

2. DEGRADACIÓN ROCAS BLANDAS

2.1. Definición y comportamiento de las rocas blandas

Se define como roca blanda a aquellos materiales de origen arcilloso o limoso que presentan una marcada cementación, y cuyo comportamiento mecánico se sitúa en un punto intermedio entre los suelos y las rocas. Dentro de este grupo se incluyen las argilitas, limolitas, margas, lutitas (shales) y lodolitas. La presencia de este tipo de materiales en las obras civiles es muy común, lo que hace de especial interés el estudio de su comportamiento bajo las sollicitaciones de la obra que se pretende llevar a cabo.

La presencia de un agente cementante “pegando” las partículas de arcilla o limo, produce un comportamiento intermedio entre los característicos de las rocas y de los suelos. Por un lado, la cementación permite adquirir una mayor resistencia y rigidez, mejorando en general sus propiedades mecánicas. Por esta razón, su comportamiento se denomina comúnmente “tipo roca”. Sin embargo, los valores de resistencia que se alcanzan no son muy elevados, por lo que su comportamiento final acaba situándose en un punto intermedio entre el característico de “tipo roca” y el de “tipo suelo”.

Otra característica de especial relevancia de las rocas blandas es que son materiales muy evolutivos, ya que presentan una tendencia muy importante a modificar su comportamiento, pasando de uno cercano a “tipo roca” a uno “tipo suelo” en un corto periodo de tiempo. Esta evolución en su comportamiento mecánico se denomina degradación. El fenómeno de degradación se caracteriza principalmente por la pérdida de resistencia del material, cambios en su volumen (expansiones irreversibles), pérdida de rigidez y la aparición de fisuras por agrietamiento (pérdida de continuidad de masa) (Alonso & Alcoverro, 2004).

El comportamiento mecánico de las rocas blandas es generalizado, ya que depende de las condiciones de cada región y de su historia geológica. Además, los procesos de degradación en las rocas blandas están relacionados con la estructura del material, que depende claramente de los procesos a los que ha estado sometido a lo largo de su historia. En este sentido, Fleming et al (1970) describieron la formación y características de las rocas arcillosas con el objetivo de definir la influencia de los procesos sufridos por el material en su estructura y, consecuentemente, en su comportamiento futuro. Para ello, se basaron en el modelo de compactación gravitacional de Skempton (1964) y en el concepto de cementación diagenética de Bjerrum (1967). Fleming et al. representaron los cambios tensionales, de resistencia y de humedad sufridos durante el proceso de formación del material, tal y como se presenta en la Figura 1:

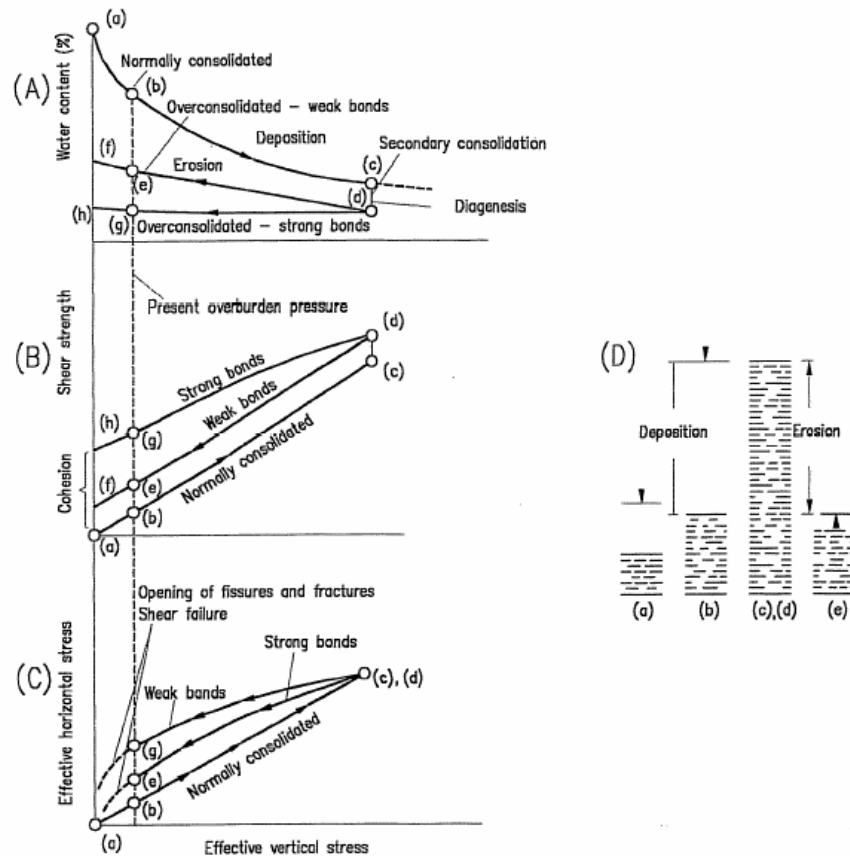


Figura 1: Historia geológica de materiales arcillosos sobreconsolidados según Fleming et al, 1970.

Inicialmente, los sedimentos son depositados, consolidándose a medida que aumenta las tensiones efectivas actuantes (trayectoria a-c). Si se dispone de minerales cementantes (normalmente CaCO_3), puede darse lugar la cementación del material, que permite un aumento de su resistencia y rigidez, junto con una disminución en su volumen (trayectoria c-d). Finalmente, cuando el material es descargado como consecuencia de la erosión o de una excavación, el material pasa a estar sobreconsolidado adquiriendo una cierta cohesión, así como una resistencia mayor a la desarrollada en su estado normalmente consolidado. Los valores finales de cohesión y de resistencia están directamente relacionados con el grado de cementación del material (trayectorias d-f y d-h), el cual, está condicionado por los factores ambientales de la región (presión, temperatura, humedad, presencia de agentes químicos)..

Tal y como justifica Bjerrum, al descargar el material, éste experimenta una cierta expansión como fruto de la liberación de la energía de deformación elástica almacenada durante la compactación. En este sentido, los materiales arcillosos menos cementados liberan más rápidamente la energía almacenada que los materiales más cementados, por lo que pueden presentar una mayor expansión. En el otro extremo, los materiales con una cementación muy fuerte pueden llegar incluso a impedir la expansión del material al ser descargado.

Por tanto, el comportamiento de las rocas blandas está muy relacionado con la historia geológica del material y, sobretodo, con el proceso de cementación sufrido.

Consecuentemente, el estudio de cada material debe hacerse teniendo en cuenta las características propias de cada material (fabrica + estructura), que dan lugar a diferentes tipos de comportamiento dependiendo del tipo de sollicitación mecánica. Además, la respuesta de los materiales frente a los procesos de meteorización que dan lugar a su degradación también estará sensiblemente sujeta a las características propias del material, como su microestructura, grado de cementación, etc.

2.2. Efectos de la meteorización en rocas blandas

Los procesos de meteorización que provocan la degradación de las rocas blandas son muy variados, incluyéndose en este grupo procesos tanto físicos como químicos. Dentro de los procesos físicos se incluyen los procesos de descarga, expansión o contracción debidas a cambios térmicos, ciclos de humedecimiento y secado, crecimiento de cristales y actividad orgánica (Mitchell, 1976). Por otro lado, se incluyen dentro de los procesos de meteorización química más importantes, según Marques et al (2005), los procesos de oxidación de minerales sulfúricos, disolución de cementos e hidratación.

Los procesos de meteorización físicos son los más relevantes, dado que sus efectos son más marcados y son los antecesores de futuros procesos de meteorización química. Los dos mecanismos de meteorización más importantes, ya que son muy usuales y sus efectos son muy rápidos, son los debidos a cambios tensionales (procesos de descarga) y los debidos a cambios en la humedad presente en el terreno (ciclos de humedecimiento y secado) como consecuencia de cambios ambientales.

Por un lado, los procesos de descarga, debidos a la erosión natural o a la excavación artificial, provocan cambios en las tensiones efectivas que actúan sobre el material. Estos cambios tensionales pueden provocar daños en el material cementante, dando lugar a una progresiva liberación de energía de deformación elástica acumulada durante el proceso de formación de la roca. La liberación de la energía de deformación elástica provoca la expansión del material, junto con la rotura de los enlaces que dan lugar a la cementación de las partículas, por lo que la deformación sufrida es no recuperable. Esta expansión puede ser muy significativa si el material incorpora minerales activos con alto potencial expansivo (p.e., montmorillonita). Por tanto, los procesos de descarga provocan un cambio en la microestructura del material, dando lugar a deformaciones no recuperables y a una modificación de las propiedades mecánicas (reducción de la resistencia y la rigidez y un aumento en la permeabilidad).

Por otro lado, los cambios en la humedad del terreno, provocados por los propios cambios ambientales naturales, inducen deformaciones irreversibles (plásticas) en el material que dan lugar a fisuras y grietas. A través de éstas, el agua puede introducirse cada vez con mayor facilidad en el terreno, incrementando los efectos provocados por la presencia de agua. Al aumentar la presencia de agua en el material a través de las fisuras, la tendencia a originarse ciertas reacciones químicas aumenta, dando lugar a una meteorización química más fuerte. Todo ello puede provocar la disolución de los materiales cementantes, causando por tanto cambios en la microestructura del material. De igual forma, los cambios de humedad debidos a los ciclos ambientales

están directamente relacionados con cambios en el grado de saturación del material, pasando de estados cercanamente saturados donde los efectos de la succión son casi despreciables, hasta estados parcialmente saturados en los cuales el efecto de la succión juega un papel muy importante en el comportamiento del material.

En resumen, la degradación en las rocas blandas se caracteriza por una alteración en sus propiedades mecánicas como fruto de cambios en su microestructura. Los mecanismos de meteorización que provocan esta alteración del material son muy variados, debiéndose tanto a procesos físicos como químicos. Sin embargo, los procesos de descarga y de cambios en la humedad provocan una degradación muy rápida del material, por lo que será de especial interés el estudio en concreto de ambos procesos.

2.3. Concepto de succión

Tal y como se ha comentado, uno de los aspectos que contribuyen notablemente a la degradación de las rocas blandas son los cambios en la humedad presente en el material. Estas variaciones en la humedad comportan cambios en las tensiones efectivas que actúan en el terreno, como consecuencia de los respectivos cambios en la succión existente en el material. En este apartado se describe este concepto de succión del material, y su relación con la humedad relativa.

En suelos no saturados se presentan tres fases: partículas sólidas, agua y aire. Sin embargo, si la presencia de agua en el suelo estuviera únicamente condicionada por la gravedad, existiría una interfaz clara entre suelo saturado y suelo seco, que correspondería al nivel freático. Por el contrario, el suelo no saturado presenta también una fase líquida. Aitchinson definió, en 1965, la succión del agua como la cantidad de energía libre de un volumen unitario de agua existente en el suelo, con referencia al mismo volumen de agua pura, en estado libre y con la misma energía potencial gravitatoria. Por tanto, la succión representa una medida de la capacidad de un suelo de retener agua, así como la mayor o menor facilidad para movilizar una cierta cantidad de agua dentro del terreno. La energía libre del agua en el suelo se puede medir en términos de la presión parcial de vapor de agua presente en la fase gaseosa existente en el suelo mediante la ley psicrométrica:

$$\psi = -\frac{RT}{M_w V_w} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right)$$

donde ψ es la succión total, R es la constante universal de los gases, T la temperatura, M_w la masa molecular del agua, V_w es el inverso de la densidad del agua, u_v es la presión parcial del vapor de agua y u_{v0} es la presión de saturación del vapor de agua en equilibrio con una superficie plana de agua pura a la misma temperatura. El cociente entre u_v y u_{v0} corresponde al valor de la humedad relativa.

La succión descrita en la fórmula anterior es la denominada succión total. Este valor de succión está formado por dos componentes: la succión matricial y la succión osmótica (Aitchinson, 1965).

Por un lado, la succión matricial o energía potencia matricial, está asociada a las fuerzas capilares existentes en el suelo. El fenómeno de ascensión capilar tiene lugar como consecuencia de la atracción entre las moléculas de agua y las partículas de suelo, así como por la tensión superficial del agua. Este fenómeno provoca que el agua ascienda a través de los poros presentes en el suelo, lo que justifica la presencia de agua por encima del nivel freático en suelos no saturados. Esta ascensión capilar del agua en el suelo dependerá del tamaño característico de los poros del suelo: suelos con poros pequeños presentarán una mayor ascensión capilar. Por tanto, en la zona del suelo que comprende la ascensión capilar, se presentan valores de presión de agua negativos respecto a la presión de aire. La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros se define como la succión matricial.

Por otro lado, en muchos casos el agua existente en el suelo no es agua pura sino que contiene sales disueltas. La presencia de sales disueltas en el agua provoca un cambio en la humedad relativa del suelo, que se denomina succión osmótica. La suma de la succión osmótica y la succión matricial nos da el valor de la succión total presente en el suelo. En la Figura 2 se describen las componentes de la succión total.

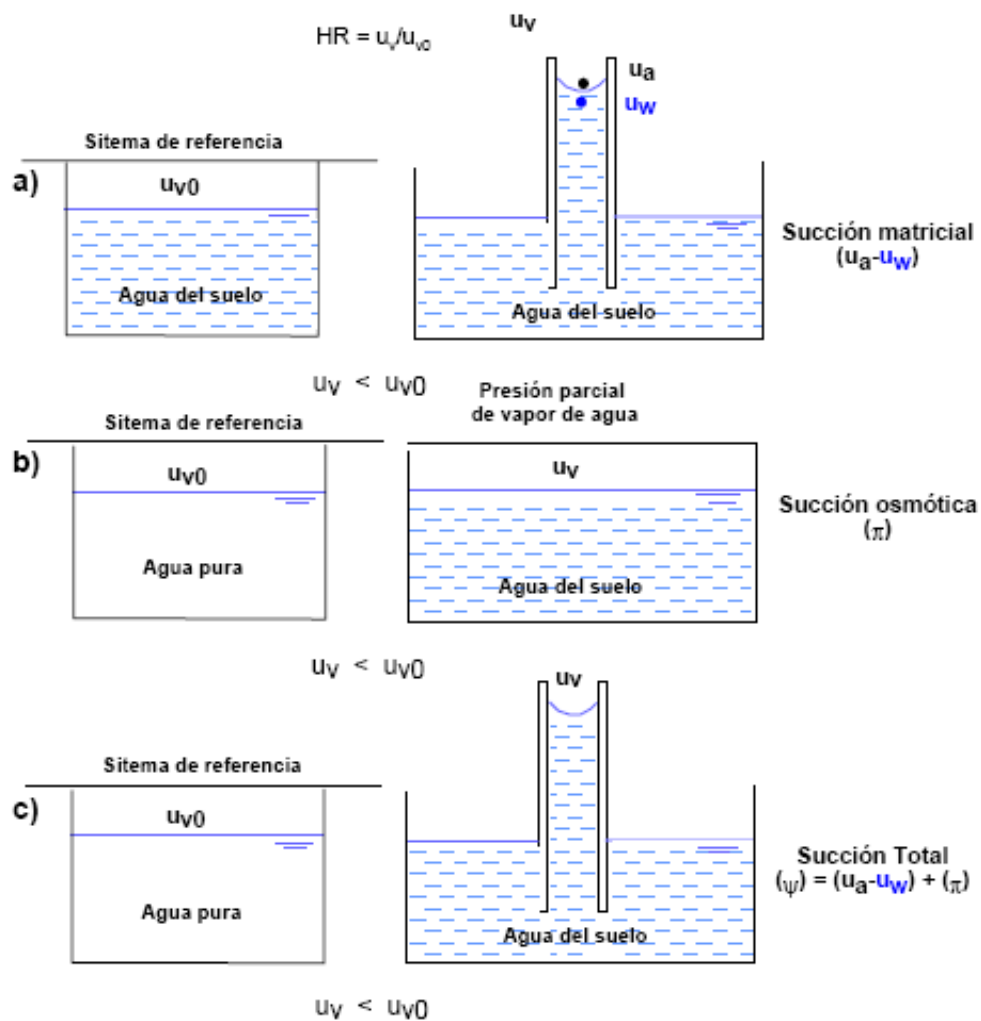


Figura 2: Succión total y sus componentes. a)-Componente matricial. b)-Componente osmótica. c)- Succión total.

La relación entre la humedad y la succión viene marcada por la denominada curva de retención de agua, que muestra la facilidad del suelo para retener y liberar agua de sus poros. Estas curvas son características de cada suelo, en función de su tamaño de poros y de su litología. La curva de retención del material representa la relación constitutiva entre el contenido de agua o grado de saturación y la succión. Esta relación viene condicionada por las propiedades propias del material, que dan lugar a una capacidad de retención y de liberación de agua determinadas. Esta capacidad de retención de agua viene definida por una cierta energía necesaria para hacer frente a la fuerza que retiene el agua en el suelo, la succión. En este sentido, la curva de retención muestra como, al disminuir la humedad del suelo, la energía necesaria para liberar más agua se hace mayor, aumentando el valor de la succión. Asimismo, la curva de retención presenta dos comportamientos diferenciados, según si se estudia el paso de estado saturado a seco o viceversa. La diferencia en la curva de retención viene condicionada por la capacidad de retención o liberación de agua en cada caso, marcada por los fenómenos de capilaridad, y se denomina histéresis. Este hecho provoca que, a igual valor de succión, el grado de saturación o la humedad sea más grande cuando el suelo se está secando.

2.4. Efectos de la meteorización por descarga y ciclos de humedecimiento y secado.

En este apartado se muestran diferentes ejemplos de estudios realizados con el objeto de estudiar y definir la degradación sufrida en rocas blandas como consecuencia de procesos de descarga y/o ciclos de humedecimiento y secado. Para ello se estudian diferentes casos observados in-situ y en laboratorio, donde se muestran los efectos de la meteorización en rocas blandas de todo el mundo. A partir de estos estudios, se puede obtener un conocimiento global del comportamiento de las rocas blandas aunque, como ya se comentó anteriormente, este comportamiento no puede ser generalizado ya que depende de multitud de factores.

a) Degradación observada en túneles

La degradación sufrida en los materiales cercanos a la excavación de túneles fue estudiada por Rejeb & Cabrera (2006). Ellos observaron las variaciones en las propiedades mecánicas e hidráulicas del shale de Tournemire (en Aveyron, Francia) debidos a la excavación de túneles

Al excavar un túnel, las distribuciones de tensiones y presiones en las cercanías a éste son fuertemente alteradas en un corto período de tiempo. Estos cambios dan lugar a deformaciones en el material que acaban provocando su degradación. Las deformaciones sufridas originan agrietamiento en la superficie de la roca cercana al túnel, disminuyendo así su resistencia y rigidez, y aumentando su permeabilidad. En este estudio se observó la formación de grietas en las paredes del túnel debidas a la descompresión del material. Además, se pudo observar que los ciclos de humedecimiento y secado provocados por cambios ambientales (variación de la

humedad relativa, HR) dieron lugar a la apertura y cierre de grietas. La zona afectada por la degradación se denominó Zona de Daño de la Excavación (EDZ), la cual alcanzó profundidades de entre 1 y 3 metros.

En la Figura 3 se muestra la relación entre la variación de la humedad relativa en la roca y los desplazamientos sufridos. Se puede observar que ambos fenómenos están fuertemente relacionados, con lo que se confirma la influencia de la humedad relativa (o la succión) sobre la rigidez.

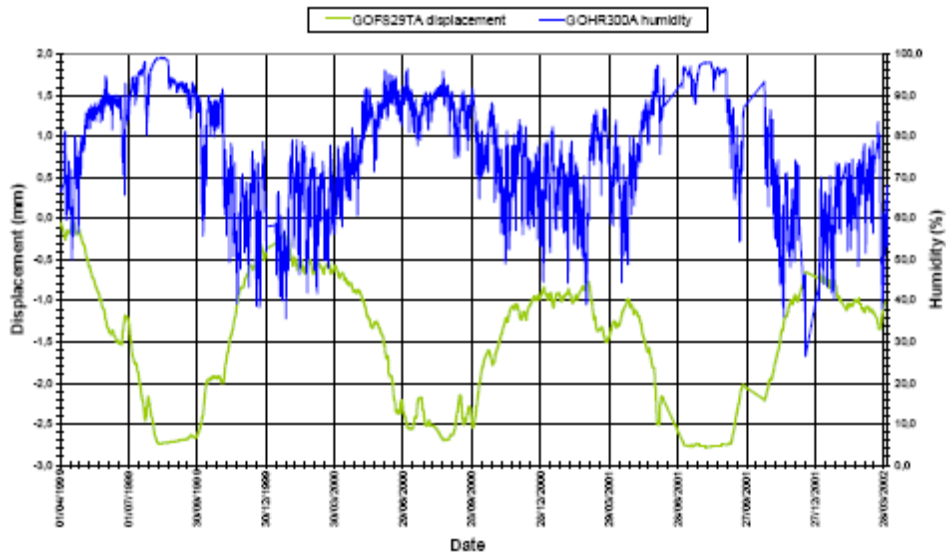


Figura 3: Variación de la humedad relativa y desplazamientos asociados. Rejeb & Cabrera, 2006.

En la Figura 4 se muestra la variación de las propiedades del material dentro de la EDZ. Se observa que la velocidad de onda de compresión (V_p) disminuye sensiblemente en las proximidades del túnel y se mantiene al aumentar la distancia a éste (ver Figura 4a). Por otro lado, en la Figura 4b se observa un aumento de la permeabilidad y una disminución del grado de saturación en la EDZ, como consecuencia de la aparición de las grietas.

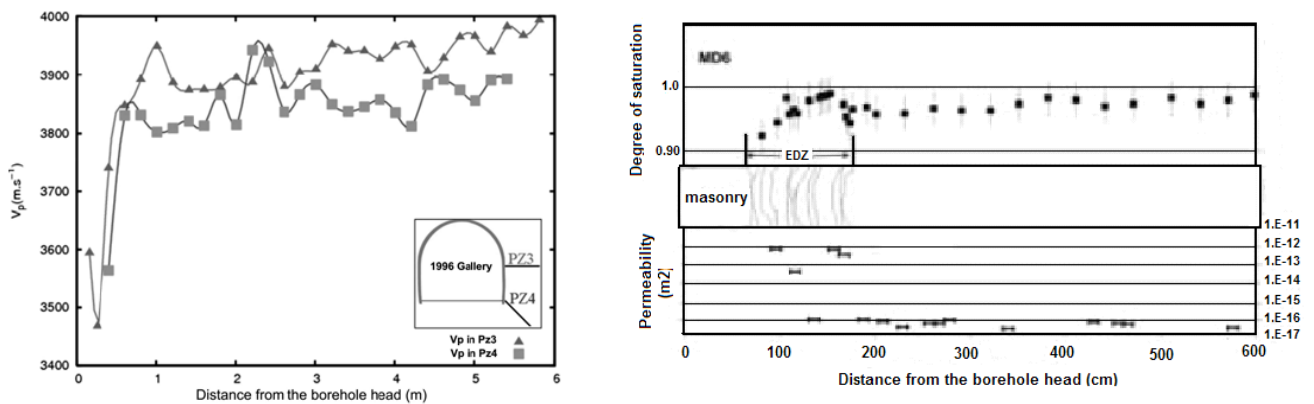


Figura 4: Variación de la velocidad de onda de compresión y Variación del grado de saturación y permeabilidad. Rejeb & Cabrera, 2006

En conclusión, a partir del estudio realizado se puede confirmar la degradación sufrida por la roca arcillosa blanda al ser excavado el túnel. Esta degradación se basa

en una modificación de las propiedades mecánicas de la roca (disminución de la rigidez) y hidráulicas (aumento de la permeabilidad). Ambos cambios son debidos a la aparición de grietas en las paredes del túnel, provocadas por la descarga y por los cambios en la humedad sufridos. La medida de ciertos parámetros como la humedad, permeabilidad y velocidad de ondas P permite observar la variación en las propiedades del material y, consecuentemente, cuantificar la degradación.

b) Degradación observada en excavaciones

Cafaro & Cotecchia (2001) estudiaron la degradación sufrida en rocas blandas al realizar excavaciones a cielo abierto. En este caso estudiaron el caso de la arcilla sobreconsolidada de Montesémola, cerca de Taranto, en Italia. Esta arcilla presentaba una fuerte cementación por carbonatos que la dotaban de las características propias de una roca blanda.

Al realizar la excavación de un talud, se observó la presencia de dos capas diferenciadas de la misma arcilla sobreconsolidada, asociadas a dos frentes de meteorización. Las dos capas presentaban una estructura similar y se diferenciaban por presentar dos tonalidades diferentes: la capa superior tenía una tonalidad amarillenta mientras que la inferior era de color gris. El color amarillo de la capa superior era debido a una mayor oxidación como consecuencia de un mayor periodo de meteorización del material, caracterizado por múltiples ciclos de humedecimiento y secado.

Se realizaron ensayos edométricos sobre los dos materiales, obteniendo comportamientos diferentes entre ambas arcillas, aunque ambas presentaban estructuras similares. Para poder establecer las causas del cambio de comportamiento entre las dos arcillas, se realizaron ensayos de humedecimiento y secado a la arcilla gris con el objeto de degradarla hasta alcanzar las propiedades de la arcilla amarilla. Se observó que, al realizar sucesivos ciclos de humedecimiento y secado, la arcilla gris se acercaba a las propiedades mecánicas de la arcilla amarilla, como consecuencia de la degradación de los enlaces diagenéticos, la reducción de su volumen específico y el incremento de su potencial expansivo. En la Figura 5 se muestra esquemáticamente la evolución del estado tensional de la arcilla natural gris hacia arcilla amarilla degradada.

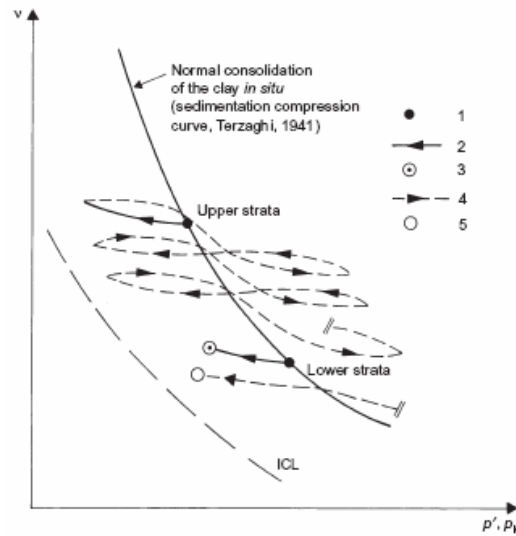


Figura 5: Evolución del estado tensional de la arcilla natural

A partir de este estudio podemos observar la influencia de los cambios en la humedad del terreno sufridos a lo largo de su historia en las propiedades de la roca blanda. Los sucesivos ciclos de humedecimiento y secado provocan una degradación en los enlaces diagenéticos y propician el comportamiento expansivo del material, muy importante si éste incorpora minerales activos.

c) Degradación observada en laboratorio

Banks et al. (1975) realizaron ensayos edométricos sobre una roca blanda con el objeto de observar la degradación por expansión de estos materiales al ser sometidos a descarga. En este caso, se estudió el shale procedente del Corte "Culebra", uno de los taludes mas problemáticos durante la construcción del Canal de Panamá. Este material puede definirse como un shale arcilloso fuertemente cementado con un porcentaje de finos cercano al 32% (principalmente montmorillonita). Se realizó un ciclo de carga-descarga y se observó una clara expansión del material al final de la descarga, lo que permitió evaluar su potencial expansivo. La curva de compresión medida en el edómetro se presenta en la Figura 6.

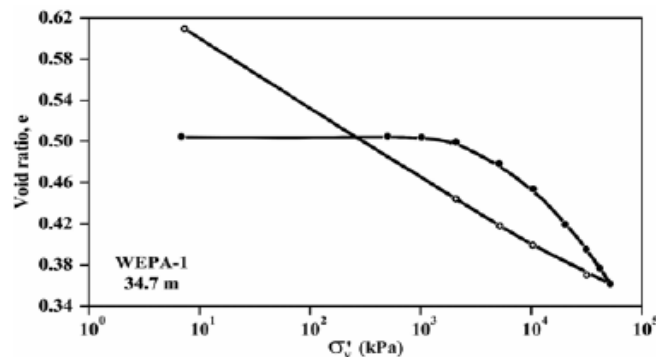


Figura 6: Compresión edométrica. Banks et al. 1975

La expansión sufrida durante la descarga del material fue debida al rompimiento del cemento en la fase de carga y el aumento de volumen total debido a la hidratación

de los minerales expansivos presentes en la roca. Aunque la hidratación de los minerales expansivos se produce desde el inicio de la carga, la expansión no tiene lugar hasta la descarga ya que la fuerte cementación lo impide. Una vez la cementación ha sido degradada durante la carga, el material puede expandirse sin ningún impedimento, aumentando sensiblemente el volumen total.

Otro estudio de la degradación de rocas blandas realizado en laboratorio fue presentado por Picarelli, en 1991. En este estudio ensayó en el edómetro muestras del shale arcilloso de Laviano, en Italia. Se realizaron sucesivos ciclos de carga-descarga de los que se pudieron obtener unos resultados que demostraron el progresivo deterioro del material con los ciclos. Se observó un incremento en la compresibilidad del material con la carga y una expansión durante la descarga. Estos resultados se muestran a continuación en la Figura 7.

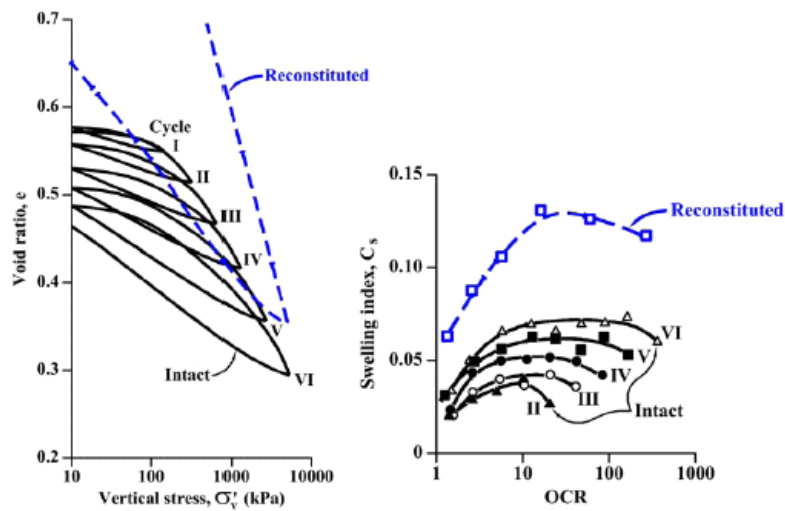


Figura 7: Degradación progresiva de la arcilla debida a procesos de carga y descarga. Picarelli, 1991.

Tal y como se muestra en las gráficas anteriores, al aumentar el número de ciclos de carga y descarga, la roca blanda presenta una mayor compresibilidad (medida por el índice de compresión C_s) y una expansión cada vez mayor, como consecuencia de una progresiva degradación.

2.5. Resumen de este capítulo

En este apartado se destaca la especial relevancia de los procesos de degradación en rocas blandas. La presencia de rocas blandas es muy habitual en gran parte de las obras civiles que se ejecutan, por lo que es de especial interés el estudio de este material frente a procesos que pueden provocar una pérdida de sus propiedades resistentes. En este aspecto, los mecanismos de degradación, principalmente los debidos a procesos de descarga y de humedecimiento y secado, son los que pueden llegar a provocar cambios más rápidos y relevantes, tal y como demuestran varios casos estudiados. Estos procesos provocan el agrietamiento del material, la rotura de la cementación, facilitan los mecanismos de expansión, alteran el contenido de agua

presente, propician la activación de reacciones químicas dando lugar a meteorización química, etc.

2.6. Referencias bibliográficas de este capítulo

- Banks D.C., Strhom W.E., De Angulo M. & Lutton R.J. (1975). *Study of clay shale slopes along the Panama Canal*. Report nº3, Engineering Analyses of slides and strength properties of clay shales along the Gaillard Cut. US Army Engineers. Waterways Experiment station., Vicksburg, Miss.
- Bjerrum L. (1967). *Progressive failure in slopes of oversolidated plastic clay and clay shales*. J.Soil Mech. & Found. Division, ASCE, Vol 93, pp 3-49.
- Cafaro & Cotecchia F. (2001) *Structure degradation and changes in the mechanical behaviour of the stiff clay due to weathering*. Geotechnique, vol 51(5), pp 491-453
- E.E. Alonso & J.A. Pineda. *Weathering and degradation of shales: experimental observations and models of degradation*. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC.
- Fleming R.W., Spencer G.S. & Banks D.C. (1970). *Empirical behaviour of clay shale slopes*. U.S. Army Engineers. Nuclar Cratering Group (NCG), Technical Report 13, pp. 1-93
- Hoffmann Jauge, Christian Amadeo (2005). *Caracterización hidromecánica de mezclas de pellets de bentonita. Estudio experimental y constitutivo*. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC.
- J.B. Burland & A. M. Ridley (1996) *The importance of suction in soil mechanics*. Imperial College of Science Technology and Medicine, London.
- Marques.E.A.G., Vargas E.A. & Antunes F.S. (2005). *A study of the durability of some shales, mudrocks and siltstones from Brazil*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol 23, pp 321-348.
- Mitchell, P.W. (1976). *Fundamentals of Soil Behaviour*. 1st edition, NewYork: Wiley.
- Picarelli, L. (1991). *Discussion on the paper: "The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks" by S.Leroueil and P.R. Vaughan*. Géotechnique, 40(2), pp 281-284.
- Rejeb A. & Cabrera J. (2006). *Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argillaceous Tournemire site (France)*. Geoproc 2006. Nanjing, China, 22-24 May
- Skempton A.W. (1964). *Long term stability in clay slopes*. Geotechnique Vol 14. nº2 pp77-101.