



Cambios del comportamiento plástico a no plástico de arcillas y su relación con la gravedad específica

Heriberto Echezuría¹

hechezuria51@gmail.com

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

Historia del Artículo

Recibido: 12 de noviembre de 2018

Aceptado: 01 de abril de 2019

Disponible online: 23 de abril de 2019

Resumen: Se demuestra que el cambio de comportamiento plástico a no plástico es complejo y depende de la interacción de los granos de material plástico contenido en la mezcla de suelo con el agua libre. Es decir cuando el esqueleto de partículas no plásticas que definen la estructura de la mezcla comienza a transmitir las fuerzas entre partículas y el material plástico forma una especie de “pasta” con el agua libre, similar a la pasta de cemento en el mortero. Esto le da propiedades plásticas al movimiento de los granos pero las fuerzas son transmitidas por el esqueleto del material no plástico. Cuando la alta concentración de material no plástico fino aumenta mucho la relación de vacíos y el agua libre, la pasta de arcilla y agua alcanza concentraciones de agua muy por encima del límite líquido. En consecuencia, la pasta se comporta como un fluido viscoso dentro de los espacios porosos. Estos conceptos aplican para los distintos tipos de suelos: CL, CH, ML y MH. Con esos criterios se estableció para cinco muestras de arcillas de la Formación Mesa con alto contenido de materiales no plásticos, que cuatro de las mismas están dentro de la zona de transición de comportamiento aunque todavía presentan plasticidad. No obstante, tendrán ángulos de fricción altos en comparación con otras arcillas. La otra muestra tuvo parámetros muy cercanos al umbral del cambio de comportamiento a no plástico, por lo que en condiciones no drenadas podría, sin lugar a dudas, presentar comportamiento no plástico. Para estas arcillas de la Formación Mesa, es el limo no plástico de grano fino (tamaños en el rango de arcillas) el que controla el cambio de plasticidad y la gravedad específica.

Palabras claves: licuación, arcillas, plasticidad, límites de Atterberg, nuevos límites equivalentes, gravedad específica.

Changes in plastic behavior to non-plastic clays and their relationship with specific gravity

Abstract: It is demonstrated that the change from plastic to non plastic behavior is a complex process which depends on the interaction of the soil particles of the plastic component of the soil mix with the free water. That is, when the non plastic soil skeleton begins to transmit the forces among particles but the

plastic component forms a "paste" with the free water, similar to that in a mortar. That gives plastic properties to grain movement but forces are transmitted by the non plastic component. When a high fine non plastic component is present the void ratio increases and so does the free water up to reach concentrations much higher than the liquid limit. Thus, the paste behaves as a viscous fluid within the porous spaces. These concepts apply to all kind of soils, i.e. CL, CH, ML and MH. With these criteria it was established for five clay samples from Mesa Formation in eastern Venezuela with high non plastic components that four of them lie within the transition zone and would exhibit high friction angles even though they also present plasticity. The other sample had two parameters very close to the threshold values for change in plastic to non plastic behavior which makes it very susceptible to have undrained behavior as a non plastic material. For the clays of the Mesa Formation it is the fine silt with sizes within the clay range which controls the change in plasticity as well as the specific gravity values.

Key words: liquefaction, clays, plasticity, Aterberg limits, new equivalent limits, specific gravity.

I. VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO PLÁSTICO EN MEZCLAS DE SUELOS

Echezuría [1] y Privitera [2] encontraron que la variación del ángulo de fricción de las arcillas no solo depende del índice de plasticidad del suelo (IP) y de las variaciones en la composición de sus partículas, sino que también depende del contenido de finos no plásticos. Esto se ilustra en la Figura 1 [1] [2] y fue demostrado por Echezuría [1] con data de Villa y Vergel [3] según se indica en la Figura 2. En ambas figuras se nota que el rango de los datos es muy amplio a la izquierda, para IP bajos, y que dicho rango se va reduciendo a medida que aumenta el IP. Esa dispersión alta para un mismo valor de un IP bajo está asociado con el contenido de finos no plásticos, tal como se indica a continuación.

En la Figura 2 se incluyen dos secuencias de ensayos en arcillas con contenidos iniciales de finos no plásticos cercanos al 49%, a las cuales se les fue agregando arena y limo. Nótese que los cambios en el contenido de cualquiera de dichos materiales no plásticos condujeron a una reducción progresiva del IP y un aumento del ángulo de fricción.

Se observa también en la Figura 2 que agregar limo no plástico o arena cambia de manera diferente las propiedades del suelo, tal como

sugieren las flechas rojas y flechas azules, respectivamente.

El cambio en el ángulo de fricción al agregar arena es gradual al principio y se hace luego abrupto. El cambio con el contenido de limo no plástico es más pronunciado y alcanza valores mayores que los alcanzados con la arena.

En la Figura 3 se indican los cambios en el ángulo de fricción con el contenido de material no plástico experimentados por la matriz de suelo plástico con la cual se realizaron los ensayos mostrados en la Figura 2 [1][2]. Nótese, nuevamente, que la respuesta del suelo en la reducción de la plasticidad y el ángulo de fricción depende no solamente de la fracción de suelo no plástico, sino de la naturaleza (limo o arena) de dicha fracción no plástica presente en la mezcla.

Otro detalle muy importante observado en la Figura 3 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 granulares no plásticos, alrededor de 34°.

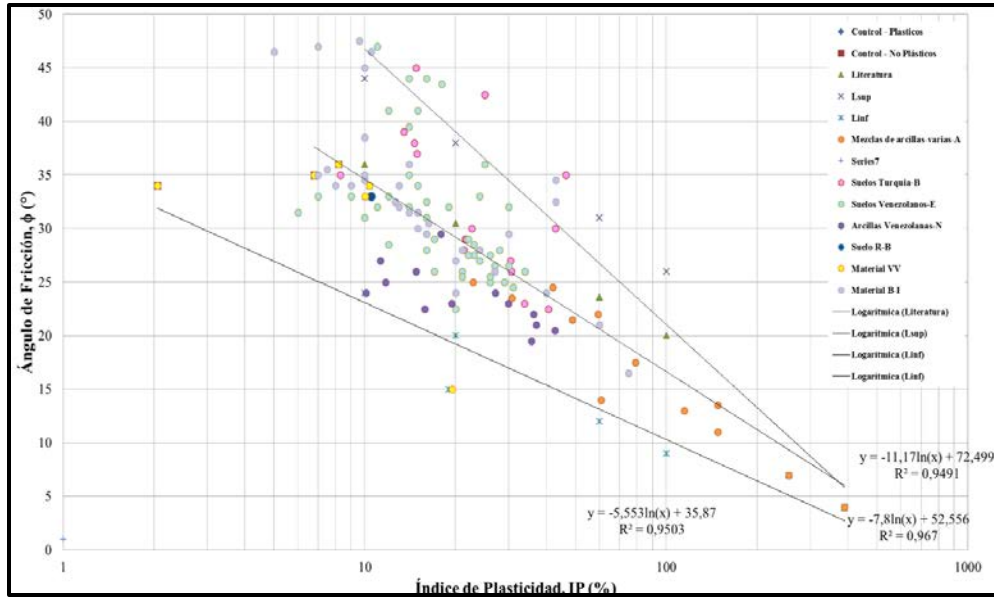


Figura 1: Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , y el índice de plasticidad (IP). La inclinación en las rectas cercanas a los extremos se debe a la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico [1][2]. Fuente: Elaboración propia.

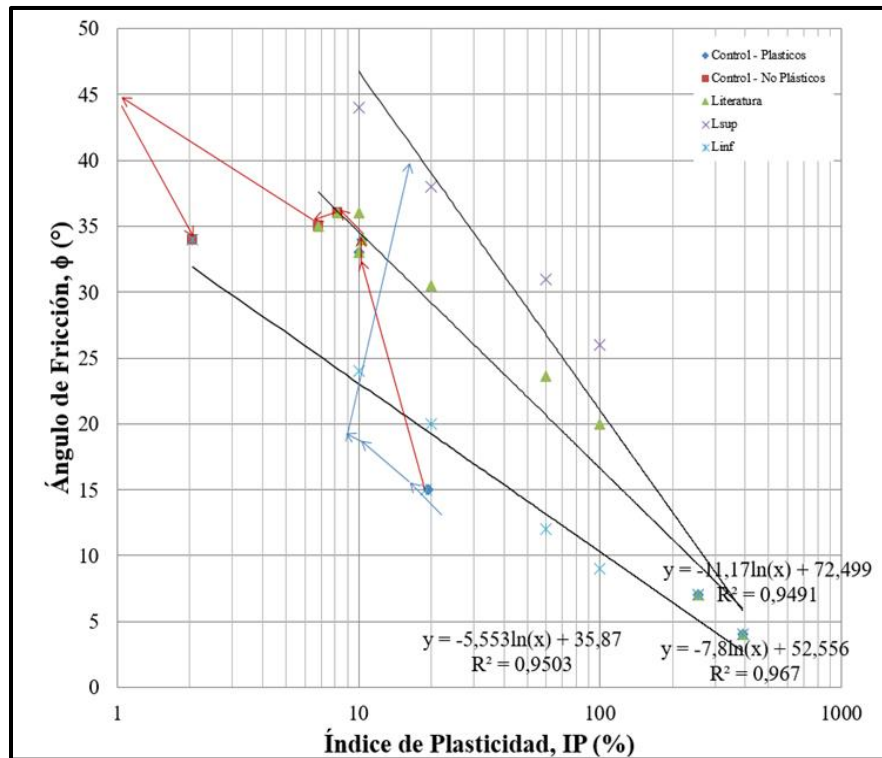


Figura 2: Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , y el índice de plasticidad (IP). La inclinación en las rectas cercanas a los extremos se debe a la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico [1] [2] [3]. Fuente: Elaboración propia

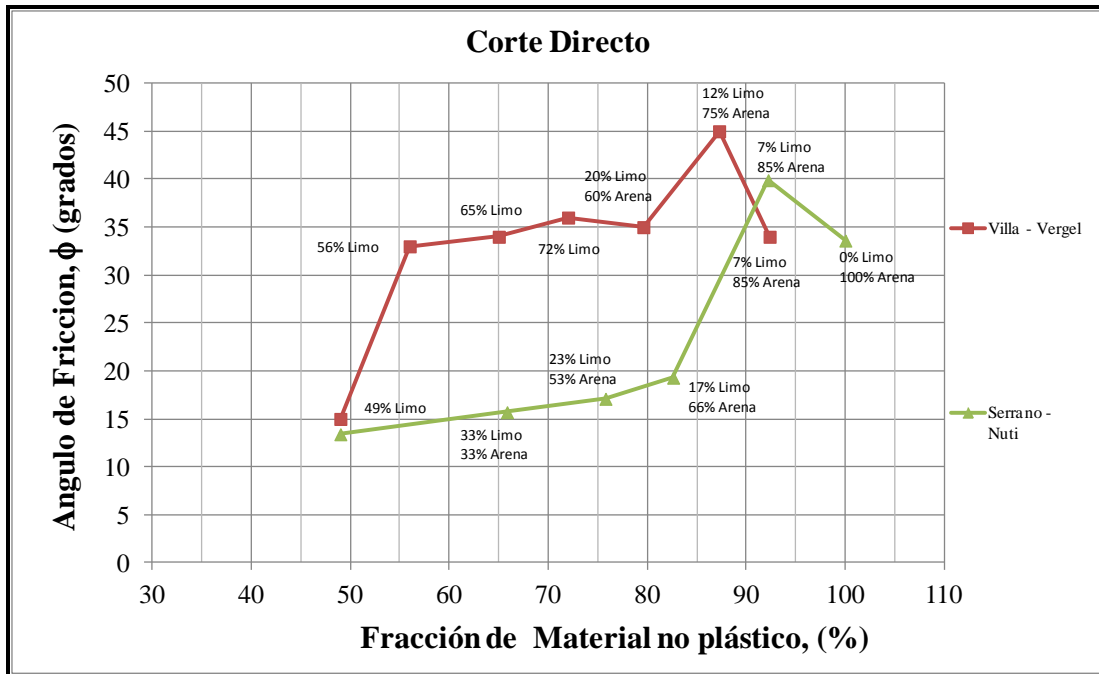


Figura 3: Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico. Modificado de Villa y Vergel [3] y Serrano y Nuti [4]. **Fuente:** Elaboración propia

Estos ángulos tan 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. No obstante, a objeto de clasificar los suelos y detectar si su comportamiento está controlado por la fracción no plástica luce apropiado.

Para detallar los aspectos correspondientes al cambio de comportamiento de plástico a no plástico de una arcilla, a continuación se presenta un resumen del comportamiento al corte no drenado de la matriz de arcilla utilizada en esta investigación a la cual se le incrementó progresivamente el contenido de limo no plástico, según se identifica en las Figuras 2 y 3. Dicho resumen se fundamenta en las rectas $L(Su)$ - $L(\square)$ contenidas en la Figura 4 con color rojo.

Las tres líneas ubicadas más a la derecha en la Figura 4, identificadas como de “comportamiento plástico” tienen contenidos de material no plástico de aproximadamente 49%, 56% y 65% de

derecha a izquierda, respectivamente. Nótese que a medida que aumenta el contenido de material no plástico entran en el grupo denominado como de “comportamiento intermedio” y la ubicación en el espacio es más a la izquierda que las anteriores y, además, su pendiente, m , aumenta ligeramente.

Si el contenido de material no plástico sigue aumentando las rectas comienzan a perder inclinación, es decir, baja el valor de la pendiente y también baja el término independiente de la recta. De la misma manera, su ubicación en el espacio es más a la izquierda que las anteriores y se han identificado en la Figura 4 como “comportamiento no plástico”.

Asimismo, se observa que para este último grupo existe un incremento en la dispersión de los valores de la resistencia al corte. Estos materiales contienen más de 72% de material no plástico.

En la Figura 5 se observa el comportamiento del LL - eqv y el LP - eqv de la arcilla mezclada con material limoso utilizada por Villa & Vergel [3] e incluida en las Figuras 2 y 3 con color rojo.

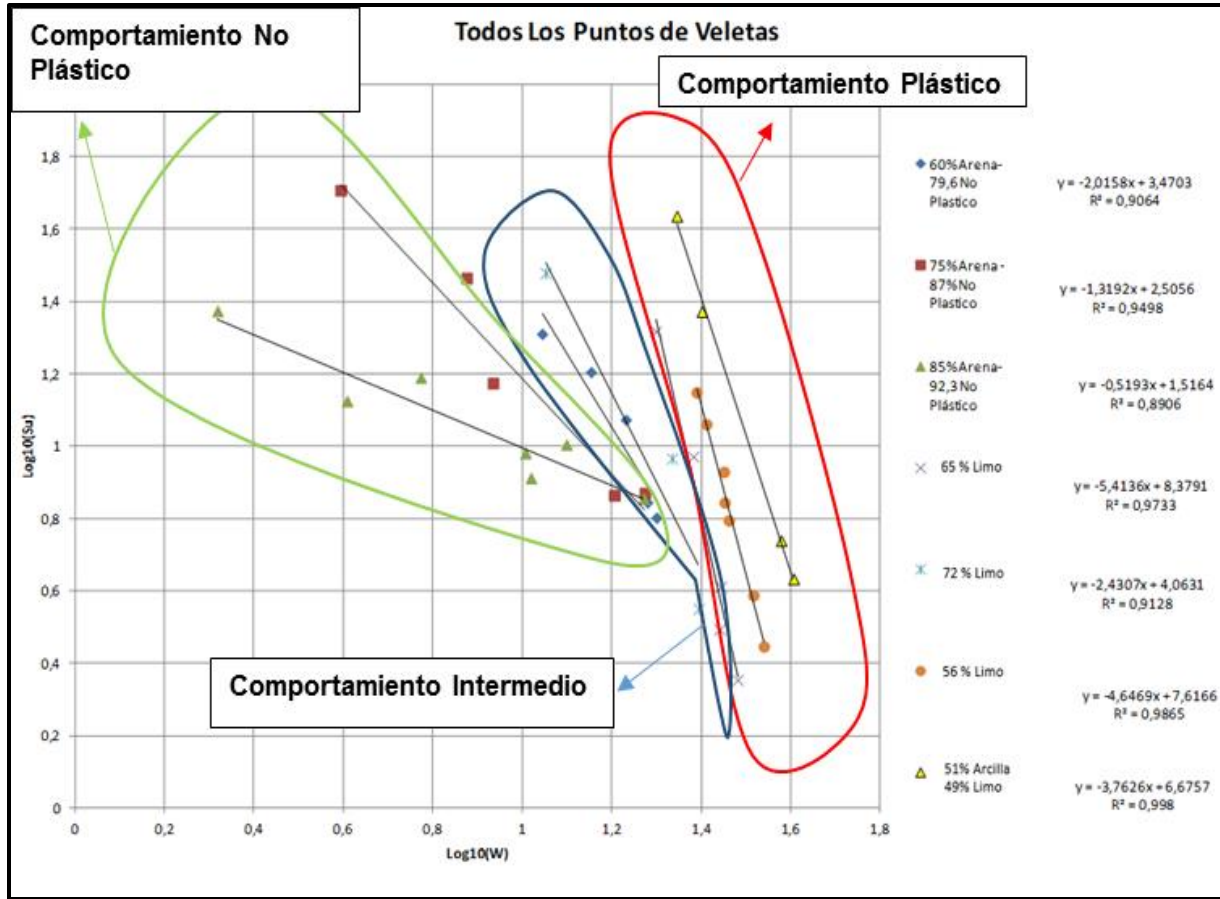


Figura 4: Variación del valor absoluto de las pendientes, m, para arcilla con distintas fracciones de materiales no plástico. Modificado de Villa-Vergel [3]. Fuente: Elaboración propia

En la misma se tiene que el límite líquido equivalente (cuadrados rojos), empieza a disminuir mientras el suelo permanece en el rango plástico, luego al alcanzar un valor igual a 35,2 este empieza a subir poco a poco hasta llegar a un valor de 40; donde se puede decir que allí el suelo podría comportarse como plástico o no plástico. Luego, a partir del 80% de contenido de material no plástico se evidencia una tendencia a subir el límite líquido equivalente de forma muy rápida por encima de 40-50%, al añadir más material no plástico.

Por el contrario, el límite plástico equivalente baja muy poco al principio, pero luego al alcanzar el valor de 70% de material no plástico, baja muy rápido. Nótese que a medida que el Límite Líquido equivalente sube, el Límite Plástico equivalente baja y el IP equivalente comienza a parecerse cada vez más al LL equivalente. Todo eso es un indicio de la pérdida de plasticidad de la muestra a medida que aumenta su contenido de material no plástico. En esta figura también se han incluido los tres rangos de comportamiento antes identificados: “plástico”, “intermedio” y “no plástico”.

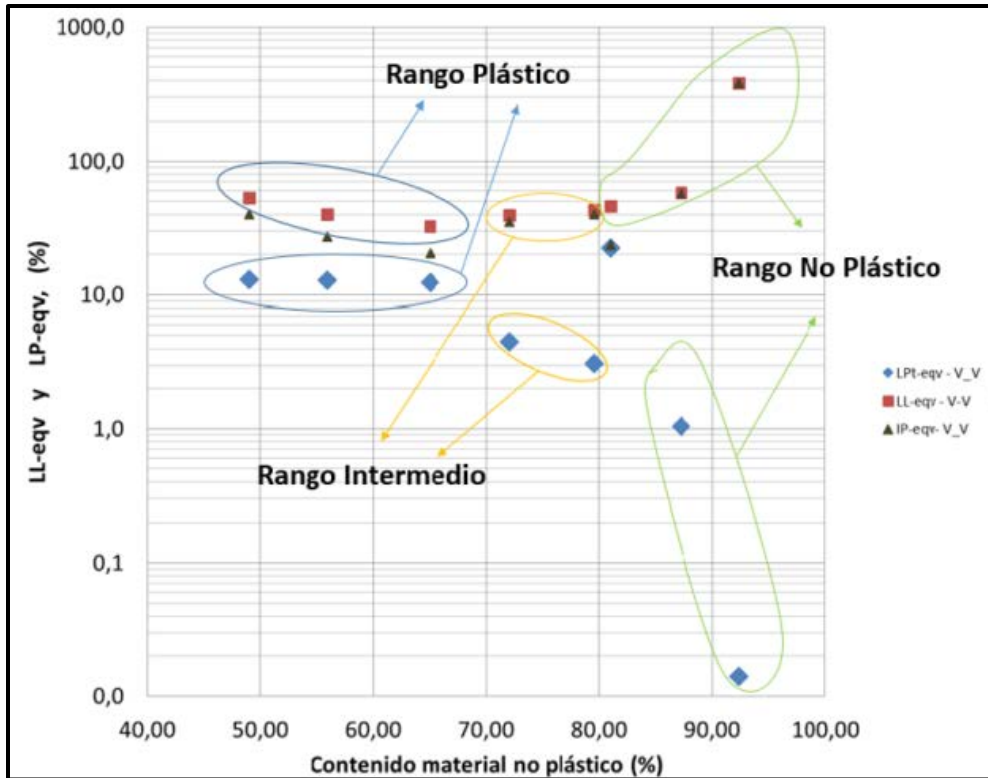


Figura 5: Comportamientos LL-eqv vs Contenido material no plástico y LP-eqv vs Contenido material no plástico. Modificado de Villa & Vergel [3]. Fuente: Elaboración propia

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

Los tres rangos de comportamiento identificados en este trabajo e indicados en las Figuras 4 y 5 tienen los siguientes rangos de IP convencionales: para el rango plástico, $IP > 8$, para el rango intermedio $6 < IP < 8$ y para el rango no plástico se tiene $0 < IP < 6$. Otros autores como Seed, según lo cita Boulanger [6] establecen los siguientes valores para la ocurrencia del cambio de comportamiento plástico a no plástico $12 < IP < 20$ y $LL < 35$. Adicionalmente, Boulanger & Idriss [5] recomiendan el rango $7 < IP < 8,3$ para definir los suelos susceptibles a licuar.

En general muchos suelos con las características indicadas en los párrafos anteriores, tanto de la base de datos de esta investigación como los reportados por otros autores tienden a caer dentro de la zona de comportamiento intermedio

en la Figura 5. En consecuencia, los mismos podrían ser susceptibles o no a licuar debido a que no hay certeza de cuál es la fracción dominante, aunque la presencia de la fracción no plástica está empezando a hacerse notar.

En otras palabras, el rango intermedio contiene suelos que no son totalmente controlados por el comportamiento no plástico y pueden tener comportamiento en ocasiones plástico y en ocasiones no plástico. De tal manera que, el criterio basado solamente en el IP parece no ser concluyente.

En la Figura 6 se presentan los límites utilizados por Seed según lo cita Boulanger [5]. Nótese que en esos rangos 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. Eso se evidencia mejor en las Figuras 7 y 8 donde se incluyen los rangos de comportamiento detectados en este trabajo, es decir, plástico, intermedio y no plástico.

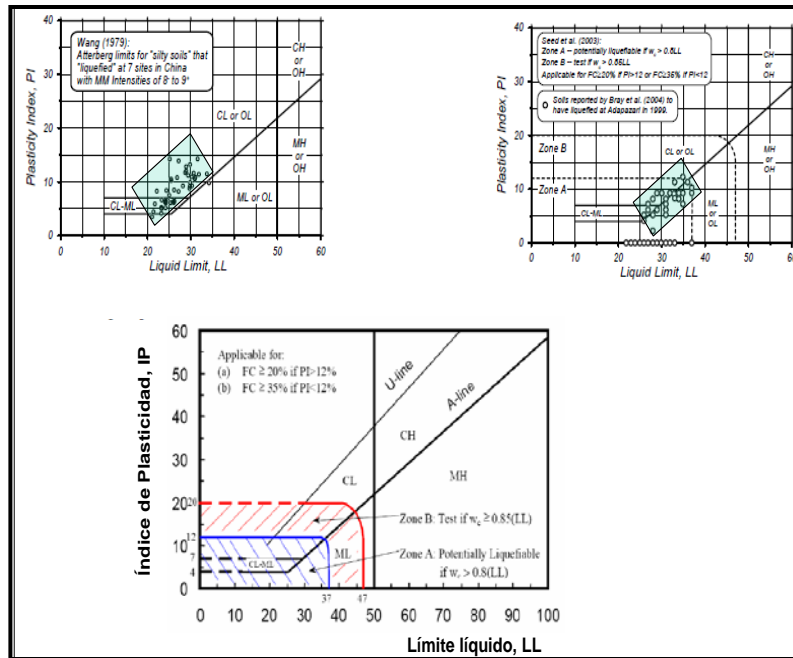


Figura 6: Suelos plásticos licuados durante sismos intensos reportados por Seed y por Wang ambos citados por Boulanger [5]. **Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 7 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 Figuras 2 y 3. En la misma observamos que su trayectoria en la Carta de Plasticidad Convencional es siempre descendiente 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 sobre el comportamiento plástico del suelo pues en algún momento se pierde el rastro de las muestras en la carta de plasticidad convencional, aunque todavía el suelo tiene plasticidad en el rango denominado intermedio.

Similarmente, en la Figura 8, se aprecia que en la Carta de Plasticidad Equivalente propuesta en esta investigación, el suelo muestra una trayectoria descendiente y luego empieza a subir hasta que se sale del rango plástico de la figura.

En la Figura 8, a medida que la trayectoria del suelo baja está en la zona donde comienza a sentirse la influencia del contenido no plástico, es decir la zona de transición. Contrariamente, cuando la trayectoria cambia y empieza subir en las inmediaciones del límite superior del rango plástico, es señal de que el contenido de material no plástico controla el comportamiento aunque el suelo todavía tenga algo de plasticidad.

Muy significativo es el hecho de que a medida que disminuye la plasticidad por la presencia del limo no plástico la nueva carta continúa detectando que existe algo de la misma todavía en las muestras, lo cual no es posible con el método y la carta de plasticidad convencional. La explicación es que el nuevo método se basa en la resistencia al corte, la cual es una propiedad del suelo mientras que la convencional se basa en el contenido de agua libre, la cual es muy difícil de detectar.

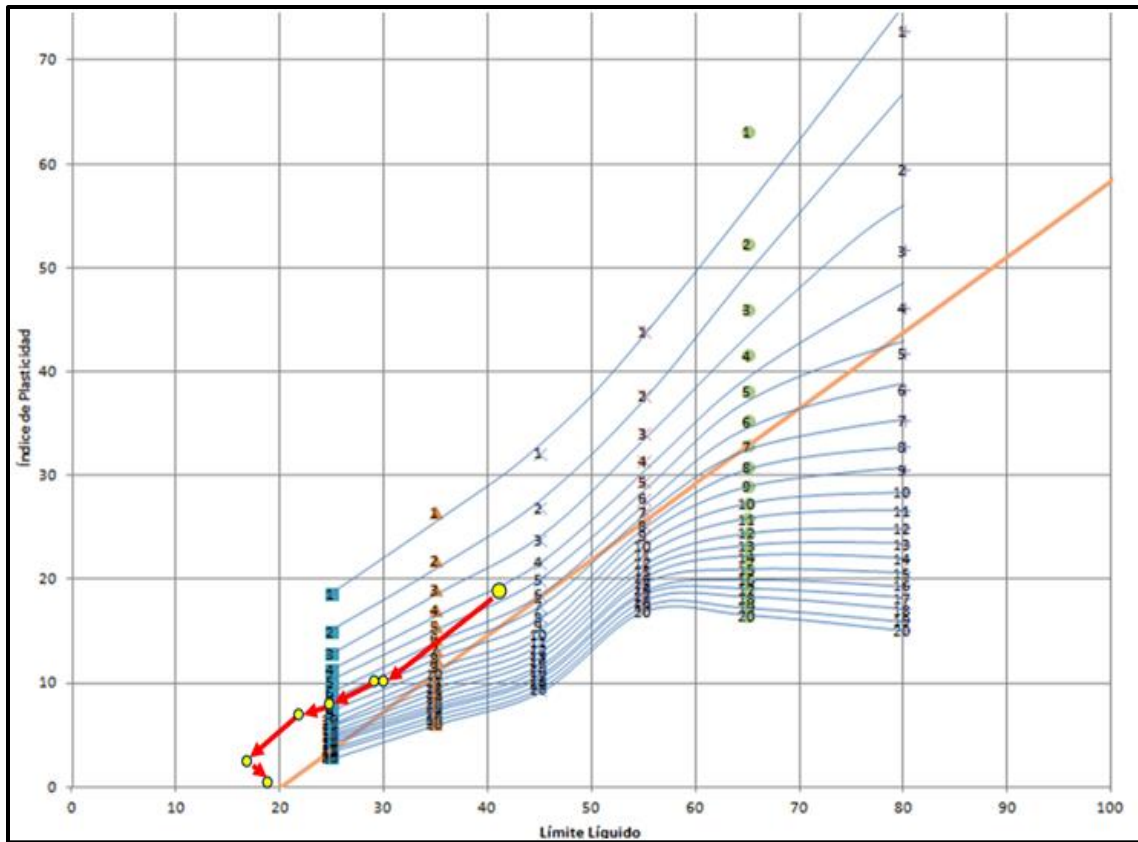


Figura 7: Trayectoria de los suelos estudiados por Villa & Vergel [3], graficado sobre la Carta de Plasticidad Convencional [6]. **Fuente:** Elaboración propia

Lo anterior demuestra que la carta de plasticidad convencional tiene más limitación que la carta con los límites equivalentes propuesta en esta investigación para establecer el rango plástico real de los suelos. Sin embargo, para establecer cuándo el suelo tendrá comportamiento plástico o no plástico, es necesario identificar mejor los tres tipos de comportamiento antes descritos para suelos con contenidos crecientes de materiales no plásticos.

III. CAMBIOS EN LA GRAVEDAD ESPECÍFICA POR ALTO CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS

La gravedad específica, G_s , depende de los minerales que constituyen el suelo. Dicha

propiedad, proporciona una referencia en la clasificación de los suelos ya que dependiendo de la fracción dominante en el suelo el valor de la G_s tendrá un rango de valores específicos. Por esa razón, esta parte de la investigación estuvo orientada al análisis de las gravedades específicas con la cantidad de finos no plásticos.

La gravedad específica de las partículas del suelo es una característica fundamental, necesaria para la definición de otras propiedades físicas de los suelos tales como: la relación de vacíos, el grado de saturación, el peso unitario y la granulometría por hidrómetro.

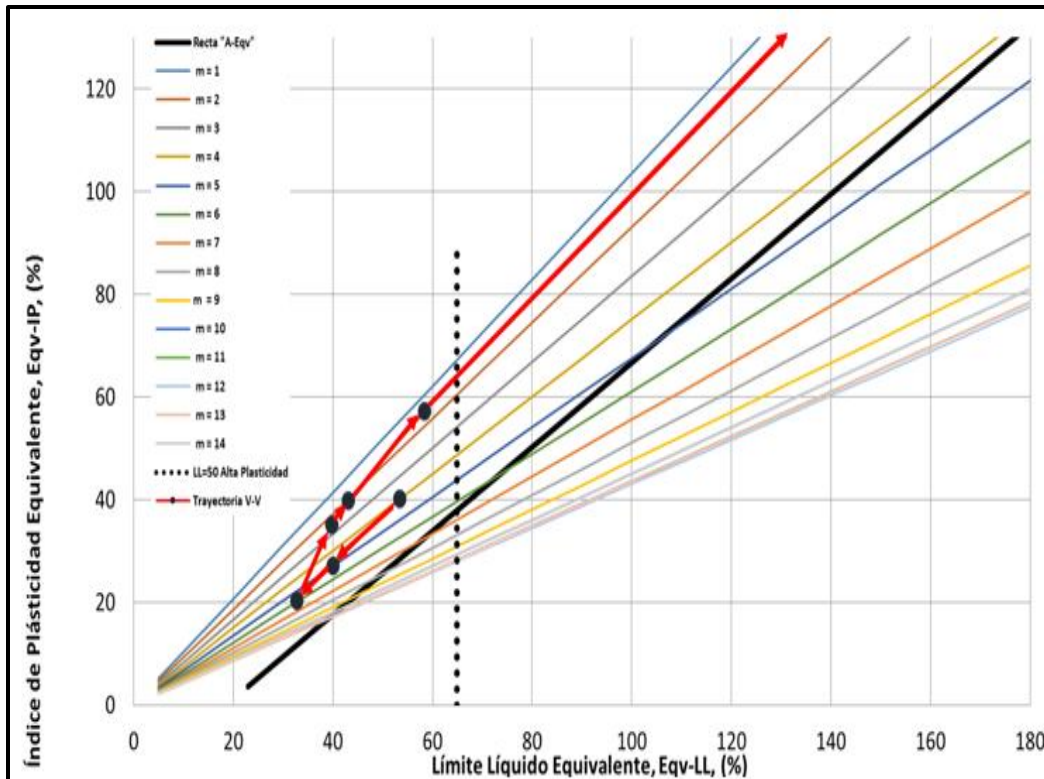


Figura 8: Trayectoria de los suelos estudiados por Villa & Vergel [3], graficado sobre la Carta de Plasticidad Equivalente propuesta por Echezuría [1]. **Fuente:** Elaboración propia

Además, esa propiedad también es empleada en diversos ensayos de laboratorio, entre los cuales están por ejemplo los de consolidación. La gravedad específica se define con la siguiente expresión, para muestras saturadas [7]:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad (1)$$

Donde:

Ws peso de las partículas sólidas

Vs volumen de las partículas sólidas

γ_w el peso de un volumen equivalente de agua destilada a 4°C

Nótese que la gravedad específica se determina obteniendo el peso seco de la muestra de suelo y

el volumen de los sólidos que la componen. Es evidente que si existen varios minerales presentes en el suelo, es decir, el mismo es una mezcla de arcillas y limos, entonces hay que tomar en consideración la contribución de los pesos y volúmenes de las distintas fracciones de suelos. En consecuencia, dependiendo de cuál mineral tenga mayor presencia en la mezcla el valor del G_s de la mezcla se verá sesgado hacia el valor del G_s del mineral más abundante.

A continuación se indican en la Tabla I algunos valores típicos de la gravedad específica existentes en la literatura para algunos suelos. Similarmente, en la Tabla II se incluyen valores promedios para la gravedad específica comúnmente utilizados para los principales minerales de las arcillas.

Es de hacer notar que la gravedad específica de los minerales de arcillas tiende a ser más alta que la de los suelos granulares como gravas, arenas y limos, con la excepción de la Caolinita.

Tabla I: Valores promedio de gravedad específica para algunos suelos [7]. **Fuente:** Elaboración propia

Tipo de suelo		Gravedad específica (Gs)
<i>Inorgánico</i>	Grava	2,65
	Arena	2,65
	Arena arcillosa	2,67
	Limo arenoso	2,66
	Limo	2,64 - 2,68
	Limo arcillo arenoso	2,67
	Arcilla	2,68 - 2,70
<i>Orgánico</i>	Limos con trozos de materia orgánica	2,30
	Lodos aluviales	2,13 - 2,60
	Turba	1,50 - 2,15
	Arcilla	2,60

Tabla II: Valores promedio de gravedad específica en los principales minerales de las arcillas [7]. **Fuente:** Elaboración propia

Minerales arcillosos	Gravedad específica (Gs)
Caolinita	2,62 - 2,66
Montmorillonita	2,75 - 2,78
Ilita	2,60 - 2,86
Clorita	2,60 - 2,96

Sin embargo, eventualmente se consiguen valores bajos para las arcillas, tal como cualquier rango estadístico para cualquier parámetro. En consecuencia, los valores extremos tienen una baja probabilidad de ocurrencia. Por eso, no es raro que se reporten valores de Gs por debajo de 2,68 para las arcillas, lo cual no significa que consistentemente esos deben considerarse como valores esperados de sus Gs sino que deben corresponder a mezclas de suelos tal como explicaremos a continuación.

En la Tabla III, se presentan los valores promedio de gravedad específica de mezclas en distintas proporciones de suelos plásticos

con gravedades iguales a 2,75 y 2,85; respectivamente, con materiales silíceos con Gs = 2,65. Se observa en la Tabla 3 que a medida que aumenta el contenido de material con Gs=2,65 (típico de materiales silíceos) se reduce lentamente el Gs de la mezcla de ambos suelos. Nótese que cuando es predominante el contenido de arcilla el valor del Gs resulta muy parecido al de ese suelo. Por lo cual, la presencia de materiales no plásticos es determinante en el valor del Gs de las mezclas. De tal manera que para que el material de las mezclas comience a estar controlado por la fracción no plástica, su Gs debe ser bajo y muy cercano al de los materiales silíceos de las arenas.

Tabla III: Valores promedio de gravedad específica para mezclas de suelos con distintos Gs

	Gs - 1 = 2,65			Gs - 2 = 2,75							
Peso en gr Suelo Gs-1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
Peso en gr Suelo Gs-2	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
Volumen - 1 (cm3)	1,9	3,8	7,5	11,3	15,1	18,9	22,6	26,4	30,2	34,0	35,8
Volumen - 2 (cm3)	34,5	32,7	29,1	25,5	21,8	18,2	14,5	10,9	7,3	3,6	1,8
Peso total - (gr)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Volumen total (cm3)	36,4	36,5	36,6	36,8	36,9	37,0	37,2	37,3	37,5	37,6	37,7
Gs - Mezc	2,74	2,74	2,73	2,72	2,71	2,70	2,69	2,68	2,67	2,66	2,65
	Gs - 1 = 2,65			Gs - 2 = 2,85							
Peso en gr Suelo Gs-1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
Peso en gr Suelo Gs-2	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
Volumen - 1 (cm3)	1,9	3,8	7,5	11,3	15,1	18,9	22,6	26,4	30,2	34,0	35,8
Volumen - 2 (cm3)	33,3	31,6	28,1	24,6	21,1	17,5	14,0	10,5	7,0	3,5	1,8
Peso total - (gr)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Volumen total (cm3)	35,2	35,4	35,6	35,9	36,1	36,4	36,7	36,9	37,2	37,5	37,6
Gs - Mezc	2,84	2,83	2,81	2,79	2,77	2,75	2,73	2,71	2,69	2,67	2,66

IV. ¿CÓMO IDENTIFICAR MATERIALES PROPENSOS A ESTAR CONTROLADOS POR LA FRACCIÓN NO PLÁSTICA?

De acuerdo con la Figura 4, los cambios en los parámetros que definen la recta $L(Su)-L(\square)$, es decir, el término independiente de dicha recta, TI, y su pendiente, m, están controlados por el aumento del contenido de material no plástico. Esos dos parámetros junto con el porcentaje de ambas fracciones (plástica y no plástica) presente en el suelo y la gravedad específica resultan fundamentales para identificar cuando ocurren cambios en el comportamiento de plástico a no plástico.

En la Figura 9 se muestra la correlación entre el término independiente, TI, y la pendiente, m, para el suelo tipo CL. 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 con ligeras variaciones muy pequeñas, por lo que es posible dibujarlas todas en un mismo gráfico, tal como se ilustra en la Figura 10.

En las Figs. 9 y 10 también se han destacado con color rojo los valores de los suelos que aparecen en la Figuras 4 y 5, para los cuales se ha descrito en detalle el proceso de cambio en el comportamiento de plástico a no plástico. Nótese que los mismos definen una zona umbral entre el comportamiento plástico a no plástico que fue posible asociar con los rangos de los parámetros TI y m. Dicha zona umbral ocurre cuando el valor del término independiente (TI) de la recta $\text{Log}(Su)-\text{Log}(\square)$ tiene valores por debajo de 4,1 y la pendiente, m está por debajo de 2,4. Véase la Figuras 9 y 10.

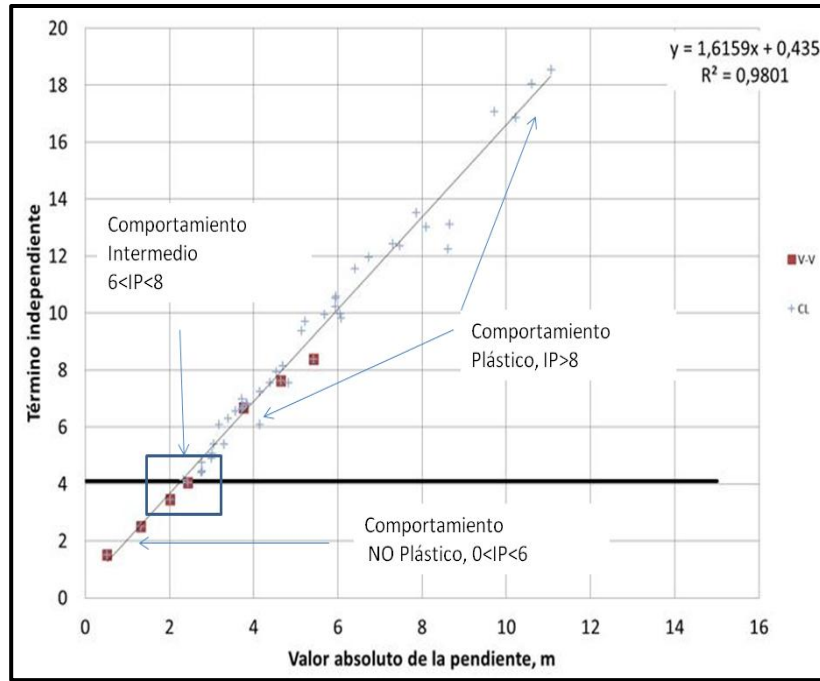


Figura 9: Puntos CL y VV comportamiento T.I vs m, modificado de [1] [2]. Fuente: Elaboración propia

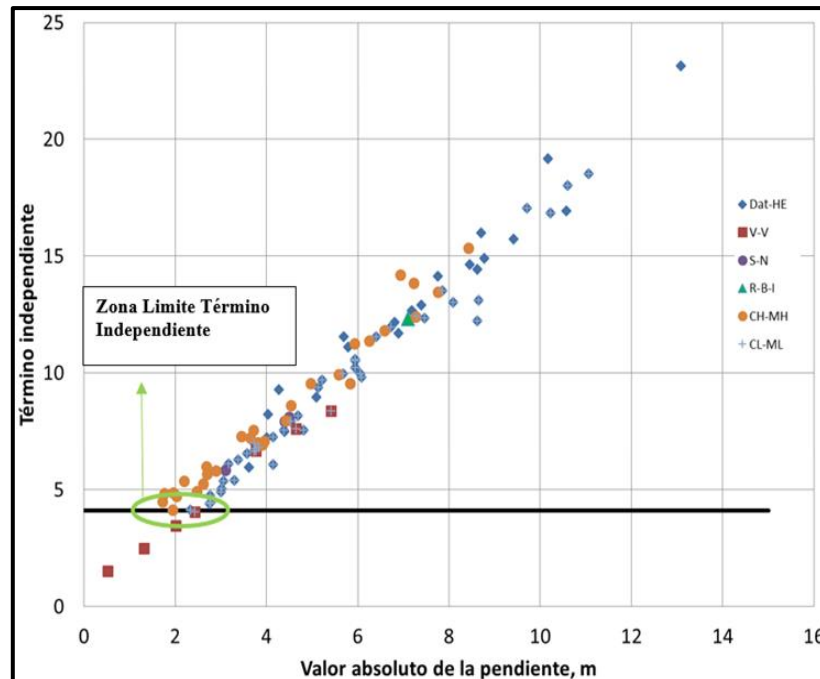


Figura 10: Gráfico aplicable a todos los materiales arcillosos y limosos relativo a los valores umbrales para el cambio de comportamiento plástico a no plástico. Modificado de [1][2]. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, tal como se mencionó antes en relación con la Figura 5, para contenidos de finos no plásticos por encima de aproximadamente 80% el límite plástico equivalente comienza a crecer en forma muy rápida por encima del 40-50% y el límite plástico equivalente a disminuir rápidamente, con lo cual incursionan en el rango controlado por el material no plástico. Lo anterior implica que el IP equivalente comienza a parecerse mucho al límite líquido. Por otra parte, en la Tabla III se evidencia que para contenidos de finos no plásticos por encima del 80% los Gs están por debajo de 2,67. En consecuencia, con base en lo antes expuesto, podemos establecer que los valores de los parámetros que marcan el cambio de comportamiento plástico a no plástico son los siguientes, los cuales deben darse simultáneamente:

Tabla IV: Valores de los parámetros que controlan el cambio de comportamiento plástico a no plástico. **Fuente:** Elaboración propia

$TI < 4,1$
$m < 2$
$LL_{equiv} \geq 45 (LL \geq 38)$
$LP_{equiv} \leq 2,5 (LP \leq 14)$
$IP_{equiv} \geq 42,5 (IP \geq 24),$
$2,66 < G_s < 2,67$
Contenido de finos no plásticos > 80%

Nótese que estos criterios implican que los suelos que cambian su comportamiento de plástico a no plástico están colocados en la nueva carta de plasticidad con los límites equivalentes de la Figura 8, en la parte superior de la zona plástica por encima de la línea de $m=2$ pero cuyo G_s sea menor que 2,67. Recuérdese que las arcillas que caigan en esta zona tendrán $G_s > 2,67$.

Como se demuestra, el cambio de comportamiento plástico a no plástico es

difícil de identificar con los métodos convencionales para los límites de Atterberg debido a que los mismos no miden una variable intrínseca del suelo sino la cantidad de agua que puede almacenar. Eso hace que aun cuando el suelo presenta plasticidad el método convencional para establecer el límite plástico no es capaz de medir. Sin embargo, el nuevo método propuesto basado en la resistencia al corte del suelo si define el cambio en el comportamiento.

Es bueno resaltar, además, que contrariamente a lo inferido de la Carta de Plasticidad convencional, no es solo la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener, sino que además hay otro grupo de variables que deben darse para detectar el cambio de comportamiento plástico. Estas variables son la gravedad específica y el contenido de finos no plásticos. Es el cambio en la resistencia al corte que induce este contenido de finos no plásticos lo que determina si el suelo tendrá comportamiento plástico o no plástico.

Resalta la diferencia entre los valores de IP dados por Boulanger e Idriss incluidos en la Figura 9 y citados en las secciones anteriores de este artículo y los Seed, en la Figura 6, con los contenidos en la Tabla 4 de esta sección. El cambio en comportamiento plástico a no plástico es complejo y depende de la interacción de los granos de material plástico contenido en la mezcla de suelo con el agua libre. Esto ocurre cuando el esqueleto de partículas que definen la estructura de la mezcla comienza a transmitir las fuerzas entre partículas, aunque el material plástico forma una especie de "pasta" con el agua libre, similar a la pasta de cemento en el mortero. Esto le da propiedades plásticas al movimiento de los granos pero las fuerzas son transmitidas por el esqueleto del material no plástico. Así, la matriz predominante es el material no plástico el cual comienza a dominar el comportamiento general de la mezcla.

No obstante, cuando debido a la alta concentración de material no plástico fino aumenta mucho la relación de vacíos y con eso el agua libre, la pasta de partículas de arcilla y agua comienzan a alcanzar concentraciones de agua

por encima del límite líquido. En consecuencia, las partículas de arcillas con su doble capa completamente desarrollada comienzan a comportarse como un fluido viscoso dentro de los espacios porosos. Es decir, su interacción con el agua libre las hace estar muy por encima del límite líquido.

V. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS PARA CAMBIO DE COMPORTAMIENTO PLÁSTICO A NO PLÁSTICO A SUELOS DE LA FORMACIÓN MESA CON VALORES ATÍPICOS DE G_s.

Para completar el análisis, se ensayaron cinco muestras de suelos de la Formación Mesa los cuales tienen $2,58 < G_s < 2,68$ para el 89% de los suelos de dicha formación [8]. Asimismo, los análisis de difracción de rayos X realizados a muestras representativas con esos valores bajos de la G_s, también provenientes de esa formación geológica, indican que en muchas de dichas muestras las fracciones predominantes son cuarzo y caolinita con amplio dominio del cuarzo.

También se aprecia en algunas de las muestras de la Formación Mesa la presencia de Montmorillonita-Caolinita y Montmorillonita, cuando la fracción de cuarzo disminuye [8]. Esto sugiere que la presencia de materiales con G_s bajo en las cercanías de 2,65 o menor debe ser importante y debe controlar el G_s de las mezclas de suelos.

Ahora bien, la granulometría representativa de los materiales presentes en las cinco muestras ensayadas se muestra en la Figura 11 [9]. En la misma se aprecia que el contenido de arena es bajo (~20%), por lo que no puede ser ese material el que esté contribuyendo los valores bajos de la G_s según los valores contenidos en la Tabla 3.

Por otra parte, el análisis riguroso de la Figura 11 muestra que aproximadamente el 60 % del material es más fino que el tamaño delimitado para las arcillas, el cual se ha identificado con una línea segmentada de color rojo (2 μ). Para comodidad del lector, también se han colocado dos líneas verdes segmentadas las cuales ubican

los diámetros convencionales para los distintos materiales denominados finos que incluyen limos y arcillas.

Atendiendo a que existe Caolinita en los suelos de la formación Mesa, es importante determinar si es esa arcilla la que podría estar contribuyendo al comportamiento de la G_s de estos suelos. Recuérdese que la G_s de la Caolinita está, según los valores de la Tabla 2, dentro del rango indicado en los párrafos anteriores, es decir $2,58 < G_s < 2,68$. Sin embargo, tal como se mencionó antes, las difracciones de rayos X indican que la presencia de Caolinita no es la más significativa en la mayoría de las muestras, sino el cuarzo.

En consecuencia, tiene que ser el limo no plástico de naturaleza silíceo el que esté presente en las mezclas y ese limo debe tener tamaños muy pequeños para incursionar en el rango de las arcillas. Es decir, el material fino presente en estos suelos tiene una fracción de limo no plástico silíceo que está dominando tanto la plasticidad como la gravedad específica de los mismos.

Los limos, de tamaño de grano muy pequeño, son materiales silíceos sin carga eléctrica en su superficie externa. Por esa razón, los mismos no se comportan como coloides sino que, por el contrario, poseen tendencia a caer más rápido que las arcillas por la acción de la gravedad.

En efecto este hecho fue confirmado por el tiempo de sedimentación que tuvieron las muestras al realizarles los ensayos con el hidrómetro; ya que la mayoría de las partículas que en un principio se encontraban en suspensión, decantaron antes de cumplir las 12 horas después de iniciado el ensayo. En este punto es bueno recordar las experiencias de Echezuría [1] con materiales que aun presentando plasticidad tenían comportamientos al corte no drenado con altos ángulos de fricción, los cuales estaban controlados por limos finos que decantaban antes de las 12 horas.

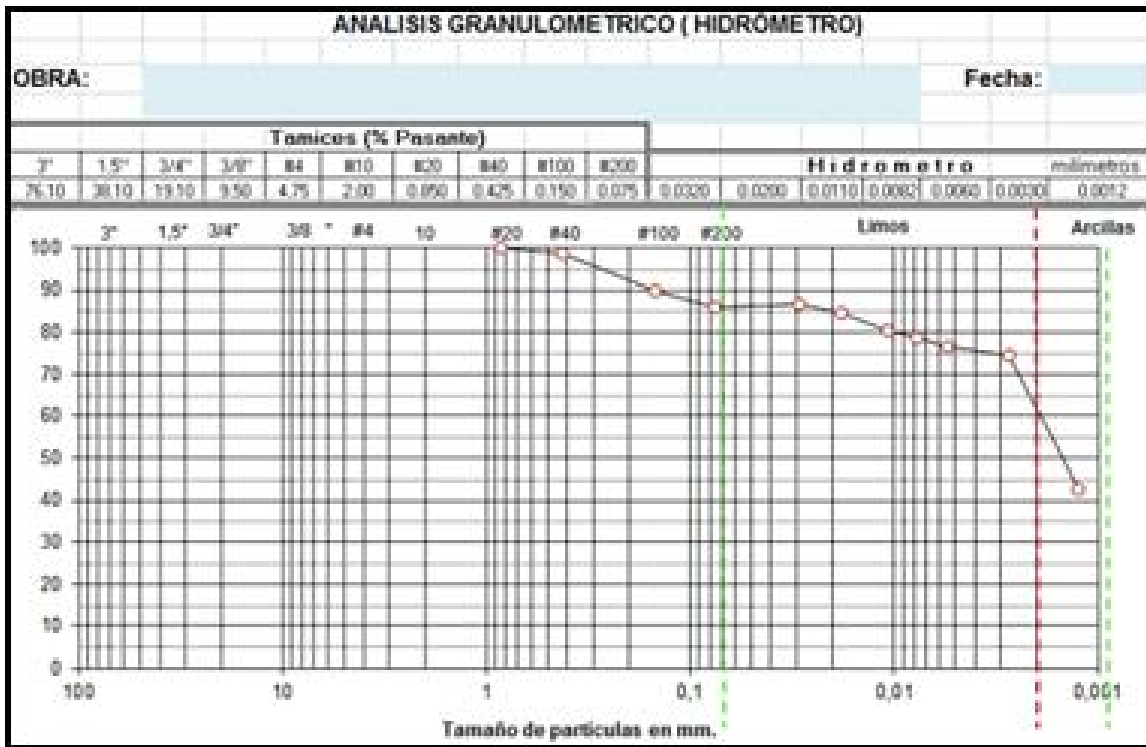


Figura 11: Pruebas de granulometría por hidrómetro a muestras del oriente venezolano con baja Gs: Modificado de García [9]

Los resultados de los ensayos de veletas de laboratorio a las cinco muestras de la Formación Mesa se incluyen en la Figura 12 [9]. Para los fines de diferenciar las muestras arenosas se le ha antepuesto la letra “s” a la clasificación de la arcilla según el SUCS, tal como se muestra a continuación:

- A. Una arcilla de baja plasticidad (CL)
- B. Una arcilla de baja plasticidad arenosa, s(CL)
- C. Dos arcillas de alta plasticidad (CH)
- D. Una arcilla de alta plasticidad arenosa s(CH)

Los valores de los límites equivalentes se incluyen en la Tabla V. Los mismos se muestran en la nueva carta de plasticidad propuesta en este trabajo de investigación en la Figura 13. Similarmente, los valores de los parámetros TI y m se incluyen en la Tabla 6.

Como se aprecia en la Figura 13, todas las muestras caen dentro del espectro plástico de los suelos, por lo que podemos indicar que las mismas tienen comportamiento plástico a pesar de la presencia de materiales no plásticos. Sin embargo, la muestra 3 identificada con el color rosa cae muy cerca del extremo superior de la nueva carta de plasticidad y la Tabla V indica que esa misma muestra tiene los valores más bajos del TI y de la pendiente, m, los cuales se aproximan a los límites equivalentes indicados para observar el cambio de comportamiento a saber: 4,1 y 2,4; respectivamente.

Esto sugiere que esta muestra debe estar muy cercana a la zona de transición de comportamiento plástico a no plástico, lo cual se observa en la Figura 14 para CH. Las otras muestras CH se incluyen en esa misma figura, mientras que las CL se incluyen en la Figura 15.

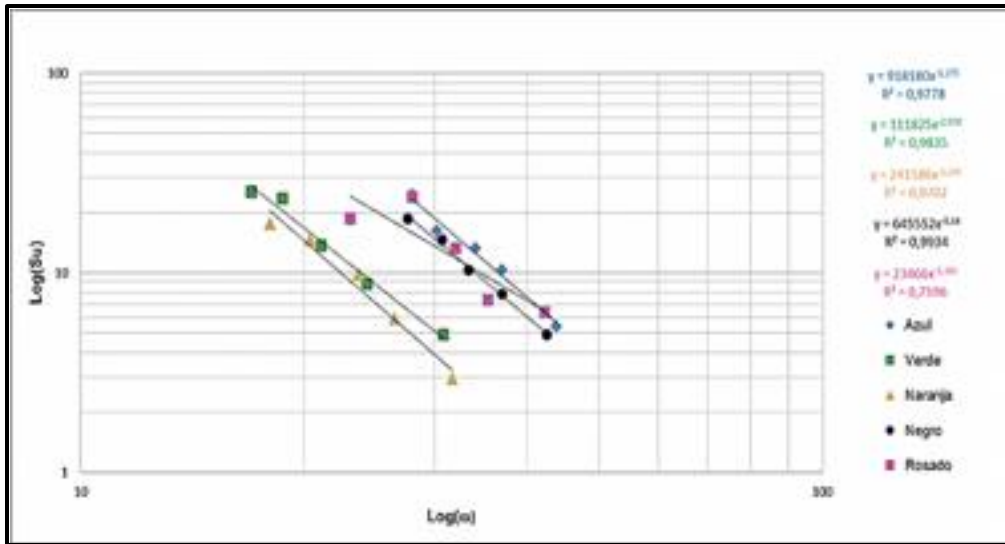


Figura 12: Variación del logaritmo de la resistencia al corte no drenado (S_u) con el logaritmo del contenido de humedad (w) en muestras de arcillas de Anaco. Modificado de [9]. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla V: Valores de los límites equivalentes de las cinco muestras de suelos de la Formación Mesa ensayados con veleta de laboratorio [9]. **Fuente:** Elaboración propia

Muest	Lpeq	Lleqv	IPeqv
1	10,1	66	55,9
2	10,04	60	49,96
3	7,7	76	68,3
4	7,5	44	36,5
5	7,7	40	32,3

Tabla VI: Valores de los parámetros TI y m para evaluar comportamiento plástico de los suelos [9]. **Fuente:** Elaboración propia

Muestra	TI	m
1	5,963	3,175
2	5,810	3,14
3	4,370	2,191
4	5,049	2,919
5	5,383	3,245

Lamentablemente, no fue posible contar con los contenidos de finos no plásticos específicos para cada una de las cinco muestras ensayadas. Sin embargo, si consideramos suficientemente representativa la muestra para la cual se preparó la Figura 11, tenemos que el contenido de finos no plástico está en el orden del 85%. De la misma manera, podemos estimar con base en la Tabla 3 que la gravedad específica está entre $2,66 < G_s < 2,67$. Sin embargo, de acuerdo con las Tablas 5 y 6 se evidencia que los valores de $IT > 4,1$ y que $m > 2,4$ con lo cual ninguna de las muestras tendrá comportamiento no plástico y no deben licuar.

Todas las cinco muestras, sin embargo, quedan dentro de la zona de transición, con lo cual su comportamiento no drenado puede estar controlado por un alto ángulo de fricción. En efecto, se espera entonces que los parámetros de Mohr-Coulomb de esos suelos tengan ángulos de fricción altos ($\phi \geq 34^\circ$) aunque exhiben comportamiento plástico. Lo mismo sucede con la G_s , la cual es baja para materiales plásticos, de acuerdo con los valores detectados en este estudio.

La muestra rosada, sin embargo, está casi en el umbral del comportamiento no plástico tanto en la parte superior de la nueva carta de plasticidad de la Figura 13 como en la Figura 14. Esta muestra tendrá más tendencia a mostrar un comportamiento no plástico que las otras cuatro.

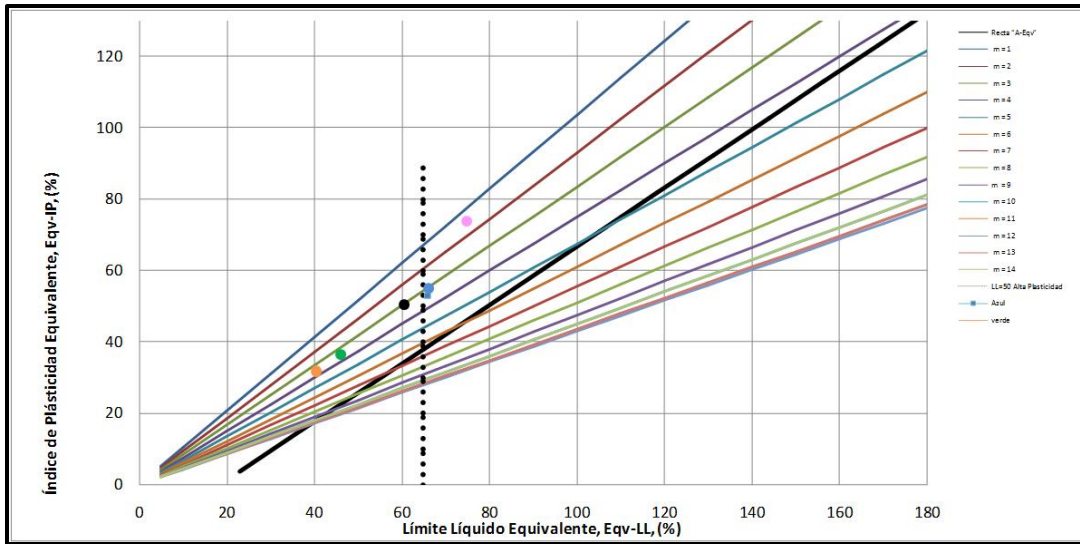


Figura 13: Localización de los valores límites equivalentes de las cinco muestras de suelos de la Formación Mesa ensayados con veleta de laboratorio. **Fuente:** Elaboración propia

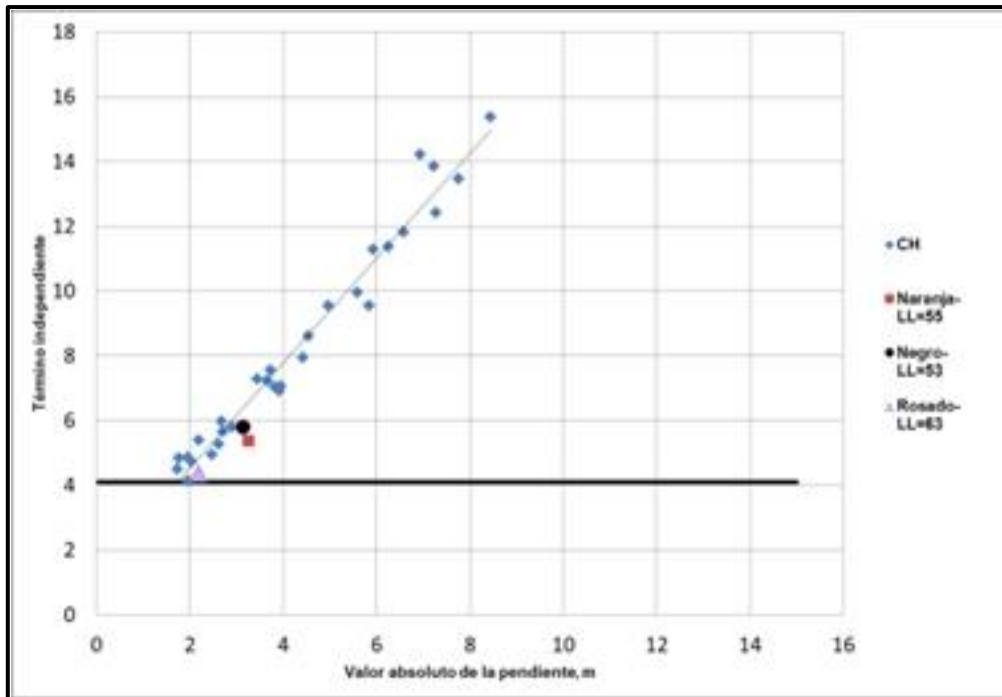


Figura 14: Comportamiento del término independiente (TI) Vs el valor absoluto de la pendiente (m) para los suelos arcillosos de alta plásticidad (CH). **Fuente:** Elaboración propia

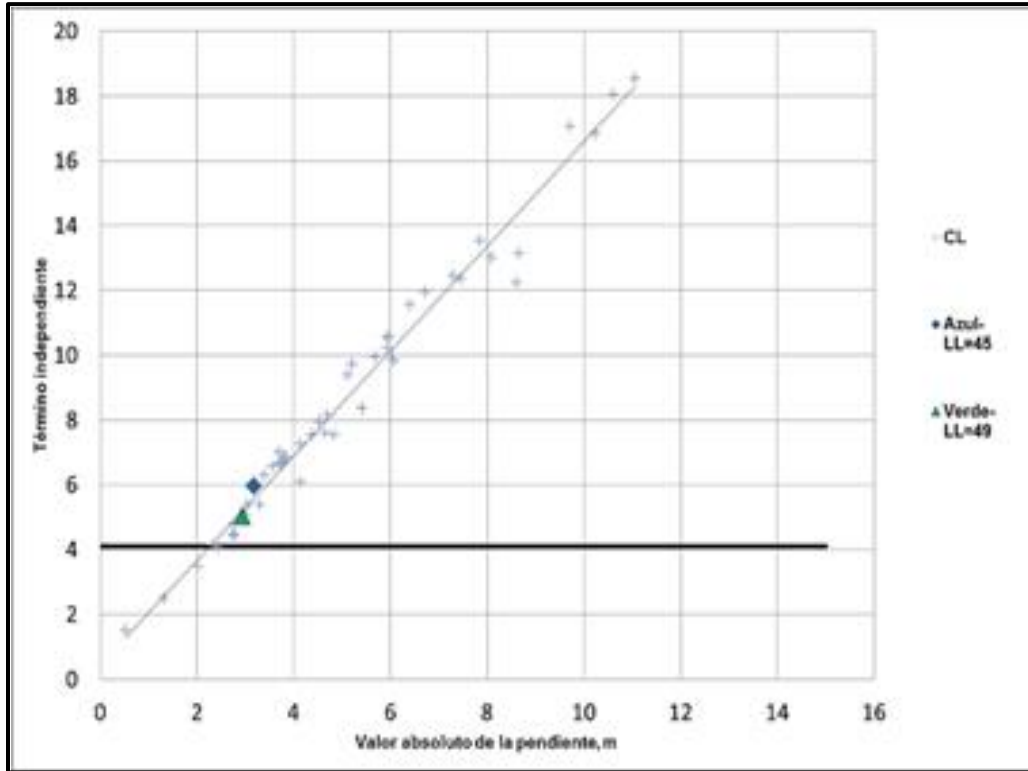


Figura 15: Comportamiento del término independiente (TI) Vs el valor absoluto de la pendiente (m) para los suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). **Fuente:** Elaboración propia

Con base en lo anterior, se confirma que los suelos pertenecientes a la Formación Mesa del oriente del país estudiados en esta parte de la investigación tienen altos contenidos de limos no plásticos que impactan los valores de la G_s y podrían tener comportamiento no plástico en condiciones no drenadas a pesar de mostrar límites de Atterberg y plasticidad.

VI. CONCLUSIONES

El valor absoluto de la pendiente, m , correlaciona bien con el término independiente de las rectas $L(Su)-L(\square)$, lo cual junto con el valor de la gravedad específica, permite establecer cuándo ocurre el cambio de comportamiento plástico a no plástico del suelo. Esa correlación aplica para los distintos tipos de suelos: CL, CH, MH y ML. No obstante, debido a la poca dispersión entre ellos es posible colocarlos todos juntos ya que los valores umbrales que definen el cambio de comportamiento plástico a no plástico son los

mismos. El valor umbral para el TI es 4,1 y el de la pendiente, m es 2.

A medida que aumenta el contenido de material no plástico ($G_s=2,65$) en una mezcla de arcillas con limos o arenas, se reduce lentamente el G_s de la mezcla. Cuando es predominante el contenido de arcilla el valor del G_s resulta muy parecido al de ese suelo, mientras que lo contrario ocurre cuando la presencia de materiales no plásticos es alta. De tal manera que cuando en una mezcla de suelos controla la fracción no plástica, su G_s debe ser bajo y muy cercano al de los materiales silíceos de las arenas o limos.

Para establecer si un suelo tendrá comportamiento plástico o no plástico de debe verificar que las siguientes condiciones se den simultáneamente:

- $TI < 4,1$
- $m < 2$
- $LL \text{ equiv} \geq 45$ ($LL \geq 38$)
- $LP \text{ equiv} \leq 2,5$ ($LP \leq 14$)
- $IP \text{ equiv} \geq 42,5$ ($IP \geq 24$),
- $2,66 < G_s < 2,67$
- Contenido de finos no plásticos > 80%

Lo anterior implica que el IP equivalente comienza a parecerse mucho al LL equivalente. Adicionalmente, los suelos que cambian su comportamiento de plástico a no plástico están colocados en la parte superior de la zona plástica por encima de la línea de $m=2$ en la nueva carta de plasticidad basada en los límites equivalentes propuesta en este trabajo, pero su G_s será menor que 2,67. Recuérdese que en general las arcillas que caen en esta zona tienen $G_s > 2,67$.

El cambio en comportamiento plástico a no plástico es complejo y depende de la interacción de los granos de material plástico contenido en la mezcla de suelo con el agua libre. Esto ocurre cuando el esqueleto de partículas que definen la estructura de la mezcla comienza a transmitir las fuerzas entre partículas, aunque el material plástico forma una especie de "pasta" con el agua libre, similar a la pasta de cemento en el mortero. Esto le da propiedades plásticas al movimiento de los granos pero las fuerzas son transmitidas por el esqueleto del material no plástico. Así, la matriz predominante es el material no plástico el cual comienza a dominar el comportamiento general de la mezcla.

No obstante, cuando debido a la alta concentración de material no plástico fino aumenta mucho la relación de vacíos y con eso el agua libre, la pasta de partículas de arcilla y agua comienzan a alcanzar concentraciones de agua por encima del límite líquido. En consecuencia, las partículas de arcillas con su doble capa completamente desarrollada comienzan a comportarse como un fluido viscoso dentro de los espacios porosos. Es decir, su interacción con el

agua libre las hace estar muy por encima del límite líquido.

Con base en el análisis comparativo, realizado en cinco muestras de arcillas de la Formación Mesa del oriente del país, los cuales tienen una alta presencia de materiales no plásticos, se determinó que en general el comportamiento de los mismos será plástico aunque sus ángulos de fricción serán altos en comparación con otras arcillas. Es posible que algunos de ellos se puedan comportar en forma no plástica durante el corte no drenado.

De la misma manera, uno de esos materiales tendrá mayor oportunidad de comportarse como no plásticos debido a que cae en la zona umbral para el cambio de comportamiento de ambos parámetros. Estos suelos pueden tener ángulos de fricción en el orden de los de materiales granulares no plásticos y pueden presentar problemas de licuación cuando sean sometidos a corte no drenado.

Finalmente, debido a estas alertas encontradas para las cinco muestras de los suelos de la Formación Mesa, en relación a que pueden mostrar comportamiento no plástico, es conveniente, realizar a esas arenas las pruebas recomendadas en esta investigación a fin de definir si el comportamiento potencial de los mismos será plástico o no plástico.

La cantidad real de material no plástico con características de minerales silíceos presentes en los suelos del oriente venezolano estudiados en este trabajo de investigación, no es arenosa, por lo que tiene que ser limosa. Adicionalmente, dicha fracción es mayor que la determinada con los tamaños de grano convencionales a partir de ensayos de granulometría por hidrómetro.

Esa fracción no plástica está entonces constituida por limos cuyos tamaños incursionan en el rango de las arcillas. Así, esos limos controlan, no solo los valores de la plasticidad sino también, los de la gravedad específica de dichas arcillas. Por lo tanto, aunque dichos suelos clasifican como arcillas su gravedad específica resultante es baja y consistentemente parecida a la de la sílice para toda la mezcla de suelo, debido a la poca

influencia de la fracción real de la arcilla presente que le aporta plasticidad.

Adicionalmente, se verificó que el comportamiento al corte no drenado de esos suelos, representado por la recta de $L(S_u)-L(\square)$, también indica que los mismos se encuentran en la zona de transición de comportamiento plástico a no plástico. Así, dichos suelos pueden exhibir ángulos de fricción altos típicos de arenas mientras que también presentan plasticidad.

REFERENCIAS

- [1] Echezuría, "La Resistencia al Corte y la Licuación de Suelos con Plasticidad", Rev. Tekhné. Vol. 20, Núm 1 (2017):081-089.
- [2] Privitera, Valeria, 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Echezuría, "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.
- [7] Lambe T.W., Whitman R.V. Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1969
- [8] Garcia, G. Javier y L. M. Portovedo M., *Evaluación de los valores de gravedad específica de arcillas detectadas en el estado Monagas, Venezuela*, Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Metropolitana, Caracas, 26 Feb. 2016.
- [9] García, Génesis, *Determinación de la gravedad específica como propiedad índice de las arcillas del Estado Anzoátegui, Venezuela*, Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Metropolitana, Caracas, Junio. 2017.