

**URETEK®**

**Tratamiento de los  
suelos sensibles a  
contracción e  
hinchamiento con el**

**MÉTODO URETEK®  
DEEP INJECTIONS**



**PATENTE EUROPEA  
N° 0 851 064**



Las inyecciones de resina de poliuretano expandente no se limitan sólo a la consolidación del suelo.

Modifican también sus comportamientos en presencia de desecación y rehidratación de los suelos sensibles.

Recientemente se han realizado dos estudios acerca del efecto de las inyecciones de resina expandente URETEK en el tratamiento de los suelos arcillosos sensibles a la contracción y al hinchamiento:

## 1 “Modelo conceptual para el tratamiento de las arcillas expansivas bajo cimentaciones con una resina de poliuretano expansivo”

Ha sido realizado en Australia por:

- Olivier Buzzi,
- Stephen Fityus,
- Yasumasa Sasaki.

Centre for geotechnical and Materials Modelling,  
School of Engineering, University of Newcastle,  
NSW2008 Australia.

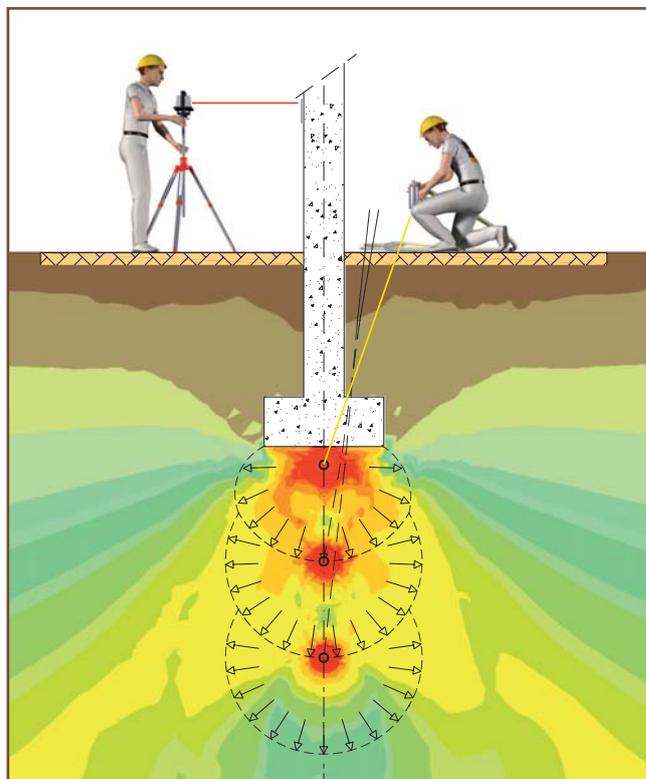
## 2 “Consolidación del suelo por inyección de resina poliuretano (tecnología URETEK Deep Injections) con el fin de atenuar el hinchamiento y retirada de los suelos arcillosos”

Ha sido realizado en Italia por:

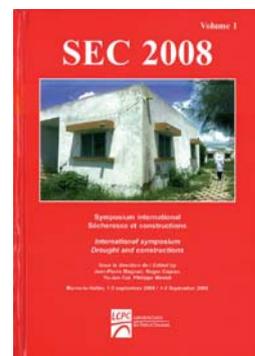
- Alberto Paschetto,
- Matteo Gabassi,
- Gianluca Vinco,
- Cristiano Guerra

Università di Urbino, Italy

# URETEK® DEEP INJECTIONS



Estos estudios han sido presentados al Simposio Internacional sobre la Seguridad organizado por el Laboratorio de los Puentes y Estructuras [cf. página 343 de La obra SECA 2008, Magnan, Covaqueros, Cui y Mestat (Ed.), 2008, Ediciones del LCPC, París].



**1** El primer estudio “**Modelo conceptual para el tratamiento de las arcillas expansivas bajo la cimentación con una resina de poliuretano expansivo**” ha demostrado:

### En primer lugar

que la resina penetra en las grietas sólo  $1/10^e$  mm y que la interfase suelo/resina alcanza un espesor de 1 a 3 mm.

### Segundo

que la penetración en los macroporos de la resina Uretek provoca una disminución de la “**Permeabilidad de la estructura del terreno in situ**”.

Precisando que: “**la permeabilidad pertinente que hay que considerar para el suelo de cimentación no es la de un elemento de base del suelo (unidad estructural), sino la permeabilidad de la estructura del suelo en su conjunto**”

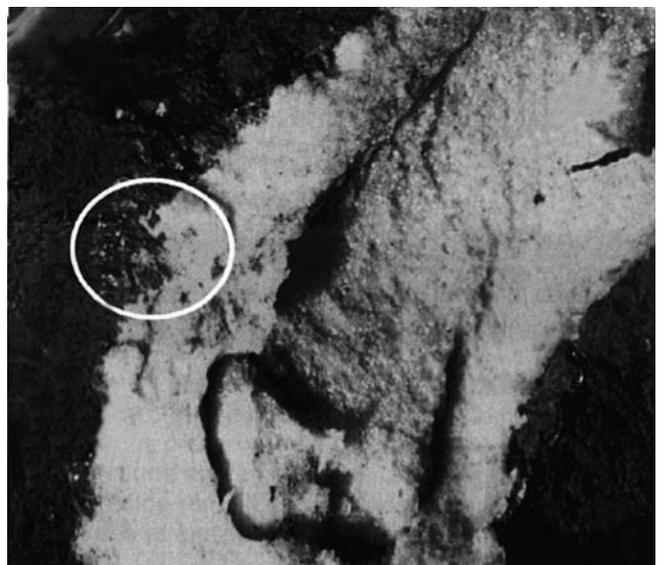
Es muy importante tener en cuenta las características de la masa estructural del suelo in situ.

De hecho los estudios realizados en el marco de El ARGIC (Análisis de la contracción e hinchamiento y sus incidencias sobre las construcciones) por el BRGM, El LCPC y la Escuela de Minas de París, mencionadas **a continuación han demostrado la importancia de las diferencias de comportamiento entre los terrenos in situ y los terrenos modificados.**

### En tercer lugar

a consecuencia de las pruebas de permeabilidad realizadas después de las inyecciones de la resina URETEK, el estudio “**concluye que la inyección de resina en un suelo puede reducir la permeabilidad macroporosa aproximadamente 50 veces**”.

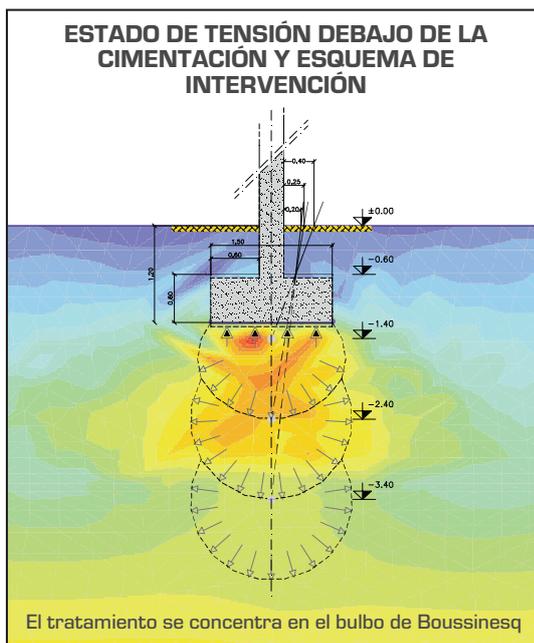
Lo que representa **una mejoría determinante** para el comportamiento del suelo frente a los fenómenos de desecación y rehidratación.



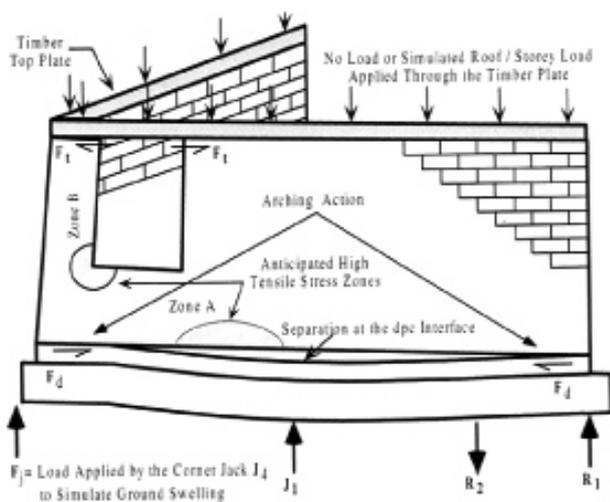
Ampliación al microscopio

Se puede notar también que las inyecciones realizadas en la primera fase del tratamiento, provocan en la interfaz terreno/cimentación:

- un relleno de los huecos presentes debajo de la cimentación y una impermeabilización del área;
- una carga de compresión, por las cargas transmitidas por la estructura en elevación, asegura una perfecta interacción suelo/estructura: situación original de la construcción.



(cf. esquema nr. 1) Nuestro procedimiento permite una perfecta interacción suelo/estructura.



Esquema 1: reacción de una estructura de mampostería a las deformaciones diferenciales de una cimentación. (Muniruzzaman, 1997)



Penetración de la resina para rellenar las grietas de contracción y compactación

**2** El segundo estudio «**Consolidación del suelo con inyecciones de resina de poliuretano (tecnología URETEK Deep Injections) para atenuar el hinchamiento y la contracción de los terrenos arcillosos**» ha demostrado que:

**En primer lugar**

la “mayor densidad de los terrenos comprimidos obtenida con las inyecciones de resina expandente URETEK previene el riesgo de variaciones de volumen en el futuro.”

“La sustitución del agua del terreno con la resina reduce considerablemente los eventuales riesgos de asentamiento debidos a nuevas goteras/pérdidas de agua disminuyendo el grado de humedad.”

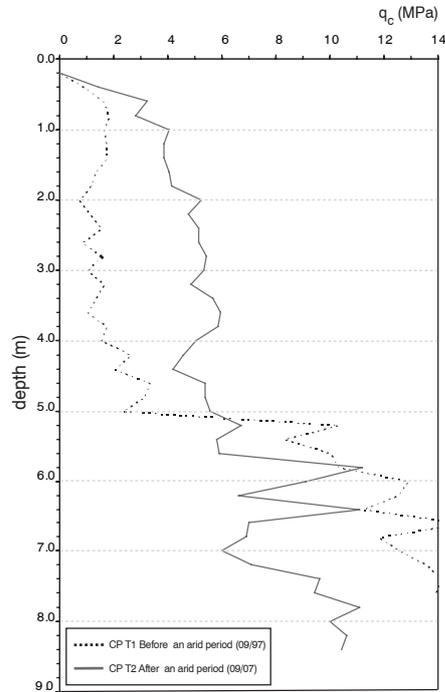
(página 348 SEC 2008)

De hecho después del tratamiento con la resina URETEK hay:

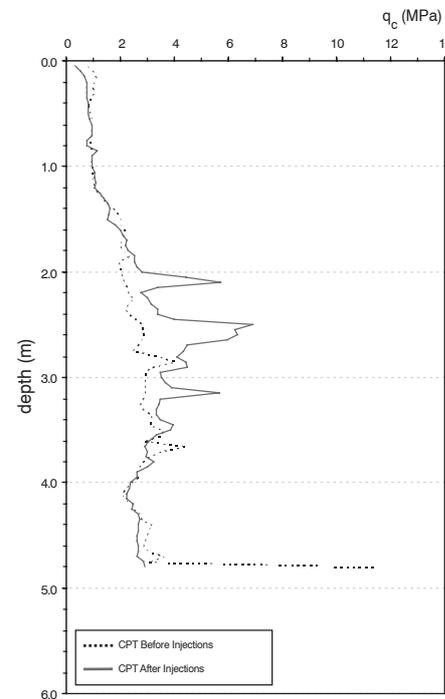
- un aumento de la resistencia dinámica del terreno,
- una saturación del terreno por la resina que provoca una disminución del grado de humedad natural  $w_{nat}$ .

Estos efectos corresponden exactamente a los que se han observado después de un período de fuerte sequía.

El resultado es reducir considerablemente la potencial contracción del suelo al ocurrir una nueva sequedad.



Comparación de las pruebas penetrométricas realizadas antes y después un período árido



Comparación de las pruebas penetrométricas realizadas antes y después inyecciones de 20 kg de resina a una profundidad de 2,8 m, según el método Urettek Deep Injections (2)

Nota: la figura tiene como objetivo el de mostrar el efecto de una sola inyección hecha en un punto a 2,80 m de profundidad. En caso de un tratamiento debajo de la fundación se realiza una gran cantidad de inyecciones que afectaría a toda la altura tratada por la combinación de los efectos de grupos de inyecciones.



### En segundo lugar

El estudio presenta un método de cálculo para evaluar la reducción de los asentamientos después del tratamiento con la tecnología Uretek Deep Injections:

El estudio considera un edificio de vivienda que ha sufrido sequedad (IP=39), situada en Antibes Juan-Les-Pines (06):

Sabiendo que el volumen de resina inyectado en el suelo representa aproximadamente:

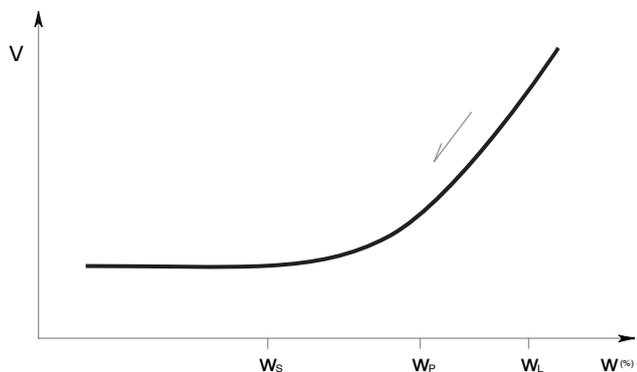
$$RV = \frac{V_r}{V} = \frac{40}{1.000} = 0,04 = 4,0\%$$

Sabiendo que la fórmula tiene en cuenta el volumen de sustitución del agua por la resina:

$$\Delta w = \frac{\Delta V_w}{V} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_d} = 0,04 \cdot \frac{10}{17} = 0,023 = 2,3\%$$

Se ha demostrado que, después del tratamiento Uretek Deep Injections hasta 3,00 m de profundidad:

“La curva de la prueba de contracción permite establecer en unos 35 mm la posible reducción de asentamiento debida a una nueva pérdida de agua.”



Relación entre volumen y grado de humedad natural



Las inyecciones siempre se controlan con láser



## Eficacia y límite del tratamiento de los terrenos arcillosos con el método URETEK DEEP INJECTIONS.

### Las inyecciones de resina expansiva Uretek tienen los siguientes efectos:

- una compactación del terreno provoca una disminución del índice de los huecos y una densificación del terreno,
- un relleno y una impermeabilización de los macro huecos restantes debajo de la cimentación de las grietas de contracción y las venas de drenaje de la circulación del agua telúrica,
- en definitiva un aplastamiento de la estructura del terreno cuando la resina se expande de forma tridimensional: esto conduce a una modificación de las propiedades mecánicas y reológicas del terreno compactado.

### El tratamiento Uretek Deep Injections implica:

- una disminución de factor 50 de la porosidad del terreno que sujeta las vías de drenaje-humectación y también de la compresión-decompresión de la masa estructurada del terreno in situ,
- un aumento de la densidad del terreno y una disminución de su grado de humedad natural que previene los riesgos de una futura sequedad,
- en consecuencia, inhibe de forma sustancial su potencial de desecación/rehidratación y por lo tanto de contracción/hinchamiento.

Las inyecciones de Resina de Poliuretano Expansiva (RPE) Uretek constituida por un polímero a cadena cerrada cuya permeabilidad es ínfima, del orden de  $10^{-9}$  m/s. **permiten retrasar y limitar de manera determinante las variaciones hídricas y con ello los fenómenos de contracción y hinchamiento de los terrenos tratados.**

Las obras realizadas sobre patologías de sequedad en todas partes del mundo y, hace más de 10 años en muchos lugares en Francia, han demostrado la eficacia del procedimiento URETEK. Esta eficacia es ratificada por los estudios arriba mencionados.

Por tanto, según el estado actual de los conocimientos, Uretek limita la aplicación de su procedimiento en presencia de terrenos arcillosos cuyos minerales están sujetos a hinchamientos interfoliares de gran amplitud, **ya que la tensión y la amplitud de su potencial de hinchamiento pueden provocar riesgos estructurales.**

Los criterios de factibilidad del procedimiento URETEK - mencionados más abajo - se han establecido sobre la base de las investigaciones científicas enunciadas en la primera parte y considerando la experiencia de las obra realizadas. Tienen en cuenta también las investigaciones geotécnicas efectuadas en el marco del Proyecto ARGIC [Análisis de la contracción e hinchamiento y sus incidencias sobre las construcciones] organizado por BRGM, LCPC y la Escuela de Minas de París, algunas de las cuales se mencionan más adelante.



## Factores de enfoque para la evaluación de los riesgos de hinchamiento después de los últimos análisis mencionadas durante el Symposium sobre la Sequía 2008:

Como se ha podido constatar antes, es importante analizar de forma escrupulosa las características de los terrenos arcillosos **para poder pronunciarse eficazmente acerca de su eventual nocividad/sus eventuales efectos nocivos.**

Algunos estudios realizados en el marco de ARGIC y presentados durante el Symposium sobre la Sequía 2008 han demostrado que las pruebas clásicas de análisis no siempre producen resultados satisfactorios:

El estudio **“Metodología de estudio de la sensibilidad de los terrenos en contracción-hinchamiento”** realizado por: Duc, M. Makki, A. Maloula, JP. Magnan del Laboratoire Central de Ponts et Cahaussées Division Mécanique des Sols et des Roches et Géologie de l'Ingénieur (MSRGI) mencionado en la obra SEC 2008 Magnan, Cojean, Cui y Mestat (Ed.), 2008, Editorial LCPC, París en las páginas 257 y 272, ha puesto en evidencia los siguientes puntos:

Con el objetivo de establecer una **metodología de evaluación de la sensibilidad de los terrenos arcilloso en contracción e hinchamiento**, el estudio ha considerado el análisis de una tipología, en este caso la arcilla de Bavant (región de Rouen).

En un primer momento se han considerado **“los métodos clásicos de análisis de la fracción fina de los terrenos (propiedades plásticas)”** en aplicación de las clasificaciones reconocidas.

Este criterio ha producido la siguiente tabla y comentarios:

Aplicación de las clasificaciones de la arcilla de Bavant

Clasificación	Parámetros	Potencial de hinchazón
Altmeyer (1995)*	$W_s$	Crítico
Rangaratham y Satyanarayana (1963)*	$I_s$	Fuerte
Seed y al. (1962)	$I_p$	Medio
Clasificación SNEP u ASTM D4546-03 (método A)	$e_{sw}^*$	Débil
Clasificación BRE (Building Research Establishment)	$I_p, \% < 2\mu m$	Medio
Clasificación EPA (US Environmental Protection Agency)	$A_c, CEC_c$	Débil
Chen (1998) **	$w_L, \% < 74\mu m$	Fuerte
Williams y Donaldson (1980)	$I_p, \% < 2\mu m$	Medio
Holtz y Gibbs (1956)	$w_L, I_p, \% < 2\mu m$	Muy fuerte
Dakshnamurthy (1978)*	$w_L, W_s, I_p$	Medio

\*mencionado por Butel (2001) \*\*mencionado por Windal (2001)

**En conclusión**, las clasificaciones disponibles no permiten prever el potencial del hinchamiento de la arcilla de Bavant ni, en general, de la mayoría de los terrenos. Es difícil clasificar los terrenos hinchables a partir solamente del valor de un índice deducido gracias a una medición indirecta de reconocimiento realizada a menudo en terrenos modificados. La estructura y cementación del grano (como por ejemplo en caso de la marga) son ignorados mientras que se trata de dos parámetros importantes y que no pueden reproducirse en laboratorio ya que están vinculados a la historia geológica del terreno. Es indispensable realizar unas pruebas mecánicas de contracción o de hinchamiento para definir los terrenos de manera escrupulosa.

### Como se puede leer:

“en conclusión las clasificaciones disponibles no permiten prever el potencial de hinchamiento de la arcilla de Bavant (ejemplo estudiado) ni, en general, de la mayoría de los terrenos”.

“clasificar los terrenos expansibles a partir de solamente el valor de un índice deducido gracias a una medición indirecta de reconocimiento realizada a menudo en terrenos modificados”.

“La estructura y cementación del grano (como por ejemplo en caso de la marga) son ignorados cuando se trata de dos parámetros importantes y que no pueden reproducirse en laboratorio ya que están relacionados a la historia geológica del terreno”.

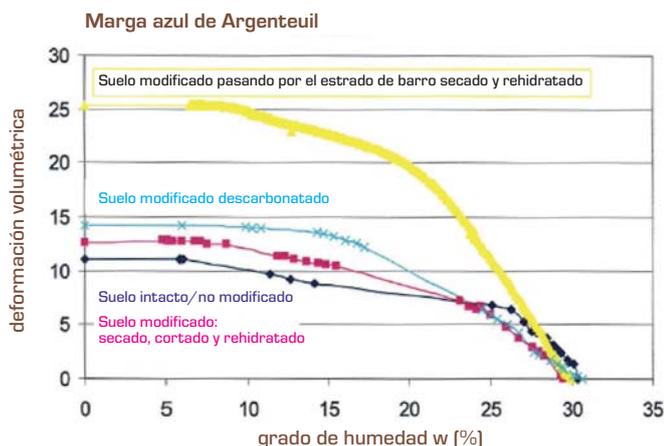
Como consecuencia, el estudio ha conducido a la **investigación sobre las características de contracción e hinchamiento de la arcilla en general y de la arcilla de Bavant en particular.**

Todo esto ha demostrado que:

- las pruebas de contracción e hinchamiento libre del edómetro son las que más se adaptan, pero tienen que **realizarse obligatoriamente sobre una muestra de terreno inalterado y no modificado**.
- las pruebas del edómetro realizadas según la Norma XP P94-091 son menos extrapolables de las de la Norma ASTM D4546-03 método A.

Lo que muestran los cuadros siguientes:

- Cuadro donde se puede ver la diferencia muy importante de las deformaciones volumétricas del suelo en función de la variación del grado de humedad entre una prueba **sobre terreno modificado de color amarillo y sobre terreno inalterado de color azul oscuro**:



**En conclusión** y en consecuencia de la realización de diferentes ensayos sobre la arcilla de Bavent, podemos leer:

“Sin embargo, todos estos datos confirman que la arcilla de Bavent no es una arcilla particularmente expansiva. Este punto no se deduce claramente de las clasificaciones existentes de los suelos sensibles a la contracción y al hinchamiento; **esto apoya la idea de que es indispensable realizar ensayos mecánicos de contracción o hinchamiento sobre terrenos inalterados para integrar el efecto de su historia y de su estructura, que no están siempre vinculados únicamente a los parámetros de consistencia utilizados en estas clasificaciones**”.

Estas observaciones quedan confirmadas en el estudio **“Relaciones entre las microestructuras de dos terrenos arcillosos de la Región Parisina y su sensibilidad a la contracción e hinchamiento”** realizada por M. Audiguier, Z. Geremew et R. Cojean mencionada en la obra SECA 2008, Magnan, Cojean, Cui y Mestat (Ed.), 2008, Ediciones del LCPC, París en la página 235 que indica:

El análisis que se refiere al comportamiento de dos terrenos arcillosos de la Región Parisina (Marne Bleues de Argenteuil et Argile Verte de Romainville), consideradas como muy sensibles a la contracción e hinchamiento conducido de la misma manera entre terreno inalterado y terreno modificado:

**“Sin embargo estas dos formaciones (MBA y AVR) no presentan el mismo comportamiento en presencia de la contracción e hinchamiento según se trate de terrenos inalterados o modificados en laboratorio”.**

■ **Tabla II.** Hinchamiento libre de la arcilla verde de Romainville y de Marga azul de Argenteuil:

Formación	AVR	MBA-1 carbonatos 27 %	MBA-2 carbonatos 58 %
Contenido de agua antes de la hinchazón (muestra no modificada) %	25	32	23
Contenido de agua antes de la hinchazón (muestra modificada) %	39	36	25
Contenido de agua antes de la hinchazón (muestra modificada) %	27	34	24
Contenido de agua antes de la hinchazón (muestra modificada) %	51	56	35
<b>Nivel de hinchazón libre (muestra no modificada) %</b>	<b>16</b>	<b>4</b>	<b>1,5</b>
<b>Nivel de hinchazón libre (muestra modificada) %</b>	<b>32</b>	<b>26</b>	<b>15</b>

“Para un grado de humedad equivalente, la tasa de hinchamiento de AVR pasa del **16 al 32 %** entre el estado intacto y el estado modificado, el de **MBA-2** pasa de **1,5 a 15**.

La tasa de hinchamiento de MBA-1, cuyo grado de humedad es mayor pasa de **4 a 26 %**... **En el estado modificado su sensibilidad es multiplicada por 6,5 à 10 ...**” (página 237)

Se evidencia claramente que las clasificaciones que se utilizan habitualmente no permiten prever el riesgo real de hinchamiento.

En la última tabla se puede ver que las Marnes Bleues de Argenteuil (Margas Azules de Argenteuil MBA-1), cuya tasa de hinchamiento real es del 4%, no presentan ningún riesgo. Esto contradice las interpretaciones habituales a través de sus características:

IP = 47, WL = 89, IR = 68, % < 2 $\mu$ m = 78 %  
Valeur au Bleu = 10, como indicado en la siguiente tabla (página 236).

Tabla I. Características mineralógicas, petrofísicas, geofísicas y geotécnicas de la Arcilla verde de Romainville y de las Marnas Azules de Argenteuil.

Formations	AVR	MBA - 1	MBA - 2
Arcilla	I, K, S	I, K, S	I, K, S, A. fibreuses
% Carbonatos	13	27	58
Porosidad %	42	45	40
Peso volumen seco kN.m <sup>-3</sup>	15	14	16
% < 2 $\mu$ m	78	78	82
Límite líquido WL %	75	89	63
Índice de plasticidad Ip %	35	47	35
Índice de contracción Ir %	59	68	47
Índice Azul de Metileno	9	10	5
Superficie específica m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	188	210	110

Este estudio evidencia también **la influencia de los carbonatos sobre las pruebas de sensibilidad de los terrenos**; esto justifica la diferencia de comportamiento, por ejemplo, entre los dos tipos de marga MBA-1 y MBA-2 en la tabla precedente:

“...para MBA-1, su comportamiento es inhibido a causa de la existencia de un cemento de carbonato que se ha formado en el curso de la diagénesis que une los granos entre ellos. En el estado modificado la historia diagenética del material ha sido parcialmente alterada” (página 238).

“Las transformaciones diagenéticas (disolución-precipitación)son responsables de la formación de enlaces entre arcilla y carbonatos que son destruidos durante la modificación.” (página 243).

“Así un material arcilloso que contiene carbonatos, clasificado entre los terrenos de fuerte o muy fuerte potencial de hinchamiento podrá tener unas tasas de hinchamiento muy débiles en su estado intacto.” (página 243).

## Aplicación al estudio de factibilidad del tratamiento de los terrenos arcillosos con el procedimiento URETEK Deep Injections.

Observaciones que conciernen a las clasificaciones corrientes.

Estos estudios muestran que las clasificaciones habitualmente utilizadas están mal adaptadas a la cualificación de los suelos de cimentación de las obras existentes.

De hecho, estas pruebas derivadas del GTR (Manual Técnico de Carreteras) para cualificar terrenos arcillosos en rellenos (creación de plataformas de carretera), se realizan:

- a partir de muestras alteradas
- a partir de muestras niveladas (400 micrones)

No tienen en cuenta:

- la historia diagenética del suelo y de la influencia de los carbonatos, ni de las limitaciones geológicas de la estructura de la masa.
- de « la fatiga del terreno » después de los ciclos de hidratación y deshidratación, como demuestra el estudio “Comportamiento de los terrenos arcillosos sometidos a esfuerzos hídricos cíclicos **Geremew y Audiguier**” (page 246) y que indica “ ... las pruebas muestran una estabilización del fenómeno de contracción-hinchamiento después de cuatro o cinco ciclos”.

Las investigaciones clásicas, muy a menudo, dan unos resultados particularmente pesimistas para el estudio de los terrenos arcillosos de obras existentes y por eso son poco extrapolable, excepto si se modifica, de forma significativa, la tabla de lectura.

### **Criterios de factibilidad para la aplicación de procedimiento URETEK Deep Injections:**

La evaluación correcta de las características de deformación de un terreno arcilloso presente bajo una obra pasa a través de la realización de pruebas de contracción e hinchamiento libre del edómetro sobre un terreno inalterado.

Considerado el protocolo que necesita este tipo de prueba y de su duración, raramente se utiliza en los estudios de suelos disponibles. Por eso, se procederá a estas pruebas sólo si las investigaciones clásicas (Límites de Atterberg, Índice Azul de Metileno) evidencian una sensibilidad probada de los terrenos arcillosos in situ.

Los resultados de estas pruebas, destinados a evaluar los riesgos relacionados a la sensibilidad probada de los suelos arcillosos, se pueden apreciar si se considera:

### **■ las propiedades específicas del procedimiento URETEK Deep Injections:**

La mayor densidad del terreno y la mejora de factor 50 de la permeabilidad macroporosa de la estructura de los suelos arcillosos tratados con tecnología Urettek Deep Injections, permiten una evaluación del riesgo en función del IP que debe modificarse y en proporción disminuir.

### **■ Los resultados de las siguientes investigaciones geotécnicas muestran:**

Los valores de las pruebas realizadas a partir de los terrenos modificados no corresponden a los valores de los terrenos in situ. Los resultados obtenidos, a veces pesimistas, necesitan modificar su tabla de lectura intentando devaluar el riesgo.

### **■ La experiencia de muchas obras que han tratado la sequedad con éxito, gracias al procedimiento URETEK Deep Injection.**



Obras URETEK en el Museo de Historia natural en París



En este contexto los criterios considerados para la aplicación del procedimiento URETEK Deep Injections, en presencia de terrenos arcillosos sensibles a la contracción e hinchamiento son:

**Criterios establecidos según el Cahier des Charges aprobado SOCOTEC**  
(Investigación Técnica n° FX2639/9 Informe n° 10.1829).

Parámetros de identificación	Aplicación del procedimiento URETEK
$I_p \leq 40$ o $MB \leq 8$	<b>Aplicación corriente</b>

Por tanto, cualquiera que sea el valor de su IP, un terreno que presenta un contenido superior al 20% de carbonato es de aplicación corriente del procedimiento URETEK Deep Injections.

**% CaCO<sub>3</sub> > el 20 % (Norma NF 94-048)**

(Significa que el tratamiento de las arcillas de margosas y margas es de aplicación corriente cualquiera que sea su indicio de plasticidad)

Más allá de estos valores, se limitará la aplicación del tratamiento **si los dos criterios siguientes actúan de forma conjunta:**

- Si la limitación del hinchamiento ejercida por el suelo in situ es superior a la limitación de las cimentaciones, más la de las tierras al descanso sobre la altura del bulbo. ( $\sigma'_g < \sigma'_{vo} < \Delta\sigma'_z$ )
- Si la amplitud del hinchamiento del suelo tratado puede ser bastante importante para provocar desórdenes en la estructura. ( $R_g \leq 5\%$ )

Las pruebas hay que realizarlas teniendo como base la prueba de hinchamiento con edómetro sobre muestra inalterada. (Norma NF P 94-091).



Obras URETEK: nuevo Museo de Arte Moderno Pinault, Punta de la Aduana, Venecia

Tabla de Síntesis de las aplicaciones para tratar la sequedad

Datos	Datos complementarios	Aplicación del procedimiento URETEK
$I_p \leq 40$ <b>O</b> $MB \leq 8$	Ningún dato complementario es necesario	<b>Corriente</b>
$I_p > 40$ <b>Y</b> $MB > 8$	$CaCO_3 \geq 20 \%$ Dado un contenido de carbonato superior a 20 % (marga y arcillas margosas por ejemplo)	<b>Corriente</b>
	$\sigma'_g < \sigma'z_{v_0} + \Delta\sigma_z$ Dada una limitación de hinchamiento del terreno inferior a la limitación del cemento, más la de los terrenos al descanso	<b>Corriente</b>
	Una amplitud de hinchamiento que no es suficiente para limitar los desórdenes sobre la estructura. Este parámetro es muy variable en función de las estructuras. Para simplificar se considera el hinchamiento $Rg \leq 5\%$	<b>Corriente</b>
	Ninguno de los elemento arriba mencionados	Se necesita una nota técnica justificativa o unas pruebas complementarias

Suivant Cahier des Charges SOCOTEC: Rapport n° 10.1829 - Dossier n° FX2639/9







**URETEK**  
Soluciones Innovadoras S.L.U.

28002 MADRID  
Calle Principe de Vergara, 126  
uretek@uretek.es  
www.uretek.es

Llamada Gratuita  
 **900 80 99 33**

