



La Resistencia al Corte y la Licuación de Suelos con Plasticidad

Prof. Heriberto Echezuría¹
hechezuria@gmail.com¹

¹ Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo
Recibido 21 de Junio de 2017
Aceptado 15 de Julio de 2017
Disponible online: 18 de Julio de 2017

Resumen: Se utilizan los parámetros que definen la correlación lineal entre el logaritmo de la resistencia al corte, $\text{Log}(S_u)$ y el logaritmo del contenido de humedad, $\text{Log}(\omega)$, a saber el término (TI) y la pendiente (m) para determinar cuándo cambia el comportamiento de un suelo de plástico a no plástico dependiendo de la cantidad de material no plástico en el mismo. Esto fue posible verificarlo para materiales tipo CL, para el cual se verifican tres tipos de comportamiento, a saber: plástico para $IP > 8$, intermedio para $6 < IP < 8$ y no plástico para $0 < IP < 6$. El rango de comportamiento intermedio indica que en ocasiones se comporta plástico y en ocasiones no plástico. Para otros suelos como CH, ML y MH se verifica la existencia de la misma correlación aunque no fue posible establecer si los cambios de comportamiento ocurren igual que para el CL. Para identificar si un suelo estará cerca de la zona de comportamiento controlado por la fracción no plástica se debe establecer su recta $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(\omega)$, seguidamente se le añade una fracción importante (10% a 20%) de material no plástico y se vuelve a determinar la nueva recta. Si la pendiente m de la recta y el TI disminuyen y se aproximan a los valores umbrales de $TI = 4$ y $m = 2$ entonces el material está en el umbral o muy cerca de la zona controlada por la fracción no plástica. Si contrariamente los valores tanto del TI como de m crecen al agregarle la fracción no plástica, el suelo está controlado por la fracción plástica. El Límite Líquido equivalente, LL_{eq} y el IP_{eqv} con la ayuda de los parámetros de la recta $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(\omega)$ proporcionan mucho más información que los límites convencionales con relación al potencial comportamiento del suelo, es decir plástico, intermedio o no plástico. La nueva Carta de Plasticidad Equivalente también proporciona una medida más real del comportamiento plástico del material que la Carta de Plasticidad convencional.

Palabras Clave: Comportamiento no plástico de arcillas, límites de Atterberg, licuación de arcillas.

Abstract: The parameters that define the linear correlation between the logarithm of the shear strength, $\text{Log}(S_u)$, and the logarithm of the water content, $\text{Log}(\omega)$, namely the independent term (TI) and the absolute value of the slope (m), are used to establish when soil behavior changes from plastic to non plastic depending upon the amount of non plastic material within the soil mix. It was verified for CL materials for which three types of behavior were identified, i.e. plastic for $IP > 8$, intermediate for $6 < IP < 8$ and non plastic for $0 < IP < 6$. The intermediate behavior means that the soil may behave sometimes as plastic and some other times as non plastic, so it defines a threshold zone. For other soils such as CH, ML and MH there exists the same type of correlation observed for CL but it was not possible to establish if they have the same type of behavior as the CL in the intermediate and non plastic zones. To establish whether or not the soil behavior will be controlled by the amount of non plastic material it is necessary to determine its $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(\omega)$ line and afterwards increasing its amount of non plastic content by say 10% or 20% and obtaining again the $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(\omega)$ line. If both, the absolute value of the slope and independent term (TI) decrease and both approximate to the limiting values of $TI = 4$ and $m = 2$ then the material will be within the threshold zone or very near it. If on the contrary, the values of both parameters increase as the amount of non plastic material increase then the soil is controlled by the plastic fraction in it. The new Equivalent Plasticity Chart along with the equivalent liquid limit, LL_{eq} , and the equivalent plasticity index, IP_{eqv} , as well as the parameters of the $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(\omega)$ line yield much more information than the conventional Plasticity Chart and Atterberg limits $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(\omega)$ regarding the plastic or non plastic behavior of the soil.

Keywords: non plastic behavior of clays, Atterberg limits, clay liquefaction.

I. INTRODUCTION

En este trabajo se utilizan los valores de los parámetros que definen la recta $\text{Log}(S_u)$ vs $\text{Log}(\omega)$, a saber el término independiente (TI) y la pendiente (m) para definir el cambio de comportamiento plástico a no plástico a medida que aumenta el contenido de material no plástico en el suelo. Para ello se utiliza los conceptos presentados por Echezuría [1, 2 y 3] sobre el rango plástico de suelos arcillosos, el cual se basa en la resistencia al corte obtenida con la veleta de laboratorio para distintas humedades del suelo en estado remoldeado.

Lo interesante de la metodología presentada Echezuría es que la misma ha permitido plantear un nuevo método para clasificar los suelos cuyos resultados son equivalentes a los obtenidos con los procedimientos convencionales de la ASTM [4 y 5]. La metodología aquí presentada es parte de la investigación sobre el tema de los cambios en las propiedades ingenieriles de mezclas de suelos plásticos y no plásticos que adelanta el autor con estudiantes de distintas universidades, incluyendo los aspectos relacionados con el potencial de licuación de suelos plásticos [6, 7, 8, 9 y 10].

A continuación presentamos un breve resumen de la metodología antes señalada. Primeramente indicaremos que, existe una correlación lineal entre el logaritmo del contenido de humedad (ω) y el logaritmo de la resistencia al corte (S_u) obtenida con la veleta de laboratorio para un suelo remoldeado, la cual en lo sucesivo denominaremos, $\text{Log}(S_u)\text{-Log}(\omega)$, la cual se ilustra en la Fig. 1 [2, 7 y 8]. Con base en esta correlación se define el valor absoluto de la pendiente, m, de la recta según se muestra en la Fig. 2. El rasgo más importante de esta correlación es que el valor de la pendiente, m, aumenta con el contenido de material no plástico al igual que lo hace el IP del suelo.

Adicionalmente, la posición en el plano log-log de la recta cambia moviéndose hacia la izquierda a medida que aumenta el contenido de material no plástico, lo cual se evidencia en la Fig. 1 para los dos suelos mostrados ya que la Barbotina tiene mucho más contenido de material no plástico que la Bentonita [4]. En efecto, la Bentonita (CH) contiene 15% de materiales no plásticos, mientras que la Barbotina (CL) tiene un 52% de materiales no plásticos, principalmente limo.

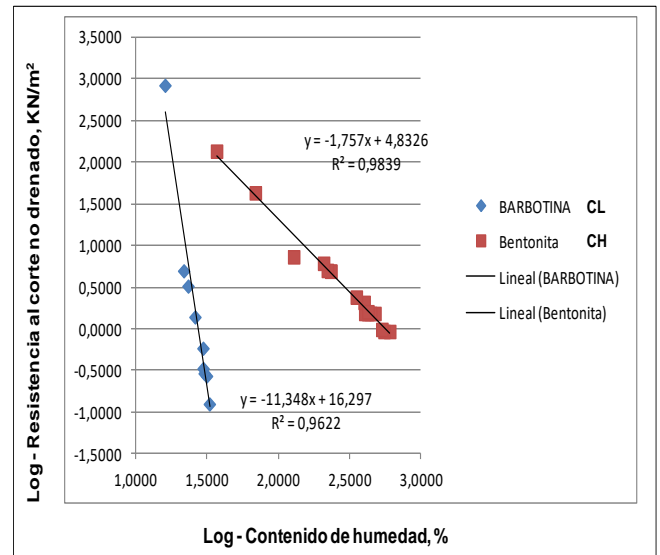


Figura 1. Variación del logaritmo de la resistencia al corte no drenado (S_u) con el logaritmo del contenido de humedad (w) de dos suelos de baja y alta plasticidad (Barbotina (CL) y Bentonita (CH)) [2, 7 y 8].

En trabajos anteriores [2 y 3] el autor también planteó una correlación entre el Límite Líquido y el valor de la humedad a un valor específico de la resistencia al corte tomado arbitrariamente pero correspondiente al estado líquido de los suelos. Ese valor de la resistencia al corte se definió como 1,5 kN/m^2 y lo denominamos como el Límite Líquido equivalente (LL-eqv). La relación entre el LL y el LL-eqv se muestra en la Fig. 3. La definición del LL-eqv de alguna manera viene a compensar lo deseado por Casagrande [11 y 12] en relación con contar con un valor único para la resistencia al corte de 25 gr/cm^2 para el LL, que hoy sabemos que no es posible, según varias investigaciones [13 y 14].

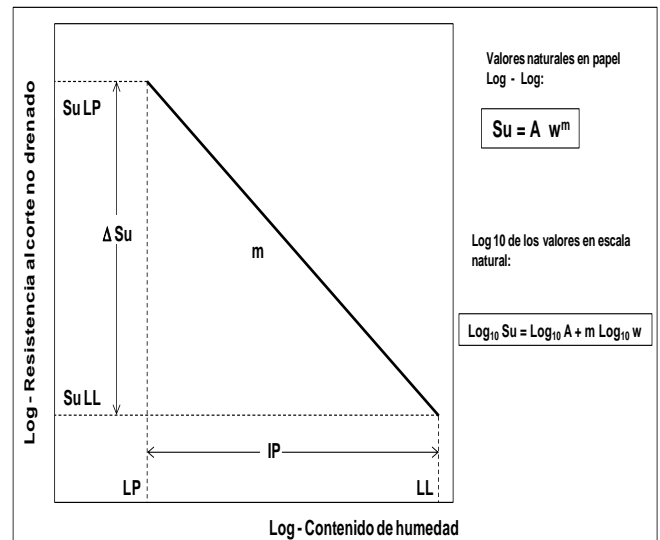


Figura 2. Diagrama esquemático de la recta $\text{Log}(Su)\text{-Log}(w)$, mostrando los límites y el índice de plasticidad además del valor absoluto de la pendiente, m [2].

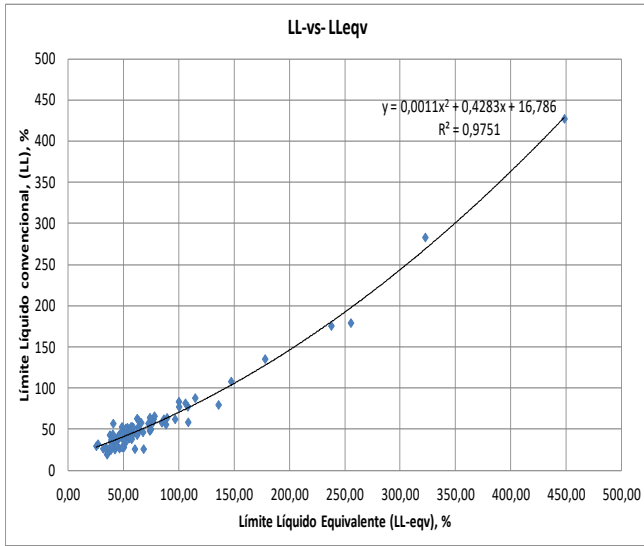


Fig. 3. Correlación entre Límite Líquido y la humedad para una resistencia al corte no drenado en estado remoldeado de 1,5 kN/m² de la base de datos ampliada [2 y 3]

Por otra parte, el autor [1] también ha definido un límite plástico equivalente, LP-reqv, como la humedad a la cual el suelo exhibe una resistencia al corte de 300 kN/m². Esta también es una definición arbitraria y se espera que dicha resistencia corresponda a una humedad que esté en el límite del rango plástico del suelo. De esta manera, el Índice de Plasticidad equivalente, IP-reqv, viene dado por la diferencia entre el LL-reqv menos el LP-reqv. El autor también ha examinado la existencia de una correlación entre el IP-reqv y el IP, la cual se muestra en las Fig. 4 [1 y 10].

Ahora bien, tal como se ve en la Fig. 2, el rango plástico está íntimamente relacionado con la pendiente, m , de la recta $\text{Log}(Su)\text{-Log}(w)$. De tal manera que mientras exista proporcionalidad entre el cambio de resistencia al corte y el cambio de humedad se estará midiendo el mismo concepto aunque se utilicen parámetros diferentes. En otras palabras, ambos métodos, el convencional y el propuesto por Echezurúa con base en los parámetros equivalentes (LL-reqv e IP-reqv), miden el rango plástico del suelo, sólo que de manera diferente. El procedimiento para clasificar el suelo utilizando estos parámetros equivalentes está descrito en [1] y permite utilizar un papel log-log que tiene ya dibujados los rangos de resistencia de 1,5 kN/m² y 300 kN/m² tal como el mostrado en la Fig. 5 para determinar los límites equivalentes.

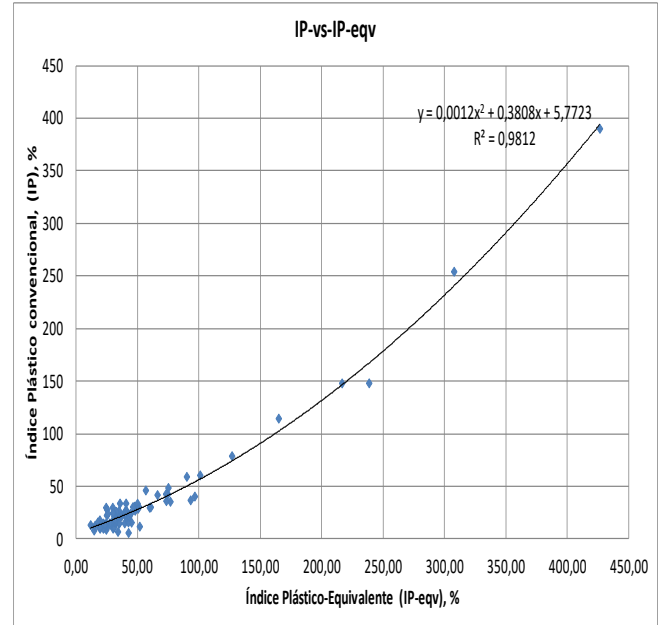


Fig. 4. Correlación entre Índice de Plasticidad (IP) y el Índice de Plasticidad equivalente (IP-reqv) [1 y 10].

Los valores convencionales de los límites de Atterberg se obtienen utilizando las correlaciones de las Fig. 3 y 4, lo cual garantiza que se mantiene la clasificación anterior a pesar de que el método ahora utilizado es algo diferente. Es oportuno destacar que los valores del LL-reqv y del LP-reqv obtenidos con este procedimiento son independientes del operador y son parámetros muy robustos del suelo. No obstante, se deben considerar los aspectos señalados por el autor en [2] con relación a la calibración de las veletas a utilizar en estos ensayos y particularmente, lo relativo al cuidado en la selección de la combinación veleta resorte.

Como hemos mencionado, las curvas de las Fig. 3 y 4 permiten obtener los límites convencionales para aprovechar toda la información que existe en la literatura y la experiencia de los profesionales utilizado dichos parámetros. Con esto queremos enfatizar que lejos de pretender introducir una metodología que redefina los parámetros índices asociados con la plasticidad del suelo, lo que se ha hecho es proponer un nuevo método de calcular la plasticidad manteniendo los conceptos anteriores. No obstante, el nuevo método utiliza un parámetro directo del suelo como es la resistencia al corte, mientras que al anterior utiliza un parámetro indirecto como la humedad. Adicionalmente, el nuevo método es más sencillo de aplicar en el laboratorio y, lo más importante de todo es que, prácticamente elimina la incertidumbre introducida por el operador.

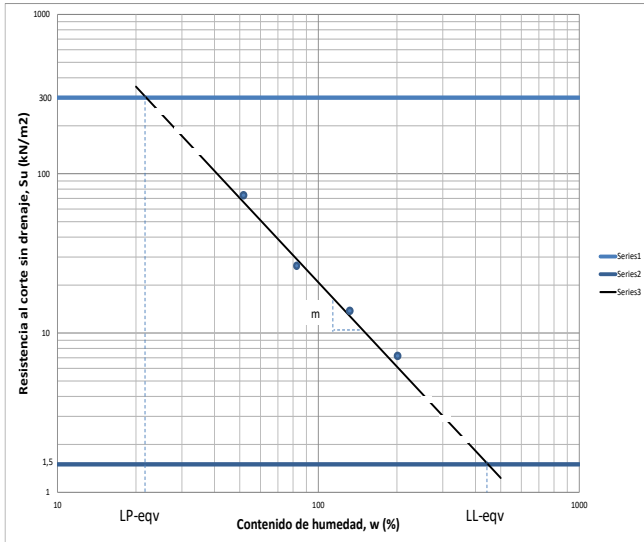


Fig. 5 Papel log-log preparado con las resistencias a 300 kN/m² y 1,5 kN/m² para obtener los límites equivalentes indicativos de la plasticidad del suelo [1 y 10].

II. NUEVA CARTA DE PLASTICIDAD MODIFICADA CON LOS PARÁMETROS EQUIVALENTES

El nuevo método descrito en los párrafos anteriores para determinar los límites equivalentes y los convencionales es muy sencillo sin embargo, la pendiente, m , y los valores de los límites de Atterberg no son suficientes para clasificar el suelo ya que la posición de la recta en el espacio log-log también es importante, tal como se indica en la Fig. 1. Por eso, se debe mantener el uso de la carta de plasticidad. A tal efecto, se ha propuesto una nueva versión de la misma presentada en la Fig. 7 [1 y 10], la cual utiliza los parámetros equivalentes antes mencionados, es decir, IP-eqv y LL-eqv.

Es interesante destacar que en la Fig. 7 las líneas mostradas corresponden a los lugares geométricos de las pendientes, m , las cuales tienden a pasar por el origen. Nótese que en la Fig. 7 se han incluido además la recta “A” transformada, destacada en negro, y el valor correspondiente a 50 para el LL convencional, el cual corresponde a un valor de 65 del LL-eqv. Para comodidad de los usuarios, se pueden colocar doble escalas en los ejes de esta carta de plasticidad, con lo cual también se pueden estimar inmediatamente los valores de los límites de Atterberg convencionales a partir de los límites equivalentes.

Tal como veremos en las secciones siguientes, esta nueva carta de plasticidad aporta mucha más información que la convencional para establecer el rango plástico real de los suelos que pueden exhibir comportamiento licuable bajo carga cíclica.

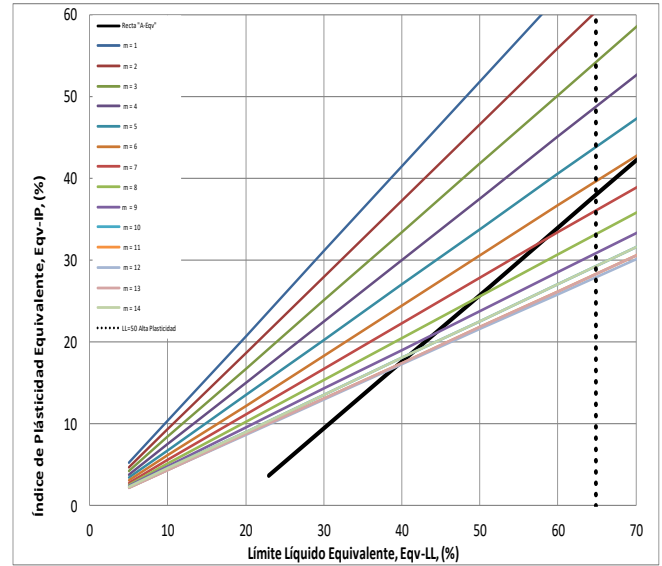


Figura 6. Carta de Plasticidad con parámetros equivalentes que incluye las líneas de igual valor absoluto de la pendiente, m , de la recta $\text{Log}(S_u) - \text{Log}(w)$ para $\text{LL-eqv} < 70$. Se incluye también la recta “A” transformada en negro.

III. CAMBIO DE COMPORTAMIENTO PLÁSTICO A NO PLÁSTICO DE MEZCLAS DE SUELOS

Un aspecto notado desde hace mucho tiempo para los suelos plásticos ha sido el cambio del ángulo de fricción con el IP, tal como se ilustra en la Fig. 7 [15]. Se observa además en dicha figura que para un mismo valor de la plasticidad existe una variación importante del ángulo de fricción que el autor de este artículo atribuye, principalmente, a la cantidad de finos no plásticos en la matriz de suelos plásticos.

En efecto, se ha determinado experimentalmente que al cambiar el contenido de material no plástico en una misma matriz de suelo plástico [9 y 16] tanto el LL como el LP disminuyen, según se muestra en la Fig. 8. En la Fig. 8 la curva verde es para incremento en el contenido de arena, mientras que la roja es para incremento inicial de limo y luego de arena. Como se observa, el cambio en el valor del ángulo de fricción es más pronunciado con el incremento de limo que con el de arena.

Para la realización de los ensayos que condujeron a los valores mostrados en esa figura se utilizó una matriz de suelo plástico, mayoritariamente Iilita, la cual se mezcló con diferentes fracciones de arena y limo. Los ángulos de fricción presentados en este artículo fueron determinados mediante ensayos de corte directo en los laboratorios de la Universidad Católica Andrés Bello [8, 9].

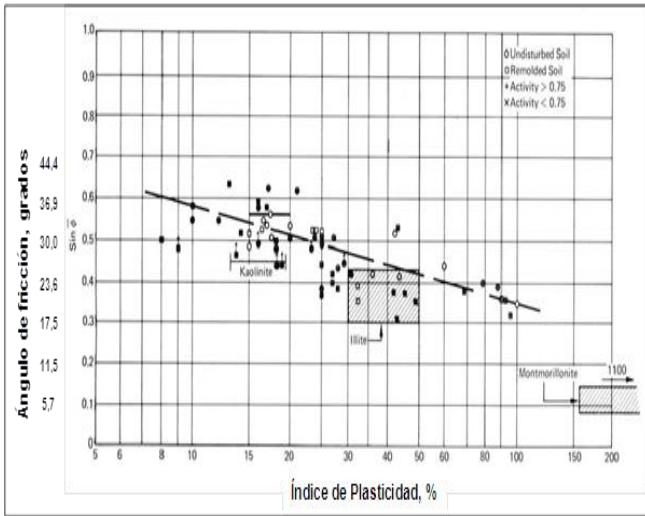


Figura 7. Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con el Índice de Plasticidad modificado de Kenney (1959) y Olson (1974) fide [15].

Es muy importante destacar que para un contenido de limo por encima de aproximadamente 49 %, el comportamiento del suelo comienza a mostrar la influencia de la fracción no plástica. Véase la curva roja en la Fig. 8. Por otra parte, si a partir del mismo porcentaje de 49% de limo se comienza a incrementar el contenido de arena, tal como ilustra la curva verde en la Fig. 8, es necesario alcanzar valores de material no plástico (arena y limo) por encima del 85% para comenzar a notar que disminuye el control del material plástico. Esto nos indica que el cambio en la respuesta del suelo depende no solamente de la fracción de suelo no plástico, sino de la naturaleza (limo o arena) de la fracción no plástica presente en la mezcla.

Otro detalle muy importante observado en la Fig. 8 es que una vez alcanzado un porcentaje de material no plástico entre 87% y 92% se obtienen ángulos de fricción muy altos entre 40° y 45° que luego caen a valores representativos típicos de materiales no plásticos, alrededor de 34°. Esto confirma que el cambio en la respuesta del suelo depende no solamente de la fracción de suelo no plástico, sino de la naturaleza (limo o arena) de la fracción no plástica presente en la mezcla.

Sin embargo, esos ángulos altos deben ser tomados con mucha cautela y no necesariamente son recomendados para diseño ya que no se han medido las presiones de poros, por lo que podría ser que los mismos se deban a potenciales presiones negativas en el suelo causadas por la tendencia al aumento de volumen durante el corte. Los ángulos de diseño deben ser obtenidos de ensayos de laboratorio debidamente realizados con medición de la presión de poros.

En la Fig. 9 [10] se muestra la trayectoria del ángulo de fricción con el cambio de IP de los materiales incluidos en

la Fig. 8. Nótese que la Fig. 9 es la misma Fig. 7 con ajustes realizados por [10] utilizando conceptos de SHANSEP [1 y 17]. Nótese que el resultado indica que en la medida que el suelo contiene pocos finos la variabilidad del ángulo de fricción disminuye con el IP, lo cual es sugerido por las curvas de trayectoria del ángulo con el IP.

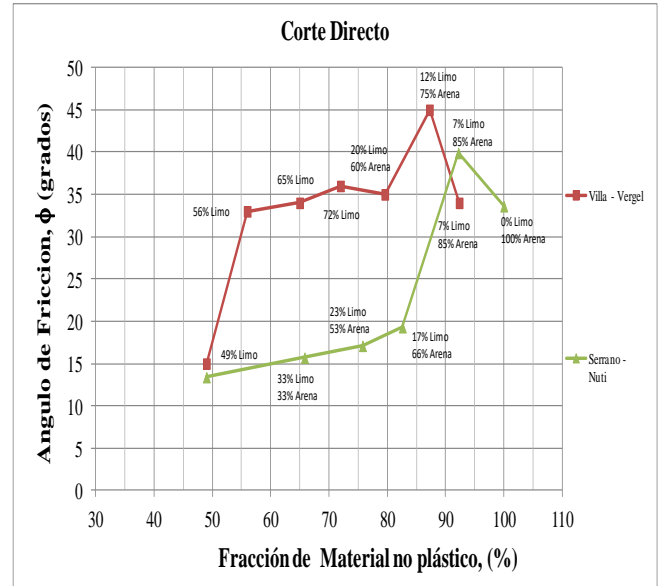


Figura 8. Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico. Modificado de Serrano y Nuti [16] y Villa y Vergel [9].

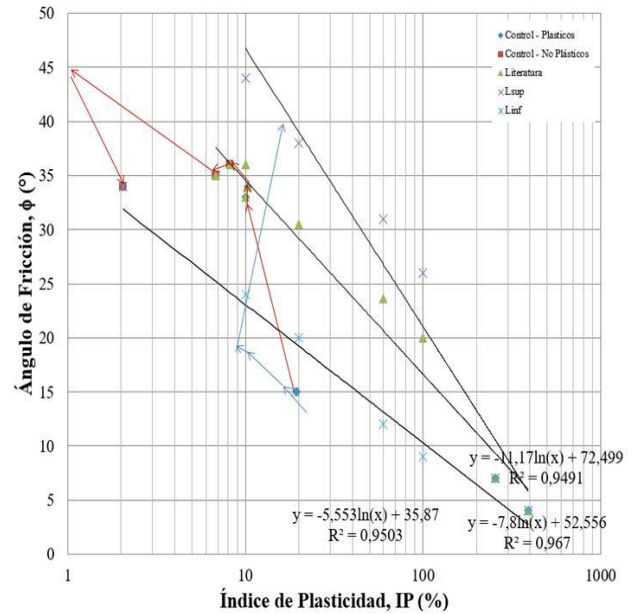


Figura 9. Izquierda Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico [10].

En la Fig. 10, se presenta un resumen del comportamiento de la matriz de Iilita utilizada en esta investigación a la cual se le incrementó progresivamente el contenido de material no plástico. Las tres líneas ubicadas más a la derecha en la Fig. 10 tienen contenidos de material no plástico de aproximadamente 49%, 56% y 65% de derecha a izquierda, respectivamente. Nótese que las mismas se colocan más a la izquierda y su pendiente aumenta ligeramente a medida que aumenta el contenido de material no plástico.

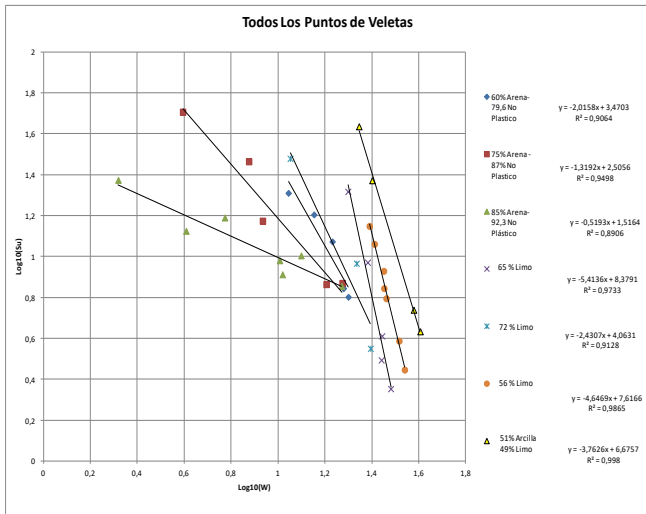


Figura 10. Variación del valor absoluto de las pendientes, m, para Iilita con distintas fracciones de materiales no plástico. [1]

A medida que el contenido de material no plástico aumenta las rectas comienzan a perder inclinación, baja el valor de la pendiente y también baja el término independiente de la recta. Asimismo, se observa un incremento en la dispersión de los valores de la resistencia al corte. Véanse las rectas con más de 72% de material no plástico en la Fig. 10.

De acuerdo con lo anterior, los cambios en ambos, el término independiente de la recta, TI, y la pendiente, m, están controlados por el aumento del contenido de material no plástico. Esos dos parámetros parecen ser los condicionantes importantes que podrían ayudar a comprender cuando ocurren cambios en el comportamiento del suelo de plástico a no plástico. Adicionalmente, esos mismos parámetros también parecen dar luces sobre si el cambio en comportamiento del suelo puede estar controlado por la fracción plástica o la no plástica.

Como se ve en la Fig. 10, las rectas $\text{Log}(Su)\text{-Log}(\omega)$ se mueven hacia la parte izquierda de la figura y cambian su posición en el espacio ya que van bajando tanto su pendiente como el término independiente de la ecuación de las rectas. Esto es una indicación de que van pasando de un comportamiento plástico a uno intermedio hasta llegar al comportamiento no plástico.

En la Fig. 11 se muestra la excelente correlación entre el TI y m para el suelo CL, según la cual el término independiente, TI, crece cuando la pendiente, m, crece. Esta misma correlación se encontró para cada uno de los otros tipos de suelos de acuerdo con su clasificación convencional, es decir, CH, ML y MH.

En la Fig. 11 también se han destacado los valores de los suelos ensayados por Villa & Vergel [9] con color rojo. Con base en estos resultados, fue posible identificar el cambio de comportamiento plástico a no plástico del suelo lo cual ocurre cuando el valor del término independiente (TI) de la recta $\text{Log}(Su)\text{-Log}(\omega)$ tiene valores por debajo de 4,1 y la pendiente, m está por debajo de 1,7.

Para esas condiciones el suelo deja de comportarse plástico y comienza a dominar la fracción no plástica, con lo cual se hacen más susceptibles a licuar. De la misma manera, se identificó una zona de transición alrededor de los valores del $TI=4,1$ y $m=1,7$ que corresponde a $5 < IP < 7$ dentro de la cual el suelo puede responder en ciertas condiciones como plástico o como no plástico. Para valores de $IP > 7$ el comportamiento es claramente dominado por la fracción plástica.

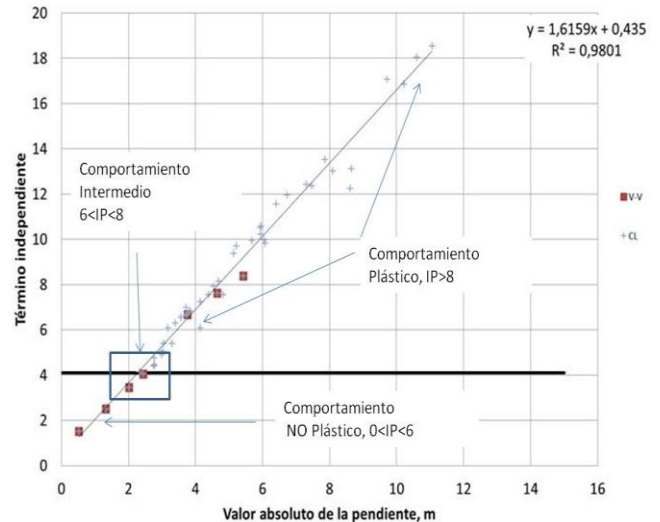


Fig. 11 Puntos CL y VV comportamiento T.I vs m, modificado de [10].

Ahora bien, es bueno dejar claro que a medida que aumenta el contenido de material no plástico en el suelo los parámetros TI y m del mismo aumentan, con lo cual su trayectoria se mueve hacia la derecha y hacia arriba en la Fig.11. Al mismo tiempo, el IP del suelo también aumenta. Luego de que ambos parámetros alcanzan un máximo que depende de la granulometría tanto del material plástico como del no plástico, el IP comienza a bajar al igual que los valores de los parámetros TI y m. Durante todo este tiempo el comportamiento del suelo estuvo controlado por la

fracción plástica y sus límites equivalentes se mantienen dentro de la zona plástica de la carta de Plasticidad con los parámetros equivalentes.

Si continuamos aumentando la fracción no plástica en el suelo, entonces los valores de TI y m continúan disminuyendo y se aproximan a $TI=4,5$ y $m=3$, con lo cual el comportamiento del suelo comienza a estar cada vez más influenciado por la fracción no plástica. En esas condiciones, la fracción no plástica puede en algunos casos dominar el comportamiento del suelo. Esa es la denominada zona de transición. En este momento los límites del suelo se acercan a los bordes de la zona plástica de la carta de Plasticidad con los parámetros equivalentes.

Si continuamos aumentando la fracción no plástica en el suelo, entonces el comportamiento comienza a estar completamente dominado por la fracción no plástica. En este momento los límites del suelo se salen de la zona plástica de la carta de Plasticidad con los parámetros equivalentes y su TI cae por debajo de 3,5 y m cae por debajo de 1,7.

IV. LA CARTA DE PLASTICIDAD Y LOS PARÁMETROS BASADOS EN LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO EN ESTADO REMOLDEADO

En la Fig. 12 se describe la trayectoria del cambio de los límites de Atterberg en la Carta de Plasticidad, para las muestras de la curva roja de las Fig. 8, 9 y 10 [1, 9 y 10]. En la misma observamos que su trayectoria en la Carta de Plasticidad Convencional es siempre descendente hasta un punto donde ya los parámetros de dicha carta, a pesar de que se han incluido en la misma los lugares geométricos de la pendiente, m, la trayectoria se detiene y no es posible obtener más información del suelo pues hay limitaciones en el IP que ha sido establecido solamente con base en el contenido de humedad.

Contrariamente, en la Fig. 13, se aprecia que en la Carta de Plasticidad Equivalente propuesta por Echezuría, el suelo muestra una trayectoria descendente y luego empieza a subir hasta que se sale del rango plástico de la figura. Esto demuestra una clara ventaja de la nueva Carta de Plasticidad propuesta por Echezuría, la cual tiene el rango plástico mejor definido con base en la resistencia al corte del suelo. De hecho, todo material cuyos parámetros de plasticidad equivalente no estén ubicados dentro del rango plástico definido por las rectas que representan el lugar geométrico de la pendiente, m, de se comportará como suelo no plástico y, por ende, susceptible a licuar en caso de un movimiento sísmico.

En la Fig. 14 se presentan los límites utilizados por otros autores como Seed, fide Boulanger [18] que establecen $12 < IP < 20$ y $LL < 35$ [2 y 10]. Nótese que en los rangos marcados en las Fig. 14 no se ubican exclusivamente los

suelos susceptibles a licuar sino que en el mismo pueden ubicarse otros suelos que no necesariamente tendrán tendencia o susceptibilidad a licuar. Esto se evidencia mejor en la Fig. 15 donde se incluyen los mencionados rangos de comportamiento detectados en este trabajo. Adicionalmente, Boulanger & Idriss recomiendan el rango $7 < IP < 8,3$ para definir los suelos susceptibles a licuar. Esto no coincide con los hallazgos de este trabajo, ya que este último rango contiene suelos que no son totalmente controlados por el comportamiento no plástico y pueden tener comportamiento en ocasiones plástico y en ocasiones plástico. En consecuencia, el criterio basado solamente en el IP no es concluyente.

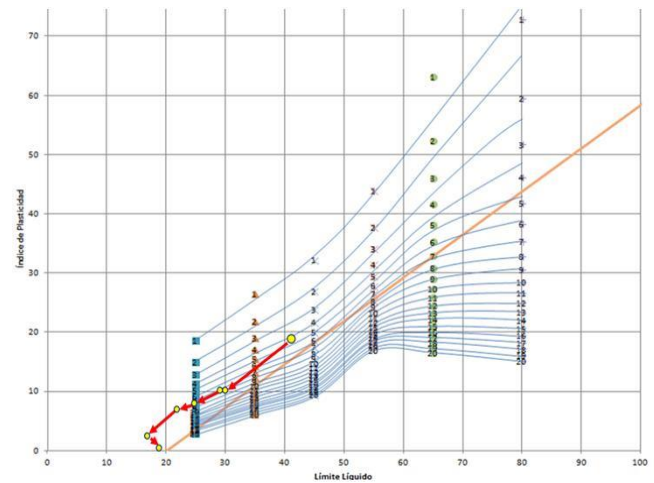


Fig. 12 Trayectoria de los suelos estudiados por Villa & Vergel [9], graficado sobre la Carta de Plasticidad Convencional. [10]

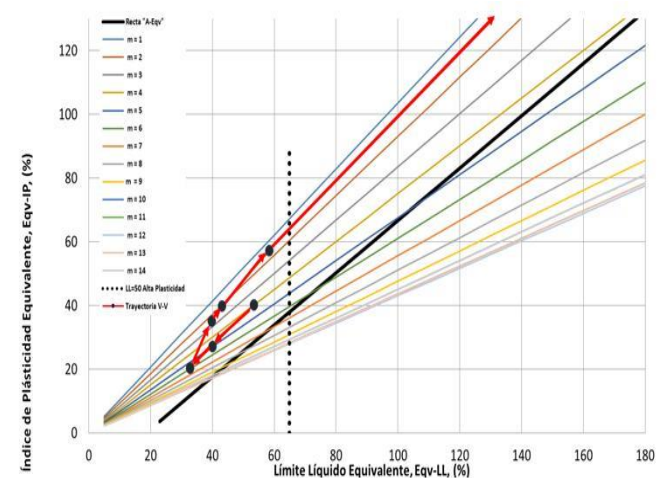


Fig. 13 Trayectoria de los suelos estudiados por Villa & Vergel [9], graficado sobre la Carta de Plasticidad Equivalente propuesta por Echezuría. [10]

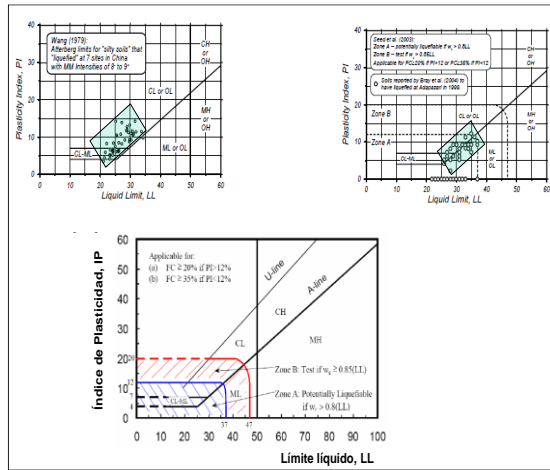


Figura 14. Suelos plásticos licuados durante sismos intensos reportados por Seed y por Wang fide Boulanger [16].

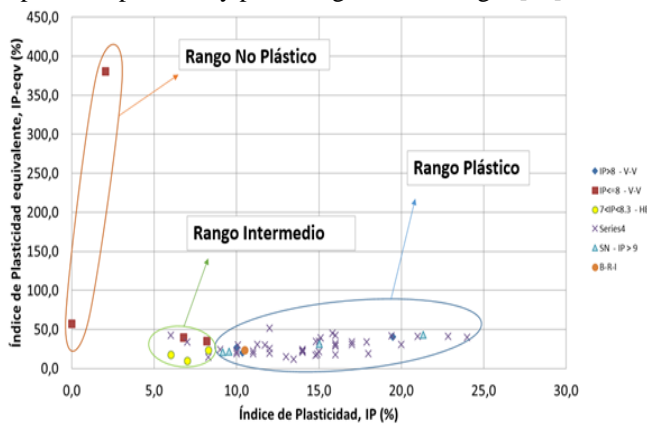


Fig. 15 Comportamiento del suelo según el Índice de Plasticidad. [10]

De acuerdo con lo indicado en la Fig. 15, en este trabajo se evidenció que existen tres comportamientos claramente marcados para los suelos con distintos contenidos de material no plástico, a saber: para el comportamiento controlado por la fracción plástica se tiene $IP > 8$, para el rango intermedio $6 < IP < 8$ y para el rango no plástico se tiene $0 < IP < 6$.

Es evidente entonces la limitación de las cartas de plasticidad por sí solas para establecer cuando el material tendrá comportamiento plástico o no plástico. Por lo tanto, la correlación entre el TI y m de la recta $\text{Log}(S_u)\text{-Log}(\omega)$ complementa esta información y permite establecer mucho mejor dicho cambio potencial en comportamiento.

V. CÓMO IDENTIFICAR MATERIALES QUE ESTÉN PRÓXIMOS A ESTAR CONTROLADOS POR LA FRACCIÓN NO PLÁSTICA

De acuerdo con lo mencionado en los párrafos anteriores, la mejor manera de identificar si un suelo estará cerca de la zona de comportamiento controlado por la fracción no plástica es establecer su recta $\text{Log}(S_u)\text{-Log}(\omega)$. Luego se le

añade una fracción importante de material no plástico (10% a 20%) y se vuelve a determinar la nueva recta.

Si la pendiente m de la recta y el TI disminuyen y se aproximan a los valores umbrales antes señalados ($TI=4$ y $m=2$) entonces el material está en el umbral o dentro de la zona controlada por la fracción no plástica. Si contrariamente los valores tanto del TI como de m crecen al agregarle la fracción no plástica, el suelo está controlado por la fracción plástica.

VI. CONCLUSIONES

La posición en el plano log-log de la correlación lineal entre el logaritmo del contenido de humedad (ω) y el logaritmo de la resistencia al corte del suelo remoldeado (S_u) está asociada con la plasticidad del suelo. A medida que se añade material no plástico a un suelo originalmente plástico, cuyos valores iniciales tanto de su término independiente (TI) como su pendiente (m) son bajos, ambos parámetros comienzan a aumentar conforme aumenta el contenido de material no plástico. Paralelamente, tanto el IP como el ángulo de fricción del suelo también van aumentando. No obstante, el suelo todavía exhibe comportamiento controlado por la porción plástica.

Una vez alcanzados los valores máximos de ambos parámetros (TI y m), los mismos comienzan a disminuir lo cual es indicativo de que el material no plástico comienza a influir de forma más significativa en el comportamiento del suelo de plástico a no plástico. Una vez que el TI alcanza durante la reducción el valor límite de 4 y la pendiente alcanza un valor cercano a 2, entonces el comportamiento del suelo comienza a estar cada vez más controlado por la fracción no plástica y se encuentra en una zona de transición.

A tal efecto, existe una correlación entre TI y m con la cual pudo verificarse los cambios de comportamiento antes referidos para suelos CL. La existencia de esta correlación entre TI y m se verificó también para los otros tipos de suelos CH, MH y ML. Sin embargo, no se realizaron suficientes ensayos para los mismos que permitieran establecer los límites del comportamiento plástico a no plástico, lo cual queda como tema para próximas investigaciones.

Para identificar si un suelo estará cerca de la zona de comportamiento controlado por la fracción no plástica se debe establecer su recta $\text{Log}(S_u)\text{-Log}(\omega)$. Luego se le añade una fracción importante (10% a 20%) de material no plástico y se vuelve a determinar la nueva recta.

Si la pendiente m de la recta y el TI disminuyen y se aproximan a los valores umbrales de $TI=4$ y $m=2$ entonces el material está en el umbral o muy cerca de la zona controlada por la fracción no plástica. Si contrariamente los

valores tanto del TI como de m crecen al agregarle la fracción no plástica, el suelo está controlado por la fracción plástica.

Lo anterior ayuda a resolver las limitaciones de los parámetros utilizados en la Carta de Plasticidad para clasificar materiales susceptibles a licuar e identificar cuándo ocurre el cambio de comportamiento de plástico a no plástico. En este sentido, la Carta de Plasticidad con parámetros equivalentes presenta la ventaja de que si el material no cae dentro del rango definido por las pendientes el mismo tendrá un comportamiento controlado por el material no plástico.

La determinación de los límites equivalentes con base en una propiedad intrínseca del suelo como su resistencia al corte en lugar de con solo la humedad permite una mejor definición del cambio de comportamiento plástico a no plástico al aumentar el contenido de material no plástico en una matriz de suelo plástico. De hecho, los límites equivalentes así como el término independiente y la pendiente de la recta $\text{Log}(S_u)$ vs $\text{Log}(\omega)$ proporcionan mucho más información que los de Atterberg con relación a los comportamientos plástico, intermedio y no plástico de suelos que podrían ser susceptibles a licuar.

REFERENCIAS

- [1] Echezuría, H., "Reinterpretación del rango plástico y su relación con la resistencia al corte del suelo remoldeado y con los conceptos de SHANSEP", Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), Caracas, Sep. 2017.
- [2] Echezuría, H., "Correlación entre la resistencia al corte no drenado en estado remoldeado y la plasticidad del suelo", XX Seminario de Geotecnia, Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), *Desafíos en el ejercicio de la geotecnia*, pp 41-58, Hotel Pestana Caracas, Nov. 2012.
- [3] Echezuría, H., "A new method to classify plastic soils based on remoulded shear strength and water content at fluid state", XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2015), Edinburgh, Scotland Nov. 2015.
- [4] ASTM. "Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils". ASTM standard D4318-00. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 2010.
- [5] ASTM. Annual Book of ASTM Standards, Sec. 4, Vol. 04.08. West Conshohocken, Pa, 2010.
- [6] González, M y A. Herrera, *Investigación del comportamiento de algunos suelos venezolanos en estado remoldeado*, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Central de Venez., Caracas, 1987.
- [7] Gabaldón, E., *La Resistencia al Corte en los Límites Líquido y Plástico*, Trabajo Especial de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Metropolitana, Caracas, Marzo, 1991.
- [8] Picón, M. y A. Pineda, *Aplicación del ensayo de resistencia al corte no drenado para clasificar suelos en sustitución del método ASTM D4318-00*, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas, Nov. 2013.
- [9] Vergel, M. y A. Villa, *Investigar la influencia de los materiales no plásticos en suelos cohesivos durante corte no drenado y su efecto en la clasificación con la carta de plasticidad*, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas, Jun. 2015.
- [10] Privitera, V., *Variación de la resistencia al corte de suelos plásticos sin drenaje en estado remoldeado con el contenido de humedad para fines de clasificación*, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas, Oct. 2016.
- [11] Casagrande, A. "Research on the Atterberg limits of soils". Public Roads 13(3):121–130 (136), 1932.
- [12] Casagrande, A. "Notes on the design of the liquid limit device". Geotechnique 8(2):84–91, 1958.
- [13] Kayabali, K and O. O. Tufenkci, "Shear strength of remolded soils at consistency limits", Can. Geotech. J. 47: 259–266, 2010.
- [14] H. B. Nagaraj; A. Sridharan and H. M. Mallikarjuna; "Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits", Geotechnical & Geological Engineering J. 30:727–736, 2012.
- [15] Missouri University of Science and Technology, Correlations Between Soil Plasticity and Strength Parameters, Geological Sciences & Engineering GE 441 - Advanced Engineering Geology & Geotechnics, Prof David Rogers, on line courses, spring 2004.
- [16] Serrano, C. y A. Nutti, *Comportamiento de un suelo granular en matriz cohesiva*, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas, Jun. 1999
- [17] Ladd, C.C. and R. Foote, "A new design procedure for stability of soft clays", Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 100, No. GT7, pp. 763-786, 1974.
- [18] Boulanger, R. W. and I. M. Idriss, "Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays", Report No. UCD/CGM-04/01, Depart. Civ. & Environ. Eng. Coll. of Eng, UC DAVIS, Dec. 2004