

Apuntes personales para posible publicación de libro

LA CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA CON BASE EN EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS

Por: **Prof. Heriberto Echezuría**

RESUMEN

En este Trabajo de Investigación se estudia en detalle la plasticidad del suelo y se correlaciona cuantitativamente con otros parámetros de ingeniería y volumétricos del suelo para mejorar la forma de clasificar los suelos con base en su plasticidad. El trabajo solo contempla los suelos plásticos en el sentido de que son parte de las mezclas naturales de suelos existentes en la naturaleza. En el trabajo se atienden varios aspectos teóricos en capítulos separados los cuales están estructurados incluyendo los análisis y deducciones requeridas, los resultados obtenidos y las conclusiones para cada caso. El modelo investigado fue verificado durante el curso de la investigación con datos de ensayos de laboratorio realizados por estudiantes en los laboratorios de la UCAB y otros tomados de la literatura para verificar la robustez del mismo y darles confianza a los potenciales usuarios de estos hallazgos. Con los datos del estudio fue posible platear una nueva carta de plasticidad para clasificación de suelos y sus aplicaciones en evaluación de licuación.

Palabras claves: plasticidad, arcillas, resistencia al corte, límites de Atterberg, modelo constitutivo de suelo, módulo de Young, módulo de corte, licuación, ángulo de fricción

INDICE GENERAL

CAPITULO 1: PROBLEMAS QUE MOTIVAN LA INVESTIGACIÓN

- 1.1 Los parámetros de diseño en proyectos de Ingeniería Conceptual y Básica
- 1.2 La predicción del comportamiento del suelo
- 1.3. Justificación de la Investigación
- 1.4 Objetivos de la investigación
 - 1.4.1 Objetivo General
 - 1.4.2 Objetivos Específicos
- 1.5 Metodología de la investigación
- 1.6 Organización de la investigación
- 1.7 Referencias del Capítulo 1

CAPITULO 2: IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS EN MEZCLAS DE SUELOS

- 2.1 Variación del comportamiento plástico en mezclas de suelos
- 2.2 La recta $L(Su)-L(\omega)$ y la plasticidad
- 2.3 Los límites equivalentes basados en las curvas $L(Su)-L(\omega)$
- 2.4 Modificación de la Carta de Plasticidad considerando los límites equivalentes
- 2.5 Cambios en la gravedad específica debidos al contenido de finos no plásticos
- 2.6 ¿Cómo identificar materiales controlados por la fracción no plástica?
- 2.7 Aplicación de los criterios para cambio de comportamiento plástico a no plástico a suelos venezolanos
- 2.8 Conclusiones del Capítulo 2
- 2.9 Referencias del Capítulo 2

CAPÍTULO 1

PROBLEMAS QUE MOTIVAN LA INVESTIGACIÓN

1.1 Los parámetros de diseño en proyectos de Ingeniería Conceptual y Básica

Para proyectos de Ingeniería, Procura y Construcción (IPC), típicamente utilizados para plantas industriales grandes o puentes de envergadura, es necesario contar con parámetros de diseño en las etapas iniciales del proyecto. En general, para este tipo de proyectos la definición de los parámetros para diseño geotécnico representa un problema importante debido a la limitada cantidad de fondos asignados a esas etapas, particularmente, en las fases Conceptual y Básica de la ingeniería, las cuales se desarrollan en las primeras etapas de dichos proyectos. Para la etapa de ingeniería de Detalles del proyecto IPC ya los fondos han sido asignados y se cuenta con información detallada, no obstante, para las dos primeras fases de la ingeniería ejecutadas en épocas más temprana del proyecto existen limitaciones para la ejecución de la exploración del subsuelo y de los ensayos de laboratorio pues el proyecto no cuenta con suficientes fondos todavía.

En consecuencia, para mejorar los estimados de costo de clase IV-V, característico de la fase de ingeniería Conceptual, a clase II-III, necesario al final de la ingeniería Básica para conseguir la aprobación de los fondos, se deben estimar debidamente los sistemas de fundaciones cuando todavía no existe información detallada de las condiciones geotécnicas de los sitios. Por lo tanto, una adecuada caracterización geotécnica que asegure la robustez de los parámetros de diseño en esas etapas tempranas del proyecto juega un rol muy importante para afinar los estimados de costos.

En este estudio se plantea un modelo capaz de integrar los distintos parámetros del suelo en un modelo único dependiente de la plasticidad que identifica los cambios en todos los parámetros del suelo cuando cambia uno de ellos. Además incluye la preparación de las curvas esfuerzo deformación y las respuestas de presión de poros durante el corte no drenado a partir de los parámetros básicos del suelo. De esta manera es posible estimar de forma suficientemente robusta los parámetros requeridos para el diseño de fundaciones atendiendo el nivel de carga y el confinamiento del suelo en etapas tempranas de los proyectos.

El hecho de calcular los valores de los parámetros de diseño a partir de las propiedades índices del suelo es un paso importante que representa una mejoría considerable con relación a la forma convencional de estimar los costos. Adicionalmente, el procedimiento aquí planteado permite considerar la no linealidad de los parámetros de resistencia al corte y mejora significativamente la selección de los valores a utilizar según los requerimientos de la fundación.

En consecuencia, el modelo integrado de suelos aquí presentado viene a constituirse entonces en una herramienta muy importante ya que permite establecer valores suficientemente confiables para dichos parámetros a partir de las propiedades índices del suelo, es decir, el índice de plasticidad, el contenido de humedad natural y el contenido de material no plástico.

Es oportuno mencionar que la mayoría de los modelos de suelos no pueden predecir el comportamiento sólo con base en las propiedades índices y requieren la ejecución de muchos ensayos antes de definir las curvas para seleccionar los valores de los parámetros aplicables al diseño.

En la sección siguiente se tratan en mayor detalle los aspectos teóricos relacionados con el problema planteado a fin de orientar las soluciones correspondientes.

1.2 La predicción del comportamiento del suelo

Muchas de las propiedades ingenieriles de los suelos, y en particular, la resistencia al corte sin drenaje, se estudian con énfasis en la historia de esfuerzos. De hecho, modelos como el SHANSEP [4] se basan en la normalización de parámetros del suelo propuesta en MIT [5] y consideran además de la presión de confinamiento actual, la historia de esfuerzos. De la misma manera, los cambios de volumen del suelo se manejan con base en los ensayos de consolidación, con los cuales se definen tanto el índice de compresión, C_c , como el índice elástico de descarga-recompresión, C_{sr} . El nivel de sobre consolidación se establece con un método empírico desarrollado por Casagrande, según es citado en [5]. Sin embargo, poco o ningún esfuerzo se ha adelantado para tratar de poner juntas estas dos formas de respuesta del suelo pues debe haber conexión entre ambos por tener en común el confinamiento.

Por otra parte, sabemos que no es posible alterar uno de los parámetros del suelo sin alterar los demás. Esto es particularmente evidente al considerar las propiedades índice ya que la relación de vacíos, e , la humedad, ω , el peso unitario total, γ_t , la saturación, S , y la gravedad específica, G_s , están íntimamente correlacionadas, tal como se ilustra en la Fig. 1-1.

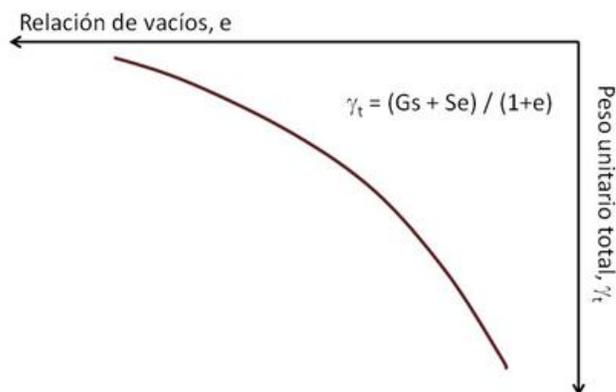


Fig. 1-1 Gráfico de compatibilidad entre las propiedades índice de los suelos. Figura de elaboración propia.

Para un suelo saturado que tiene una gravedad específica conocida, G_s , existe una curva única como la mostrada en la Fig. 1-1 . Es bueno destacar que las correlaciones de las propiedades índice aplican tanto a las condiciones remoldeadas como a las inalteradas. En otras palabras, no dependen de la estructura del suelo, sino de la capacidad de las partículas del mismo para almacenar agua.

Considerando entonces que cualquier cambio en el peso unitario está, por un lado, estrechamente unido a las propiedades índices y, por otro lado, con el cambio de volumen del suelo, es lógico pensar entonces que los cambios en los esfuerzos y en la resistencia al corte, están también relacionados con dichas propiedades índices. Ahora bien, considerando que la capacidad de retener agua de una arcilla, independientemente de su estructura en sitio, está controlada por la capacidad de sus partículas para atraer agua en su doble capa, podemos establecer que esa capacidad de retención de agua está fuertemente ligada con la plasticidad. Adicionalmente, de acuerdo con Rogers [6], quien cita a Kenney (1959) y Olson (1974), la capacidad de retener agua también está íntimamente relacionada con el ángulo de fricción y, en particular, con el seno de dicho ángulo, ya que el mismo varía con la pendiente de la recta de Mohr-Coulomb, M-C, tal como se ilustra en la Fig. 1-2.

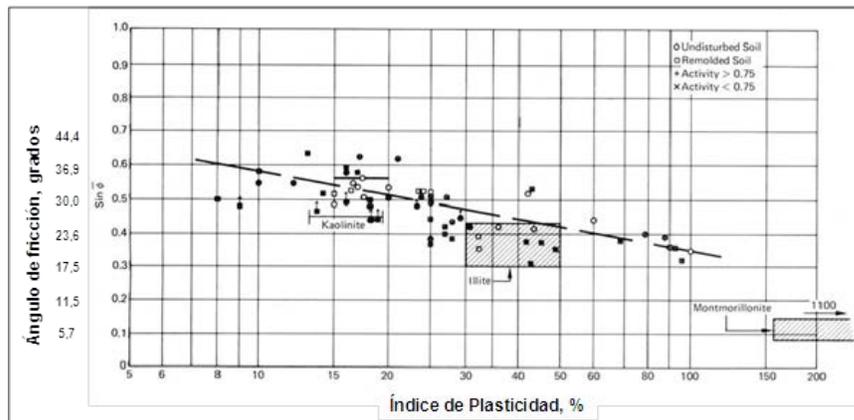


Fig. 1-2 Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con el Índice de Plasticidad modificado de Kenney (1959) y Olson (1974) según los cita Rogers [6].

Al hacer una revisión crítica del rol de variables como la plasticidad, el contenido de material no plástico, la gravedad específica y el ángulo de fricción del suelo será posible proponer un modelo que unifique todos los criterios antes señalados. De esta manera se podrán incorporar las características esfuerzo deformación, resistencia al corte, compresibilidad y nivel de sobre consolidación, en un modelo único que permita anticipar las respuestas del suelo y reducir los ensayos de laboratorio requeridos para las actividades de caracterización geotécnica. Lo anterior es un aspecto sumamente importante en las etapas tempranas de los proyectos de

ingeniería al darle suficiente confianza a los datos obtenidos con mínimo esfuerzo de campo y laboratorio para optimizar los aspectos financieros y los costos de los estudios de suelos.

Es necesario que el modelo permita anticipar el comportamiento del suelo conociendo solamente sus propiedades índices. Por ello, para el desarrollo del mismo se utilizarán los conceptos de normalización de parámetros, los cuales han sido extensamente probados y aceptados en la Mecánica de Suelos. Un modelo con estas características sería una excelente forma de chequear si los ensayos de laboratorio están dando resultados razonables para el suelo o si el mismo tiene alguna propiedad especial que debe ser atendida cuidadosamente.

1.3 Justificación de la investigación

Uno de los retos más importantes en la Ingeniería Geotécnica consiste en anticipar el comportamiento del suelo con la menor cantidad de información posible. Esto se debe fundamentalmente a los gastos asociados y el tiempo que implica la investigación geotécnica y la caracterización del suelo. Por ello es muy conveniente contar con un modelo basado en los mismos principios clásicos de la Mecánica de Suelos, como la normalización de parámetros de ingeniería junto con otros como el SHANSEP, que permitan anticipar y predecir adecuadamente los parámetros para diseño ingenieril con base en el menor número posible de ensayos.

Es bueno destacar que aunque algunas correlaciones existentes permiten algunas de estas predicciones, es necesario contar con un número importante de ensayos que permitan soportar los resultados. Es decir, darle más peso y confianza a la información disponible en etapas tempranas para reducir los costos de las exploraciones y los ensayos de laboratorio. Si se lograra unificar los parámetros índices con las propiedades de ingeniería y las volumétricas se contaría con un excelente medio para alcanzar esos objetivos.

La base fundamental para lograr un modelo integrado radica en el concepto de que todos los parámetros del suelo están interconectados y no es posible alterar uno de ellos sin afectar a los demás. Ese puede ser considerado el punto de partida para formular un modelo que integre los criterios convencionales en una forma integral tridimensional para predecir de manera robusta el comportamiento del suelo y sus parámetros de diseño en ingeniería. De hecho, en la práctica común, esto es realizado separadamente y se toman en consideración los cambios en las propiedades producto de las cargas aplicadas en los ensayos para poder completar la caracterización de los materiales. Lo anterior se realiza cuando se conoce que hay sobre consolidación en algunos estratos en los cuales variarán las condiciones debido a la imposición de las nuevas cargas por las fundaciones.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es estudiar en detalle la plasticidad de los suelos y su correlación con los demás parámetros ingenieriles de los mismos para anticipar su comportamiento ante el corte no drenado con aplicaciones en la caracterización geotécnica.

1.4.2 Objetivos específicos

- Establecer la influencia del contenido de finos no plásticos en la gravedad específica del suelo G_s .
- Establecer la influencia del contenido de finos no plásticos en la resistencia al corte remoldeada como propiedad intrínseca del suelo en lugar de solamente la humedad.
- Proponer una carta de plasticidad basada en la resistencia al corte remoldeada tomando en cuenta el IP y el contenido de finos no plásticos.

1.5 Metodología de la investigación

En el desarrollo de este trabajo especial se empleó la metodología experimental con realización de ensayos de laboratorio aunado a procedimientos de inferencia basados en la lógica de los procesos químicos y físicos involucrados en los distintos procesos geotécnicos. De la misma manera, se utilizó la búsqueda en la literatura de resultados de ensayos publicados por otros autores que fuesen relevantes para verificar los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

Como parte de la investigación, también se utilizó información citada como ejemplo de casos particulares existente en libros. Esta información permitió verificar el método propuesto en este trabajo con datos independientes. En todos los casos, cada una de las fuentes fue debidamente citada. La comparación de los valores predichos por el modelo aquí presentado con aquellos indicados en otros textos consultados permitió su validación utilizando valores no incluidos en el desarrollo del mismo, lo cual lo hace más robusto. Es bueno destacar que, durante el desarrollo de este Trabajo de Investigación se siguió el código de ética de la investigación de la Universidad Católica Andrés Bello.

La fase experimental comprendió la ejecución de varios trabajos de grado, TG, realizados en distintas universidades y dirigidos por el autor, en los cuales se llevaron adelante segmentos específicos de dicha investigación. Esto requirió la adecuada división del trabajo en sectores que permitiesen cumplir con todos los objetivos sin perder la orientación general, así como la integración final de los resultados y la formulación definitiva del modelo, lo cual fue

realizado estrictamente por el autor. Todos los TG y las otras fuentes de información o datos se citan debidamente a lo largo de este trabajo.

1.6 Organización de la investigación

Los detalles para alcanzar los logros de cada uno de los objetivos específicos junto con sus hallazgos se presentan en forma separada en Capítulos integrales que incluyen los aspectos teóricos, los análisis requeridos, los resultados y las conclusiones. En el Capítulo 1 se describe el problema que motiva la investigación junto con algunos aspectos teóricos generales. Similarmente se justifica la investigación y se exponen los objetivos de la misma. Además se indica la metodología de la investigación.

En el Capítulo 2 se formula el modelo integrado de las distintas propiedades del suelo: volumétricas, índices e ingenieriles que permite anticipar el comportamiento del suelo, con base en el IP, el contenido de material no plástico y la Gs, ante el corte no drenado. Dicho modelo se basa en los criterios bien aceptados de respuesta hiperbólica para las curvas de esfuerzo deformación y en los conceptos de normalización y nivel de consolidación de suelos con plasticidad. Se consigue además como un logro de la investigación que las curvas de respuesta de presión de poros durante el corte son también hiperbólicas y dependientes del IP. Con dicho modelo se puede determinar la resistencia al corte y el estado de consolidación del suelo, lo cual es fundamental para diseño de ingeniería en proyectos IPC, sobre todo para las fases de ingeniería Conceptual y Básica de proyectos de grandes inversiones.

1.7 Referencias del Capítulo 1

1 Atterberg, A. M. (1911). “Über die physikalische Bodenuntersuchung, und über die Plastizität de Tone,” International Mitteilungen für Bodenkunde, Verlag für Fachliteratur. G.m.b.H. Berlin, Vol. 1, 10–43.

2 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, 2001

3 http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010_11_14_archive.html

4 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.

5 Lambe T.W., Whitman R.V. Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1969

6 Rogers, David, “Correlations Between Soil Plasticity and Strength Parameters”, Geological Sciences & Engineering GE 441 - Advanced Engineering Geology & Geotechnics, on line courses, spring 2004, Missouri University of Science and Technology.

7 Kamil Kayabali and Osman Oguz Tufenkci, “Shear strength of remolded soils at consistency limits”, Can. Geotech. J. 47: 259–266, 2010.

8 Echezuría, H., “La Resistencia al Corte y la Licuación de Suelos con Plasticidad”, Rev. Tekhné. Vol. 20, Núm 1 (2017):081-089.

CAPÍTULO 2 IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS EN MEZCLAS DE SUELOS

2.1 Variación del comportamiento plástico en mezclas de suelos

Echezuría [1] y Privitera [2] encontraron que la variación del ángulo de fricción de las arcillas depende tanto del IP como del contenido de finos no plásticos. Esto se muestra en la Fig. 2-1. Como se observa en dicha figura, la variación del ángulo de fricción es mucho más amplia que la contenida en la Fig. 2-2 [3]. En la Fig. 2-1 se observa que para un mismo valor del IP hay un amplio rango de valores del ángulo de fricción, el cual está asociado con el contenido de finos no plásticos.

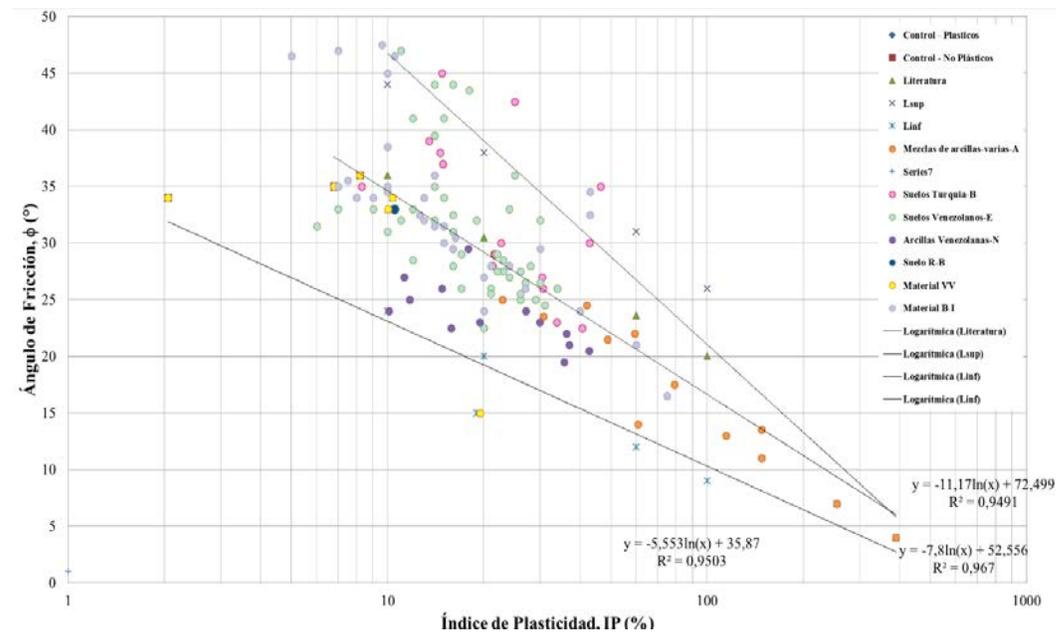


Fig. 2-1 Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico [1 y 2].

Por otra parte, en la Fig. 2-3 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 [4 y 5] y los resultados fueron integrados por el autor. 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 Fig. 2-3 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.

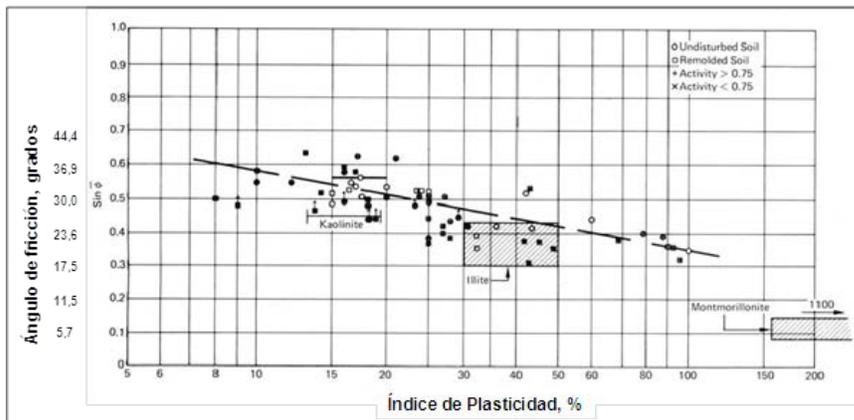


Fig. 2-2 Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con el Índice de Plasticidad modificado de Kenney (1959) y Olson (1974) según los cita Rogers [3].

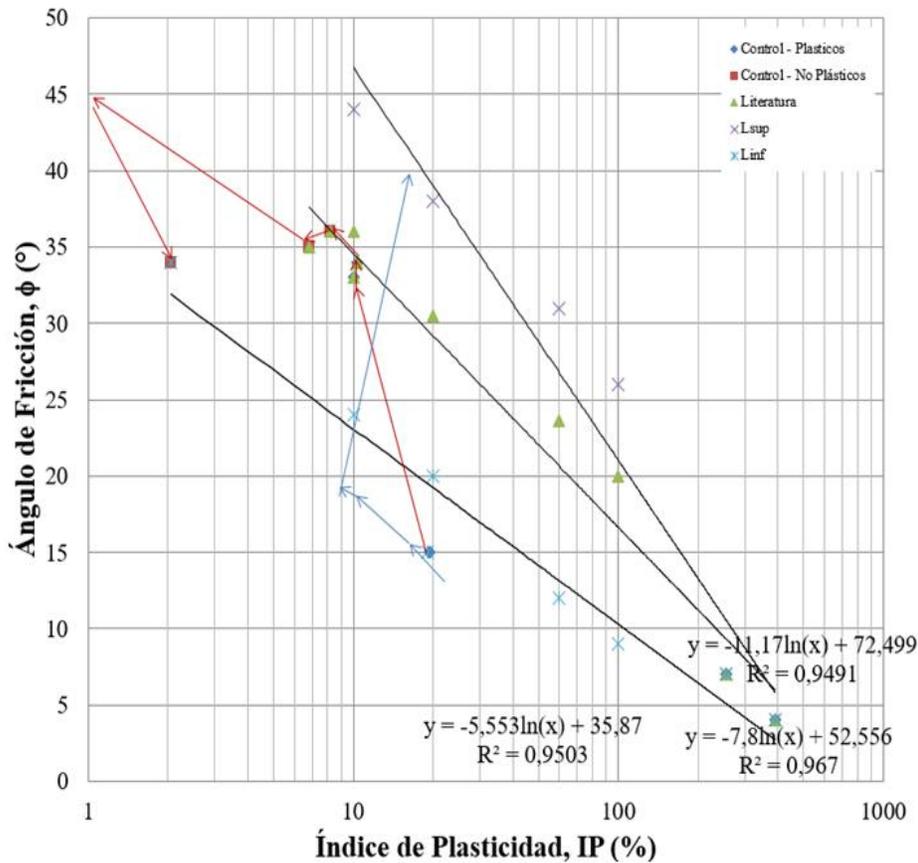


Fig. 2-3 . Correlación entre el ángulo de fricción, ϕ , con la fracción de material no plástico contenida en una matriz de material plástico [1 y 2].

Se observa también en la Fig. 2-3 que 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.

Como se observa en la Fig. 2-3, la respuesta del suelo ante el aumento del contenido de finos no plásticos es la reducción de la plasticidad y el aumento del ángulo de fricción. Dichos cambios dependen no solamente de la fracción de suelo no plástico, sino de la naturaleza (limo o arena) de dicha fracción no plástica.

Otro detalle muy importante observado en la Fig. 2-3 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° . Esos 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.

2.2 La recta $L(Su)$ - $L(\omega)$ y la plasticidad

Las rectas $L(Su)$ - $L(\omega)$ (la “L” es por logaritmo) son el resultado de las pruebas de resistencia al corte, usualmente con veleta de laboratorio, a un suelo con diferentes contenidos de humedad. Esto se ilustra en la Fig. 2-4 [1]. Es claro que existe una correlación lineal en escala logarítmica entre la resistencia al corte con el contenido de humedad para un mismo suelo. Es evidente, también en la Fig. 2-4, que las rectas de cada suelo son diferentes, tanto en su pendiente como en su posición en el espacio.

Los principales parámetros para los suelos incluidos en la Fig. 2-4 se presentan en la Tabla 3 [1]. Como se observa en la Tabla 2-1, a medida que el valor absoluto de la pendiente de la recta $L(Su)$ - $L(\omega)$ disminuye tanto el IP como el LL aumentan.

También se aprecia en la Tabla 2-1, que la relación entre las resistencias en ambos límites aumenta significativamente a medida que aumenta el valor absoluto, m , de la pendiente de la recta $L(Su)$ - $L(\omega)$. En consecuencia, es de esperar entonces que el valor absoluto de la pendiente, m , esté controlado por la fracción no plástica y por el tamaño de las placas de arcilla. Esto también se aprecia claramente para los otros suelos incluidos en la Fig. 2-4 ya que las pendientes de las rectas son mayores para los limos y las arcillas de baja plasticidad, mientras que para las arcillas de alta plasticidad con LL alto los mismos tienden a disminuir.

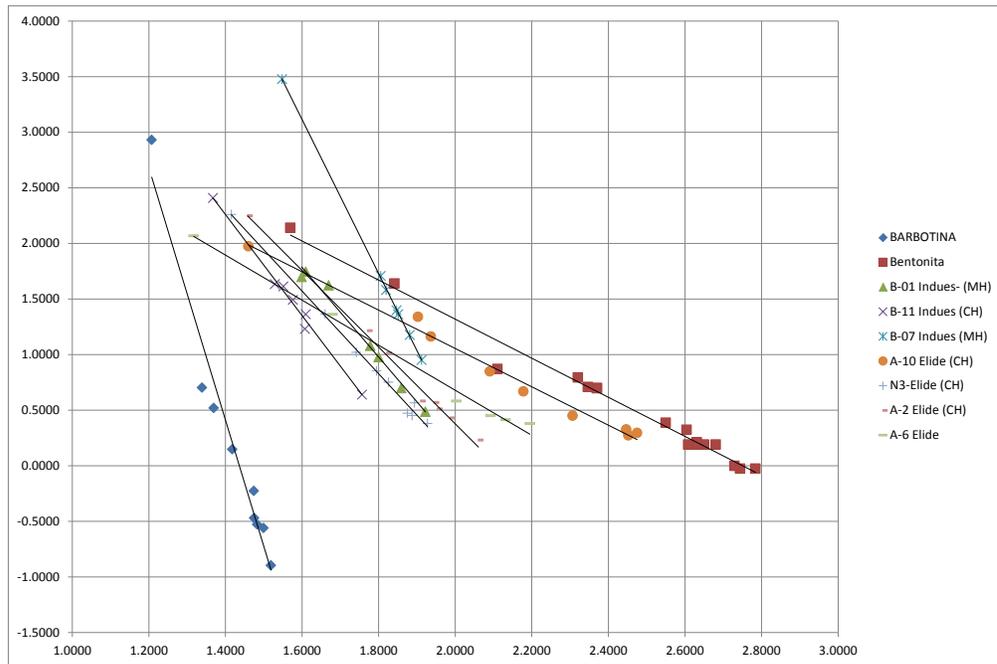


Fig. 2-4. Comparación de las pendientes de varios suelos arcillosos de alta y baja plasticidad y limosos de alta y baja compresibilidad. Modificado de [6].

Tabla 2-1. Parámetros de los suelos incluidos en la Fig. 2-4. Modificado de [6].

SuLP/SuLL	m	Sample No,	Plastic limit		Liquid limit		IP	
			PL (%)	SuLP (kPa)	LL (%)	SuLL (kPa)	LL-LP	Clasif.
63	1,76	BENTONITA	37,1	138	427	1,63	390	CH
55	1,72	A10	28,8	94	283	1,88	254	CH
70	2,0	A6	20,7	121	135	2,59	115	CH
47	3,4	A2	28,7	177	88	3,71	59	CH
25	3,7	N3	26,0	182	62	7,14	36	CH
18	4,0	B-01	40,7	56	84	3,06	43	MH
59	4,5	B-11	23,3	256	57	4,36	34	CL
336	6,9	B-07	35,3	2999	82	8,93	46	CL
202	8,6	BARBOTINA	16,1	853	30	4,23	13	CL

Seguidamente, se estudiará la influencia del contenido de finos no plásticos en la resistencia al corte del suelo remoldeado en condiciones no drenadas. Para ello se analizarán en detalle las rectas $L(Su)-L(\omega)$ de dos suelos, la Barbotina (CL) y la Bentonita (CH), contenidas en la

Fig. 2-4, junto con otros suelos. La composición de estos dos suelos fue realizada con base en un análisis semicuantitativo de roca total el cual se incluye en la Tabla 2-2 [6]:

Tabla 2-2. Resultados de análisis semicuantitativo de roca total en muestras de suelo (%) [6]

SUELO	CUARZO	MIN. ARCILLA	FELDESPATO	CALCITA	DOLOMITA
BARBOTINA	34	48	5	13	TZ
BENTONITA	9	85	6	TZ	TZ

Leyenda: Tz - trazas

Nótese que la Barbotina tiene un 48% de arcilla y un 34% de cuarzo y fragmentos finos de otras rocas (18% entre Feldespato y Calcita). Eso significa que tiene un alto componente de partículas finas de forma no laminar (52%) y 48% de minerales de arcilla. Por otra parte, la Bentonita tiene solamente 15% (6%+9%) de materiales no plásticos y 85% de minerales de arcilla.

Ahora bien, los resultados de la composición de la fracción menor que 2μ para la Barbotina y la Bentonita, incluidos en la Tabla 2-3 [6], abajo, muestran que la Barbotina tiene por encima del 98% de arcilla Ilita, la cual podemos denominar como de placas medianas según se verá más adelante, y menos del 2% de otros minerales desordenados de placas medianas a pequeñas denominadas Alis en dicha tabla. La Bentonita, por otra parte, tiene 100% de minerales de arcilla tipo Smectita, el cual tiende a ser de placas muy pequeñas comparables a la Montmorillonita

Tabla 2-3. Resultados de análisis semicuantitativo de fracción menor que 2μ [6].

SUELO	CAOLINA	ILITA	ALIS	SMECTITA	CLORITA
BARBOTINA	*	> 98	< 2	*	*
BENTONITA	*	*	*	100	*

En la Fig. 2-5 [7] se comparan los tamaños relativos de partículas de Kaolinita e Ilita (izquierda). Nótese que la Ilita tiene aproximadamente un tercio de la longitud de la Kaolinita. A la derecha de la misma figura se compara la Montmorillonita con la Kaolinita,

incluidos los tamaños relativos de sus dobles capas al ser saturadas. Nótese la diferencia en el tamaño relativo de las dobles capas para cada una de esas dos partículas (derecha abajo).

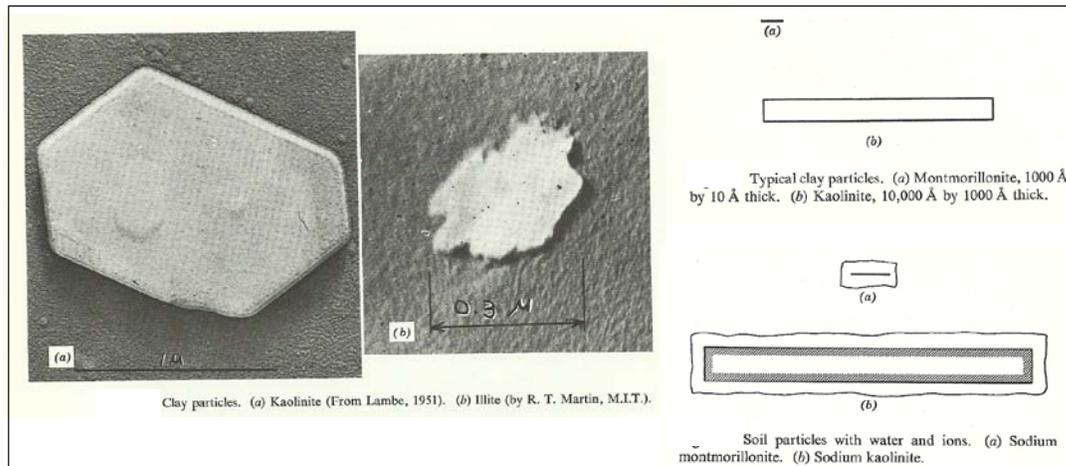


Fig. 2-5 Comparación de los tamaños relativos entre Caolinita, Ilita y Montmorillonita, incluyendo la doble capa al hidratarse. (Tomado de Lambe y Whitman [7])

Es bueno recordar que los minerales de arcilla son planos y con alta carga eléctrica en sus caras lo cual les da propiedades plásticas al contacto con el agua. Los otros materiales finos con tamaños equivalentes pero de forma redondeada y sin suficiente carga en su superficie externa no presentan plasticidad.

Si observamos críticamente las rectas $L(S_u)-L(\omega)$ mostradas la Fig. 2-4 tenemos que el valor absoluto de la pendiente de la Bentonita ($m=1,757$) es casi un orden de magnitud menor que el de la Barbotina ($m=11,348$). Por simple deducción podemos decir con base en la información contenida en las Tablas 2-1 a 2-3 y en la Fig. 2-4 que el valor absoluto de la pendiente de la recta $L(S_u)-L(\omega)$ es baja para suelos con componentes de arcilla más fina como la Smectita y con muy pocos materiales no plásticos (cuarzo y feldespato).

Contrariamente, a medida que el suelo presenta una fracción más alta de materiales no plásticos tipo roca molida sin plasticidad, además de un contenido de arcilla más bajo y de mayor tamaño, el valor absoluto de la pendiente de la recta $L(S_u)-L(\omega)$ aumenta significativamente. En otras palabras, el comportamiento del suelo durante el corte comienza a estar dominado por la fracción granular aunque la arcilla presente le aporte cierta plasticidad.

Lo anterior sugiere la existencia de una interacción importante entre la fracción no plástica del suelo con la fracción de arcilla. Cuando la fracción no plástica es alta y controla el

comportamiento del suelo, dicho suelo presentará un rango plástico bajo, es decir, su Índice de Plasticidad, IP, será pequeño. Si este suelo es sometido a corte a bajas presiones de confinamiento puede presentar un aumento de su volumen (dilatación) con presiones de poros negativas que aumentarían los valores de la resistencia al corte. Contrariamente, si un suelo tiene una fracción no plástica pequeña tendrá un comportamiento dominado por la arcilla con un índice de plasticidad más alto.

En consecuencia, el valor absoluto de la pendiente de la recta $L(S_u)-L(\omega)$ de un material con comportamiento controlado por la fracción no plástica tenderá a ser de alta a muy alta dado que los cambios en la resistencia al corte son muy altos para cambios moderados a bajos de la humedad. Esto explica bastante bien el comportamiento en la Fig. 2-4 de la Barbotina, que tiene un contenido de arcilla de 48% y un alto contenido de material no plástico o roca molida de 52% frente al de la Bentonita que tiene 98% de arcilla y 15% de los otros materiales. Recuérdese que la Barbotina tiene también un LL bajo (30%) y un valor absoluto de la pendiente de la recta $L(S_u)-L(\omega)$ muy alto (11,348). La Bentonita, por otro lado, tiene un LL muy alto (427%) y una pendiente muy baja (1,757).

Para detallar aún más los aspectos relacionados con el cambio de comportamiento de plástico a no plástico, a continuación se presenta el análisis de la arcilla incluida en la Fig. 2-3, en color rojo, a la cual se le incrementó progresivamente el contenido de limo no plástico. Dicho análisis se realiza utilizando las rectas $L(S_u)-L(\omega)$ contenidas en la Fig. 2-6.

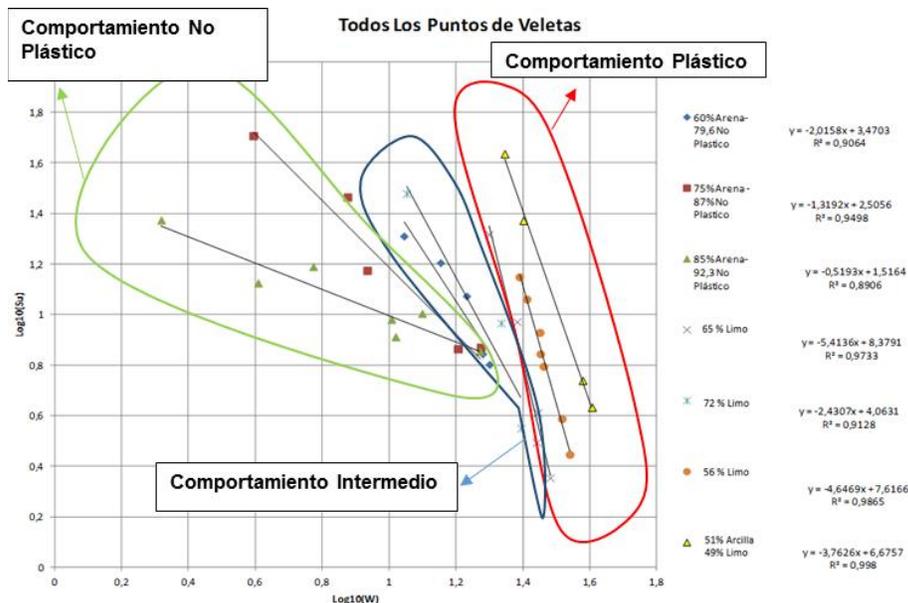


Figura 2-6. Variación del valor absoluto de las pendientes, m , para arcilla con distintas fracciones de materiales no plástico. Modificado de Villa-Vergel [5]

A tal efecto, se resaltan las tres líneas ubicadas más a la derecha en la Fig.2-6, identificadas como de “comportamiento plástico” las cuales tienen contenidos de material no plástico de aproximadamente 49%, 56% y 65% de derecha a izquierda, respectivamente. Tal como se indicó antes, a medida que aumenta el contenido de material no plástico la ubicación en el espacio de las rectas es más a la izquierda que las anteriores y, además, el valor absoluto de su pendiente, m , aumenta ligeramente.

A medida que el contenido de material no plástico sigue aumentando las rectas comienzan a perder inclinación, es decir, baja el valor absoluto de la pendiente y también baja el término independiente de la recta, TI (valor para $S_u=1$ o $L(S_u)=0$). De la misma manera, su ubicación en el espacio sigue desplazándose a la izquierda. Las rectas pasan del rango identificado como de “comportamiento intermedio” al “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. Véase la Fig. 2-6.

El corolario de todo lo anterior es que para un rango plástico dado (IP), debemos esperar que a medida que aumenta la fracción no plástica en el suelo debe aumentar el valor absoluto de la pendiente de la recta $L(S_u)-L(\omega)$ y su posición en el espacio se mueve hacia la izquierda. Contrariamente, mientras mayor sea el contenido de materiales plásticos en el suelo, el valor absoluto de esa pendiente será menor y su posición en el espacio $L(S_u)-L(\omega)$ se moverá hacia la derecha.

2.3 Los límites equivalentes basados en las curvas $L(S_u)-L(\omega)$

Considerando que el valor absoluto de la pendiente, m , de la recta $L(S_u)-L(\omega)$ es proporcional a la plasticidad del suelo, se decidió investigar las posibles correlaciones entre las resistencias al corte en los estados límites de Atterberg con otros valores equivalentes considerando que debe existir proporcionalidad entre los valores de la resistencia al corte con el contenido de humedad del suelo.

Eso con la idea de proponer un método de clasificación de los suelos con base en la resistencia al corte que mantenga la esencia de lo medido convencionalmente hasta ahora con los límites de Atteberg. De esa manera se obtendrían valores similares a los obtenidos con los métodos convencionales de la ASTM [8] pero a partir de parámetros obtenidos con la resistencia al corte del suelo. A tal efecto, en trabajos anteriores se utilizaron datos experimentales de 90 suelos compuestos por 85 suelos venezolanos [6, 9 y 10] y 15 suelos turcos [11].

Primeramente se estudió la 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 $1,5 \text{ kN/m}^2$ y será denominado en lo sucesivo como el Límite Líquido equivalente (LL-equiv). Para ese valor

tan bajo de la resistencia al corte se espera que todos los suelos se comporten como un fluido. La relación entre el LL convencional y el LL-eqv se muestra en la Fig. 2-7 [1].

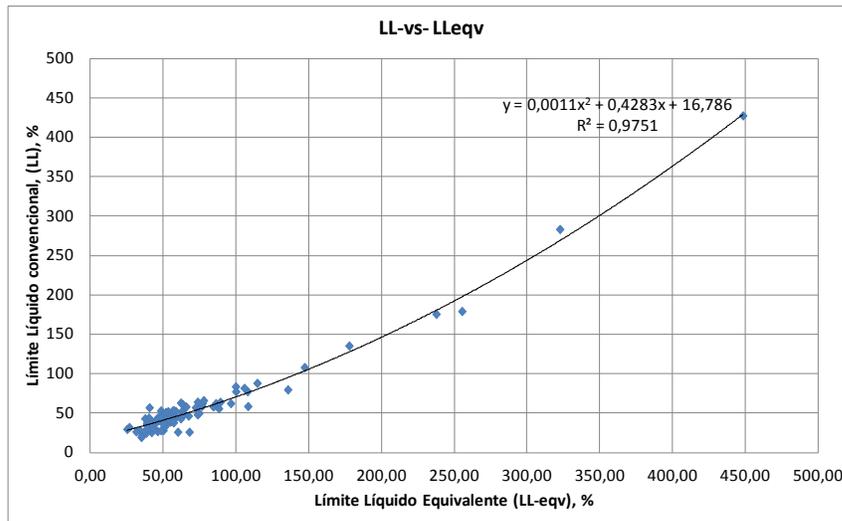


Fig. 2-7. Correlación entre Límite Líquido convencional y el Límite Líquido equivalente definido para la humedad a la cual se obtiene una resistencia al corte de $1,5 \text{ kN/m}^2$. Tomada de [1].

La definición del LL-eqv en la forma antes descrita de alguna manera viene a compensar lo deseado por Casagrande [12] en relación con tener un valor único para la resistencia al corte de 25 gr/cm^2 para el LL, que hoy se sabe que no es posible [13]. Es bueno señalar que la dispersión observada en la Fig. 2-7 se debe a la forma en que se realizan los ensayos de límite líquido, ya que las curvas de resistencia aquí incluidas tienen mínima dispersión pues fueron determinadas por un mismo tipo de veleta.

De la misma manera, se decidió tomar el valor de resistencia al corte de 300 kN/m^2 , como representativo del estado plástico, por lo que será denominado en lo sucesivo como límite plástico equivalente, LP-eqv. La correlación entre el límite plástico convencional y el LPeq se muestra en la Fig. 2-8. Nuevamente, la dispersión en este caso incluye las prácticas para la determinación del límite plástico que son menos cuidadosas que para el límite líquido. Es bueno destacar que, aunque este valor de 300 kN/m^2 y el anterior de $1,5 \text{ kN/m}^2$ parecen totalmente arbitrarios, en realidad, ambos están íntimamente ligados con la plasticidad del suelo a través del valor absoluto de la pendiente, m , de cada suelo, tal como se muestra en las Figs. 2-4 y 2-6.

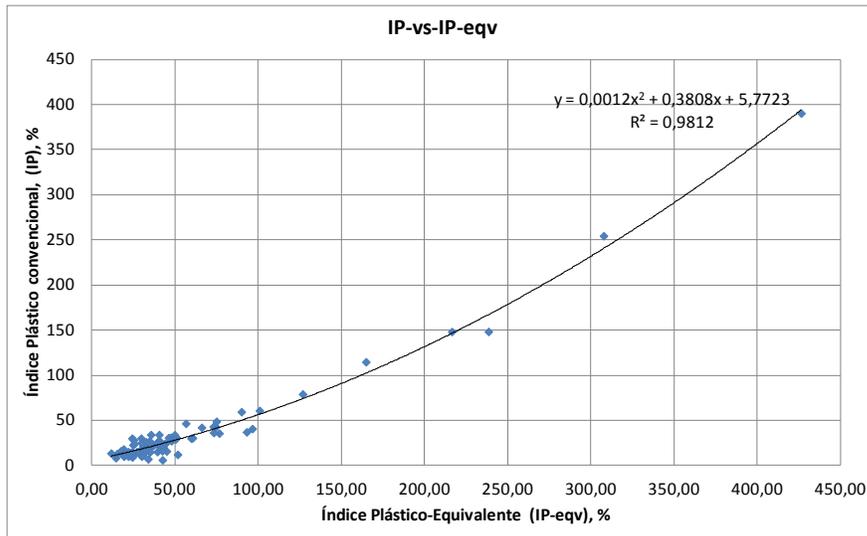


Fig. 2-8. Correlación entre Índice de Plasticidad (IP) y el Índice de Plasticidad equivalente (IP-eqv). Tomada de [1].

De acuerdo con las Figs. 2-4 y 2-6, mientras exista proporcionalidad entre el cambio de resistencia al corte y el cambio de humedad se está midiendo el mismo concepto aunque se utilicen parámetros diferentes. En otras palabras, ambos métodos, el convencional y el propuesto en esta sección con base en los parámetros equivalentes (LL-eqv e IP-eqv), miden el rango plástico del suelo, sólo que de manera distinta!!

Es bueno destacar que los valores del LL-eqv y del LP-eqv obtenidos con los límites equivalentes son independientes del operador y son parámetros muy robustos del suelo. Así, mismo, permiten obtener los valores convencionales de los límites de Atterberg utilizando las correlaciones de las Fig. 2-7 y 2-8, lo cual garantiza que se mantienen todas las correlaciones existentes desarrolladas con la clasificación convencional a pesar de que se obtienen de otra manera.

Ahora bien, otra gran ventaja del nuevo método basado en la resistencia al corte del suelo y con los nuevos límites equivalentes es que se puede preparar un papel log-log con los valores de resistencia al corte de $1,5 \text{ kN/m}^2$ y 300 kN/m^2 ya dibujados en el mismo, tal como se ilustra en la Fig. 2-9, para dibujar en el mismo los valores obtenidos de los ensayos de veleta para determinar los límites de Atterberg lo cual simplifica muchísimo el procedimiento, tal como es explica a continuación.

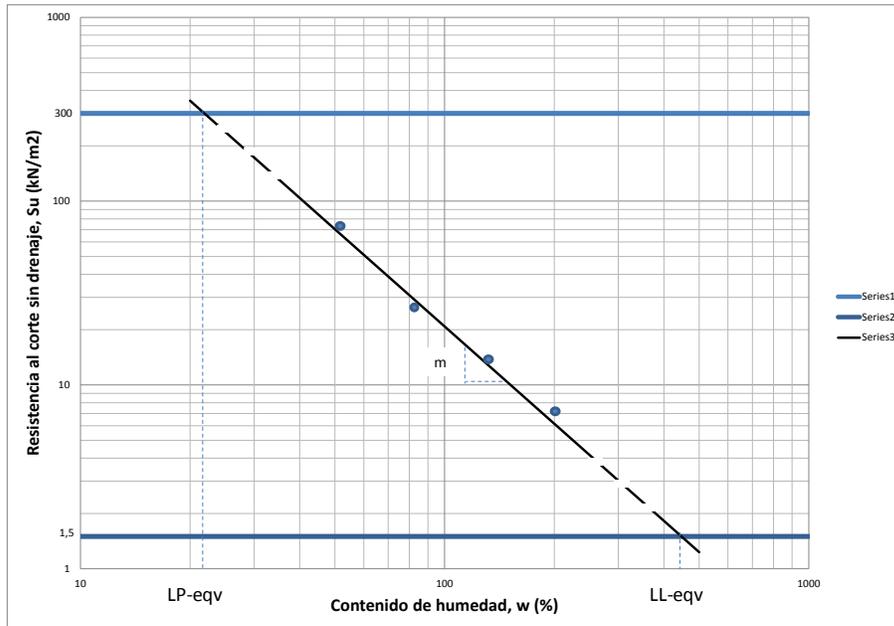


Fig. 2-9. Papel log-log preparado con las resistencias a 300 kN/m^2 y $1,5 \text{ kN/m}^2$ para obtener los límites equivalentes indicativos de la plasticidad del suelo [24].

El procedimiento para determinar los límites Atterberg utilizando los límites equivalentes y las rectas $L(S_u)-L(\omega)$, es de la siguiente manera: a) primero se preparan al mismo tiempo cuatro o cinco muestras de suelo a diferentes contenidos de humedad las cuales se dejan hidratar por 24 horas; b) seguidamente, se determinan las resistencias al corte con la veleta de laboratorio de las cuatro o cinco muestras previamente preparadas con diferentes humedades sin importar los rangos o valores de los mismos; c) los valores de humedad y resistencia al corte obtenidos se dibujan en el papel log-log y se calcula el valor absoluto de la pendiente de la recta $\text{Log}(S_u)-\text{Log}(\omega)$, d) seguidamente, se extiende el trazo de dicha recta para determinar las humedades correspondientes a las resistencias al corte de 300 kN/m^2 y $1,5 \text{ kN/m}^2$, respectivamente, las cuales corresponden a los límites equivalentes.

Nótese que no hay que tener el cuidado de estar ajustando las humedades en el entorno tanto del LL o del LP por ensayo y error tal como se hace en los métodos actuales, los cuales son responsables de mucha de la dispersión de los valores mostrados en las Figs. 2-7 y 2-8.

Como se ha mencionado, las curvas de las Fig. 2-7 y 2-8 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

es más práctico y sencillo de aplicar en el laboratorio y elimina la incertidumbre introducida por el operador y por las prácticas indebidas, sobre todos las relacionadas con el tiempo de hidratación de las arcillas.

2.4 Modificación de la Carta de Plasticidad considerando los límites equivalentes

Debido a que los valores absolutos de la pendiente, m , están estrechamente relacionados con la plasticidad, Echezurúa [14] incluyó dichos valores en la carta de plasticidad del sistema de clasificación unificado de suelos (SCUS), tal como se ilustra en la Fig. 2-10.

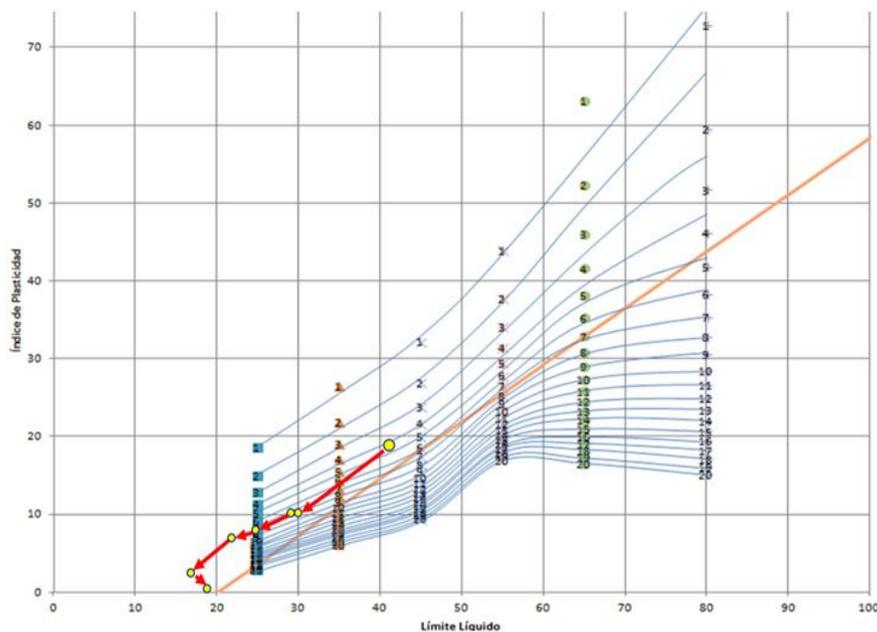


Fig. 2-10 Carta de plasticidad del sistema unificado de clasificación de suelos modificada para incluir los valores absolutos de la pendiente m . Modificado de Echezurúa [14]

No obstante, la clasificación con dicha carta presenta limitaciones al momento de establecer cuándo un suelo está en la zona en la cual cambian sus propiedades de plásticas a no plásticas. Esto se ilustra en la Fig. 2-10 con la trayectoria de los estados límites de las mezclas de suelos resultantes de agregar finos no plásticos a una matriz original cuya trayectoria está marcada en rojo en la Fig. 2-3.

Como se ve, la Fig. 2-10 simplemente muestra que el índice de plasticidad (IP) convencional alcanza un valor que se aproxima progresivamente a cero, lo cual no es necesariamente indicativo de cuando el suelo ha perdido sus propiedades plásticas. Eso se debe a que lo que

generalmente indica esa situación es la dificultad de medir el límite plástico convencional a medida que aumenta el contenido de finos no plásticos. Sin embargo, los valores de la resistencia al corte medidos con la veleta de laboratorio siguen mostrando una recta en el espacio $L(Su)-L(\omega)$, a pesar de no poder medirse el LP convencional, con lo cual se demuestra que el suelo continúa exhibiendo plasticidad.

Considerando lo anterior, Echezuría [1] propuso modificar la carta de plasticidad utilizando los límites equivalentes antes definidos y el valor absoluto de la pendiente, m , la cual se muestra en la Fig. 2-11. En la misma se incluyen los mismos datos de las arcillas mostradas en la Fig. 2-10.

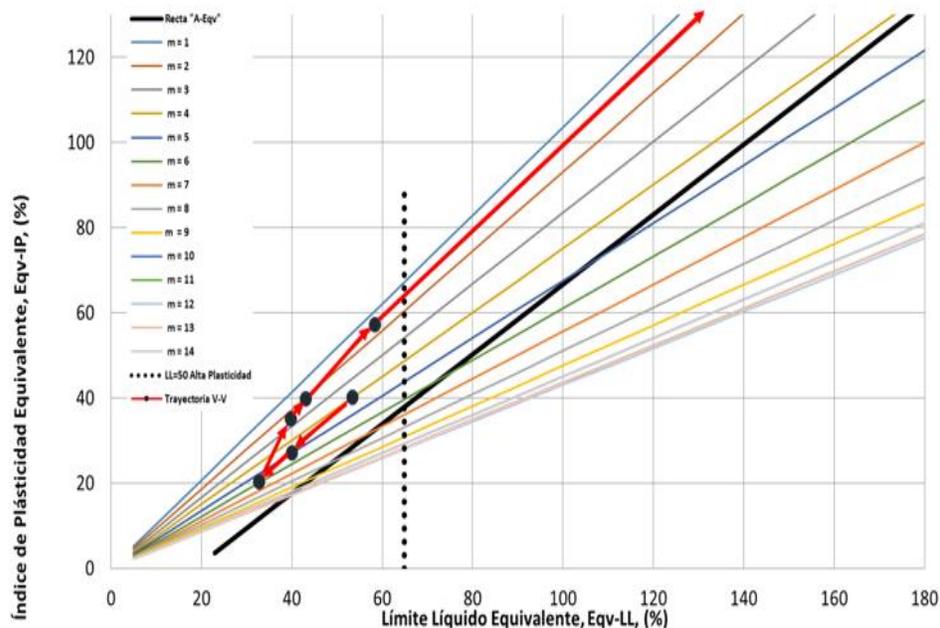


Fig. 2-11. Carta de Plasticidad modificada con parámetros equivalentes que incluye las líneas de igual valor absoluto de la pendiente, m , de la recta $L(Su)-L(\omega)$ para $LL < 50$ ($LL\text{-}eqv < 65$). Se incluye también la recta “A” transformada en negro. Tomada de Echezuría [1].

La carta de plasticidad modificada propuesta basada en los límites equivalentes incluye ambas, la equivalente de la Línea “A” de la carta convencional y el valor del $LL = 50$ ($LL\text{-}eqv = 65$), que define el paso de baja a alta plasticidad convencional. De manera que se mantienen esos criterios tal como fueron desarrollados inicialmente.

Por otro lado, la nueva carta de plasticidad propuesta por Echezuría refleja el rango completo real para el cual el suelo muestra plasticidad, de manera que cuando el suelo pierde la plasticidad, el mismo queda fuera del espacio plástico definido por la misma. Nótese la

diferencia en la trayectoria de plasticidad a medida que aumenta el contenido de material no plástico en la arcilla en las Figs. 2-10 y 2-11. Mientras que en la carta convencional la plasticidad no puede ser evidenciada llegando el IP casi a cero, Fig. 2-10, en la nueva carta de plasticidad con los límites equivalentes, Fig. 2-11, se ve que el IP primero baja pero luego aumenta a medida que se añade más material no plástico al suelo.

Es oportuno señalar que, a partir de las correlaciones de las Fig. 2-7 y 2-8 se pueden colocar doble escalas en los ejes de la nueva carta de plasticidad propuesta, con lo cual también se pueden estimar inmediatamente los valores de los límites de Atterberg convencionales a partir de los límites equivalentes sin tener que recurrir a las Figs. 2-7 y 2-8.

2.6 Cambios en la gravedad específica debidos al 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. 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]:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$$

donde:

W_s , peso de las partículas sólidas

V_s , 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 Gs de la mezcla se verá sesgado hacia el valor del Gs del mineral más abundante.

En la Tabla 2-4 se indican algunos valores típicos de la gravedad específica existentes en la literatura para algunos suelos. Similarmente, en la Tabla 2-5 se incluyen valores promedios para la gravedad específica comúnmente utilizados para los principales minerales de las arcillas.

Tabla 2-4. Valores promedio de gravedad específica para algunos suelos. Modificada de [7].

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 2-5. Valores promedio de gravedad específica en los principales minerales de las arcillas. Modificada de [7].

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

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. Sin embargo, eventualmente se consiguen valores bajos para las arcillas, tal como cualquier rango estadístico para cualquier parámetro. Por ende, los valores extremos tienen una baja probabilidad de ocurrencia. En consecuencia, 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 más adelante.

Por otra parte, en la Tabla 2-6, se presentan los valores promedio de la gravedad específica de mezclas de dos suelos plásticos en distintas proporciones con materiales silíceos con Gs = 2,65. Las gravedades específicas individuales de los suelos plásticos son iguales a 2,75 y 2,85; respectivamente. Se observa también en la Tabla 2-3 que a medida que aumenta el contenido de material con Gs=2,65 se reduce lentamente el Gs de las mezclas para los dos suelos plásticos.

Tabla 2-6. Valores promedio de gravedad específica para mezclas de suelos con distintos Gs. Tomada de [16].

	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

Nótese que cuando el contenido de material no plástico está por encima del 95% la Gs comienza parecerse a la de los suelos granulares (2,65, 2,66). Para valores más bajos del contenido de material no plástico el valor del Gs está por encima de esos valores, indicando la importancia de los materiales plásticos en la mezcla. Véase la Tabla 2-3. 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 no plásticos.

2.6 ¿Cómo identificar materiales controlados por la fracción no plástica?

De acuerdo con las Figs. 2-4, 2-6 y 2-9, los cambios en los parámetros que definen la recta $L(Su)-L(\omega)$, es decir, el término independiente de dicha recta, TI, y el valor absoluto de 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) presentes en el suelo y la gravedad específica resultan fundamentales para identificar cuando ocurren cambios en el comportamiento de plástico a no plástico.

En la Fig. 2-12 se muestra la correlación entre el término independiente, TI, y el valor absoluto de 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 Fig. 2-13.

En las Figs. 2-12 y 2-13 se han destacado con color rojo los valores de las mezclas de suelo obtenidas al variar el contenido de finos no plástico que aparecen en las Figs. 2-3 y 2-6, para los cuales se ha descrito en detalle el proceso de cambio en el comportamiento de plástico a no plástico. Nótese en las Figs. 2-12 y 2-13 que existe 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 $\text{Log}(Su)-\text{Log}(\omega)$ tiene valores por debajo de 4,1 y la pendiente, m está por debajo de 2,4. Véase la Figs. 2-12 y 2-13. Se incluyen también en la Fig. 2-9 los rangos de IP encontrados en este trabajo para identificar los cambios de comportamiento plástico a no plástico de suelos.

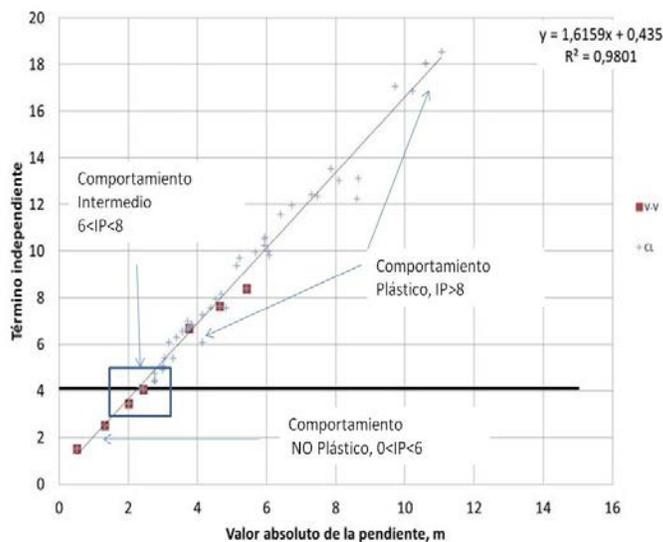


Fig. 2-12 Puntos CL y VV comportamiento T.I vs m , modificado de [1 y 2].

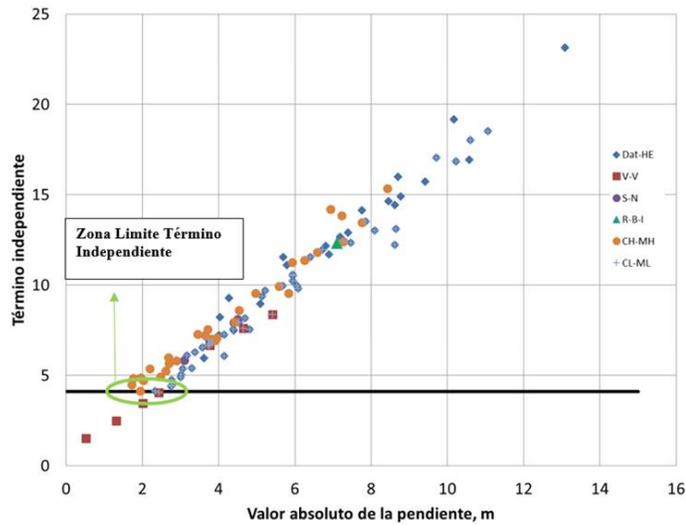


Fig. 2-13 Gráfico aplicable a todos los materiales arcillosos y limosos relativo a los valores umbrales para el cambio de comportamiento plástico a no plástico. Modificado de [1 y 2].

En la Fig. 2-12 se evidencia que las plasticidades mayores que 8 tienen un rango muy amplio de valores de TI y m. Los suelos con IP entre 6 y 8 caen cerca del umbral identificado en este trabajo para definir cuando controla la fase no plástica. Véase la Fig. 2-12. Eso sugiere que al disminuir el IP convencional hay un amplio grupo de suelos con esos valores que no necesariamente indican que los mismos estén perdiendo la plasticidad.

La Fig. 2-14 muestra los cambios en LLeq e IPeq para de las mezclas de suelo obtenidas al variar el contenido de finos no plástico que aparecen en las Figs. 2-3 y 2-6.

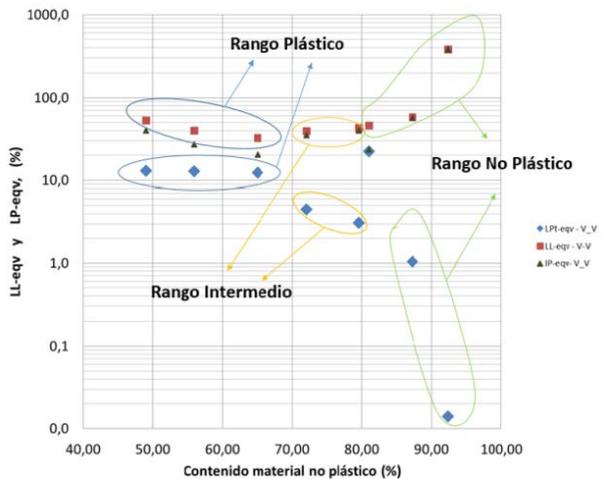


Fig. 2-14 Comportamientos LL-eqv vs Contenido material no plástico y LP-eqv vs Contenido material no plástico. Modificado de [5]

Se evidencia en la Fig. 2-14 que para contenidos de finos no plásticos por encima de aproximadamente 80% el límite líquido equivalente comienza a crecer en forma muy rápida por encima del 40-50% y el límite plástico equivalente a disminuir rápidamente, inclusive a valores por debajo de 1, 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 equivalente.

Como se mencionó antes, los tres rangos de comportamiento identificados en este trabajo 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 $0 < IP < 6$. Véase la Fig. 2-12. Otros autores como Seed, según lo citan Boulanger e Idriss [16] establecen los siguientes valores para la ocurrencia del cambio de comportamiento plástico a no plástico $12 < IP < 20$ y $LL < 35$, tal como se muestra en la Fig. 2-15. Adicionalmente, Boulanger e Idriss [16] recomiendan el rango $7 < IP < 8,3$ para definir los suelos susceptibles a licuar.

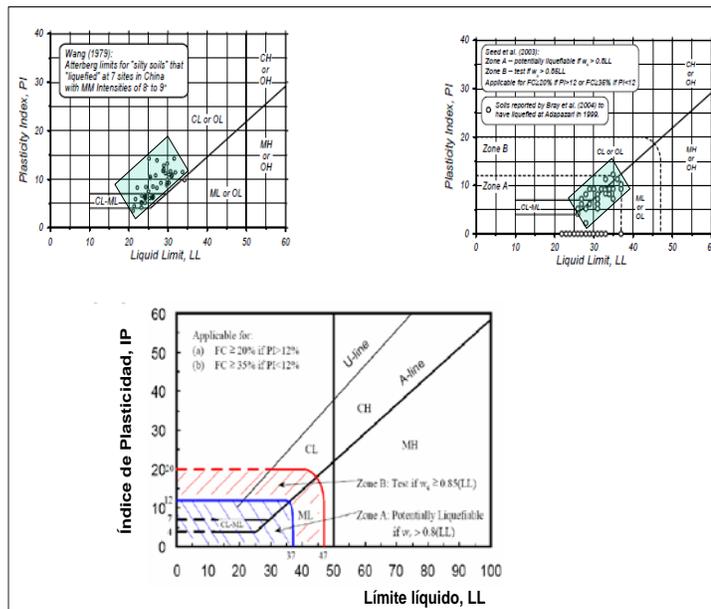


Fig. 2-15. Suelos plásticos licuados durante sismos intensos reportados por Seed y por Wang ambos citados por Boulanger e Idriss [16].

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 Fig. 2-14. 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.

Tal como se mencionó antes, en la Tabla 2-6 se evidencia que para contenidos de finos no plásticos por encima del 80% las Gs están por debajo de 2,67. Por ende, 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 expresados en la Tabla 2-7, los cuales deben darse simultáneamente:

Tabla 2-7 Valores de los parámetros que controlan el cambio de comportamiento plástico a no plástico. Tabla de preparación 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 los criterios de la Tabla 2-7 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 Fig. 2-11, 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.

Ahora bien, los rangos de plasticidad contenidos en el trabajo de Boulanger e Idriss [16] para indicar suelos susceptibles a licuar, de acuerdo con lo mencionado en los párrafos anteriores, no identifican exclusivamente los suelos susceptibles a licuar sino que en el mismo pueden ubicarse otros suelos que no necesariamente tendrán tendencia o susceptibilidad a licuar. Resalta la diferencia entre los valores de IP dados por Boulanger e Idriss [16] en los párrafos anteriores y en la Fig. 2-15 con los contenidos en la Tabla 2-4 de esta sección y en la Fig. 2-12.

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. Si la cantidad de agua disponible no es capaz de saturar el suelo plástico y llevarlo al límite líquido, hay un comportamiento de partículas áridas (no plásticas) con la pasta que forma el suelo plástico. Esto le da propiedades plásticas al movimiento de los granos áridos aunque las fuerzas son transmitidas por el esqueleto del material no plástico. Una vez que el material

plástico entra en el rango líquido, se establece un umbral en el que comienza a haber suficiente agua libre en la mezcla para influir en el comportamiento de las partículas áridas como si las plásticas no estuvieran presentes.

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 pues define el umbral indicado antes cuando las partículas del suelo plástico dejan el agua libre.

Como se demuestra, el cambio de comportamiento plástico a no plástico del suelo es difícil de identificar con los métodos convencionales basados solamente en los límites de Atterberg. Eso es debido a que estos últimos solo miden la cantidad de agua que el mismo puede almacenar sin considerar los cambios en las otras variables, como la gravedad específica y la resistencia al corte como indicativos de la plasticidad real del suelo. En consecuencia, aun cuando el suelo presente plasticidad el método convencional para establecer el límite plástico no es capaz de medirla. Sin embargo, el nuevo método propuesto basado en la resistencia al corte del suelo si define ese cambio en el comportamiento. Lo anterior sugiere que la carta de plasticidad convencional tiene fuertes limitaciones para detectar el cambio de comportamiento plástico a no plástico, mientras que la carta con los límites equivalentes propuesta por Echezuría [1] permite establecer el rango plástico real de los suelos y la Tabla 4 define mejor dicho cambio en comportamiento.

2.7 Aplicación de los criterios para cambio de comportamiento plástico a no plástico a suelos venezolanos

Para probar la eficiencia del método para establecer el cambio de comportamiento plástico a no plástico, 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 [17]. 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 [17]. 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 ensayados se muestra en la Fig. 2-16. 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 Gs según los valores contenidos en la Tabla 2-3.



Fig. 2-16 Pruebas de granulometría por hidrómetro a muestras del oriente venezolano con baja Gs. Tomada de [18].

Por otra parte, el análisis riguroso de la Fig. 2-16 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 (2μ). 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 Gs de estos suelos. Recuérdese que la Gs de la Caolinita está, según los valores de la Tabla 2-2, 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.

Tal como se ha mencionado, 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 del autor 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.

Sobre la base de las ideas expuestas, se establece que la cantidad real de material no plástico presente en las cinco muestras de la formación Mesa estudiadas en esta investigación, es mayor que la determinada con los tamaños de grano convencionales, puesto que no es posible obtener consistentemente gravedades específicas tan bajas para materiales arcillosos distintos de la Caolinita, la cual también está limitada en estos suelos de acuerdo con las difracciones de rayos X.

Los resultados de los ensayos de veletas de laboratorio a las cinco muestras de la Formación Mesa se incluyen en la Fig. 2-17 [18]. 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:

- 1) Una arcilla de baja plasticidad (CL),
- 2) Una arcilla de baja plasticidad arenosa, s(CL),
- 3 y 4) Dos arcillas de alta plasticidad (CH), y
- 5) Una arcilla de alta plasticidad arenosa s(CH).

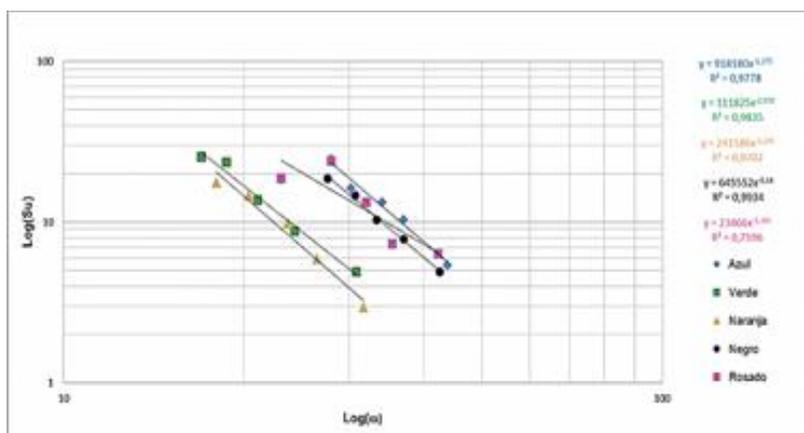


Figura 2-17. Variación del logaritmo de la resistencia al corte no drenado (S_u) con el logaritmo del contenido de humedad (ω) en muestras de arcillas de Anaco. Tomada de [18].

Los valores de los límites equivalentes se incluyen en la Tabla 2-8. Los mismos se muestran en la nueva carta de plasticidad propuesta en este trabajo de investigación en la Fig. 2-18. Similarmente, los valores de los parámetros TI y m se incluyen en la Tabla 2-9.

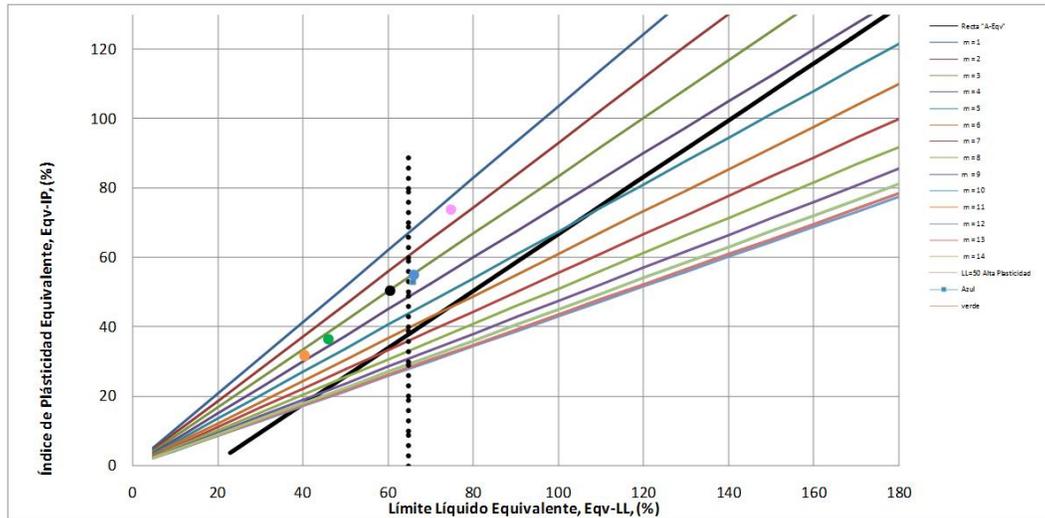


Fig. 2-18. Localización de los valores límites equivalentes de las cinco muestras de suelos de la Formación Mesa ensayados con veleta de laboratorio. Tomada de [18].

Tabla 2-8 Valores de los límites equivalentes de las cinco muestras de suelos de la Formación Mesa ensayados con veleta de laboratorio. Modificada de [18].

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 2-9 Valores de los parámetros TI y m para evaluar comportamiento plástico de los suelos. Modificada de [18].

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

Como se aprecia en la Fig. 2-18, 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 2-9 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 Fig. 2-19 para CH. Las otras muestras CH se incluyen en esa misma figura, mientras que las CL se incluyen en la Fig. 2-20.

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 Fig. 2-16, 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 2-6 que la gravedad específica está entre $2,66 < G_s < 2,67$. Sin embargo, de acuerdo con las Tablas 2-8 y 2-9 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.

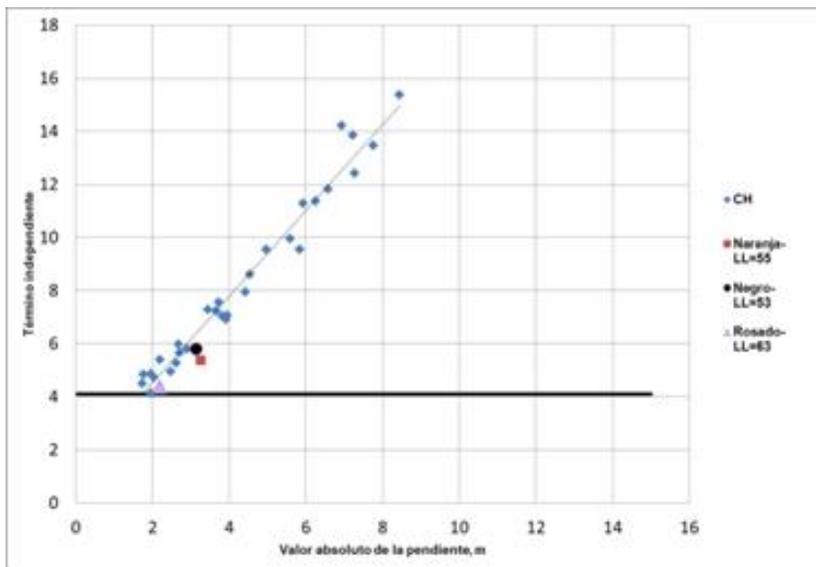


Fig. 2-19. Comportamiento del término independiente (TI) Vs el valor absoluto de la pendiente (m) para los suelos arcillosos de alta plasticidad (CH). Tomada de [18].

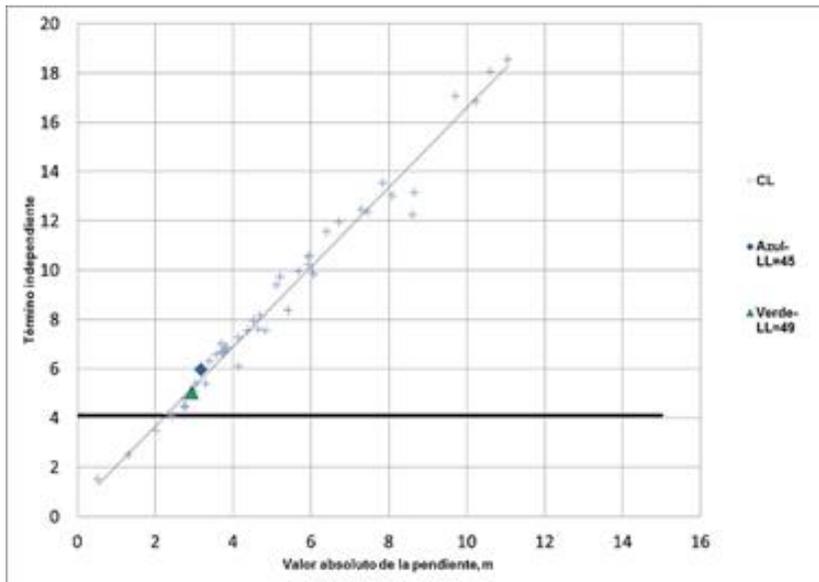


Fig. 2-20. Comportamiento del término independiente (TI) Vs el valor absoluto de la pendiente (m) para los suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). Tomada de [18].

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 Gs, 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 Fig. 2-18 como en la Fig. 2-19. Esta muestra tendrá más tendencia a mostrar un comportamiento no plástico que las otras cuatro.

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 Gs. La mayoría de estos suelos no tendrían alto potencial para presentar comportamiento no plástico. Solo uno de ellos podrían tener comportamiento no plástico en condiciones no drenadas a pesar de mostrar límites de Atterberg y plasticidad.

2.8 Conclusiones del Capítulo 2

Existe una correlación entre la plasticidad del suelo y el valor absoluto de la pendiente de la recta de $L(S_u)-L(\omega)$ en estado remoldeado. De la misma manera, observa que al aumentar la

fracción no plástica contenida en una matriz de suelo plástico cambia el valor absoluto de la pendiente de dicha recta y la posición de la misma en el espacio $L(Su)$ - $L(\omega)$.

Los datos experimentales indican que para un valor cualquiera de LL , el valor absoluto de la pendiente de la recta $L(Su)$ - $L(\omega)$ aumenta drásticamente a medida que disminuye el Índice de Plasticidad. La recta $L(Su)$ - $L(\omega)$ se utilizó como base en la formulación de un método alternativo para clasificar los suelos. El procedimiento propuesto considera dos resistencias al corte para cuyas humedades se definen dos estados de los distintos suelos, tal como fue el espíritu original de Casagrande. Esas resistencias al corte son $1,5 \text{ kN/m}^2$ y 300 kN/m^2 a cuyas humedades los suelos deben estar en el rango líquido y en el rango plástico, respectivamente. De esta manera se obtienen dos nuevos límites denominados límite líquido equivalente y límite plástico equivalente, respectivamente.

La proporcionalidad entre las resistencias al corte y los contenidos de humedades en dichos estados es la misma que para los estados límites convencionales de Atterberg. Dicha proporcionalidad queda demostrada en las correlaciones obtenidas para el límite líquido con el límite líquido equivalente y entre el índice de plasticidad y el índice de plasticidad equivalente.

Se propone una modificación a la carta de plasticidad con los límites equivalentes, la cual contiene el espacio real en el cual el suelo muestra propiedades plásticas, aún en las zonas de transición. Cuando el suelo cambia sus propiedades a no plásticas simplemente no es posible ubicarlo dentro del espacio plástico definido en la nueva carta. Debido a las excelentes correlaciones entre el LL y $LLeq$ y entre el IP y el $IPeq$, es posible colocar doble escala en los ejes de la Carta de Plasticidad modificada propuesta a fin de obtener ambos valores al conocer uno de ellos. De esta manera no se están sustituyendo ni cambiando los límites de Atterberg, sino que se propone una forma alternativa para determinarlos con menos potencialidad de errores por estar basada en la resistencia al corte. Así, se mantienen las correlaciones existentes con los límites de Atterberg.

Para las rectas $L(Su)$ - $L(\omega)$, el valor absoluto de su pendiente, m , correlaciona bien con su término independiente, 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 con relativamente poca dispersión entre ellos. Por esa razón, fue posible colocarlos todos juntos ya que los valores umbrales que definen el cambio de comportamiento plástico a no plástico son los mismos para todos. El valor umbral para el TI es $4,1$ y el de la pendiente, m es 2 . Esto era de esperarse ya que los suelos naturales son mezclas de arcillas, limos y arenas, con lo cual el cambio de plasticidad realmente depende del contenido de material no plástico tal como se demuestra en este trabajo.

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:

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

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, pero su G_s será menor que 2,67. Recuérdese que en general las arcillas con poco material no plástico que caen en esa zona tienen $G_s > 2,67$.

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 plástico 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.

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 de limo no plástico es mayor que la determinada con los tamizados convencionales.

Esa fracción no plástica está entonces constituida por limos cuyos tamaños incursionan en el rango de las arcillas. Así, los 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 todas las mezclas de suelo, debido a la poca influencia de la fracción real de la arcilla presente que le aporta plasticidad.

Finalmente, se verificó que el comportamiento al corte no drenado de esos suelos, representado por la recta de $L(Su)-L(\omega)$, 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.

2.9 Referencias del Capítulo 2

- 1 Echezuría, H., “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 Rogers, David, “Correlations Between Soil Plasticity and Strength Parameters”, Geological Sciences & Engineering GE 441 - Advanced Engineering Geology & Geotechnics, on line courses, spring 2004, Missouri University of Science and Technology.
- 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 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.
- 6 Gabaldón, E. La Resistencia al Corte en los Límites Líquido y Plástico, Trabajo Especial de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Metropolitana, Caracas, Marzo, 1991.
- 7 Lambe T.W., Whitman R.V. Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1969
- 8 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, 2001.
- 9 González, M y Herrera, A, Investigación del comportamiento de algunos suelos venezolanos en estado remoldeado, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Central de Venez., 1987.
- 10 PICÓN, M. y PINEDA, E, Aplicación del ensayo de resistencia al corte no drenada para clasificar suelos en sustitución del método ASTM D4318-00, Trabajo Especial De Grado, UCAB, Nov. 2013.

- 11 Kamil Kayabali and Osman Oguz Tufenkci, “Shear strength of remolded soils at consistency limits”, *Can. Geotech. J.* 47: 259–266, 2010.
- 12 Casagrande, A. “Research on the Atterberg limits of soils”. *Public Roads* 13(3):121–130 (136), 1932.
- 13 Nagaraj; H. B., A. Sridharan and H. M. Mallikarjuna; “Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits”, *Geotechnical & Geological Engineering J.* 30:727–736, 2012
- 14 Echezuría, H., “A new method to classify plastic soils based on remoulded shear strength and water content at fluid state”, *Proceedings of the XVI European Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Edinburg, Scotland, Sept. 13-17, 2015.
- 15 Echezuría, H., “Cambios del comportamiento plástico a no plástico de arcillas y su relación con la gravedad específica”, *Tekhné*. Vol. 22, 2019
- 16 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.
- 17 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.
- 18 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.