

Síntesis del Estado del Conocimiento sobre el Comportamiento Esfuerzo–Deformación y Degradabilidad de Rocas Lodosas.

State of Knowledge about Stress–Strain Behavior and Degradability Synthesis on Mudrocks.

Mario Camilo Torres Suárez, IC, MIG, Estudiante Doctorado
Universidad Nacional de Colombia – Colciencias

Resumen

Durante décadas las rocas lodosas han constituido un gran problema a la hora de diseñar y sobretodo construir proyectos de infraestructura que se apoyan en macizos rocosos, tanto a nivel superficial como profundo, especialmente después de culminar las etapas de excavación, debido principalmente a que estos materiales son por naturaleza susceptibles a degradarse o deteriorarse en cuanto a su estructura (meteorización físico – química), presentando comportamientos inestables que pueden ocasionar suficiente pérdida de resistencia para sobrellevar la falla de las estructuras que le sean asociadas. En este artículo se presentan los últimos avances reportados en tratándose de investigación y resultados sobre el Comportamiento Esfuerzo–Deformación y la Degradabilidad de este tipo de rocas, en forma especial cuando estos procesos se deben a descargas del material ó por erosión que los afecta superficialmente, permitiendo que se generen nuevas interacciones entre fases y elementos constitutivos, que cambian la estructura interna del material y por ende su comportamiento es disímil respecto del que pudo haberse previsto en estudios técnicos iniciales.

Abstract

During decades the mudrocks had been a great problem at the time of design and building construction projects, shallows and depths, especially after to finish excavations phases, because these materials are naturally susceptible to degraded or weathering into structure (physical and chemical weathering), exhibiting unstable behavior that can occasion loss of resistance to collapse of associated structures. This paper presents, the advance about research and results on stress–strain behavior and weathering of these rocks, specially when the processes are been by unloading of material or by erosion that affects superficially, permits new interactions between constitutive elements and phases, that changes the internal structure and it's behavior is far that predicts by the initial technical studies.

1. INTRODUCCIÓN

Nuestro país se encuentra ubicado en la zona intertropical, justo sobre la Línea Ecuatorial, bajo la influencia permanente de amenazas de diversa índole, dentro de las que se destacan movimientos sísmicos, volcanes, intensidad pluviométrica, etc. que desencadenan en forma casi permanente un sin número de desastres: caídas, avalanchas, deslizamientos, desprendimientos, hundimientos y otros, que afectan directamente habitantes e infraestructura nacional y por ende la economía se ve frecuentemente soslayada ante dichos eventos, sin contar otros problemas sociales y de seguridad que mantienen en vilo a muchas de las poblaciones colombianas. Gran parte de estos acontecimientos han sido causados (o al menos se

hubiesen podido mitigar sus efectos) por desconocimiento de las variables que intervienen en su desarrollo o la forma como cambian los parámetros de resistencia que controlan los materiales presentes durante estos sucesos.

Los materiales que se tratan en este artículo son rocas por naturaleza susceptibles a rápido deterioro por meteorización o descarga, que necesariamente implican la pérdida de resistencia por desestructuración de los mismos; estas rocas, también denominadas rocas blandas o incompetentes, son generalmente de naturaleza arcillosa o con componentes altamente sensibles a los cambios en contenidos de humedad, por lo cual es común observar su deterioro luego de experimentar infiltración de aguas.

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA

La investigación que dio pie a este artículo fue planteada para dar continuidad a trabajos preliminares que han adelantado profesores y estudiantes del Grupo de Investigación en Geotecnia –GIGUN– de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, quienes han venido observando con detenimiento el comportamiento de materiales similares a los que son objeto de este estudio, y han logrado determinar la interacción entre parámetros de resistencia mecánica y posibles procesos de desestabilización de taludes y laderas, principalmente a escala macroestructural (tamaño típico de muestras de laboratorio y análisis por métodos numéricos), haciendo recorridos y campañas de reconocimiento a zonas donde predominan estos materiales.

Es así como uno de los primeros trabajos de los que se tiene conocimiento fue elaborado por los ingenieros **A. Alarcón** (Director de la tesis doctoral propuesta por el autor de este artículo), **G. Ángel** y **A. Isaza** en el año 1976, relacionado con la Caracterización de las lutitas en Colombia¹, quienes pudieron establecer en aquella época las bases para el estudio geotécnico de lutitas en el país, además de algunas relaciones entre la calidad de los materiales, su aptitud estructural y procesos asociados a deslizamientos. Realizaron una recopilación de la información que se tenía hasta esa época y consolidaron el estado del conocimiento para la fecha de estudio; allí se presentan aspectos como el origen y formación de las lutitas, su clasificación, propiedades geotécnicas, comportamiento in-situ y algunos resultados de ensayos básicos de laboratorio, demostrando que el desconocimiento del comportamiento de estos materiales en obras de ingeniería era generalizado y el número de problemas identificados era grande e iba en aumento, concluyendo sobre la importancia y necesidad de adelantar investigaciones que profundizaran en el estudio de aspectos microestructurales y mecanismos de degradación.

¹ “Bases para el Estudio Geotécnico de las Lutitas en Colombia”. A. Alarcón, G. Ángel y A. Isaza. Tesis de grado. Director Ing. Manuel García López. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 1976.

Los autores reportan varios informes sobre problemas de estabilidad en cercanías de poblaciones cundinamarquesas como Nocaima, elaborados por el Servicio Geológico Nacional (hoy Ingeominas), desde los años 30's (Hubach).

De otro lado el Profesor de la Universidad Nacional, Geólogo **Juan Montero**, quien en 1968 había iniciado observaciones y planteado la necesidad de investigar características geomecánicas de lutitas que afloran en el sector La Renta–Río Sogamoso, carretera Bucaramanga–Barrancabermeja, la cual presentaba problemas serios de inestabilidad asociados a la presencia de estos materiales y sus coluviones², ha sido uno de los profesionales más inquietos en cuanto a las consecuencias de los deslizamientos ya que insiste en que no se pueden plantear acciones de mitigación sin antes conocer los verdaderos efectos de estos eventos, principalmente si se tiene en cuenta que en la mayoría de nuestros países no se cuenta con políticas estatales de administración del riesgo y las estadísticas que se tienen son pobres además de estar dispersas.

Es así como su interés por identificar estos aspectos le ha permitido recopilar y establecer claras relaciones entre la geología, la geomorfología, la tectónica, la actividad volcánica y la pluviosidad que impera en la región Andina a lo largo de toda la cordillera, en la cual la presencia de materiales débiles y altamente degradables es una constante, coincidiendo en muchos casos con las zonas de mayor depresión económica y social del continente³. Su trabajo ha sido orientado hacia la conformación de un inventario de primer orden de movimientos en masa, tanto en Colombia como en toda la región.

De hecho, junto con el geólogo Ricardo Cortés Delvalle, elaboraron el primer Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa de Colombia (1989); igualmente, el Dr. Montero, tiene experiencia en el seguimiento de problemas asociados a rocas lutíticas en los corredores viales Bogotá–Villavicencio, Bogotá–Villeta, Mosquera – La Mesa y Barbosa–Oiba, entre otros.

² “Consideraciones generales sobre la estabilidad en relación con la carretera en construcción Bucaramanga–Barrancabermeja”. Informe especial por Montero, J. y Grimme, K., Ministerio de Obras Públicas, Colombia, 1968.

³ “Movimientos en masa en la región Andina”. J. Montero. Memorias III Curso Latinoamericano de Movimientos en Masa. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Ingeominas, PMA. Bogotá, agosto de 2005.

Un escenario que también ha generado su preocupación se refiere al uso de estos materiales como pétreos para construcción; en este tema aun faltan estudios serios y sistemáticos que permitan determinar sus características físico – mecánicas.

2.1. Investigación Presentada en Eventos Internacionales Realizados en Colombia ó adelantados en el país

Uno de los trabajos más importantes presentados en Colombia fue el elaborado por el Geólogo Profesor **Alberto S. Nieto**, quien en el año 1982 trató el tema “Caracterización Geotécnica de Macizos de Roca Blanda”, acopiando una gran cantidad de información que para la fecha permitía establecer un Estado del Conocimiento con respecto a esta temática⁴. Este documento resume los hallazgos que se habían realizado durante los 30 años anteriores al Congreso Suramericano, indicando que los materiales presentes en gran parte de nuestra región están constituidos por suelos residuales, glaciales, sensitivos, cementados, etc., los cuales tienen un comportamiento sensiblemente diferente al previsto por la mecánica de suelos clásica que se desarrolló básicamente en países templados, en donde predominan los suelos sedimentarios estratificados.

Dentro de los materiales representativos destaca los siguientes: arcillolitas, lodolitas, limolitas, areniscas pobremente cementadas, margas y tobas, entre otros. Se mencionan también procesos que dependen del tiempo como el intemperismo, la expansión, el rebote y la cedencia, que deberían ser precisados en función del tipo de obra involucrado. Se concluye que para la época, las técnicas y procedimientos de caracterización de rocas blandas eran esencialmente los mismos que se utilizaban para rocas duras, pero se hace hincapié en mantener los contenidos de humedad lo menos variables posible, destacando que no se conocía un criterio de falla que aplicara a estos materiales y que según su criterio el que mayor futuro tenía era el propuesto por Hoek y Brown.

Sugiere medir la deformabilidad de los macizos con gatos de perforación y la permeabilidad mediante pruebas piezométricas in situ; en ese momento se tenía conocimiento de estudios

experimentales recientes sobre la relación resistencia–deformación–tiempo de roca blanda intacta, pero su aplicación a condiciones de campo no era factible.

Otro aspecto interesante de este tipo de documento es que recopila toda la información de que se tenga noticia hasta la fecha, con lo cual nuestro trabajo se concreta en ubicar documentos “estados del conocimiento” lo más recientes posible. Dentro de los documentos revisados por el Profesor Nieto se encuentran más de 75 referencias, destacándose como una de las más antiguas la del Profesor Mogi, K, (1966) quien trató la dependencia entre la resistencia de la roca y la presión, y planteó la transición entre la fractura frágil al flujo dúctil. Este será uno de los puntos de mayor consideración en esta investigación ya que se asocia a la aplicación del estado crítico en rocas, especialmente las que son nuestro objeto de estudio.

Durante el mismo I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas, el Profesor Dr. Ingeniero **Oreste Moretto**, presenta una ponencia sobre el estado del conocimiento en síntesis de Fundaciones en Roca⁵. Aquí resumen en forma magistral lo que se conocía y venía aplicando hasta ese momento (1982), destacando igualmente la revisión de un gran número de publicaciones (cerca de 70) de diversas fuentes como Congresos Internacionales de Mecánica de Rocas, Congresos de Grandes Presas, Congresos Internacionales y Regionales de Mecánica de Suelos y Fundaciones, Journals de ASCE y Simposios sobre Mecánica de Rocas.

El Dr. Moretto explica en su documento, cómo el estudio de las rocas blandas y por lo general expansivas era aun precario para la época y por tanto prevalecían soluciones de tipo empírico a la hora de diseñar la cimentación de edificaciones, en algunos casos con éxito pero en muchos otros con fracaso, sobretodo porque la determinación de la presión de expansión y el hinchamiento son función del estado de humedad inicial y no es fácil mantener esta característica invariable durante la ejecución de ensayos de laboratorio. Debido a esto se planteaban soluciones como: concentración de cargas, profundización de cimientos y evitar que la superficie de apoyo se altere por

⁴ “Caracterización Geotécnica de Macizos de Roca Blanda”. Geólogo Alberto S. Nieto. Memorias I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá, noviembre de 1982.

⁵ “Fundaciones en Roca – Síntesis escogida del estado del conocimiento”. Dr. Ing. Oreste Moretto. Memorias I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá, noviembre de 1982.

desconfinamiento y exposición; aunque estas medidas siguen, y continuarán siendo válidas, es claro que se requiere conocer los procesos intrínsecos con mayor detalle para poder en un futuro predecir las condiciones de humedad y presión que controlarían los materiales durante las etapas constructivas, sino otros.

Complementando lo anteriormente expuesto, el Profesor **Milton Vargas** presenta la ponencia sobre el Estado del Conocimiento en Estabilidad de Taludes (1982)⁶, haciendo una síntesis detallada del tratamiento que se le daba a los taludes en la época, diferenciando entre macizos rocosos no alterados (cuyo estudio se inició por Karl Terzaghi en 1962), en cuyo caso estaban involucrados tres factores principales: a) resistencia por fricción y cohesión a lo largo de las fracturas de las rocas, b) presiones ejercidas por el agua que percola a través de las juntas y fracturas, y c) dislocación y fracturas sufridas por camadas de rocas, a lo largo de superficies profundas, de antiguos escurrimientos, y macizos rocosos extremadamente fracturados, alterados y estratificados, en los cuales además de los factores anteriores, se destacan: d) dureza y consistencia de la roca, e) material arcilloso o arenoso presente en las juntas y f) espesor de las juntas. Aquí el Dr. Vargas comenta que los métodos de análisis para este tipo de rocas deben avanzar de los que son aplicables a macizos controlados por discontinuidades y pasar a problemas de distribución de esfuerzos y deformaciones que consideren equilibrios elasto-plásticos y visco-plásticos, que es la tendencia actual del desarrollo investigativo en modelos constitutivos de geomateriales tal como lo plantea el Ing. Félix Hernández en documento referido al pie de página⁷. Para cada tipo de macizo rocoso se presenta un resumen de trabajos publicados a esa fecha, destacándose los siguientes para rocas alteradas:

- Primer Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Lisboa, 1966): ponencia en la sesión “Estabilidad de Taludes Naturales y Excavados” con el tema “Equilibrio Límite en Rocas Fracturadas y

⁶ “Estabilidad de Taludes – Estado del Conocimiento”. Dr. Milton Vargas. Memorias I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá, noviembre de 1982.

⁷ “Plan Estratégico de Desarrollo 2005 – 2010 del Doctorado en Ingeniería-Geotecnia”. Líneas de Investigación Pág. 30-31. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, septiembre de 2005.

Diaclasadas” por J.W. Bray del Imperial College de Londres, el cual trata especialmente de casos de taludes en rocas sedimentarias y esquistosas fracturadas y alteradas mediante la aplicación de la teoría de equilibrio límite de la mecánica de suelos.

- Segundo Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Belgrado, 1970): se destaca el trabajo presentado por Ter-Stepanian “Una redistribución de tensiones en macizos rocosos semi duros y procesos de relajamiento profundo de taludes” y la “Aplicación de métodos probabilísticos a la optimización de proyectos de taludes en roca” por el colombiano Tomás Shuk, aplicable igualmente a casos de taludes en rocas muy fracturadas, estratificadas, moles esquistosas y alteradas.
- Primer Congreso Internacional de la Asociación Internacional de Geología para Ingeniería (Paris, 1970): en la sesión “Fenómenos geológicos relacionados con estructuras de ingeniería” se presentaron los siguientes trabajos: a) “Eskurrimientos de tierra post glacial reactivados por cortes de estratos ferrosos” por Zaruba & Simek de Checoslovaquia; b) “Un estudio de escurrimientos de tierra en Galilea” por Wiserman *et al.* de Israel; c) “Estudios de geología para ingeniería en taludes sujetos a escurrimientos de tierra” por Zolotarev de Rusia; d) “Degradación de escarpes de argilita” por Barton de Inglaterra.
- Tercer Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Denver, Colorado, 1974): se destaca el trabajo presentado por el Dr. Hoek sobre los cuatro modos de falla que prevalecen en rocas, de los cuales solo tres se consideraban normales para la época; se adicionó la falla circular en taludes intensamente fracturados. Se trató también el estado del conocimiento sobre la acción de presiones de agua en los planos de deslizamientos y en las juntas.
- Segundo Congreso Internacional de la Asociación Internacional de Geología para Ingeniería (São Paulo, 1974): se presentaron

estados del conocimiento sobre escurrimientos de taludes.

- o Tercer Congreso Internacional de la Asociación Internacional de Geología para Ingeniería (Madrid, 1978): se empieza a tratar el tema de riesgos naturales y planeamiento regional.
- o Cuarto Congreso Internacional de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Montreaux, Suiza 1970): las contribuciones versan sobre dislocaciones de taludes y métodos de estabilidad, pasando por un trabajo denominado “Ruptura progresiva en taludes de roca estratificada y fisurada” por Descoeurdes e Vencer de Suiza, llegando a considerar un modelo matemático que tiene en cuenta la naturaleza discontinua de los macizos y un modelo físico constituido por una serie de bloques ajustados simulando una camada de taludes.

En el año 1987, con motivo del VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos, bajo la dirección del Dr. Montero O., la geóloga **M. Alejandrina Vanegas de Melo** presenta su trabajo titulado “Caracterización de Lutitas para Ingeniería Civil”, en donde sintetiza la investigación sobre caracterización de estos materiales complementada con la realización de ensayos de comportamiento mecánico, para su uso en construcción. El estudio comprendió una revisión completa sobre la terminología de las rocas arcillosas y su clasificación, un análisis de las características litológicas y una investigación de laboratorio mediante ensayos de identificación, degradación, análisis químicos, mineralógicos y petrográficos. De allí se concluye que el término “lutita” o “roca lodosa” es el más apropiado para referirse a este tipo de rocas de naturaleza arcillosa degradable, además de incluir, por primera vez en Colombia, un estudio detallado de las características composicionales y microestructurales de una gran cantidad de muestras (38) provenientes de diversas zonas geográficas (Fr’s. Chipaque, Cáqueza y Villeta).

Después de este panorama parece bueno referir algunos de los trabajos más recientes que respecto al tema se han adelantado en Colombia, específicamente en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en donde se ha liderado

mucha de la investigación realizada en el país sobre la temática.

A pesar que varios de estos trabajos nunca fueron publicados, aportan bastante al conocimiento directo de los materiales ya que sus autores estuvieron en contacto directo con éstos durante prolongados periodos de tiempo. Entre otros estudios se destacan:

a) “Caracterización Geomecánica y Comportamiento de las Lutitas de la Carretera La Vega–Villeta” por **Gilmar Iván Patiño** en octubre de 2000, quien bajo la dirección del Ing. Manuel García López presenta un análisis detallado de las características predominantes de los materiales del sector incluyendo resultados de ensayos de laboratorio combinados con análisis de estabilidad de taludes y laderas, lo que permitió ver la bondad de los parámetros encontrados mediante dichos ensayos. Se incluyen resultados de ensayos petrográficos con una descripción microscópica en términos de textura, composición y cemento presente, aunque al final no es posible ver con claridad como interactúan estos resultados a la luz de algún criterio o marco conceptual de falla para estos materiales.

b). “Zonificación Geotécnica del Corredor Vial Tobía Grande–Puerto Salgar” por **César Augusto Palomino S.** en el año 2002, quien bajo la dirección del Ing. Álvaro Jaime González presenta los resultados de la zonificación geotécnica del corredor vial con base en el Método de Evaluación de Estabilidad para Zonas Homogéneas a Escala Intermedia propuesto por Ramírez & González en 1989, realizando un detallado recuento de los modelos y mecanismos de falla identificados para este tipo de materiales.

c). “Seguimiento de la Inestabilidad en el sector “El Cune” Vía Bogotá–Honda, y evaluación de soluciones implantadas entre los años 1994 y 2002” por **Carlos Humberto Castro**, quien bajo la dirección del Profesor Juan Montero O. realizó un trabajo detallado de seguimiento a los procesos que han venido ocurriendo desde el año 1994, cuando el Gobierno Nacional intervino el sector con motivo de la construcción de esta variante; aquí se demuestra que las obras implantadas han incrementado los procesos inestabilizantes y que las soluciones que brinda la consultoría nacional no aplican en la forma adecuada.

En el sitio se ha invertido el equivalente a 6 Km. de carretera en un tramo que escasamente

tiene 300 m de longitud⁸, sin que hasta el momento se halla podido vislumbrar ninguna solución efectiva y definitiva y en la actualidad el proyecto se encuentra cerrado.

d) “Sugerencia de medidas correctivas para implantar en el sitio inestable de El Cune, Vía Honda–Bogotá” por el Ing. **Jorge Andrés Osorio Ortiz**, quien bajo la dirección del Profesor Juan Montero O. realiza un estudio detallado de los efectos económicos, sociales y ambientales que ha ocasionado este movimiento en masa e intentando modelar el proceso presenta una serie de recomendaciones que ayudarían a mejorar la problemática actual. Por primera vez se obtiene un modelo coherente del modo de falla de este talud.

Otros proyectos adelantados mediante la modalidad de Proyectos de Grado, han venido mostrando la importancia de valorar adecuadamente los efectos de los deslizamientos en el país, con lo cual se piensa que se tomaría mayor conciencia frente al reto de conocer mejor nuestros materiales antes de lanzarnos a la construcción de obras en condiciones geológicas–geotécnicas y ambientales complejas. Entre otros se destacan:

a). “Reducción de costos y daños de orden geotécnico en proyectos viales variante de Cáqueza” por Bernardo Castañeda, 2002.

b). “Mecanismo de falla de taludes en depósitos de ladera que suprayacen lutitas cizalladas en la variante Cáqueza de la Vía Bogotá–Villavicencio” por Nancy Lucía Rodríguez, 2001.

Trabajos asociados al comportamiento de rocas blandas a la luz de modelos de elasto–plasticidad incremental han sido recientemente presentados y muestran cómo las deformaciones elásticas pueden ser discriminadas de las plásticas, teniendo en cuenta además el efecto relevante de la presión de confinamiento. Un aporte importante en este sentido lo está realizando el Profesor Ing. Félix Hernández Rodríguez, quien ha liderado la investigación sobre modelos de comportamiento de materiales geotécnicos y en este caso particular se validó un modelo mediante la ejecución de ensayos de laboratorio con un material cohesivo–friccionante de características controladas,

⁸ “Seguimiento de la inestabilidad en el sitio El Cune”. Montero O., González G., Castro & Osorio O. Memorias X Congreso Colombiano de Geotecnia, Agosto de 2004. Pág. 657 – 667. Paipa (Boyacá).

representativo de las rocas de baja resistencia como lo es el microconcreto. Este trabajo fue realizado por los Ingenieros **Carlos José Bacca** y **Juan Carlos Sáenz**.

Otra serie de investigaciones ha sido liderada por el Profesor Doctor Ingeniero, Ing. de Minas y Metalurgia **Álvaro de la Cruz Correa Arroyave**, quien ha orientado su trabajo en forma particular hacia la caracterización de rocas colombianas de todo tipo y ha logrado reunir evidencia experimental que muestra las peculiaridades de nuestras rocas en comparación con las propiedades de rocas de otras latitudes, observando que, al parecer, en términos generales, nuestras rocas tienen menos resistencia y tienden a ser más deformables debido principalmente a condiciones de intemperismo y grado de meteorización por estar en climas tropicales y tectónicamente activos, comparadas con rocas europeas y norteamericanas.

Otros profesionales que han aportado al conocimiento de nuestros macizos rocosos seguramente no alcanzan a formar parte de este resumen, no así su trabajo; entre ellos se destacan los Ingenieros Jorge Enrique Ardila, Manuel Roberto Villarraga y Jaime Suárez, además de los Geólogos Pedro Antonio Hernández Borda e Ítalo Reyes, entre muchos otros.

Para terminar este panorama se debe mencionar el trabajo del Profesor Doctor en Rocas, Ing. **Jorge Enrique Puerto Garzón**, quien ha concentrando esfuerzos de investigación en temas relacionados con túneles y el conocimiento del terreno para construcción de proyectos de ingeniería, tema que constituyó el punto de inicio del trabajo que en mecánica de rocas ha iniciado igualmente el autor de éste documento.

2.2. Resumen de la Investigación Realizada ó Reportada en Eventos en Colombia

Como se puede extractar de la breve revisión adelantada a la investigación realizada y reportada en Colombia respecto del comportamiento esfuerzo–deformación de rocas lodosas, el interés por el tema data de hace más de 30 años durante los cuales ha habido esfuerzos un tanto aislados por conocer en forma idónea el comportamiento de estos materiales y una preocupación constante por estar al día y mejorar las técnicas de caracterización de materiales así como los

métodos de análisis utilizados para modelar su aptitud frente a las solicitaciones que les imponen la naturaleza y las obras de ingeniería. Igualmente es claro que la práctica de la geotecnia, respecto de la aplicación de los conceptos que se han venido emitiendo sobre el comportamiento de estas rocas, dista mucho de ser consecuente con estos y el número de fracasos, incluso recientemente reportados en proyectos de ingeniería, va en aumento e implica acciones prontas que conlleven a que dichos proyectos sean mejor sopesados en un futuro inmediato.

De otra parte investigaciones no necesariamente orientadas a rocas de esta naturaleza, han aportado elementos clave en temas como caracterización de rocas, toma y procesamiento de datos de campo y laboratorio, modelación y análisis de estabilidad de taludes y laderas, túneles y obras subterráneas, además de una línea de reciente adelanto sobre deslizamientos activados por sismos, en cuyo caso se han planteado modelos y propuestas de zonificación por el Profesor **Carlos Eduardo Rodríguez P.**, PhD, y su equipo investigador.

Aunque el componente microestructural no ha sido la constante en las investigaciones reportadas, lo cual es comprensible debido a que el trabajo en este aspecto es de reciente desarrollo en mecánica de suelos y más aun en mecánica de rocas, asociado esto a la dificultad en la obtención de muestras en campo y la ejecución de ensayos de laboratorio, han impedido que se planteen propuestas contundentes respecto de un marco real comprensivo sobre esta escala del comportamiento de los materiales, sesgando la investigación hacia escalas locales y regionales toda vez que los procesos son más evidentes en su caracterización, no así en su modelación.

3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

A este respecto la información que se encuentra en journals y memorias de congresos internacionales, o simplemente en referencias bibliográficas, es amplia y variada, y sería casi utópico pretender tener la totalidad de la misma referida en esta síntesis del estado del conocimiento. Sin embargo el autor considera, para iniciar, que es indispensable datar el inicio de la investigación sobre el tema, para lo cual se basa en una referencia que figura en la obra magistral

de los editores de "Landslide: Investigation and Mitigation", Turner & Schuster (1996), quienes en el capítulo 21 (Shales and Other Degradable Materials) comentan que la predicción del comportamiento de materiales degradables ha sido materia de intensa investigación desde los comienzos de los 60's, cuando los propios Terzaghi & Peck (1967) describieron a los shales como materiales localizados entre zonas de cementación incipiente y completa, es decir aquellos que pueden variar entre un suelo duro y una roca real.

Ya de otrora, Taylor estableció (1948) que "los shales son en sí mismos considerados como rocas, pero cuando se exponen al aire o sufren cambios en el contenido de humedad, pueden descomponerse rápidamente". No obstante lo anterior, los mismos editores reconocen que el tema de materiales degradables no fue considerado con detalle en el *Reporte de Deslizamientos* que habían preparado para el año 1978, pero que si fueron identificados los principios básicos que gobiernan estos materiales, destacando que las propiedades más importantes de estas rocas son la naturaleza del ensamble de los minerales y la resistencia de los minerales constitutivos; un material rocoso no puede ser fuerte si sus minerales constitutivos son débiles y si la resistencia de los bonds presentes entre minerales es débil (Piteau & Peckover, 1978).

En el año 1967 la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles presenta en su journal un artículo "Conferencia Terzaghi", ofrecida por el Dr. **Laurits Bjerrum** en febrero del año 1966, titulado "Falla Progresiva en Taludes de Arcillas Plásticas Sobreconsolidadas y Shales Arcillosos", en el cual se hace una magistral descripción de los mecanismos asociados a falla de taludes en este tipo de materiales, planteando las condiciones necesarias para que ésta se genere y desarrolle, entre otras que: los esfuerzos laterales internos sean lo suficientemente grandes para causar concentraciones de esfuerzos en el frente de avance del deslizamiento, las arcillas deben contener suficiente cantidad de energía de deformación recuperable para producir una expansión en la dirección del movimiento y la resistencia al corte residual sea relativamente baja comparada con la resistencia al corte pico. Dicha energía de deformación recuperable está asociada a la formación de bonds diagenéticos durante el proceso de consolidación y compresión de las rocas.

3.1 Estado de la Investigación en Europa, Asia y Oceanía

Para iniciar, el primer trabajo que se abordará es el adelantado en la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España), por el equipo investigador liderado por el Profesor **Eduardo Alonso Pérez de Agreda**, quien ha tratado el tema desde la óptica del entendimiento y modelamiento del comportamiento de rocas débiles y expansivas, proponiendo modelos de comportamiento de estos materiales que acoplan modelos constitutivos para granos y bonding, mediante el equilibrio energético que cada uno desarrolla por separado, y, según se tiene entendido, avanzan hacia modelos más elaborados del tipo hidro-mecánico-termo-químico, es decir que asocian varias componentes que en determinado momento participan en el comportamiento de las rocas (Pineda, 2006).

Un documento resumen del trabajo de Alonso *et al.* se titula “Expansión y Degradación de Rocas Arcillosas” (2003), el cual es el resultado de una serie de investigaciones que viene adelantando desde finales de los 80’s con temas asociados como la “Modelación del comportamiento de suelos expansivos”, presentado en la 2ª. Conferencia Internacional de Suelos No Saturados (1998); “Suelos con problemas especiales”, memorias de la 9ª. Conferencia Europea de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones (1987); “Modelo constitutivo para suelos parcialmente saturados”, *Géotechnique* 40, No. 3 (1990); “Comportamiento mecánico de suelos áridos”, memorias de la Conferencia de características ingenieriles de suelos áridos (Londres, 1994) y “Un marco de trabajo para el comportamiento de arcillas expansivas no saturadas” (Canadian Geotechnical, 1992).

El trabajo hace referencia en forma particular a los shales arcillosos en diferentes partes del mundo como Norte América, Brasil e Italia (Hsu & Nelson, 1993 –Da Costa Nunes, 1979– Bertuccioli & Lanzo, 1993) en donde se han observado procesos de degradación de la roca. Se define la degradación como un término general que aplica a gran número de fenómenos tales como la reducción de resistencia, cambios en volumen, pérdida de rigidez y en casos severos, pérdida de masa debido a la apertura de fisuras y, eventualmente, fenómenos de inestabilidad que afectan volúmenes finitos de roca.

La degradación está frecuentemente asociada con descarga, lo cual es el caso típico en excavaciones subterráneas y superficiales. También la exposición a condiciones atmosféricas conduce igualmente a la degradación del shale. Los resultados experimentales muestran que los efectos de la descarga no son fácilmente identificables ya que el muestreo u operaciones de perforación involucran descargas iniciales no controladas, por lo que resulta importante determinar desde el comienzo el estado de esfuerzos en que se encuentra el material, lo que ha sido materia de discusión porque su determinación es bastante compleja y costosa y en la generalidad de los casos no se realiza.

Aquí cobran especial fuerza los conceptos de materiales cementados y no cementados, debido a que este aspecto controla la resistencia de los materiales en las etapas iniciales de descarga y dependiendo de la presencia de agua y sobretodo la forma como ésta actúe dentro del material, acelerarán o no los procesos de degradación de los mismos, en algunas ocasiones asociada a fenómenos de expansión que son igualmente función de los minerales constitutivos de los geomateriales; el estudio muestra que tanto cargas como descargas tienen efecto en el daño que sufre el bonding y por ende conlleva a la alteración (“desintegración” es el término usado por Bjerrum, 1967) de las rocas arcillosas. Los efectos osmóticos contribuyen a la expansión acelerada de las rocas, lo que se manifiesta cuando éstas son expuestas a agua destilada y tienden a ser más pronunciadas en rocas de origen marino debido a la alta concentración de sales del agua de poros.

El documento referido, titulado “Degradación de bonds y deformaciones permanentes en rocas arcillosas blandas” (Jean Vaunat & Antonio Gens, 2003), extiende conceptos de los estados límite y crítico, inicialmente desarrollados para suelos, a materiales estructurados introduciendo la dependencia entre la superficie de cedencia y un parámetro de estructuración (Figura No. 1).

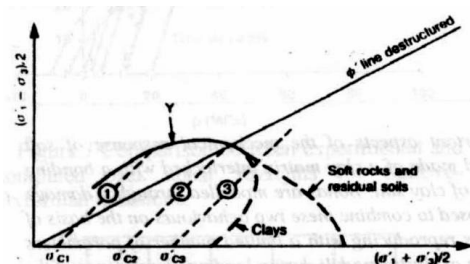


Figura No. 1 – Curvas de cedencia típicas para materiales estructurados (después de Leroueil & Vaughan, 1990)

Según esta Figura, en la zona interior de Y las deformaciones permanecen pequeñas y relativamente más recuperables; cuando se alcanza el nivel Y, comienza a desarrollarse la cedencia, acompañada de pérdida en la estructura. En consecuencia la curva Y se contrae hacia la curva de cedencia de un material totalmente desestructurado, lo cual representa un límite inferior para todas las curvas Y en el espacio de los esfuerzos; durante este proceso se observa un ablandamiento en la relación esfuerzo-deformación.

La representación esquemática del arreglo matriz-bonds se muestra en la Figura No. 2.

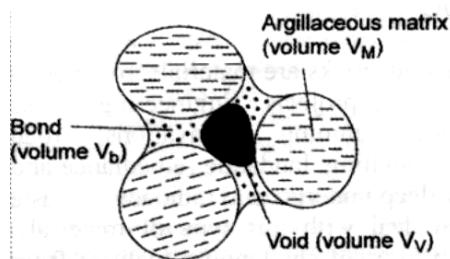


Figura No. 2 – Representación esquemática del arreglo matriz-bonds (Tomado de Vaunat & Gens, 2003)

El artículo concluye que el modelo logra reproducir la degradación del módulo elástico, el comportamiento frágil y cuasi-frágil cuando se incrementa el bonding; se basa en la combinación de dos tipos de comportamientos: un modelo clásico del suelo para representar el comportamiento de la matriz arcillosa y un modelo de daño para representar el comportamiento de los bonds. El modelo solo requiere cinco parámetros usados para la matriz arcillosa, todos con una clara interpretación física. Estos se fundamentan en el conocido modelo de comportamiento Cam Clay Modificado, en términos de esfuerzos externos y deformaciones, para el caso de una arcilla de porosidad media y el criterio Hoek & Brown cuando se trata de una matriz arcillosa de baja porosidad. Para los bonds se trabajó con una ley de daño elástico de acuerdo con el modelo propuesto por Carol *et al.* (2001), para materiales cuasi-frágiles.

Otro de los trabajos que se quiere destacar en esta breve revisión del estado del conocimiento, es el presentado por los autores **S. Leroueil** y **P.R. Vaughan** (1990–1991), titulado “Efectos generales y congruentes de la estructura en suelos naturales y rocas débiles”, el cual reúne prácticamente, en forma de síntesis y análisis, los

resultados de varias investigaciones adelantadas hasta esa fecha, las cuales comprenden rigurosos estudios de laboratorio con materiales de diferentes sitios de la tierra, mostrando con claridad el efecto de la estructura interna de los suelos y las rocas en la resistencia de los mismos, lo que incide fuertemente en la forma y tipo de las curvas de cedencia que se obtienen de los ensayos practicados. Se aclaran conceptos como suelos “estructurados” versus los “desestructurados”, “cedencia” (por compresión, corte e hinchamiento), “compresión secundaria” y otros.

En conclusión, así como los materiales pueden ganar resistencia por procesos de compresión secundaria también lo pueden hacer por procesos de bonding (incluida la cementación), lo cual les brinda una estructura diferente a la que tienen en un estado anterior, rigidizándolos y haciéndolos más competentes ante la aplicación de cargas de compresión; no obstante, también se vuelven más frágiles y su estructura más sensible ante descargas ó cambios en las condiciones de humedad y saturación, especialmente cuando los minerales constitutivos son de naturaleza arcillosa. Las curvas de cedencia tienen una tendencia más isotrópica que las esperadas en arcillas consolidadas, las cuales son más anisotrópicas.

Este aspecto es la entrada al análisis del siguiente documento, presentado y publicado en el Journal Géotechnique 45, No. 2, 223–235 por los autores **E. A. Novello & I. W. Johnston** (1995) titulado “Materiales Geotécnicos y el Estado Crítico”, en el cual demuestran como el postulado del **Estado Crítico** aplica a todos los materiales geotécnicos y no únicamente a los suelos como lo plantearon sus autores originales mediante el conocido Modelo del Estado Crítico (Schofield, A. & Wroth, C. P., 1968, “Critical State Soil Mechanics”, London).

Varios investigadores han reconocido que la transición frágil-dúctil en mecánica de rocas tiene similitud con el concepto de presión de preconsolidación en mecánica de suelos (Barton, 1976). Sobre evidencia experimental obtenida mediante un sin número de ensayos de consolidación isotrópica en suelos y rocas (Novello & Johnston, 1989), se observa que los conceptos de consolidación normal y sobre consolidación tienen aplicación a todos los materiales geotécnicos. Suelos preconsolidados muestran un comportamiento dilatante, con resistencia pico a una relativa baja deformación

unitaria axial y una reducción en resistencia después del pico, con un modo de falla caracterizado por un plano sencillo; los suelos normalmente consolidados no muestran dilatancia, una pequeña resistencia pico a mayores niveles de deformación unitaria y alguna reducción en la resistencia después del pico, con un modo de falla más amplio y la tendencia a forma de barril, si la fricción está presente al final del ensayo (Bishop, Webb & Lewin, 1965, London Clay).

En el caso de rocas blandas, resultados obtenidos sobre muestras de lodolitas de Melbourne (Chiu & Johnston, 1980), con cerca de 2 MPa de resistencia a la compresión uniaxial y relación de vacíos inicial cercana a 0.4, esfuerzos de confinamiento medio inicial variables entre 0.5 y 34.3 MPa, muestran comportamiento dilatante para bajos niveles de dicho esfuerzo (< 5 MPa), con resistencia pico a bajos niveles de deformación y plano de falla bien definido. Para especímenes fallados con aumento progresivo del esfuerzo de confinamiento (5 a 17 MPa), la dilatancia se vuelve menos pronunciada y la deformación axial a la falla se incrementa. Para especímenes fallados a grandes niveles de confinamiento (17 a 34.3 MPa), no se observa dilatancia antes de la falla, lo cual sugiere que la lodolita entra a un comportamiento totalmente contráctil similar al de los suelos normalmente consolidados. Figura No. 3.

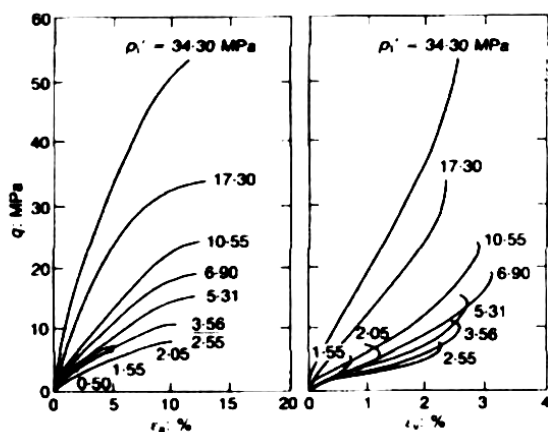


Figura No. 3 – Resultados de ensayos a compresión triaxial drenados para lodolita Melbourne (Chiu & Johnston, 1980)

El concepto de Estado Crítico, aplicado al comportamiento de rocas blandas muestra claramente como estos materiales se pueden caracterizar mediante la determinación de la línea de compresión isotrópica (LCN) y la línea del

estado crítico (LEC), observando una zona de aparente presión de preconsolidación precedente a la LCN en el plano $v-\ln p'$; esto se observó en ensayos drenados y no drenados sobre una roca sedimentaria blanda (Ohya tuff, Adachi *et al.* 1981), con resistencia a la compresión confinada de alrededor de 5 MPa y relación de vacíos inicial cercana a 0.7. Aunque hay una discrepancia aparente en la localización de los puntos de resistencia última en materiales sobreconsolidados, los cuales se esperarían como una extensión de la LEC, aparecen un poco más debajo de ésta línea (Figura No. 4).

La diferencia entre el estado crítico en rocas blandas y suelos es que la resistencia friccional para las rocas blandas es no lineal en el plano $q-p'$, mientras que para suelos usualmente se asume lineal.

En conclusión, para suelos el concepto de estado crítico trata la falla plástica como un gran fenómeno friccional donde el suelo poroso fluye como un fluido friccional (Schofield & Wroth, 1968).

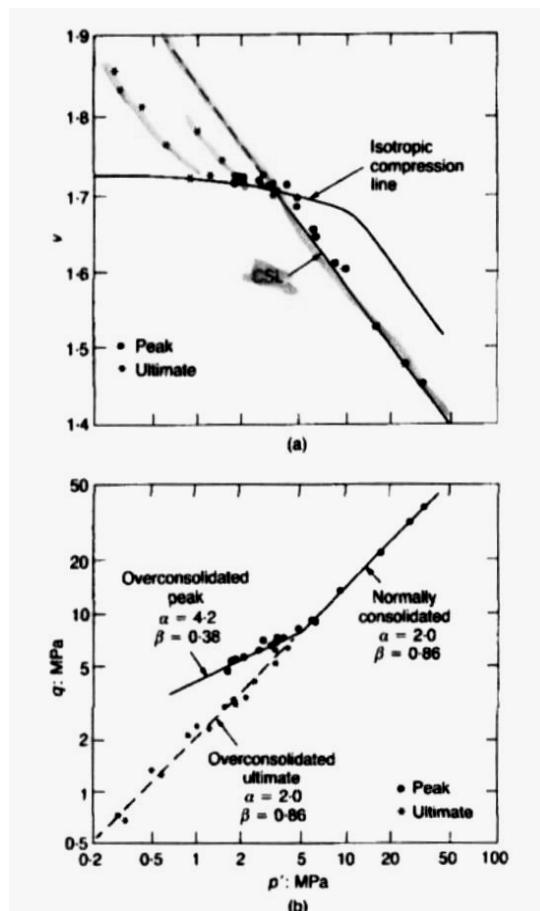


Figura No. 4 – Estados de falla para rocas sedimentarias blandas (de Adachi *et al.*, 1981)

El mismo concepto aplica igualmente a rocas blandas, mientras que en rocas duras, debido a que la porosidad se acerca a cero, el estado crítico se define en forma más corriente como el estado plástico del componente mineral sólido. De acuerdo con la teoría clásica de plasticidad (Hill, 1960), el flujo totalmente plástico es un fenómeno cohesivo con condiciones en la cedencia independientes de la presión de confinamiento aplicada.

Un trabajo adelantado en Oceanía, titulado “Trayectorias de Esfuerzo y Esfuerzo–Deformación para Suelos Graníticos Descompuestos mediante Aproximación Numérica”, por **S. A. Mofiz, M. R. Taha & A. Alim**, de Malasia y BanglaDesh, presentado en el XII PCSMGE en Boston (MA.) en 2003, muestra como el comportamiento esfuerzo–deformación y cambio volumétrico para suelos graníticos es altamente dependiente de las trayectorias de esfuerzos. El porcentaje máximo de incremento en la resistencia se muestra para la trayectoria en el ensayo Triaxial Convencional a Compresión, mientras que la mínima es para el ensayo Triaxial Reducido a Compresión; para las predicciones mediante elementos finitos, se usaron los parámetros del Modelo Cam Clay para simular las características esfuerzo–deformación y los cambios volumétricos, los cuales arrojaron resultados ajustados a las mediciones realizadas.

Resultados similares se presentan en el documento “Ensayos Triaxiales sobre Suelos Débilmente Cementados con Cambios en las Trayectorias de Esfuerzos” por **V. Malandraki & D.G. Toll**, de la Universidad de Dirham (UK) en el Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 3, Marzo de 2003, en el cual se muestra que la cedencia de los bonds ocurre bajo la dirección que sigue cada trayectoria de esfuerzos, aun cuando haya ocurrido a lo largo de otra trayectoria. Esto demuestra que el bonding es un proceso anisotrópico y sugiere que su superficie de cedencia es cinemática, en el sentido de que es una superficie expandible/contráctil, lo cual no quiere decir que sea una superficie móvil.

Se concluye que el comportamiento de suelos con bonding (cementados) está fuertemente influenciado por los cambios en la dirección de las trayectorias de esfuerzos durante el corte. La cedencia de la estructura cementada de los suelos ocurre a lo largo de cada dirección de trayectoria de esfuerzo seguida; el proceso de rompimiento de bonds es anisotrópico y no todos lo hacen cuando

inicia la cedencia. Se postula que la superficie de cedencia se expande cuando las deformaciones volumétricas con compresivas y se contrae cuando son dilatantes.

Aquí cobra especial importancia el documento presentado por **I. A. Sadisun & H. Shimada et al.** en 2003, titulado “Observaciones Experimentales sobre Características del Desleimiento de Rocas con Referencia Particular a Rocas Sedimentarias Arcillosas”, donde se confirma que las rocas arcillosas tienen la tendencia natural a degradarse físicamente dentro de tiempos relativamente cortos después de quedar expuestas a la atmósfera y la humedad, lo cual también se conoce como propiedades de desleimiento. Los resultados indican que el shale ensayado se caracterizó por un bajo a medio comportamiento al desleimiento con un valor medio I_{SI} del 7.5% versus la arcillolita que mostró una media del 41%. Este valor es el porcentaje de material perdido respecto a la masa seca inicial para cada ciclo.

3.2 Estado de la Investigación en América

Al respecto, y específicamente hablando de Norte América, se reconocen trabajos liderados por **G. Mesri** y **A. F. Cepeda Díaz** (Universidad de Illinois), quienes en el VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones presentaron el artículo titulado “Permeabilidad de las lutitas”, demostrando como ésta propiedad de los materiales varía considerablemente en función de los esfuerzos aplicados durante la ejecución de ensayos de compresión, además de otros trabajos.

La investigación en comportamiento de materiales a nivel micro estructural viene siendo liderado, entre otros destacados investigadores, por **Juan Carlos Santamarina**, del Georgia Institute of Technology, y **Abraham Díaz–Rodríguez**, de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes en el año 2003 durante la XII PCSMGE presentan un documento titulado “Fricción en Suelos: Observaciones a Micro y Macro Escala”, en donde se hace una síntesis de lo que ha sido la historia de la investigación en fricción de suelos además de los mecanismos y observaciones que predominan en cada escala del comportamiento de los materiales.

De otra parte, el trabajo presentado y publicado por **S. Leroueil**, de la Universidad Laval en Québec, titulado “Taludes Naturales y Cortes;

Mecanismos de Movimiento y Falla”, condensa en forma magistral gran parte de los adelantos científicos e investigativos respecto del comportamiento de los geomateriales, examinando los aspectos básicos de la mecánica de suelos que son relevantes, la importancia del agua y las diferentes etapas de los movimientos de taludes. Se revisa con detalle la fragilidad de algunos suelos y la influencia de otros factores tales como el creep, la fatiga, la desestructuración, la saturación parcial y la infiltración, entre otros.

La “Degradación Tiempo Dependiente debida a Falla Progresiva de Puentes de Roca a lo largo de Discontinuidades”, por **J. Kemeny** (Universidad de Arizona, USA), publicado en el *Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, Septiembre de 2004, es uno de los trabajos recientes que mediante modelación numérica ayudan a comprender la naturaleza de estos procesos tiempo-dependientes, lo cual se hace normalmente usando visco-plasticidad, sin embargo cuando esa dependencia es debida a procesos de fragilidad y crecimiento de grietas, la aproximación debe ser micro-mecánica con parámetros mecánicos y geométricos bien definidos.

Para finalizar esta síntesis del conocimiento en esta región del mundo, el documento titulado “Cómo Afectan la Fábrica y la Dilatación la Resistencia de Materiales Granulares?” por **R.G. Wan et al.** (Canadá, 2005), aclara un aspecto asociado al papel de la fábrica del material, en el sentido que sus cambios ocurren cuando las deformaciones unitarias mayores que los esfuerzos son impuestas a un volumen de material. El mecanismo por el cual los materiales derivan su resistencia es reflejado en la forma en que los esfuerzos/fuerzas son llevados por la microestructura; para detectar esto se deben ensayar los geomateriales en condiciones diferentes a las conocidas drenada y no drenada.

3.3 Resumen de la Investigación Reportada y Publicada en el Ámbito Internacional

Evidentemente la relación de trabajos aquí presentada es mínima comparada con la gran cantidad de documentos a los cuales se tiene acceso hoy día, pero constituye un punto de partida para identificar las tendencias mundiales en investigación de geomateriales, en aspectos asociados al comportamiento esfuerzo-deformación de rocas lodosas, en lo cual el aporte

que han realizado investigadores en mecánica de suelos es invaluable y permite notar que cada día se estrechan más los lazos con la mecánica de rocas.

Se destacan entre muchas investigaciones, las lideradas por la UPC (Barcelona, España) dado que han desarrollado modelos avanzados de comportamiento de materiales, los cuales al parecer tienden a acercarse más al comportamiento real de estos, no obstante no han sido validados y apenas empieza a montarse la infraestructura que permitirá hacer dicha validación; la aplicación de conceptos como los estados límite y crítico al comportamiento deformacional de rocas es otra muestra de que los materiales se enmarcan dentro de los mismos principios universales de la mecánica y que las peculiaridades de cada uno se deben ir estableciendo en la medida que se conozcan los fundamentos que gobiernan la generalidad.

La investigación a escala microestructural está en pleno desarrollo y ésta se debe intensificar ya que está claro que su importancia radica en que a esta escala se generan muchos de los procesos que controlan el comportamiento de los materiales y que en muchos casos los están llevando a la falla, especialmente cuando son sometidos a procesos de meteorización o descarga, permitiendo que la estructura se vuelva frágil y por tanto vulnerable ante diferentes condiciones físicas y ambientales.

4. DISCUSIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE ROCAS LODOSAS

Después de este brevísimo extracto de la revisión bibliográfica adelantada respecto de la investigación y trabajos que se han realizado en el mundo sobre el tema en cuestión, el autor de esta síntesis del estado del conocimiento quiere plantear una discusión técnico-científica que gire en torno al enfoque que se le debería dar a la caracterización de geomateriales, en este caso particular rocas lodosas y su comportamiento esfuerzo-deformación, ya que los procesos involucrados en la desestructuración de estos materiales son sui géneris y difieren sensiblemente de los que afectan otros materiales reconocidos como estructurados.

Para empezar es importante aclarar algunos conceptos en los cuales se observa que aun no hay

un total acuerdo entre los investigadores, ya que mientras para unos la roca blanda “es aquella que puede fallar a través de material intacto (Intact Failure) a los niveles de esfuerzos litoestáticos existentes próximos a una excavación”, lo cual depende de la anisotropía de esfuerzos en campo, y por tanto “rocas con valores de resistencia a la compresión inconfiada menores que 37.5 MPa, y menos frecuentemente, menores que 75 MPa pueden considerarse como rocas blandas” (Nieto, 1982 – Montero, 2005), para otros este concepto podría estar más asociado al comportamiento post-pico, entendiendo como tal que si éste se muestra elástico-frágil se trata de una roca dura, si sufre ablandamiento por deformación sería una roca promedio, mientras que en el caso de ser elástico-plástico es una roca blanda (Hoek, 2002).

Aparentemente los conceptos son mutuamente excluyentes, es decir para unos interesa la condición que predomine antes y durante la falla mientras que para otros la clave estaría en el comportamiento después de ésta; no obstante lo anterior ambos criterios serían válidos desde el punto de vista de la escala a la que se observen los procesos; es decir, cuando se mira la macroestructura gobiernan las discontinuidades presentes en un macizo rocoso, bien sea que se trate de planos de estratificación, bandeamiento y esquistocidad, entre otros, mientras que a nivel microestructural controlan los minerales constitutivos, el arreglo de partículas y la presencia y estado de cementante entre ellas, como algunas de las principales características.

Otro aspecto clave es la definición de un material estructurado versus el que no lo es; en cuanto a esto, si se considera que la desestructuración se debe a procesos de deformación previa o remoldeo de los materiales, ó en los cuales ellos nunca han existido (Leroueil & Vaughan, 1991), prácticamente todos los materiales naturales serían estructurados; pero qué pasa cuando la “estructura virgen o inicial” se altera por procesos naturales o inducidos, p.e. erosión ó ciclos de carga-descarga-recarga, de los cuales no necesariamente se tenga conocimiento o no sean fácilmente discernibles mediante los ensayos de laboratorio convencionales?; en ese caso se debería hablar de un material estructurado para un tiempo dado, debido a que dichos materiales, y en forma particular las rocas, pueden haber transitado durante su historia geológica por procesos que implicaron desestructuración y posterior recuperación de esta.

Sin embargo es claro que uno de los aspectos fundamentales a la hora de caracterizar estos materiales, lo constituye la toma de muestras y la pérdida de condiciones naturales que pueden sufrir estos, tanto al momento de su obtención como su traslado, hasta cuando se empiecen a realizar los respectivos ensayos de laboratorio; este aspecto prácticamente no es tratado en la literatura, probablemente debido a que los investigadores normalmente trabajan con las muestras tal como llegan a su laboratorio.

El estudio sistemático de la microestructura, es decir la estructura a escala microscópica, orientaría en forma más adecuada este tipo de investigaciones que pretenden caracterizar procesos de falla intacta de materiales y por ende debería incluir no solo la caracterización de los minerales y otras sustancias constitutivas, sino además la forma y tamaño de granos y de poros, su distribución espacial y características de rugosidad y asperezas, tipo y cantidad de contactos, presencia y calidad del cementante o bonding, fases constitutivas e interacciones entre ellas, etc.

De otra parte y dado que los procesos de degradación de estos materiales se presentan por lo general en tiempos muy cortos, su naturaleza es tiempo-dependiente, por lo que las investigaciones deben tener en cuenta la variable tiempo, en cuyo caso no se tratarían bajo los modelos de relajación convencionales (creep), pero que igualmente al considerar este aspecto como fundamental, arrojarían resultados en términos de relaciones constitutivas.

Igualmente se quiere plantear la necesidad de investigar los procesos de degradación de estos materiales bajo condiciones que integren diversos factores que actúan en el terreno, entre ellos: condiciones de humedad inicial, estado inicial de esfuerzos, relación de vacíos inicial, modelo geológico-tectónico-hidráulico que controle el sitio de estudio, grado de meteorización de los materiales presentes, fábrica y estructura inicial, determinación de estado virgen y por supuesto del estado crítico, de tal forma que se obtengan las curvas de cedencia de los materiales, y, mediante observación de los comportamientos, determinar el nivel de susceptibilidad ante diferentes procesos de degradación de propiedades como la descarga, la erosión hídrica, la disolución química u otros.

5. CONCLUSIONES DE LA SÍNTESIS Y RECOMENDACIONES A FUTURO

La investigación adelantada en el mundo respecto del comportamiento esfuerzo–deformación de rocas lodosas, ha avanzado en forma significativa en otras latitudes debido a intensas campañas de caracterización y desarrollo de modelos avanzados de comportamiento pero en nuestro medio hay un rezago grande a la hora de caracterizar estos materiales geológicos, quizás en parte por la innecesaria visión disciplinaria de algunos investigadores en mecánica de rocas pero sobretodo por el desconocimiento de quienes tienen en sus manos asignar recursos para un mejor conocimiento de nuestros materiales, es decir las entidades gubernamentales que contratan los estudios, asociado esto a la posibilidad real de adelantar campañas de exploración y reconocimiento de las propiedades que controlan el comportamiento de las rocas, sin entrar a analizar que los costos por posibles fallas y desastres, a veces mal interpretados como naturales, siempre serán mayores que los que implica la investigación de materiales.

El impulso que han venido teniendo los conceptos y modelos de trabajo a nivel microestructural es clave para orientar en forma adecuada la investigación, porque además permite integrar diferentes disciplinas y como resultado de esto modelar en forma más real los procesos involucrados en la degradación de los materiales, es decir el geoambiente. En esta forma se podrá en un futuro optimizar la administración de los recursos geoambientales, aspecto fundamental para países en pleno desarrollo como Colombia y en las regiones de Centro y Sur Americana.

En el conocimiento de lo microestructural asociado a la modelación física y numérica de avanzada, podrían estar varias de las respuestas que aun la ciencia no ha logrado ofrecer, cuando de comprender y predecir el comportamiento de materiales como las rocas degradables se trata.

REFERENCIAS CONSULTADAS

Acosta H. *et al.* (2005). *Viscous Property of Clay in 1–D Compression: Evaluation and Modeling*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.

Alonso E. E. & Alcoverro J. (2003). *Swelling and Degradation of Argillaceous Rocks*. Departamento de

Ingeniería Geotécnica y geociencias, UPC. Barcelona, España.

Alonso E.E., Romero E., Amedo D. & Olivilla S. (2005). *Geotechnical Properties of Low Density Unsaturated Carbonated Clayey Silts and Impact on the Foundation of Canal Embankments*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.

Alonso E.E., Gens A., Berdugo I. & Romero E. (2005). *Expansive Behavior of a Sulphated Clay in a Railway Tunnel*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.

Arel E. & Önalp A. (2004). *Diagnosis of the Transition from Rock to Soil in a Granodiorite*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 9, Septiembre 1, 2004.

ARMA – American Rock Mechanics Association. (2003). *Workshop on Deep Underground Science and Engineering Laboratories (DUSEL's). Final Report*.

Bjerrum L. (1967). *Progressive Failure in Slopes of Overconsolidated Plastic Clay and Clay Shales*. Terzaghi Lecture. Memorias de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. Journal.

Bolton M. D. (2000). *The Role of Micro–Mechanics in Soil Mechanics. International Workshop on Soil Crushability*. Yamaguchi University, Japan. Julio 1999.

Castellanza R. & Nova R. (2004). *Oedometric Test on Artificially Weathered Carbonatic Soft Rocks*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 7, Julio 1, 2004.

Cavounidis S. (2005). *Slope Failure Movements Controlled by Unloading*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.

Conil N., Djeran–Maigre I. *et al.* (2004). *Poroplastic Damage Model for Claystones*. Applied Clay Science 26 (2004) 473–487.

Díaz–Rodríguez J. A. & Martínez–Vásquez J. J. (2005). *Strain Rate Behavior of Mexico City Soils*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.

Elsworth D. *et al.* (2003). *Deep Underground Science and Engineering Laboratories (DUSELs)*. American Rock Mechanics Association.

Futai M. M. & Almeida M. S. S. *et al.* (2004). *Yield, Strength, and Critical State Behavior of a Tropical Saturated Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 11, Noviembre 1, 2004.

Harr, M. E. (1980). *Mechanics of Particulate Media, A Probabilistic Approach*. McGraw – Hill. Purdue University. USA.

Hauze F. *et al.* (2003). *Rock Mechanics and Enhanced Geothermal Systems*. American Rock Mechanics Association.

Hoek, E. (2000). *Rock Engineering – Course Notes*. Versión electrónica obtenida en la página Web www.roscience.com/.

- Instituto Nacional de Vías–INVIAS & Ministerio del Transporte. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes–Geotecnia Vial*. García López *et al.* Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá.
- Katsuki D. & Nakata Y. (2005). *An Elasto–plastic Constitutive Model for Structured Sand with Interparticle Bonding*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.
- Kemeny J. (2005). *Time–dependent Drift Degradation due to the Progressive Failure of Rock Bridges Along Discontinuities*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42, 35–46.
- Khranchenkov M. G. (2005). *Rheological Double–porosity Model for Clayed Rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Lacasse S. & Berre T. (2005). *Undrained Creep Susceptibility of Clays*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.
- Leroueil S. & Vaughan P. R. (1991). *The General and Congruent Effects of Structure in Natural Soils and Weak Rocks*. Géotechnique 40, No. 3, 467–488.
- Leroueil S. (2001). *Natural Slopes and Cuts: Movement and Failure Mechanisms*. Géotechnique 51, No. 3, 197–243.
- Malandraki V. & Toll D. G. (2001). *Triaxial Tests on Weakly Bonded Soils with Changes in Stress Path*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 3, Marzo, 2001.
- Mofiz S. A. *et al.* (2003). *Trayectorias de Esfuerzo y Esfuerzo–Deformación para Suelos de Granito Descompuesto Usando Métodos Numéricos*. Memorias XII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. MIT, Cambridge, MA. (USA).
- Novello E. A. & Johnston I. W. (1995). *Geotechnical Materials and the Critical State*. Géotechnique 45, No. 2, 223–235.
- Pavon J. & Cacace H. (2005). *Geotechnical Site Characterization of Weak Rock in Asuncion*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.
- Rodríguez J.A. (2005). *Yielding and Stress–strain Relationships for Bogotá Clays*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.
- Roscoe K.H. *et al.* *Yielding of Clays in States Wetter than Critical*. Páginas 211 – 240.
- Rowe P.W. (1972). *The Relevance of soil Fabric to Site Investigation Practice*. Géotechnique 22, No. 2, 195–300.
- Santamarina J. C. & Díaz–Rodríguez J. A. (2003). *La Fricción en los Suelos: Observaciones a Micro y Macro Escala*. Memorias XII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. MIT, Cambridge, MA. (USA).
- Sadisun I. A. & Shimida H. *et al.* (2003). *Observaciones Experimentales sobre las Características del Desleimiento de Roca con Referencia Particular a Rocas Sedimentarias Argilíticas*. Memorias XII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. MIT, Cambridge, MA. (USA).
- Shalabi F. I. (2005). *FE Analysis of Time–dependent Behavior of Tunneling in Squeezing Ground Using Two Different Creep Models*. Journal of Tunnelling and Underground Space Technology 20, 271–279.
- Torres Suárez M. C. (2006). *Influencia de Procesos de Descarga en la Microestructura y Resistencia de Rocas Arcillosas Degradables*. Propuesta de Tesis Doctoral. Director Ing. Adolfo Alarcón Guzmán. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- _____. (2005). *Utilización de los Métodos No destructivos –MND– para Determinar Propiedades Físico–Mecánicas en Rocas Sedimentarias*. Tesis de Maestría en Ingeniería–Geotecnia. Director Ing. Jorge Enrique Puerto Garzón. Universidad Nacional, Bogotá.
- _____. (2004). *Impacto de los Métodos No Destructivos en Mecánica de Rocas*. Artículo Memorias del X Congreso y V Seminario Colombianos de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Paipa (Boyacá). ISBN 958–33–6321–9. Páginas 459–468.
- _____. (2003). *Estudios Geotécnicos y su Impacto en la Vulnerabilidad de las Construcciones a la Luz de las Normas Sismoresistentes NSR–98*. Artículo Revista Ingeniería Grancolombiana No. 8. ISSN 0122 – 3739. Páginas 15–26.
- _____. (2004). *Impacto de los Métodos No Destructivos en Mecánica de Rocas Moderna–Aplicaciones a la Ingeniería Civil y de Minas*. Artículo Revista Ingeniería Grancolombiana No. 9. ISSN 0122 – 3739. Pág. 24–38.
- _____. (2003). *Propuesta para Impartir Formación de Profundización en Ingeniería Civil – Mecánica de Rocas Básica con Aplicación de Métodos No Destructivos*. Propuesta presentada en la Universidad La Gran Colombia.
- Tu X. B. *et al.* (2005). *Swelling Behavior Induced by Alteration in Granite and Its Implications on Underground Excavation*. Journal of Tunnelling and Underground Space Technology 20, 378–389.
- Turner A. K. & Schuster R. L. (1996). *Landslides – Investigation and Mitigation – Special Report 247*. National Academy of Sciences. USA.
- Vaunat J. & Gens A. (2003). *Degradación y Deformación de una Roca Blanda Arcillosa*. Memorias XII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. MIT, Cambridge, MA. (USA).
- Wan R.G. *et al.* (2005). *How do Fabric and Dilatancy Affect the Strength of Granular Materials?* Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.
- William E. & Airey D.W. (2005). *Influence of Stress Level on the Highly Compacted Shales in the Sydney Basin*. Memorias de la Conferencia Mundial de Mecánica de Suelos en Osaka, Japón.