

Conductividad Hidráulica en Campo y Laboratorio: Desempeño de Suelos Finos en Aplicación Ambiental

Marcos MUSSO^{a,1}, Alfonso FLAQUER^b, Gonzalo BANGO^a, Leonardo LEITE^a
y Agustin MENTA^b

^a*Departamento de Ingeniería Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay*

^b*Grupo Hidrología Subterránea-IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay*

Abstract. Clayey soils have been used as liners in different infrastructure as dams, lagoons, landfills because these kinds of soils have lower hydraulic conductivity (HC). Environmental regulations demand one meter of compacted clay liners (CCL) with HC lower than 10^{-9} m/s to accept a project as urban waste landfill. In Uruguay, Libertad Formation is composed by clayey and silty clayey soils and it is widespread in southern of the country. In this research, two sites were analyzed, collecting soil samples with an auger every 0.5 m. All soils were classified as clay or silt and in laboratory the HC values varied from 10^{-6} m/s to 10^{-10} m/s. The infiltration field test values were 10^{-6} m/s to 10^{-7} m/s, higher than laboratory values. Libertad Formation could be used as liners if the soils are compacted, because the *in situ* hydraulic conductivities are higher than the allowed value by environmental regulations.

Keywords. Compacted clay liners, hydraulic conductivity, environmental protection.

1. Introducción

Los suelos arcillosos son usados como barreras poco permeables en diferentes obras de ingeniería como presas de riego, lagunas de tratamiento de efluentes, rellenos sanitarios de residuos urbanos [1]. La selección de los sitios donde se realizan estas obras requiere de una fuente de arcilla que cumplan con el volumen y desempeño exigido por el proyecto. Cuando se usan como repositorio de residuos (líquidos o sólidos) las exigencias de las regulaciones ambientales contemplan barreras compactadas de arcilla de 1m y conductividad hidráulica (CH) 10^{-9} m/s [2]. En todos los casos es necesario cumplir con dos objetivos, verificar que los suelos seleccionados cumplan con las condiciones de CH exigidas por la regulación ambiental cuando compactados y cuantificar el volumen suficiente para las obras a construir.

El efecto de la compactación en la conductividad hidráulica de los suelos fue estudiado por [3] considera que se obtiene una estructura dispersa del suelo cuando se compacta con humedad mayor a la óptima (rama húmeda) y una estructura floculada al

¹ Corresponding Author, Departamento de Ingeniería Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, JH Reissig 565, Montevideo, Uruguay; E-mail: mmusso@fing.edu.uy.

compactar con humedad menor a la óptima (rama seca). Analizando ensayos de laboratorio [4], muestran el efecto de la compactación, obteniendo valores 2 a 3 órdenes de magnitud menores de CH al compactar con humedad mayor a la óptima. Además de obtienen menores valores de CH cuando se compacta por amasado el suelo comparado con la compactación estática.

La comparación de los valores de conductividad hidráulica en campo y laboratorio en arcillas compactadas es tema de discusión. Las barreras de arcilla en campo tenían valores de CH mayores (2 a 3 órdenes de magnitud) a las CH determinadas en laboratorio [5]. Considera que entre los errores a considerar en las barreras de arcilla están: el espesor menor a 0,6 m, grietas generadas por efectos de desecación y un control inadecuado del proceso de compactación.

Evaluando el efecto de los terrones generados cuando se compacta, [6] determina que en el ramo húmedo de la curva de compactación los terrones no influyen en la CH, en cambio si lo hacen cuando el suelo está con la humedad de la región seca. Además, el efecto de la energía de compactación genera diferencias en las propiedades hidráulicas. Considera que para obtener baja CH debe compactarse con humedad mayor a la óptima y energía alta. [7] analizando 84 barreras de arcilla determinan que los factores que influyen en la obtención de CH menores a 10^{-9} m/s son: la humedad de compactación, el número de capas y el espesor de la barrera.

Otros investigadores que analizan los suelos en su condición *in situ* usan el concepto de Permeabilidad Matricial (KM), permeabilidad asociada a los microporos, para definir la conductividad hidráulica determinada en laboratorio y Permeabilidad Total (KT) para la conductividad hidráulica determinada en campo. Los estudios sobre suelos finos realizados en laboratorio confirman la baja conductividad hidráulica asociada a la KM [8-10]. Sin embargo [8, 11, 12] determinaron que pueden existir diferencias entre las conductividades hidráulicas medidas en campo (KT) respecto de los valores de laboratorio (KM). Por ejemplo, en Canadá [9] verificaron una alta conductividad hidráulica en un Till cuaternario, que se suponía menor a 10^{-10} m/s, atribuyéndole a la presencia de fracturas, pero también a heterogeneidades en el Till. Los resultados obtenidos en laboratorio son del orden de 10^{-11} m/s y en cambio los ensayos de campo son del orden de 5×10^{-9} m/s. La diferencia está en la escala de ensayo de KM que no evalúa los macroporos como grietas, fisuras o estructuras biogénicas (hormigueros, cuevas, etc.) que si se evalúa en la KT. Existen trabajos cuantificando la fracturación cuando se hacen ensayos de pequeña escala (laboratorio) o de gran escala (campo) y/o cuando se comparan ensayos de corto plazo con largo plazo [8].

En Uruguay son escasos los estudios de conductividad hidráulica en suelos finos abarcando ensayos de campo y laboratorio. La mayoría son investigaciones que usan ensayos de anillo doble en campo y de carga constante en laboratorio [13, 14].

El objetivo de este trabajo es evaluar las propiedades hidráulicas en campo y laboratorio de una unidad geológica compuesta por arcillas y limos de gran extensión en el sur de país y usada como barrera en aplicaciones para acumular agua, contener efluentes de procesos agroindustriales o residuos sólidos urbanos.

2. Área de estudio

La región sur del Uruguay está cubierta por sedimentos cuaternarios de composición limo arcillosa y arcillosa de la Fm. Libertad, con niveles decimétricos de loess, de color pardo rojizo y presenta concreciones de carbonato de calcio. El espesor es variable,

alcanzado 35m de potencia [15]. En este trabajo se seleccionaron dos sitios en el departamento de San José (Figura 1), por ser el área donde se define esta formación geológica.

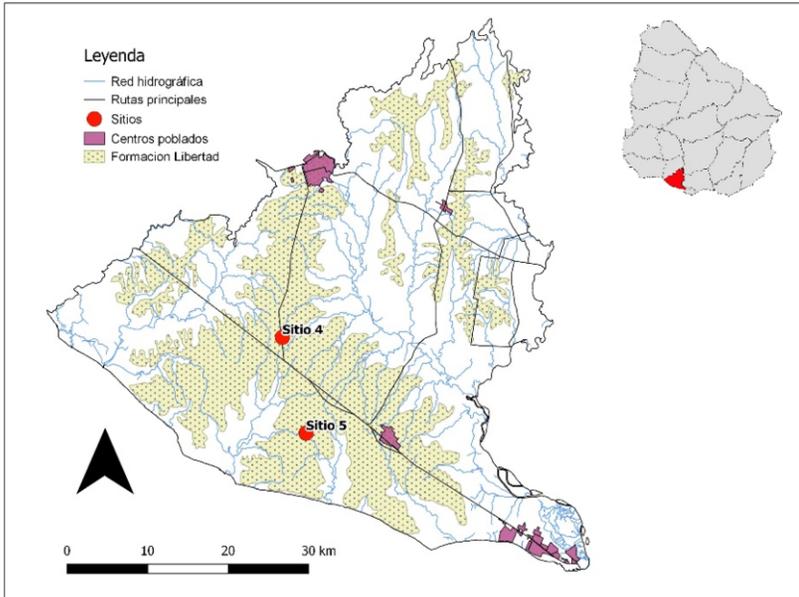


Figura 1. Área de estudio en San José, Uruguay.

3. Materiales y Métodos

Se realizaron ensayos de campo en 2 sitios. En cada sitio se realizó un pozo con taladro de 3 m de profundidad, colectando muestras disturbadas cada 0,5 m e indisturbadas a cada metro. Las muestras fueron identificadas por el número de pozo (P4, P5) y por la profundidad de donde se extrajo (1= 0,5 m; 2= 1,0 m; 3= 1,5 m; etc). Los suelos fueron clasificados según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), siguiendo la norma [16]. En las muestras indisturbadas se midieron las propiedades índices: porosidad, peso específico de los sólidos y del suelo, humedad.

Se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC pH 7) de la fracción arcillosa, a través del método de acetato de amonio. Las propiedades hidráulicas en campo se determinaron mediante ensayos de infiltración a carga constante [17] en el pozo donde se extrajeron las muestras para clasificación. En laboratorio la conductividad hidráulica se determinó a carga constante [18], compactando el suelo en las condiciones de peso específico determinado en las muestras indisturbadas.

4. Resultados y Discusión

La granulometría de los diferentes pozos se muestra en las Figuras 2 y 3, donde se observa que el porcentaje de arena es menor a 10 % en todas las muestras. Los

porcentajes de arcillas son variables entre los sitios en las diferentes profundidades muestreadas en cada sitio. El sitio 5 tiene valores de 40 % a 60 % de arcillas, en cambio el sitio 4 valores de 9 % a 25 %. Estas diferencias se resaltan en la clasificación SUCS de cada sitio, dominando la clasificación como limo de baja compresibilidad (ML) en el sitio 4 y la clasificación como arcilla de alta compresibilidad (CH) en el sitio 5 (Tabla 1). Las capacidades de intercambio catiónico de las arcillas de los sitios estudiados indican valores asociados a mezcla de minerales arcillos del grupo de las 2:1 (Illitas y Esmectitas).

Tabla 1 Textura, Capacidad de Intercambio Catiónico, Límite líquido, Índice de plasticidad y Clasificación SUCS (sd sin dato).

| Muestra | CIC ph7 (cmol/kg) | Arcilla (%) | LL (%) | IP (%) | Clasificación SUCS |
|---------|----------------------|----------------|-----------|-----------|-----------------------|
| P4-1 | sd | 20 | 42 | 18 | CL |
| P4-2 | 31,4 | 25 | 50 | 24 | CH |
| P4-3 | sd | 16 | 42 | 17 | ML |
| P4-4 | 24,1 | 22 | 49 | 21 | ML |
| P4-5 | sd | 9 | 34 | 10 | ML |
| P4-6 | 19,9 | 12 | 42 | 17 | ML |
| P5-1 | sd | 40 | 44 | 22 | CL |
| P5-2 | 21,8 | 50 | 53 | 29 | CH |
| P5-3 | sd | 60 | 56 | 35 | CH |
| P5-4 | 26,8 | 62 | 69 | 41 | CH |
| P5-5 | sd | 63 | 73 | 39 | MH |
| P5-6 | 33,2 | 62 | 45 | 21 | CL |

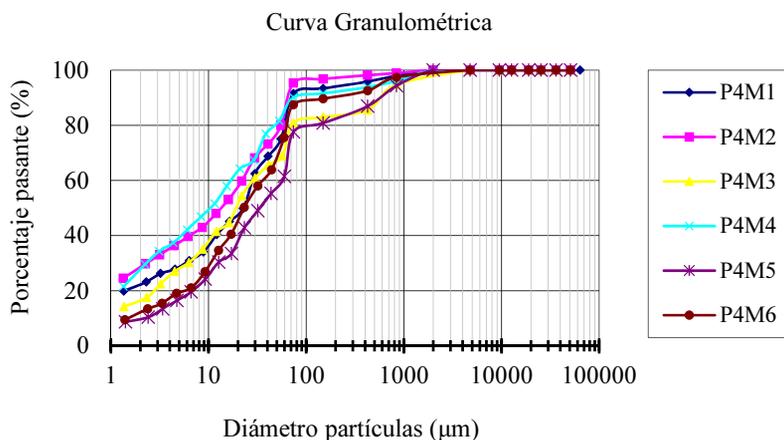


Figura 2. Distribución granulométrica suelos Sitio 4.

Se observa en la Tabla 2 que también hay diferencias en los valores de peso específico y porosidades entre las muestras de los dos sitios, mostrando cuantitativamente estructuras más abiertas en el sitio 5. Analizando en conjunto las fracciones arcillosas y la porosidad se identifica que el alto contenido de arcilla en el sitio 5 contribuye a la menor conductividad hidráulica identificada en campo respecto del sitio 4.

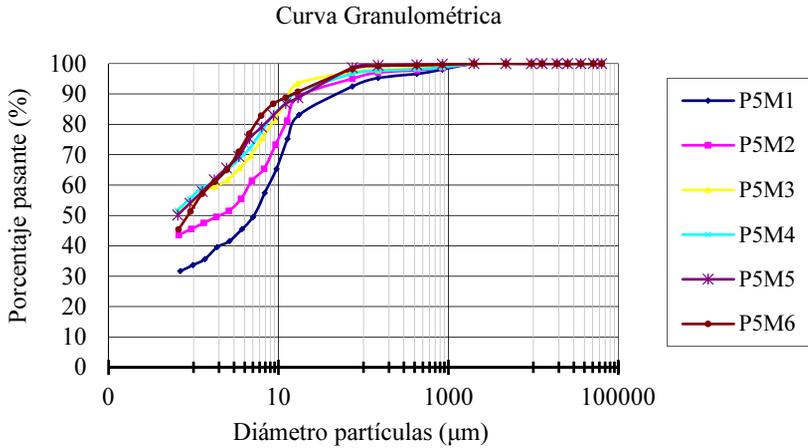


Figura 3. Distribución granulométrica suelos Sitio 5.

Tabla 2 Propiedades índice de las muestras indisturbadas.

| Muestra | Peso Específico Seco (KN/m^3) | Peso Específico Sólidos (KN/m^3) | Porosidad (%) |
|---------|--|---|---------------|
| P4-1m | 15,2 | 26,7 | 43 |
| P4-2m | 15,5 | 25,6 | 39 |
| P5-1m | 14,8 | 26,5 | 44 |
| P5-2m | 12,3 | 25,5 | 52 |
| P5-3m | 14,1 | 27,0 | 48 |

Las conductividades hidráulicas determinadas en laboratorio son variables. En el sitio 4 se obtuvieron valores de CH de 10^{-6} m/s en las muestras 2 y 5, y 10^{-10} m/s en la muestra 4. En cambio los valores de CH del sitio 5 son 10^{-10} m/s en las muestras analizadas. Los valores de CH determinados a partir de los ensayos de infiltración son del orden de 10^{-6} m/s en el sitio 4 y de 10^{-7} m/s en el sitio 5. Las variaciones en las granulometrías y porosidades entre ambos sitios podrían explicar en parte estos valores diferentes, mayor contenido de arcilla con mayor porosidad (sitio 5) compensaría el menor contenido de arcilla y menor porosidad (sitio 4). Sin embargo, se debe considerar en ambos casos los efectos de los macroporos (grietas, fisuras, bioestructuras) en la CH de campo.

La diferencia de 2 a 3 órdenes de magnitud entre la CH de campo y de laboratorio es similar a la verificada por [5] para muestras compactadas de barreras de arcilla, así como las CH determinadas en suelos *in situ* por [8, 9, 11, 12]. Los mayores valores de CH en los ensayos de campo pueden asociarse a la variación granulométrica en los niveles estudiados y al efecto de los macroporos (fisuras, grietas, bioestructuras) que pueden interceptarse al realizar una perforación de varios metros para realizar el ensayo de infiltración. Además, en laboratorio el tema de la escala de la muestra no consigue reproducir este efecto, midiendo sólo la permeabilidad matricial.

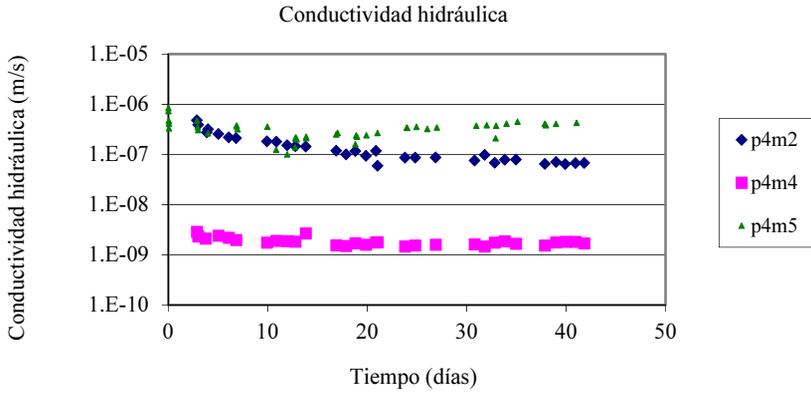


Figura 4. Conductividad Hidráulica laboratorio Sitio 4.

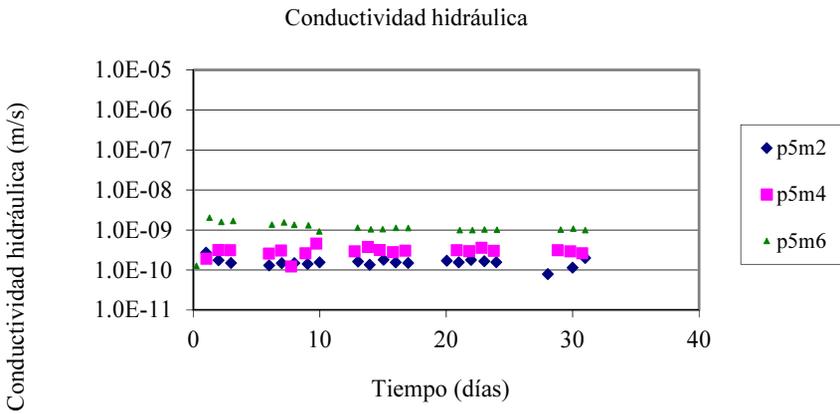


Figura 5. Conductividad Hidráulica laboratorio Sitio 5.

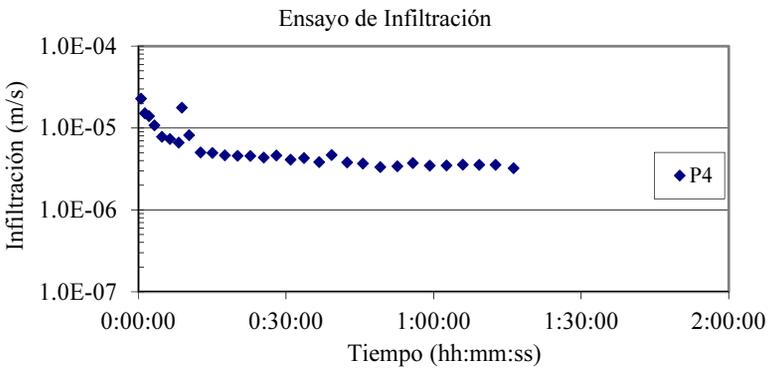


Figura 6. Conductividad Hidráulica campo Sitio 4.

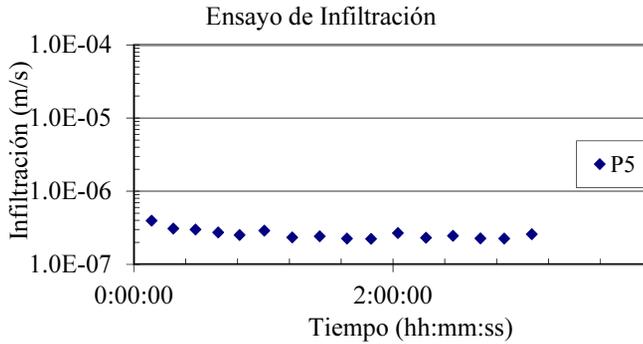


Figura 7. Conductividad Hidráulica campo Sitio 5.

Los suelos analizados pueden ser usados como barrera poco permeable si se verifican las condiciones de CH que indican las reglamentaciones ambientales, tanto en laboratorio como en campo en las condiciones de compactación adecuadas. No deberían usarse los suelos en las condiciones naturales sin un detallado estudio de infiltración en campo, porque los valores de CH encontrados en los ensayos de campo son mayores que los indicados como adecuados para uso en barreras de arcilla.

5. Conclusiones

La Fm. Libertad es una unidad geológica que al ser analizada desde la visión geotécnica es heterogénea en su composición granulométrica y en sus propiedades hidráulicas.

Las variaciones granulométricas en los sitios generan variaciones de la conductividad hidráulica medida en laboratorio. En campo la Permeabilidad Total medida en un pozo está dominada el suelo con mayor conductividad hidráulica. Los valores de conductividad hidráulica en campo son 2 a 3 órdenes de magnitud mayores que los valores obtenidos en laboratorio. En laboratorio se obtienen valores adecuados en los suelos de la Fm. Libertad para uso en barreras de arcilla. La variabilidad entre los valores de conductividad hidráulica entre campo y laboratorio refleja el efecto de los macroporos en campo.

Los suelos finos de la Fm Libertad en las condiciones de campo no son adecuados para usar como barreras de arcilla. En cambio, al compactarlas se obtienen valores aceptados por las normativas de los organismos ambientales para barreras de arcilla en fondos de lagunas de tratamiento de efluentes y de rellenos sanitarios.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Fondo Maria Viñas FMV-2014-104174-ANII-Uruguay (Agencia Nacional de Investigación e Innovación, ANII Uruguay).

Referencias

- [1] H. H. Murray. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview *Applied Clay Science*, **17** (2000), 207-221
- [2] EPA (US) Solid Waste Disposal Facility Criteria: Technical Manual. 1993. 530-R93-17.revised 1998
- [3] T.W. Lambe. The engineering behaviour of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* **84** (1958) 1-35
- [4] Mitchel J. K., Hooper, D. R. & Campanella, R. G. Permeability of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Engng Div. ASCE* **91** (1965) 41-66.
- [5] D.E. Daniel. Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *J. Geotech. Engng* **110** (1984) 285-300
- [6] D.E. Daniel. Influence of clods on the hydraulic conductivity of compacted clay. *J. Geotech. Engng ASCE* **116** (1990) 1231-1248
- [7] C.H. Benson; D.E. Daniel & G.P. Boutwell, G. P. Field performance of compacted clay liners. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125** (1999) 390 – 403.
- [8] C.K. Keller; G. Van Der Kamp; J.A. Cherry. A multiscale study of the permeability of a thick clayey till. *Water Resources Research*. **25** (1989) 2299–2317
- [9] Gerber, R. E.; Boyce, J. I.; Howard, K W.. Evaluation of heterogeneity and field-scale groundwater flow regime in a leaky till aquitard. *Hydrogeology Journal* **9** (2001):60-78.
- [10] M. Aertsens, I. Wemaere, L. Wouters Spatial variability of transport parameters in the Boom Clay. *Applied Clay Science*, **26** (2004), 37-45
- [11] G. Fortin, G van der Kamp, J.A. Cherry. Hydrogeology and hydrochemistry of an aquifer-aquitard system within glacial deposits, Saskatchewan, Canada. *Journal of Hydrology*. **126** (1991) 265-292.
- [12] B.E.J. Boldt-Lepping & M. Jim Hendry 2003 Application of Harmonic Analysis of Water Levels to Determine Vertical Hydraulic Conductivities in Clay-Rich Aquitards. *GROUNDWATER* **41** (2003) 514-522.
- [13] M.Musso, S Pereira, L. Fajardo. Conductividad hidráulica de suelos cultivados con caña de azúcar previo aplicación de vinaza. *Jornadas del Cenozoico – Sociedad Uruguaya de Geología*, 2012. Montevideo, Uruguay.
- [14] R. Rodríguez; G. Bango; A. Flaquer; M. Musso. Propiedades hidráulicas de la Fm. Libertad: Ensayos de Campo y Laboratorio. *Actas XX Congreso Argentino de Geología*, S. M. Tucumán. Argentina. 2017.
- [15] F. Precciozi, J. Spoturno, W. Heinzen, P. Rossi. *Carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. 1985
- [16] ASTM *Standart methods*. D2487 Annual Book of Standards – Soil and Rock, Building Stones, Section 4, V.04.08, ASTM Publication, Philadelphia, USA.1988
- [17] A. Azevedo & J. Albuquerque (Ed) *Ensaio de Permeabilidade em Solos - Orientações para sua execução no campo*. ABGE , Sao Pablo-SP-2013
- [18] ASTM *Standart methods*. D2434 Annual Book of Standards – Soil and Rock, Building Stones, Section 4, V.04.08, ASTM Publication, Philadelphia, USA.1988.