

Capítulo 6

Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

6.1 Síntesis del trabajo. Conclusiones

6.1.1 Antecedentes

El comportamiento mecánico de las escolleras tiene particularidades muy importantes, que determinan su respuesta a una sollicitación específica. Partiendo de que la escollera es un material granular, se identificaron los puntos clave que diferencian su comportamiento de otros materiales de menor tamaño. La rotura de partículas es la causa principal de la variación del comportamiento de los materiales granulares a diferentes escalas. Tomado en cuenta este hecho, se analizaron los resultados de ensayos triaxiales en arenas sometidas a grandes presiones; y todo tipo de ensayo efectuado con intenciones de realizar modelaciones constitutivas, o que dieran alguna una pauta sobre el comportamiento de este tipo de suelos.

Del escrutinio de los resultados mencionados, se deduce que la rotura de partículas del material disminuye la dilatancia, por consiguiente la resistencia máxima. Existe un umbral de tensiones, para el cual la rotura de partículas empieza a ser significativa. La dinámica entre partículas que se presenta en un ensayo edométrico es diferente de la del ensayo triaxial. Pero para cada forma de aplicación de carga se han detectado límites, en los que la rotura de partículas empieza a influir en la respuesta del material a la sollicitación externa.

El límite de tensiones para el que se presenta rotura de partículas disminuye en función de la resistencia del material y del tamaño de las partículas.

El interés prioritario de esta investigación es estudiar la influencia del contenido de humedad sobre las características mecánicas de un material granular, cuando se somete a estados de tensión triaxial. El contenido de humedad es una variable fundamental a controlar, para entender adecuadamente el comportamiento de las escolleras. De los ensayos triaxiales en arenas realizados por diferentes autores, se deduce que los materiales secos tienen mayor resistencia al corte y dilatan más que los saturados. En los ensayos edométricos en escolleras con humedad relativa controlada (Oldecop 2000), se detectó un aumento de la compresibilidad del material cuando el contenido de humedad aumenta.

El concepto de estado crítico es una herramienta muy potente que simplifica el planteamiento de modelos constitutivos. Esta condición última no es ampliamente aceptada en el caso de los materiales granulares, debido a que su obtención no es sencilla. En los últimos años se han desarrollado técnicas para su identificación en arenas, y se ha generalizado un estado crítico bi-lineal. La pendiente de la segunda línea está controlada por la rotura de partículas. En materiales con mayor tamaño se espera que el inicio de la rotura de partículas se produzca a tensiones menores. Tomando en cuenta la influencia de la rotura de las partículas es posible manejar un estado crítico en escolleras, concepto que ayuda en el planteamiento del modelo constitutivo.

De las investigaciones consultadas, en las que se discute el tema de la superficie de fluencia de arenas y gravas sometidas a estados de tensión triaxiales, se concluye que la superficie de fluencia se ve afectada por la trayectoria previa de tensiones. La superficie tiene forma de elipse con su eje mayor girado hacia la zona donde las tensiones previas han actuado.

La teoría de Rowe (1962), que explica como el incremento de resistencia se relaciona con la dilatancia, ha sido modificada por varios autores para describir el comportamiento de los suelos granulares. Es muy interesante la modificación de Wan y Guo (1998), que incluye un parámetro de estado, con el que se logra reproducir de una manera natural la influencia de la densidad y la tensión en la dilatancia. La teoría de Rowe modificada, se ha utilizado

como potencial plástico para reproducir el comportamiento denso-tenso dependiente de la arena.

Las ideas anteriores son los puntos de partida de la presente investigación. En el desarrollo de la presente investigación se corroboran y aplican los tópicos mencionados. Para con ello, ampliar el conocimiento actual del comportamiento de los materiales granulares sometidos a tensiones triaxiales, haciendo un especial énfasis en la influencia de la succión.

6.1.2 Diseño del equipo triaxial de escolleras

Se diseñó y construyó una célula triaxial de escolleras con control de succión para probetas de 250 mm de diámetro por 500 mm de altura. Además, se construyó y adaptó infraestructura adicional para montar la célula triaxial y aplicar la carga axial a la probeta. El equipo se ubicó en un sitio equipado con temperatura controlada.

El diseño de la célula triaxial estuvo condicionado por la ubicación de la instrumentación dentro de la célula. Al inicio se utilizaron sólo sensores comerciales. Se instalaron tres sensores de desplazamiento (LVDT), para la medición de la deformación vertical; una célula de carga en el cabezal; un transductor diferencial de presión (DPT), para la medición indirecta global del cambio de volumen, mediante el seguimiento del nivel de agua en una zona con dimensiones conocidas; y un transductor de presión para medir la presión de confinamiento aplicada. La presión de confinamiento se aplicó con aire comprimido.

Después de tener la configuración general del equipo, se pensó en instalar un transductor alternativo que registrara el cambio de diámetro de la probeta. Como no se encontraron alternativas en los transductores comerciales, se decidió diseñar uno, la célula de medición diametral (CMD). Las ventajas de este nuevo transductor son: el espacio reducido que ocupa, su resistencia al agua y su bajo coste. La desventaja es que para ensayos largos, clásicos en suelos no-saturados, el pegamento que se utiliza para instalar las galgas extensométricas presentar fluencia y puede perder estanquidad cuando se aplican grandes presiones. La implementación de este transductor mejoró notablemente la precisión de los

resultados, debido a que los obtenidos por el DPT necesitan corregirse por la penetración de membrana. Con el diseño de las CMD, se implementó un método de cálculo analítico en el que se obtuvo una expresión matemática, que relaciona las deformaciones del transductor registradas por las galgas y la distancia entre los apoyos del transductor.

Con el avance del programa experimental se decidió implementar un transductor adicional, para la medición de la deformación axial local. Este nuevo dispositivo permitió verificar las mediciones realizadas con los LVDT sobre el cabezal. Se decidió adaptar transductores de medición local (LDT) sustentados en unas bases diseñadas para instalarse sobre las CMD. Los LDT son utilizados para medir pequeñas deformaciones, y en este caso se adaptaron para poder medir deformaciones hasta del 20%. Los LDT funcionaron muy bien, no obstante, la medición se vio afectada por el deslizamiento de la membrana respecto al material cuando se produjeron grandes deformaciones. Con estos transductores se pudo verificar que el error por efecto “bedding” no es importante, eliminándose cuando la probeta se enrasó con material de menor tamaño que rellena los huecos existentes entre el filtro y el material.

Para lograr el control de la humedad relativa se instaló un sistema de aire acondicionado, con el que se obtuvo un control de variación en la temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$. Para la imposición de la humedad relativa se formó un circuito con: la célula triaxial, una bomba de aire, un higrómetro y un pote con una solución salina saturada. Este sistema fue utilizado por Oldecop (2000) para ensayos edométricos en escolleras y resultó de utilidad en el equipo triaxial.

Los ensayos se pueden efectuar con deformación y tensión axial controlada. Con ayuda de la bomba de aceite de la prensa se realizaron los ensayos con deformación controlada. Para poder hacer los ensayos con control de tensión se diseñó y construyó una interfase aire-aceite, conectada a un regulador de presión de aire. Se puede seleccionar el modo de aplicación de carga axial, mediante una válvula de tres vías que conduce el aceite directamente al pistón de la prensa.

Se automatizó la adquisición de datos mediante una tarjeta 16 bits. Los datos se guardan en formato de texto mediante un programa hecho en Visual Basic. El programa permite la

visualización de los resultados a lo largo del ensayo, que es una ayuda muy importante en el seguimiento de las trayectorias escalonadas efectuadas para la obtención de la superficie de fluencia.

6.1.3 Resultados obtenidos

Se hicieron ensayos triaxiales drenados con deformación controlada y humedades relativas de 100, 92, 85, 75, 52 y 36 %. El material utilizado fue una pizarra que se obtuvo de las márgenes del río Pancrudo, sitio donde se construirá la futura presa de Lechago. Las características más importantes del comportamiento del material en este tipo de ensayos son:

- Para una misma presión de confinamiento, la resistencia al corte del material aumenta a medida que disminuye la humedad relativa. En cuanto al comportamiento volumétrico dentro de la fase de compresión axial, la dilatancia aumenta cuando disminuye la humedad relativa. De acuerdo a las granulometrías obtenidas después del ensayo se observa claramente como, el cambio del contenido de humedad induce un cambio granulométrico, debido al cambio de la resistencia de la roca.
- En los ensayos con una misma humedad relativa y diferentes presiones de confinamiento, se observa como la resistencia al corte aumenta cuando la presión de confinamiento aumenta, pero la rigidez inicial del material disminuye al aumentar la presión de confinamiento. Este hecho se debe a que la rotura de partículas se presenta desde tensiones muy pequeñas, y produce una disminución del desviador producido por el constante reacomodo de las partículas. Por otro lado, la deformación volumétrica aumenta con la presión de confinamiento.
- Se observó también que la relación de tensiones crítica $M_{cr} = q_{cr}/p_{cr}$, tiene una variación no lineal en la medida que la presión de confinamiento y la humedad relativa aumentan, como consecuencia de la rotura de partículas que se produce en cada condición.

De acuerdo con lo anterior se deriva que el cambio de humedad en el material influye notoriamente en su comportamiento al corte. Por ello, se acepta que el contenido de humedad del material es una variable a controlar para conocer en detalle el comportamiento al corte de este tipo de materiales.

Examinando los resultados de deformación volumétrica de los ensayos triaxiales en los que se impusieron humedades relativas de 100 y 36%, se observa como la deformación última tiende a estabilizarse. Sólo en los ensayos con menor presión de confinamiento, no se estabilizó la deformación, aunque existe cierta tendencia a la estabilización. Analizando los datos en el plano, volumen específico-tensión media ($v-p$), y uniendo los últimos puntos de los ensayos se obtiene una línea recta. Esta línea recta es una buena estimación de la línea de estado crítico. Existe una separación clara entre las líneas de estado crítico para cada humedad relativa, tal como se observa en la Figura 4.23, que es una aportación importante de la presente investigación.

Para eliminar errores de excesiva dilatación en el cálculo del volumen de la probeta con los datos obtenidos de las CMD, se supuso que la probeta cuando dilata en su parte central, adopta una forma parabólica. En base a las dimensiones obtenidas por los tres sensores CMD colocados en la parte central, y al diámetro del cabezal y la base de la probeta; se obtienen la ecuación de una parábola, con la cual se realiza una integración del volumen de la probeta. Con el volumen obtenido se calculó un diámetro equivalente, que se utilizó en el cálculo de la deformación volumétrica y la tensión axial. Con este procedimiento se lograron una mejor concordancia de los resultados en la obtención de las líneas de estado crítico.

Se realizaron dos ensayos con control de deformación y una etapa intermedia de humedecimiento bajo desviador constante. En el primero se varió el contenido de humedad de la muestra mediante el cambio de la humedad relativa; al que se aplicó una presión de confinamiento de 0.3 MPa (ensayo DC3). Los resultados de las deformaciones axial y volumétrica tienen una componente dependiente del tiempo muy grande, que supera a la deformación obtenida en un ensayo saturado con la misma presión de confinamiento (ver Figura 4.26). La tensión desviadora aumenta la deformación en el tiempo de una manera muy significativa. En otro ensayo similar, pero donde se aplicó una presión de

confinamiento de 0.5 MPa; se logró eliminar la influencia temporal y los resultados de este ensayo son directamente comparables, con los del ensayo saturado y los del que se le impuso una HR de 36%. Se observa como la resistencia y el comportamiento volumétrico pasa de un estado seco a uno saturado, correspondiendo con la resistencia y deformación obtenidas en los ensayos realizados con humedad relativa constante.

El material presenta una superficie de fluencia que tiene la forma de una elipse girada hacia la zona desviadora. Esta geometría es similar a la que se presenta en arenas. Se obtuvieron los vectores de deformación plástica que en la mayoría de los casos no son perpendiculares a la superficie de fluencia, dato que corrobora un comportamiento no asociado del material. Cuando se posiciona la superficie de fluencia en la zona no saturada y se intercepta en la zona de saturación, se obtiene una superficie de fluencia contraída por el efecto de la saturación. Se obtiene por ende, una presión de pre-consolidación mayor en los materiales secos.

Con la ayuda de las células de medición diametral y el transductor diferencial de presión, se pudo estimar la penetración de membrana en los ensayos isótropos y triaxiales. Se detectó que existen variaciones en la penetración de membrana, en la medida que aumenta la deformación de corte. Su tendencia es no lineal, debido al cambio de la dilatación que se produce en los ensayos de corte. Este detalle suele omitirse cuando se hacen las correcciones de penetración de membrana en ensayos granulares.

6.1.4 Análisis de los resultados para su modelación

Se analizaron los resultados de los ensayos del material tomando como base una ecuación hiperbólica que incluye un parámetro de estado, propuesta por Wood *et al.* (1994). Se observó que el parámetro b , inverso de la pendiente inicial; aumenta cuando la presión de confinamiento, y el trabajo total producido en la zona de compresión isótropa. Se reconoció la existencia de un trabajo plástico que está asociado exclusivamente con el reacomodo de partículas, y otro que incluye el reacomodo y la rotura de partículas. Al trabajo que genera rotura de partículas se le llamó trabajo plástico efectivo.

La relación de tensiones crítica M_{cr} , depende del trabajo plástico efectivo y de la succión. Se propuso que el parámetro M_{cr} sea función del trabajo plástico efectivo, y que disminuye hasta un valor residual. La ganancia de la resistencia al corte en función de la succión se atribuye a la variación que presentó M_{cr} . Su cambio se expresa en porcentaje respecto al valor de M_{cr} en condiciones saturadas. La ganancia de la resistencia en función de la succión tiene una tendencia hiperbólica.

De acuerdo con el análisis de los resultados de los ensayos triaxial en el plano, de relación de tensiones principales en función de la dilatancia ($R = \sigma_1/\sigma_3 - D = 1 - \delta\varepsilon_p/\delta\varepsilon_l$); se dedujo que las deformaciones volumétricas dependen de la densidad, tensión y de la succión. La implementación de un potencial plástico que involucre un parámetro de estado puede reproducir el comportamiento anterior. Los parámetros de estado tienen como referencia la línea de estados críticos y son usados para reproducir la tenso-denso dependencia. En la presente investigación se encontró que la línea de estados críticos depende de la succión. Con en base a lo anterior se concluye, que la incorporación de este tipo de parámetros incluye de una manera natural la dependencia de la succión también.

6.1.5 Ecuación constitutiva para escolleras

Se planteó un modelo elasto-plástico con dos superficies de fluencia; en base a que la dinámica entre las partículas es diferente, cuando se somete un material granular a deformaciones de corte y deformaciones volumétricas. En el caso de deformaciones de corte se presenta un movimiento de partículas en la dirección general del corte, que involucra: fricción, obstrucción, dilatancia, rotura de partículas y reacomodo. El caso volumétrico se presenta una contracción, que involucra: fricción, reacomodo y rotura de partículas. Una superficie reproduce el comportamiento de corte del material y la otra el volumétrico, con parámetros de endurecimiento independientes. La superficie de fluencia de corte depende de las deformaciones de corte, las volumétricas, el trabajo plástico efectivo y la succión. La superficie de fluencia volumétrica depende de las deformaciones plásticas volumétricas y la succión. La variación del parámetro de endurecimiento de la superficie de fluencia de corte se basa en la ecuación hiperbólica de Wood *et al.* (1994), que utiliza un parámetro de estado para normalizar la resistencia adicional producida por la

dilatancia. Para describir el comportamiento volumétrico se adopta el modelo de Oldecop y Alonso (2001).

El parámetro de endurecimiento de la superficie de fluencia de corte depende de los parámetros b y M_{cr} , mencionados en el apartado anterior. Al parámetro b se le asigna una tendencia hiperbólica con el trabajo plástico total. Al parámetro M_{cr} , se le asigna una variación de disminución exponencial inversa, que tiende a un valor residual en función del trabajo plástico efectivo. Además M_{cr} , crece con una tendencia hiperbólica en función de la succión. La variación de estos parámetros es provocada por la rotura de partículas, e implementar estas tendencias en un modelo constitutivo es innovador. Sin embargo, esta consideración resulta en una subestimación de la resistencia al corte entre las deformaciones axial de 1 y 7%, en los materiales sometidos presiones de confinamiento de 0.1 MPa y succión alta.

Se supone que el material puede alcanzar el estado crítico. La línea de estados críticos es una línea recta en el plano volumen específico-tensión media. La posición de la línea de estados críticos depende de la succión; como no se encontró una dependencia clara en los ensayos realizados, se adoptó una lineal en función del logaritmo de la succión. Tal como, Oldecop (2000) encontró para el colapso volumétrico por cambio de succión.

Como regla de flujo de la superficie de corte se propone una ecuación sencilla que depende del ángulo de dilatancia del material. Este ángulo se calcula con la teoría de Rowe (1962) en deformación plana, que fue modificada por Wan y Guo (1998). La modificación consistió en la incorporación de un parámetro de estado, que junto con el estado crítico dependiente de la succión propuesto en la presente investigación, reproduce el comportamiento volumétrico que es función de la densidad, la tensión y la succión.

Se supone que la fluencia del material comienza desde el inicio de la aplicación del desviador. Como consecuencia de que la rotura de partículas se produce a tensiones muy pequeñas. En el caso de que la presión de confinamiento muy pequeña y succión muy elevada el material estudiado no presentó rotura de partículas. En este caso se detectó una pequeña superficie de fluencia en la zona de las tensiones desviadoras, generada por la compactación del material.

La integración del modelo se hizo en la hoja de cálculo “Excel”, con ayuda de funciones hechas en “Visual Basic” para “Excel”. En general el modelo reproduce adecuadamente los ensayos realizados. El modelo es muy simple en su concepción, aunque se complica un poco la implementación debido al problema de esquina que se genera cuando las dos superficies están activas.

6.2 Líneas futuras de investigación

El trabajo de investigación, descrito en este documento, abre el camino como toda investigación hacia nuevas interrogantes. En esta sección se plantean algunas ideas que podrían desarrollarse, para mejorar el entendimiento del comportamiento de los materiales granulares, cuando son sometidos a tensiones de corte y diferentes succiones.

6.2.1 Mejora del equipo triaxial

Como herramienta primordial para obtener información de primera mano, es necesario tener un equipo adecuado a las exigencias actuales. Un equipo triaxial construido es susceptible de mejoras, sobre todo después tenerlo a prueba después de su construcción. Así que se plantean algunas posibles mejoras que podrían contribuir a obtener resultados más confiables.

El equipo está bien instrumentado, pero sin embargo pueden mejorarse las células de medición diametral. Estas tienen el defecto de que las galgas extensométricas sumergibles utilizadas, se deterioran con el tiempo. Para ello hay que cambiar el tipo de galgas por otras que tenga un sistema de fijación diferente a la resina epóxica. Recientemente se han comercializado galgas extensométricas sumergibles encapsuladas, que se fijan mediante soldadura. Este tipo de dispositivos pueden mejorar la estabilidad en el tiempo de las células de medición diametral desarrolladas.

La implementación de un sistema de carga automatizado, complementaría el equipo triaxial. Hasta hoy las trayectorias de tensión realizadas se efectuaron manipulando los

diferentes equipos manualmente, y se realizó con cierto grado de incertidumbre. En la misma línea, está proyectado construir un sistema automatizado de inyección de aceite para el control de la aplicación de carga desviadora en la célula triaxial. La construcción de este equipo y la implementación de un sistema que controle los cambios de presión de confinamiento, son los sistemas requeridos para la automatización. Todo ello controlado mediante un programa capaz de mantener una trayectoria de tensiones o deformaciones, según sea el caso requerido en el estudio.

La mejora del equipo triaxial, sin duda facilitaría la tarea de investigar el efecto temporal sobre el comportamiento del material.

6.2.2 Estudios experimentales

En la medida que se obtienen resultados experimentales y se analizan, van surgiendo detalles interesantes susceptibles a ser estudiados. Este tipo de tópicos se presentaron en esta investigación, y se plantea la realización de estudios más detallados para esclarecerlos.

Uno de los aspectos que requiere particular atención, es la dependencia en el tiempo de comportamiento de la escollera. El ensayo DC3 comentado en el apartado 6.1.3 de este capítulo, es particularmente interesante en este tema, ya que la dependencia temporal de las deformaciones se vio magnificada por la presencia de la tensión desviadora y el cambio de humedad. Es importante realizar un programa experimental que contemple ensayos bajo tensión desviadora controlada con variación de succión, para así poder entender su dependencia del tiempo; con el fin de modelar adecuadamente el comportamiento de las escolleras.

Los ciclos de humedecimiento y secado que se producen en la naturaleza, como resultado del cambio climático de las estaciones, puede cambiar el comportamiento del material cuando esta sometido a un desviador constante. Por lo que es interesante plantearse esta variable adicional a la hora de estudiar el comportamiento en el tiempo.

En los resultados del programa experimental se analizó el estado crítico. Se encontró que depende de la succión. Pero se observó, que esta dependencia se ve afectado por la forma

de la partícula. Hecho por el cual, no se determinó una dependencia clara de la posición de la línea de estados críticos en función de la succión. En el caso en el que el material tiene un índice de lajas mayor, resultó que la línea de estado crítico se desplaza menos con la variación de la succión. Este detalle no había sido detectado antes; resulta interesante que se realizara un estudio especial en el que se identifica como la forma de la partícula y la succión, inciden sobre la posición de la línea de estado crítico.

Estudiar el comportamiento del material a bajas succiones sigue siendo una necesidad. En el ensayo DC3, cuando se tenía una humedad relativa de 98% (2.8 MPa) se saturó el material, y se produjeron unas deformaciones del un orden de magnitud mayores a las que ya se habían presentado hasta ese momento.

En los ensayos triaxiales realizados no se observó localización. Es posible que no se haya producido debido a la rotura de partículas tan intensa que se presentó. Este tópico es importante estudiarlo, ya que no está claro porque no se presentó localización en los ensayos realizados.

Las características de comportamiento presentadas en este material, deben de ser verificadas en materiales diferentes. Para así asegurarse que son generales. Por tanto la realización de ensayos similares a los efectuados en este estudio es primordial.

6.2.3 Modelación constitutiva

La concepción del modelo como dos superficie de fluencia plantea problemas de esquina en su implementación. Es interesante explorar su modificación por una sola superficie curva. Lo interesante sería implementar una superficie de fluencia cinemática, que tomase en cuenta la trayectoria previa de tensiones y la influencia de la rotura de partículas.

Mejorar el modelo constitutivo, en lo referente a la reproducción de la influencia de la rotura de partículas en la curva tensión-deformación. Ya que este fenómeno es complicado de reproducir.

La implementación del modelo en un programa de elementos finitos, es uno de los pasos pendientes para poder probarlo en casos reales de comportamiento de presas, o pedraplenes de carreteras y ferrocarriles.

