

# La alteración de las pizarras ordovícicas de la ciudad de Salamanca: implicaciones geotécnicas

*Weathering of ordovician slates in the Salamanca urban area: geotechnical implications*

J. Nespereira, M. Yenes Ortega y J.A. Blanco Sánchez

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced s.n., C.P.37008 Salamanca  
e-mail: jnj@usal.es; myo@usal.es; jablanco@usal.es;

## ABSTRACT

*This paper deals with the geotechnical properties of the ordovician weathered slates outcropping in the urban area of Salamanca. Due to the mesozoic weathering, the originated profile imported characteristics of residual soils to the slates in some locations. This process has important effects on the geomechanical behaviour of these materials.*

*The slates have been tested in moisture content, granulometric analysis, liquid and plastic limit, apparent density, Proctor, permeability, compression strength and California Bearing Ratio (C.B.R.). The weathered slates are low permeability silty or clay soils with low plasticity (ML-CL); they are composed of kaolinite, illite, quartz and feldspar. According to the requirements of the Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3), this kind of slates are appropriate soils.*

**Key words:** residual soil, slates, weathering, geotechnical characterization, Salamanca

Geogaceta, 34 (2003), 39-42  
ISSN:0213683X

## Introducción

En los últimos años se ha puesto de manifiesto la importancia de los estudios de los procesos de alteración de las rocas, en especial en los campos de la geología medioambiental, ingeniería civil y geomorfología.

Los procesos de meteorización modifican la composición química, la mineralogía y, en algunos casos, la fábrica de las rocas, variando a su vez sus propiedades geotécnicas. Cada una de las diferentes etapas por las que va pasando el macizo rocoso en el proceso de meteorización tiene sus propios rasgos característicos (Tabla I; GSL, 1995).

En el entorno de Salamanca existe un sustrato de naturaleza pizarrosa en el que se ha desarrollado un perfil de alteración, cuyo principal proceso sufrido fue la caolinitización de las micas, cloritas y feldspatos primarios de las rocas, produciéndose bajo unas condiciones climáticas de tipo tropical o intertropical (Molina y Blanco, 1980). De esta manera, la transición entre la roca sana y la roca totalmente alterada es gradual, existiendo una serie de estadios intermedios entre ellas.

Aquí se estudian las propiedades geotécnicas de los materiales de mayor

grado de alteración, V-VI, en los que toda la roca ha sido afectada de manera intensa, llegando en algunos puntos a borrar parcialmente la esquistosidad original.

## Localización geológica

El sustrato rocoso del entorno urbano de la ciudad de Salamanca está formado por pizarras y cuarcitas de edad ordovícica (Llanvirn-Llandeilo), sobre las que se depositan en discordancia los materiales terciarios pertenecientes al borde occidental de la Cuenca del Duero (Fig. 1). Las pizarras forman una sucesión predominantemente lutítica, depositada en un ambiente de plataforma abierta, que representa un régimen de sedimentación muy uniforme sobre amplias áreas (Brenchley *et al.*, 1986). Durante el Mesozoico este sustrato estuvo bajo la acción de un clima tropical-intertropical, lo que generó un manto de alteración, que se fosilizó por el depósito de los materiales terciarios (Molina y Blanco, 1980).

Las características del sustrato pizarroso alterado varían en función de su grado de alteración, pero son rasgos comunes su aspecto plástico y tonos marrón-rosado, con manchas amarillentas y/o blanquecinas debido a la

presencia ocasional de óxidos de hierro. La esquistosidad generalmente se puede apreciar, aunque existen puntos en los que está borrada casi en su totalidad (Fig. 2) (Nespereira Jato, 2002)

## Análisis y resultados

### Análisis químicos

Las determinaciones tanto del contenido en sulfatos como en materia orgánica se hicieron en base a las normas UNE. Los resultados obtenidos fueron siempre negativos.

### Mineralogía

La determinación de la composición mineralógica se hizo a partir de análisis de rayos X sobre roca total. Se hicieron seis difractogramas, que reflejaron el marcado carácter arcilloso (>70%) de esta alteración, con caolinita e illita como minerales más abundantes. En menor proporción también se encuentra cuarzo y feldespato potásico. (Tabla II)

### Granulometría

Por lo que se refiere a los resultados del análisis granulométrico, el porcentaje de finos es muy alto, (>65%), mientras que la cantidad de partículas inferiores a 2 micras, tamaño arcilla, es baja (35-17%). Si comparamos este resulta-

Grado de meteorización	Término	Características
Grado I	Roca fresca	No presenta síntomas de meteorización
Grado II	Ligeramente meteorizada	La meteorización penetra por fracturas
Grado III	Moderadamente meteorizada	La meteorización penetra en la matriz rocosa
Grado IV	Muy meteorizada	La meteorización penetra toda la roca pero quedan zonas interiores inalteradas
Grado V	Completamente meteorizada	Completamente meteorizada, pero aún se reconoce estructura y textura originales
Grado VI	Suelo residual	Se han perdido la estructura y textura originales

Tabla I.- Clasificación del grado de meteorización (GSL, 1995).

Table I.- Weathering grades classification (GSL, 1995).

do con los porcentajes de la mineralogía obtenidos por difracción de R-x, que indican una naturaleza eminentemente arcillosa del material (>70% de arcilla), se demuestra una contradicción que se debe a la tendencia del material a formar agregados de partículas durante el ensayo granulométrico de sedimentación que no siempre quedan dispersados por medio de los tratamientos que para ello se indican en la Norma UNE 103102:1995.

Peso específico de las partículas sólidas y densidad aparente

El peso específico de las partículas sólidas fluctúa entre 2,81 y 2,66 (Tabla III), mientras que los valores de densidad aparente se sitúan en torno a 2,21 gr/cm<sup>3</sup>. Esta última propiedad refleja claramente el proceso de alteración sufrido, ya que la densidad aparente es inferior a la que se espera en este tipo de rocas cuando están sanas, entre 2,56 y 2,68 gr/cm<sup>3</sup> (Jiménez Salas y Justo Alpañes, 1975). Por otro

lado, el peso específico de sus partículas sólidas no es más que el reflejo de la composición mineralógica anteriormente señalada, ya que el valor para la caolinita es de 2,64, situándose el de la illita entre 2,60 y 2,86. El valor medio obtenido es de 2,71 (Tabla III).

Plasticidad

El aspecto plástico que presentan estos materiales en campo hace que la determinación de sus límites de Atterberg sea de especial interés a la hora de identificarlos y clasificarlos. Los valores obtenidos sitúan la media del límite líquido en 40,36%, al límite plástico en 24,21% y el índice de plasticidad en 16,15%. En la figura 3 aparecen representados todos los valores obtenidos.

Estos datos permiten clasificar a los materiales como suelos ML-CL, arcillas-limos de baja plasticidad, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).

Compactación

El ensayo Proctor ofrece unos valores de densidad seca situados entre 1,59 y 1,57 gr/cm<sup>3</sup>, para unas humedades óptimas entre el 21 y el 19%.

Potencial de Hinchamiento

Dada la naturaleza arcillosa de las muestras se decidió realizar varios ensayos Lambe para determinar su potencial de hinchamiento. La mayoría de ellos situaron a las pizarras alteradas dentro del

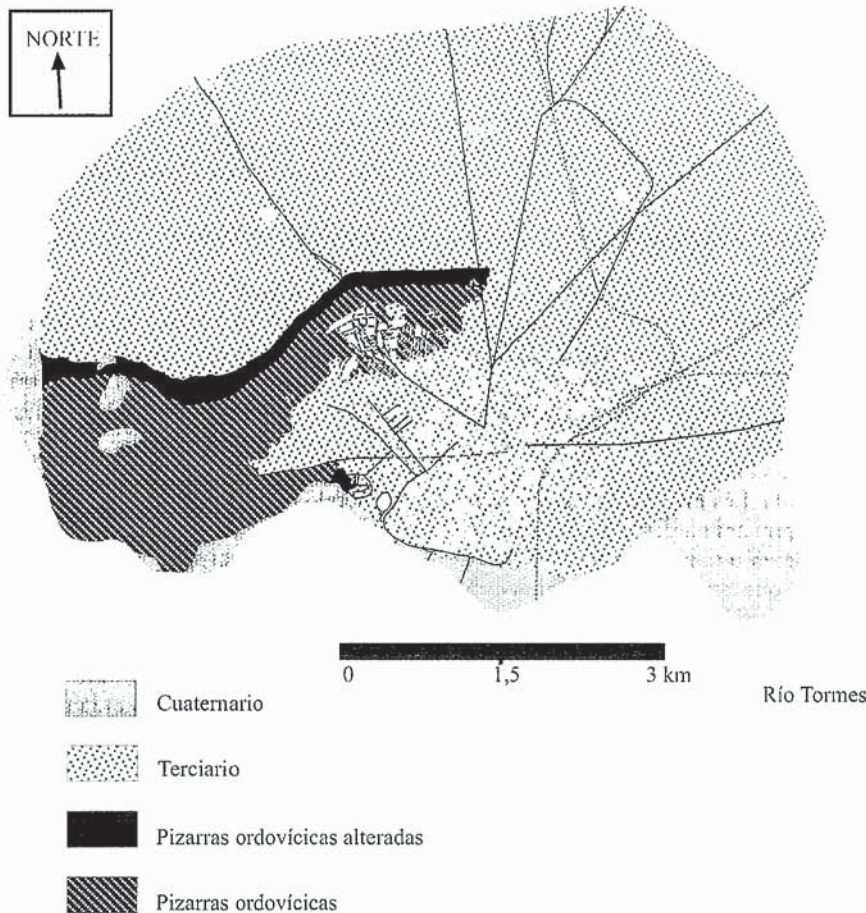


Fig. 1.- Esquema geológico de Salamanca

Fig. 1.- Geological sketch of Salamanca urban area

Mineralogía	%
Cuarzo	19
Feldespato	6
Illita	37.5
Caolinita	37.5

Tabla II.- Interpretación cuantitativa de los difractogramas de rayos X

Table II.- Quantitative interpretation of X-ray diffractograms

grupo de los suelos con un potencial de hinchamiento no crítico, aunque hubo alguna muestra que dio valores que corresponden a un potencial marginal. Si bien el aspecto plástico y arcilloso de estos materiales lleva a pensar en la posibilidad de que se produzcan fenómenos de expansividad, los análisis mineralógicos y de potencial de hinchamiento manifiestan lo contrario. La expansividad se produce en las arcillas que tienen una elevada tendencia a alojar en su estructura moléculas de agua, lo que provoca el hinchamiento del suelo. Las arcillas presentes en las pizarras alteradas son caolinitas e illitas, ambas con baja tendencia a incluir moléculas de agua y por tanto poco hinchables.

#### Permeabilidad

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se empleó el permeámetro de carga variable, debido a los bajos valores esperados en estos materiales. La muestra se compactó a la máxima densidad Proctor (1,59 gr/cm<sup>3</sup> para una humedad del 21%). El valor del coeficiente de permeabilidad (k) obtenido es muy bajo, del orden de 10<sup>-6</sup>cm/s. Corresponde a materiales de permeabilidad baja (Custodio *et al.*, 1983). Es de esperar que la permeabilidad *in situ* de estos materiales, incluso en zonas con un grado de alteración inferior sea aún menor, ya que la compacidad será algo mayor que la conseguida en laboratorio. Además, las posibles zonas de circulación de agua, las zonas de fractura, van a estar rellenas del material arcilloso y plástico que se forma desde un primer momento en el proceso de alteración.

#### Resistencia a compresión simple

Para el estudio de la resistencia a compresión simple se hicieron ensayos de carga puntual en laboratorio (ensayo PLT o Franklin). Se trata de un ensayo típico de rocas, lo cual parece un poco contradictorio dada la naturaleza de los materiales estudiados. Sin embargo, la



Fig. 2.- Aspecto de campo de las pizarras alteradas

Fig. 2.- Appearance of the weathered slates

ambigüedad de sus características (aspecto y propiedades de un suelo, pero aparentemente elevada resistencia) nos llevó a pensar en lo oportuno de su realización.

Los valores máximos de resistencia obtenidos fueron muy bajos, inferiores a 10 kN/m<sup>2</sup>. El análisis crítico del ensayo y de los resultados nos lleva a concluir que en este tipo de materiales su aplicación no es válida, ya que las tipologías de las roturas que se producían no afectaban a todo su diámetro, sino que se escalonaban en intervalos comprendidos entre dos superficies de esquistosidad. Así, los valores de D y W, distancia entre los puntos de aplicación de la carga y ancho de los bloques, en la rotura no guardan la relación requerida por la norma para que este ensayo tenga validez (Norma UNE 22950-5:1990).

Por otro lado, los ensayos de compresión uniaxial marcan unas resistencias entre 174 kN/m<sup>2</sup> y 3000 kN/m<sup>2</sup> (Informes Geotécnicos Universidad de Salamanca), valores muy bajos para una roca y que

vienen a confirmar que el ensayo PLT no es aplicable para este tipo de materiales.

#### California Bearing Ratio (C.B.R.)

Con vistas a clasificar estos materiales desde el punto de vista de su aprovechamiento como materiales para terraplenes se llevó a cabo el ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio). No se observaron hinchamientos apreciables, obteniéndose unos valores del C.B.R. entre 13 y 20%.

#### Clasificación de las pizarras alteradas según el PG-3

El PG-3 Ministerio de Obras Públicas, 1973) da una serie de características a partir de las cuales se evalúa la calidad y posible aprovechamiento de los materiales para obra civil. Dichos requisitos se recogen en la tabla IV.

Con los resultados obtenidos en nuestros ensayos: tamaño máximo menor de 8 cm, pasa por el tamiz 0,08 UNE más del 65%, LL 36,17, densidad máxima 1,57, C.B.R. entre 12 y 21; podemos concluir

	W (%)	% Ar	% Finos	% Arc	LL	LP	IP	D.ap	D.d	Gs	e	Sr (%)
Máx.	19,5	12	73	35	62,2	33,1	51,2	2,29	1,99	2,81	0,647	100
Media	16,36	7	69	24	40,36	24,21	16,15	2,18	1,87	2,71	0,433	97,7
Mín.	14,79	0	65	17	21,8	11	6,9	2,02	1,64	2,66	0,358	85,5

Table III.- Propiedades físicas de las pizarras alteradas. W: humedad; Ar: tamaño arena, de 2 a 0,06 mm; Finos: tamaños menores a 0,06 mm; Arc: tamaño arcilla, menores a 0,002 mm; LL, límite líquido; LP, límite plástico; IP, índice de plasticidad; D.ap: densidad aparente en gr/cm<sup>3</sup>; D.d: densidad seca en gr/cm<sup>3</sup>; Gs: peso específico de las partículas sólidas; e: índice de poros; Sr: grado de saturación.

Table III.- Physic properties of weathered slates.. W: moisture content; Ar: sand size, from 2 to 0.06mm; Finos: sizes below 0,06mm; Arc: clay size, below 0.002mm; LL, lliquid limit; LP, plastic limit; IP, plasticity index; D.ap: aparent density gr/cm<sup>3</sup>; D.d: dry density gr/cm<sup>3</sup>; Gs: specific gravity; e: void ratio; Sr: saturation.

	Seleccionado	Adecuado	Tolerables	Inadecuados
Tamaño máximo (cm)	<8	<10	No se especifica	Si no se pueden
% Pasa tamiz 0.08UNE	<25	<35	No se especifica	incluir en las
Plasticidad	LL<30; IP<10	LL<40	LL<40 ó IP> (0,6LL-9)	categorías anteriores, o bien
Densidad máxima (t/m3)	No se especifica	>1,75	>1,45	sean perecederos e insalubres
C.B.R. (%)	>10 no hincha	>5 hinchamiento <2 %	>3	
Materia orgánica (%)	<	<1	<2	

Tabla IV.- Propiedades geotécnicas para materiales de terraplenes según el PG-3

Table IV.- Geotechnical requirements for landfill materials. PG-3

que la alteración de mayor grado de las pizarras ordovícicas de la ciudad de Salamanca genera materiales tolerables.

**Conclusiones**

Las pizarras ordovícicas que forman parte del sustrato rocoso de la ciudad de Salamanca sufrieron en el Mesozoico una serie de procesos de alteración que dieron lugar a cambios importantes en sus propiedades geotécnicas, pasando a tener características más propias de un suelo que de una roca.

El producto de esta alteración es un material arcilloso, compuesto por

caollinita e illita, que desde el punto de vista geotécnico puede clasificarse como un suelo residual, de tipo ML-CL. Pese a su elevado contenido en arcillas, la naturaleza mineralógica de éstas hace que el potencial de hinchamiento sea muy bajo, como así han demostrado los ensayos Lambe llevados a cabo.

Los bajos valores de densidad aparente obtenidos son debidos a los cambios mineralógicos y estructurales generados por la alteración, que dan lugar a un material mucho menos denso.

Otra de las propiedades geotécnicas que se ve claramente afectada por la alte-

ración es la resistencia a compresión simple. Los resultados obtenidos se alejan mucho de los esperados para un material rocoso de naturaleza pizarrosa, situándose más próximos a los de un suelo duro.

En cuanto a la posibilidad de reutilizar estos materiales para la construcción de terraplenes, y en base a los requerimientos que para ello se especifican en el PG-3, las pizarras ordovícicas alteradas de la ciudad de Salamanca se encuentran dentro del grupo de los materiales tolerables. Por lo tanto, podrían ser empleados en la construcción del núcleo, cimientto y coronación de un terraplén, aunque para esta última zona sería necesario un tratamiento estabilizador con cal o cemento.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación "Estudio integrado del medio natural del área urbana de Salamanca y de su zona de expansión. Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión del medio urbano" (SAO96/03), financiado por la Junta de Castilla y León, y durante el disfrute de una beca de Complemento de la Universidad de Salamanca por parte de J.Nespereira.

**Referencias:**

AENOR (1999): Geotecnia: Ensayos de campo y de laboratorio. Normas UNE.  
 Brenchley, P.J., Romano, A., Gutiérrez-Marco, J.C. (1986): *Can. Soc. Petrol. Geol.*, Memoir 11: 241-255  
 Custodio, E. y Llamas, M.R. (1996): *Hidrología subterránea*. Tomos I y II, 2ª Ed. Omega. Barcelona.  
 González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002): *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid.  
 GSL, (1995): *Q.J.Engng Geol.* 28, 207-242  
 Jiménez Salas, J.A. y De Justo Alpañés, J.L. (1975). *Geotecnia y cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas*. Editorial Rueda. Madrid  
 Ministerio de Obras Públicas (1976). PG-3 / 75. Serie normativas. Instrucciones de Construcción.  
 Molina, E., Blanco, J.A. (1980). *C.R.Acad. Sci., Paris*, 290, 1293-1296  
 Nespereira Jato, J. (2002) Tesis de Master, Universidad Complutense de Madrid.

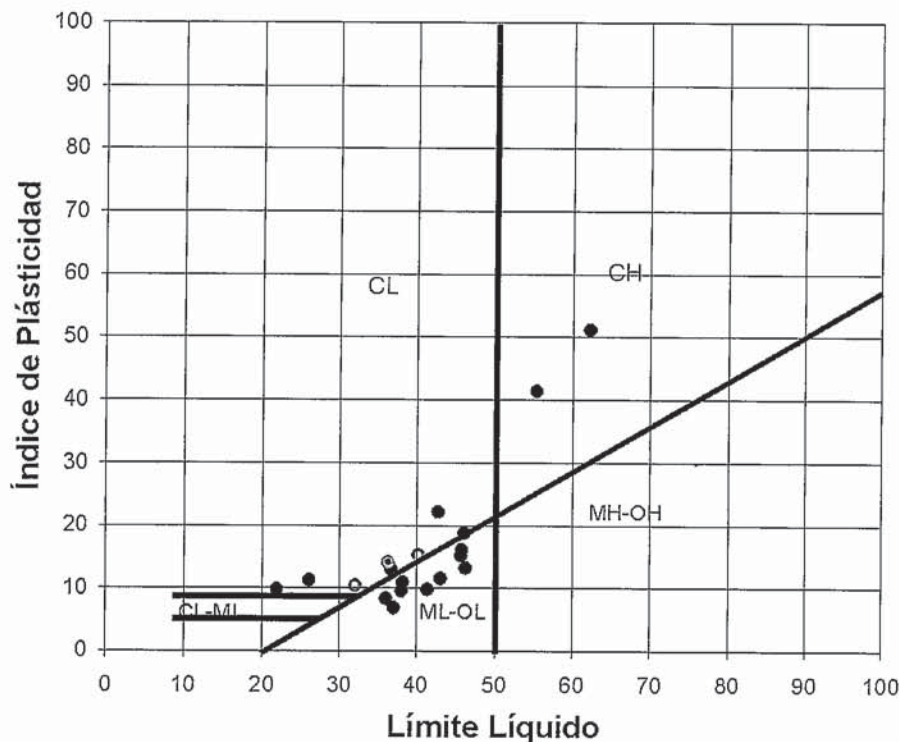


Fig. 3.- Pizarras alteradas en el gráfico de Casagrande

Fig. 3.- Weathered slates in Casagrande's graphic