

IMPORTANCIA DEL TRANSPORTE PREFERENCIAL EN LA ZONA NO SATURADA (ZNS)
Y LA FORMACIÓN DE FISURAS EN RESIDUOS MINEROS

R.L. RODRÍGUEZ^{1, 2)}, L. CANDELA⁽²⁾, A. LLORET⁽²⁾ y A. LEDESMA⁽²⁾

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.⁽¹⁾
Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. ETSICCP⁽²⁾

RESUMEN

En este trabajo se muestran los resultados de una campaña de ensayos de caracterización física del residuo metalúrgico de una de las fábricas de la industria cubana del níquel, que se encuentran acumulados en una presa de residuos (*tailings dam*) sobre las terrazas del río Moa. La caracterización se realizó en condiciones saturadas y no saturadas, con el objetivo de determinar aquellas propiedades que afectan al flujo tanto en la zona saturada, como en la no saturada y a la formación de fisuras, como paso previo al posterior estudio del transporte de contaminantes.

PALABRAS CLAVES

Cuba, minería, succión, histéresis, metales pesados. zona no saturada

ABSTRACT

The paper presents a preliminary study on some physical properties of a metallurgical residual waste from a cuban nickel factory. The waste is dispo-

sed of in a embankment close to Moa river. The objective of this work is to evaluate the material properties that could be relevant to the seepage conditions on the unsaturated zone. Crack produced by dissecation are also considered to be important in this problem.

A series of hydro-mechanical laboratory tests have been performed in order to characterise the material in saturated and unsaturated conditions . this is past of an ongoing research project as a first step to study the flow and transport of pollutants trough an unsaturated and cracked soil.

KEY WORDS

Cuba, mining, suction, metallurgic, heavy metals, unsaturated zone

1. INTRODUCCIÓN

En el presente siglo como resultado de la revolución científico técnica y el desarrollo industrial, la zona no saturada (ZNS) ha sido afectada por el vertido de diferentes tipos de residuos ricos en elementos contaminantes, en los que juegan un papel predominante los que resultan de los trabajos mineros y metalúrgicos. En materiales poco permeables, una correcta identificación del flujo en la ZNS es absolutamente necesaria para evaluar el efecto de lixiviado de contaminantes. El flujo preferencial, originado por macroporos puede ser el responsable de la contaminación detectada en los acuíferos.

Como ya es sobradamente conocido, la ZNS es de vital importancia en el estudio de la contaminación de los acuíferos, pues esta constituye la barrera de protección natural contra la contaminación, dado que muchos contaminantes quedan retenidos o son degradados en su recorrido hacia el acuífero. Los procesos de transporte y flujo a través de este medio han sido ampliamente estudiados en los últimos años, como se puede ver en un gran número de publicaciones realizadas (Freeze, 1971; Niels, *et al.*, 1986; Varela y Carrera, Samper, en Candela y Varela, 1993). La mayoría de estos estudios se centran en el análisis del transporte de contaminantes a través de la ZNS considerado como un medio poroso, basados en la ecuación de Richards y modelos de transporte acoplado. En la mayoría de los casos, el estudio de la infiltración no tiene en cuenta la presencia de procesos de histéresis (la relación entre la tensión de succión y la humedad del suelo, que no es única), ni la existencia de flujo preferencial (Van Dam *et al.*, 1996). Los resultados experimentales muestran que un porcentaje muy importante de la contaminación se produce a través de flujo preferente, cuyo origen se asocia a la presencia de fisuras o cambios en la conductividad hidráulica. Existen diversos trabajos experimentales de campo cuyo objetivo ha sido valorar los efectos de transporte preferencial sobre la masa total del contaminante transportado, pero pocos abarcan el estudio de dichos procesos en el laboratorio por las dificultades que encierran

la representación de la variabilidad espacial (Freeze, 1971, Samper, 1991, Van Dam *et al.*, 1990, Saxena *et al.*, 1994).

La industria minera se ha caracterizado por la generación de procesos contaminantes por cambios de pH y la presencia de metales pesados (Freeze y Cherry, 1979), asociados a los residuos derivados de los procesos de beneficio, tratamiento y extracción de minerales. Entre ellos, cabe destacar la formación de las denominadas presas de cola (*Tailings Dam*), constituidas por los residuos procedentes de las plantas metalúrgicas y las escombrosas, formadas por los denominados estériles de las minas. Generalmente la granulometría del material que forma las presas se sitúa en la fracción arcillo-limosa, siendo habitual la presencia de histéresis y la formación de fisuras verticales por los efectos de la desecación del material. La formación de las grietas en las presas depende de la composición mineralógica, de las condiciones climatológicas (temperatura y precipitaciones) y de la vegetación (Morris *et al.*, 1992), pudiendo actuar como caminos preferenciales para la circulación del flujo y transporte de los contaminantes a través de la ZNS hacia los acuíferos.

En esta comunicación se presentan los resultados de una campaña de ensayos de caracterización del residuo de las presas arriba mencionadas con el objeto de analizar, aquellas propiedades que afectan el flujo tanto en la zona saturada, como en la no saturada y la formación de fisuras, como paso previo al posterior estudio del transporte de contaminantes a través de la ZNS.

2. ZONA DE ESTUDIO

La industria cubana del níquel ubicada en el noreste de la provincia de Holguín (Moa. Cuba), realiza desde 1963 con una planta y a partir del 1986 con dos, los procesos mineros y metalúrgicos para la extracción de concentrado de níquel y cobalto. Estos procesos generan grandes volúmenes de residuos, que al culminar el proceso son mezclados, diluidos en agua y transportados por tuberías en forma de líquido viscoso hasta las presas de residuos (presas de cola), ubicadas en las terrazas del río Moa. En la actualidad existen dos presas de residuos que ocupan un área de 6 km² y una altura media de 6 m, en las que se vierten unas 5200 t/día de residuo (un promedio de 60 l/s) con un contenido medio de 60% de agua y 40% de sólidos. Es de destacar que la humedad de los residuos de las presas es muy variada con valores que oscilan entre un 20 a un 50% según las diferentes áreas de las presas. La variación se debe a que el vertido del residuo se realiza de forma puntual, lo que da lugar a que en los embalses se presenten áreas totalmente saturadas y en otras no (Heredía, 1980).

En los residuos de estas presas se ha detectado la presencia de fisuras en la superficie que alcanzan profundidades superiores a los 20 cm y de hasta 5 cm de ancho, aspecto este que favorece la infiltración de las aguas meteóricas

y con ello el proceso de circulación de los contaminantes hacia el acuífero de las terrazas del río Moa.

Las presas, ubicadas sobre las terrazas del río Moa, al parecer son las responsables de la contaminación de las aguas subterráneas, habiéndose detectado las concentraciones de: Ni = 0.01-0.05 mg/l, $SO_4 = 400 - 3000$ mg/l, Mn = 2.2 - 7 mg/l, Cr = 0.2 - 1.7 mg/l, Fe = 0.6 - 5 mg/l (Proenza *et al.*, 1994), siendo los valores en las zonas del acuíferos no contaminadas sensiblemente inferiores.

Climatológicamente el área se caracteriza por precipitaciones medias superiores a los 1800 mm, sobrepasando en algunos años los 2000 mm, la temperatura media anual es de 27 grados, la evaporación 1600 mm y la media de la humedad relativa es de 86% (Tellez, 1995).

El estudio se ha realizado a partir de muestras de material sólido procedentes de una presa de residuos mineros con el objeto de determinar las propiedades que intervienen tanto en la formación de fisuras como del flujo, para posteriormente dilucidar los procesos que conducen a la contaminación.

El material esta compuesto por partículas minerales tratadas mediante el proceso de lixiviación con carbonato amoniacal para la extracción de óxido de níquel y cobalto, secado a altas temperaturas con la adición de petróleo, lo que le confieren un característico color negro.

3. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

3.1. Propiedades mineralógicas, químicas, físicas e identificación

La determinación de la composición mineralógica del residuo se efectuó mediante difracción de RX, y la concentración de los metales pesados por absorción atómica (tabla 1).

Tabla.1.
Composición mineralógica y metales pesados presentes

Minerales	Densidad g/cm ³	Formula	Elemento	Concentración en ppm
Magnetita	5.20	Fe ²⁺ +Fe ³⁺ +O ⁴	Fe (total)	430-500
Mannesoferrita	4.88	MgFe ₂ O ₄	Cr (total)	30-50
Mannesicromita	4.52	Mg Cr ₂ O ₄	Mn(total)	8
Cromita	5.02	Fe ³ Cr ₂ O ₄	Ni (total)	15-20
Hematita	5.254	Fe ₂ O ₃	Co (total)	3
Cuarzo	2.65	SiO ₂	Cu (total)	0.5

Tabla 2.
Concentración de sales por litro de agua en el extracto de pasta saturada

Parámetro determinados	Valor	Método
K	23.8 ppm	Fotometría de Llama
Na	145.8 ppm	Fotometría de Llama
Mg	1012.9 ppm	Absorción atómica
Ca	33.2 ppm	Absorción atómica
Cl	212.6 ppm	HPLC
SO ₄	307.2 ppm	HPLC
HCO ₃	292.8 ppm	Volumétrico visual
NO ₃	3387.1 ppm	HPLC
NO ₂	8.2 ppm	HPLC
P	3.1 ppm	HPLC
N	2.9 ppm	Volumétrico visual
Materia orgánica oxidable(MO)	1.6 %	Volumétrico electroquímico
C. E a 25 o	7.7 ds/m	Conductivímetro
pH	7.2	Potenciometro
S.A.R Relación absorción de Na	0.97	Cálculo aritmético
Humedad de saturación	51%	Mecánico - volumétrico

La composición química de las sales del residuo se determinó a partir del extracto en pasta saturada, calculándose la concentración de iones disueltos en el agua y los parámetros que se relacionan en la tabla 2.

Como se puede observar el residuo está compuesto prácticamente por minerales muy ricos en metales pesados e hierro, siendo este ultimo el que le confiere marcadas características magnéticas. La elevada concentración de materia orgánica se debe a la presencia de alifáticos derivados de la combustión del petróleo. Debido al contenido en metales pesados el residuo se encuentra dentro de la lista número dos de sustancias contaminantes de CEE (DOGC 1776 del 28-07-1993). Es de destacar, que no se detectó la presencia de cromo hexavalente.

La granulometría se realizó por el método de sedimentación y mediante técnica láser (figura 1). A partir de los resultados del láser se obtuvo que el diámetro medio de las partículas es 4.28 micras, el 92 % del material presenta una granulometría con diámetro inferior a 200 micras, tiene una superficie efectiva (Se) de 0.83 m²/g y una superficie volumétrica (Sv) de 2.61 m²/cm³.

Las curvas obtenidas por ambos métodos no son idénticas (figura 1), esta diferencia puede deberse a la formación de agregados durante el proceso de sedimentación a causa del carácter magnético del residuo. Según la distribución granulométrica el material se clasifica como un limo. Las densidades del material y sus límites de Atterberg se muestran en la tabla 3. Los valores de la densidad seca corresponden a muestras inalteradas.

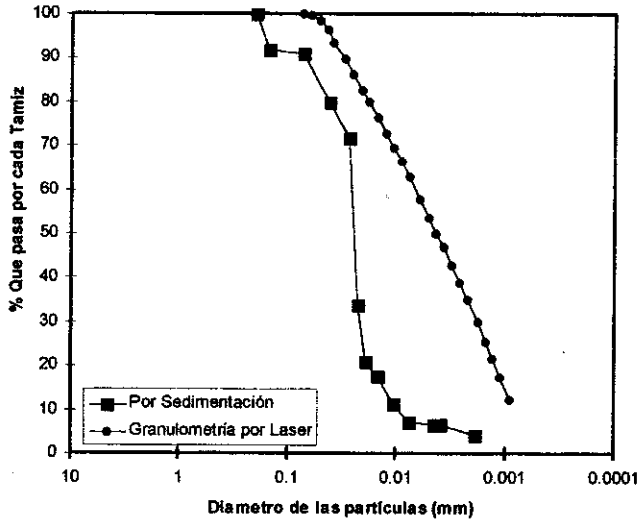


Fig. 1. Curva granulométrica.

De acuerdo con los parámetros que se muestran en la tabla 3, el material puede ser clasificado como un limo de bajo límite líquido (ML) y un índice de plasticidad de 4, es decir que el material es muy poco plástico en su comportamiento. El conocimiento de sus límites, índice de plasticidad y densidad son de extraordinaria importancia para la simulación de las condiciones de humedad natural a nivel de laboratorio, así como para el estudio de los procesos de secado y humedecimiento (histéresis).

Tabla 3.
Característica de densidad y límites de Atterberg.

Densidad		Límites de Atterberg	
Densidad natural *	2.1(g/cm ³)	LL	43.9 %
Densidad seca *	1.7-1.9(g/cm ³)	Lp	39.9 %
Densidad de las partículas	3.97(g/cm ³)	IP	4 %
Humedad	20 - 50 %		

* (Heredia 1980).

3.2. Permeabilidad

Las determinaciones realizadas a nivel de laboratorio corresponden a condiciones saturadas y no saturadas. La permeabilidad saturada se determinó por el método de carga constante y carga variable, comprobando que la

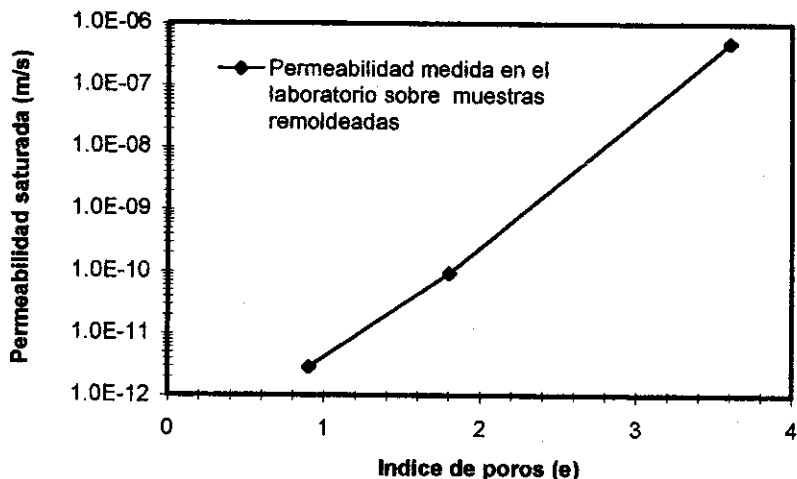


Fig. 2. Curva de permeabilidad saturada.

misma varía en función de la porosidad (n) desde $8.64 \cdot 10^{-3}$ m/día (10^{-6} m/s) para $n=62\%$ hasta $4.32 \cdot 10^{-3}$ m/día (10^{-12} m/s) para $n=42\%$ (figura 2), por lo que se clasifica como un material muy poco permeable (Custodio y Llamas, 1983).

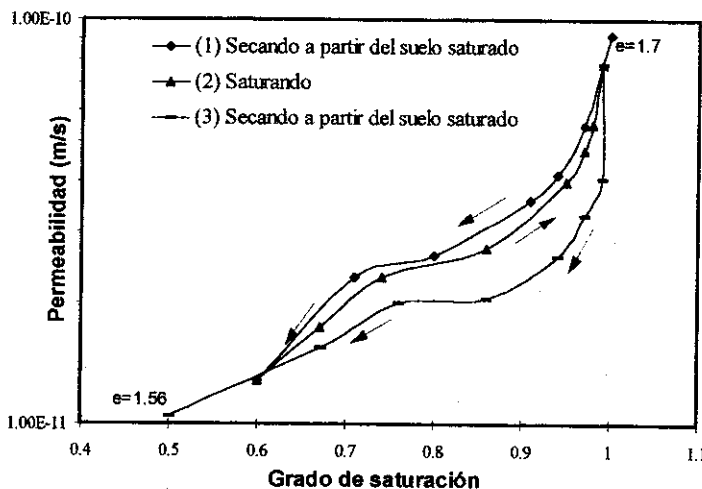


Fig. 3. Permeabilidad no saturada.

La permeabilidad no saturada se determinó a partir del ensayo edométrico con succión controlada, efectuado en una muestra de 10 mm de altura y 50 mm de diámetro con una saturación del 100% y humedad inicial del 43 %, con variaciones en el grado de saturación similares a las existentes en condiciones naturales. El equipo utilizado es análogo al de una placa de succión con control de la tensión vertical sobre el suelo (Escario y Saez, 1973). Los valores de la permeabilidad se ajustaron midiendo la evolución del volumen de agua que entra o sale de la muestra en función del tiempo cuando se cambia la succión impuesta. El ajuste se realiza utilizando la ecuación de Richards (figura 3). Se puede comprobar que la permeabilidad disminuye con la variación del grado de saturación (S_r) de 5×10^{-11} m/s para $S_r=1$ a 1.02×10^{-11} m/s para $S_r = 0.55$. Si se considera un flujo de pistón y la ausencia de absorción, los valores de la permeabilidad calculados no pueden explicar la presencia de las concentraciones encontradas en el acuífero.

3.3. Curva de retención

El estudio del flujo en los suelos no saturados exige la determinación de la curva de retención, que expresa la relación entre el contenido volumétrico de agua (la humedad natural) y la succión en dicho suelo. La succión total de agua en el suelo puede entenderse como la medida de la energía del agua (por unidad de volumen) y tiene dos componentes una de origen capilar (que viene dada por la diferencia de presión entre el aire y el líquido presente en los poros del suelo) y otra de origen osmótico.

La determinación de la succión total se ha realizado, mediante el psicrómetro tipo SMI Transistor Psicrometer. Esta técnica es útil para medir succiones comprendidas en el rango de 0.1 a 10 MPa (Lloret, 1993). Para la medida de la succión entre 0.1 y 0.9 MPa, difícil de medir con precisión con la técnica psicrométrica, se ha utilizado el edómetro de succión controlada. En este caso la succión impuesta es la capilar. Los valores obtenidos por los dos procedimientos fueron ajustados mediante la ecuación de Van Genuchten, (1978, cuya ecuación es:

$$S_r = \left(1 + \left(\frac{s}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda}$$

donde, S_r : grado de saturación, s : Succión experimental medida y λ y P_o son parámetros estimados a partir de los ajustes por mínimos cuadrados de los valores experimentales medidos según Van Genuchten 1978.

En la figura 4 se representan los valores de los resultados experimentales y los teóricos por la anterior ecuación de la succión en función del grado de saturación, para dos valores de porosidad ($n = 0.6$ $\lambda = 0.389$ y $P_o = 1.2$ MPa y $n = 0.63$ $\lambda = 0.392$ y $P_o = 0.274$ MPa). Se comprueba la existencia de un valor de saturación residual de un 6 a un 10%.

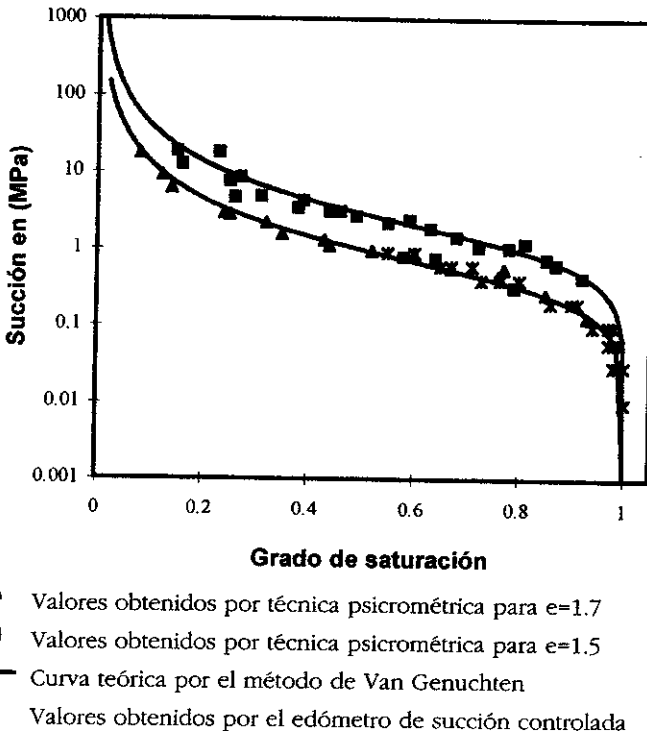


Fig. 4. Curva de retención obtenida por el edómetro de succión controlada.

La figura 5 se muestra la curva de retención obtenida a partir de los resultados del edómetro de succión controlada. Se aprecia claramente el fenómeno de la histéresis, para un mismo valor de succión durante los procesos de secado y humedecimiento se obtienen diferentes grados de saturación. que se manifiesta como resultado de la variación de volumen de poros del material. En los procesos cíclicos de secado y humedecimiento el volumen de agua que sale de la muestra nunca es igual al que entra, debido a que varían las condiciones iniciales de porosidad y el grado de saturación. El efecto de la histéresis no es más que el efecto de retardar el movimiento del agua en el suelo. En la práctica el uso de la curva de secado o humedecimiento depende del objetivo del trabajo u investigación a realizar aunque es obvio que la utilización de solo una de las rama puede conducir a errores.

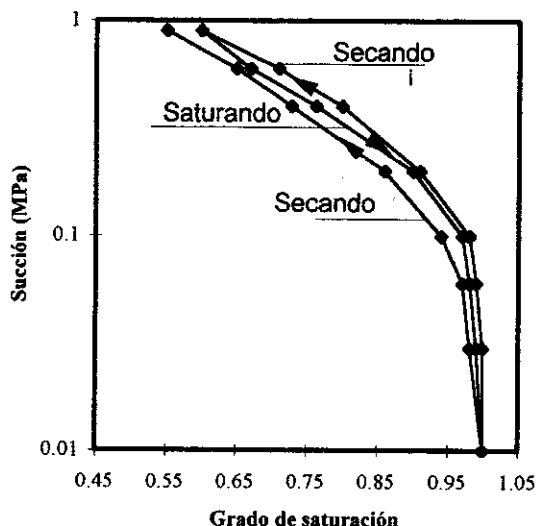


Fig. 5. Curva de retención obtenida por el edómetro de succión controlada.

3.4. Propiedades Mecánicas

El conocimiento de las propiedades mecánicas es necesario para dilucidar el comportamiento del material al variar las condiciones de humedad y densidad, indispensables para modelar el proceso de formación de las fisuras. El estudio de las propiedades mecánicas se realizó mediante ensayos de resistencia al corte, compresión simple y ensayos de tracción por el método brasileño.

En seis ensayos de resistencia al corte directo en condiciones de saturación y una densidad seca de 1.53, un índice de poros (e) de 1.65 y porosidad inicial ($n=(e/(1+e))$) de 0.62, se determinó el ángulo de fricción interna (41 a 45 grados) y la cohesión (0.01 MPa). La medida de la resistencia a la compresión simple se realizó a 25 muestras con diferentes grados de saturación, para determinar el módulo de deformación del material. El módulo de deformación alcanza su mayor valor para humedad entre el 2 y 3 %, disminuyendo rápidamente al incrementar ésta (figura 6).

La resistencia a la tracción que es uno de los parámetros más importantes en la formación de las fisuras, se realizó por el método brasileño (ASTM) en muestras con una densidad seca de 1.53 g/cm³ medida, y se comprobó que la resistencia a la tracción y la compresión simple alcanza su máximo valor para humedad entre el 25 y el 35 % (figura 7).

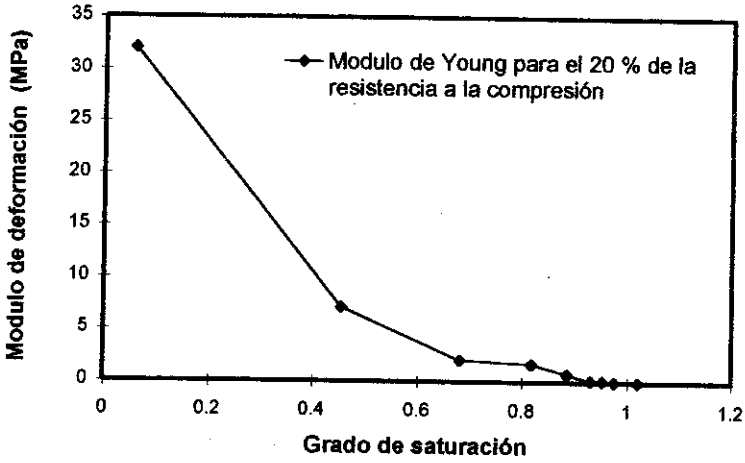


Fig. 6. Módulo de deformación.

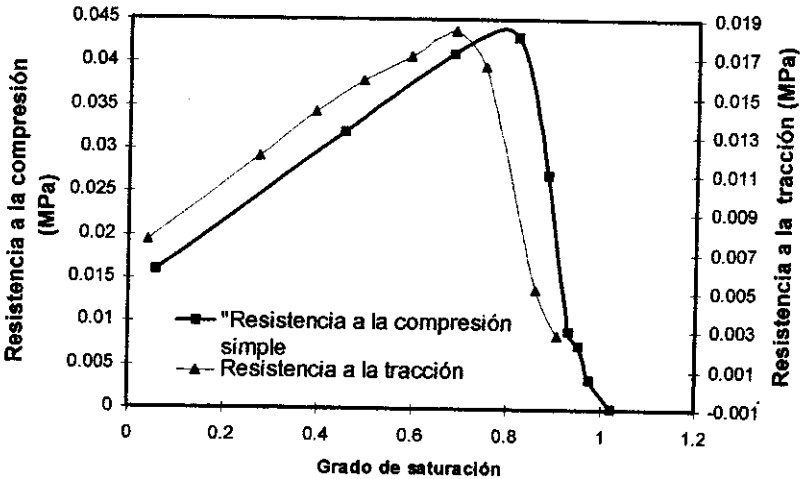


Fig. 7. Curvas de resistencia a la tracción y a la compresión.

Los resultados del ensayo edométrico con succión controlada en términos de cambio de volumen debido a cambio de succión se presentan en la figura 8. Puede observarse que el primer secado induce unos importantes cambios de volumen que no se recuperan en los posteriores humedecimientos, esta disminución de volumen ocasiona la disminución de la permeabilidad del material pues provoca la reducción de la porosidad, sin embargo si el cambio de volumen es importante puede iniciar el crecimiento de fisuras que favorecen el flujo preferencial. Después del primer secado los cambios de volumen por cambios de succión son mucho menores (figura 8).

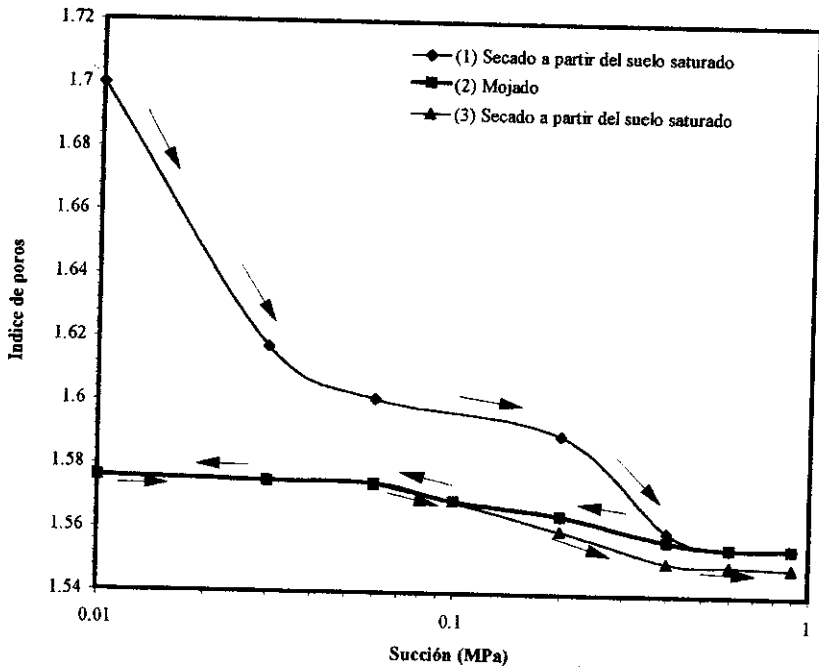


Fig. 8. Consolidación por cambio de succión.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los estudios de laboratorio muestran que el material de las presas de colas se caracteriza por una granulometría limo-arcillosa y una permeabilidad no saturada muy baja (10^{-11} m/s), condicionada por el grado de saturación y la histéresis del suelo. Según estos parámetros la presencia de contaminación en

el acuífero difícilmente podría explicarse mediante la ecuación de Richards. Sin embargo, la presencia puede explicarse si se tiene en cuenta los flujos preferenciales originados por la existencia de fisuras por desecación que se encuentran en la superficie de los embalses.

La formación de fisuras en los residuos acumulados en las presas de la industria cubana del níquel, esta favorecida por los bruscos cambios de humedad que se generan debido a las condiciones climáticas.

La formación de estas fisuras condiciona el régimen de infiltración y en casos como el estudiado en Moa, constituye una zona preferencial de flujo de indudable importancia.

Las fisuras verticales por desecación aparecen cuando las tensiones de tracción que se ejercen en un plano vertical llegan a superar la resistencia a la tracción del medio, esta resistencia a la tracción depende del contenido de agua. Las tensiones horizontales se generan por la tendencia del suelo a disminuir de volumen cuando se deseca sin coacciones. Hasta la aparición de las primeras fisuras, la deformación horizontal del suelo es casi nula, de forma que se compensa la disminución de volumen por desecación con un incremento de las tensiones de tracción. La magnitud de las tensiones de tracción están pues relacionadas con la rigidez del material y el cambio de volumen que experimenta cuando se deseca, cuanto mayores sean los gradientes verticales de humedad generados por las condiciones de evaporación en la superficie, mayores serán los gradientes de tensión horizontal y mayor probabilidad existirá para la formación de fisuras.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo forma parte de los proyectos de investigación AMB97-0859-CO2 y PD94-1024-A financiados por la CICYT.

5. REFERENCIAS

- CARRERA, J & Galarza, G. (1993). Transporte de solutos en el medio no saturado. La ZNS y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos. Eds. L. Candela y M. Varela. pp 83-110.
- CUSTODIO, E. & Llamas, M.R. (1983). Hidrología subterránea. Ed. Omega. Segunda edición. Barcelona. 1 Vol.
- DELAGE, P. (1993). Unsaturate soils. Recent developments and applications. CCEE Cours, Barcelona, June 15-17.
- ESCARIO, V. & SAES, J. (1973). Medida de las propiedades de los suelos expansivos y colapsables bajo succión controlada. Boletín de la Sociedad Española de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Nº. 6. pp1-8.
- FREEZE, R. A. y CHERRY, J. (1979). Groundwater. Ontario. Canada. 603 p.
- FREEZE, R. A. (1971), Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dams, water Resours. Res., 7(4), 929-941.

- HEREDIA, N.D.(1980):Propiedades físico - mecánicas de las colas de níquel. Una comparación. *Ingeniería Civil* 4.(4). 265-291.
- Journal Rock Mechanics Society & Geomechanics. Abstrac. vol. 15, pp 99-103. Pergomon Press Ltd. 1978. Great Britain.
- JIMENEZ, J.A. & De Justo, J.L.(1975):Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las Rocas. Editorial rueda. Madrid. 466.
- LLORET, A. (1993) Métodos de medida y aplicación de la succión en el Laboratorio. La ZNS y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos. Editores L. Candela y M. Varela. pp 122-144.
- MORRIS, P.H.,Grahan, J & Willians, D.(1992).Cracking in drying soils. *Can. Geotech J.* 29. pp 263-267.
- NIELSEN, D.R., Van Genuchten & Biggar, J. (1986) Water flow an solute transport processes in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, 22(9). pp 89-108
- PROENZA, J., BATISTA, J. & TERRERO, A.C. (1994). Utilización de técnicas estadísticas multivariantes en la valoración de la calidad de las aguas que abastecen a Moa. *Minería y Geología*. 1(2). p 29-34.
- Residuos industriales. Normativa legal vigente en Cataluña. 1993.
- RODRÍGUEZ, R. (1997).Características de un residuo metalúrgico utilizando técnicas analíticas y experimentales en el laboratorio. *Forum de Recerca y Desenvulpamen.* Manresa. Libro de Resumen pp 85-86.
- SAMPER, J. F. (1993). Transporte de solutos La ZNS y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos. Eds L. Candela y M. Varela. pp 63-82
- SAMPER, J. F. (1991). Flujo de agua y transporte de masa en el medio no saturado. Estado del arte. *CIHS. Hidrogeología, estado actual y perspectiva.* Eds. F. Angita, I. Aparicio, L. Candela M. F. Zurbano. pp 79-100.
- Interpreting non-steady state tracer breakthrough experiments in sand and clay soils using dual porosity model. *J. Hidrology*, 162: 279-298.
- TELLEZ, W.(995): Análisis de la pluviometria en el noreste holguinero y algunas consideraciones sobre el impacto ambiental en Moa. Fondo geológico ISMM. pp 49.
- VAN GENUCHTEN, R. (1978). Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with anew closed-from analytical model.
- VAN DAM, J.C, HENDRICKX, J. M. VAN OMMEN, H. C., BANNINK, M. H., VAN GENUCHTEN, M., TH. & DEKKER, L.W.(1990). Water and solute movement in a coarse - textured water - repellent fiel soil. *J. Hidrology.*,120: 359-379.
- VAN DAM, J.C., WOSTEN, J.H.M.: & Nemens, A.(1996).Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent fiel soils. *Journal of Hydrology*. 184, pp 153-173.
- VARELA, M. & CARRERA, J.(1993) Condiciones de flujo. La ZNS y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos. Editores L. Candela y Varela pp 45 62.