



CLASIFICAR SUELOS PLASTICOS CON BASE EN LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO EN ESTADO REMOLDEADO

■ Heriberto Echezuría

email: heriberto.echezuria@yvsite.com

Universidad Católica Andrés Bello

Caracas - Venezuela

Fecha de Recepción: 28 de Septiembre 2013

Fecha de Aceptación: 15 de Febrero de 2014

RESUMEN

Se demuestra que el valor absoluto de la pendiente, m , de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ está íntimamente relacionada con la plasticidad del suelo mientras que la posición de dicha recta en el espacio $\log(S_u)-\log(w)$ está controlada por el contenido de finos no plásticos. Por otra parte, también se establece que para un valor cualquiera del Límite Líquido (LL), el valor de, m , aumenta drásticamente a medida que disminuye el Índice de Plasticidad (IP) mientras que, para un IP cualquiera el valor de, m , aumenta lentamente a medida que aumenta el Límite Líquido. En consecuencia, es posible generar en la Carta de Plasticidad curvas representativas del lugar geométrico de suelos con igual valor de, m . Por otra parte, se establece que el LL está relacionado con el contenido de humedad para la resistencia al corte no drenado del suelo remoldeado de $1,5 \text{ kN/m}^2$. Todos estos hechos

permiten proponer un método alternativo para clasificar los suelos plásticos con base en el lugar geométrico del valor, m , en la carta de plasticidad y la humedad a la cual el suelo tiene una resistencia al corte de $1,5 \text{ kN/m}^2$. Es bueno destacar que la clasificación obtenida con este método es idéntica a la obtenida con los métodos ASTM convencionales para los límites de Atterberg. Finalmente, se demuestra también que, el contenido de finos no plásticos permite correlacionar el valor de, m , con los suelos plásticos potencialmente licuables.

Palabras claves: clasificación de suelos plásticos, carta de plasticidad, resistencia al corte no drenado, suelos en estado remoldeado, carta de plasticidad, límites de Atterberg, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad.

SORT PLASTIC SOILS BASED ON RESISTANCE TO STATE COURT REMOULDED UNDRAINED

ABSTRACT

It was possible to demonstrate that the absolute value of the slope, m , of the line $\log(S_u) - \log(w)$ is intimately related to the plasticity of the soil, whereas, its position in the $\log(S_u) - \log(w)$ space is controlled by the amount of non-plastic fines in the soil. On the other hand, it was also demonstrated that for a given value of the Liquid Limit (LL) the value of, m , increases drastically as the Plasticity Index (PI) decreases, whereas, for a given PI the value of, m , increases slowly as the LL increases. Consequently, it was possible to generate in the Plasticity Chart curves representatives to the locus of soils with identical value of, m . Furthermore, it was also established that the LL is related to the water content of the soil for a undrained remoulded shear strength of 1.5 kN/m^2 . All these facts allowed the formulation of an alternative method to classify plastic soils based on the locus of the value of, m , in the plasticity chart and the water content at a shear strength of 1.5 kN/m^2 of the remoulded soil. It is worth mentioning that the soil classification obtained with this

method is equivalent to that obtained with conventional ASTM methods to determine Atterberg Limits. Finally, it was demonstrated that the non-plastic fines content allows correlating the value of, m , with the liquefaction potential of plastic soils.

Keywords: sorting of plastic soil plasticity chart , shear I not drained soils been remoulding plasticity chart , Atterberg limits , limit liquid limit plastic , plasticity index .

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un método alternativo para clasificar suelos plásticos cuyos resultados son equivalentes a los obtenidos con los métodos convencionales de la ASTM [1] para los límites de Atterberg. El planteamiento de dicho método es el resultado del análisis de la variación de la resistencia al corte no drenado en estado remoldeado de suelos plásticos con el contenido de humedad y su correlación con la Carta de Plasticidad.

El análisis presentado se fundamenta en el hecho de que varios autores [2, 3, 4 y 5] han encontrado en estudios experimentales que al graficar en papel log-log la resistencia al corte del suelo en estado remoldeado, S_u , con el contenido de humedad, w , se obtiene una recta que en lo sucesivo denominaremos la recta $\log(S_u)-\log(w)$ cuya pendiente denominaremos, $-m$. En la Fig. 1 se incluye el resumen del trabajo de Youssef y otros, fide Wroth y Woods [5] donde cada una de las rectas corresponde a una arcilla distinta. Adicionalmente, en esa misma gráfica se incluyen los límites líquidos de cada arcilla, representados por un punto sobre dichas rectas, y un ajuste preliminar entre la resistencia al corte y el contenido de humedad para dichas arcillas. Nótese que la resistencia al corte en el LL disminuye a medida que aumenta el valor de dicho límite.

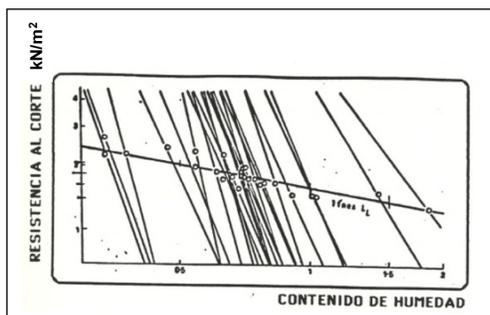


Figura 1. Rectas de $\log(S_u)-\log(w)$ para distintas arcillas

Para lograr obtener valores similares a los obtenidos con los métodos convencionales de la ASTM [1] fue necesario correlacionar los parámetros obtenidos con esos procedimientos con el valor absoluto de la pendiente, m . A tal efecto, en este trabajo se utilizaron datos experimentales de 42 suelos compuestos por 27 suelos venezolanos reportados por Gabaldón [2] y 15 suelos hindúes reportados por Kayabali y Tufenkci [3]. En la Tabla 1 se incluyen los datos de plasticidad y otros detalles que sirven para caracterizar dichos suelos.

A los efectos de ejecutar el análisis indicado en los párrafos anteriores, en este trabajo se realizó un examen detallado de la recta $\log(S_u)-\log(w)$, incluyendo la posición relativa de la misma en los gráficos log-log tal como ilustramos en la Fig.2. En dicha figura se incluyen las rectas $\log(S_u)-\log(w)$ para dos suelos de baja y alta plasticidad denominados Barbotina (CL) y Bentonita (CH), respectivamente. La Bentonita es un material ampliamente utilizado para obras geotécnicas y petroleras, mientras que la Barbotina es una mezcla de suelos comúnmente utilizada en la elaboración de cerámicas en Venezuela. Los límites de Atterberg para ambos suelos son: Barbotina, $LL= 30$, $LP= 14$ y Bentonita, $LL= 427$ y $LP= 390$. Véase la Tabla 1.

Nótese en la Fig.2 la excelente correlación ($R^2>96$) para cada una de las rectas que definen la resistencia al corte con la humedad de ambos suelos, además de la diferencia en las pendientes ($-11,348$ vs $-1,757$). Nótese además la posición de las rectas en el espacio, es decir, la Barbotina está a la izquierda y la Bentonita a la derecha en esa misma figura.

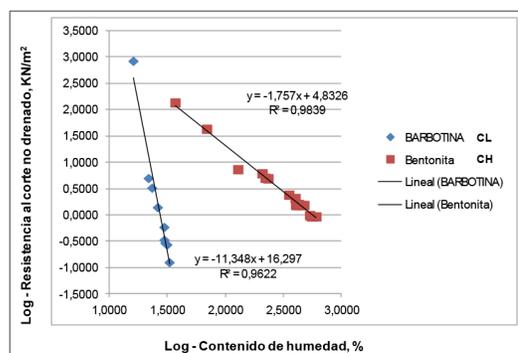


Figura 2. Ejemplos de la variación de la resistencia al corte no drenado de Barbotina (CL) y Bentonita (CH).

En la Fig. 3 se ilustra esquemáticamente la recta $\log(S_u)-\log(w)$, mostrando su relación con los límites de Atterberg y con el índice de plasticidad. Se destaca además en dicha figura el valor absoluto de la pendiente de dicha recta, m . Tal como hemos expresado antes, la resistencia al corte y la humedad cambian en forma exponencial, de allí la conveniencia de utilizar la correlación entre los logaritmos de los valores corresponde a una recta tal como se señala en la Fig.3.

Es oportuno destacar que desde que los límites de consistencia se introdujeron en la Mecánica de Suelos, se ha intentado correlacionarlos con la resistencia al corte no drenado en estado remoldeado del suelo. De hecho, la definición inicial del LL apunta a que cada golpe con el aparato de Casagrande vence la resistencia al corte del

suelo y la adherencia entre el suelo y la copa (la cual es indirectamente función de la resistencia al corte).

De acuerdo con Casagrande [6 y 7], el valor fijo de 25 golpes establecido en el método para determinar el LL equivalía a una resistencia al corte de 25gr/cm². En otras palabras, el LL de un suelo debía corresponder a la humedad a la cual el suelo presentaría una resistencia al corte de 25 gr/cm².

En realidad la resistencia al corte del suelo en los Límites de Atterberg obtenida en la forma en que se realizan los ensayos según la norma ASTM [1] es variable y no es un valor constante ni para el LL ni para el Límite Plástico (LP). Esto se ilustra claramente en la Fig.4 donde se muestran dichos valores para los 42 suelos incluidos en este trabajo. En esa figura se destaca que para valores del LL entre 30 y 85, donde se encuentran la mayoría de los suelos, hay una dispersión importante de la resistencia al corte con el contenido de humedad en el LL. Lo mismo aplica para el LP mostrado en esa misma figura.

Tabla 1 Propiedades y otras características de los 42 suelos utilizados en este estudio ordenados por su Índice de Plasticidad.

m	Muestra No.	PL(%)	SuLP(kPa)	LL(%)	SuLL(kPa)	LL-LP	Clasificación
		Plastic limit		Liquid limit		IP	
1.8	BENTONITA	37	138	427	1.6	390	CH
1.7	A10	29	94	283	1.9	254	CH
2.0	A7	31	98	179	3.4	148	CH
2.2	A8	27	172	176	2.9	148	CH
2.0	A6	21	121	135	2.6	115	CH
2.7	A4	29	117	108	3.5	79	CH
3.4	A2	29	177	88	3.7	59	CH
4.0	B-01	41	56	84	3.1	43	MH
6.9	B-07	35	2999	82	8.9	46	CH
4.3	B-04	39	304	80	14.5	41	MH
1.9	A5	17	60	77	2.7	61	CH
5.7	B-02	47	111	77	6.5	30	MH
10.2	B-08	39	907	64	6.0	25	MH
2.9	A9	15	241	64	3.8	49	CH
5.8	B-03	32	249	62	5.0	31	MH
3.6	A3	20	278	62	3.8	42	CH
3.7	N3	26	182	62	7.1	36	CH
2.7	N2	22	81	59	4.9	37	CH
2.5	N13	15	104	58	3.7	43	CH
4.5	B-11	23	256	57	4.4	34	CL
2.6	N5	20	69	56	4.8	36	CH
3.4	A1	18	117	49	3.9	31	CL
3.2	N12	18	131	48	5.6	30	CL
5.2	B-12	25	257	46	10.4	21	CL
7.3	B-05	24	249	46	1.8	23	CL
5.7	B-10	24	125	46	3.4	22	CL
3.6	N1	18	111	45	3.9	27	CL
6.7	B-13	23	634	45	7.3	22	CL
8.5	B-09	30	156	44	5.3	15	ML
3.7	A11	17	121	40	5.0	23	CL
10.2	B-15.2	23	980	38	5.8	15	CL
8.1	B-06	22	130	37	2.1	15	CL
4.7	N4	19	137	37	6.9	18	CL
3.1	N11	14	85	33	5.6	19	CL
8.6	BARBOTINA	16	853	30	4.2	13	CL
2.3	N10	12	40	28	5.8	16	CL
2.8	N9	12	65	27	6.6	15	CL
8.7	B-14	18	175	26	6.7	8	CL
3.0	N8	11	92	26	6.6	15	CL
3.3	N15	13	49	25	6.5	11	CL
2.8	N6	10	55	21	6.0	12	CL
2.7	N7	9	59	19	7.7	10	CL

Nota: Suelos con identificación "A y N" presentados por Gabaldón [2], suelos identificados con "B" presentados por Kayabali y Tufenkci [3].

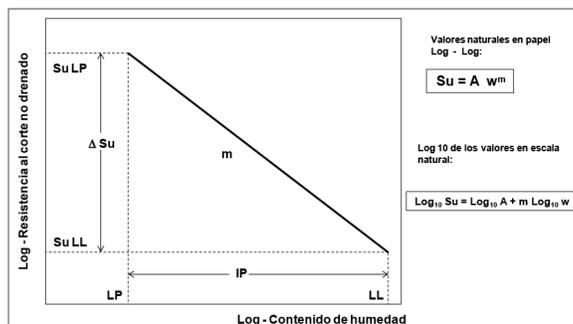


Figura 3. Diagrama esquemático de la recta $\log(Su)\text{-}\log(w)$, mostrando los límites y el índice de plasticidad además del valor absoluto de la pendiente, m .

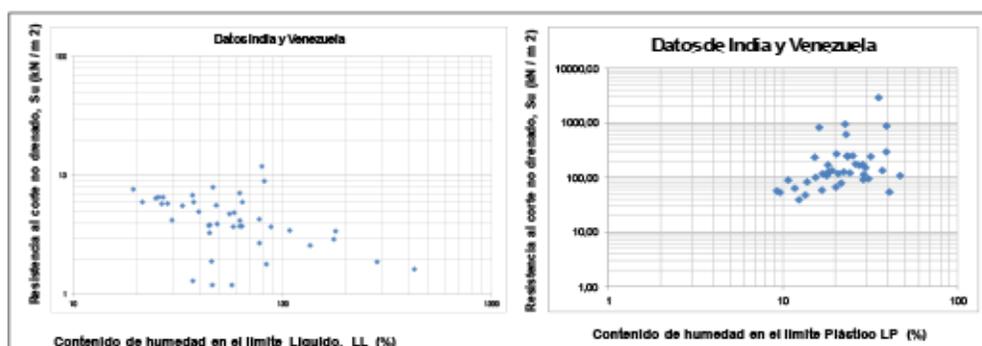


Figura 4. Correlación entre la resistencia al corte y el contenido de humedad para los 42 suelos de Venezuela e India incluidos en este trabajo

En relación con este aspecto, en un reciente trabajo Nagaraj, Sridharan y Mallikarjuna [8] concluyen que no es posible obtener valores únicos para la resistencia al corte en los límites de Atterberg por cuanto variables tales como el contenido de minerales de arcilla además del tipo de aparato utilizado influyen en los mecanismos que controlan la determinación de la resistencia al corte en los límites de Atterberg.

Ahora bien, tal como hemos mencionado antes, el cambio de la resistencia al corte con la humedad sí resulta en una recta al graficar ambos valores en papel log-log, independientemente del método utilizado para obtener la resistencia al corte o del tipo de suelo con tal de que tenga plasticidad. En consecuencia, uno de los objetivos fundamental de este trabajo es caracterizar el comportamiento de los suelos plásticos en estado remoldeado con la carta de plasticidad, por cuanto debe existir una correlación entre el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(Su)\text{-}\log(w)$ y la ubicación de dicha recta en el espacio log-log con la plasticidad del suelo, tal como se aprecia en las Figs. 2 y 3.

2. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO REMOLDEADO CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD

Para este análisis revisaremos, primeramente, la fracción de materiales limosos no plásticos conjuntamente con los minerales de arcilla presentes en el suelo. El análisis que conduciremos se basa mayormente en la inferencia por cuanto contamos con datos experimentales limitados con relación a la naturaleza de los materiales no plásticos en la matriz del suelo y del tamaño de los minerales de arcilla.

En relación con este aspecto, bueno destacar la experiencia personal del autor con materiales que aunque tienen plasticidad y clasifican como CL, muestran ángulos de fricción relativamente altos para una arcilla, $\Phi > 30^\circ$.

Al ensayar dichos materiales en corte triaxial no drenado ($C \square U$) las trayectorias de esfuerzos mostraron patrones muy similares a los de las arenas limosas parcialmente contractivas y dilatantes, de acuerdo con la presión de confinamiento aplicada. En otras palabras, estos materiales

tienen un comportamiento dominado por la fracción no plástica aunque clasifican como arcilla. Por otra parte, al suspenderlos en agua, más del 75-80 % de los mismos sedimentaron dentro de las primeras 6 - 12 horas.

Otras evidencias de la variación en el ángulo de fricción, Φ , con el Índice de Plasticidad se muestran en la Fig. 5 [9]. En la misma se observa que a medida que aumenta el Índice de Plasticidad disminuye el ángulo de fricción. Sin embargo, la dispersión para un Índice de Plasticidad cualquiera es bastante grande. Por ejemplo, tomemos la Kaolinita en la cual se observa que dicho ángulo puede variar entre unos 25° y 38°. Algo parecido podemos decir de la Ilita, cuyo ángulo varía entre 17,5° y 33°.

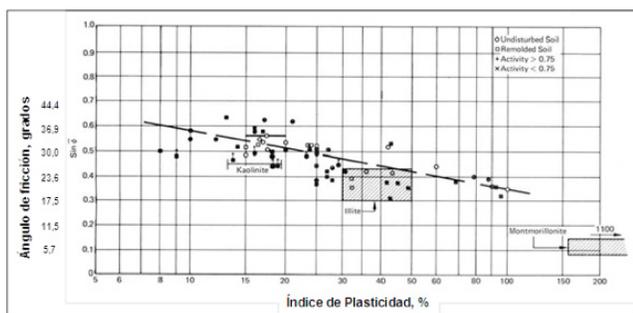


Figura 5. Correlación entre el ángulo de fricción, Φ , con el Índice de Plasticidad modificado de Kenney (1959) y Olson (1974) fide [9]

Es evidente que estas variaciones tan grandes del ángulo de fricción no son debidas al componente de la arcilla exclusivamente, por cuanto las láminas de arcillas tienden a ser bastante uniformes. En consecuencia, el comportamiento de la arcilla pura en contacto con el agua tiene poco margen de variación para el ángulo de fricción. En otras palabras, las variaciones tan grandes en el ángulo de fricción contenidas en la Fig. 5 necesariamente corresponden a mezclas de dichas arcillas con otros componentes de suelos no plásticos cuya influencia se hace sentir en la medida que aumenta el contenido de dichos componentes no plásticos en la matriz de arcilla aumentando el ángulo de fricción.

Seguidamente, analizaremos la influencia del contenido de finos no plásticos en la resistencia al corte del suelo en condiciones no drenadas considerando lo antes comentado con relación con la Fig. 5 y las rectas $\log(S_u) - \log(w)$ de los dos suelos incluidos la Fig. 2, la Barbotina (CL) y la Bentonita (CH). La composición de estos dos suelos fue realizada con base en un análisis semicuantitativo de roca total el cual se indica en la Tabla 2 [2]:

Tabla 2. Resultados de análisis semicuantitativo de roca total en muestras de suelo (%)

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

Legenda: 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 3 [2], abajo, muestran que la Barbotina tiene por encima del 98% de arcilla Ilita, el 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 (Alis). 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 3. Resultados de análisis semicuantitativo de fracción menor que 2μ .

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

En la Fig. 6 [10] 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).

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.

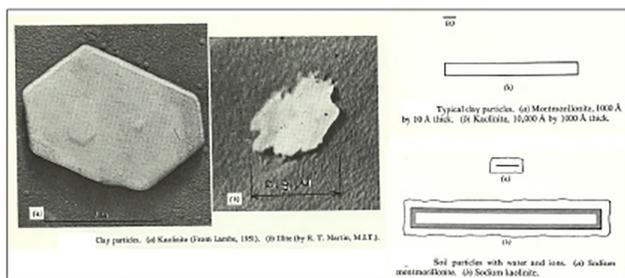


Figura 6. Comparación de los tamaños relativos entre Caolina, Illita y Montmorillonita, incluyendo la doble capa al hidratarse. (Tomado de Lambe y Whitman [10])

Si observamos críticamente las rectas $\log(Su)-\log(w)$ mostradas la Fig.2 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 y 3 y en la Fig.1 que el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ 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 alta de estos últimos materiales, 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 $\log(Su)-\log(w)$ aumenta significativamente. En otras palabras, el comportamiento del suelo en el corte comienza a estar dominado por la fracción granular aunque la arcilla presente le aporta cierta plasticidad. Esto coincide con la experiencia antes descrita del autor.

Lo anterior nos indica que existe una interacción importante entre la fracción no plástica del suelo con la 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. Contrariamente, si un suelo tiene una fracción no plástica pequeña tendrá un comportamiento dominado por la arcilla con un índice de plasticidad relativamente grande. De la misma manera, al ser 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.

En consecuencia, el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ 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 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.

La Barbotina tiene un LL bajo (30%) y una pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ muy alta (-11,348). La Bentonita, por otro lado, tiene un LL muy alto (427%) y una pendiente muy baja (-1,757).

Lo antes indicado con respecto a los valores absolutos de las pendientes de los materiales con distintos contenidos de finos no plásticos se aprecia también en la Fig. 7 donde hemos incluido varios materiales desde arcillas de alta y baja plasticidad hasta limos de alta y baja compresibilidad. Nótese que en la Fig.7 se grafican los logaritmos de los valores en lugar de los valores en log-log, dado que el efecto es el mismo.

Los principales parámetros para los suelos incluidos en la Fig. 7 se presentan en la Tabla 4. Como se observa en la Tabla 4, a medida que el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ disminuye tanto el IP como el LL aumentan.

También se aprecia en la Tabla 4, que la relación entre las resistencias en ambos límites aumenta significativamente a medida que aumenta la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$.

En consecuencia, es de esperar entonces que la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ esté controlada por la fracción no plástica y por el tamaño de las placas de arcilla. Esto también se aprecia claramente en la Fig. 7 y en la Tabla 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 las mismas tienden a disminuir.

Tabla 4. Parámetros de los suelos incluidos en la Fig. 5

SuLP/SuLL	m	Sample No.	Plastic limit		Liquid limit		IP		Casf.
			PL (%)	SuLP (kPa)	LL (%)	SuLL (kPa)	LL-IP		
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	

Figura 7. Comparación de las pendientes de varios suelos arcillosos de alta y baja plasticidad y limosos de alta y baja compresibilidad

El corolario de todo lo anterior es que para un rango plástico dado, debemos esperar que a medida que aumenta la fracción no plástica en el suelo debe aumentar la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$, tal como se esquematiza en la Fig. 8.

De la misma manera, es de esperar que a medida que disminuye el tamaño de la arcilla (aumenta el LL) disminuya el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$.

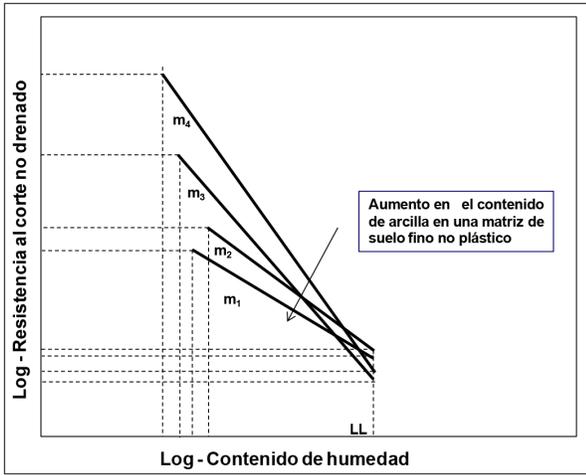


Figura 8. Cambio esperados en la pendiente de las rectas $\log(Su)-\log(w)$ a medida que aumenta el contenido de arcilla en el suelo con una fracción no plástica fija.

Para aplicar estos conceptos a los suelos utilizados en este trabajo definimos la distancia a la recta "A" dada por la carta de plasticidad tal como se indica en la Fig.9. Nótese que al definir la distancia a la recta "A" en esta forma se obtienen valores negativos para los suelos por debajo de la línea "A", es decir los limos.

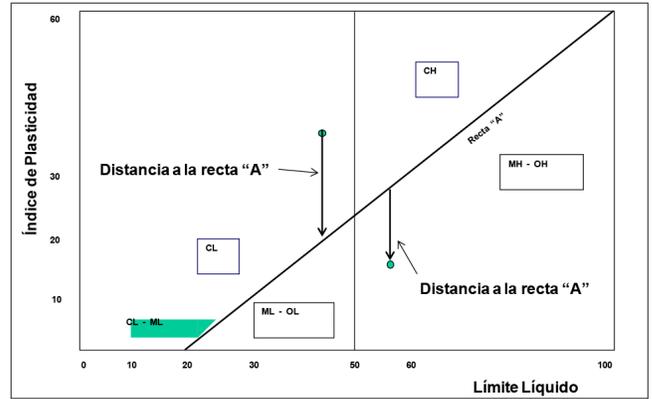


Figura 9. Definición de la distancia a la recta "A" para un LL cualquiera.

En la Fig.10 se incluyen los cambios de pendiente observados para suelos con LL comprendidos entre 100-430, 70-90, 50-70, 40-50, 30-40 y 20-30 respectivamente. Se han utilizado regresiones lineales debido a lo limitado de la cantidad de datos en las distintas categorías. No obstante, es claro en la figura 10 que para todos los rangos de límites líquidos mostrados a medida que aumenta la distancia a la recta "A" disminuye el valor de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$. Esto corrobora que la pendiente aumenta a medida que disminuye el Índice de Plasticidad.

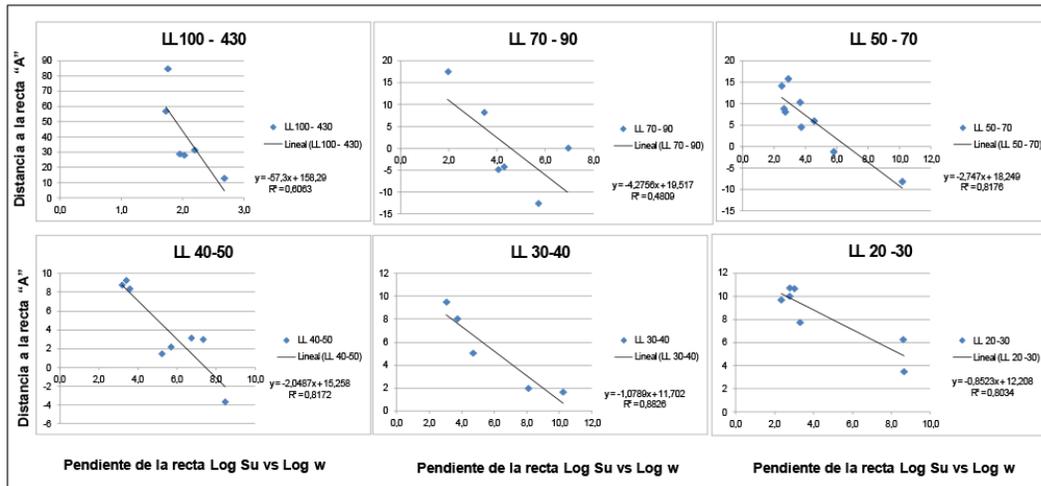


Figura 10. Correlación entre el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ con distancia a la recta "A" para distintos rangos de límite líquidos.

Por otra parte, para evaluar la influencia del tamaño de la arcilla revisamos la intersección de la curva que relaciona las pendientes con la distancia a la recta "A", lo cual equivale a decir que evaluaremos el valor absoluto

de la pendiente de la recta $\log(Su)-\log(w)$ sobre la recta "A" para distintos rangos de límites líquidos.

Para el caso de los suelos estudiados en este trabajo con $LL < 50$ se preparó la Fig.11 en la cual se ilustra en los cuadros azules los valores obtenidos al aplicar las

regresiones de la Fig.10 para el valor medio del LL de cada rango. Como se observa en la Fig.11, los valores absolutos de las pendientes aumentan a medida que disminuye el IP para esos rangos de Límites Líquidos.

El mismo ejercicio se realizó para los $50 < LL < 100$ lo cual se muestra en la Fig. 12, con el mismo resultado para los cuadros azules contentivos de los valores calculados con las regresiones de la Fig.10.

Podemos concluir entonces que existe evidencia experimental que soporta la relación entre la resistencia al corte no drenado para suelos plásticos remoldeados y la plasticidad de los mismos. Esto sirve de base para caracterizar los suelos utilizando esas propiedades junto con la carta de plasticidad, tal como veremos más adelante.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON BASE EN, m , Y LA PLASTICIDAD.

Para caracterizar los suelos con base en el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u) - \log(w)$ y la carta de plasticidad se interpolaron por separado los valores absolutos de las pendientes, m , para los suelos con $LL < 50$ y $50 < LL < 100$. Esto se hizo en las Fig. 11 y 12.

Como se ve en las Figs. 11 y 12, es posible definir curvas que representen el lugar geométrico de los valores absolutos de la pendiente, m , las cuales se abren a medida que aumenta la fracción fina no plástica, es decir a medida que disminuye el Índice de Plasticidad y aumenta el LL. Similarmente, a medida que aumenta el LL las líneas de igual pendiente tienden a ser paralelas a la recta "A" para los valores de IP más altos.

Por otra parte, a medida que el IP disminuye y aumenta el LL las líneas de igual pendiente se curvan a la derecha y hacia abajo. Es decir, para IP altos el comportamiento es controlado por la fracción de arcilla con pendientes bajas mientras que para IP bajos el comportamiento es controlado por la fracción de finos no plásticos. Lo anterior demuestra que el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u) - \log(w)$ está íntimamente relacionada con la plasticidad del suelo, con el tamaño de las partículas de arcilla y con la fracción no plástica en el mismo. Dicha pendiente constituye un parámetro adicional muy útil para complementar la forma en que han sido tradicionalmente caracterizados los suelos con la carta de plasticidad.

Tal como hemos indicado, la limitada información disponible a la fecha puede causar que la posición de las curvas de igual pendiente cambiase ligeramente a

medida que aumente la cantidad de datos disponibles. No obstante, lo importante es que la misma es una información valiosa para complementar la caracterización de los suelos que está en perfecta armonía con la forma tradicional de hacerlo según las normas ASTM y la práctica de la ingeniería en muchos países. Todo esto abre nuevas oportunidades para investigar y comprender mejor el comportamiento en el corte no drenado de los suelos plásticos en estado remoldeado con el contenido de humedad y con la carta de plasticidad.

4. APLICACIONES DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON BASE EN, m .

El código chino ha reconocido desde hace algún tiempo que materiales con $LL < 40$ y con $IP < 20$ han mostrado susceptibilidad a la licuación. Algunos autores como Seed y Wang, fide Boulanger e Idriss [11] han presentado evidencias de licuación en este tipo de materiales, las cuales incluimos en la Fig. 13 y resaltamos en verde, junto con las recomendaciones de Seed para identificarlos.

Al aplicar este rango de suelos licuables a las muestras de suelos utilizadas en este estudio tenemos que en efecto corresponden a suelos con valor absoluto de la pendiente $m \geq 4,69$ los cuales muestran una alta razón de las resistencias al corte en los límites plástico y líquido, $S_{uP}/S_{uLL} > 23$, según se aprecia en la Tabla 5 resaltados en azul. De acuerdo con lo expuesto en la sección anterior, en esta zona de la carta de plasticidad la importancia de la fracción no plástica es fundamental por cuanto la contribución de la arcilla se espera que sea pequeña debido al gran tamaño de las láminas.

De la misma manera, si graficamos los cuadrados verdes que demarcan los materiales plásticos que han experimentado licuación durante sismos en el gráfico de la Fig. 11, lo cual hacemos en la Fig. 14 pero ahora resaltado con un cuadrado rojo, luego de interpolar observamos que los valores absolutos de las pendientes de dichos materiales están por encima de aproximadamente $m=4,7$. En consecuencia, podemos afirmar que la caracterización de los materiales plásticos con bajo LL e IP utilizando el valor absoluto de la pendiente de la curva $\log(S_u) - \log(w)$ resulta de gran utilidad para identificar los suelos plásticos potencialmente licuables.

Nótese que hasta ahora hemos utilizado el LL y el IP determinados mediante ASTM en conjunto con el valor absoluto de la pendiente, m , de la recta $\log(S_u) - \log(w)$ para caracterizar suelos plásticos potencialmente licua-

bles. Sin embargo, otra posible aplicación para estos conceptos sería para la clasificación de los suelos plásticos aprovechando que el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ correlaciona muy bien con la plasticidad del suelo. Véanse las Figs. 11 y 12.

Ahora bien, lograr la clasificación del suelo con este procedimiento no es una tarea fácil por cuanto solamente contamos con el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$. Si se deseara obtener los límites en forma alternativa a la convencional sería necesaria otra correlación adicional bien entre el LL o el IP (obtenidos de la forma convencional) con alguna otra variable fácil de obtener a partir de la recta $\log(S_u)-\log(w)$.

Luego de explorar muchas variables y potenciales combinaciones para una correlación de este tipo, se encontró que la humedad en el LL correlaciona muy bien con la humedad a la cual el suelo tiene una resistencia de $S_u=1,5 \text{ kN/m}^2$, tal como se muestra en la Fig. 15. Este es un valor de la resistencia al corte tomado al azar para el cual se espera que el comportamiento del suelo esté en el rango líquido.

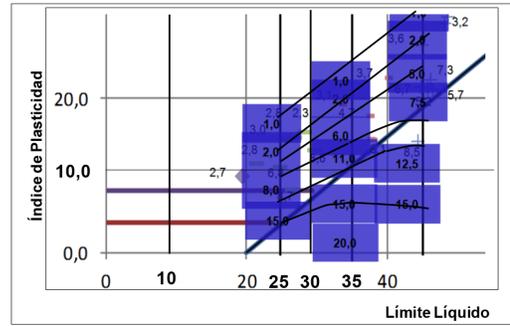


Figura 11. Definición de curvas de igual pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ de acuerdo con la plasticidad para la muestra de suelos estudiados con $LL < 50$.

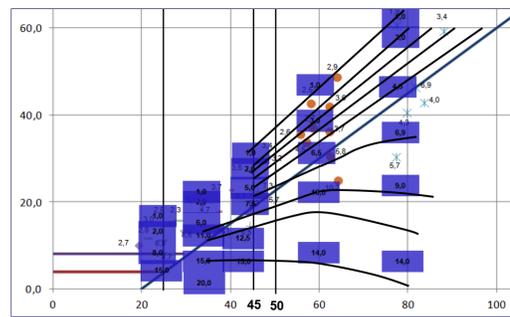


Figura 12. Definición de curvas de igual pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ de acuerdo con la plasticidad para la muestra de suelos estudiados con $LL > 50$.

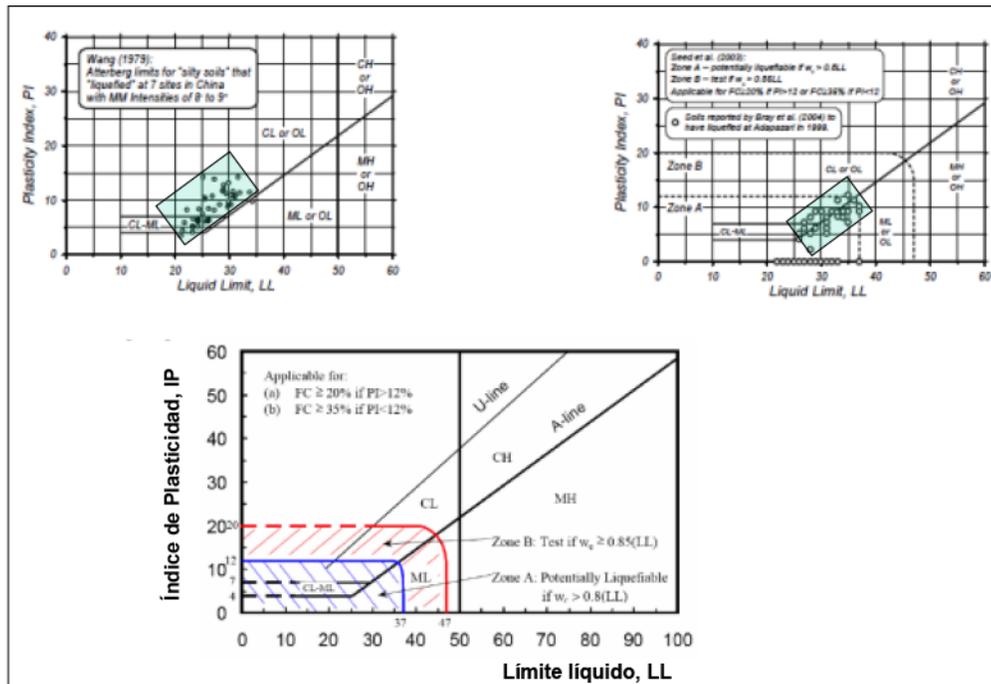


Figura 13. Suelos plásticos licuados durante sismos intensos reportados por Seed y por Wang fide Boulanger [11] y recomendaciones de Seed para caracterizar estos materiales.

Nótese que, aunque los valores de la resistencia al corte no sean constantes para el procedimiento de Casagrande, la humedad obtenida con ese procedimiento (ASTM) respecto a otra humedad dentro del estado "líquido" del suelo, parecen guardar una excelente correlación que luce independiente de las propiedades del suelo, tal como se ve en la Fig. 15. Es oportuno destacar que esta correlación está también relacionada con la posición de la recta en el espacio log-log, la cual depende de la plasticidad del suelo, según habíamos expresado antes.

Considerando estos aspectos puede entonces proponerse un método para clasificar los suelos realizando solamente pruebas de resistencia al corte a varias muestras del suelo a distintas humedades que permita calcular la pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ y el valor de la humedad a la cual el suelo tiene una resistencia al corte de 1,5 kN/m², tal como describimos en la próxima sección de este artículo.

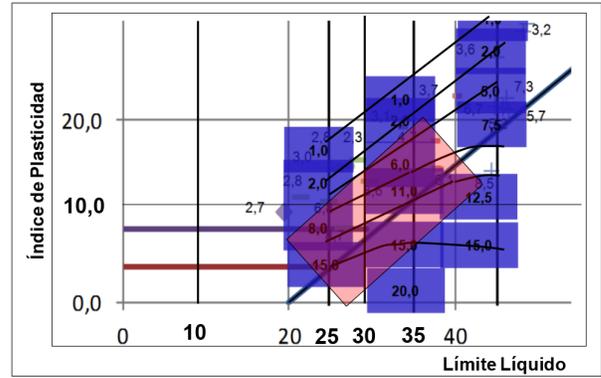


Figura 14. Rango de suelos plásticos licuables estudiados por Seed y Wang, fide Boulager e Idriss [10]. Nótese que las pendientes de las rectas $\log(S_u)-\log(w)$ son mayores que $m=4,69$.

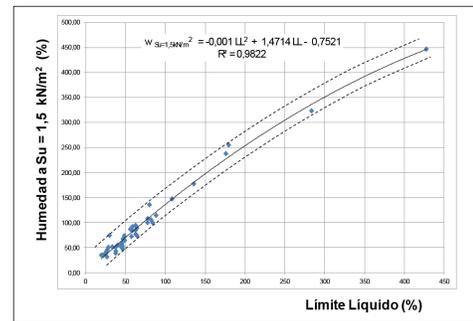


Figura 15. Correlación entre LL y la humedad para una $S_u=1,5$ kN/m². Nótese la excelencia del ajuste por mínimos cuadrados indicada por el factor R^2 .

Tabla 5 Identificación de suelos susceptibles a licuar dentro de la muestra utilizada en este trabajo dados por $m>4,5$; $LL<37$ e $IP<20$.

Pendiente	Muestra No.	PL (%)	LL (%)	LL-IP	Clasific.	Línea "A"	IP-A	SU/PL	SU/LL
m		Plastic limit	Liquid limit	IP		IP			
1,76	BENTONITA	37,1	427,35	390,25	CH	306	85	63	
1,72	A10	28,83	283,2	254,37	CH	197	57	55	
1,95	A7	30,9	179,2	148,3	CH	119,4	29	29	
2,19	A8	27,4	175,6	148,2	CH	117	31	59	
2,02	A6	20,7	135,4	114,7	CH	87	28	70	
2,68	A4	29,0	108,1	79,0	CH	66	13	34	
1,95	A5	16,71	77,47	60,76	CH	43	18	22	
3,45	A2	28,7	88,0	59,4	CH	51	8	47	
2,89	A9	15,2	64,0	48,8	CH	33	16	80	
6,93	B-07	35,3	81,7	46,4	(CH)	46	0	336	
4,03	B-01	40,7	83,6	42,9	MH	48	-5	18	
2,47	N13	15,4	58,1	42,7	CH	29	14	43	
3,65	A3	20,3	62,3	42,0	CH	32	10	78	
4,27	B-04	39,1	79,7	40,6	MH	45	-4	21	
2,70	N2	21,6	58,6	37,0	CH	29	8	13	
3,72	N3	26,0	62,3	36,3	CH	32	5	25	
2,61	N5	20,1	55,7	35,6	CH	27	9	14	
4,54	B-11	23,3	57,1	33,8	CL	28	6	59	
3,39	A1	17,8	48,6	30,8	CL	21	9	30	
5,80	B-03	31,8	62,4	30,6	MH	32	-1	50	
5,69	B-02	46,9	77,3	30,4	MH	43	-13	17	
3,17	N12	18,2	48,1	29,9	CL	21	9	20	
3,57	N1	17,8	44,9	27,1	CL	19	8	27	
10,17	B-08	39,2	64,2	25,0	(ML)	33	-8	151	
3,72	A11	16,8	39,7	22,9	CL	15	8	24	
7,33	B-05	23,5	46,1	22,6	(CL)	20	3	139	
6,73	B-13	23,0	44,7	21,7	(CL)	19	3	87	
5,68	B-10	24,2	45,7	21,5	CL	19	2	37	
5,22	B-12	25,1	46,4	21,3	CL	20	2	25	
3,05	N11	13,7	33,2	19,4	CL	10	10	15	
4,69	N4	19,2	37,1	17,9	CL	13	5	23	
2,33	N10	12,3	28,2	15,8	CL	6	10	7	
2,76	N9	11,7	26,8	15,1	CL	5	10	10	
8,09	B-06	22,3	37,2	14,9	(CL)	13	2	63	
3,01	N8	10,7	25,5	14,8	CL	4	11	13	
10,22	B-15 2	22,7	37,5	14,8	(CL)	13	2	169	
8,46	B-09	29,7	44,3	14,6	(ML)	18	-4	29	
11,35	BARBOTINA	16,1	29,6	13,5	CL	7	6	202	
2,77	N6	9,6	21,3	11,7	CL	1	11	9	
3,30	N15	13,4	24,7	11,3	CL	4	8	7	
2,75	N7	9,2	19,3	10,1	CL	0	10	8	
8,65	B-14	18,1	26,4	8,3	(CL)	5	4	26	

5. MÉTODO PROPUESTO PARA CLASIFICAR SUELOS CON BASE EN LA RECTA $\log(su)\text{-}\log(w)$

El procedimiento para clasificar los suelos con base en la recta $\log(Su)\text{-}\log(w)$ sin tener que realizar los límites en la forma convencional pero obteniendo el mismo resultado consta de cuatro pasos los cuales se explican a continuación y se ilustran gráficamente en la Fig. 16.

Los pasos se describen a continuación:

1. Realizar al menos cinco ensayos de resistencia al corte con veleta cilíndrica de laboratorio en muestras de suelo con diferentes contenidos de humedad, tratando de mantener el rango de humedades tan amplio como sea posible.
2. Calcular el valor absoluto de la pendiente, “m”, de la curva $\log(Su)\text{-}\log(w)$ y establecer la humedad a la cual la resistencia al corte es $Su = 1,5 \text{ kN/m}^2$. Este último valor se identifica con la letra “A” en el paso 2 de la Fig. 16.
3. Con ese valor de la humedad, “A”, se define el LL del suelo, a partir de la Fig. 15, con la cual se obtiene el LL tal como si se hubiese aplicado la norma ASTM. Este LL lo denominamos, “B”, en el paso 3 de la Fig. 16.
4. Conocido el LL del suelo, “B”, y el valor absoluto de la pendiente, m, de la recta $\log(Su)\text{-}\log(w)$ determinada en el paso 1 de la Fig. 16, ubicamos el suelo en la carta de plasticidad interpolando los valores de, m, según se requiera y obtenemos el IP del suelo, el cual denominamos “C”, en el paso 4 de la Fig. 16.

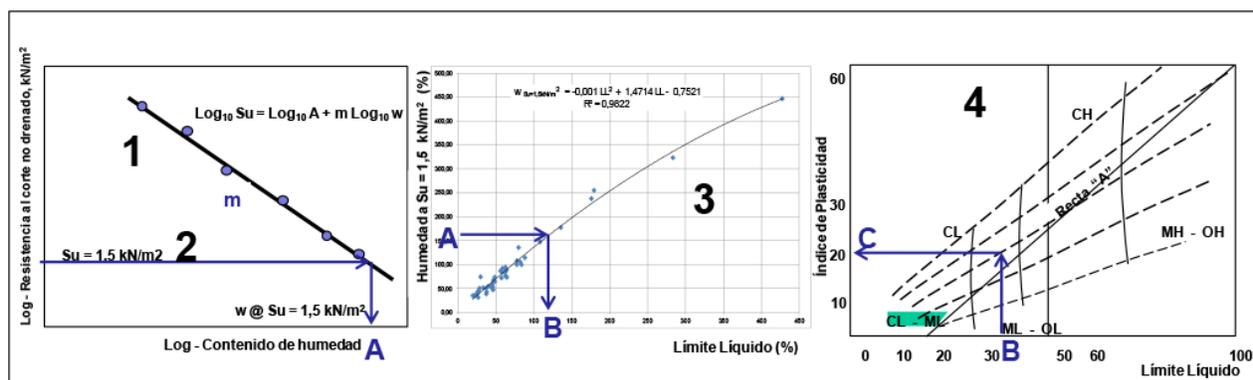


Figura 16. Procedimiento propuesto para clasificar los suelos con base en la recta $\log(Su)\text{-}\log(w)$.

Es muy importante destacar que con el método antes descrito el suelo quedaría clasificado de manera equivalente a la práctica común en la geotecnia y de acuerdo con los procedimientos de la ASTM [1]. Para lograr que este procedimiento sea suficientemente robusto es necesario aumentar la base de datos de la resistencia al corte en estado remoldeado junto con los límites de Atterberg convencionales para ampliar los rangos de la pendiente “m” en todo el espectro de la carta de plasticidad.

Es posible que tanto la curva de la Fig. 15 como las curvas finales de las Figs. 10, 11 y 12 pudiesen requerir ajustes una vez que se cuente con una base de datos mayor producto de la aplicación del método en distintos laboratorios. No obstante, el análisis presentado en este trabajo y las evidencias recopiladas hasta la fecha por el autor permiten inferir los aspectos básicos del comportamiento del suelo de acuerdo con la interacción

de las fracciones arcillosa y no plástica del suelo. De la misma manera, se demuestra que el método propuesto es de gran utilidad para clasificar suelos plásticos para sus distintas aplicaciones y se propone continuar con la investigación en esta dirección.

Finalmente, para que los resultados de resistencia al corte para los distintos contenidos de humedad de cada uno de los suelos utilizados en este estudio puedan ser utilizados por aquellos que comiencen a utilizar este método, incluimos dichos valores en la Tabla 6.

Tabla. 6. Valores de la resistencia al corte con el contenido de humedad para los distintos suelos incluidos en este

	w	Su _{mx}		w	Su _{mx}		w	Su _{mx}		w	Su _{mx}		w	Su _{mx}				
	%	kPa		%	kPa		%	kPa		%	kPa		%	kPa				
A-10	79,9	21,91	BARBOTINA	33,0	0,13	N-13	37,9	12,72	B-04	45,7	122,00	N-04	24,4	58,80				
	86,3	14,56			31,6		0,28			42,7	8,06			52,2	99,00		31,6	10,04
	123,2	7,07			30,4		0,30			46,4	6,08			58,0	83,00		35,6	6,36
	150,7	4,66			29,9		0,34			52,7	3,82			66,3	27,00		42,8	4,81
	202,6	2,83			29,8		0,59			58,6	3,25			74,5	19,00		45,0	2,26
	279,5	2,12			26,2		1,41			61,5	3,11			79,2	14,00		37,1	6,85
	298,4	1,98			23,4		3,31			67,6	2,40						19,2	136,67
	28,8	94,28			21,8		5,05			82,2	2,12							
	283,2	1,88			16,1		853,27			58,1	3,72		B-05	26,2	99,00			
										15,4	103,66				29,5	59,00	N-11	27,9
										31,7	28,00		34,0	4,38				
A-07	68,7	19,65	N-10	25,4	7,70					33,7	15,00		42,4	2,69				
	84,7	12,01			27,3	6,78	A-02	37,4	23,32		35,4	14,00		47,6	2,12			
	137,1	4,10			29,8	5,09			43,9	10,32					33,2	5,58		
	202,1	2,54			33,6	3,39			47,9	7,49					13,7	85,34		
	221,4	1,98			38,4	2,69			57,1	3,82		38,1	6,80					
	179,2	3,41			43,4	2,40			69,0	3,67	B-06	25,8	47,00					
	30,9	97,93			28,2	5,83			61,3	3,53			27,7	23,00	B-15	28,0	89,00	
				12,3	40,21			69,1	2,97		30,5	8,80		30,5		78,00		
							76,1	2,83		31,5	7,20		33,6	14,00				
A-08	55,6	41,84					85,7	2,54		23,0	87,00		35,1	11,00				
	73,3	17,67	N-09	22,5	12,87		58,6	4,89		28,5	23,00		36,2	8,60				
	145,0	3,82			23,7	9,89					23,0	99,00						
	215,9	2,12			28,2	4,52												
	175,6	2,92			30,8	3,67	N-03	45,8	23,18				BENTONITA	608,1	0,94			
	27,4	171,76			37,6	2,54			55,2	10,46	B-07	63,9		51,00		554,4	0,94	
	175,6	2,92			43,1	2,12			66,9	5,65				35,3	2999,03		536,0	1,00
	27,4	171,76			26,8	6,59			78,3	3,68				81,7	8,93		479,1	1,55
				11,7	65,28			77,2	2,83			70,3		25,00		446,6	1,55	
								75,1	2,97			76,1		15,00		429,1	1,55	
								84,6	2,40			66,0		38,00		424,0	1,55	
A-06	47,8	23,04	N-08	16,4	18,90		62,3	7,14		71,0		23,00		406,2	1,55			
	100,7	3,82			5,3	27,55		26,0	181,76				402,2	2,11				
	123,6	2,83			4,1	29,94				B-08	53,0	41,00		354,6	2,44			
	156,6	2,40			2,6	35,14						60,0	11,00		234,6	5,00		
	135,4	2,59			1,5	41,98	N-05	40,5	13,85			55,2	29,00		222,0	5,11		
	20,7	117,01			89,5	10,70			46,9		6,93		63,6	6,80		209,0	6,22	
					6,7	25,51			56,3		3,82		57,3	20,00		128,9	7,44	
A-04	66,2	14,13		89,5	10,70			58,4	3,39						69,4	43,64		
	76,3	8,76						73,8	2,97						37,1	138,03		
	89,7	4,95						55,7	4,77					427,4	1,63			
	119,3	2,54	N-15	23,7	7,92			20,1	68,56	B-09	40,3	15,00						
	141,5	1,84			27,8	3,82						42,7	5,90					
	108,1	3,46			30,5	2,97						37,8	20,00					
	29,0	117,01			35,3	2,26	A-01	35,6	12,86			36,0	32,00	A-11	32,2	11,59		
					24,7	6,46			44,0		4,95		31,5		89,00		34,6	7,63
					13,4	49,14			46,8		4,52						42,3	3,82
									48,4		3,68						49,4	2,26
A-02	59,0	16,40						54,6	2,40	B-10	28,6	57,00			39,7	4,97		
	66,2	10,32	N-06	18,9	9,47			57,8	2,12			33,4	24,00			16,8	120,74	
	81,2	3,82			23,4	4,10			64,0		1,84		29,7		34,00			
	89,9	3,25			25,3	3,39		48,6	3,93			35,6	13,00					
	96,8	2,69			31,5	2,26		17,8	117,00			30,2	31,00	B-14	19,4	83,00		
	115,0	1,70			21,3	6,00										21,3	50,00	
	88,0	3,71			9,6	54,86									24,1	16,60		
	28,7	177,29					N-12	35,2	19,64	B-11	33,8	43,00		18,1	174,91			
								41,3	7,63			23,3	255,86		26,4	6,67		
							55,3	3,11		57,1	4,36		25,3	9,90				
A-05	52,7	6,50	N-07	17,0	11,73		62,1	2,12		35,6	41,00		26,3	5,90				
	59,2	4,52			23,1	3,96		73,8	2,12		37,7	31,00						
	71,3	2,97			30,4	2,40		48,1	5,64		40,7	23,00						
	84,7	2,12			19,3	7,69		18,2	131,22		40,5	17,00	B-03	35,3	144,00			
	106,4	1,56			9,2	58,67									38,2	80,00		
	115,0	1,70												47,8	25,00			
	77,5	2,71																
	16,7	60,24	B-01	39,7	50,00	N-01	27,3	32,93	B-12	30,9	86,00		50,5	15,00				
					46,7		42,00			27,9	26,60		34,3	51,00		52,9	14,00	
					60,0		12,00			29,6	20,07		36,8	37,00		49,7	19,00	
					63,1		9,50			31,8	12,72		38,3	28,00				
A-09	35,2	27,70			72,3		5,00			34,5	8,90		39,6	22,00				
	42,2	11,73								38,6	4,95		41,7	19,00	A-03	31,3	65,44	
	51,9	6,22								42,7	3,39						45,4	12,55
	71,7	2,69	B-02	47,6	95,00		45,8	2,83					48,5	9,61				
	80,5	2,26			49,7	80,00		47,1	2,83	B-13	31,2	80,00		61,3		3,82		
	64,0	3,76			52,9	57,00		53,5	2,61			34,6	43,00			66,0	3,11	
	15,2	241,32			57,3	41,00		59,7	1,70			34,9	37,00			81,2	1,98	
					60,9	27,00		66,3	1,41			39,9	19,00			62,3	7,14	
					63,1	19,00		44,9	3,86			40,3	12,00		20,3	278,13		
					65,1	16,00		17,8	111,07									

Nota de la Tabla 6. Los suelos identificados con "A" y "N" fueron tomados de Gabaldón [1] y aquellos con "B" fueron tomados de Kayabali y Tu-fenkci [2].

6. ASPECTOS RELACIONADOS CON LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE

Antes de describir el método para clasificar los suelos con base en la recta $\log(S_u)-\log(w)$, es necesario dedicar unas notas a la manera que se determina la resistencia al corte en el laboratorio. Lo importante es señalar que existen problemas con los procedimientos para obtener la resistencia al corte del suelo ya que generalmente se utilizan distintos tamaños y geometrías de veleta dependiendo de la resistencia del suelo. Para suelos muy blandos a firmes se utilizan veletas cilíndricas largas y con

aspa grande, mientras que para suelos de muy firmes a duros se utilizan veletas cilíndricas cortas de aspa pequeña o veletas cónicas [12]. Adicionalmente, existen otras geometrías de veletas de uso limitado. Por otra parte, existen otras herramientas para obtener la resistencia al corte del suelo por extrusión a través de orificios [3] o en la falla local como el cono de caída libre. En la Fig. 17 se esquematizan estas herramientas.

En consecuencia, para poder generalizar este procedimiento es conveniente utilizar la misma forma y tipo de veleta u otro mecanismo cuidadosamente para lograr uniformidad en los datos. Los datos utilizados por el autor en este trabajo corresponden a veletas cilíndricas de laboratorio.

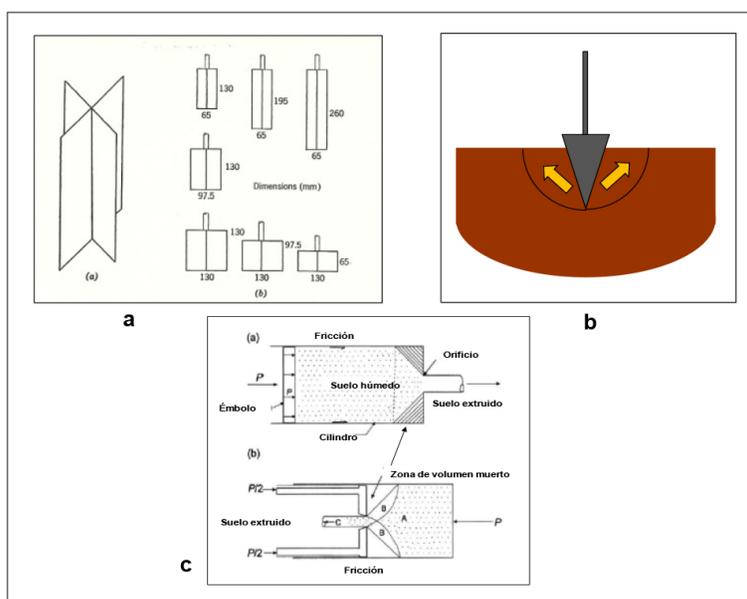


Figura 17. Herramientas para ensayos de resistencia al corte, a) veleta cilíndrica [12], b) cono de caída libre, c) equipos para extrusión del suelo [2].

Para la veleta cilíndrica de laboratorio, Hansbo fide [4] recomienda utilizar ecuaciones del tipo:

$$S_u = M / k(d,h) \quad (1)$$

donde: $k(d,h)$ es una constante que es función de la superficie de falla generada por las aspás de la veleta, es decir, de las dimensiones de la veleta tales como diámetro, d , y altura, h .

Al cambiar la geometría del mecanismo de falla se genera una variación en los valores de la resistencia al corte obtenidos para las mismas humedades. Esto se muestra en la Fig. 18 abajo, en la cual se incluyen resultados de dos tipos distintos de veleta empleados por

Gabaldón [2], Fig. 18a, y Youssef y otros [5], Fig. 18b. La integración de ambos resultados se incluye en la Fig. 18 y 19 y se evidencia que los valores de Youssef están por debajo por un factor de aproximadamente 2,5 de los correspondientes al trabajo de Gabaldón.

De la misma manera, es bueno destacar que aún si se utilizara un mismo tipo o geometría de veleta, García [12] ha encontrado que la resistencia al corte de una arcilla con un contenido de humedad dado cambia dependiendo de la combinación de veleta y resorte utilizados para realizar el ensayo, tal como se ilustra en la Fig. 19.

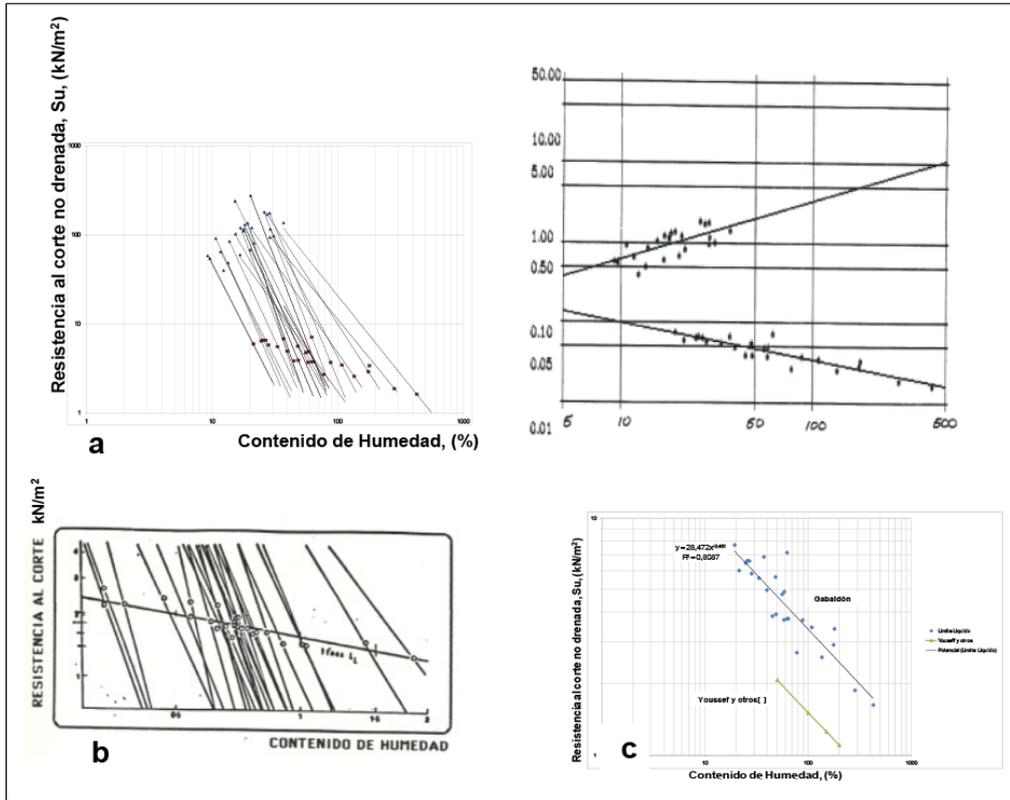


Figura 18. Influencia de la geometría de la veleta en los resultados de resistencia al corte vs humedad para suelos remoldeados, a) rectas con veleta cilíndrica [2], b) veleta plana no cilíndrica [5], c) integración de resultados.

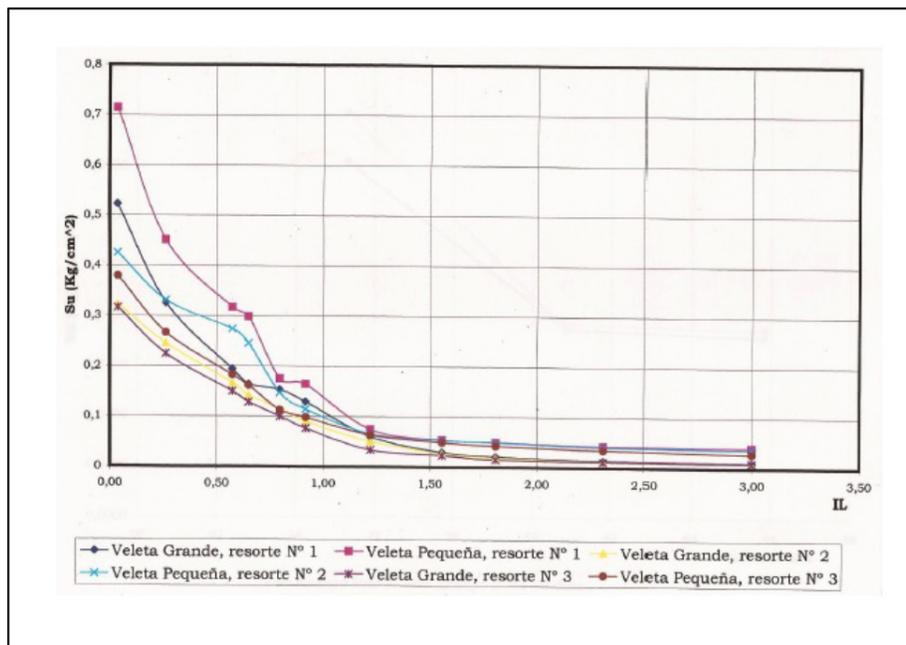


Figura 19. Variación de la resistencia al corte sin drenar vs el índice de liquidez para cada combinación veleta – resorte. Tomada de [12]

Para el caso del cono de caída libre, la forma de la ecuación para obtener la resistencia al corte se indica a continuación [4]:

$$S_u = k(\alpha, f) W / d^2 \quad (2)$$

donde: $k(\alpha, f)$ es una constante que depende de la fricción en la interface suelo-cono, f , y de el ángulo en el ápice del cono, α . W , es el peso del cono y d , es la penetración. Este ensayo es pseudo-estático ya que el procedimiento del ensayo consiste en dejar caer el cono desde una posición en la cual la punta del ápice está en contacto con la muestra para que el cono penetre en el suelo durante la caída libre. La resistencia del suelo es entonces evaluada en función directa del peso del cono e indirecta de la penetración.

En el caso del ensayo de extrusión [3] se coloca una cantidad de suelo a un determinado contenido de humedad el cual es luego forzado a pasar por un orificio de dimensiones dadas. El procedimiento puede ser directo o indirecto, dependiendo si la ubicación del orificio está en el émbolo o en las paredes del recipiente. Véase la Fig. 17c [3].

La ecuación para definir la resistencia al corte con este equipo es la siguiente:

$$S_u = P / k(R) \quad (3)$$

donde: P , es la presión requerida para extruir el suelo y $k(R)$ es una constante que es función de la relación de áreas, $R = A_o / A_f$, con A_o como área del émbolo y A_f como el área del orificio a través del cual el suelo es forzado.

Algo similar a lo antes mencionado con relación a la geometría del elemento con el cual se realizará el corte del suelo aplica al molde donde se colocará al suelo para el ensayo. En particular nos referimos a la influencia en la superficie de falla de las paredes y el fondo del molde donde se debe ejecutar el ensayo. Además de los aspectos antes señalados, habría

Nótese que aunque al utilizar el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ evitamos en teoría muchos de los problemas antes citados por el tipo de ensayo o el mecanismo de falla. No obstante, si se adoptara un método para clasificación de suelos la determinación con base en el valor de la humedad a la resistencia $S_u=1,5 \text{ kN/m}^2$, sí debería atenderse con detalle este tipo de problemas. En consecuencia, es conveniente utilizar el mismo tipo de aparato utilizado en este trabajo es decir, veletas cilíndricas de laboratorio. Adicionalmente es conveniente que una vez seleccionados los aparatos para trabajar no cambiar los mismos para mantener homogeneidad en los valores.

Se demuestra la existencia de una correlación entre la plasticidad del suelo y el valor absoluto de la pendiente de la recta de $\log(S_u)-\log(w)$ en estado remoldeado, la cual sugiere que la fracción no plástica contenida en una matriz de suelo ejerce una influencia muy importante en el valor absoluto de la pendiente de dicha recta.

Los datos experimentales indican que para un valor cualquiera de LL, el valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ aumenta drásticamente a medida que disminuye el Índice de Plasticidad. Contrariamente, para un Índice de Plasticidad cualquiera, a medida que aumenta el LL aumenta lentamente el valor absoluto de la pendiente de dicha recta. En consecuencia, es posible generar curvas que representen el lugar geométrico del valor absoluto de la pendiente de la recta $\log(S_u)-\log(w)$ en la Carta de Plasticidad.

Adicionalmente, los valores absolutos de las pendientes de las rectas $\log(S_u)-\log(w)$ permiten identificar suelos plásticos potencialmente licuables, los cuales parecen tener valores absolutos de las pendientes por encima de 4,69. Esos suelos pueden ser fácilmente identificables con las líneas de igual valor absoluto de pendiente en la Carta de Plasticidad.

La recta $\log(S_u)-\log(w)$ podría utilizarse como método alternativo para clasificar los suelos. El procedimiento propuesto para tal fin consta de cuatro pasos basados además en la correlación entre el LL y la humedad a la cual el suelo tiene una resistencia de $1,5 \text{ kN/m}^2$. Adicionalmente, el método requiere que se utilice un mismo procedimiento para obtener la resistencia al corte para evitar sesgos en la data. Para este trabajo se utilizó la veleta cilíndrica de laboratorio.

Por otra parte, es conveniente aumentar la base de datos entre los valores absolutos de las pendientes de dichas rectas con los límites de Atterberg convencionales a fin de ajustar adecuadamente las posiciones de las correlaciones que sirvieron para realizar este trabajo. No obstante, aunque la información actual es limitada las tendencias observadas son sólidas por lo que se estima que habrá ajustes menores a las correlaciones propuestas en este trabajo..

Una vez asimilado este procedimiento, no habrá necesidad de realizar los ensayos convencionales sino únicamente los de resistencia al corte en muestras con distintas humedades que permitan definir la recta $\log(S_u)-\log(w)$, de acuerdo con el método propuesto. Sin embargo, los valores obtenidos serán equivalentes a haberlos

obtenido con la norma ASTM lo cual es sumamente ventajoso para mantener las correlaciones existentes con esos parámetros de clasificación de los suelos.

corte no Drenada por el Equipo Veleta Miniatura del Laboratorio, Trabajo Especial de Grado, UCAB, Julio 2003.

8. REFERENCIAS

- [1] 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
- [2] Gabaldón, E. *La Resistencia al Corte en los Límites Líquido y Plástico, Trabajo Especial de Grado de Ingeniero Civil, Univ. Metropolitana, Caracas, Marzo, 1991.*
- [3] Kamil Kayabali and Osman Oguz Tufenkci, "Shear strength of remolded soils at consistency limits", *Can. Geotech. J.* 47: 259–266, 2010.
- [4] 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.*
- [5] Wroth, C.P., and Wood, D.M. "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils". *Can Geotech. J.* 15(2): 137–145. doi:10.1139/t78-014, 1978.
- [6] Casagrande, A. "Research on the Atterberg limits of soils". *Public Roads* 13(3):121–130 (136), 1932.
- [7] Casagrande, A. "Notes on the design of the liquid limit device". *Geotechnique* 8(2):84–91, 1958.
- [8] H. B. Nagaraj; A. Sridharan and H. M. Mallikarjuna; "Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits", *Geotechnical & Geological Engineering J.* 30:727–736, 2012
- [9] Missouri University of Science and Technology, *Correlations Between Soil Plasticity and Strength Parameters, Geological Sciences & Engineering GE 441 - Advanced Engineering Geology & Geotechnics*, Prof David Rogers, on line courses, spring 2004.
- [10] Lambe T.W., Whitman R.V. *Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1969*
- [11] 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.*
- [12] García, M. *Efecto del Sistema Resorte Veleta Seleccnada para el Ensayo de Resistencia al*

