



**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“APLICACIÓN DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE NO  
DRENADA PARA CLASIFICAR SUELOS EN SUSTITUCIÓN DEL  
MÉTODO ASTM D4318-00”**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

Presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

Como parte de los requisitos para optar al título de

**INGENIERO CIVIL**

REALIZADO POR

**Picón B, Mariella E.**

**Pineda R, Eduardo A.**

PROFESOR GUÍA

**Ing. Heriberto Echezuría**

FECHA

**Noviembre de 2013**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a Dios por darme fuerzas cuando me sentí vencida, a mi abuelo quien con su amor me ha llenado de vida, mi corazón, mi razón de ser. A Eduardo Pineda, dueño de mis sueños, mis despertares, mi amuleto, mi compañero de vida. A mi madre por su apoyo y optimismo.

**Mariella Eugenia Picón Burelli**

A Dios por darme salud y fortaleza para cumplir esta meta. A mi madre Belkis Rodríguez, que a pesar de todas las dificultades, me apoyó en todo momento, siendo mi guía y mi todo. A mi mejor amiga y compañera de tesis Mariella Picón, que siempre ha estado conmigo en los momentos difíciles, siendo una persona excepcional a la que admiro y amo por ser tan especial. A mi abuela Petrica, que siempre estaba pendiente de mis progresos en el transcurso de la carrera, rezando por mí en todo momento.

**Eduardo Andrés Pineda Rodríguez**

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios, a ti me aferré cuando sentí mi mundo oscurecer, tú me diste fuerzas para seguir adelante con mi vida y me ensañaste que todo lo que pasa te hace crecer.

A mi abuelo, la persona más importante en mi vida, mi padre, mi amigo, la luz de mis ojos. De no ser por ti no sería la mujer que soy hoy. Sin tu apoyo, tus consejos, no habría logrado alcanzar esta meta. Te amo.

A mi abuela, siempre apoyándome y deseando lo mejor.

A mi madre, gracias a ti aprendí que lo que no te destruye te hace más fuerte.

A Belkis Rodríguez, por tu apoyo incondicional, a ese corazón tan grande no te cabe el pecho, siempre poniendo a los demás antes que ti misma. Algo digno de admirar, espero algún día ser tan buena madre como lo eres tú.

A Eduardo Pineda, cada segundo estando a tu lado es un regalo, siempre estás ahí para mí, dándome tu amor. Que afortunada soy de tenerte a mi lado.

A Heriberto Echezuría, el mejor tutor que pueda haber, amante de la investigación, espléndida persona, siempre positivo y optimista. No encuentro las palabras suficientes para agradecer su dedicación y disposición ante todo.

Al señor Eudomar, Pedro, a Carmen, Anthony, Elías, Moisés y al Profesor Pérez Ayala, por su apoyo incondicional; excelentes personas, definitivamente el mejor equipo de trabajo, más que un equipo una familia.

A las empresas AIG Ingeniería Geotécnica C. A y Centeno – Rodríguez & Asociados S.C, por facilitarnos todos los recursos necesarios para desarrollar este trabajo.

A los Ingenieros Álvaro Boiero y Johan Coronado por su total disposición y apoyo.

A la UCAB por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y a mis compañeros Nelson Carreras, Adriana Briceño, Elio Salazar, Jesús Luongo, Cesar Cantillo por su apoyo y amistad.

**Mariella Eugenia Picón Burelli**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios todopoderoso, por concederme los dones para superar los retos que el camino de la vida me he encontrado, en especial, el de ser Ingeniero Civil de la Universidad Católica Andrés Bello.

Agradezco a mi madre Belkis Rodríguez, por ayúdame a lograr esta meta, por su amor y su apoyo incondicional, por creer en mí y darme su confianza. Este logro es de los dos, gracias por la formación que me has dado.

A mi hermana Eliana Parra, que a pesar de la gran distancia que nos separa siempre has estado pendiente, y a la espera de pasar unas vacaciones juntos.

A mi novia Mariella Picón, quien día a día estuvo conmigo, en aquellos momentos difíciles que me hacían pensar en desistir; tú siempre estuviste allí dándome aliento.

Al Ing. Heriberto Echezuría, quien siempre estaba de buen humor y con mente positiva, demostrando lo mucho que le gusta la investigación, el descubrir cosas nuevas. Dispuesto a corregir y concretar resultados, sin su apoyo logístico aún estaría distante el final de esta meta.

A mi abuela Petrica, a mi tío Geronimo y mi tío Leonardo, que siempre estuvieron pendiente brindándome una mano amiga.

Al señor Eudomar y a su hermano Pedro Henrique, por su simpatía y buena voluntad, siempre atentos y pendientes de que no nos faltara nada a la hora de realizar los ensayos.

Al Ing. Álvaro Boiero, el Ing. Johan Coronado y a la empresa AIG Ingeniería Geotécnica C.A, por facilitarnos un considerable número de muestras, y dedicarnos un poco de su tiempo para la búsqueda de las mismas.

A todo el personal del Laboratorio de Suelos de UCAB, el Ing. Pérez Ayala, Carmen Rosales

y Anthony, por su apoyo durante los días de trabajo para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado.

A la UCAB, por bríndame una formación académica de alta calidad, fomentando mi crecimiento profesional.

Finalmente, a Jesús Luongo, Nelson Carreras, Adriana Briceño y Elio Salazar, quienes fueron las personas con las que más compartí los últimos años de mi carrera universitaria. Gracias por brindarme su amistad, los tendré siempre presentes.

A todos Gracias.

**Eduardo Andrés Pineda Rodríguez**



RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE .....	17
RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE EN EL LÍMITE LIQUIDO .....	18
VELETA DE LABORATORIO.....	18
CAPITULO III.....	23
ANTECEDENTE HISTÓRICO.....	23
CAPÍTULO IV.....	27
MARCO METODOLÓGICO .....	27
CAPÍTULO V .....	36
RESULTADOS .....	36
ROBUSTEZ DE LA BASE DE DATOS .....	36
RANGO DE APLICACIÓN DEL ENSAYO DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO A DISTINTAS HUMEDADES .....	37
PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU - LOG W Y VALOR DE LA HUMEDAD A LA CUAL EL SUELO TIENE UNA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO DE 1,5KN/M <sup>2</sup> .....	39
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON BASE A LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W Y LA PLASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL .....	43
AJUSTE DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL LÍMITE LÍQUIDO PARA UNA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO DE 1,5KN/M <sup>2</sup> ANTE EL AUMENTO DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL .....	43
AJUSTE DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W CON DISTANCIA A LA LÍNEA “A” PARA DISTINTOS RANGOS DE LÍMITE LÍQUIDO ANTE EL AUMENTO DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL .....	44
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON BASE AL VALOR ABSOLUTO DE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W Y LA PLASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA BASE DE DATOS AMPLIADA .....	48
CAPITULO VI.....	51
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51

ROBUSTEZ DE LA BASE DE DATOS .....	51
RANGO DE APLICACIÓN DEL ENSAYO DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO A DISTINTAS HUMEDADES .....	51
PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU - LOG W Y VALOR DE LA HUMEDAD A LA CUAL EL SUELO TIENE UNA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO DE 1,5KN/M <sup>2</sup> .....	54
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON BASE A LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W Y LA PLASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL .....	58
AJUSTE DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL LÍMITE LÍQUIDO PARA UNA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO DE 1,5KN/M <sup>2</sup> ANTE EL AUMENTO DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL .....	60
AJUSTE DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W CON DISTANCIA A LA LÍNEA “A” PARA DISTINTOS RANGOS DE LÍMITE LÍQUIDO ANTE EL AUMENTO DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL .....	64
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON BASE AL VALOR ABSOLUTO DE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W Y LA PLASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA BASE DE DATOS AMPLIADA .....	68
CONCLUSIONES .....	71
RECOMENDACIONES .....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76
BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA.....	77
ANEXOS .....	78

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> DEFINICIÓN DE CURVAS DE IGUAL PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU – LOG W DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD PARA LAS MUESTRAS DE SUELOS ESTUDIADAS. ....	3
<b>FIGURA 2.</b> CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA AL CORTE Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD PARA LOS 42 SUELOS DE VENEZUELA E INDIA ESTUDIADOS. ....	5
<b>FIGURA 3.</b> COMPARACIÓN DE LAS PENDIENTES DE VARIOS SUELOS ARCILLOSOS DE ALTA Y BAJA PLASTICIDAD Y LIMOSOS DE ALTA Y BAJA COMPRESIBILIDAD.....	7
<b>FIGURA 4.</b> CORRELACIÓN ENTRE LL Y LA HUMEDAD PARA UNA SU=1,5 KN/M <sup>2</sup> . NÓTESE LA EXCELENCIA DEL AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS INDICADA POR EL FACTOR R <sup>2</sup> .....	8
<b>FIGURA 5.</b> GRÁFICO DE LAS PLASTICIDADES (SEGÚN A. CASAGRANDE).....	11
<b>FIGURA 6.</b> CARTA DE PLASTICIDAD, TAL COMO SE USA ACTUALMENTE.....	13
<b>FIGURA 7.</b> LISTA DE CATIONES EN ORDEN DECRECIENTE DE SU EFECTO BENÉFICO SOBRE LA RESISTENCIA AL CORTE DE UNA ARCILLA. ....	15
<b>FIGURA 8.</b> DIAGRAMA DEL EQUIPO DE VELETA DE CORTE. ....	19
<b>FIGURA 9.</b> VARIACIONES EN LA MOVILIZACIÓN DE LA RESISTENCIA CORTANTE. ....	21
<b>FIGURA 10.</b> PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA CLASIFICAR LOS SUELOS CON BASE EN LA RECTA LOG SU – LOG W .....	28

<b>FIGURA 11.</b> RECIPIENTE.....	30
<b>FIGURA 12.</b> HORNO. ....	30
<b>FIGURA 13.</b> MORTERO CON PILÓN.....	30
<b>FIGURA 14.</b> TAMIZ N° 40.....	30
<b>FIGURA 15.</b> BOWL DE PORCELANA .....	31
<b>FIGURA 16.</b> IRRIGADOR. ....	31
<b>FIGURA 17.</b> CILINDRO GRADUADO .....	31
<b>FIGURA 18.</b> ESPÁTULA. ....	31
<b>FIGURA 19.</b> EQUIPO DE VELETA MINIATURA DE LABORATORIO, RESORTE N° 2, VELETA GRANDE Y VELETA PEQUEÑA. ....	32
<b>FIGURA 20.</b> VASO .....	32
<b>FIGURA 21.</b> RECIPIENTE.....	32
<b>FIGURA 22.</b> BALANZA .....	32
<b>FIGURA 23.</b> DETALLE DEL MONTAJE .....	34
<b>FIGURA 24.</b> DISTRIBUCIÓN DE LA BASE DE DATOS TOTAL. ....	37
<b>FIGURA 25.</b> TENDENCIA LINEAL RESULTANTE DE GRAFICAR EN PAPEL LOGARÍTMICO LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE CON LA HUMEDAD DE LAS 51 MUESTRAS ENSAYADAS. ....	38
<b>FIGURA 26.</b> TENDENCIA LINEAL RESULTANTE DE GRAFICAR EN PAPEL LOGARÍTMICO LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE CON LA HUMEDAD DE LAS 42 MUESTRAS QUE CONSTITUYEN LA BASE DE DATOS ORIGINAL. ....	39
<b>FIGURA 27.</b> CORRELACIÓN ENTRE LÍMITE LÍQUIDO Y LA HUMEDAD PARA UNA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO DE 1,5KN/M <sup>2</sup> DE LA BASE DE DATOS AMPLIADA.....	40

<b>FIGURA 28.</b> ESQUEMATIZACIÓN EN LA CARTA DE PLASTICIDAD A) CAMBIO EN LA PENDIENTE PROMEDIO PARA CADA TIPO DE SUELO FINO. B) CAMBIO EN LA HUMEDAD PROMEDIO PARA CADA TIPO DE SUELO FINO. ....	42
<b>FIGURA 29.</b> COINCIDENCIA ENTRE LOS LÍMITES DE ATTERBERG Y EL MÉTODO PROPUESTO ORIGINAL. ....	43
<b>FIGURA 30.</b> AJUSTE DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL VALOR ABSOLUTO DE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOGSU – LOGW CON DISTANCIA A LA LÍNEA “A” PARA DISTINTOS RANGOS DE LÍMITE LÍQUIDO ANTE EL AUMENTO DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL. ....	45
<b>FIGURA31.</b> DEFINICIÓN DE CURVAS DE IGUAL VALOR ABSOLUTO DE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU-LOG W DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD RECOMENDADA PARA LAS MUESTRAS DE SUELO CON $LL < 50$ . ....	46
<b>FIGURA 32.</b> DEFINICIÓN DE CURVAS DE IGUAL VALOR ABSOLUTO DE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU-LOG W DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD RECOMENDADA PARA LAS MUESTRAS DE SUELO CON $50 < LL < 80$ . ....	47
<b>FIGURA 33.</b> DEFINICIÓN DE CURVAS DE IGUAL VALOR ABSOLUTO DE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU-LOG W DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD RECOMENDADA PARA LAS MUESTRAS DE SUELO CON $80 < LL < 300$ . ....	48
<b>FIGURA 34.</b> COINCIDENCIA ENTRE LOS LÍMITES DE ATTERBERG Y EL MÉTODO PROPUESTO CON LOS AJUSTES REALIZADOS AL SER AMPLIADA LA BASE DE DATOS. ....	49
<b>FIGURA 35.</b> RANGO DE HUMEDAD BAJO OBSERVADO EN MUESTRA E14. ....	52
<b>FIGURA 36.</b> RANGO DE HUMEDAD AMPLIO OBSERVADO EN MUESTRA E4. ....	53
<b>FIGURA 37.</b> EJEMPLOS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA DE LAS MUESTRAS E41 (ML) Y E13 (CH). ....	54
<b>FIGURA 38.</b> UBICACIÓN EN EL ESPACIO DE LAS MUESTRAS E44 Y E7. ....	57
<b>FIGURA 39.</b> UBICACIÓN EN EL ESPACIO DE LAS MUESTRAS E33 Y E5. ....	57

<b>FIGURA 40.</b> CORRELACIÓN ENTRE LA PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU-LOG W CON DISTANCIA A LA RECTA “A” PARA DISTINTOS RANGOS DE LÍMITE LÍQUIDOS.....	59
<b>FIGURA 41.</b> DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TENDENCIA RESPECTO A LA OBTENIDA CON LA BASE DE DATOS ORIGINAL.....	61
<b>FIGURA 42.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA RECTA LOG SU-LOG W INDICANDO LAS RESISTENCIAS AL CORTE DE AMBOS MÉTODOS. ....	63
<b>FIGURA 43.</b> DEFINICIÓN DE CURVAS DE IGUAL PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU- LOG W DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD PARA LA MUESTRA DE SUELOS ESTUDIADOS CON $LL < 50$ .....	66
<b>FIGURA 44.</b> DEFINICIÓN DE CURVAS DE IGUAL PENDIENTE DE LA RECTA LOG SU- LOG W DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD PARA LA MUESTRA DE SUELOS ESTUDIADOS CON $LL > 50$ .....	68
<b>FIGURA 45.</b> MUESTRAS REPORTADAS POR LOS LABORATORIOS QUE NO PRESENTAN COINCIDENCIA CON EL MÉTODO PROPUESTO.....	70

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> PARÁMETROS DE LOS SUELOS INCLUIDOS EN LA <b>FIGURA 3.</b> ....	6
<b>TABLA 2.</b> UNDRAINED SHEAR STRENGTHS (CU) AT LIQUID LIMIT. ....	18
<b>TABLA 3.</b> FACTORES RESORTES. ....	22
<b>TABLA 4.</b> BASE DE DATOS INICIAL. ....	36
<b>TABLA 5.</b> AUMENTO DE LA BASE DE DATOS. ....	36
<b>TABLA 6.</b> VALORES ESTADÍSTICOS DE LA PENDIENTE (M) Y LA HUMEDAD (W, 1,5KN/M <sup>2</sup> ), DE LAS MUESTRAS ARCILLOSAS DE BAJA PLASTICIDAD (CL). ....	40
<b>TABLA 7.</b> VALORES ESTADÍSTICOS DE LA PENDIENTE (M) Y LA HUMEDAD (W, 1,5KN/M <sup>2</sup> ), DE LAS MUESTRAS ARCILLOSAS DE ALTA PLASTICIDAD (CH). ....	41
<b>TABLA 8.</b> VALORES ESTADÍSTICOS DE LA PENDIENTE (M) Y LA HUMEDAD (W, 1,5KN/M <sup>2</sup> ), DE LAS MUESTRAS LIMOSAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD (ML). ....	41
<b>TABLA 9.</b> VALORES ESTADÍSTICOS DE LA PENDIENTE (M) Y LA HUMEDAD (W, 1,5KN/M <sup>2</sup> ), DE LAS MUESTRAS LIMOSAS DE ALTA COMPRESIBILIDAD (MH). ....	41
<b>TABLA 10.</b> VALORES ESTADÍSTICOS DE LÍMITE LÍQUIDO MEDIO, REAL Y PORCENTAJE DE ERROR. ....	50
<b>TABLA 11.</b> VALORES ESTADÍSTICOS DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD MEDIO, REAL Y PORCENTAJE DE ERROR. ....	50
<b>TABLA 12.</b> MUESTRAS UBICADAS EN EL EXTREMO INFERIOR DE LA TENDENCIA CENTRAL. ....	62

## INDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1.</b> VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA EN ESTADO REMOLDEADO CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS 51 MUESTRAS ENSAYADAS CON LA VELETA MINIATURA DE LABORATORIO.....	78
<b>ANEXO 2.</b> PROPIEDADES Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS 93 MUESTRAS ESTUDIADAS ORDENADOS POR EL LÍMITE LÍQUIDO REAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ORIGINAL.....	84
<b>ANEXO 3.</b> PROPIEDADES Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS 93 MUESTRAS ESTUDIADAS ORDENADOS POR EL LÍMITE LÍQUIDO REAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ORIGINAL.....	87
<b>ANEXO 4.</b> PROPIEDADES Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS 93 MUESTRAS ESTUDIADAS ORDENADOS POR EL LÍMITE LÍQUIDO REAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ACTUALIZADO.....	89
<b>ANEXO 5.</b> PROPIEDADES Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS 93 MUESTRAS ESTUDIADAS ORDENADOS POR EL LÍMITE LÍQUIDO REAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ACTUALIZADO.....	92

## **RESUMEN**

Para verificar la aplicabilidad del ensayo de resistencia al corte no drenada en estado remoldado como método alternativo para clasificar suelos finos plásticos, fueron ensayadas 51 muestras de suelos inorgánicos con el equipo de Veleta Miniatura del Laboratorio de la Universidad Católica Andrés Bello. Al ser graficada la variación que presenta la resistencia a 4 o 5 distintas humedades, de cada una de estas muestras, en papel logarítmico, se obtuvo una recta, cuyo valor absoluto de la pendiente muestra relación con su plasticidad. Echezuría, autor de este método, a través de su trabajo argumenta el establecimiento de tendencia que presentan solidez, más sin embargo propone un aumento de la base de datos para estudiar la variabilidad de las mismas. Este Trabajo Especial de Grado buscó alcanzar este objetivo, robusteciendo con estas 51 muestras, el número de datos que soportan el método para analizar su variabilidad; resultando en la obtención de pequeñas variaciones, mayor grado de precisión y facilidad de empleo. Finalmente puede entonces decirse, que la solidez mencionada por Echezuría se encontraba en lo correcto, lo que garantiza su aplicabilidad y da pié a futuros estudios que puedan enriquecer este método.

## INTRODUCCIÓN

Mediante la elaboración del siguiente Trabajo Especial de Grado se examina la aplicabilidad de un método alternativo para clasificar suelos en sustitución del método ASTM D4318-00, correlacionando los límites de consistencia con la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado del suelo, usando la Veleta Miniatura de Laboratorio. Para ello, se realiza un análisis sobre la variación de la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado de suelos plásticos con el contenido de humedad, lo cual es sustentado con datos experimentales de 51 suelos; estos a su vez permiten la ampliación de la base de datos de la información recolectada, ya estudiadas previamente por Echezuría (5).

Echezuría, quien empleó los datos de suelos ya estudiados anteriormente por Gabaldón (6) y Kayabali K. and Oguz O. (7), observó al igual que dichos autores, la existencia de una relación lineal entre el logaritmo de la resistencia al corte no drenada y contenido de humedad. Este aspecto, junto con el hallazgo de que la resistencia al corte del suelo en los Límites de Atterberg es variable y no un valor constante ni para el Límite Líquido ni para el Límite Plástico (4,5,6,7), fueron los fundamentos empleados que le permitieron realizar esta investigación y posteriormente desarrollar este método.

Al analizar las pendientes de dichas rectas, el autor de este método (5), notó que tanto el tamaño y forma de las partículas de arcilla, como el contenido de finos no plásticos en el suelo, son otros parámetros importantes a considerar para la caracterización de los mismos; atribuyéndole a estas partículas no plásticas, el dominio del comportamiento de la resistencia al corte del suelo. Sus datos experimentales indicaron que para un valor cualquiera de Límite Líquido, el valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  aumenta a medida que disminuye el Índice de Plasticidad. Contrariamente, para un Índice de Plasticidad cualquiera, a medida que aumenta el Límite Líquido disminuye el valor absoluto de la pendiente de dicha recta. En consecuencia, le fue posible generar curvas de igual valor absoluto de la pendiente en la Carta de Plasticidad.



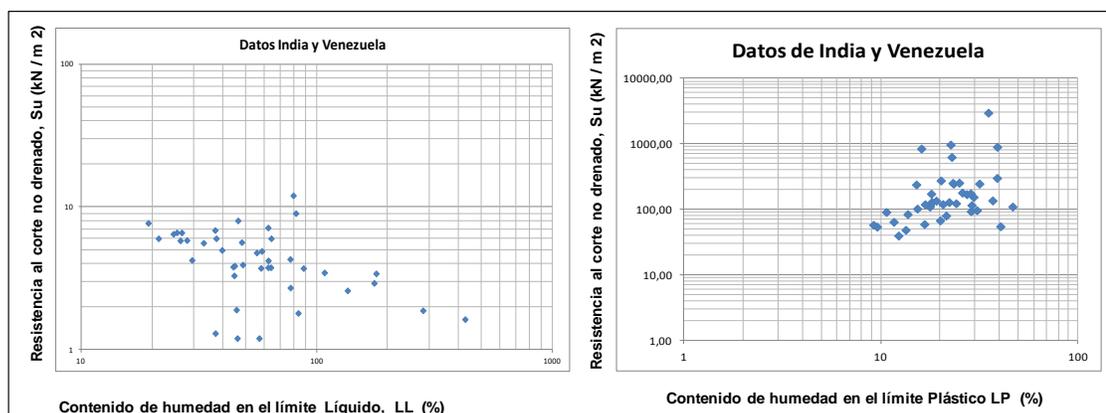
En vista de que el estudio realizado por Echezuría permitió obtener tendencias sólidas con una base de información limitada; este trabajo permitirá corroborar sí dichas tendencias se mantienen al aumentarse su base de datos y verificar a su vez la aplicabilidad del método propuesto.

# CAPÍTULO I

## 1.1 Planteamiento del Problema

Para la determinación del límite líquido y plástico de los suelos, Atterberg (1) estableció las primeras convenciones para ello. Sin embargo los procedimientos descritos dejaron notar muchos detalles de las pruebas sin identificar y la experiencia demuestra que estos son de transcendencia en los resultados obtenidos. Debido a esta limitación Casagrande desarrolló un método para la determinación del límite líquido, mediante la “Copa de Casagrande”; de acuerdo a su teoría (2, 3) el valor fijo de 25 golpes establecido en el método equivalía a una resistencia al corte de  $25\text{gr/cm}^2$ .

En un reciente trabajo Nagaraj, Sridharan y Mallikarjuna (4) y Echezuría (5), concluyen que en realidad la resistencia al corte del suelo en los Límites de Atterberg es variable y no valores constantes ni para el Límite Líquido ni para el Límite Plástico, 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. Esto se ilustra claramente en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Correlación entre la resistencia al corte y el contenido de humedad para los 42 suelos de Venezuela e India estudiados.

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

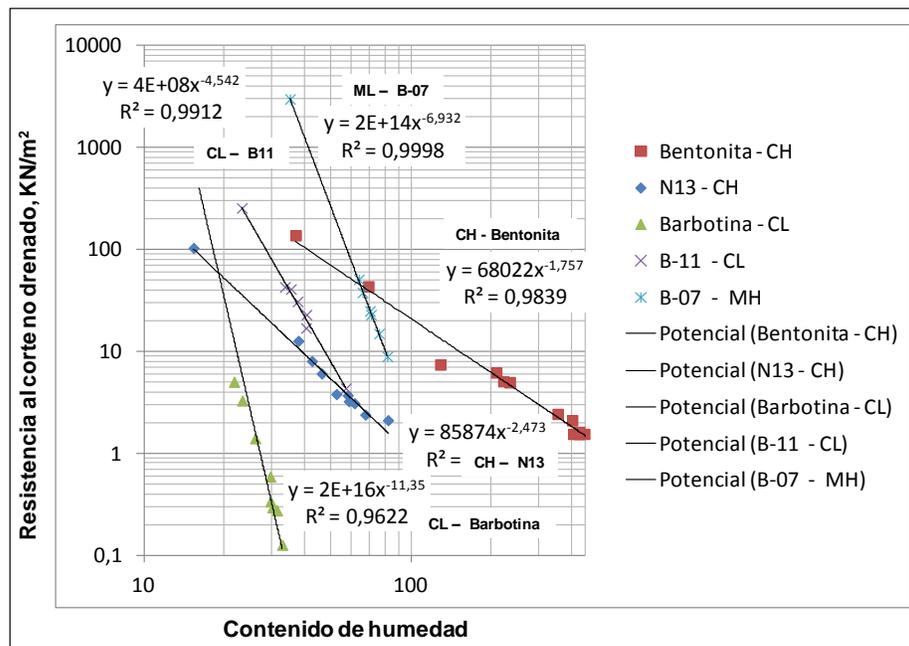
Es por ello que Echezuría (5) plantea la aplicabilidad de un nuevo método que demuestra la existencia de una correlación entre la plasticidad del suelo y el valor absoluto de la pendiente de la recta de  $\log Su - \log w$ . Este se fundamenta en análisis presentados por varios autores (5,6,7 y 8) en el que han encontrado que al graficar en el papel log-log la resistencia al corte del suelo en estado remoldeado,  $Su$ , con el contenido de humedad,  $w$ , se obtiene una recta.

El otro parámetro importante para la caracterización propuesta en el trabajo a realizar es el contenido de finos no plásticos en el suelo, así como el de los minerales de arcilla que son planos y con alta carga eléctrica en sus caras. Según estudios realizados (5), se observó que al trabajar con materiales que aunque tienen plasticidad y clasifican como CL, muestran ángulos de fricción relativamente altos para una arcilla. Mediante un análisis profundo se logró concluir que necesariamente corresponden a mezclas de arcillas con otros componentes de suelo no plásticos, esto indica que existe una interacción importante entre la fracción no plástica del suelo con la arcilla, ya que a medida que aumenta la fracción no plástica se observa una variación importante en el comportamiento del suelo; y esto se ve reflejado en el valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$ . En la **Figura 3** y **Tabla 1** se ilustra lo anteriormente planteado.

**Tabla 1.** Parámetros de los suelos incluidos en la **Figura 3**.

			Plastic limit		Liquid limit		IP	
SuLP/SuLL	$m$	Sample No,	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

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.



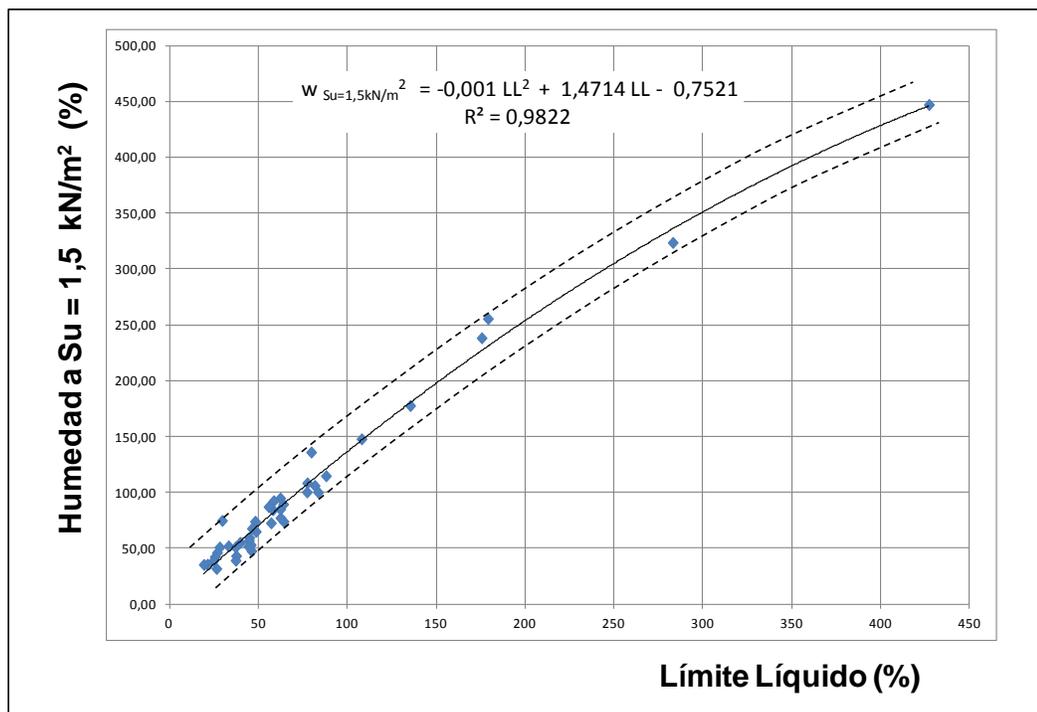
**Figura 3.** Comparación de las pendientes de varios suelos arcillosos de alta y baja plasticidad y limosos de alta y baja compresibilidad.

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

Luego de explorar muchas variables y potenciales combinaciones para una correlación, se encontró que la humedad en el Límite Líquido correlaciona muy bien con la humedad a la cual el suelo tiene una resistencia obtenida con la veleta cilíndrica convencional de laboratorio de  $S_u=1,5 \text{ kN/m}^2$ . Este es un valor tomado al azar para el cual se espera que el comportamiento del suelo esté en el rango líquido (5).

El razonamiento detrás del uso de este valor de humedad a una resistencia al corte baja se basó en lo originalmente deseado por Casagrande al proponer un valor único de resistencia al corte para el límite líquido. Nótese que, aunque los valores de la resistencia al corte no sean constantes para el procedimiento de Casagrande, la proporcionalidad entre dicha humedad respecto a otra humedad dentro del estado “líquido” del suelo correspondiente a una

resistencia muy baja parecen guardar una excelente correlación que luce independiente de las propiedades del suelo, tal como se ve en la **Figura 4**.



**Figura 4.** Correlación entre LL y la humedad para una  $S_u=1,5 \text{ kN/m}^2$ . Nótese la excelencia del ajuste por mínimos cuadrados indicada por el factor  $R^2$ .

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

Ahora bien, como el método propuesto por Echezuría (5) es muy reciente, el mismo requiere ser probado y comparado con suficientes datos de manera de establecer la variabilidad con respecto a los límites de Atterberg obtenidos con los métodos normativos. A tal efecto, debe aumentarse la base de datos ya estudiada para determinar si se requiere o no realizar ajustes, lo cual es parte de los objetivos de este trabajo especial de grado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Verificar la aplicabilidad del ensayo de resistencia al corte no drenada en estado remoldeado para obtener la clasificación de suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar 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  $1,5 \text{ KN/m}^2$ .
- Analizar la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado y la plasticidad del suelo a través del ensayo de veleta a distintas humedades para establecer un rango de aplicación.
- Verificar la robustez de la base de datos ya empleada para el análisis de la pendiente de la recta  $\log S_u - \log w$  e Índice de Plasticidad.
- Verificar la robustez de la base de datos ya empleada para el análisis de las curvas de igual pendiente de la recta  $\log S_u - \log w$ , de acuerdo con la plasticidad para las muestras de suelo.

## **1.3 Justificación**

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. De hecho, la definición inicial del límite líquido apunta a que cada golpe con el aparato de Casagrande vence la resistencia al corte del suelo y la adherencia entre el mismo y la copa, la cual es indirectamente función de la resistencia al corte.

Mediante estudios anteriores (5,6,7 y 8), se encontró que existe 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. Es por ello, que se examina la posibilidad de utilizarla como método alternativo para clasificar los suelos.

Estos estudios han brindado limitada información, pero las tendencias observadas son sólidas. Por lo que a través de este trabajo se amplía la base de datos para complementar la caracterización de los suelos, que está en perfecta armonía con la forma tradicional de hacerlo y la buena práctica de la ingeniería. Esto promueve nuevas oportunidades para investigar y comprender mejor el comportamiento en el corte no drenado de los suelos plásticos con el contenido de humedad y con la carta de plasticidad.

#### **1.4 Alcance**

Se pretende confirmar la aplicabilidad del ensayo de resistencia al corte no drenada en estado remoldeado, para obtener la clasificación de suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Para lograr esto, se ajustarán las correlaciones propuestas en los trabajos previos al ampliar la base de datos; para definir con mayor precisión parámetros que permitan afirmar su aplicabilidad.

Es por ello, que se ensayaron 51 muestras de suelos inorgánicos de diferentes niveles de plasticidad con la veleta de laboratorio para 4 o 5 distintas humedades, con el fin de obtener una variación de la resistencia al corte en estado remoldeado sin drenar que permitan definir la recta  $\log Su - \log w$ .

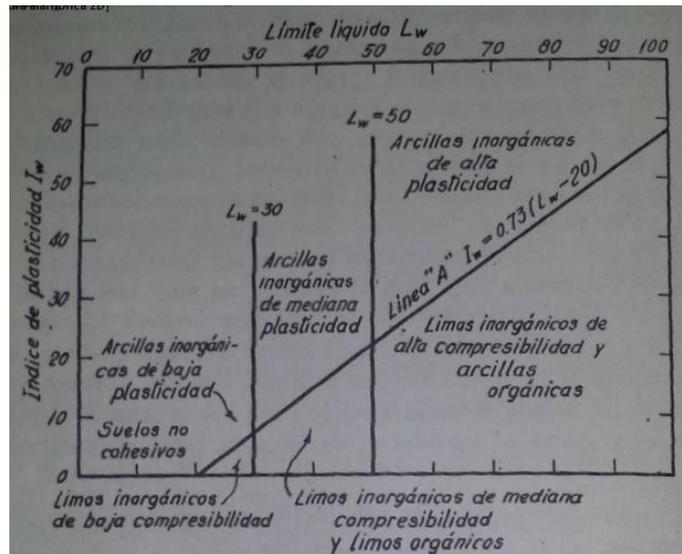
A partir de los resultados de los ensayos antes mencionados y del análisis de los mismos, se busca verificar la aplicabilidad del método propuesto por Echezuría (5), el cual puede resultar ser un procedimiento suficientemente robusto; alternativo para obtener la clasificación de los suelos plásticos, sin realizar los ensayos convencionales en la determinación de los límites de Atterberg.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### Clasificación de suelos finos – Carta de Plasticidad

Según cuales sean sus características y propiedades físicas más importantes, los suelos cohesivos pueden ser divididos en ocho grandes grupos, a saber: arcillas inorgánicas de alta, de media, y de baja plasticidad; suelos limosos inorgánicos de alta, de media, y de baja compresibilidad; arcillas orgánicas y limos orgánicos (11). En el grafico de plasticidades es posible diferenciar los distintos tipos de suelos cohesivos en una forma muy sencilla. En este, las abscisas representan el límite líquido  $L_w$  (LL) y las ordenadas el índice de plasticidad  $I_w$  (IP). Tal como se muestra en la **Figura 5**, el grafico se divide en seis regiones, tres de ellas situadas por encima de la línea A y las otras tres por debajo.



**Figura 5.** Gráfico de las plasticidades (según A. Casagrande).

**Fuente:** “Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica.” Karl Terzaghi y Ralph B. Peck.

La línea A, empíricamente obtenida, sirve de frontera entre los suelos cuyas partículas finas exhiben mayores características de plasticidad, ubicados en la parte superior de la grafica; y

los suelos con alto contenido de materia orgánica, así como aquellos que contienen finos de baja plasticidad situados en las zonas bajas.

Dicha línea junto con las verticales trazadas para los correspondientes  $L_w=30$  y  $L_w=50$ , terminan por dividir el gráfico en seis zonas. La primera vertical se debe a que la resistencia del suelo seco en el caso de las arcillas situadas por encima de la línea A aumenta de mediana, para muestras con límite líquido menor de 30, a muy alta para muestras con límite líquido superior a 100. Por el contrario, si el suelo se encuentra ubicado muy por debajo de la línea A, la resistencia en seco de los suelos con límite líquido menor de 50 es muy baja y solo llega a ser mediana para materiales con límite líquido del orden de 100 por ciento (12).

Finalmente, la colocación del suelo en una de estas zonas ya definidas, indicará que presentará las propiedades mecánicas e hidráulicas características del grupo al cual pertenece.

### **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos**

Este sistema está basado en el Sistema de Clasificación de Aeropuertos, propuesto originalmente en 1942 por A. Casagrande (13). Incluso podría decirse que es el mismo, pero con ligeras modificaciones.

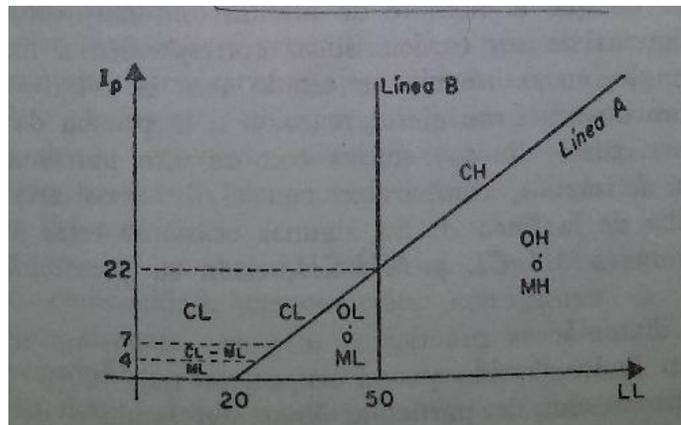
El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas (13).

Los suelos finos se subdividen algunas veces en:

- a) Limos: partículas mayores que 0,002 mm. Estos a su vez pueden ser orgánicos (O) e inorgánicos (M).
- b) Arcilla: partículas menores que 0,002 mm. Al igual que los limos, pueden ser orgánicas (O) e inorgánicas (C).

Cabe destacar que las arcillas no se pueden clasificar por el tamaño de las partículas, porque hay suelos más finos que 0,002 mm que no contiene arcillas y en otros casos algunos granos de minerales arcillosos son mayores de 0,002 mm (14).

La modificación realizada por este sistema, se refiere a los suelos por encima de la Línea A con índice plástico comprendido entre 4 y 7, y cambia la clasificación de los suelos que caen en la zona punteada de la **Figura 6**, siendo esta finalmente la Carta de Plasticidad que se emplea en la actualidad.



**Figura 6.** Carta de plasticidad, tal como se usa actualmente.  
**Fuente:** "Mecánica de Suelos." Juárez Badillo y Rico Rodríguez.

Los limos y las arcillas inorgánicas, a su vez están subdivididos según su límite líquido en dos grupos señalados a continuación:

- Grupos CL y CH

Ambos comprendidos en la zona por encima de la Línea A, siendo CL definida por  $LL < 50\%$  e  $Ip > 7$  y CH por un  $LL > 50\%$ .

- Grupos ML y MH

Ambos comprendidos en la zona bajo la Línea A, siendo ML definida por  $LL < 50\%$  y la porción sobre la Línea A con  $I_p < 4$ ; y MH definida por  $LL > 50\%$ . Los suelos finos que caen sobre la Línea A y con  $4\% < I_p < 7\%$  se consideran casos de frontera, estableciéndoles el símbolo doble CL-ML.

### **Suelos Remoldeados**

Es aquél que a través de una acción mecánica (ya sea con equipo o manualmente) se destruye completamente su estructura, modificando sus propiedades mecánicas y su comportamiento. Bourland (1990), le llama suelo reconstituido a aquel suelo que ha sido desestructurado ó remoldeado y que después de haberlo dejando en reposo recupera sus propiedades mecánicas, o sea se reconstituye.

### **Tixotropía**

Si se amasa completamente una muestra de la fracción fina de un suelo y luego se la deja reposar sin que sufra alteración alguna, la masa adquiere con el tiempo mayor resistencia cohesiva, dicha resistencia aumenta al principio en forma rápida y luego más y más lentamente.

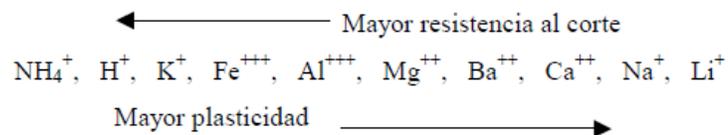
Si la muestra es nuevamente amasada a contenido de humedad constante, su cohesión disminuye en forma considerable, pero si se la deja reposar, vuelve a recuperar su valor. Este fenómeno se conoce como Tixotropía.

La pérdida y el subsiguiente retorno de la resistencia cohesiva parece deberse a la destrucción y subsiguiente reordenación de la estructura molecular de las capas adsorbidas.

### **Relación existente entre los límites de Atterberg, forma y composición mineralógica de las partículas.**

La propiedad de la plasticidad es un atributo solamente de los minerales arcillosos y como prácticamente todos los suelos finos contienen minerales arcillosos, los mismos son por consiguiente plásticos.

J. D. Sullivan (15), trató muestras de una misma arcilla hidrogenada con distintos cationes, y encontró que, a igual contenido de humedad, en estado sólido, la resistencia al corte varía apreciablemente, decreciendo en el orden en que se citan los cationes en la **Figura 7**, y la plasticidad varía aproximadamente en el mismo orden, pero en sentido opuesto.



**Figura 7.** Lista de Cationes en orden decreciente de su efecto benéfico sobre la resistencia al corte de una arcilla.  
**Fuente:** “*Introducción a algunas Propiedades Fundamentales de los Suelos*”. Julio Nadeo y Augusto Leoni.

Según J. D. Sullivan (15), el fenómeno observado se puede explicar debido a la formación de la doble capa difusa de gran viscosidad, donde se encuentran los cationes cambiabiles en contacto con la superficie de las partículas del suelo. Estas películas pueden ser relativamente gruesas en el caso de cationes muy ávidos de agua, como el  $\text{Li}^+$  y  $\text{Na}^+$ , pero muy delgadas con el  $\text{H}^+$ . La doble capa difusa de los otros cationes tiene espesores intermedios, de acuerdo a la sucesión de la **Figura 7** citada anteriormente.

Por esta razón, los suelos con cationes  $\text{Li}^+$  y  $\text{Na}^+$  adsorbidos, son relativamente más plásticos y, con un bajo contenido de agua, tienen relativamente menor resistencia al corte, pues sus partículas se hallan separadas por una doble capa difusa más gruesa, con propiedades semisólidas. Para contenidos de humedad más altos resulta una relación inversa. Hacemos la

suposición de que J.D Sullivan al hablar de resistencia al corte, se refiere a la resistencia al corte remodelada, ya que sí está analizando el comportamiento con distintos cationes, está de alguna manera inundando el suelo y lo debe remodelar para que haya un intercambio efectivo de los mismos, ya que de no ser así sería más complicado su análisis.

Tanto en estado sólido como plástico, las fracciones finas plásticas de los suelos poseen cohesión, es decir, capacidad para resistir tensiones tangenciales o de corte. Una medida de esta resistencia al corte es el límite líquido, ya que mide la cohesión potencial de un material que, a su vez, depende de la superficie total de sus áreas de contacto, o sea, de la finura y forma de sus granos. Las partículas de suelo fino pueden ser angulares, en forma de escamas y ocasionalmente en forma de agujas, y a veces redondeadas; en general el porcentaje de partículas escamosas aumenta a medida que decrece el tamaño de las fracciones de un suelo dado, ya que las partículas menores a dos micras tienen principalmente forma de escamas.

Cuanto más pequeño y más aplanados son los granos de una arcilla, mayor es esta área total de contacto entre estos granos y mayor la cantidad de agua necesaria para revestirlos, por ello, el límite líquido es más alto. Por otro lado, el límite líquido de una arcilla se ve disminuido cuando tiene presente agregado de arena o limo. El límite plástico disminuye al mismo tiempo, pero no tan rápidamente como lo hace el límite líquido, de forma que la adición de partículas gruesas causa un descenso en el límite plástico.

### **Resistencia al corte**

La resistencia al esfuerzo cortante entre dos partículas, es la fuerza que debe aplicarse para producir un deslizamiento relativo entre las mismas. El origen de esta resistencia para los suelos plásticos está en las fuerzas atractivas que actúan entre los átomos superficiales de las partículas. Estas fuerzas atractivas dan lugar a la formación de enlaces químicos en los puntos de contactos superficiales (16). El número de enlaces dependerá en gran parte de la naturaleza fisicoquímica de las partículas.

La resistencia al deslizamiento tangencial entre partículas es de naturaleza friccional, debido al hecho de que la misma es proporcional a la fuerza normal ejercida. Es decir, si la fuerza normal disminuye lo hará la resistencia o el número de enlaces, generando así la disminución de la resistencia tangencial total.

Existen algunos casos en los que si la fuerza normal se anula, aun puede medirse una cierta resistencia al deslizamiento tangencial. En tales casos, se dice que existe una cohesión verdadera o real entre partículas, esto puede ser debido a que las partículas de suelo han estado en contacto por un tiempo prolongado sin alteraciones. Sin embargo, la magnitud de la cohesión verdadera entre partículas es muy pequeña, excepto en algunos casos especiales, y su contribución a la resistencia del suelo es también muy reducida.

En suelos finos plásticos, la resistencia del suelo disminuye a medida que el contenido de agua aumenta, esto es debido a que el agua superficial actúa como lubricante. En presencia de agua, los iones superficiales se hidratan y se debilita el enlace con las superficies minerales.

Para obtener la resistencia al corte en laboratorio existen distintos equipos que son ideales para obtener la resistencia al corte con drenaje, sin drenaje o ambas.

### **Resistencia al corte sin drenaje**

Para conocer mejor el comportamiento de los suelos arcillosos o limosos y, en general, de todos aquellos que tienen permeabilidad baja, suele ser necesario investigar la resistencia al corte en aquellas situaciones en las que el drenaje está impedido. Entiéndase sin drenaje, a aquellas situaciones en las que el agua del suelo no puede moverse y adecuarse al nuevo estado de cargas; presentándose entonces presiones intersticiales que intentan desplazar el agua hacia posiciones de equilibrio.

La resistencia al corte no drenada de los suelos remoldeados, es motivo de estudio en algunas aplicaciones de la ingeniería geotécnica. Existen varios métodos para la determinación de este parámetro, incluyendo la prueba de veleta de laboratorio.

## Resistencia al corte sin drenaje en el límite líquido

La resistencia al corte no drenada de los suelos remoldeados proporciona una base racional para las pruebas índice, para establecer el límite líquido y plástico (7). Una serie de trabajos existen en relación a este tema, dando como resultado, datos que revelan que a pesar de que la resistencia al corte no drenada en el límite líquido se encuentra dentro de rangos de 0,5 a 4 kN/m<sup>2</sup>, el promedio se encuentra alrededor de 1,6 y 1,7 kN/m<sup>2</sup>, tal como se muestra en la **Tabla 2.**

**Tabla 2.** Undrained shear strengths ( $c_u$ ) at liquid limit.

Source	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )		Remarks
	Range	Average	
BS 1377 (BSI 1948)	—	1.6	Quoted by Whyte (1982)
Skempton and Northey (1953)	0.7–1.75	—	Soils with very different PI values
Norman (1958)	0.8–1.6	—	Apparatus used conforms to British Standards Institute standards
Seed et al. (1964)	2.5	—	Quoted by Whyte (1982)
Youssef et al. (1965)	1.3–2.4	1.7	Utilized laboratory vane tests
Skopek and Ter-Stepanian (1975)	1–3	—	Quoted by Wroth and Wood (1978)
Karlsson (1977)	0.5–4.0	—	Quoted by Whyte (1982)
Wroth and Wood (1978)	—	1.7	Adopted as the best estimate
ASTM D4318-00 (ASTM 2001)	1.1–2.3	—	Quoted by Wroth and Wood (1978)
Swedish cone	—	1.7	Quoted by Whyte (1982)
Whyte (1982)	—	1.6	Upon literature review
Federico (1983)	1.7–2.8	—	Quoted by Sharma and Bora (2003)
Wood (1985)	—	1.7	Quoted by Sharma and Bora (2003)
Medhat and Whyte (1986)	—	1.6	Upon literature review
Sharma and Bora (2003)	—	1.7	Adopted as the best estimate

**Fuente:** “*Shear strength of remolded soils at consistency limits*”. Kamil Kayabali and Osman Oguz Tufenkci.

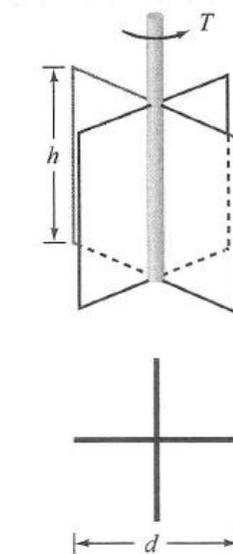
## Veleta de Laboratorio

La veleta fue originalmente diseñada en Inglaterra (1954) por el laboratorio en investigación de caminos. Sus primeros usos fueron para investigar la relación entre resistencia al corte no drenada y contenido de agua en suelos cohesivos.

Este ensayo consiste en insertar una veleta de varias aspas en el extremo inferior de un tubo de muestra, girándolo a una velocidad constante para determinar la torsión requerida, que genere una superficie cilíndrica de corte. La torsión así, se convierte en una unidad de resistencia al

esfuerzo cortante del área de superficie cilíndrica, esta torsión es medida por un resorte calibrado de torsión.

El equipo consta de un vástago al cual está ligada la veleta, generalmente compuesta por cuatro aspas rectangulares como se muestra en la **Figura 8**. La implementación de veletas de distintos tamaños y geometrías dependerá 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.



**Figura 8.** Diagrama del equipo de veleta de corte.  
**Fuente:** “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”. Braja M. Das.

Dicho equipo cuenta con un motor el cual hace girar el resorte a una velocidad constante de 60 a 90° por minuto, y consta de cuatro unidades de resorte de torsión de diferentes sensibilidades. Según García M. (17), el resorte N° 1 por ser más sensible se recomienda para obtener la resistencia al corte de suelos muy blandos, el resorte N° 2 es recomendado para suelos entre blandos y firmes, el resorte N°3 para suelos moderadamente firmes y el resorte N°4 es el más duro; se recomienda para suelos muy firmes y es el menos utilizado.

Según Braja M. Das (18), el torque máximo debe ser igual a la suma del momento resistente de la fuerza cortante a lo largo de la superficie lateral del cilindro del suelo ( $M_s$ ) y del momento resistente de la fuerza cortante en cada extremo ( $M_e$ ).

$$T = M_s + M_e + M_e \quad (1)$$

El momento resistente  $M_s$  se expresa como:

$$M_s = (\pi dh)S_u (d/2) \quad (2)$$

Donde:

d: Diámetro de la veleta de cortante.

h: Altura de la veleta de cortante.

Para calcular  $M_e$ , los investigadores supusieron tres tipos de distribución de la movilización de la resistencia cortante en los extremos del cilindro de suelo:

1. Triangular: la movilización de la resistencia cortante es  $S_u$  en la periferia del cilindro de suelo y decrece linealmente a 0 en el centro.
2. Uniforme: la movilización de la resistencia cortante es constante (es decir,  $S_u$ ) de la periferia al centro del cilindro de suelo.
3. Parabólica: la movilización de la resistencia cortante es  $S_u$  en la periferia del cilindro de suelo y decrece parabólicamente a 0 en el centro.

Esas variaciones en la movilización de la resistencia cortante se muestran en la **Figura 9**. Por lo tanto el torque en la falla se expresa como:

$$T = \pi S_u \left[ \frac{d^2 h}{2} + \beta \frac{d^3}{4} \right] \quad (3)$$

Donde :

T: Torque máximo (kg-cm).

h: Altura de las aspas de la veleta (cm).

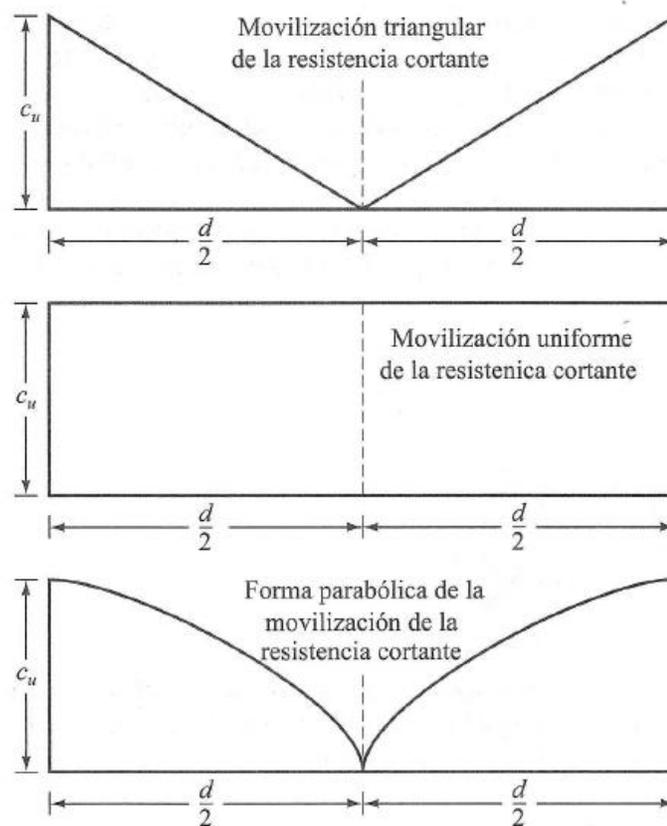
d: Diámetro de las aspas de la veleta (cm).

$S_u$ : Esfuerzo cortante en el torque máximo (kg/cm).

$\beta=1/2$  para la movilización triangular de la resistencia cortante sin drenaje.

$\beta=2/3$  para la movilización uniforme de la resistencia cortante sin drenaje.

$\beta=3/5$  para la movilización parabólica de la resistencia cortante sin drenaje.



**Figura 9.** Variaciones en la movilización de la resistencia cortante.  
**Fuente:** "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica". Braja M. Das.

Ya que la torsión es medida por un resorte calibrado de torsión, la ecuación de la resistencia al corte se ve modificada y es expresada en la siguiente ecuación:

$$S_u = \frac{2k\theta_f}{\pi d^2 \left(h + d\frac{\beta}{2}\right)} \quad (4)$$

Donde:

k: Factor de calibración del resorte.

$\theta_f$ : Deflexión del resorte en grados.

**Tabla 3.** Factores resortes.

*2.- FACTORES RESORTES*

1	2	3	4	
<b>0,008</b>	<b>0,015</b>	<b>0,026</b>	<b>0,046</b>	<b>libras-pulgada</b>
<b>0,009</b>	<b>0,018</b>	<b>0,030</b>	<b>0,053</b>	<b>kgs-cm</b>

**TORQUE = FACTOR x LECTURA DIAL INTERNO**

**Fuente:** “Ensayo de Veleta Miniatura de Laboratorio. Ref: ASTM D4648”.Hugo, Pérez.

## **CAPITULO III**

### **ANTECEDENTE HISTÓRICO**

Un sistema de clasificación de los suelos es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen propiedades similares (9). Es por ello, que Albert Mauritz Atterberg decide estudiar las propiedades físicas de los suelos en función de su granulometría, descubriendo que ésta no explica el comportamiento de los suelos finos, por lo que decide cambiar de estrategia estudiando otra propiedad de estos suelos, la plasticidad.

Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua (10). Encontró, que para expresar adecuadamente la plasticidad se requieren dos parámetros, el límite líquido y el índice de plasticidad; siendo este último igual a la diferencia entre el límite líquido y plástico.

Según Atterberg el Límite Líquido, frontera entre los estados semilíquido y plástico, era definido en términos de una técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remoldeado en una cápsula formando en él una ranura, y en hacerla cerrar golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura; el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban sin mezclarse al cabo de un cierto número de golpes (1). Al convertirse esta práctica en una rutina en todos los laboratorios y no haberse especificado muchos detalles, Terzaghi (1927) sugirió a Casagrande elaborar un método de prueba en busca de lograr estandarizarlo. Esto debido a que se observó, que la influencia del operador es grande y de trascendencia en los resultados.

Casagrande en 1932, desarrolla un dispositivo normalizado (Copa de Casagrande) que permitió minimizar los errores del operador, y generando consigo que las normas de todo el mundo lo hayan adoptado como metodología para la obtención del límite líquido. Ya para 1939, relaciona la resistencia al corte con el límite líquido de un suelo (Sharma y Bora 2003). Casagrande sugiere, que un valor promedio de la resistencia al corte de los suelos en el límite

líquido es de 2,65 kN/m<sup>2</sup>, teniendo en cuenta la amplia dispersión de los valores del límite líquido dependiendo del aparato que sea utilizado para las pruebas. Una serie de documentos existen en relación a este tema, entre ellos los presentados en los trabajos de Wroth y Wood (1978), y Sharma y Bora (2003).

A pesar de haberse estandarizado el proceso de determinación del límite líquido, se ha observado que siguen existiendo un importante número de elementos que alteran la ejecución del ensayo entre los cuales están: la dificultad de realizar la ranura en ciertos suelos con alto contenido de materiales no plásticos, la tendencia de los suelos de baja plasticidad de deslizar por la cuchara en lugar de fluir, sensibilidad de pequeñas diferencias en el aparato (forma del ranurador, dureza de la base, la forma de la leva, la rugosidad de la cuchara, etc.), la sensibilidad de la técnica del operador en realizar el ensayo, etc. La combinación de todos estos factores deriva en pensar lo conflictivo del uso de este método, ya que ensayos realizados sobre un mismo suelo por un mismo operador pueden dar distintos resultados.

En 1958, Casagrande señaló que éste es un ensayo de corte dinámico que no ofrece una base de comparación uniforme para los suelos fino granulares, al punto que recomendó su cambio por un ensayo de resistencia al corte. Es por ello, que no sorprende encontrarse con el hecho de que investigadores hayan estudiado la aplicabilidad del ensayo de resistencia al corte no drenada en estado remoldeado, para relacionarlos con el Límite Líquido y Límite Plástico, entre los cuales podemos mencionar:

- Kamil Kayabali and Osman Oguz Tufenkci, “*Shear strength of remolded soils at consistency limits*” (2010).
- Gabaldón Elide, en su Trabajo Especial de Grado de Ingeniero Civil “*La Resistencia al Corte en los Límites Líquido y Plástico*” (1991).
- González, M y Herrera, A, a través de su Tesis de Grado de Ingeniero Civil “*Investigación del comportamiento de algunos suelos venezolanos en estado remoldeado*” (1987).

- Wroth, C.P., and Wood, D.M. “*The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils*” (1978).

Todos estos autores han encontrado en sus 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; lo cual cumple independientemente del método utilizado para determinar la resistencia al corte no drenada del suelo. Así como también, que en realidad la resistencia al corte del suelo en los Límites de Atterberg es variable y no un es un valor constante ni para el Límite Líquido ni para el Límite Plástico, objetando lo establecido por Casagrande.

En relación con este aspecto, en el trabajo realizado por H. B. Nagaraj; A. Sridharan and H. M. Mallikarjuna; “*Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits*” (2012), concluyeron de igual forma que no es posible obtener valores únicos de 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.

A pesar de todas estas desventajas ya antes mencionada y de que se han realizado investigaciones en busca de sustituir este método, por uno de resistencia al corte no drenado en estado remoldeado; actualmente sigue empleándose este método en los laboratorios, ya que tal como lo dijo Casagrande en las páginas de Géotecnicque del año 1958 y se mantiene hasta la fecha: “Desafortunadamente, por ahora ninguno de estos ensayos está lo suficientemente simplificado como para competir, en simplicidad y coste, con el actual”.

Es por ello, que la redefinición de los límites de plasticidad de los suelos con base en un criterio de resistencia al corte y el uso de la veleta de laboratorio, podría implicar un cambio substancial. En consecuencia, se pretende aplicar a varias muestras el procedimiento de Echezuría (5), el cual busca facilitar la determinación de los límites de consistencia de los suelos y por tanto su clasificación. La otra característica del método de Echezuría (5), es que el

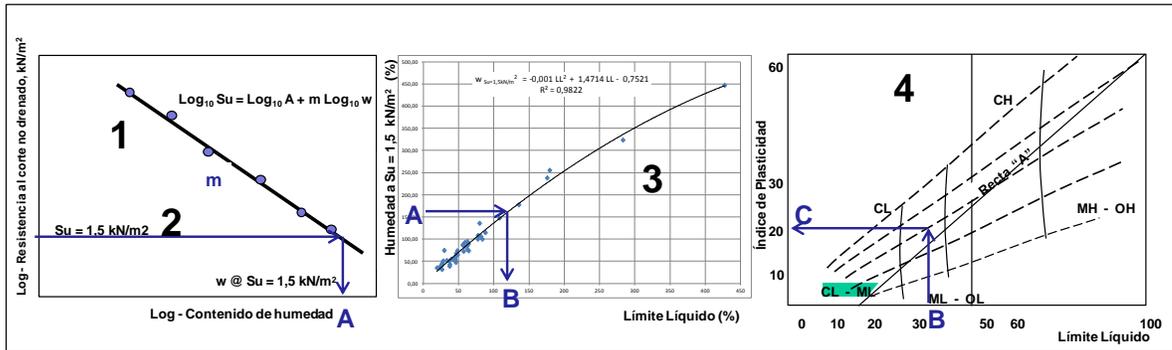
mismo a pesar de utilizar la resistencia al corte en estado remoldeado, está basado en los métodos tradicionales, de manera de aprovechar toda la información y correlaciones adquiridas anteriormente.

## CAPÍTULO IV

### MARCO METODOLÓGICO

La metodología utilizada se basa en un procedimiento para clasificar los suelos con base en la recta  $\log Su - \log w$  sin tener que realizar los límites en la forma convencional, pero obteniendo el mismo resultado, este consta de cuatro pasos los cuales se explican a continuación y se ilustran gráficamente en la **Figura 10**.

1. Realizar al menos cuatro ensayos, lo ideal serían cinco, 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 la pendiente, “m”, de la curva  $\log_{10} Su$  vs  $\log_{10} w$  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 **Figura 10**.
3. Con ese valor de la humedad, “A”, se define el Límite Líquido del suelo, el cual es equivalente al obtenido con la copa de Casagrande, a partir de la correlación entre ambas humedades, utilizando la **Figura 4**. Este LL lo denominamos, “B”, en el paso 3 de la **Figura 10**.
4. Conocido el LL del suelo, “B”, y la pendiente, m, de la recta  $\log Su - \log w$  determinada en el paso 1 de la **Figura 10**, ubicamos el suelo en la carta de plasticidad interpolando los valores de la pendiente, m, según se requiera y obtenemos el IP del suelo, el cual denominamos “C”, en el paso 4 de la **Figura 10**.



**Figura 10.** Procedimiento propuesto para clasificar los suelos con base en la recta log Su – log w

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

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 D 4318-00.

Para desarrollar la metodología expuesta, se tomaron los datos del ensayo de límites de consistencia (ASTM D 4318) de 91 muestras de suelos inorgánicos. Del total de muestras, los datos de 42 de ellas fueron proporcionados por la empresa AIG Ingeniería Geotécnica C.A; 9 proporcionados por la empresa CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS S.C. Gracias a investigaciones previas realizadas por Gabaldón (1991) se tomaron los datos de 25 muestras; y por Kamil Kayabali y Osman Oguz Tufenkci (2010) del que se adoptaron finalmente 15 datos.

La resistencia al corte no drenada determinada mediante el ensayo de Velea Miniatura de Laboratorio (ASTM D 4648), fue realizado únicamente a 51 muestras (42 suministradas por la empresa AIG Ingeniería Geotécnica C.A y, 9 por la empresa CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS S.C). Las pruebas se realizaron con el equipo de Velea Miniatura Wykeham Farrance de la Universidad Católica Andrés Bello, modelo N° 23500.

Tal como se indica en la metodología previamente descrita, una vez realizados los ensayos de Velea Miniatura de Laboratorio, se procede a elaborar el gráfico Log Su – Log w de éstas 51 muestras, para proceder finalmente a realizar la clasificación. Este procedimiento se realizó de

igual forma, con los datos de resistencia al corte sin drenar y humedades mostrados en los trabajos de Gabaldón (6), y Kamil Kayabali y Osman Oguz Tufenkci (7).

A continuación, se presentan los instrumentos utilizados para llevar a cabo la metodología antes expuesta:

## 1. EQUIPOS

- a) Recipiente hecho de material resistente, para el secado de la muestra inalterada en el horno durante 24 horas. **Figura 11.**
- b) Horno capaz de mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C. **Figura 12.**
- c) Mortero con Pilón empleado para triturar la muestra. **Figura 13.**
- d) Tamiz N° 40. **Figura 14.**
- e) Bowl de Porcelana, como recipiente para realizar el remoldeo de la muestra. **Figura 15.**
- f) Irrigador. **Figura 16.**
- g) Cilindro Graduado utilizado para establecer un estándar de medidas, y así poder tenerse un control aproximado de la variación de humedad que se quiera manejar. **Figura 17.**
- h) Espátula empleada para el manejo y remoldeo de la muestra. **Figura 18.**
- i) Equipo de Veleta Miniatura de Laboratorio, resorte N° 2, Veleta Pequeña (h=1,27 cm y d=1,27 cm) y Veleta Grande (h=2,54 cm y d=1,87 cm). **Figura 19.**
- j) Vaso con dimensiones tal que permita garantizar la inserción de la veleta en la muestra a una profundidad mínima igual al doble de la altura del aspa de la veleta; y diámetro suficiente para permitir un espacio libre de al menos un diámetro de las aspas entre todos los puntos sobre la circunferencia de la superficie de corte y el extremo exterior de la muestra. La acotación del diámetro, es referida principalmente al caso del empleo de la Veleta Grande (condición más desfavorable). **Figura 20.**
- k) Recipiente para la obtención de contenidos de humedad, hecho de material resistente a la corrosión y no sujeto al cambio de masa por calentamiento y enfriamiento. **Figura 21.**

- l) Balanza para medir la masa de las muestras, con capacidad máxima de 350 gr y precisión de 0,01 gr. **Figura 22.**



**Figura 11.** Recipiente.

Fuente: Propia.



**Figura 12.** Horno.

Fuente: Propia.



**Figura 13.** Mortero con Pilón.

Fuente: Propia.



**Figura 14.** Tamiz N° 40.

Fuente: Propia.



**Figura 15.** Bowl de Porcelana.

**Fuente:** Propia.



**Figura 16.** Irrigador.

**Fuente:** Propia.



**Figura 17.** Cilindro Graduado.

**Fuente:** Propia.



**Figura 18.** Espátula.

**Fuente:** Propia.



**Figura 19.** Equipo de Veleta Miniatura de Laboratorio, Resorte N° 2, Veleta Grande y Veleta Pequeña.

**Fuente:** Propia.



**Figura 20.** Vaso.

**Fuente:** Propia.



**Figura 21.** Recipiente.

**Fuente:** Propia.



**Figura 22.** Balanza.

**Fuente:** Propia.

## **2. CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS**

Se deben efectuar calibraciones periódicas de las unidades de resortes de torsión para garantizar la operación adecuada del equipo de Veleta Miniatura de Laboratorio. Esta consiste en la aplicación de pesos calibrados dentro de una rueda calibrada a un torque conocido. Para cada resorte a utilizar, aplicar una serie de pesos de calibración para desarrollar una gráfica de rotación del resorte (en grados) vs torque (Kg-cm).

## **3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

La muestra inalterada se colocará en el horno por un lapso de 24 horas, será triturada para luego proceder a pasarla por el tamiz N° 40. Del material pasante por dicho tamiz, se toman aproximadamente 340 gr para colocarlos en un recipiente apropiado, añadiéndole una cierta cantidad de agua a tal punto que la muestra se encuentre en la vecindad de límite plástico, siempre y cuando se logre que ésta permita su trabajabilidad. Esta primera humedad es adoptada para así manejar un rango amplio de los valores ensayados, tomando en cuenta que las pruebas serán realizadas bajo 4 o 5 distintos contenidos de humedad. Una vez agregada el agua para esta primera humedad, se deja en reposo durante 24 horas aproximadamente, en un lugar fresco, introduciendo la muestra en una bolsa hermética a fin de que se mantenga húmeda, para reducir al mínimo las pérdidas de agua por evaporación. Para las humedades restantes, el tiempo de espera en reposo deberá ser de 1 hora.

Es importante mencionar que al momento de introducir la muestra húmeda en los vasos destinados para la elaboración del ensayo, el proceso de llenado debe ser por capas de aproximadamente 3 cm, y tras cada capa, el vaso debe ser golpeado contra una superficie firme y acolchonada; esto en busca de evitar burbujas de aire en la muestra que afecten los resultados del ensayo.

#### 4. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Se fija bien la unidad de veleta de esfuerzo cortante, así como el contenedor del espécimen a una mesa con un marco para evitar el movimiento durante el ensayo.

**Figura 23.**



**Figura 23.** Detalle del Montaje.

**Fuente:** Propia.

- b) Se inserta la veleta en la muestra a una profundidad mínima igual al doble de la altura del aspa de la veleta, para asegurarse que el extremo superior de la misma se encuentra hincado por lo menos a una altura razonable por debajo de la superficie de la muestra.
- c) Se toma la lectura inicial.
- d) Se sostiene la muestra firmemente para evitar que gire y se da inicio a la rotación mecánica de la veleta, de manera que gire la parte superior del resorte a un velocidad constante de  $60-90^{\circ}/\text{min}$ .
- e) Se anota las lecturas de las deflexiones del resorte o de la torsión del transductor eléctrico por lo menos cada  $5^{\circ}$  de rotación, hasta que la deflexión del resorte no se incremente más (se considera que ha ocurrido la falla) o hasta que se obtenga un máximo de  $180^{\circ}$  de rotación. Durante la rotación de la veleta se sostiene el aspa a una altura fija.
- f) Se anota las lecturas de torsión máxima o intermedia si se requiere.

- g) Se toma una muestra representativa del espécimen para determinar su contenido de humedad. Según lo establecido en la ASTM 2216-92, la masa mínima de la muestra para un tamaño máximo pasante del tamiz N° 40 es de 10 gr.
- h) Se inspecciona el suelo para ver si se han incluido arena o grava o si existen grietas de la superficie de falla, todo lo cual puede influenciar los resultados del ensayo. Anote los resultados de la inspección.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

#### Robustez de la Base de Datos

En la Tabla 4 se puede observar la cantidad de muestras utilizadas por Echezurúa para el desarrollo del método propuesto. Por otro lado, la Tabla 5 refleja el número de muestras que fueron ensayadas con la Veleta Miniatura de Laboratorio para determinar la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado a 4 o 5 distintas humedades, generando así el aumento de la base de datos y la verificación de la robustez del método original.

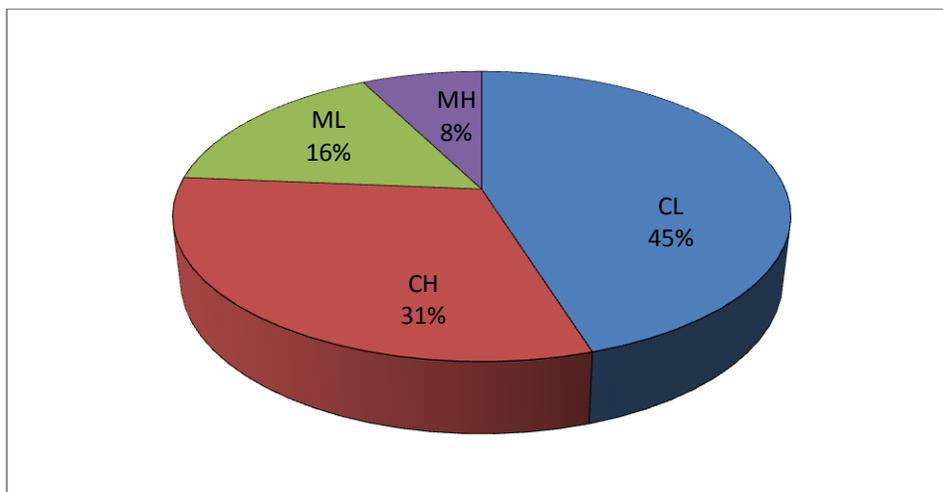
**Tabla 4.** Base de Datos Inicial.

Tipo de Suelo	Cantidad
CL	19
CH	15
ML	2
MH	6
Total	42

**Tabla 5.** Aumento de la Base de Datos.

Tipo de Suelo	Cantidad
CL	23
CH	14
ML	13
MH	1
Total	51

Finalmente se tiene un total de 93 muestras analizadas para verificar la aplicabilidad del método propuesto. En la **Figura 24.** puede observarse el porcentaje de cada tipo de suelo fino plástico estudiado, donde se presenta un dominio de Arcillas de baja Plasticidad (CL) con un 45%; y una baja presencia de Limos de alta Compresibilidad (MH) con un 8%.

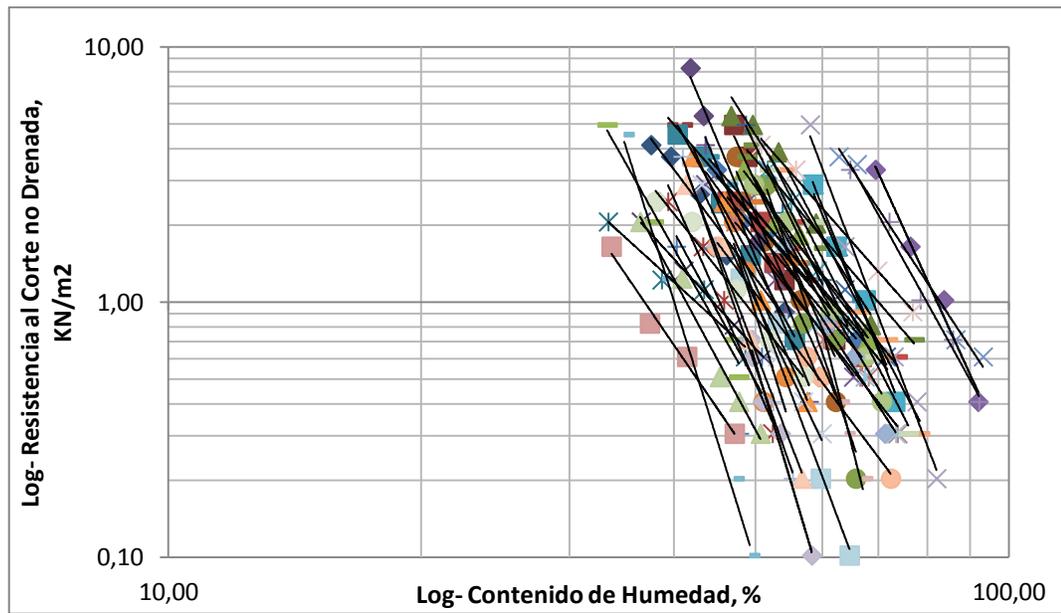


**Figura 24.** Distribución de la Base de Datos Total.

Fuente: Propia.

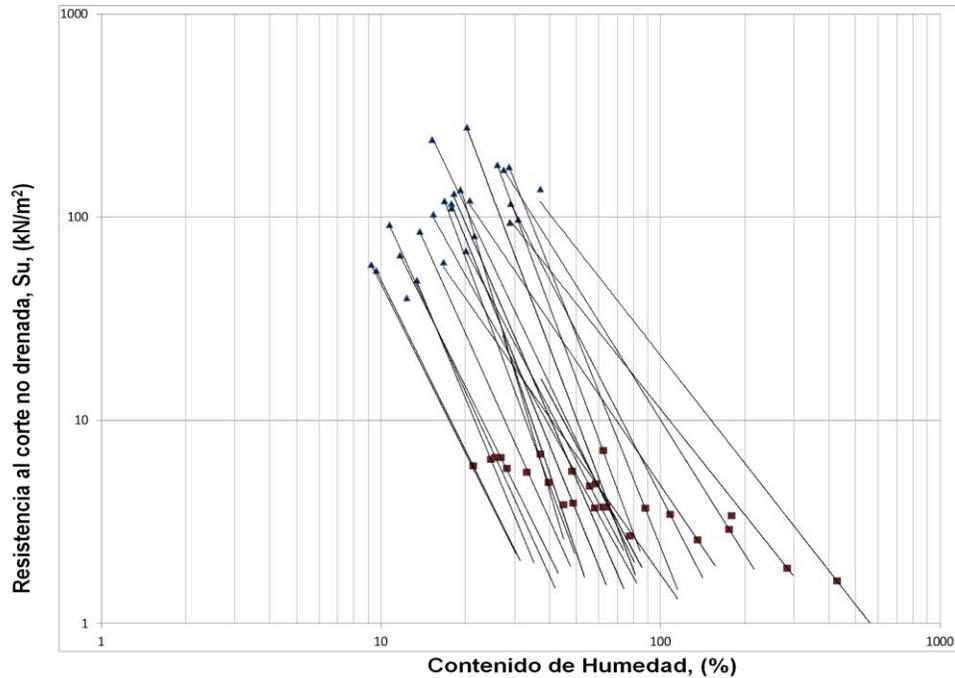
### **Rango de Aplicación del Ensayo de la Resistencia al Corte no Drenada en estado Remoldeado a distintas Humedades**

Para analizar la variabilidad de la Resistencia al Corte no Drenada en estado Remoldeado con distintas humedades, fueron ensayadas 51 muestras con el equipo de Veleta Miniatura de Laboratorio. Estas muestras han sido graficadas en papel logarítmico, así como las 42 muestras empleadas como base de datos original (**Figura 25** y **26** respectivamente), observándose la excelente relación lineal existente.



**Figura 25.** Tendencia lineal resultante de graficar en papel logarítmico la variación de la resistencia al corte con la humedad de las 51 muestras ensayadas.

**Fuente:** Propia.

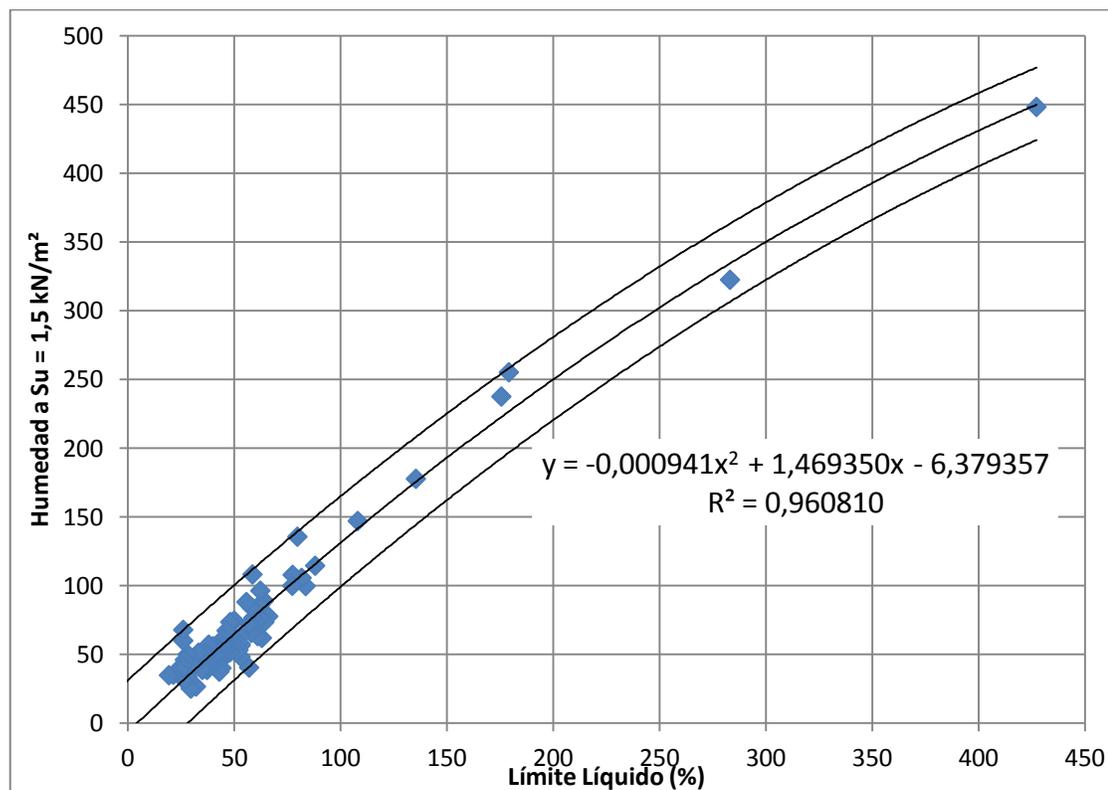


**Figura 26.** Tendencia lineal resultante de graficar en papel logarítmico la variación de la resistencia al corte con la humedad de las 42 muestras que constituyen la base de datos original.

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

### **Pendiente de la Recta Log Su - Log w y Valor de la Humedad a la cual el Suelo tiene una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de 1,5kN/m<sup>2</sup>**

La mayoría de las muestras manejadas para el desarrollo de este trabajo figuraron dentro de un rango de Límite Líquido entre 20(%) y 100(%), como se muestra en **Figura 27**, por lo que los extremos inferiores y superiores a éstos fueron excluidos para la determinación de los valores estadísticos (**Tabla 6, 7, 8 y 9**). Los Límites Líquidos mayores de 100% que en su totalidad correspondieron a suelos arcillosos de alta Plasticidad (CH), están muy alejados de la media del conjunto, por lo que la desviación estándar al incluirlos presenta un aumento considerable (92,97).



**Figura 27.** Correlación entre Límite Líquido y la Humedad para una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de  $1,5\text{kN/m}^2$  de la Base de Datos Ampliada.

**Fuente:** Propia.

**Tabla 6.** Valores Estadísticos de la pendiente (m) y la humedad ( $w_{1,5\text{kN/m}^2}$ ), de las muestras Arcillosas de baja Plasticidad (CL).

Resultados Estadísticos		
	Pendiente (m)	% w ( $1,5\text{kN/m}^2$ )
Máximo	11,06	74,00
Mínimo	2,32	26,00
Rango	8,74	48,00
Promedio	5,34	49,51
Desviación Estándar	2,24	10,50

**Tabla 7.** Valores Estadísticos de la pendiente (m) y la humedad ( $w_{1,5kN/m^2}$ ), de las muestras Arcillosas de alta Plasticidad (CH).

Resultados Estadísticos		
	Pendiente (m)	% w ( $_{1,5kN/m^2}$ )
Máximo	8,43	114,00
Mínimo	1,95	41,00
Rango	6,48	73,00
Promedio	4,78	72,43
Desviación Estándar	1,85	19,21

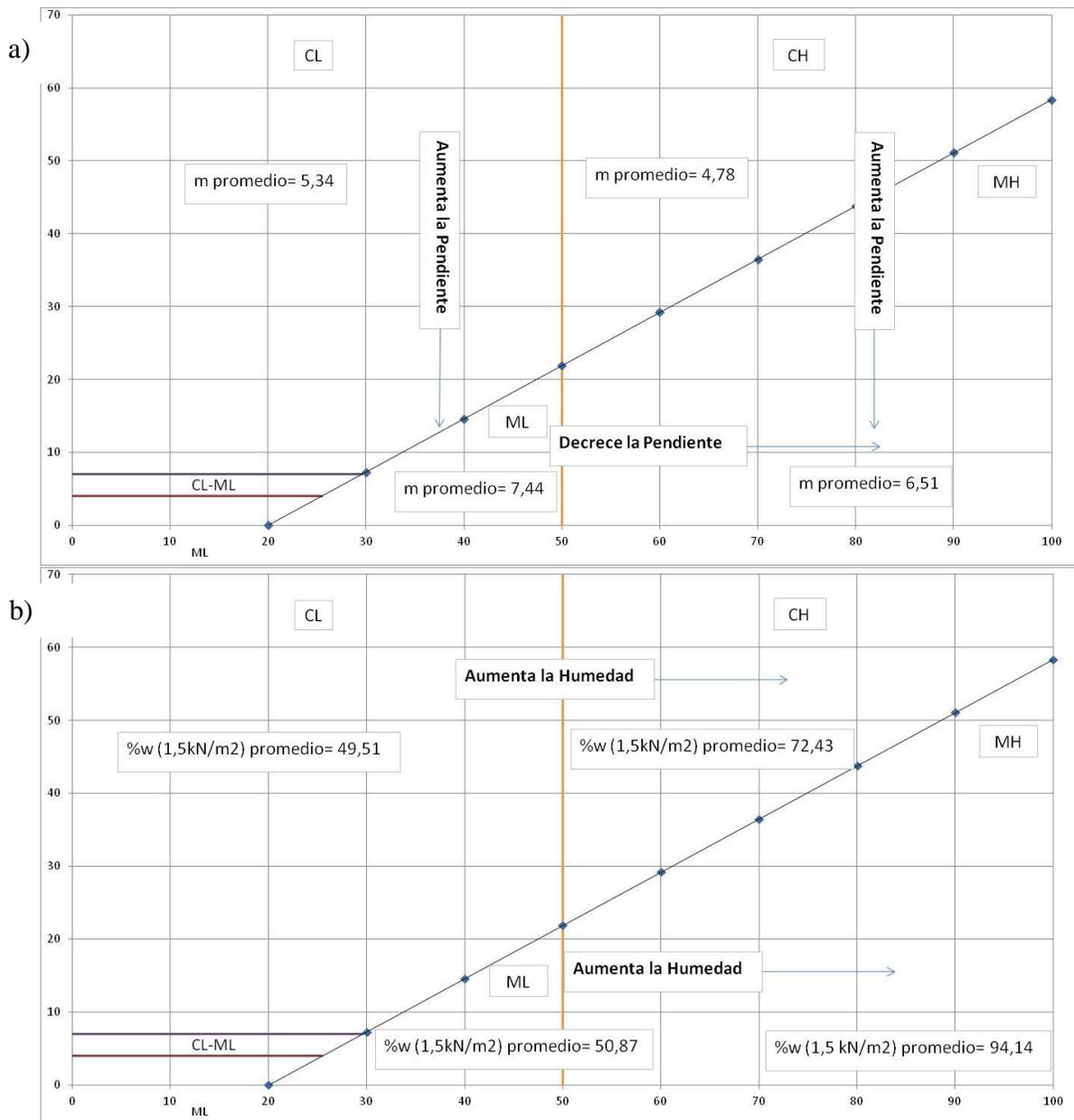
**Tabla 8.** Valores Estadísticos de la pendiente (m) y la humedad ( $w_{1,5kN/m^2}$ ), de las muestras Limosas de baja Compresibilidad (ML).

Resultados Estadísticos		
	Pendiente (m)	% w ( $_{1,5kN/m^2}$ )
Máximo	13,08	63,00
Mínimo	3,61	40,00
Rango	9,47	23,00
Promedio	7,44	50,58
Desviación Estándar	2,53	6,62

**Tabla 9.** Valores Estadísticos de la pendiente (m) y la humedad ( $w_{1,5kN/m^2}$ ), de las muestras Limosas de alta Compresibilidad (MH).

Resultados Estadísticos		
	Pendiente (m)	% w ( $_{1,5kN/m^2}$ )
Máximo	10,17	136,00
Mínimo	4,03	66,00
Rango	6,14	70,00
Promedio	6,51	94,14
Desviación Estándar	2,26	23,98

Los valores de la pendiente y humedad ( $w_{@1,5kN/m^2}$ ) promedio mostrados previamente, se exhiben en la **Figura 28** para representar esquemáticamente el comportamiento de la media del conjunto de cada tipo de suelo fino en la Carta de Plasticidad.

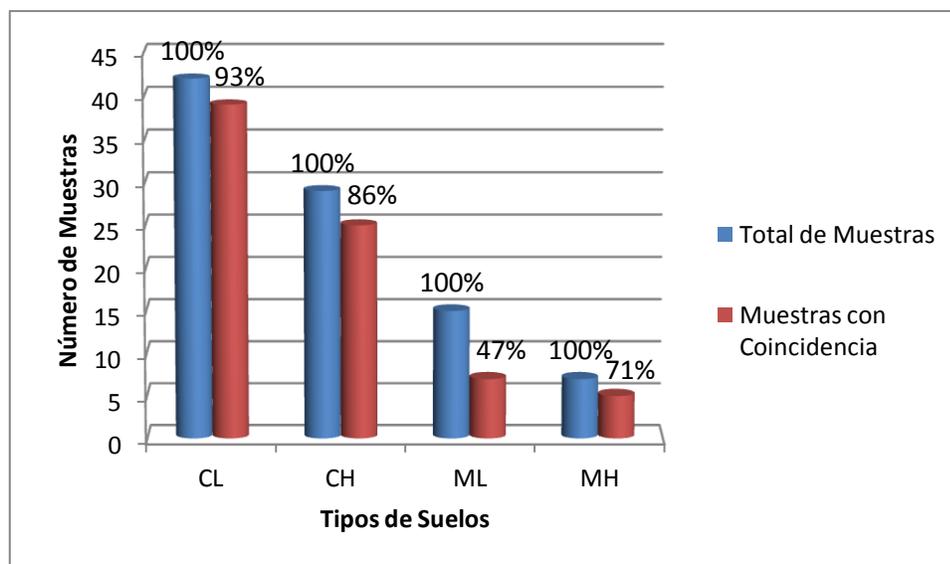


**Figura 28.** Esquematización en la Carta de Plasticidad a) Cambio en la pendiente promedio para cada tipo de suelo fino. b) Cambio en la humedad promedio para cada tipo de suelo fino.

Fuente: Propia.

### Caracterización de los suelos con base a la pendiente de la recta $\log Su - \log w$ y la Plasticidad en función de la base de datos original

Con la finalidad de verificar la robustez del método original, fueron clasificadas 93 muestras, de las cuales 51 pertenecen a la ampliación de la base de datos y las restantes corresponden a la base original de 42 muestras. En la **Figura 29** puede observarse el porcentaje de coincidencia para cada tipo de suelo fino plástico estudiado.



**Figura 29.** Coincidencia entre los Límites de Atterberg y el Método Propuesto Original.

Fuente: Propia.

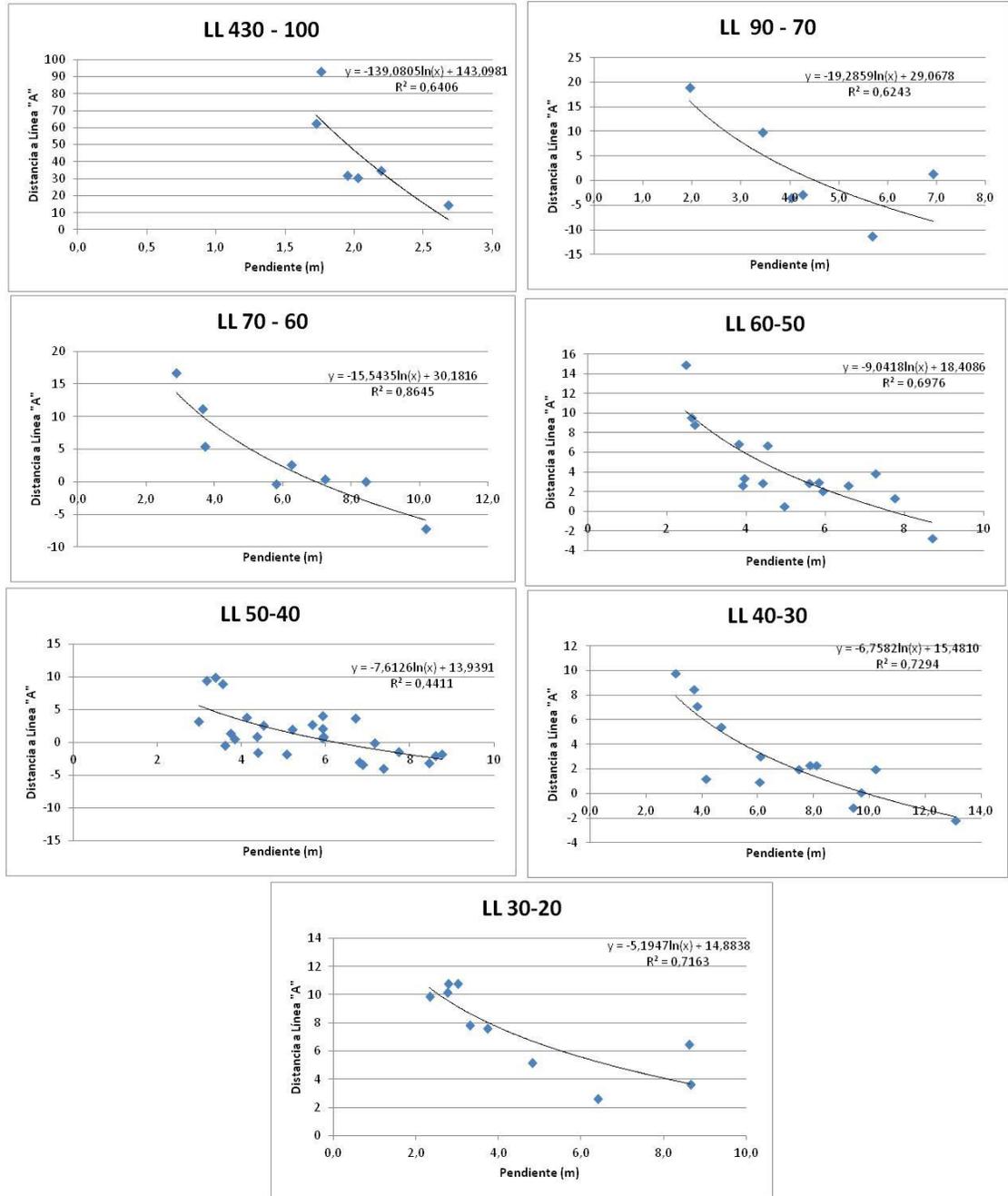
### Ajuste de la Correlación existente entre el Límite Líquido para una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de $1,5\text{kN/m}^2$ ante el aumento de la base de datos original

Al ser aumentada la base de datos de las muestras, se obtuvo la tendencia observada en la **Figura 27**, de la Correlación existente entre el Límite Líquido para una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de  $1,5\text{kN/m}^2$ .

**Ajuste de la Correlación existente entre la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  con distancia a la Línea “A” para distintos rangos de Límite Líquido ante el aumento de la base de datos original**

Para aplicar los conceptos a los suelos utilizados, debe definirse la distancia a la Línea “A” dada por la carta de plasticidad. Al ser establecida, se obtendrán valores negativos correspondiente a los suelos que se encuentran por debajo de la Línea “A” y positivos a los que se encuentren por encima de la misma.

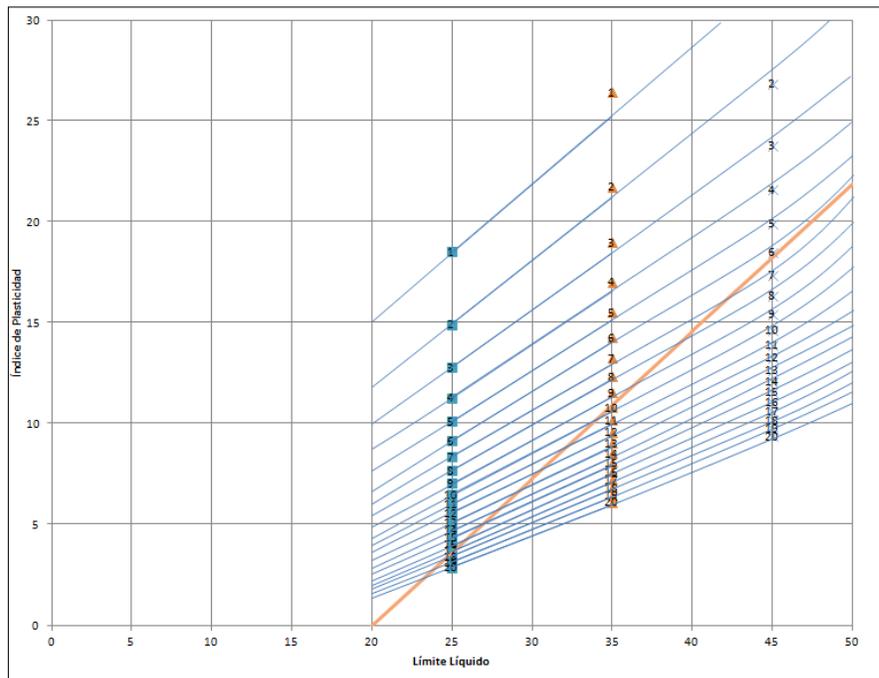
Con la finalidad de analizar la distancia de la Línea “A” junto con los cambios del valor absoluto de la pendiente, fueron estudiados los Límites Líquidos de la base de datos aumentada en los siguientes rangos: 430-100, 90-70, 70-60, 60-50, 50-40, 40-30 y 30-20 estableciendo sus tendencias. **Figura 30.**



**Figura 30.** Ajuste de la Correlación existente entre el valor absoluto de la pendiente de la recta logSu – logw con distancia a la Línea “A” para distintos rangos de Límite Líquido ante el aumento de la base de datos original.

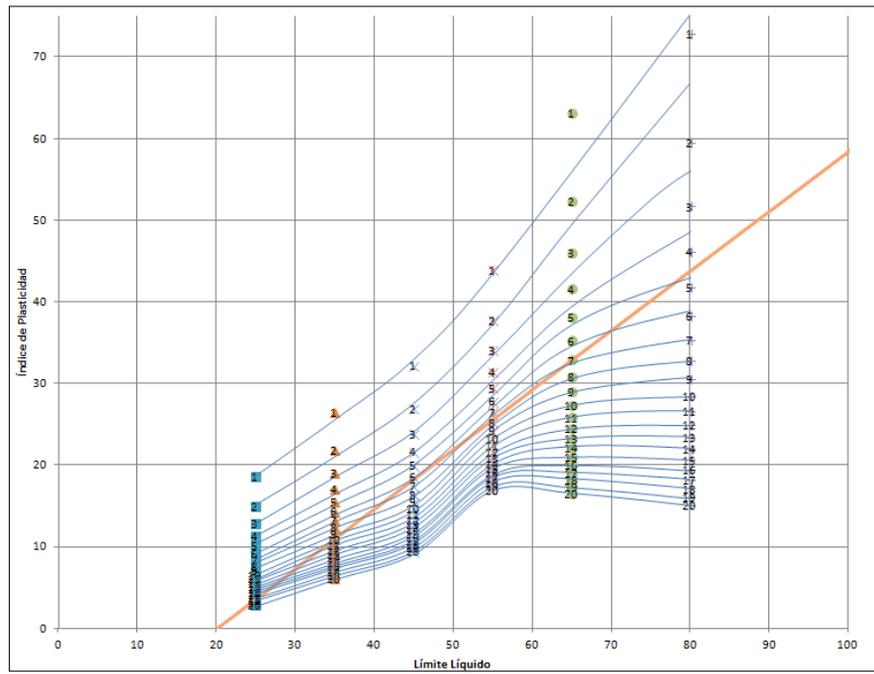
Fuente: Propia.

Una vez establecidas las tendencias, fueron reflejados los cambios del valor absoluto de pendiente con respecto a la Línea “A” en la Carta de Plasticidad, dentro de los rangos de los Límites Líquidos antes mencionados. Se muestran a continuación la definición de las curvas de igual valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$ , recomendándose el uso de la **Figura 31** para Límite Líquido menor de 50, **la Figura 32** para Límite Líquido entre 50 – 80; y finalmente la **Figura 33** para Límite Líquido entre 80 - 300.



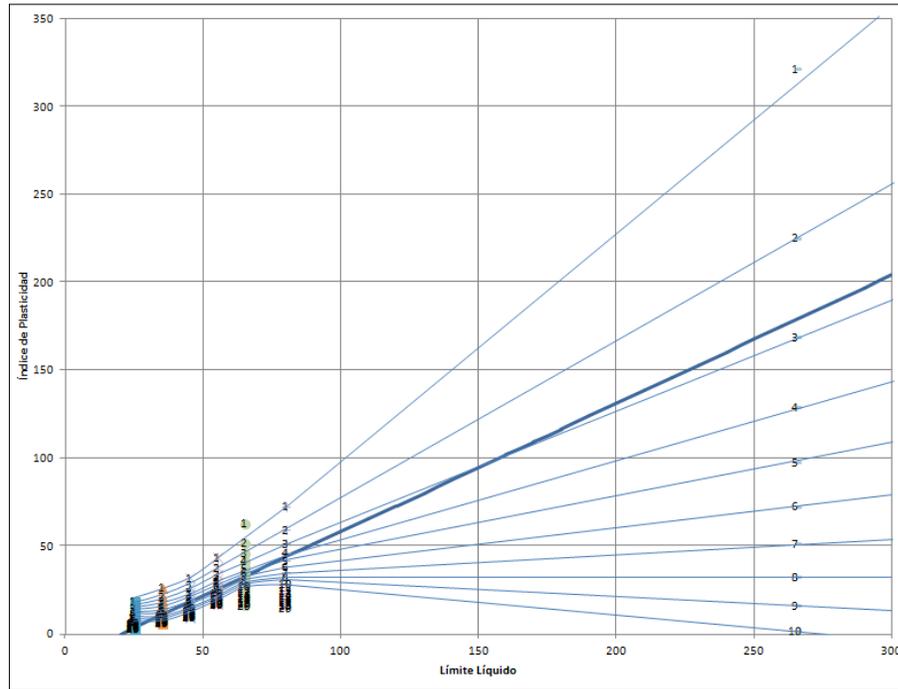
**Figura 31.** Definición de curvas de igual valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  de acuerdo con la plasticidad recomendada para las muestras de suelo con  $LL < 50$ .

**Fuente:** Propia.



**Figura 32.** Definición de curvas de igual valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log S_u - \log w$  de acuerdo con la plasticidad recomendada para las muestras de suelo con  $50 < LL < 80$ .

**Fuente:** Propia.

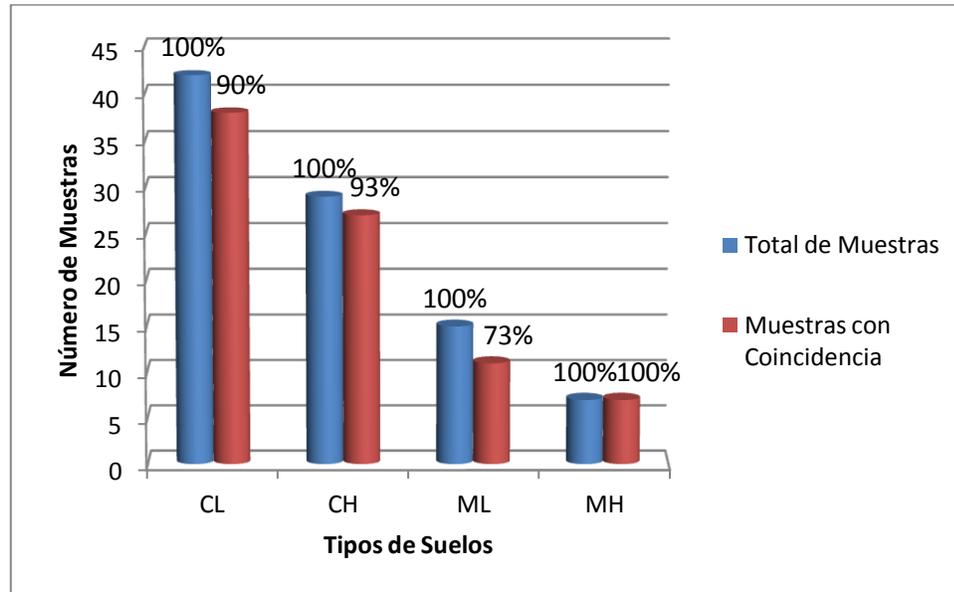


**Figura 33.** Definición de curvas de igual valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log S_u - \log w$  de acuerdo con la plasticidad recomendada para las muestras de suelo con  $80 < LL < 300$ .

**Fuente:** Propia.

### **Caracterización de los suelos con base al valor absoluto de la pendiente de la recta $\log S_u - \log w$ y la Plasticidad en función de la base de datos ampliada**

Al haberse elaborado los ajustes pertinentes como consecuencia del incremento de la base de datos, el porcentaje de coincidencia de las mismas muestras en general aumenta, como puede observarse en la **Figura 34**.



**Figura 34.** Coincidencia entre los Límites de Atterberg y el Método Propuesto con los ajustes realizados al ser ampliada la base de datos.

Fuente: Propia.

Para la determinación de los valores estadísticos de los Límites Líquido e Índice de Plasticidad medio, real y del porcentaje de error de los suelos, mostrados en las **Tablas 10 y 11**, fueron excluidos los datos de los suelos que presentan un Límite Líquido menor a 20(%) y mayor a 100(%), ya que figuran fuera de la mayoría de los datos estudiados.

Cabe destacar que la determinación del Porcentaje de Error, fue realizada entre los valores medios y Reales indicados en la misma. Donde a datos “Reales”, se refiere a los valores reportados por el laboratorio de la empresa donante del material, mientras que el valor “medio” corresponde al resultado de la aplicación del método propuesto.

**Tabla 10.** Valores estadísticos de Límite Líquido medio, real y porcentaje de error.

Resultados Estadísticos			
	LL medio	LL real	% Error
Máximo	95,00	88,00	96,15
Mínimo	29,00	21,30	0,00
Rango	66,00	66,70	96,15
Promedio	46,76	46,80	14,81
Desviación Estándar	11,73	14,33	16,28

**Tabla 11.** Valores estadísticos de Índice de Plasticidad medio, real y porcentaje de error.

Resultados Estadísticos			
	IP medio	IP real	% Error
Máximo	63,00	60,76	266,67
Mínimo	9,00	6,00	0,00
Rango	54,00	54,76	266,67
Promedio	22,44	22,78	25,72
Desviación Estándar	10,48	11,18	37,16

Es importante mencionar que el porcentaje de error de 25,72%, que están indicando el promedio de los valores de Índice de Plasticidad de las muestras, es producto de la variabilidad propia de los Límites de Atterberg, tal como son definidos en la actualidad.

## CAPITULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### **Robustez de la Base de Datos**

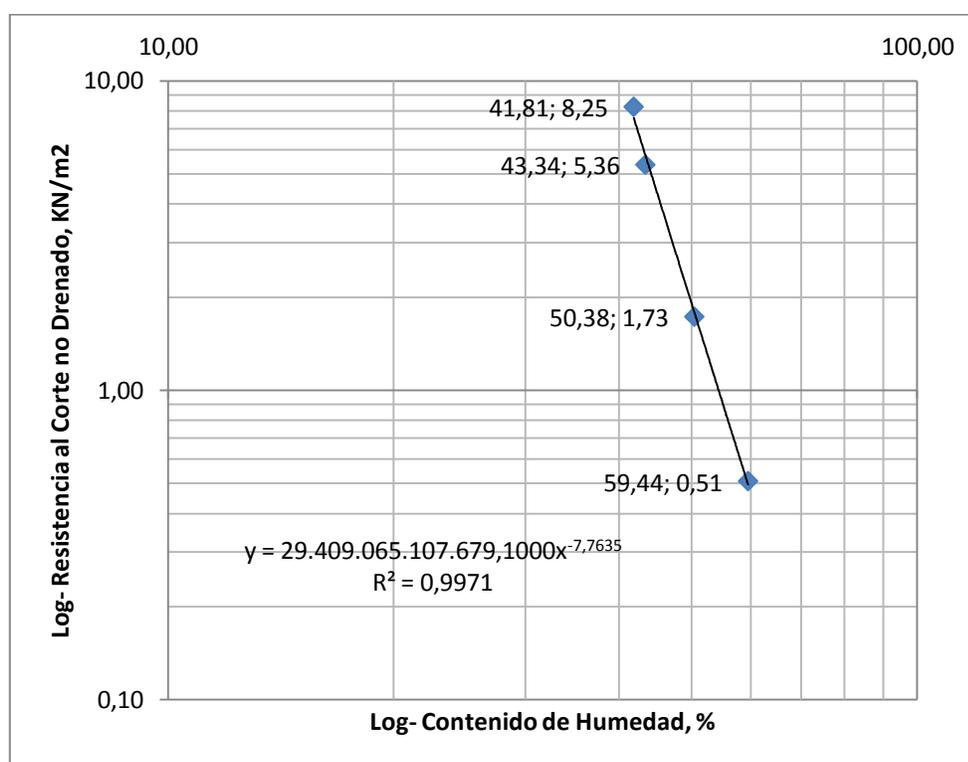
En las **Tablas 4 y 5** pudo verse como la base de datos del método actual ha sido ampliada, ya que se pasó de un número de 42 a 93 muestras de distintas plasticidades. Sin embargo, en la **Figura 24** se puede observar fácilmente que en cuanto a limos se refiere, se tiene un reducido número de muestras. Esta escasez es muy notable en los limos de alta compresibilidad (MH), lo que puede estar causando en la carta de Plasticidad donde fueron definidas las curvas de igual pendiente, ese comportamiento brusco que puede observarse en la **Figura 32**, para un Límite Líquido de 65; véase cómo las curvas de igual pendiente superiores a valores de 8, que están ubicadas por debajo de la línea “A”, a medida que aumentan tienden a ir curveándose con un comportamiento cada vez menos sutil; por lo que se tomará en cuenta este punto en las recomendaciones, al sugerir el estudio y la aplicación del método a muestras de este tipo para corroborar sí el comportamiento se mantiene o presenta alguna variación.

#### **Rango de Aplicación del Ensayo de la Resistencia al Corte no Drenada en estado Remoldeado a distintas Humedades**

Con la finalidad de analizar la variabilidad de la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado con la Veleta Miniatura de Laboratorio y así establecer un rango de aplicación, fueron ensayadas 51 muestras de suelos finos inorgánicos. La representación logarítmica de la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado con la humedad para cada muestra, dieron como resultado un ajuste lineal. Esta tendencia lineal pudo observarse en la totalidad de las muestras ensayadas e incluso de las 42 muestras que constituyen la base de datos original (**Figura 25 y 26**).

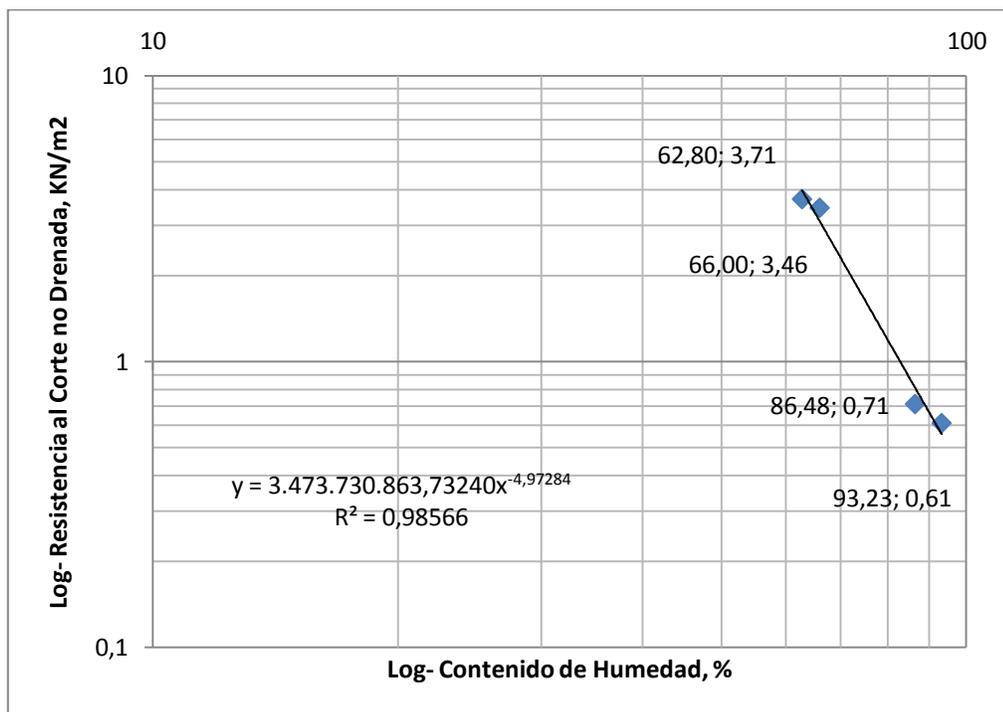
Al momento de la preparación de las muestras, en busca de trabajar con humedades cercanas a los límites y que a su vez se permita una facilidad de manipulación, se hizo uso de un cilindro

graduado; esto nos dio la ventaja de llevar un control del intervalo de humedad manejada, sin embargo, en algunas muestras tuvo mayor peso la trabajabilidad, lo que trajo consigo rangos de humedades más amplios en unas muestras que en otras. Este hecho puede observarse, por ejemplo en las **Figuras 35 y 36**.



**Figura 35.** Rango de Humedad bajo observado en muestra E14.

Fuente: Propia.



**Figura 36.** Rango de Humedad amplio observado en muestra E4.

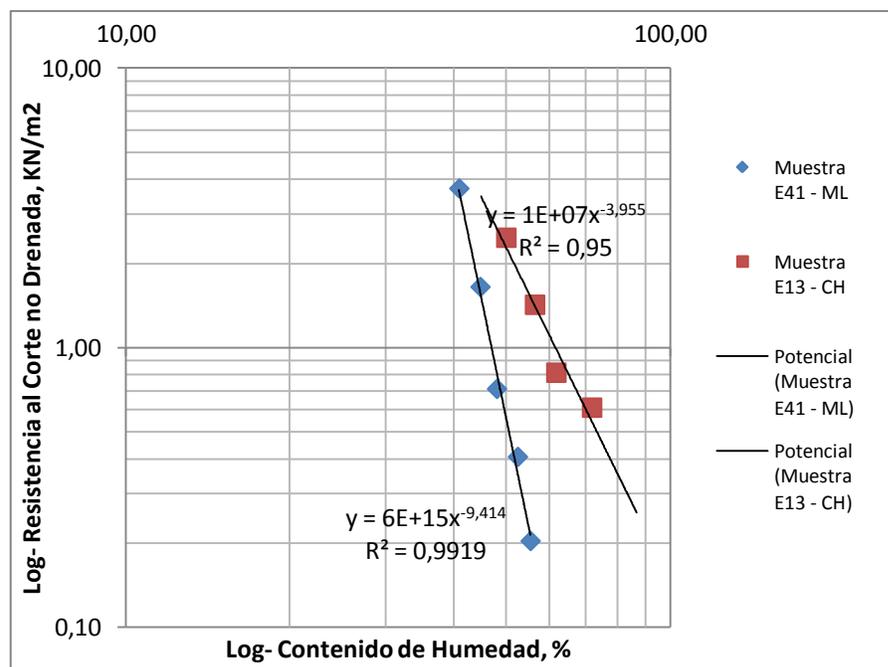
**Fuente:** Propia.

Véase que, independientemente del rango de variación de humedad manejado en cualquier muestra, la tendencia lineal se mantiene, lo que permite inferir que no existe ninguna limitación al momento de variar las humedades, simplemente queda a criterio del operador, manejarlas de tal modo que le permita elaborar los ensayos con mayor comodidad; siempre y cuando con la última humedad que se trabaje, la muestra presente una consistencia tal que permita obtenerse un valor de la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado con la Veleta Miniatura de Laboratorio, y así se establezcan al menos 4 puntos que permitan definir el gráfico para poder aplicar el método propuesto.

En caso de que se desee determinar el valor de la humedad a la cual el suelo se encuentra ante una resistencia al corte en estado remoldeada no drenada conocida, y la misma no se halle en el intervalo obtenido, puede simplemente realizarse una extrapolación gracias a la excelente relación lineal que guarda esta correlación.

**Pendiente de la Recta Log Su - Log w y Valor de la Humedad a la cual el Suelo tiene una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de 1,5kN/m<sup>2</sup>**

Como hemos mencionado antes, cuando se grafica en papel log-log el cambio de la resistencia al corte con la humedad, se obtiene una recta, cuyo valor absoluto de la pendiente de la misma está intrínsecamente vinculada con el Índice de Plasticidad, tal como se aprecia en la **Figura 37**.



**Figura 37.** Ejemplos de la Variación de la Resistencia al Corte no drenada de las Muestras E41 (ML) y E13 (CH).

**Fuente:** Propia.

La esquematización de este vínculo se demuestra en la **Figura 28 (a)** donde se reflejan las pendientes promedio de los distintos tipos de suelo finos plásticos estudiados, mostrados en las tablas de datos estadísticos **6, 7, 8** y **9**. En dicha figura, puede verse cómo las arcillas de baja plasticidad (CL) tienen una menor pendiente que los limos de baja compresibilidad (ML). Lo mismo ocurre con las arcillas de alta plasticidad (CH) que poseen una pendiente menor a la de

los limos de alta compresibilidad (MH). Ahora bien, si nos movemos horizontalmente y comparamos entre sí las arcillas de baja y alta plasticidad, podemos ver que se cumple que las CL tienen una mayor pendiente que las CH, esto ocurre igualmente con los limos de baja y alta compresibilidad. Este comportamiento de la pendiente era esperado ya que como es sabido, existe una interacción entre la presencia del contenido de finos no plásticos, tipo de mineral de arcilla, forma y tamaño del mismo; siendo estos quienes dominan la plasticidad del suelo, que se refleja a su vez en la pendiente de la recta resultante.

Ahora bien, para entender mejor cómo es la relación que existe entre el valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  y el Índice de Plasticidad véase la **Figura 30**. En ella se muestran los gráficos del valor absoluto de la pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  con la distancia a la Línea “A” para distintos rangos de Límite Líquido. Las tendencias presentes en los gráficos, muestran cómo a mayor distancia a la Línea “A” menor es la pendiente de la recta y viceversa. Ya que la distancia a la Línea “A” es una medida indirecta del Índice de Plasticidad, y se ha observado un comportamiento característico de las pendientes en la carta de Plasticidad, puede decirse entonces, que a menor valor absoluto de la pendiente, mayor será el Índice de Plasticidad; así como a menor pendiente, mayor será el Índice de Plasticidad del suelo.

Según los resultados obtenidos al escoger un valor bajo de resistencia al corte lograda con la Veleta Miniatura de Laboratorio de  $1,5 \text{ kN/m}^2$ , se pudo apreciar que se tiene una muy buena afinidad entre la humedad a esa resistencia y el Límite Líquido; tal como se muestra en la **Figura 27**, donde se ilustra la correlación entre el límite líquido y la humedad, obteniendo una tendencia polinómica de segundo orden, que guarda un excelente ajuste en relación con los datos.

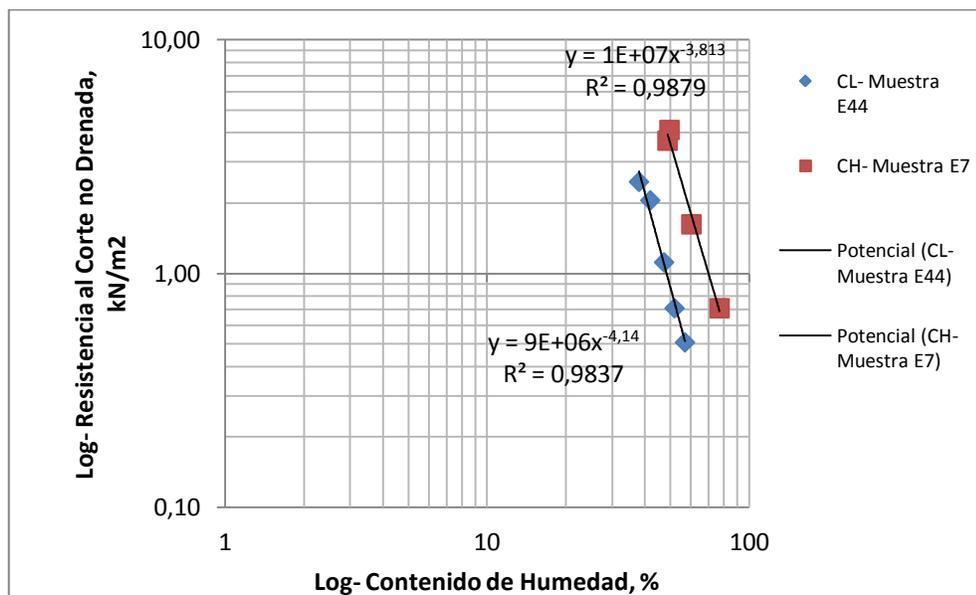
Se puede apreciar con más detalle en el **Anexo 4**, donde se reflejan los valores característicos de cada muestra de suelo empleado, cuán certero resulta ser este ajuste; al observar el porcentaje de error que existe entre el valor de Límite Líquido medio obtenido con este arreglo

y el reportado por el laboratorio, determinado de acuerdo al ensayo de límites de consistencia (ASTM D 4318-84). Es de notar que no se sobrepasa un 20% de error en la gran mayoría de las muestras, las que superan este porcentaje reflejan el error natural intrínseco de los límites de Atterberg y no de este método propuesto.

Una vez demostrado lo certero del ajuste y con objeto de reflejarle al lector el comportamiento esperado de la humedad a este valor de  $S_u=1,5\text{kN/m}^2$  en la Carta de Plasticidad, se realizaron los cálculos estadísticos presentes en las tablas **6, 7, 8 y 9**; y representados en la **Figura 28 (b)**.

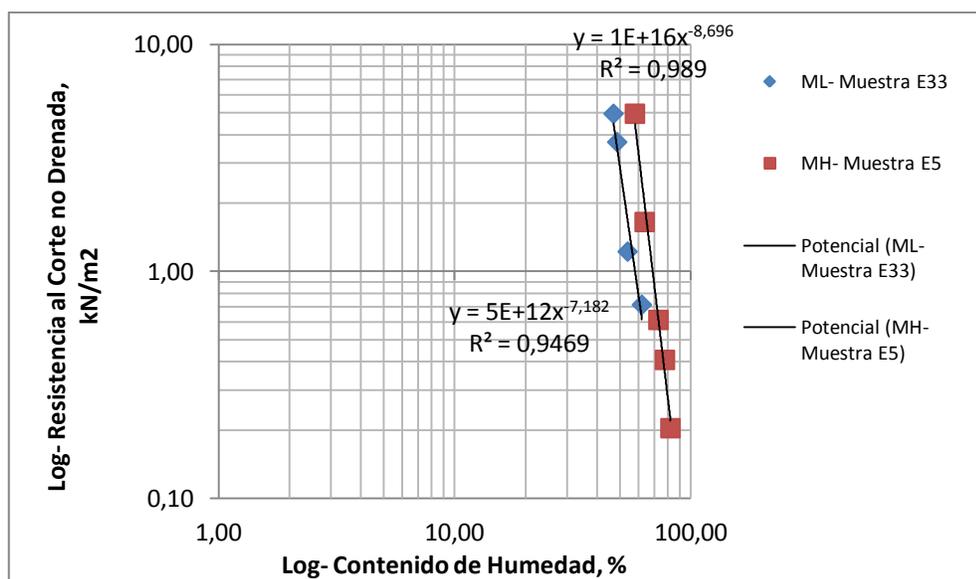
En dicha figura se observa, cómo la humedad que presenta el suelo a un valor de resistencia al corte no drenado en estado remoldeado de  $1,5\text{kN/m}^2$ , muestra un comportamiento característico para cada tipo de suelo, que a diferencia de la pendiente, sólo varía horizontalmente. Las arcillas de baja plasticidad presentaron como comportamiento medio del conjunto una menor humedad que las arcillas de alta plasticidad; esto mismo ocurre entre los limos de baja y alta compresibilidad.

El contenido de humedad que sea capaz de adsorber un suelo, controlará la ubicación en el espacio (con respecto al eje de las abscisas) de la recta resultante al graficar la variación de la resistencia corte no drenada en estado remoldeado con la humedad. Véase la **Figura 38**, donde al ser graficadas dos Arcillas cualesquiera, una de baja plasticidad y otra de alta plasticidad; la primera resulta ubicada a la izquierda y la otra a la derecha del gráfico. Esto mismo se observa en la **Figura 39**, con referencia esta vez a los limos de alta y baja compresibilidad, quienes presentan el mismo comportamiento.



**Figura 38.** Ubicación en el espacio de las muestras E44 y E7.

Fuente: Propia.



**Figura 39.** Ubicación en el espacio de las muestras E33 y E5.

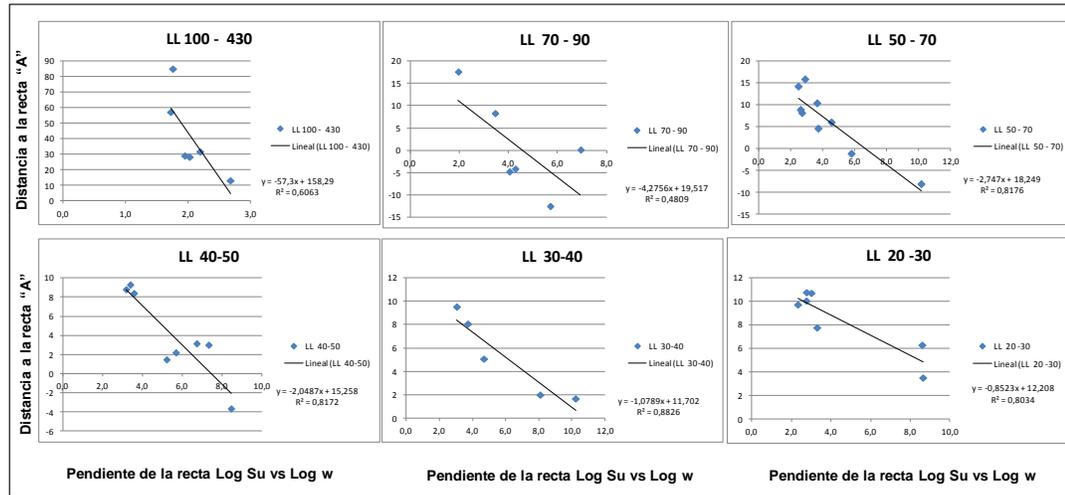
Fuente: Propia.

### **Caracterización de los suelos con base a la pendiente de la recta $\log S_u - \log w$ y la Plasticidad en función de la base de datos original**

Antes de realizar el análisis correspondiente, es importante acotar que al mencionarse el término “Coincidencia”, se está haciendo referencia a sí al aplicar el método propuesto, la muestra clasifica igual, al tipo de suelo reportado por el laboratorio, a través del Ensayo de límites de consistencia (ASTM D 4318-84).

Al aplicar el método original para clasificar los 93 suelos, se obtuvieron los porcentajes de coincidencia mostrados en la **Figura 29**. Donde puede observarse que el menor porcentaje de coincidencia corresponde a los limos de baja compresibilidad (ML) con un 47%, mientras que el mayor porcentaje lo presentan las arcillas de baja plasticidad (CL). Esto se debe, en el caso de los ML al reducido número de este tipo de suelo en la base de datos original; o en el caso contrario para las CL al mayor número de muestras de este tipo que conforman dicha base de datos.

La carta de plasticidad donde están definidas las curvas de igual pendiente de la recta  $\log S_u - \log w$  propuestas por Echezuría (**Figura 1**) posee escasa información para algunos valores de pendiente, lo que genera incertidumbre y por tanto poca precisión al momento de realizar las interpolaciones necesarias para determinar el Índice de Plasticidad. Estas curvas fueron definidas a partir de la correlación entre la pendiente de la recta  $\log S_u - \log w$  con distancia a la recta “A” para distintos rangos de Límite Líquido (**Figura 40**).



**Figura 40.** Correlación entre la pendiente de la recta log Su-log w con distancia a la recta “A” para distintos rangos de límite líquidos.

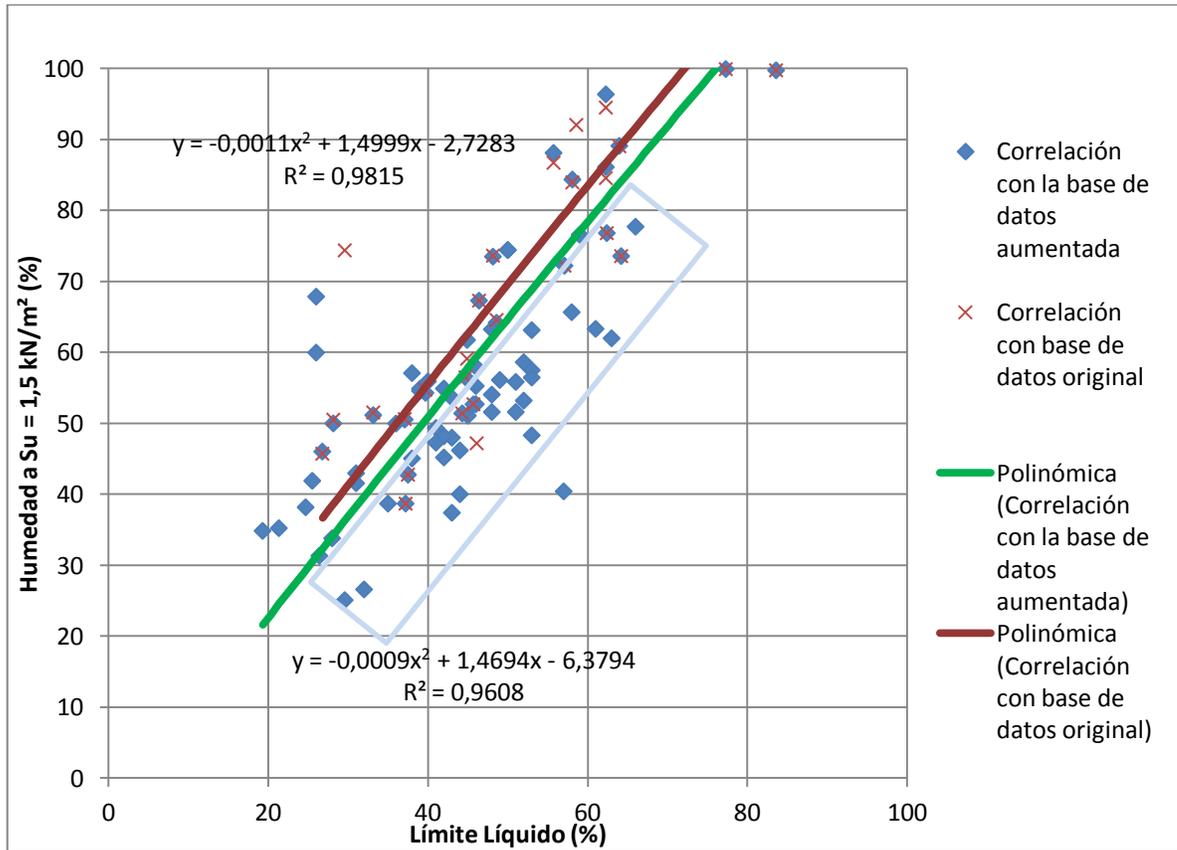
**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

Como se observa en la misma, la escasa base de datos de los suelos presentes en las distintas categorías estudiadas por el autor del método, lo obligó a utilizar arreglos lineales para definir el comportamiento de las curvas de igual pendiente en la carta de Plasticidad. Dándose a ver también, como ésta limitada base de datos es muy notoria para muestras con pendientes que figuren por debajo de la Línea “A”, es decir, que esto es lo que está generando el bajo porcentaje de coincidencia que están presentados los limos al ser clasificados con el método original. Se puede inferir por tanto, que los porcentajes de coincidencia de las arcillas de alta plasticidad y limos de alta compresibilidad, están siendo afectados por lo análogo analizado con los limos de baja compresibilidad.

### **Ajuste de la Correlación existente entre el Límite Líquido para una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de $1,5\text{kN/m}^2$ ante el aumento de la base de datos original**

La tendencia de la Correlación existente entre el Límite Líquido para una Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado de  $1,5\text{ kN/m}^2$ , generó un ajuste similar al de la correlación propuesta en el método original (**Figura 4**). Observándose que al aumentar la base de datos, el factor de ajuste en relación a los mismos ( $R^2$ ) ha disminuido, ya que de 0,98 ha pasado a un valor de 0,96, más sin embargo, se encuentra dentro del mismo orden.

Esta disminución a pesar de ser un poco menor, está indicando un comportamiento que va a generar un aumento del Límite Líquido al realizar el procedimiento de clasificación propuesto por el método una vez aumentada la base de datos. Tal como se observa en la **Figura 41**, este comportamiento se debe a que una gran cantidad de las muestras incluidas para robustecer la base de datos, se están ubicando en la zona más baja (delimitada en el cuadro azul), lo que está generando que la curva de tendencia se esté desplazando ligeramente hacia la derecha y hacia abajo, con respecto a la línea de tendencia original determinada por el autor del método; permitiendo confirmar que a pesar de que la base de datos original era limitada, las tendencias que estableció el autor ciertamente fueron sólidas, ya que su zona de predicción de abarque de futuros valores se encontró muy próxima a la que actualmente se está presentando con el aumento de la base de datos.



**Figura 41.** Desplazamiento de la línea de tendencia respecto a la obtenida con la base de datos original.

Fuente: Propia.

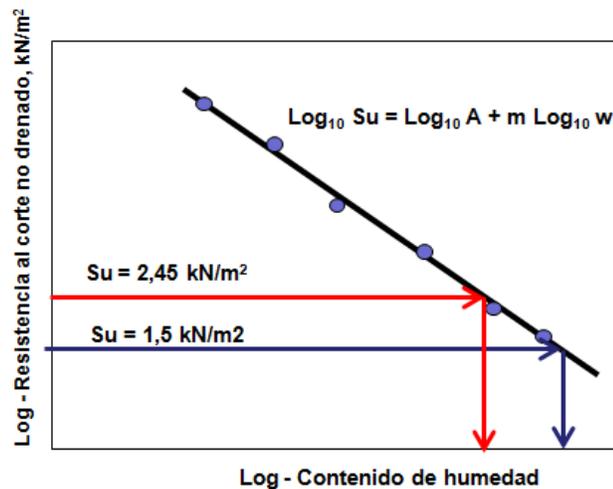
Esto último mencionado, está indicando que los puntos que se están encontrando en los límites exteriores de esta tendencia central, están presentando valores de Límite Líquido muy alejados a los que deberían estar indicando mediante su determinación con la elaboración de su ensayo en laboratorio. Con el objetivo de determinar una “aproximación” de cuán alejados están estos valores de la tendencia central, es decir, de los valores esperados o que generan mayor grado de confiabilidad; al realizar el método para clasificar la totalidad de los suelos, se realizaron curvas paralelas a dicha tendencia, correspondientes a las líneas extremas observadas en la **Figura 27**.

Estos rangos extremos, fueron también tomados en cuenta para determinar lo que en la **Anexo 4 y 5** aparecen como LL mínimo, LL máximo, Ip mínimo e Ip máximo. Véase como estos valores están subestimando ó en caso contrario sobreestimando, el valor esperado de Límite líquido e Índice de Plasticidad que debe presentar el suelo al ser clasificado con el método (LL medio e IP medio); lo que a su vez explica el porcentaje de error del promedio de los valores presentados en las **Tablas 10 y 11**.

Al analizar con mayor detalle los valores extremos presentes en la correlación, se pudo observar que los encontrados hacia el extremo inferior están presentado un valor de Límite Líquido mayor que el valor de porcentaje de humedad que presenta el suelo a una resistencia al corte no de drenada de  $1,5\text{kN/m}^2$  (**Tabla 12**); dicho valor de Límite Líquido es imposible que esté en lo correcto, ya que como bien se sabe, la determinación de este valor con la copa de Casagrande corresponde a la humedad en que el suelo presenta una resistencia al corte de  $25\text{gr/cm}^2$ , lo que equivale  $2,45\text{kN/m}^2$ . Al ser este último valor mayor a los  $1,5\text{kN/m}^2$ , que es donde se espera el comportamiento del suelo esté en el rango líquido, y la pendiente resultante de graficar en papel logarítmico la variación de la resistencia al corte no drenada en estado remodelado con la humedad siempre descendiente, demuestra que este Límite Líquido reportado en laboratorio está errado (**Figura 42**).

**Tabla 12.** Muestras ubicadas en el extremo inferior de la tendencia central.

Muestra	$W@1,5\text{kN/m}^2$	LL (%)	w - LL	Clasificación
E2	62,01	63,00	<b>-0,99</b>	CH
E6	40,44	57,00	<b>-16,56</b>	CH
E9	48,34	53,00	<b>-4,66</b>	CH
E24	40,04	44,00	<b>-3,96</b>	ML
E28	37,43	43,00	<b>-5,57</b>	CL
E44	26,63	32,00	<b>-5,37</b>	CL
BARBOTINA	25,12	29,58	<b>-4,46</b>	CL



**Figura 42.** Diagrama esquemático de la recta log  $S_u$ -log  $w$  indicando las resistencias al corte de ambos métodos.

Fuente: Propia.

Ahora bien, los valores ubicados en el extremo superior están indicado que el valor del Límite Líquido reportado por el laboratorio está siendo subestimado, ya que es mucho menor que el valor de la humedad que presenta el suelo a una resistencia  $S_u=1,5\text{kN/m}^2$ , quien como ya se demostró, guarda una excelente correlación con el Límite Líquido determinado mediante el procedimiento de la copa de Casagrande, que luce independientemente de las propiedades del suelo. Esta subestimación del Límite Líquido determinado en laboratorio, puede deberse a que ante la preparación de la muestra, no se respete el tiempo de curado necesario para lograr una adecuada distribución de la humedad que permita la hidratación de las partículas finas; ó que por otro lado, el contenido de partículas no plásticas presente sea muy alto y al agregarle el agua se estén formando meniscos que no son propios del comportamiento de los suelos plástico, haciéndole creer al operador que el agua agregada se está incorporando por completo al suelo. Proceder a realizar el ensayo bajo estas condiciones genera una distorsión total en la determinación del límite Líquido.

### **Ajuste de la Correlación existente entre la pendiente de la recta $\log Su - \log w$ con distancia a la Línea “A” para distintos rangos de Límite Líquido ante el aumento de la base de datos original**

La **Figura 30** muestra los rangos de Límite Líquido analizados, observándose que el aumento de la base de datos, generó consigo un mayor número de muestras que presentaron Límite Líquido entre 70 y 50, lo que nos permitió dividir en dos, el rango único que originalmente el autor analizó dentro de estos límites. Esto fue realizado para obtener una mayor precisión al momento de definir las curvas de igual pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  en la carta de Plasticidad. Cabe destacar que de igual forma, se presentó un mayor número de muestras con pendientes encontradas por debajo de la línea “A” e incluso sobre la misma, en su mayoría, dentro del rango de Límites comprendido entre 50-40; cosa que no presenciaba con tanta magnitud en el método original.

Nótese que el aumento de la cantidad de pendientes dentro de los rangos, permitieron definir tendencias logarítmicas, ya que son las que mejor se ajustaron a los datos analizados; siendo esta distinta a la empleada por el autor del método (lineal) (**Figura 40**), debido a la escasa base de datos que tenía a su disposición.

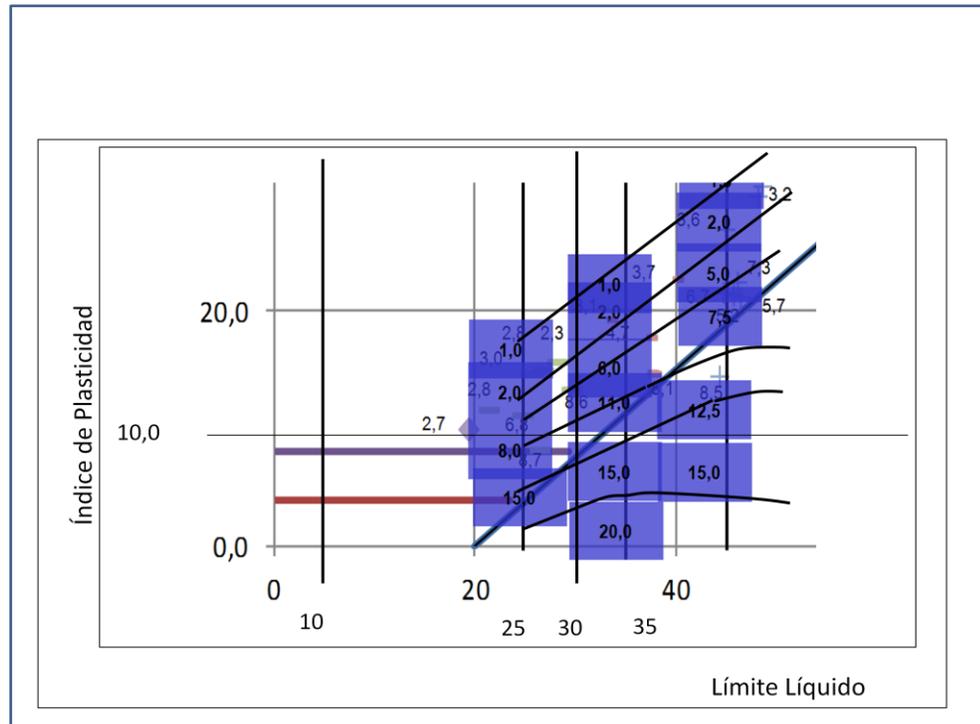
Estos ajustes dieron lugar a las curvas de distinta pendiente definidas en las **Figuras 31, 32 y 33**. En las cuales puede observarse, cómo ahora el comportamiento definido por las mismas, tiene una mayor precisión que la observada con el método original. Es por ello que la incertidumbre y el margen de error al momento de realizar la interpolación de la pendiente, disminuye considerablemente. Cabe acotar que, es importante realizar el estudio del método, a un número considerable de muestras que presenten valores de Límite Líquido superiores a 100(%), para manejar una mayor robustez y definir sí el comportamiento establecido en las curvas de igual pendiente, al ajustar los datos, se mantiene.

El empleo de las tendencias logarítmicas, son las que dan respuesta a que los intervalos entre las pendientes sean más amplios a medida que se alejan por encima de la recta “A” y más

cercanos a medida que se alejan por debajo de la misma. Véase el comportamiento descrito anteriormente en la **Figura 31, 32 y 33** donde las curvas correspondientes a las menores pendientes, que son las que están más alejadas a la Línea “A”, se encuentran más separadas; y a medida que se alejan por debajo a la dicha recta, van acercándose cada vez más.

Otro aspecto importante en cuanto al comportamiento de las curvas, tal como se mencionó en el punto de la Robustez de la base de datos, es el comportamiento brusco que puede observarse en la **Figura 32** para un Límite Líquido de 65, debe por tanto ser estudiado con mayor profundidad, aumentando la base de datos de suelos que presenten un Límite Líquido entre 50 y 70, con Índices de Plasticidad menores a 20.

Ahora bien, en cuanto a la posición en el espacio de las curvas en la Carta de Plasticidad, se observa un desplazamiento de las mismas únicamente con respecto al eje de las ordenadas (IP), comportamiento esperado ya el aumento de la base de datos permitió abarcar mayores de valores de pendientes, mas no fueron aumentados los números de muestras con Límite Líquido en los límites superior e inferior a los que estudió el autor del método. Para ver mejor este comportamiento, empleamos como guía las pendientes que se encuentran justo por encima y por debajo de la Línea “A” y analizamos únicamente las **Figuras 31 y 32**, ya que brinda mayor comodidad para su entendimiento. Ya una vez ubicados en estas figuras, vamos a incluir ahora la curvas definidas por el autor del método (**Figura 43 y 44**), y vamos, con la ayuda de ambas a hacer una comparación de este movimiento que se ha observado en la curvas de igual pendiente.



**Figura 43.** 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  $LL < 50$ .

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

Para analizar las figuras **31** y **43**, donde se muestran las curvas de igual pendiente definidas mediante la elaboración de este trabajo y las definidas por el autor del método respectivamente, para valores de Límite Líquido menores a 50 en la Carta de Plasticidad; vamos a analizar la pendiente que corte con la Línea “A” para el valor del Límite Líquido promedio resultante de cada uno de los rangos de estudio establecidos en las **Figuras 30** y **40**.

En el Rango de  $20 < LL < 30$ , al ingresar en las Cartas de Plasticidades donde se encuentran definidas las curvas (**Figuras 31** y **43**) con un valor de  $LL=25$ , véase como el valor de la pendiente que corta con la Línea “A” aumenta de  $m=17$  a lo que originalmente era de  $m=15$ ; esto indica que las curvas para ese Límite Líquido ascendieron, lo que es debido a que el aumento de la base de datos permitió aumentar únicamente para este rango, suelos ubicados

por encima de la Línea “A”, es decir, solo se presentaron dentro de este rango un aumento de muestras de arcilla de baja plasticidad (CL).

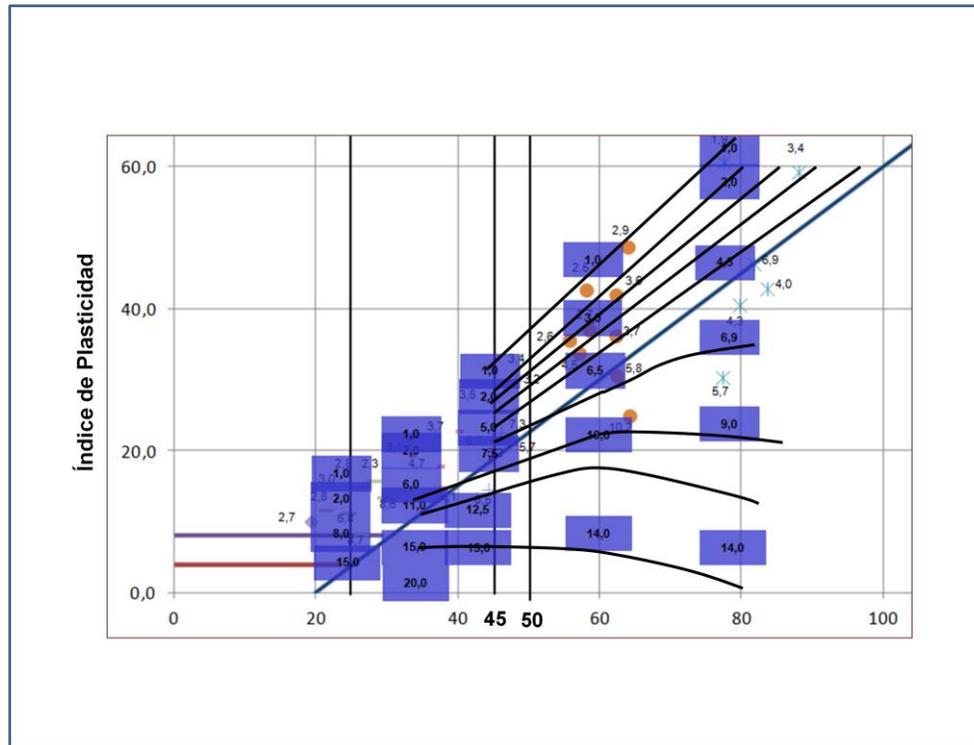
Al pasar al siguiente rango ( $30 < LL < 40$ ) e ingresar a las mismas figuras ya mencionadas, con un  $LL=35$  y cortando con la Línea “A”, se observó que la pendiente ahora pasó a ser de  $m=9,8$ , cuando con el método original es de  $m=11$ ; esto nos indica que las curvas descendieron aunque no muy notoriamente, ya que el aumento de la base de datos a pesar de generar un incremento de muestras por encima de la recta “A” (CL), también permitieron aumentar el número de muestras que figuran por debajo de la misma (ML).

Finalmente al ingresar con el último  $LL=45$  que puede analizarse en las **Figuras 31 y 43**, resultante del rango de  $40 < LL < 50$ , y repitiendo el procedimiento descrito; se observa como la pendiente definida con la base de datos aumentada indica un valor de  $m=6,5$  y con la base original arroja un valor de  $m=7,5$ . Para este Límite Líquido se puede ver, al igual que en el caso anterior, las pendientes están descendió y por la misma razón.

Vamos ahora a pasar a la **Figura 32 y 44**. Donde se muestran las curvas de igual pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  de acuerdo con la plasticidad para la muestra de suelos estudiados con  $50 < LL < 80$ ; para analizar cómo está influyendo en el comportamiento de las curvas el aumento de las muestras de arcillas de alta plasticidad y limos de alta compresibilidad.

Primero analizaremos el rango de Límite Líquido entre 50-70 estudiado por el autor del método, y ya que como se dijo anteriormente, para este trabajo se logró dividir en dos rangos 50-60 y 60-70; se ingresó entonces con  $LL=60$  y se observa como la pendiente pasó de  $m=6,5$  con las curvas del método original a  $m=7,2$  con el aumento de la base de datos; lo que indica que las curvas ascendieron debido al aumento de muestras CH y bajo número de las MH agregadas (**Tabla 4 y 5**).

Ya que la base de datos no aumento el número de muestras con Límite Líquido entre los restantes rangos, se observó como la pendiente se mantuvo igual al ingresar en las **Figura 32** y **44**; siendo este un valor de pendiente para LL=80 de  $m=4,8$  para ambas.



**Figura 44.** Definición de curvas de igual pendiente de la recta  $\log Su - \log w$  de acuerdo con la plasticidad para la muestra de suelos estudiados con  $LL > 50$ .

**Fuente:** “Correlación entre la Resistencia al Corte no drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo”, Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H.

### **Caracterización de los suelos con base al valor absoluto de la pendiente de la recta $\log Su - \log w$ y la Plasticidad en función de la base de datos ampliada**

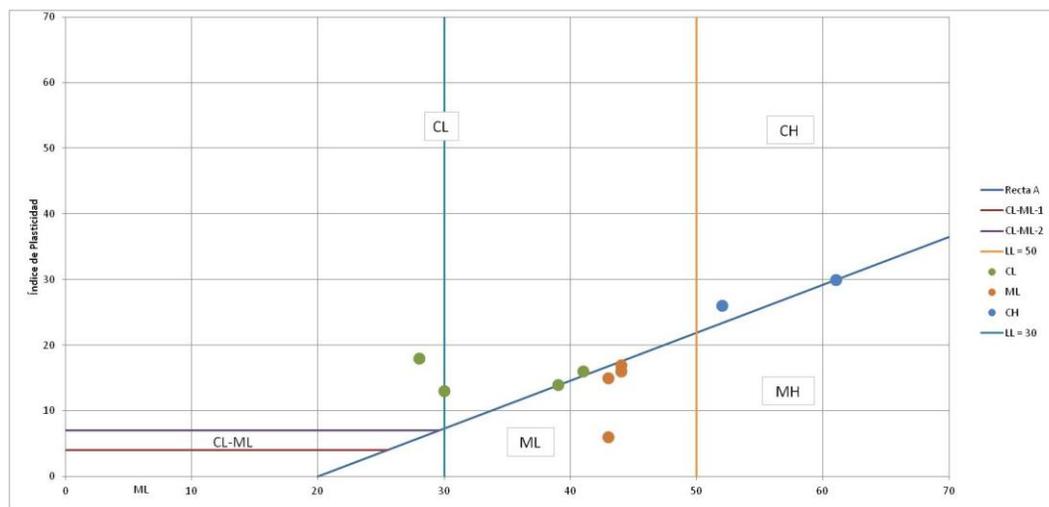
Se certifica la solidez de las tendencias establecidas por el método originalmente propuesto por Echezuría. Sin embargo, al ser aumentada la base de datos, se garantiza mayor precisión y

fácil manejo, sobre todo al momento de emplear las curvas de igual valor absoluto de la pendiente, trazadas en la Carta de Plasticidad (**Figura 31, 32 y 33**).

Esta mayor precisión se demuestra, ya que los porcentajes de coincidencia han aumentado en cuanto a los limos de alta y baja compresibilidad, así como para las arcillas de alta plasticidad, por lo que la disminución del porcentaje de coincidencia en las arcillas de baja plasticidad de un 93% a 90%, da un indicio del efecto que han generado los ajustes al ser aumentada la base de datos.

Con referencia a lo anterior, realizando el análisis de la totalidad de los porcentajes que no están mostrando coincidencia con la clasificación reportada por los laboratorios, se concluye es debido al desplazamiento de las curvas de igual pendiente, acentuando aún más la sensibilidad de estos datos ubicados en la vecindad de la línea "A"; así como los ubicados en el umbral que distingue los suelos entre plasticidad media o alta ( $LL=50$ ); siendo estas dos zonas las de mayor susceptibilidad en la Carta de plasticidad, ya que allí es donde la influencia del operador más se hace notar ( **Figura 45**).

Por otra parte, dos de las muestras, están exentas a lo anteriormente mencionado y corresponden a una muestra limosa de baja compresibilidad y una arcilla de baja plasticidad. Como ya se ha dicho antes, este tipo de muestras de suelos están propensas a una mayor dispersión en la determinación de los Límites de Atterberg, tal como se calculan en la actualidad, debido a la influencia que genera el alto contenido de material fino no plástico en el mismo.



**Figura 45.** Muestras reportadas por los laboratorios que no presentan coincidencia con el método propuesto.

**Fuente:** Propia.

## CONCLUSIONES

Para la elaboración del presente trabajo se realizó el ensayo de veleta miniatura de laboratorio a 51 muestras, con el fin de determinar la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado, bajo 4 o 5 distintas humedades, permitiendo verificar la aplicabilidad de este ensayo para obtener la clasificación de suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Luego de haber realizado esta investigación se puede concluir lo siguiente:

- El método sí aplica, y está reflejando la variabilidad intrínseca y natural que existe en la determinación de los límites de Atterberg en los distintos laboratorios, debido a la gran influencia que tiene el operador al realizar el ensayo.
- Al graficar en papel logarítmico la variación de la resistencia al corte no drenada en estado remoldeado con la humedad, se obtiene una relación lineal una vez que se hayan obtenido entre 4 o 5 puntos que permitan definirla.
- El valor de la humedad a la cual el suelo presenta una resistencia al corte de  $1,5 \text{ kN/m}^2$ , tiene una excelente correlación con el límite líquido en la aplicación de este método, ya que este valor de resistencia a pesar de ser bajo puede ser registrado por el ensayo de veleta miniatura de laboratorio o en caso contrario puede ser hallado mediante una extrapolación.
- No existe un rango de humedad para la aplicación del método, siempre y cuando se elaboren entre 4 o 5 ensayos de veleta a distintas humedades, para así obtener una excelente tendencia lineal en relación a los datos.
- El valor absoluto de la pendiente de la recta que se genera al graficar  $\log S_u - \log w$  esta intrínsecamente relacionado al Índice de Plasticidad, a menor valor de pendiente mayor Índice de Plasticidad y viceversa.
- Las curvas de igual pendiente definidas en la Carta de Plasticidad propuesta por el autor del método, demostraron ser tendencias solidas, ya que el aumento de la base de

datos solo condujo a pequeños ajustes y mayor precisión gracias a la facilidad de manejo.

- Los datos reportados por los laboratorios que muestran un Límite Líquido mayor al contenido de humedad en la que el suelo presenta una resistencia al corte de  $1,5 \text{ kN/m}^2$ , reflejan la variabilidad que existe en la determinación de los límites de Atterberg; debido al grado de confianza que tiene el operador al momento de realizar el ensayo, ya que es un procedimiento rutinario y de gran simplicidad.

## RECOMENDACIONES

Partiendo de los análisis realizados, y las conclusiones precedentes, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Estudiar una cantidad considerable de suelos que reporten un Límite Líquido menor que 20 y mayor que 100 (%), para corroborar el comportamiento de la tendencia polinómica de segundo grado en la correlación entre el Límite Líquido y la humedad para una resistencia al corte no drenada en estado remoldeado de  $1,5 \text{ kN/m}^2$ .
- Estudiar una cantidad considerable de suelos que reporten un Límite Líquido comprendido entre 50 y 70 (%), con bajo índice de plasticidad, para ratificar si el cambio brusco que presentan las curvas de igual pendiente dentro de este rango, en la carta de plasticidad se atenúa o se mantiene.
- Realizar un estudio estadístico de la correlación entre la humedad a  $1,5 \text{ kN/m}^2$  y el Límite Líquido reportado por el laboratorio, concentrándose en la media más una desviación estándar, que reduzca los límites superiores e inferiores para obtener un rango más ajustado a los resultados reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) JUÁREZ B., RODRÍGUEZ R. *Mecánica de Suelos*, Tomo 1, Limusa, México 1986<sup>3</sup>, 128.
- (2) CASAGRANDE A. “Research on the Atterberg limits of soils” en *Public Roads* 13(3) (1932) 121-130. 136.
- (3) CASAGRANDE A. “Notes on the design of the liquid limit device” en *Geotechnique* 8(2) (1958) 84-91.
- (4) NAGARAJ H.B., SRIDHARAN A. AND MALLIKARJUNA H.M. “Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits” en *Geotechnical & Geological Engineering J.* 30 (2012) 727-736.
- (5) ECHEZURÍA H. “Correlación entre la Resistencia al Corte no Drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo” en Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H, Caracas, 8-10 Nov. (2012).
- (6) GABALDÓN E. “La Resistencia al Corte en los Límites Líquido y Plástico”, Trabajo Especial de Grado de Ingeniero Civil, Universidad Metropolitana, Caracas 1991.38-49.
- (7) KAYABALI K., and OGUZ O. “Shear strength of remolded soils at consistency limits” en *Can. Geotech. J.* 47 (2010) 259–266.
- (8) WROTH C.P., and WOOD D.M. “The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils” en *Can Geotech. J.* 15(2) (1978) 137–145.
- (9) SOWERS G.B; SOWERS G.F. *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*, Limusa, México 1975, 101.
- (10) JUÁREZ B., RODRÍGUEZ R. *Mecánica de Suelos*, 127.
- (11) TERZAGHI K., y PECK R. *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*, El Ateneo, Barcelona 1963<sup>3</sup>, 41.
- (12) TERZAGHI K., y PECK R. *Mecánica de Suelos*, 43.
- (13) JUÁREZ B., RODRÍGUEZ R. *Mecánica de Suelos*, 152-153.
- (14) SOWERS G.B; SOWERS G.F. *Introducción a la Mecánica*, 42.
- (15) NADEO J., LEONI A. *Introducción a Algunas Propiedades Fundamentales de los Suelos*, <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Propiedades%20caracteristicas%20de%20los%20suelos.pdf>[10/10/2013] 29-30.
- (16) LAMBE T.W., WHITMAN R.V. *Mecánica de Suelos*, Limusa, México 2009, 75.

- (17) GARCÍA M. “Efecto del Sistema Resorte Veleta seleccionada para el Ensayo de Resistencia al Corte no drenada por el Equipo Veleta Miniatura del Laboratorio”, Trabajo Especial de Grado, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas 2003, 27.
- (18) DAS M. “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, Cengage Learning, México 2001, 238-240.

## BIBLIOGRAFÍA

- CASAGRANDE A. “Notes on the design of the liquid limit device” en *Geotechnique* 8(2) (1958) 84-91.
- CASAGRANDE A. “Research on the Atterberg limits of soils” en *Public Roads* 13(3) (1932) 121-130. 136.
- DAS B. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Cengage Learning, México 2001, pp. 594.
- ECHEZURÍA H. “Correlación entre la Resistencia al Corte no Drenado en Estado Remoldeado y la Plasticidad del Suelo” en Memorias del XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Echezuría, H, Caracas, 8-10 Nov. (2012).
- GABALDÓN E. “La Resistencia al Corte en los Límites Líquido y Plástico”, Trabajo Especial de Grado de Ingeniero Civil, Universidad Metropolitana, Caracas 1991, pp. 106.
- GARCÍA M. “Efecto del Sistema Resorte Veleta seleccionada para el Ensayo de Resistencia al Corte no drenada por el Equipo Veleta Miniatura del Laboratorio”, Trabajo Especial de Grado, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas 2003, pp.75.
- JUÁREZ B., RODRÍGUEZ R. *Mecánica de Suelos*, Tomo 1, Limusa, México 1986<sup>3</sup>, pp. 629.
- KAYABALI K., and OGUZ O. “Shear strength of remolded soils at consistency limits” en *Can. Geotech. J.* 47 (2010) 259–266.
- LAMBE T.W., WHITMAN R.V. *Mecánica de Suelos*, Limusa, México 2009, pp.582.
- NAGARAJ H.B., SRIDHARAN A. AND MALLIKARJUNA H.M. “Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits” en *Geotechnical & Geological Engineering J.* 30 (2012) 727-736.
- OLIVARES A. “Estudio de la Tixotropía de los Sedimentos Lacustres de la Ciudad de México”, Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Mecánica de Suelos, Instituto Politécnico Nacional, México 2011, pp.90.
- SALAS J. *Mecánica de Suelo y sus Aplicaciones a la Ingeniería*, Dossat, S. A, Madrid 1954, pp. 533.
- SOWERS G.B; SOWERS G.F. *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*, Limusa, México 1975, pp. 677.
- TERZAGHI K., y PECK R. *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*, El Ateneo, Barcelona 1963<sup>3</sup>, pp. 722.
- WROTH C.P., and WOOD D.M. “The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils” en *Can Geotech. J.* 15(2) (1978) 137–145.

## BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

BESOAIN E. *Mineralogía de Suelos*,

[http://www.books.google.co.ve/books?id=9OMOAQAIAAJ&pg=PA309&lpg=PA309&dq=grim+1953+espa%C3%B1ol&source=bl&ots=TDDDtNsO22&sig=Rzx\\_5HSMihfwA9Q2LFplSjbQABo&hl=es&sa=X&ei=EjdTUpT\\_DobI9gSHmoGABQ&ved=0CEEQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false](http://www.books.google.co.ve/books?id=9OMOAQAIAAJ&pg=PA309&lpg=PA309&dq=grim+1953+espa%C3%B1ol&source=bl&ots=TDDDtNsO22&sig=Rzx_5HSMihfwA9Q2LFplSjbQABo&hl=es&sa=X&ei=EjdTUpT_DobI9gSHmoGABQ&ved=0CEEQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false)  
[09/10/2013] 343.

NADEO J., LEONI A. *Introducción a Algunas Propiedades Fundamentales de los Suelos*,  
<http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Propiedades%20caracteristicas%20de%20los%20suelos.pdf>[10/10/2013] 62.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Variación de la Resistencia al Corte no Drenada en Estado Remoldeado con el Contenido de Humedad de las 51 muestras ensayadas con la Veleta Miniatura de Laboratorio.

Muestra: E1	
%humedad N°1= 69,44	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 76,37	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 83,74	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 91,97	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E2	
%humedad N°1= 54,35	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 66,50	Su= 0,92 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 71,79	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 78,39	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E3	
%humedad N°1= 58,47	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 62,34	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 67,54	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 73,23	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E4	
%humedad N°1= 62,80	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 66,00	Su= 3,46 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 86,48	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 93,23	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E5	
%humedad N°1= 58,06	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 63,81	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 73,01	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 77,76	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 82,07	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E6	
%humedad N°1= 33,29	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 37,80	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 47,28	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 47,75	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: 7	
%humedad N°1= 48,84	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 49,70	Su= 4,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 60,26	Su= 1,63 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 77,20	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E8	
%humedad N°1= 48,41	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )

%humedad N°2= 52,70	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 56,30	Su= 1,83 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 68,01	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E9	
%humedad N°1= 42,11	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 45,82	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 50,67	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 57,58	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E10	
%humedad N°1= 49,76	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 54,41	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 61,45	Su= 0,92 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 67,53	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 70,61	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E11	
%humedad N°1= 46,27	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 50,63	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 52,59	Su= 1,43 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 66,83	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E12	
%humedad N°1= 51,64	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 55,09	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 59,16	Su= 1,32 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 64,39	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E13	
%humedad N°1= 49,93	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 56,37	Su= 1,43 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 61,69	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 71,75	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E14	
%humedad N°1= 41,81	Su= 8,25 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 43,34	Su= 5,36 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 50,38	Su= 1,73 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 59,44	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= -	Su= -
Muestra: E15	
%humedad N°1= 64,76	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 72,09	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 78,52	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 85,83	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 92,22	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E16	
%humedad N°1= 50,00	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 50,76	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )

%humedad N°3= 55,14	Su= 1,53 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 61,20	Su= 0,92 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E17	
%humedad N°1= 58,63	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 62,66	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 63,82	Su= 1,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4=71,49	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E18	
%humedad N°1= 44,92	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 48,23	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 52,14	Su= 1,93 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 65,82	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E19	
%humedad N°1= 43,56	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 48,89	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 52,71	Su= 1,22 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 65,34	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E20	
%humedad N°1= 47,43	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 48,23	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 51,17	Su= 1,73 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 56,54	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 62,27	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E21	
%humedad N°1= 48,66	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 50,30	Su= 4,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 53,79	Su= 2,24 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 60,03	Su= 1,22 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E22	
%humedad N°1= 54,08	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 60,98	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 65,50	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 71,25	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E23	
%humedad N°1= 47,29	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 60,27	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 68,10	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 73,76	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E24	
%humedad N°1= 36,52	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 41,05	Su= 1,32 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 47,12	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 51,08	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E25	

%humedad N°1= 45,02	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 57,49	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 59,85	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 72,39	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E26	
%humedad N°1= 53,51	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 59,05	Su= 0,82 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 67,45	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 73,41	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E27	
%humedad N°1= 46,47	Su= 5,36 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 49,58	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 53,20	Su= 3,87 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 58,96	Su= 2,04 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 68,51	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E28	
%humedad N°1= 33,38	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 38,65	Su= 1,22 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 43,39	Su= 1,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 48,58	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E29	
%humedad N°1= 55,98	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 55,06	Su= 1,63 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 64,66	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 73,73	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E30	
%humedad N°1= 47,95	Su= 1,24 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 53,06	Su= 0,82 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 59,73	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 64,65	Su= 0,10 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E31	
%humedad N°1= 41,34	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 45,92	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 49,20	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 56,76	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E32	
%humedad N°1= 37,53	Su= 4,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 39,63	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 42,88	Su= 2,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 46,14	Su= 1,53 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 54,05	Su= 0,92 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E33	
%humedad N°1= 47,12	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 48,82	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )

%humedad N°3= 54,07	Su= 1,22 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 62,13	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E34	
%humedad N°1= 43,12	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 53,03	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 56,97	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 59,95	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E35	
%humedad N°1= 40,35	Su= 4,54 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 43,04	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 45,44	Su= 2,44 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 49,29	Su= 1,53 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 55,62	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E36	
%humedad N°1= 49,48	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 49,52	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 50,94	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 53,52	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 58,31	Su= 0,10 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E37	
%humedad N°1= 44,01	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 46,29	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 65,23	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 67,24	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E38	
%humedad N°1= 39,32	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 40,92	Su= 4,95 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 42,90	Su= 3,77 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 47,87	Su= 2,44 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 57,72	Su= 1,22 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E39	
%humedad N°1= 51,55	Su= 2,89 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 56,91	Su= 0,82 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 62,09	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 65,79	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E40	
%humedad N°1= 60,31	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 62,90	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 63,90	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 67,06	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E41	
%humedad N°1= 40,92	Su= 3,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 44,76	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 48,00	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )

%humedad N°4= 52,44	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 55,34	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E42	
%humedad N°1= 43,55	Su= 4,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 49,79	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 54,24	Su= 0,92 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 57,90	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E43	
%humedad N°1= 36,43	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 40,86	Su= 1,24 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 45,29	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 47,76	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 50,67	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E44	
%humedad N°1= 38,01	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 41,98	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 47,39	Su= 1,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 51,95	Su= 0,71 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 56,95	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E45	
%humedad N°1= 39,32	Su= 2,47 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 43,28	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 45,83	Su= 1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 52,35	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E46	
%humedad N°1= 40,24	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 44,52	Su= 1,63 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 47,82	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 50,83	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E47	
%humedad N°1= 34,88	Su= 4,54 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 38,77	Su= 1,24 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 47,15	Su= 0,20 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 49,21	Su= 0,10 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E48	
%humedad N°1= 47,11	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 48,50	Su= 1,32 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 51,05	Su= 0,41 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 54,30	Su= 0,51 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E49	
%humedad N°1= 33,67	Su= 1,65 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 37,40	Su= 0,82 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 41,41	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 47,18	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )

Muestra: E50	
%humedad N°1= 51,95	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 58,79	Su= 2,06 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 65,51	Su= 0,81 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 69,43	Su= 0,61 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°5= 75,99	Su= 0,31 (kN/m <sup>2</sup> )
Muestra: E51	
%humedad N°1= 50,72	Su= 4,12 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°2= 55,80	Su= 3,30 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°3= 69,81	Su= 1,32 (kN/m <sup>2</sup> )
%humedad N°4= 76,86	Su= 0,92 (kN/m <sup>2</sup> )

**Anexo 2.** Propiedades y otras características de las 93 muestras estudiadas ordenados por el Límite Líquido Real mediante la aplicación del método original.

Muestra	%W (LOG 1,5)	LL				% Error	m
		LL mínimo	LL máximo	LL medio	LL real		
BENTONITA	446	385	-	428	427,35	0	1,8
A-10	323	246	300	274	283	3	1,72
A-07	255	180	-	201	179	12	1,95
A-08	238	164	-	184	176	5	2,19
A-06	177	111	155	129	135	5	2,03
A-04	148	86	-	105	108	3	2,68
A-02	114	59	102	80	88	9	3,44
B-01	100	48	91	70	84	16	4,03
B-07	106	53	91	74	82	9	6,93
B-04	136	76	121	96	80	20	4,27
A-05	108	54	97	75	77	3	1,95
B-02	100	48	91	70	77	9	5,69
E1	78	33	74	55	66	17	7,23
E2	62	21	62	45	63	29	6,25
B-08	74	29	71	53	64	17	10,17
A-09	89	40	82	63	64	2	2,89
B-03	77	32	73	55	62	12	5,8
A-03	84	36	78	59	62	5	3,67
N-03	94	44	86	66	62	6	3,74
E3	63	22	63	46	61	25	8,43
E4	76	31	73	54	59	8	4,97
N-02	91	42	84	64	59	9	2,8

N-13	84	36	62	59	58	2	2,48
E5	66	24	64	48	58	17	8,7
B-11	72	27	69	52	57	9	4,54
E6	41	-	46	33	57	42	5,83
N-05	87	39	81	61	56	10	2,62
E7	63	22	63	46	53	13	3,81
E8	58	17	58	43	53	19	4,42
E9	48	-	51	37	53	30	7,27
E10	57	17	58	42	53	21	5,58
E11	53	14	54	40	52	23	3,91
E12	61	20	61	45	52	13	6,58
E13	56	16	57	42	51	18	3,95
E14	52	14	54	39	51	23	7,76
E15	75	30	71	53	50	6	5,93
E16	57	17	57	42	49	14	5,95
A-01	65	23	64	47	49	3	3,38
N-12	74	29	71	53	48	10	3,17
E17	63	22	63	46	48	4	7,75
E18	54	15	56	41	48	15	3,84
E19	52	14	54	39	48	19	4,53
B-12	67	24	65	49	46	6	5,22
B-05	47	-	50	37	46	20	7,33
E20	53	15	55	40	46	13	7,39
E21	58	18	58	43	46	7	6,81
E22	55	16	56	41	46	11	5,94
B-10	53	14	54	40	46	12	5,68
E23	51	13	53	39	45	13	4,14
N-01	59	18	59	44	45	2	3,61
B-13	57	16	57	42	45	6	6,73
B-09	51	13	53	39	44	12	8,46
E24	40	-	45	32	44	27	3,61
E25	46	-	49	36	44	18	4,39
E26	54	15	56	40	43	7	5,09
E27	62	21	62	45	43	5	5,13
E28	35	-	42	29	43	33	3
E29	58	18	58	43	43	0	4
E30	48	-	50	37	43	14	8,77

E31	45	-	48	35	42	17	8,62
E32	48	-	51	37	42	12	4,38
E33	55	16	56	41	42	2	7,18
E34	47	-	49	37	41	10	6,89
E35	49	-	52	38	41	7	5,94
E36	46	-	49	36	41	12	11,06
E37	56	16	57	42	40	5	3,76
A-11	55	16	56	41	40	3	3,71
E38	55	16	56	41	39	5	3,82
E39	55	16	56	41	39	5	9,71
E40	57	17	58	42	38	11	13,08
E41	45	-	49	35	38	7	9,41
B-15	43	-	47	34	38	9	10,22
B-06	39	-	44	32	37	14	8,09
N-04	51	13	53	39	37	5	4,68
E42	50	12	52	38	36	6	7,86
E43	39	-	44	32	35	9	6,08
N-11	52	14	54	39	33	17	3,04
E44	44	-	48	35	32	9	4,14
E45	43	-	47	34	31	10	7,46
E46	42	-	46	33	31	6	6,05
E47	39	5	44	32	30	7	10,57
BARBOTINA	26	-	35	24	29,6	19	8,6
N-10	51	13	53	39	28	38	2,32
E48	48	-	51	37	28	32	4,38
E49	34	-	41	29	28	4	4,82
N-09	46	-	49	36	27	34	2,77
B-14	31	-	38	28	26	6	8,65
E50	60	19	60	44	26	68	6,4
E51	68	25	66	49	26	88	3,72
N-08	42	6	46	34	26	33	3,01
N-15	38	-	44	32	25	30	3,3
N-06	35	-	41	30	21	41	2,77
N-07	35	-	41	30	19	55	2,75

**Anexo 3.** Propiedades y otras características de las 93 muestras estudiadas ordenados por el Límite Líquido Real mediante la aplicación del método original.

Muestra	IP				% Error	Clasificación			
	mínimo	máximo	medio	real		mínimo	medio	máximo	real
BENTONITA	-	-	-	390,25	-	CH	CH	-	CH
A-10	-	-	-	254	-	CH	CH	CH	CH
A-07	150	-	-	148	-	CH	-	-	CH
A-08	145	-	-	148	-	CH	-	-	CH
A-06	89	-	-	115	-	CH	-	-	CH
A-04	59	-	-	79	-	CH	-	-	CH
A-02	37	-	54	59	-	CH	CH	-	CH
B-01	28	57	44	43	3	CL	CH	CH	MH
B-07	26	36	35	46	25	CH	MH	MH	MH
B-04	48	63	53	41	31	CH	MH	-	MH
A-05	37	74	55	61	9	CH	CH	-	CH
B-02	25	51	40	30	32	CL	CH	MH	MH
E1	14	34	27	34	21	CL	CH	MH	CH
E2	11	32	22	34	35	CL	CL	CH	CH
B-08	11	22	20	25	20	CL	MH	MH	MH
A-09	25	56	42	49	14	CL	CH	CH	CH
B-03	16	41	30	31	2	CL	CH	CH	MH
A-03	19	52	38	42	10	CL	CH	CH	CH
N-03	26	56	37	36	2	CL	CH	CH	CH
E3	8	26	18	30	40	CL-ML	ML	MH	CH
E4	16	46	30	29	3	CL	CH	CH	CH
N-02	26	57	51	37	38	CL	CH	CH	CH
N-13	19	42	40	43	6	CL	CH	CH	CH
E5	7	27	19	25	24	CL-ML	ML	MH	MH
B-11	12	42	29	34	14	CL	CH	CH	CH
E6	-	23	16	30	47	-	CL	CL	CH
N-05	24	57	41	36	15	CL	CH	CH	CH
E7	14	42	26	31	16	CL	CL	CH	CH
E8	-	34	24	27	11	-	CL	CH	CH
E9	-	18	15	28	46	-	CL	MH	CH
E10	-	32	22	27	19	-	CL	CH	CH
E11	-	32	26	26	0	-	CL	CH	CH

E12	11	31	21	26	19	CL	CL	CH	CH
E13	-	35	26	26	0	-	CL	CH	CH
E14	-	23	17	24	28	-	CL	MH	CH
E15	15	40	27	24	13	CL	CH	CH	CH
E16	-	31	22	22	0	-	CL	CH	CL
A-01	12	41	28	31	9	CL	CL	CH	CL
N-12	14	47	33	30	10	CL	CH	CH	CL
E17	10	28	19	19	0	CL	CL	MH	ML
E18	-	33	27	21	29	-	CL	CH	CL
E19	-	31	22	23	4	-	CL	CH	CL
B-12	12	33	25	21	17	CL	CL	CH-MH	CL
B-05	-	24	15	23	34	-	CL	CL-CH	CL
E20	-	26	19	15	27	-	CL	MH	ML
E21	-	30	21	16	31	-	CL	CH	ML
E22	-	30	22	23	4	-	CL	CH	CL
B-10	-	29	22	22	2	-	CL	CH	CL
E23	-	13	22	22	0	-	CL	CH	CL
N-01	-	37	25	27	8	-	CL	CH	CL
B-13	-	30	21	22	3	-	CL	CH	CL
B-09	-	22	12	15	18	-	ML	MH	ML
E24	-	26	19	17	12	-	CL	CL	ML
E25	-	28	22	16	38	-	CL	CL	ML
E26	-	31	22	15	46	-	CL	CH	ML
E27	11	35	23	24	4	CL	CL	CH	CL
E28	-	29	17	20	15	-	CL	CL	CL
E29	-	35	24	6	300	-	CL	CH	ML
E30	-	20	13	15	13	-	ML	ML-MH	ML
E31	-	19	13	14	4	-	CL	ML	ML
E32	-	29	18	17	6	-	CL	CH	CL
E33	-	27	20	16	25	-	CL	CH	ML
E34	-	24	15	12	24	-	ML	CL	ML
E35	-	27	16	16	0	-	CL	CH	CL
E36	-	18	12	16	25	-	ML	ML	CL
E37	-	35	27	16	69	-	CL	CH	CL
A-11	-	34	26	23	14	-	CL	CH	CL
E38	-	34	27	21	29	-	CL	CH	CL
E39	-	22	13	14	7	-	ML	MH	CL

E40	-	14	10	11	9	-	ML	MH	ML
E41	-	19	13	12	11	-	CL	ML	ML
B-15	-	18	13	15	12	-	ML	ML	ML
B-06	-	19	13	15	13	-	CL	CL	CL
N-04	-	30	19	18	6	-	CL	CH	CL
E42	-	18	15	14	7	-	CL	MH	CL
E43	-	22	15	14	7	-	CL	CL	CL
N-11	-	34	22	19	13	-	CL	CH	CL
E44	-	27	19	10	90	-	CL	CL	CL
E45	-	21	14	10	40	-	CL	CL	CL
E46	-	22	15	9	67	-	CL	CL	CL
E47	-	16	13	13	0	-	CL	ML	CL
BARBOTINA		14	8	13,5	41		CL	CL	CL
N-10	-	35	23	16	46	-	CL	CH	CL
E48	-	16	12	18	33	-	ML	MH	CL
E49	-	25	16	11	45	-	CL	CL	CL
N-09	-	31	19	15	26	-	CL	CL	CL
B-14	-	13	7	8	16	-	CL	ML	CL
E50	-	31	22	7	206	-	CL	CH	CL
E51	12	43	29	12	142	CL	CL	CH	CL
N-08	-	28	19	15	28	-	CL	CL	CL
N-15	-	26	20	11	77	-	CL	CL	CL
N-06	-	24	17	12	45	-	CL	CL	CL
N-07	-	23	16	10	58	-	CL	CL	CL

**Anexo 4.** Propiedades y otras características de las 93 muestras estudiadas ordenados por el Límite Líquido Real mediante la aplicación del método actualizado.

Muestra	%W (LOG 1,5)	LL				Error (%)	m
		LL mínimo	LL máximo	LL medio	LL real		
BENTONITA	446	386	-	426	427,35	0	1,8
A-10	323	242	302	270	283	5	1,72
A-07	255	178	233	197	179	10	1,95
A-08	238	162	216	181	176	3	2,19
A-06	177	110	163	127	135	6	2,03
A-04	148	86	138	104	108	4	2,68
A-02	114	60	112	80	88	9	3,44

B-01	100	50	101	70	84	16	4,03
B-07	106	54	106	74	82	9	6,93
B-04	136	78	129	95	80	19	4,27
A-05	108	56	107	76	77	2	1,95
B-02	100	50	101	71	77	8	5,69
E1	78	34	84	57	66	14	7,23
E2	62	22	72	48	63	24	6,25
B-08	74	34	81	54	64	16	10,17
A-09	89	42	92	64	64	0	2,89
B-03	77	43	83	56	62	10	5,8
A-03	84	38	88	61	62	2	3,67
N-03	94	45	96	67	62	8	3,74
E3	63	23	72	49	61	20	8,43
E4	76	32	82	56	59	5	4,97
N-02	91	43	94	65	59	11	2,8
N-13	84	38	88	61	58	5	2,48
E5	66	24	74	50	58	14	8,7
B-11	72	29	79	54	57	5	4,54
E6	41	6	56	36	57	37	5,83
N-05	87	40	90	62	56	11	2,62
E7	63	23	73	48	53	9	3,81
E8	58	19	69	45	53	15	4,42
E9	48	12	62	40	53	25	7,27
E10	57	18	68	45	53	15	5,58
E11	53	15	65	43	52	17	3,91
E12	61	21	71	47	52	10	6,58
E13	56	18	68	44	51	14	3,95
E14	52	14	64	42	51	17	7,76
E15	75	41	81	55	50	10	5,93
E16	57	18	68	45	49	8	5,95
A-01	65	24	74	49	49	1	3,38
N-12	74	31	81	54	48	12	3,17
E17	63	23	73	48	48	0	7,75
E18	54	16	66	44	48	8	3,84
E19	52	14	64	42	48	13	4,53

B-12	67	25	76	51	46	10	5,22
B-05	47	11	61	40	46	13	7,33
E20	53	15	65	43	46	7	7,39
E21	58	19	69	45	46	2	6,81
E22	55	17	67	44	46	4	5,94
B-10	53	15	66	43	46	6	5,68
E23	51	13	64	42	45	7	4,14
N-01	59	20	70	46	45	2	3,61
B-13	57	18	68	45	45	1	6,73
B-09	51	13	64	42	44	5	8,46
E24	40	6	56	36	44	18	3,61
E25	46	10	61	39	44	11	4,39
E26	54	16	66	43	43	0	5,09
E27	62	22	72	48	43	12	5,13
E28	35	2	52	33	43	23	3
E29	58	19	69	45	43	5	4
E30	48	11	61	40	43	7	8,77
E31	45	9	59	39	42	7	8,62
E32	48	11	52	40	42	5	4,38
E33	55	17	67	44	42	5	7,18
E34	47	11	61	40	41	3	6,89
E35	49	12	63	41	41	0	5,94
E36	46	10	60	39	41	5	11,06
E37	56	18	68	44	40	10	3,76
A-11	55	17	67	44	40	11	3,71
E38	55	17	66	44	39	13	3,82
E39	55	17	67	44	39	13	9,71
E40	57	18	68	45	38	18	13,08
E41	45	9	59	39	38	4	9,41
B-15	43	8	58	37	38	1	10,22
B-06	39	5	56	35	37	6	8,09
N-04	51	14	64	41	37	11	4,68
E42	50	13	63	41	36	14	7,86
E43	39	5	55	35	35	0	6,08
N-11	52	14	64	42	33	27	3,04

E44	44	8	59	38	32	19	4,14
E45	43	7	57	37	31	19	7,46
E46	42	7	67	37	31	19	6,05
E47	39	5	56	35	30	17	10,57
BARBOTINA	26	-	46	29	29,6	2	8,6
N-10	51	14	64	42	28	49	2,32
E48	48	11	61	40	28	43	4,38
E49	34	2	52	33	28	18	4,82
N-09	46	10	61	39	27	46	2,77
B-14	31	-	50	32	26	21	8,65
E50	60	21	71	47	26	79	6,4
E51	68	26	76	51	26	96	3,72
N-08	42	7	57	37	26	45	3,01
N-15	38	4	54	35	25	42	3,3
N-06	35	2	52	33	21	55	2,77
N-07	35	2	52	33	19	71	2,75

**Anexo 5.** Propiedades y otras características de las 93 muestras estudiadas ordenados por el Límite Líquido Real mediante la aplicación del método actualizado.

Muestra	IP				Error (%)	Clasificación			
	mínimo	máximo	medio	real		mínimo	máximo	medio	real
BENTONITA	-	-	-	390,2	100	CH	-	CH	CH
A-10	226	273	250	254	2	CH	CH	CH	CH
A-07	150	200	166	148	12	CH	CH	CH	CH
A-08	127	171	144	148	3	CH	CH	CH	CH
A-06	86	134	101	115	12	CH	CH	CH	CH
A-04	56	92	69	79	13	CH	CH	CH	CH
A-02	37	66	53	59	11	CH	MH	CH	CH
B-01	25	54	43	43	0	CL	MH	CH	MH
B-07	25	37	35	46	25	CH	MH	MH	MH
B-04	46	63	50	41	23	CH	MH	MH	MH
A-05	39	85	63	61	4	CH	CH	CH	CH
B-02	23	43	40	30	32	CL	MH	CH	MH
E1	12	38	27	34	21	CL	MH	CH	CH

E2	8	37	21	34	38	CL	CH	CL	CH
B-08	9	28	23	25	8	ML	MH	MH	MH
A-09	23	60	43	49	12	CL	CH	CH	CH
B-03	18	39	28	31	8	CL	MH	CH	MH
A-03	19	50	37	42	12	CL	CH	CH	CH
N-03	33	54	42	36	16	CL	MH	CH	CH
E3	7	30	19	30	37	CL	MH	ML	CH
E4	14	47	29	29	0	CL	CH	CH	CH
N-02	24	62	45	37	22	CL	CH	CH	CH
N-13	22	62	42	43	2	CL	CH	CH	CH
E5	7	31	19	25	24	ML	MH	MH	MH
B-11	13	45	29	34	14	CL	CH	CH	CH
E6		28	15	30	50		CH	CL	CH
N-05	23	62	43	36	21	CL	CH	CH	CH
E7	11	46	24	31	23	CL	CH	CL	CH
E8	-	41	21	27	22	-	CH	CL	CH
E9	-	31	15	28	46	-	CH	CL	CH
E10	-	37	20	27	26	-	CH	CL	CH
E11	-	40	21	26	19	-	CH	CL	CH
E12	7	35	20	26	23	CL	MH	CL	CH
E13	-	42	22	26	15	-	CH	CL	CH
E14	-	31	16	24	32	-	CH	CL	CH
E15	17	44	27	24	13	CL	CH	CH	CH
E16	-	36	19	22	14	-	CH	CL	CL
A-01	12	49	26	31	16	CL	CH	CL	CL
N-12	16	56	32	30	7	CL	CH	CH	CL
E17	7	33	19	19	0	ML	MH	ML	ML
E18	-	41	22	21	5	-	CH	CL	CL
E19	-	38	20	23	13	-	CH	CL	CL
B-12	10	41	24	21	13	CL	CH	CH	CL
B-05	-	30	15	23	34	-	CH	CL	CL
E20	-	32	16	15	7	-	MH	ML	ML
E21	-	34	18	16	13	-	MH	ML	ML
E22	-	35	19	23	17	-	CH	CL	CL
B-10	-	36	18	22	16	-	CH	CL	CL

E23	-	38	20	22	9	-	CH	CL	CL
N-01	9	45	24	27	11	CL	CH	CL	CL
B-13	-	34	18	22	17	-	MH	CL	CL
B-09	-	29	15	15	3	-	MH	ML	ML
E24	-	33	18	17	6	-	CH	CL	ML
E25	-	35	18	16	13	-	CH	CL	ML
E26	-	37	19	15	26	-	CH	CL	ML
E27	9	40	22	24	8	CL	CH	CL	CL
E28	-	30	18	20	10	-	CH	CL	CL
E29	-	42	22	6	267	-	CH	CL	ML
E30	-	28	14	15	6	-	MH	ML	ML
E31	-	27	13	14	4	-	MH	ML	ML
E32	-	27	18	17	6	-	CH	CL	CL
E33	-	32	17	16	6	-	MH	ML	ML
E34	-	30	15	12	24	-	MH	ML	ML
E35	-	34	17	16	6	-	CH	CL	CL
E36	-	24	12	16	25	-	MH	ML	CL
E37	-	43	22	16	38	-	CH	CL	CL
A-11	-	42	22	23	4	-	CH	CL	CL
E38	-	41	22	21	5	-	CH	CL	CL
E39	-	28	15	14	7	-	MH	ML	CL
E40	-	23	12	11	9	-	MH	ML	ML
E41	-	26	12	12	3	-	MH	ML	ML
B-15	-	25	11	15	26	-	MH	ML	ML
B-06	-	25	12	15	19	-	MH	CL	CL
N-04	-	37	19	18	6	-	CH	CL	CL
E42	-	30	15	14	7	-	CH	CL	CL
E43	-	27	14	14	0	-	CH	CL	CL
N-11	-	43	22	19	13	-	CH	CL	CL
E44	-	34	18	10	80	-	CH	CL	CL
E45	-	27	13	10	30	-	CH	CL	CL
E46	-	35	15	9	67	-	MH	CL	CL
E47	-	23	10	13	23	-	MH	ML	CL
BARBOTINA	-	17	9	13,5	33	-	ML	CL	CL
N-10	-	47	25	16	58	-	CH	CL	CL

E48	-	25	12	18	33	-	MH	ML	CL
E49	-	26	14	11	27	-	CH	CL	CL
N-09	-	41	22	15	46	-	CH	CL	CL
B-14	-	19	10	8	20	-	ML	CL	CL
E50	7	35	20	7	178	CL	MH	CL	CL
E51	12	49	28	12	133	CL	CH	CH	CL
N-08	-	35	20	15	35	-	CH	CL	CL
N-15	-	32	18	11	59	-	CH	CL	CL
N-06	-	31	18	12	54	-	CH	CL	CL
N-07	-	31	18	10	78	-	CH	CL	CL