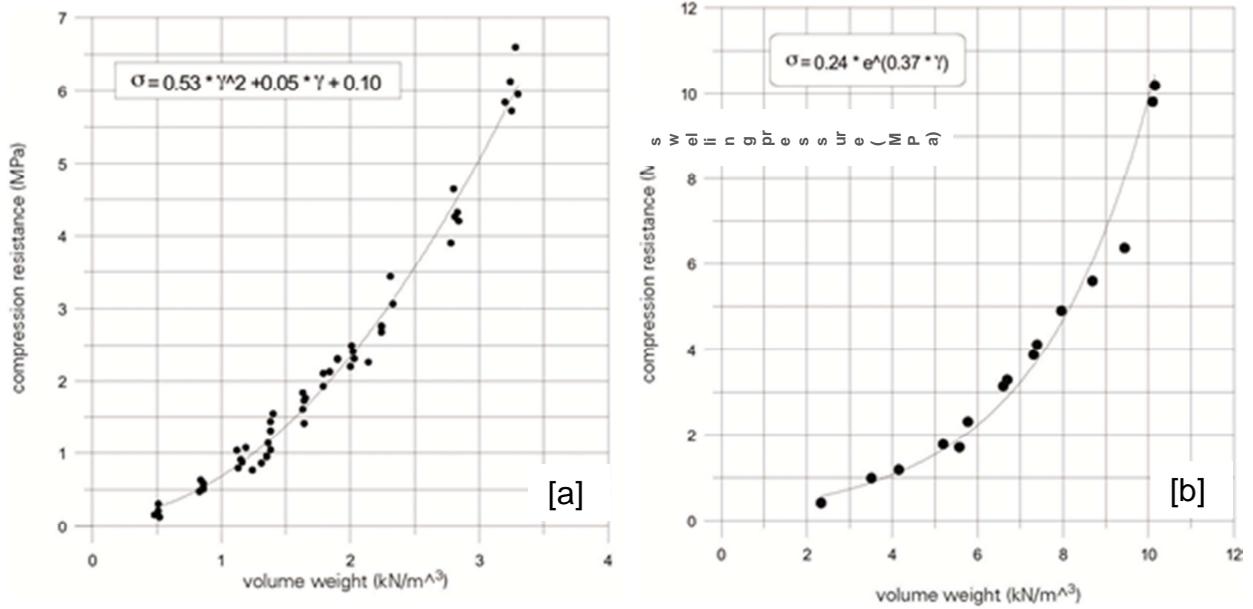


Figura 1 [a]. Evolución de la resistencia a la compresión, σ_c , con el peso específico, γ_r , de la resina. [b] Evolución de la presión de hinchamiento máximo, σ_{sw} , con el peso específico, γ_r , de la resina (Dei Svaldi et al., 2005).

El procedimiento prevé, por otra parte, un control de la mejora a través de ensayos penetrométricos (PDM 30) comparativos realizados antes y después de las inyecciones.

3.2. La inyección

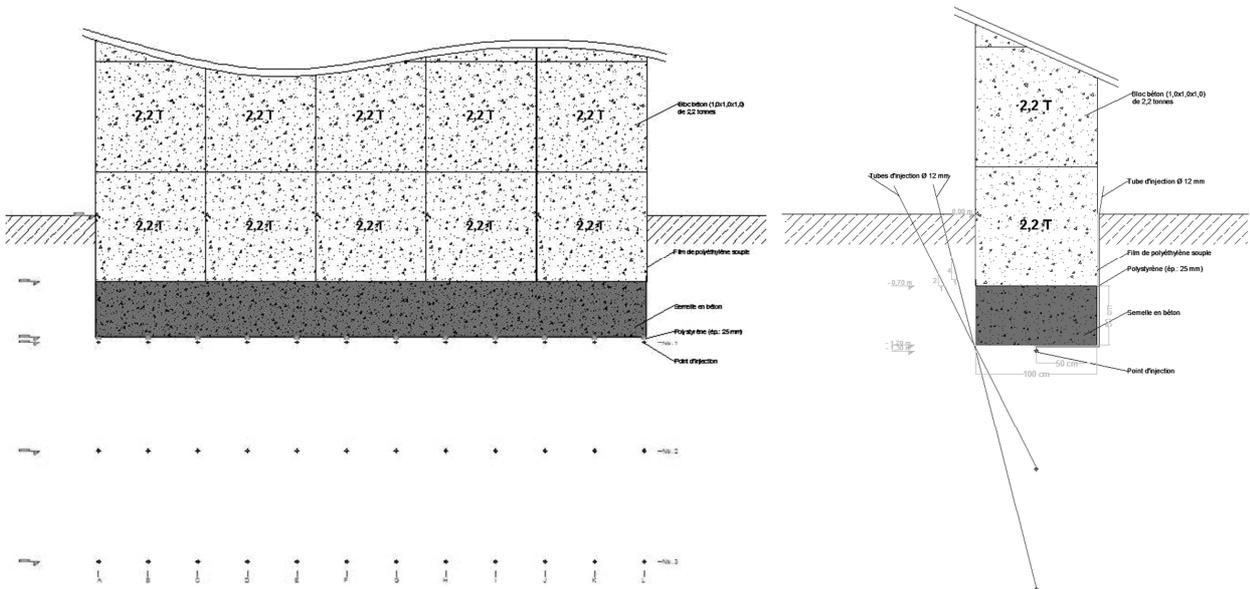


Figura 2. Malla de la inyección.

Como el objetivo es verificar el efecto de las inyecciones de resina expansiva de poliuretano en la permeabilidad de los suelos arcillosos presentes al nivel del asentamiento de los cimientos superficiales o semi-profundos, se ha construido una estructura provisional. Como el nivel de apoyo de los cimientos se sitúa en la cota de -1,2 m, la malla de inyección está compuesta por tres niveles (-1,3 m, -2,3 m, -3,3 m) con un espacio de 1,0 metro cada uno. De esta manera, las inyecciones se refieren a todo el espesor constituido por las formaciones n° 1 y n° 2, situados en el nivel de asentamiento de los cimientos. Cada nivel conlleva 12 puntos distribuidos en toda la longitud de los cimientos y con un espacio de 0,45 m entre cada uno (Figura 2).

Las inyecciones se han realizado alrededor de 9 meses después de la construcción de la estructura. Durante este periodo de consolidación, se han efectuado estudios planialtimétricos de la estructura y se ha puesto de manifiesto una compactación de 6 a 7 mm.



Foto 3[a]. Preparación de la inyección del primer nivel.



Foto 3[b]. Inyección del segundo nivel bajo el control del láser permanente.

Con motivo de las condiciones de saturación del suelo, las inyecciones han sido realizadas en dos fases. La primera durante el mes de mayo de 2014, la segunda durante el mes de julio de 2014 (Fotos 3[a] y 3[b]). De conformidad con el dimensionamiento realizado antes de la intervención, cerca de 200 kg de resina han sido inyectados y repartidos en los tres niveles de inyección.

4. Resultados

Debemos precisar antes que nada que el conjunto de los ensayos in situ y la toma de muestras para los ensayos de laboratorio han sido efectuados una semana después de la descarga de la zapata y 24 horas después del desmontaje de dicha zapata.

4.1. Mejora de las características mecánicas

A raíz del dimensionamiento de las inyecciones, se esperaba un coeficiente de mejora de 1,5. Después de las inyecciones, la mejora de las características mecánicas se ha constatado a través de dos sondeos realizados con el penetrómetro dinámico pesado tipo B (norma NF P 94-115). Estos ensayos han sido ejecutados en el eje de la cimentación, después del desmontaje de la estructura.

El factor de mejora de la resistencia dinámica media medida tanto en el seno de la formación nº 1 como de la formación nº 2 queda incluido globalmente entre 1,4 y 1,6. A nivel de la formación nº 2, este factor de mejora puede puntualmente alcanzar un valor de 2.

Además, los ensayos de control interno realizados con el penetrómetro dinámico (PDM 30) por Urettek antes y después de las inyecciones han mostrado un nivel de mejora equivalente (coeficiente de mejora comprendido entre 1,5 y 2 para las dos formaciones) en concordancia con los resultados de los ensayos con penetrómetro pesado.

Todos estos resultados confirman que ha habido efectivamente consolidación en profundidad a nivel de las formaciones inyectadas. Queda pues por comprobar si esta mejora viene acompañada por una reducción de la permeabilidad de los suelos.

4.2. Reducción de la permeabilidad

Las diferencias de valores medidas entre ensayos in situ y en el laboratorio son notables. En efecto, los ensayos in situ solicitan un mayor volumen de suelo y tienen pues en cuenta las heterogeneidades naturales mientras que las muestras inalteradas no representan más que una pequeña porción de la masa del suelo.

De este modo, en el seno de la formación de arcilla nº 2 muy poco permeable, las diferencias entre los resultados de los ensayos in situ y los ensayos de laboratorio pueden provenir de las fisuras u otras heterogeneidades litológicas en las que las muestras inalteradas han sido extraídas (Figura 3).

Esta observación concuerda con las diferencias de permeabilidad de un factor de cerca de 300 ($1 \cdot 10^{-6}$ à $3 \cdot 10^{-9}$ m/s) señalado por Benson et al. (1994) entre los ensayos en laboratorio sobre muestras de arcilla de 70 mm de diámetro y ensayos in situ.

Este mismo resultado entre ensayos de laboratorio y ensayos in situ es inferior a 10 en la formación nº 1. La presencia de heterogeneidades locales sería pues menor en el seno de esta formación por el hecho de la homogeneidad de distribución de granos arenosos gruesos presentes en la matriz arcillosa.

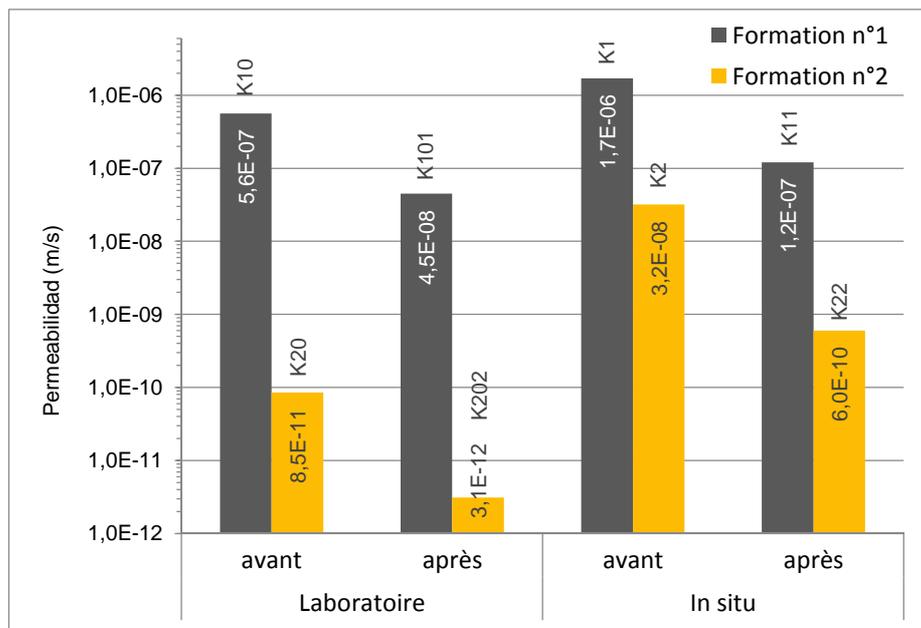


Figura 3. Permeabilidades de las formaciones n° 1 y n° 2 medidas antes y después de las inyecciones.

Según el conjunto de medidas in situ, los valores del coeficiente de permeabilidad se han reducido significativamente después de la inyección. La reducción es más importante en la formación de arcilla (formación n° 2).

En el seno de la formación n° 1, los ensayos de laboratorio antes de la inyección hacen aparecer una dispersión con factor 2. Es un factor relativamente débil a la vista de las incertidumbres que pueden resultar de la variabilidad vinculada con el muestreo. La media de los dos valores de permeabilidad de $5,6 \cdot 10^{-7}$ m/s ha sido mantenida pues con la referencia K10 en la figura 3. Al final, los factores de reducción de la permeabilidad determinados en los ensayos de laboratorio y in situ son cercanos, con valores respectivos de 12,5 y 14.

En el seno de la formación n° 2, el valor de permeabilidad inicial medido a través del ensayo de laboratorio de $8,5 \cdot 10^{-11}$ m/s es muy bajo, con un valor cercano al valor límite de determinación del método. El factor de reducción de 27 posiblemente se ha subestimado. En este caso, un factor de reducción de cerca de 50 puesto de manifiesto por el ensayo puede ser mantenido para esta formación.

Por otra parte, este factor de reducción es coincidente con los resultados propuestos por Buzzi et al. (2010) donde los factores de reducción de permeabilidad puestos de manifiesto quedan comprendidos entre 40 y 55.

5. Conclusión

Se ha construido una estructura provisional de hormigón sobre suelos arcillosos. Después de un periodo de 9 meses, se han ejecutado inyecciones de resina expansiva a nivel de los suelos de asentamiento de los cimientos (suelos arcillosos).

Se han efectuado ensayos comparativos antes y después de las inyecciones (medidas de la resistencia dinámica y de la permeabilidad). En análisis conjunto de las variaciones de las resistencias geomecánicas y de la permeabilidad ha podido ser analizado después del desmontaje de la estructura. El desmontaje de la estructura ha permitido estudiar de forma precisa las mejoras aportadas por las inyecciones de resina.

Los resultados han permitido confirmar la capacidad del procedimiento Uretek Deep Injections® para mejorar las características mecánicas de los suelos arenoso-arcillosos y arcillosos. Esta consolidación viene acompañada sistemáticamente por una reducción significativa de la permeabilidad de los suelos por un factor que puede alcanzar el valor de 50.

La determinación de los factores de reducción de permeabilidad ha necesitado el uso de métodos de medida adaptados y una ejecución rigurosa. El hecho de tener en cuenta la representatividad de los ensayos y el funcionamiento hidráulico de la masa del suelo, han permitido poner de manifiesto las diferencias entre los suelos arenoso-arcillosos y arcillosos.

La aplicación de un protocolo de control estandar para las futuras obras se podrá basar sobre las observaciones hechas en el marco de este trabajo experimental.

6. Referencias bibliográficas

- Benson C., Zhai H. and Wang X. (1994) Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 120: 366-387.
- BRGM (2009) *Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets.*
- Buzzi O., Fityus S. and Sasaki, Y., (2007) Conceptual model for the remediation of expansive clay foundations using expanding polyurethane resin.', *Proceedings of the 10th Australia-New Zealand Conference on Geotechnical Engineering*. Australian Geomechanics Society, Vol.1, 436-441.
- Buzzi O., Fityus S. et Sloan S. (2010), Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations. *Canadian geotechnical journal* 47: p. 623-634
- Cassan M., De Marsily G. (1998) *Intercomparaison des méthodes de mesures es faibles perméabilités. Avis d'expert. Rapport de synthèse ADEME Centre d'Angers.*
- Cassan M. (2005) *Les essais de perméabilités sur site dans la reconnaissance des sols.* ISBN 2-85978-396-2. Presses des Ponts et Chaussées
- Dei Svaldi A., Favaretti M., Pasquetto A., Vinco G. (2005), Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin. *Proc 6th International Conference on Ground Improvement Techniques*, pp. 577-584.
- Dominijanni A. et Manassero M. (2014), *Consolidamento dei terreni con resine espandenti – Guida alla progettazione.* Mac Graw-Hill Education.
- Favaretti M., Germanino G., Pasquetto A., Vinco G. (2004), Interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di una torre campanaria con iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione. *Proc. XXII Convegno Nazionale di Geotecnica*, pp. 357-364.