TESIS
IC2003
G65
v.1

**UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

# Efecto del Sistema Resorte Veleta seleccionada para el Ensayo de Resistencia al Corte no drenada obtenida por el equipo Veleta Miniatura del Laboratorio

**REALIZADO POR:** GARCIA B., Maria Elena

**PROFESOR GUIA:** ING. PEREZ A., Hugo

**FECHA:** Julio, 2003

**UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Efecto del Sistema Resorte Veleta seleccionada para el Ensayo de Resistencia al Corte no drenada obtenida por el equipo Veleta Miniatura del Laboratorio**

Este jurado una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: DIECINUEVE (19)

JURADO EXAMINADOR

Firma: Firma: Firma:

**REALIZADO POR:** **GARCIA B., Maria Elena**

**PROFESOR GUIA:** **ING. PEREZ A., Hugo**

**FECHA:** **Julio, 2003**

**A mi Mamá,** por ser mi apoyo incansable, por estar siempre a mi lado cuando te necesite y por brindarme todo su amor y cariño en los malos y buenos momentos.

**A mi Papá,** por confiar en todo momento en mí, por brindarme tanta alegría cuando superaba una etapa y por entenderme.

**A mi Abuela,** por haberme criado como si fuera una hija.

**A mi Abuelo,** por brindarme su amor en vida y cuidarme desde el cielo, espero que te sientas orgulloso...

**A Luis,** por existir en mis pensamientos y ayudarme en todo momento.

**AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor El Ingeniero Hugo Pérez Ayala por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, por haber aceptado llevar esta responsabilidad, por aportarme todos sus conocimientos, por apoyarme en todo momento y darme animo para seguir adelante.

A Ramón Márquez, Jesús Villegas, Yeliza Sirit, Antonio Manríquez y a todo el personal del Laboratorio de Suelos y Materiales por brindarme sus conocimientos, por haber participado activamente en la investigación, por su inagotable paciencia y apoyo cada día.

A los Ingenieros Pedro Carrillo y Guillermo Bonilla, por haberme dedicado su tiempo y haber aportado su conocimiento en esta investigación.

A mis padres, abuelos por brindarme su fe y confianza.

Al Ingeniero Luis Peña, por ayudarme académicamente.

A la Doctora Mariela Machado, por el apoyo y ayuda que me brindo durante su vida.

A mis amigos, por siempre darme el apoyo necesario para continuar.

A la Madre Josefa Alberti y a la Madre Pilar Silva, por sus excelentes consejos.

A Dios, que es el pilar de mi fe...

# ÍNDICE

Dedicatoria I

Agradecimientos II

Sinopsis XIII

Introducción 1

Capitulo I. Marco Teórico

I.1 Reseña Histórica 3

I.2 Resistencia al Corte 16

I.3 Conceptos importantes 18

Capitulo II. Ensayos de Veleta

II.1 Ensayo de Veleta de Campo

II.1.1 Definición 20

II.1.2 Descripción del Equipo 20

II.1.3 Procedimiento de Ensayo 24

II.2 Ensayo de Veleta Miniatura de Laboratorio

II.2.1 Definición 25

II.2.2 Descripción del equipo 25

II.2.3 Calibración del Equipo 29

II.2.4 Procedimiento del Ensayo 29

II.3 Diferencia entre los Equipos de Veleta de Campo y Laboratorio 31

II.4 Descripción del Estudio 32

Capitulo III. Metodologia

III.1 Preparación de la muestra en el Laboratorio

III.1.1 Introducción 34

III.1.2 Características del material 35

III.1.2 Preparación de la muestra patrón 35

III.2 Ensayos de Clasificación y Comportamiento de la muestra patrón

III.2.1 Ensayos de Clasificación 36

III.2.2 Ensayos de Comportamiento 36

III.2.3 Análisis de los resultados de los ensayos de clasificación 37

III.2.4 Análisis de los resultados de los ensayos de comportamiento 38

Capitulo IV. Ejecución, Resultados y Análisis de los Ensayos de Veleta Miniatura de Laboratorio

IV.1 Organización de la Muestra Patrón en el Laboratorio 39

IV.2 Programación de Ensayos 40

IV.3 Resultados 41

IV.4 Análisis de los Resultados 44

IV.4 Análisis de las variaciones cuantitativas Y algunas conclusiones 61

Conclusiones 70

Recomendaciones 72

Referencias bibliográficas 73

Anexos 76

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones de Veleta de Campo más recomendadas según el tipo de suelo y su resistencia al corte 22

Tabla 2: Humedades de la muestra patrón en el momento de ser Ensayada 40

Tabla 3: Valores de la resistencia al corte sin drenar, % de Humedad, Relación de Vacíos, Peso unitario saturado y peso unitario seco para cada combinación Veleta – Resorte de la muestra patrón 41

Tabla 4: Efecto Tixotropico de las arcillas. Muestra ensayada con el resorte de Torsión N°1 y el aspa de veleta grande (2,54 x 2,54 cm) 42

Tabla 5: Efecto Tixotropico de las arcillas. Muestra ensayada con el resorte de Torsión N°1 y el aspa de veleta pequeña (1,27 x 1,27 cm) 42

Tabla 6: Sensibilidad de la muestra patrón obtenida con el resorte de torsión N° 1 y la veleta grande (2,54 x 1,905 cm) 43

Tabla 7: Sensibilidad de la muestra patrón obtenida con el resorte de torsión N° 1 y la veleta pequeña (1,27 x 1,27 cm) 43

Tabla 8: Valores para desplazamientos Angulares de las aspas de Veleta de 5 y 10° 61

Tabla 9: Cuadro comparativo de valores y variación porcentual. Análisis Cuantitativo 62

Tabla 10: Variaciones porcentuales entre valores mínimos y máximos para cada índice de liquidez (IL) 63

Tabla 11: Combinaciones veleta – resorte recomendadas para obtener la resistencia al corte sin drenar de la muestra bajo ciertos rangos de humedad 70

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Momento Resistente de la fuerza Cortante (Braja M. Das, 2001) (4) 13

Figura 2: Variaciones en la Movilización de la Resistencia Cortante (Braja M. Das, 2001) (4) 13

Figura 3: Carta de Corrección de Bjerrum para el ensayo de veleta [Bjerrum (1972) y Lass et al (1977)] (Bowles, 1998) (11) 14

Figura 4: Reinterpretación de la Carta de Corrección de Bjerrum por Ass et al 14

Figura 5: Equipo de Veleta de Campo [Gibas et al (1960)] (Bowles, 1988) (11) 23

Figura 6: Principio del Ensayo de Veleta (a) Forma del cilindro de falla alrededor de la veleta, (b) Rotación de la veleta inducida por el esfuerzo superficial cortante (Braja M. Das, 1983) 28

Figura 7: Foto de la falla cilíndrica obtenida después de ensayar la muestra patrón con la veleta grande (2,54 x 1,905 cm) 58

Figura 8: Foto de la falla cilíndrica obtenida después de ensayar la muestra patrón con la veleta pequeña (1,27 x 1,27 cm) 59

Figura 9: Foto de la deformación angular producida por la veleta grande (2,54 x 1,905 cm) después de ensayar la muestra patrón 60

Figura 10: Foto de la deformación angular producida por la veleta pequeña (1,27 x 1,27cm) después de ensayar la muestra patrón 60

## INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada veleta bajo el resorte de torsión N° 1 con los distintos % de humedad 47

Gráfico 2: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada veleta bajo el resorte de torsión N° 2 con los distintos % de humedad 48

Gráfico 3: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada veleta bajo el resorte de torsión N° 3 con los distintos % de humedad 49

Gráfico 4: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada resorte de torsión bajo el aspa de veleta grande (2,54 x 1,905 cm) con los distintos % de humedad 50

Gráfico 5: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada resorte de torsión bajo el aspa de veleta pequeña (1,27 x 1,27 cm) con los distintos % de humedad 51

Gráfico 6: Variación de la Resistencia al corte sin drenar vs la relación de vacíos para cada combinación veleta – resorte 52

Gráfico 7: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs el peso unitario saturado para cada combinación veleta – resorte 53

Gráfico 8: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs el peso unitario seco para cada combinación veleta – resorte 54

Gráfico 9: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs el Índice de liquidez para cada combinación veleta resorte 55

Gráfico 10: Efecto tixotropico de las arcillas obtenido con el resorte de torsión N° 1 y el aspa de veleta grande (2,54 x 1,905 cm) 56

Gráfico 11: Efecto tixotropico de las arcillas obtenido con el resorte de torsión N° 1 y el aspa de veleta pequeña (1,27 x 1,27 cm) 57

Gráfico 12: Variación de la resistencia al corte sin drenar con respecto al índice de liquidez para el resorte de torsión N° 1 64

Gráfico 13: Variación de la resistencia al corte sin drenar con respecto al índice de liquidez para el resorte de torsión N° 2 65

Gráfico 14: Variación de la resistencia al corte sin drenar con respecto al índice de liquidez para el resorte de torsión N° 3 66

Gráfico 15: Variación de la resistencia al corte sin drenar con respecto al índice de liquidez para una deflexión angular de 5° 67

Gráfico 16: Variación de la resistencia al corte sin drenar con respecto al índice de liquidez para una deflexión angular de 10° 68

Grafico 17: Contracción lineal 69

## INDICE DE ANEXOS

Anexo A: Sistema de clasificación de los Suelos basados en criterios de granulometría. 76

Anexo B: Sistema de clasificación de los suelos. 78

Anexo C: Ensayos de clasificación de los suelos usados para la muestra patrón. 84

Anexo D: Procedimiento para realizar el ensayo de resistencia al corte no drenada obtenida del equipo de veleta miniatura. 85

Anexo E: Material Inicial. 111

Anexo F: Resultado de la clasificación de la muestra patrón. 113

Anexo G: Valores de gravedad especifica para minerales arcillosos. 125

Anexo H: Rangos típicos de propiedades índices de minerales arcillosos comunes. 126

Anexo I: Resultado de los ensayos de comportamiento para la muestra patrón. 127

Anexo J: Peso Unitario Saturado después de ensayar 139

Anexo K: Tablas y Curvas de Calibración de los resortes utilizados en el equipo de Veleta Miniatura del Laboratorio. 141

Anexo L: Resultados de los ensayos de resistencia al corte no drenada obtenidos del equipo de Veleta Miniatura del Laboratorio. 147

Anexo M: Tabla de la resistencia al corte para diferentes grados de consistencia de una arcilla. 230

**Efecto del Sistema Resorte – Veleta seleccionada para el Ensayo de Resistencia al Corte no Drenada obtenida del Equipo Veleta Miniatura del Laboratorio**

## SIPNOSIS

El problema de la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos puede decirse que constituye uno de los puntos fundamentales de toda la Mecánica de Suelos.

Existen diferentes equipos para hallar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos y el uso de cada uno de ellos depende del tipo de suelo analizado. El Equipo de Veleta Miniatura de Laboratorio es usado para obtener la resistencia al corte sin drenar en muestras de suelo cohesivo plástico ($\phi$ =0). Consta de cuatro aspas rectangulares de diferentes dimensiones; además de una serie de resortes de constante (K) diferentes entre si.

El objetivo de esta investigación se basa principalmente en obtener la resistencia al corte sin drenar con las diferentes combinaciones **Veleta – Resorte** de una muestra preparada en el laboratorio a diferentes humedades y observar las variaciones en los resultados.

Para la ejecución de esta investigación, se trabajo con un material inicial el cual fue sometido a procedimientos mecánicos para obtener la muestra patrón, la cual fue clasificada geotécnicamente.

Se utilizaron dos aspas de veleta. El aspa de veleta grande que mide 2,54 cm de altura y 1,905 cm de diámetro y el aspa de veleta pequeña de dimensiones 1,27 cm de altura y 1,27 cm de alto.

Se utilizaron tres resortes de torsión. El resorte N°1 (K = 0,00918379), el resorte N° 2 (K = 0,01753475) y el resorte N° 3 con (K = 0,03011457), donde K es el valor de calibración de cada resorte (constante de rigidez).

Utilizando un aspa y un tipo de resorte se pueden obtener seis combinaciones **Veleta – Resorte** con las cuales se ensayo la muestra patrón a diferentes contenidos de humedad en el equipo de veleta miniatura de laboratorio.

Con los ensayos realizados, se obtuvieron las variaciones de resistencia al corte sin drenar en función de tipo de veleta y tipo de resorte para cada porcentaje de humedad de la muestra patrón. Como era de esperarse la resistencia al corte aumento al disminuir el contenido de humedad de la muestra patrón. Se observo en todos los casos que para el aspa de veleta pequeña la resistencia al corte era mayor que para el aspa de veleta grande. Entre un resorte y otro la variación fue mínima para humedades mayores al límite líquido y aumento para humedades menores al límite líquido y cercanas al límite plástico.

En vista de los resultados obtenidos se concluye que existes combinaciónes óptimas **Veleta – Resorte** para ensayar la muestra cuando se encuentra en ciertos rangos de % de humedad.

# INTRODUCCION

La resistencia al corte de los suelos es uno de los puntos fundamentales de toda la Mecánica de Suelos. En efecto, una valoración correcta de ese concepto constituye un paso previo imprescindible para intentar con esperanzas de éxito, cualquier aplicación de la Mecánica de Suelos al análisis de la estabilidad de las obras civiles.

En esta investigación se analizará la resistencia al corte sin drenar de un suelo cohesivo-plástico con el equipo de veleta miniatura de laboratorio. Este equipo consta de una serie de resortes con diferentes constantes de rigidez y de una serie de aspas de veleta con diferentes dimensiones.

El objetivo principal de la investigación es obtener la resistencia al corte sin drenar con las diferentes combinaciones **Veleta – Resorte** de una muestra patrón preparada en el laboratorio a diferentes humedades y observar las posibles variaciones que puedan existir en los resultados.

Para lograr este objetivo se pretende efectuar una serie de ensayos con el equipo de veleta miniatura en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Católica Andrés Bello.

Con este estudio se pretende observar la dispersión que pueda haber para combinaciones **Veleta – Resorte** en un mismo material a igual humedad natural (saturado). Por otra parte se pretende obtener la combinación **Veleta – Resorte** óptima para ciertos rangos de humedades a

las que se encuentre la muestra patrón, con el fin de orientar a las personas interesadas por el tema.

Es necesario recalcar la inaplicabilidad de los resultados obtenidos del análisis de los datos para cualquier muestra se suelo diferente a la usada en esta investigación, ya que otros materiales pueden reflejar comportamientos diferentes. Por otra parte se debe tomar en cuenta que esta en una investigación cualitativa mediante comparación de valores cuantitativos obtenidos de ensayos.

# I. MARCO TEORICO

## I.1 Reseña Histórica

La mecánica de Suelos como rama de la ingeniería ha pasado a través de dos etapas: la empírica y la científica.

En la etapa empírica los ensayos se obtuvieron por el método de ensayo y error, pagando el precio de fallas ocasionales en cualquier diseño. El requisito que debía tener un ingeniero era la intuición, pero por desgracia no todos gozaban de este don. En consecuencia el progreso de esta etapa fue intermitente y lento.

En la etapa científica, se comienzan a predecir los resultados por razonamientos matemáticos sobre las bases de datos de los ensayos y unas pocas relaciones fundamentales. Al principio de esta etapa el logro de una teoría razonable para el estudio de los suelos parecía inalcanzable. Los científicos estaban en el punto justo para la experiencia amarga. El comportamiento de los suelos puso restricciones sobre la aproximación teórica y los problemas ingenieriles surgieron. Sin embargo, se lograron nuevos progresos sobre una base semi-empírica; una gran cantidad de conocimientos fueron acumulados, los cuales suplementaron y calificaron las conclusiones basadas sobre los análisis (Karl Terzaghi, 1948) (16).

Uno de los requisitos indispensables para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de una masa de suelos es conocer su resistencia al corte. Los ingenieros de la Mecánica de Suelos tradicional en sus primeros años había creído resolver este problema, gracias a que en 1776 el ingeniero y físico francés Coulomb, trabajando para la defensa

militar francesa, observó que el empuje que produce un suelo contra un muro de contención causa un ligero movimiento del muro, y por lo tanto en el suelo que esta siendo retenido se forma un plano de deslizamiento esencialmente recto. El postulo que la máxima resistencia al corte ($\tau f$) en el plano de falla esta dada por:

$$\tau_f = c + \sigma * \tan(\phi) \qquad (I.1.1)$$

Donde:

- $\sigma$ es el esfuerzo total en el plano de falla.
- La constante de proporcionalidad tan ($\phi$) fue definida por Coulomb en términos a un ángulo al cual el llamo "Angulo de fricción Interna" y lo definió como una constante del material.
- El termino C fue asignado por Coulomb como "Cohesión" y fue considerado también como una constante del material.

La ecuación de Coulomb es una relación puramente empírica y se basa en la Ley de Fricción para el deslizamiento de dos superficies planas, con la inclusión de un término de cohesión (c) con el cual se toma en cuenta que los suelos arcillosos exhiben resistencia al esfuerzo cortante aun en condiciones en que el esfuerzo total en el plano de falla es nulo (Peter L. Berry, 1997) (19).

Por lo tanto podemos decir, que los suelos pueden ser clasificados según esta ecuación en:

- Suelos puramente cohesivos, sin rozamiento interno ($\tau = c$).
- Suelos puramente friccionantes, sin cohesión ($\tau = \sigma * \tan(\phi)$).
- Suelos cohesivos y friccionantes ($\tau = c + \sigma * \tan(\phi)$.

La utilización de la ecuación de Coulomb no condujo siempre a diseños sastifactorios de las estructuras de suelo y los ingenieros con ciertos dotes de observación comenzaron a notar las fuertes discrepancias que existían entre la realidad y la teoría. La razón para ello no se hizo evidente hasta que en 1925 Karl Terzaghi, con base en serias investigaciones experimentales, publico el principio de esfuerzos efectivos que dice que el esfuerzo total en el plano de falla ($\sigma$) es igual al el esfuerzo efectivo ($\sigma'$) más la presión intersticial (u), es decir:

$$\sigma = \sigma' + u \qquad (I.1.2)$$

Pudo apreciarse entonces que, dado que el agua no puede soportar esfuerzos cortantes sustanciales, la resistencia al corte de un suelo debe ser el resultado únicamente de la resistencia a la fricción que se produce en los puntos de contacto entre partículas; la magnitud de esta depende solo de la magnitud de los esfuerzos efectivos que soporta el esqueleto del suelo. Por lo tanto, cuando más grande sea el esfuerzo efectivo normal a un plano de falla potencial, mayor será la resistencia al corte de dicho plano. Entonces, si se expresa la ecuación de Coulomb en términos de esfuerzos efectivos, se tiene:

$$\tau_f = c' + \sigma' * \tan(\phi') \qquad (I.1.3)$$

en la cual los parámetros c' y $\phi'$ son propiedades del esqueleto del suelo, denominados cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva, respectivamente (Peter L. Berry, 1997) (19).

Posteriormente, Hvorslev hizo notar que la cohesión de las arcillas saturadas no era una constante, sino que resultaba ser función del contenido de agua.

Se debe notar que la contribución de Hvorslev destruyó la idea insostenible de que la cohesión fuese una constante que dependía de las propiedades del esqueleto del suelo. (Juárez y Rico, 1980) (13).

Paralelamente en el año 1900, el ingeniero Otto Mohr hipotetizó un criterio de falla para materiales reales, en el cual estableció que "cuando el esfuerzo de corte sobre el plano de falla alcanza la falla es únicamente función del esfuerzo normal aplicado sobre ese plano", es decir:

$$\tau_{ff} = f\,(\sigma_{ff}) \qquad (I.1.4)$$

Donde, $\tau$ es el esfuerzo de corte y $\sigma$ es el esfuerzo normal. El primer subíndice f es referido al plano sobre el cual el esfuerzo actúa (el plano de falla) y la segunda f indica que esta bajo la falla. (D. Kovacs, 1981) (8).

De esta manera si conocemos el esfuerzo principal a la falla podemos construir un círculo de Morh, para ese estado de esfuerzo particular. Igualmente podemos guiar varios ensayos a la falla o medir esfuerzos de falla en varios elementos y construir el círculo de Mohr para cada elemento o ensayos. (D. Kovacs, 1981) (8).

Ya que el círculo de Mohr determina la falla, es posible construir la envolvente de falla del esfuerzo de corte. Esta envolvente llamada "La envolvente de Mohr" expresa la relación funcional entre el esfuerzo cortante y $\tau_{ff}$ y el esfuerzo normal $\sigma_{ff}$ a la falla (D. Kovacs, 1981) (8)

El significado físico de la envolvente de Mohr puede entenderse por las siguientes consideraciones:

- Si el círculo de Mohr para un determinado estado de esfuerzos queda totalmente por debajo de la envolvente, el suelo será estable para ese estado de esfuerzos.

- Si el círculo de Mohr es tangente a la envolvente habrá alcanzado la resistencia máxima del suelo en un determinado plano a través del mismo. Este plano se denomina plano de falla.

- No es posible mantener en el interior de un suelo un estado de esfuerzos cuyo círculo de Mohr corte a la envolvente correspondiente a ese suelo. Cualquier intento de imponer ese estado de esfuerzos daría lugar a deformaciones ilimitadas, es decir a la falla.

La envolvente de Mohr tiene forma curva, por lo tanto el trabajo era más laborioso. Entonces pareció razonable combinar la ecuación de Coulomb (I.1.1), con el criterio de Mohr (I.1.4) y ajustar la curva a un línea recta. La forma en que se ajusta una línea recta la envolvente de Mohr dependerá de la gama de $\sigma_{ff}$ que interese. De esta manera nace así el "Criterio de Mohr-Coulomb", el cual es el más aplicado al estudio de los suelos (Lambe, 1998).

Como el criterio de Mohr-Coulomb asume implícitamente que la resistencia es independiente del esfuerzo principal intermedio, modernamente se han desarrollado otras teorías que toman en cuenta dicho esfuerzo, tal como la realizada por T.H. Wu, A.K. Loh y L.E. Malvern (Febrero 1963); en la cual el criterio de Mohr-Coulomb fue extendido al esfuerzo del espacio tridimensional, y cuya hipótesis fue que "si el criterio de falla es

independiente del esfuerzo principal intermedio entonces la envolvente resultante debía ser una pirámide hexagonal".

Por otra parte, R. M. Haythornthwaite (Septiembre 1963) discutió la validez del criterio de Mohr-Coulomb en la investigación antes señalada, refiriéndose a que la fuente de la aparente desviación del criterio de Mohr-Coulomb era producida por la existencia de una distribución de esfuerzos no uniformes en los ensayos, y que la teoría era basada en esfuerzos promedios. En definitiva, en los casos de los suelos, uno de los mejores criterios disponibles es una generalización de las ideas de Mohr-Coulomb a un espacio cartesiano ortogonal de tres dimensiones.

Del mismo modo, las consideraciones anteriores se sustentan de manera experimental. Como el suelo no es isótropo ni linealmente elástico, no es disponible determinarle las constantes elásticas E (Módulo de Young) y $\mu$ (Coeficiente de Poisson) para calcular la relación entre esfuerzos y deformaciones. Es por eso que se utilizan diferentes pruebas, siendo cada una de ellas apropiada para estudiar el comportamiento esfuerzo-deformación, bajo un tipo de carga especifica. Entre estas pruebas están: Prueba Edometrica o de Consolidación, Prueba Triaxial, Prueba de corte Directo, Prueba de Veleta, etc.

En la presente investigación se hicieron pruebas con el equipo de veleta miniatura del laboratorio, con el cual se obtienen resultados bastante confiables para la resistencia cortante sin drenaje Su (concepto: $\phi = 0$) de suelos cohesivos plásticos.

La prueba de veleta es una contribución relativamente moderna al estudio de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. El aparato fue diseñado en el año 1940 por el investigador Lyman Carlson en el Instituto

Geotécnico de Suecia; el cual consiste básicamente de un vástago desmontable en piezas, en cuyo extremo inferior esta ligada la veleta propiamente dicha, generalmente de cuatro aspas ligadas a un eje, que es prolongación del vástago. Se aplica un torque en la parte superior del vástago para que la veleta gire con velocidad uniforme, hasta que el suelo falle.

En 1948 en suecia Cadling y Odenstad desarrollaron una ecuación para establecer la relación entre la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y la torsión aplicada por el vástago de la veleta.

Inicialmente propusieron que la superficie de falla es un cilindro circular con un diámetro y una altura igual a la del aspa de la veleta, por lo tanto concluyeron que el torque máximo aplicado a la cabeza de del vástago para general dicha falla debe ser igual a la suma del momento resistente de la fuerza cortante a lo largo de la superficie lateral del cilindro de suelo (Ms) y el momento resistente de la fuerza cortante de cada extremo (Me) (ver figura 1), es decir:

$$\mathbf{T = Ms + Me + Me} \qquad (I.1.5)$$

El momento resistente Ms se expresa como:

$$\mathbf{Ms = (\pi DH)\ Su\ (D/2)} \qquad (I.1.6)$$

Donde: D = diámetro del aspa de la veleta (cm)

H = altura del aspa de la veleta (cm)

Su = Resistencia al corte sin drenar ($Kg/cm^2$)

Para el cálculo de Me, los investigadores supusieron tres tipos de distribución de la movilización de la resistencia cortante en los extremos del cilindro de suelo:

- *Triangular:* la movilización de la resistencia cortante es Cu en la periferia del cilindro de suelo y decrece linealmente a 0 en el centro.

- *Uniforme:* la movilización de la resistencia cortante es constante (es decir, Cu) de la periferia al centro del cilindro de suelo.

- *Parabólica:* la movilización de la resistencia cortante es Cu 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 2. Por lo tanto el torque en la falla se expresa como:

$$\mathbf{T = \pi\, Su\, [H^*(D^2/2) + \beta^*(D^3/4)]} \qquad (I.1.7)$$

Donde:

T: Torque máximo (Kg-cm)

H: Altura de las aspas de la veleta (cm)

D: Diámetro de las aspas de la veleta (cm)

Su: Esfuerzo cortante en el torque máximo (Kg/cm$^2$)

$\beta = 1/2$ 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

Bjerrum (1974) demostró que conforme la plasticidad de los suelos se incrementa; la Su obtenida de las pruebas de corte con veletas da resultados no muy confiables para el diseño de cimentaciones. Por esta razón, sugirió la siguiente corrección:

$$\mathbf{Su}_{\text{(diseño)}} = \lambda\ \mathbf{Su}_{\text{(cortante de la veleta)}} \qquad (I.1.7)$$

Donde:

$\lambda$ = factor de corrección.

Se obtiene de la carta de corrección de Bjerrum ver figura 3 (Bowles, 1988).

Según el Profesor Hugo Pérez Ayala la corrección propuesta por Bjerrum descripta anteriormente para disminuir el valor de la resistencia al corte sin drenar basada en el índice de plasticidad de un material remoldeado en el laboratorio no relaciona con otra propiedad en sitio y muestra una gran dispersión en sus valores.

En opinión del profesor, el índice de liquidez es un valor que relaciona en su expresión la plasticidad y la humedad natural, en consecuencia la relación de vacíos y el peso unitario, según el las correlaciones en sitio, para materiales plásticos deben hacerse con este índice y no con el índice plástico que por si solo pueden inducir a errores en las estimaciones.

Consideraciones de varios autores que se muestran posteriormente son mas aconsejables ya que ellos toman en cuenta otros factores mas reales de la condición en sitio como la relación de sobre consolidación.

Ladd (1977), añade puntos a la carta de corrección de Bjerrum ver figura 3 (Bowles, 1988) (12).

Ass et al (1986), hace un nuevo estudio importante de la carta de Bjerrum, donde incluye OCR y produce una carta revisada la cual se muestra en la figura 4 (Bowles, 1988) (12).

Arman et al (1975) y Foott. Et al (1980), encontraron que los valores obtenidos de la resistencia al corte no drenada con el equipo de veleta son mas altos, en el orden de $2q_u$ (Bowles, 1988) (12).

Walter (1986), encontró una relación aceptable entre $S_{u,\,v}$ y el ensayo triaxial del Laboratorio. Además en su opinión el ensayo de veleta de campo es de difícil ejecución para profundidades mayores a 10 m.

Mas recientemente, Morris y William (1994) dieron las siguientes correlaciones para $\lambda$:

$$\lambda = 1{,}18e^{-0{,}08(PI)} \quad \textbf{(Para PI > 5)} \qquad (I.1.8)$$

$$\lambda = 7{,}01e^{-0{,}08(LL)} + 0{,}57 \quad \textbf{(Para LL > 20)} \qquad (I.1.9)$$

Donde:

LL: limite liquido

IP: indice de plasticidad

(Braja M. Das, 2001)(4)

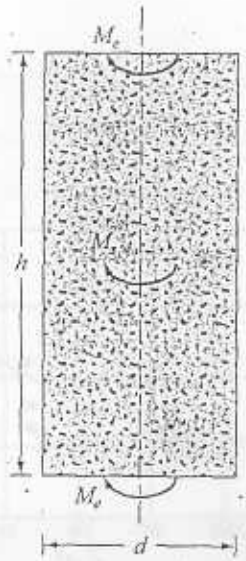


**Figura 1. Momento Resistente de la Fuerza Cortante (Braja M. Das, 2001) (4)**

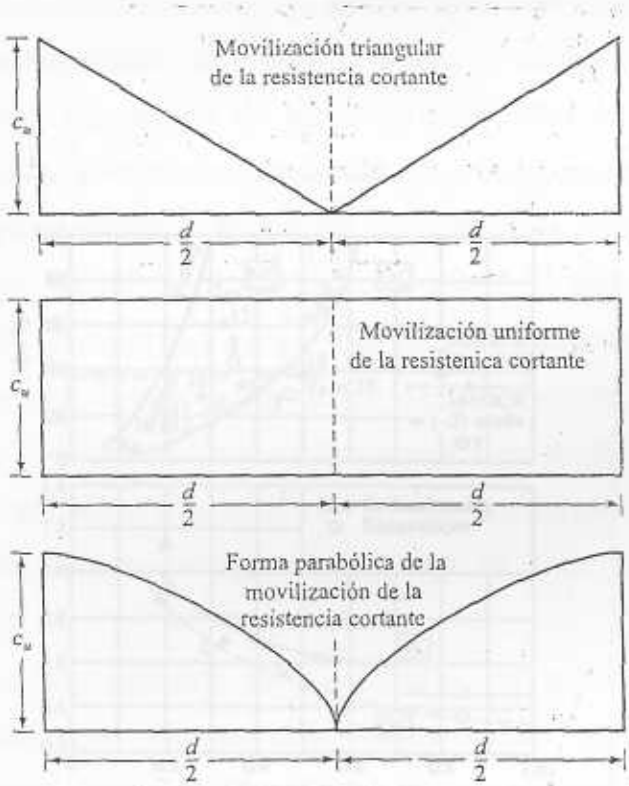


**Figura 2. Variaciones en la movilización de la resistencia cortante (Braja M. Das, 2001) (4)**

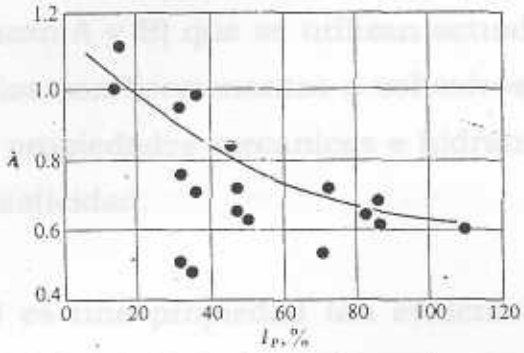


**Figura 3. Carta de Corrección de Bjerrum para el Ensayo de Veleta [Bjerrum (1972) y Ladd et al. (1977)] (Bowles, 1988) (12)**

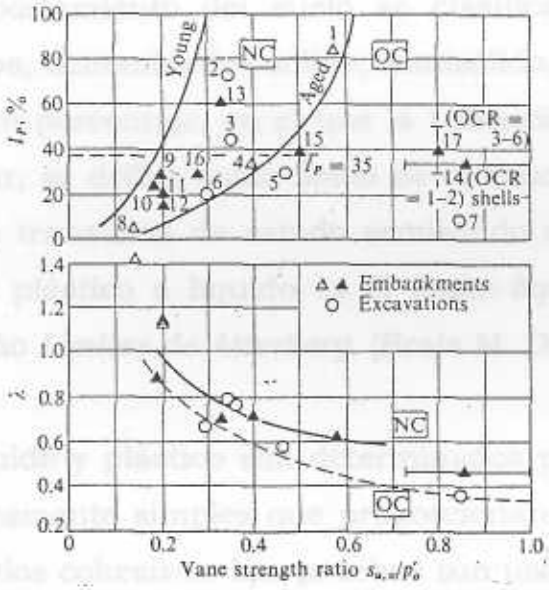


**Figura 4. Reinterpretación de la Carta de Corrección de Bjerrum por Ass et al. (Bowles, 1988) (12)**

Como se menciono anteriormente el ensayo de veleta es recomendado para suelos cohesivos plásticos (arcillas). Para conocer cuales son los suelos que cumplen estas características se deben clasificar según los sistemas de clasificación (Ver Anexo A y B) que se utilizan actualmente, en los cuales se definen que los suelos son friccionantes o cohesivos en función del tamaño de los granos y sus propiedades mecánicas e hidráulicas, conocidas por sus características de plasticidad.

La plasticidad es una propiedad tan evidente que ha servido antaño para clasificar los suelos en forma puramente descriptiva. Se han desarrollado varios criterios, pero el mas usado ha sido el criterio del científico sueco, Albert Mauritz Atterberg, el desarrollo un método para describir la plasticidad de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido. El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como *limite de contracción*. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el *límite plástico*, y el estado plástico a líquido es el *límite líquido*. Esos límites se conocen también como *Limites de Atterberg*. (Braja M. Das, 2001) (4).

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudio la relación del

índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una "Carta de Plasticidad", la cual esta dividida en grupos definidos que indican las propiedades mecánicas e hidráulicas de ese grupo y en la cual, al situar un suelo desconocido, por medio del calculo de los parámetros que definen su plasticidad, se obtiene información valiosa y básica sobre el suelo en cuestión, y que permite su identificación y clasificación. (Lambe, 1996; Braja M. Das, 2001) (4).

Es conveniente que estos valores se obtienen de muestras remoldeadas (estructura dispersa) y existen algunas variaciones en muestras sin alterar. Aún así es un parámetro muy importante para la evaluación cualitativa del material.

**II.2 Resistencia al Corte**

La resistencia al esfuerzo cortante entre dos partículas es la fuerza que debe aplicarse para producir un desplazamiento relativo entre las mismas. El origen de esta resistencia esta 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 superficiales. Así pues la resistencia por fricción entre dos partículas es de la misma naturaleza que la resistencia al esfuerzo cortante de un bloque de material sólido intacto, como puede ser el acero (Lambe, 1998) (24).

Para obtener la resistencia al corte en laboratorio existes diferentes equipos, los cuales según sus características e indicaciones son ideales para obtener la resistencia al corte con drenaje, sin drenaje o ambas.

La resistencia al corte con drenaje se lleva a cabo sobre un espécimen de suelo saturado manteniendo la velocidad de carga suficientemente lenta de manera que el exceso de presión de poro del agua generada en el suelo se disipe completamente por drenaje. Los equipos mas usados para obtener la resistencia al corte con drenaje son: el equipo de corte directo y el ensayo triaxial CD.

La resistencia al corte sin drenaje es usualmente llevada a cabo en especimenes de arcilla, se obtiene sometiendo las muestras a condiciones no drenadas durante todo el ensayo, donde no se permite que fluya el agua. Los equipos más utilizados para obtener la resistencia al corte sin drenaje son: la veleta de campo, ensayos triaxiales CU y UU, la veleta miniatura de laboratorio y el ensayo de compresión no confinada. El equipo con mayor credibilidad para obtener la resistencia al corte sin drenaje en arcillas normalmente consolidadas es la veleta de campo, ya que esta se lleva a cabo en sitio, donde la muestra no ha sufrido perturbaciones.

Es importante destacar que para una determinada arcilla con una determinada historia de esfuerzos, existe una relación única resistencia-esfuerzo-deformación que es aplicable independientemente del tipo de carga y del grado de drenaje al aplicar esta, es decir, independientemente de la forma de fallar el suelo, la relación entre la resistencia y el esfuerzo es la misma. Sin embargo si se consolidan dos muestras de una determinada arcilla bajo el mismo esfuerzo y una de ellas se rompe por corte con drenaje completo y la otra sin drenaje, se obtendrán diferentes valores de la resistencia. Esta variación se explica por la diferencia entre presiones intersticiales, y por lo tanto entre los esfuerzos efectivos, existentes en ambas muestras (Lambe, 1998) (24).

## II.3 Conceptos importantes

Para que el lector pueda comprender más a fondo el presente trabajo de grado se definen los siguientes términos:

- **Suelos Cohesivos:** son aquellos suelos que presentan una resistencia al corte aun cuando se anule la fuerza normal aplicada, esto puede ser debido a que las partículas de suelo han estado en contacto por un tiempo prolongado sin alteraciones (Lambe, 1998) (24).

- **Tixotropía:** es un término que se emplea para describir un aumento de la resistencia al corte con el tiempo sin variar la composición del suelo (Lambe, 1998) (24).

  Entre las partículas arcillosas se ejercen fuerzas debidas a las ligaduras fisicoquímicas que se manifiestan en sus respectivas películas envolventes de agua y cationes adsorbidos. Un amasado energético de la arcilla, puede romper esas ligaduras momentáneamente, lo cual se refleja macrofisicamente por una perdida sensible de las propiedades de resistencia del material. Sin embargo, la mayoría de las arcillas vuelven más o menos lentamente a sus propiedades originales; este fenómeno se le denomina *Tixotropía* (Juárez y Rico, 1980) (13).

- **Resistencia inalterada:** es la resistencia al corte máxima sin drenaje que tiene un suelo tal como existe en el terreno (Braja M. Das, 2001).

- **Resistencia remoldeada:** es la resistencia al corte máxima sin drenaje que tiene un suelo después de haber sido sometido a un amasado sin variación de humedad (Braja M. Das, 2001) (4).

- **Sensitividad:** es el cociente entre la resistencia inalterada y la resistencia remoldeada, o bien:

$$S = Cu_{(inalterada)} / Cu_{(remoldeada)} \qquad (I.3.1)$$

(Braja M. Das, 2001) (4).

- **Plasticidad:** es la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse (Juárez y Rico, 1980) (13).

# Capitulo II. Ensayos de Veleta

## II.1 Ensayo de Veleta de Campo

### II.1.1 Definición

El ensayo de corte con veleta de campo consiste en colocar una veleta de cuatro hojas en el suelo inalterado y girarla desde la superficie para determinar la fuerza de torsión necesaria para romper una superficie cilíndrica cizallada por la veleta, que se convierte en la resistencia al corte de la superficie cilíndrica.

El ensayo de Veleta de Campo es recomendado para suelos cohesivos plásticos con una resistencia al corte no drenada inferior a 2 Kg/cm$^2$.

### II.1.2 Descripción del Equipo

El equipo de veleta de campo se muestra en la figura 5 y consiste de varias parte principales como se describe a continuación:

El conjunto para aplicar la torsión consiste en un anillo robusto, de 12,7 cm de diámetro exterior, 2,54 cm de altura y un espesor de 1,44 cm, con la finalidad de aplicar un momento equilibrado al vástago de la veleta sin necesidad de un cojinete de empuje. El anillo tiene una sección cortada la cual se deformara según se aplique la torsión y su deformación viene indicada por un medidor con dial, este conjunto se calibra en metros – kilo

de torsión. Una rueda dentada de 25,4 cm, que esta unida al anillo de torsión, engrana con una manivela que funciona con velocidad controlada. Esta rueda dentada esta marcada en grados y tiene un indice para indicar la graduación.

Una entubación normalizada de 20,32 cm por 60 cm de longitud con salientes laterales para apoyar en el terreno y enterrarse en una profundidad de 30 cm, se emplea para anclar el dispositivo de torsión. Puede utilizarse ampliaciones para variar el nivel del aparato y la profundidad de colocación de la veleta, o para elevar el aparato por encima del nivel freático.

El varillaje de la veleta esta formado por:

- Una sección superior cuadrada que pasa a través del anillo de torsión.
- Una sección central constituida por una varilla de perforación normalizada tipo A de 1,5 cm de longitud.
- Una sección inferior de acero inoxidable de 2,5 cm en el que va soldada la veleta.
- Una entubación tipo BX de 1,5 cm de longitud que envuelve la varilla de la veleta y contiene en la parte inferior un cojinete estanco.

El cojinete esta unido a una junta estanca de goma anular y tiene un engrasador.

Las aspas de las veletas que se unen al extremo de la varilla son de cuatro tamaños:

- De 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud
- De 7,5 cm de diámetro por 15 cm de longitud
- De 6,2 cm de diámetro por 12,7 cm de longitud
- De 5 cm de diámetro por 10 cm de longitud

El tamaño de la veleta elegida deberá ser el más conveniente para el estado general del suelo. En la tabla 1 se puede observar cuales son las dimensiones de veleta mas recomendable para cada suelo y el rango de operación de la resistencia al corte.

| **Dimensiones de la Veleta (cm)** | **Resistencia al Corte ($Kg/cm^2$)** | **Tipo de Suelos** |
|---|---|---|
| 10 X 20 | 0 – 0,70 | Saturados Muy Blando |
| 7,5 X 15 | 0 – 1,68 | Saturados entre blandos y firmes |
| 6,2 X 12,7 | 0 – 2,81 | Saturados moderadamente firmes |
| 5 X 10 | - | Saturados firmes |

**Tabla 1. Dimensiones de Veleta de Campo más recomendadas según el tipo de suelo y su resistencia al corte**

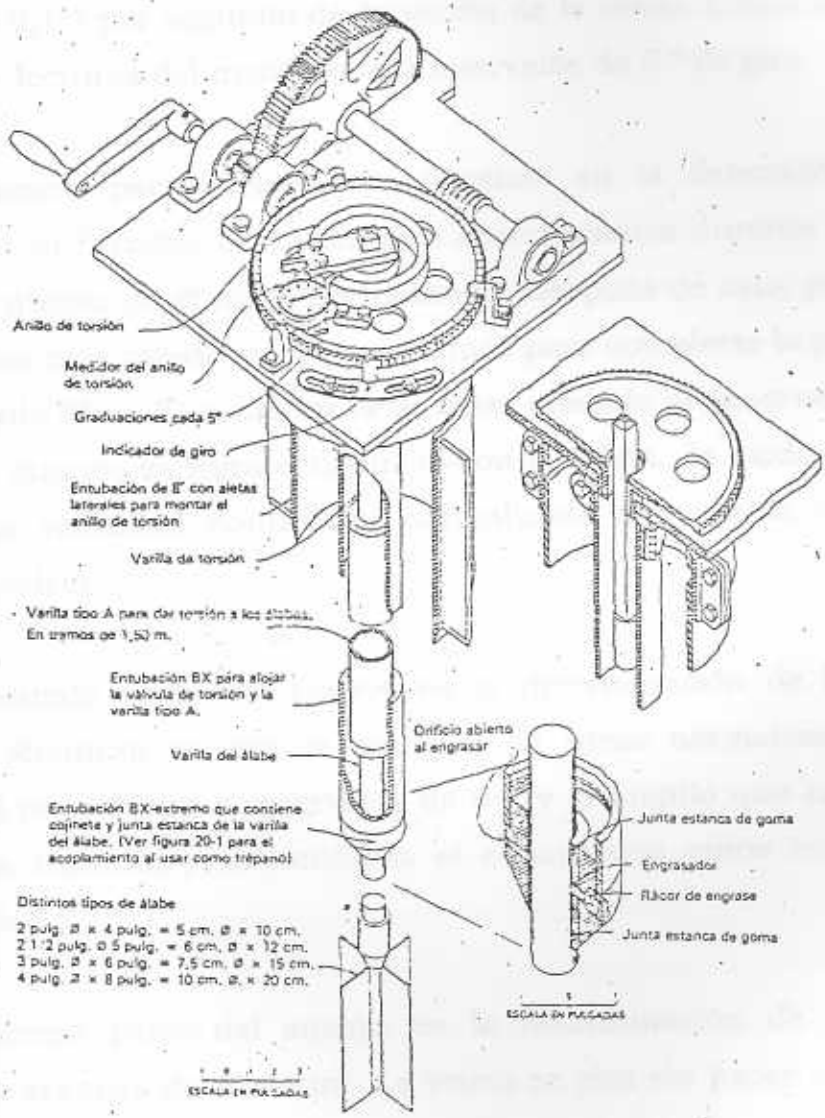


**Figura 5. Equipo de Veleta de Campo (Bowles, 1988) (12)**

### II.1.3 Procedimiento de Ensayo

Las lecturas iniciales del manómetro y del transportador se toman después de comprobar que la varilla esta suelta (torsión cero y tensando después. Se gira la manivela a un ritmo uniforme de 12 vueltas por minuto, que equivale a una vuelta cada 5 segundos de cronometro. Esto corresponde a un giro de 0,1 ° por segundo de la varilla de la veleta (ritmo normalizado). Se toman las lecturas del manómetro a intervalos de 5 ° de giro.

La primera parte del ensayo consiste en la determinación de la corrección de la fricción. Se hacen seis observaciones durante los primeros 30 ° de giro utilizando el ritmo normalizado. Después de esto, puede llevarse a cabo un giro más rápido sin observaciones para completar la parte restante del movimiento libre. El operador debe tener cuidado al observar mediante el manómetro, cuando se logra el contacto con la veleta, de modo que se utilice de nuevo la velocidad controlada normalizada durante la aplicación de torsión a la veleta.

La segunda parte del ensayo es la determinación de la resistencia inalterada. Mientras se gira la manivela al ritmo normalizado, se hacen lecturas del manómetro a intervalos de 5 ° y el ángulo que hay cuando se hacen estas lecturas y se continúa el ensayo con cinco lecturas más a intervalos de 5 °.

La tercera parte del ensayo es la determinación de la resistencia remoldeada después de la rotura. La veleta se gira sin hacer anotaciones en un ángulo de 360 °, e incluso pueden exigirse giros adicionales. Después de este giro, se vuelve al ensayo a ritmo normalizado y controlado. Se hacen cinco lecturas más a 5 °. Posteriormente, se gira hacia atrás la manivela y se

hace una lectura sin carga para comprobar la lectura inicial.

Por ultimo se calcula la resistencia al corte mediante las formulas expuestas en apartes anteriores. Es importante destacar que debe hacerse para cada equipo de veleta de campo una curva de calibración que muestre los Kg – m de torsión en función de las diferencias de lectura del manómetro. Estas curvas se obtienen mediante ensayos de laboratorio de calibración del equipo.

La resistencia al corte no drenada obtenida con el equipo de veleta de campo puede variar si el ensayo es realizado a diferentes profundidades. Normalmente se debe a que las humedades de saturación son inferiores a mayor profundidad o lo que es lo mismo la relación de vacíos disminuye, esto es producto del proceso de consolidación del suelo por su propio peso, especialmente en extractos de gran espesor.

## II.2 Ensayo de veleta Miniatura de Laboratorio

### II.2.1 Definición

La prueba de esfuerzo cortante de veleta miniatura 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 (ver figura 6-a). 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.

Es importante destacar que para el equipo de veleta miniatura la muestra que va a ser ensayada debe estar constituida por suelos saturados blandos ($\phi = 0$), con una resistencia al esfuerzo cortante sin drenar inferior a $1Kg/cm^2$. La fatiga o falla de la veleta en arcillas más rígidas y suelos principalmente sedimentarios puede variar de la supuesta falla cilíndrica superficial causando por lo tanto un error en la prueba de la fuerza medida en muestras sin perturbar posiblemente con lentes finos de otros materiales que afectan el valor final.

El ensayo se puede realizar en muestras remoldeadas o sin remoldear (no perturbadas). Es importante destacar que para muestras remoldeadas muy blandas los valores obtenidos pueden considerarse como valores de resistencia al corte no drenada "Su" residuales.

### II.2.2 Descripción del Equipo

El equipo consta de un vástago al cual esta ligada la veleta, generalmente compuesta por cuatro aspas rectangulares según se puede observar en la figura 6-b. Se recomienda que la altura de la veleta sea el doble del diámetro (2:1). Aunque veletas con una altura igual al diámetro (1:1) también se pueden usar si se quiere determinar por separado los esfuerzos horizontales de las esfuerzos verticales. El diámetro de la veleta puede variar desde 0,5" a 1" (12,7 a 25,4 mm).

El equipo de veleta miniatura de laboratorio tiene un motor el cual hace girar el resorte de torsión a una velocidad constante de 60 a 90° por minuto. Es importante destacar que La velocidad de rotación de la veleta tiene dos efectos principales en las mediciones resultantes del esfuerzo cortante de la veleta. El primero es prevenir que ocurrirá drenaje para así

poder medir el esfuerzo cortante sin drenar. El segundo se parece a un esfuerzo viscoso, mientras mas rápidamente queda el suelo rebanado mayor es la fuerza cortante medida.

El equipo consta de cuatro unidades de resortes de torsión de diferentes sensibilidades. El resorte N°1 es el mas sensible y 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 mas duro se recomienda para suelos muy firmes y es el menos utilizado.

Se puede observar una foto del equipo de veleta miniatura de laboratorio en el Anexo D, Figura D.6.

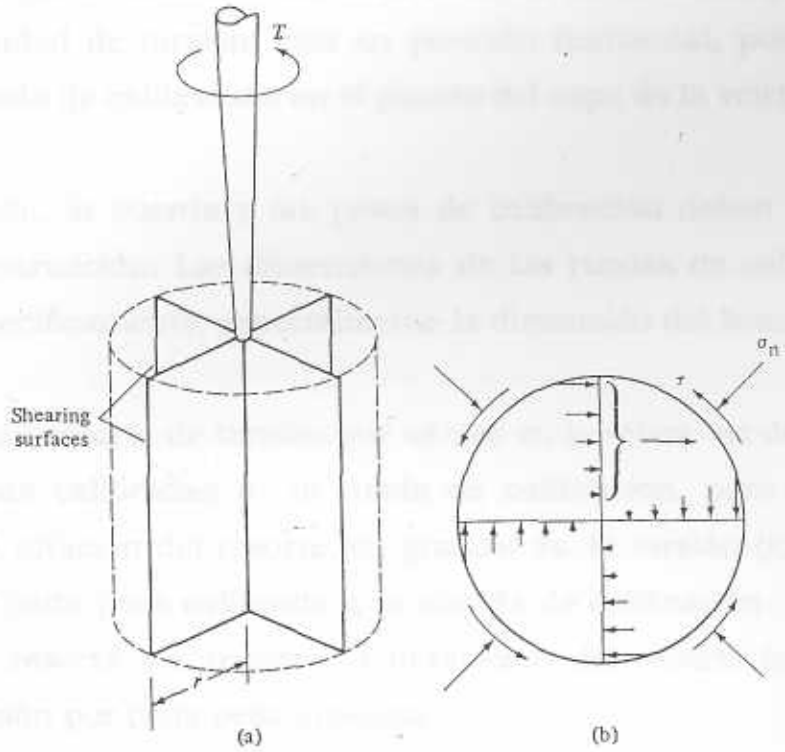


**Figura 6. Principio del ensayo de Veleta.**
**(a) Forma del cilindro de falla alrededor de la veleta**
**(b) Rotación de la veleta inducida por el esfuerzo normal en la superficie cortante**
**(Spangler y Handy, 1973) (26)**

### II.2.3 Calibración del Equipo

Se deben hacer calibraciones periódicas de las unidades de resortes de torsión para asegurarse que la operación del dispositivo de la veleta miniatura sea adecuada. La calibración se logra aplicando pesas calibradas a una rueda calibrada para producir una torsión conocida (brazo de palanca por peso). Se fija la unidad de esfuerzo cortante de tal modo que el resorte de la veleta (unidad de torsión) este en posición horizontal, posteriormente se inserta la rueda de calibración en el puesto del aspa de la veleta.

La rueda, la cuerda y las pesas de calibración deben estar libres de cualquier obstrucción. Las dimensiones de las ruedas de calibración deben anotarse específicamente, especialmente la dimensión del brazo de palanca.

Por cada resorte de torsión que se use en la veleta se debe aplicar una serie de pesas calibradas a la rueda de calibración, para desarrollar un diagrama de rotación del resorte (en grados) vs. la torsión (Kg - cm). Se fija con cuidado cada pesa calibrada a la cuerda de calibración se permite que se desvié el resorte. Se registra la desviación del resorte (en grados) y se aplica la torsión por cada pesa aplicada.

### II.2.4 Procedimiento del Ensayo

- 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.
- 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. Si para el ensayo se emplea dentro de la muestra una veleta muy larga (12") entonces la adherencia entre el vástago y el suelo debe evaluarse. La adherencia se evalúa insertando un vástago sin veleta con las mismas dimensiones del vástago de la veleta dentro del suelo hasta el nivel que se analiza y anotando la torsión resultante contra la rotación. Esta medida de torsión se sustrae de los resultados del ensayo; para eliminar la corrección el vástago de torsión puede envolverse en una manga sin fricción para evitar que la adherencia ocurra.

- Se toma la lectura inicial.

- 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 una velocidad constante de 60 – 90°/min.

- Se anota las lecturas de las deflexiones del resorte o de la torsión del transductor eléctrico por lo menos cada 5° de rotación hasta que la deflexión del resorte no se incremente mas (se considera que ha ocurrido la falla) o hasta que se obtenga un máximo de 180° de rotación. Durante la rotación de la veleta se sostiene el aspa a una altura fija.

- Se anota las lecturas de torsión máxima o intermedia si se requiere.

- Se toma una muestra representativa del espécimen para determinar su contenido de humedad.

- 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.

- Después de obtener la torsión máxima determine la fuerza de veleta remoldeada girando la veleta rápidamente por un mínimo de 5 a 10 revoluciones. La determinación de la fuerza remoldeada debe empezarse inmediatamente después de terminar la rotación rápida y o en su efecto dentro de un minuto después del remoldeo. Se repite el procedimiento anterior.

- Para el calculo de la resistencia al corte sin drenar se utiliza la ecuación de de Calding que fue descripta con detalles en el capitulo I.

Para más detalles sobre todo lo referido al equipo de veleta miniatura de laboratorio ver el Anexo D.

**II.3 Diferencias entre los Equipo de Veleta de Campo y de Laboratorio**

Estos dos equipos se basan principalmente en el mismo fundamento, que es obtener la resistencia al corte sin drenaje de muestras de suelos cohesivos y plásticos ($\phi = 0$) mediante la aplicación de un torque al vástago de una veleta para obtener una falla cilíndrica del suelo. La resistencia al corte por lo tanto se calcula bajo la ecuación diseñada por Calding para ambos equipos.

Una de las diferencias fundamentales entre ambos equipos es que en las muestras ensayadas en el laboratorio con la veleta miniatura se puede asumir que los esfuerzos verticales sobre las tapas del cilindro que configura

la superficie de falla son iguales a los horizontales, esto no ocurre en ensayos realizados en sitio en muestras no perturbadas, confinadas y sometidas en un mismo deposito a cargas geostaticas que aumentan con la profundidad.

Otra diferencia que existe entre los dos ensayos es que para la prueba en sitio con la veleta de campo la muestra se considera que esta en su estado original, es decir, no ha sido alterada, en cambio para la prueba de veleta miniatura de laboratorio, se usan muestras remoldeadas y "sin alterar" aún y cuando sabemos que el termino "sin alterar" esta afectado en este caso por la perdida del confinamiento real en sitio.

**II.4 Descripción del Estudio**

La finalidad de la presente investigación fue analizar la variación de la resistencia al corte no drenada con el equipo veleta miniatura de laboratorio, de un material cohesivo y plástico (muestra patrón, 100% arcilla), a distintas humedades y con diferentes combinaciones veleta-resorte. Para este propósito se hicieron una serie de ensayos las siguientes humedades obtenidas mediante secado al aire: 78,58%; 65,53%; 56,01%; 51,24%; 44,88%; 39,16%; 36,86%; 34,10%; 32,65%; 26,74% y 22,49%.

La razón por la cual se variaron las humedades desde mayores al límite liquido hasta cercanas al límite plástico, fue para garantizar en todo momento la plasticidad del material y mediante un secado lento propiciar la pérdida de agua sin perdida de su condición de muestra saturada (consolidación lenta por secado). Además uno de los factores que afecta la resistencia al corte sin drenar es la humedad, al disminuir la misma la resistencia al corte sin drenar aumenta (Lambe, 1998)

Conociendo que las muestras constituidas por materiales cohesivos y plásticos tienen la propiedad de recuperar su resistencia o aumentarla después de un tiempo de haberlas ensayado o haber alterado su estado de reposo original (efecto tixotropico), se intento para observar el mismo, realizando algunos ensayos al respecto.

Cuando se obtuvo el límite líquido, este se ejecuto por dos formas: primero se dejo el material reposar por 24 horas y luego por 48 horas antes de ser ensayado, con la finalidad de comprobar que el número de golpes preciso para cerrar el surco, en la determinación del límite liquido aumenta o disminuye según el tiempo de reposo en el proceso de saturación del material a la humedad requerida (Jiménez salas, 1951).

# Capitulo III. Metodología

## III.1 Preparación de la Muestra en el Laboratorio

### III.1.1 Introducción

Para preparar una muestra en el laboratorio es necesario conocer a fondo el equipo donde va a ser ensayada, debido a que para cada equipo existe un tipo de muestra ideal. En el caso del equipo de veleta miniatura de laboratorio, la muestra mas recomendada es la formada por suelos cohesivos y plásticos, es decir arcillosos como ya se especifico anteriormente. La preparación del material con alto porcentaje de arcilla disminuye la posibilidad de que se genere resistencia al corte por fricción en la superficie cilíndrica ensayada, razón por la que podemos afirmar que es producida por la cohesión entre partículas en estructura dispersa.

Por lo tanto lo primero que se hizo fue buscar una fuente donde pudieran existir suelos de este tipo. Cuando se obtuvo el material este fue sometido a una serie de tratamientos mecánicos para obtener una muestra homogénea (lo que se denomina remoldeo) y que cumpliera con ciertas características.

Luego se clasifico mediante los distintos sistemas de clasificación que existen (ver Anexos A y B), para conocer más sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas de la muestra. Es importante destacar que para suelos constituidos por partículas menores que el tamiz #200 estas propiedades pueden deducirse cualitativamente a partir de sus características de plasticidad.

### III.1.2 Caracteristicas del Material

El material inicial proviene de la Alfarería Venezuela, la cual se encuentra ubicada en Guarenas (Estado Miranda) (Ver anexo E.1)

### III.1.3 Preparación de la muestra patrón

- El material inicial se sumergió en agua con el fin de que el material grueso se soltara del material fino.
- Posteriormente al período de inmersión, el material se disperso utilizando un aparato agitador.
- Dicha suspensión se dejo asentar por un periodo de una hora para que el material arenoso llegara al fondo y luego verter la parte superior en otro envase con el fin de lavarla por un tamiz #200.
- Luego se procedió al lavado del material en el cual se guardo tanto el pasante del tamiz # 200 como el retenido en el mismo.
- Ambos materiales se dejaron sedimentar por un periodo de 48 hs.
- Pasadas las 48 hs el agua limpia por encima de los materiales sedimentados se removió por sifoneado.
- El material sedimentado pasante del tamiz #200 (muestra patrón, 100% arcilla) se unió y amaso con el fin de homogenizar. Luego una gran parte de la muestra se coloco en envases los cuales se dejaron al aire libre para que se secara hasta una humedad óptima a la cual

pudiese ser ensayada. La otra parte se seco al horno con el fin de clasificar el material (ver Anexo F.2)

- El material sedimentado retenido en el tamiz #200 (arena) se seco al horno y se clasifico (ver anexo F.1).

## III.2 Ensayos de Clasificación y Comportamiento de la muestra patrón

### III.2.1 Ensayos de clasificación

Se realizaron los siguientes ensayos:

- Hidrometria
- Gravedad Especifica
- Limite de Contracción
- Limites de Attenbert
- Contenido de humedad

Los resultados obtenidos se pueden observar en el Anexo F.2

### III.2.2 Ensayos de Comportamiento

Se realizaron los siguientes ensayos:

- Expansión
- Consolidación

Los resultados obtenidos se pueden observar en el Anexo I.

### III.2.3 Análisis de los resultados de los ensayos de clasificación

- Según la carta de plasticidad AASHTO (ver Anexo B.1.2) la muestra patrón se clasifica como A – 7-6 (I.G. = 10) (suelo arcilloso).

- Según la Carta de plasticidad de Casagrande (ver Anexo B.2.2) la muestra patrón se define como una arcilla inorgánica de mediana plasticidad.

- Según la Carta de Plasticidad de Casagrande para minerales arcillosos (ver Anexo B.3), con la humedad del Límite Líquido = 40,73 y el Índice Plástico = 18,94 (ver Anexo F.2.4), el mineral que predomina es una Ilita (ver Anexo H).

- Según los valores de la Gravedad Especifica para materiales arcillosos (ver Anexo G), correspondientes para la Ilita esta en el rango de 2,60 – 2,84 y la muestra patrón tiene una Gravedad Especifica que se encuentra en ese rango (Gs = 2,72; ver Anexo F.2.2).

- De la Hidrométrica (Anexo F.2.1) el 55% del material fino es Limo y el 45% es Arcilla (según ASSHTO y ASTM, ya que USCS no realiza distinción).

- El límite de contracción obtenido por el procedimiento de laboratorio es de 14,75 (ver Anexo F.2.3). Mediante el procedimiento de Casagrande o Carta de plasticidad nos da aproximadamente 16, por lo tanto en valido ya que la variación es mínima.

En resumen, de los resultados de los ensayos realizados sobre la muestra patrón este se puede definir como: Fino arcilloso, ya que su comportamiento esta determinado por la proporción de arcilla existente en el material.

### III.2.4. Análisis de los resultados de los ensayos de comportamiento

Se seco una muestra al horno, la cual posteriormente se tallo en forma del anillo que conforma el equipo de consolidación. La muestra se sometió a un ensayo de expansión libre dando como resultado un porcentaje de expansión igual a 8,77 (Ver Anexo I.1)

Del ensayo de consolidación se obtuvo un coeficiente de consolidación C.V.= 0,0005 para un incremento de carga hasta 0,50 Kg/cm$^2$ y C.V.= 0,0003 para un incremento de carga hasta 3,00 Kg/cm$^2$. (Ver Anexo I.2).

# IV. Ejecución, Resultados y Análisis de los Ensayos en el Equipo Veleta Miniatura de Laboratorio

## IV.1 Organización de la Muestra Patrón en el Laboratorio

La muestra patrón se coloco en cuatro envases completamente saturada, es decir $W_{natural}$ = 80,73 % >> $W_{LL}$ = 40,73 %. Se aseguro saturación completa de la muestra debido a que en los suelos totalmente saturados todos los espacios están ocupados por agua, por lo tanto no existen vacíos de aire que puedan perturbar el ensayo.

El motivo por el cual se prepararon cuatro envases de muestra patrón, fue para poder ensayar todas las combinaciones **Veleta - Resorte** de una forma organizada y obtener la humedad respectiva para cada ensayo.

Uno de estos envases se utilizo únicamente para obtener la humedad a la que se encontraba la muestra cada vez que se ensayaba, es decir, se supuso que el suelo variaba su humedad a un mismo nivel para los cuatro envases.

Los otros tres envases fueron marcados con las siglas R1 = Resorte de Torsión N 1, R2 = Resorte de Torsión N° 2 y R3 = Resorte de Torsión N° 3. Con la finalidad de ensayar la muestra patrón en cada uno de estos envases con las combinaciones de veleta y el resorte correspondiente a cada envase.

## IV.2 Programación de Ensayos

Se realizo un programa para ensayar las muestras con el fin de obtener humedades representativas.

El programa inicial consistía en ensayar las muestras una vez a la semana. Debido a la alta humedad del suelo, tenía baja consistencia y estas fallaban muy rápidamente, sin dar medición de la resistencia al corte sin drenar en algunos casos.

Al aproximarnos a valores por encima del limite liquido, se observo mediante los ensayos de contenido de humedad que esta disminuia en una rata de mas o menos 2% al día. Entonces se concluyo que se debia ensayar la muestra cada dos días, para lograr obtener una rango de humedades mas próximo.

Al pasar una semana se podía observar que ensayándola cada dos días las humedades estaban dando muy dispersas, por lo tanto se tomó la decisión de ensayar todos los días, hasta que se obtuvo una humedad cercana al limite plástico.

| Fecha | % Humedad | Programa de Ensayos |
|---|---|---|
| inicial | 80,73 | Semanal |
| 20-5-03 | 78,58 | |
| 22-5-03 | 65,53 | Interdiaria |
| 26-5-03 | 56,01 | |
| 28-5-03 | 51,24 | |
| 30-5-03 | 44,88 | |
| 2-6-03 | 39,16 | Diaria |
| 3-6-03 | 36,86 | |
| 4-6-03 | 34,10 | |
| 5-6-03 | 32,65 | |
| 9-6-03 | 26,74 | |
| 12-6-03 | 22,49 | |

**Tabla 2. Humedades de la muestra patrón en el momento de se ensayada**

## IV.3 Resultados

| N° del Resorte | | | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dim. Veleta (cm) | | | | | Grande 2,54 x 1,905 | Pequeña 1,27 x 1,27 | Grande 2,54 x 1,905 | Pequeña 1,27 x 1,27 | Grande 2,54 x 1,905 | Pequeña 1,27 x 1,27 |
| % Humedad | Relación de vacios (ef) | γ sat (Kg/m³) | γ seco (Kg/m³) | Índice de Liquidez | Su (Kg/cm²) | Su (Kg/cm²) | Su (Kg/cm²) | Su (Kg/cm²) | Su (Kg/cm²) | Su (Kg/cm²) |
| 78,58 | 2,14 | 1548 | 867 | 3,00 | 0,0112 | 0,0404 | 0,0107 | 0,0368 | 0,0100 | 0,0281 |
| 65,53 | 1,78 | 1618 | 978 | 2,31 | 0,0142 | 0,0427 | 0,0126 | 0,0409 | 0,0116 | 0,0351 |
| 56,01 | 1,52 | 1682 | 1078 | 1,81 | 0,0208 | 0,0494 | 0,0194 | 0,0490 | 0,0150 | 0,0421 |
| 51,24 | 1,39 | 1719 | 1136 | 1,55 | 0,0294 | 0,0539 | 0,0271 | 0,0531 | 0,0233 | 0,0491 |
| 44,88 | 1,22 | 1774 | 1225 | 1,22 | 0,0599 | 0,0741 | 0,0504 | 0,0654 | 0,0333 | 0,0632 |
| 39,16 | 1,07 | 1833 | 1317 | 0,92 | 0,1294 | 0,1639 | 0,0901 | 0,1144 | 0,0765 | 0,0983 |
| 36,86 | 1,00 | 1859 | 1358 | 0,80 | 0,1527 | 0,1751 | 0,1153 | 0,1471 | 0,0998 | 0,1123 |
| 34,10 | 0,93 | 1892 | 1411 | 0,65 | 0,1639 | 0,2986 | 0,1414 | 0,2452 | 0,1281 | 0,1614 |
| 32,65 | 0,89 | 1911 | 1441 | 0,57 | 0,1938 | 0,3166 | 0,1666 | 0,2738 | 0,1497 | 0,1825 |
| 26,74 | 0,73 | 1996 | 1575 | 0,26 | 0,3258 | 0,4513 | 0,2451 | 0,3311 | 0,2246 | 0,2667 |
| 22,49 | 0,61 | 2067 | 1688 | 0,04 | 0,5226 | 0,7139 | 0,3226 | 0,4251 | 0,3161 | 0,3791 |

**Tabla 3. Valores de la resistencia al corte sin drenar, % de Humedad, Relación de Vacios, $\gamma_{saturado}$ y $\gamma_{seco}$ para cana combinación veleta – resorte de la muestra patrón**

| N° del Resorte | | 1 |
|---|---|---|
| Dim. Veleta (cm) | | Grande 2,54 x 1,905 |
| Fecha | % Humedad | Su (Kg/cm²) |
| 26-5-03 | 45,82 | 0,0360 |
| 28-5-03 | 40,86 | 0,0375 |
| 30-5-03 | 35,32 | 0,0710 |
| 16-6-03 | 45,84 | 0,0375 |
| 18-6-03 | 40,73 | 0,0386 |
| 20-6-03 | 35,33 | 0,0807 |

**Tabla 4. Efecto tixotropico de las arcillas. Muestras Patrón ensayadas con el resorte N°1 y el Aspa de Veleta Grande (2,54 cm x 1,905 cm)**

| N° del Resorte | | 1 |
|---|---|---|
| Dim. Veleta (cm) | | Pequeña 1,27 x 1,27 |
| Fecha | % Humedad | Su (Kg/cm²) |
| 26-5-03 | 50,6 | 0,0471 |
| 28-5-03 | 40,73 | 0,0965 |
| 30-5-03 | 36,81 | 0,1167 |
| 16-6-03 | 50,57 | 0,0584 |
| 18-6-03 | 40,69 | 0,1033 |
| 20-6-03 | 36,73 | 0,1235 |

**Tabla 5. Efecto tixotropico de las Arcillas. Muestras Patrón ensayadas con el resorte N°1 y el Aspa de Veleta Pequeña (1,27 cm x 1,27 cm)**

| | |
|---|---|
| **Muestra** | T6 |
| **Número del Resorte** | 1 |
| **Dimensiones del Aspa de la Veleta (cm)** | 2,54 x 1,905 |
| **% de Humedad** | 35,33 |
| **Resistencia al corte sin remoldear (Kg/cm²)** | 0,0807 |
| **Resistencia al corte remoldeada (Kg/cm²)** | 0,0482 |
| **Sensibilidad de la arcilla** | 1,7 |

**Tabla 6 Sensibilidad de la Muestra Patrón obtenida con el resorte N°1 y el Aspa de Veleta Grande (2,54 cm x 1,905 cm)**

| | |
|---|---|
| **Muestra** | T6 |
| **Número del Resorte** | 1 |
| **Dimensiones del Aspa de la Veleta (cm)** | 1,27 x 1,27 |
| **% de Humedad** | 36,73 |
| **Resistencia al corte sin remoldear (Kg/cm²)** | 0,1235 |
| **Resistencia al corte remoldeada (Kg/cm²)** | 0,0674 |
| **Sensibilidad de la arcilla** | 1,8 |

**Tabla 7. Sensibilidad de la Muestra Patrón obtenida con el resorte N°1 y el Aspa de Veleta Pequeña (1,27 cm x 1,27 cm)**

**IV.4 Análisis de los Resultados**

La resistencia al corte sin drenar de una arcilla debe ser la misma independientemente de la forma de falla del suelo. Sin embargo si tomamos dos muestras de una determinada arcilla a una misma humedad y las ensayamos usando diferentes equipos y condiciones, podremos notar que esta varía (Lambe, 1998)

El equipo de veleta consta de cuatro resortes y dos dimensiones del aspa de veleta, por lo tanto al ensayar una misma muestra a una humedad especifica con las diferentes combinaciones deberíamos obtener el mismo resultado. En los ensayos realizados en esta investigación existieron variaciones entre la resistencia al corte sin drenar para las diferentes combinaciones Veleta – Resorte, como se indica a continuación:

En el Gráfico 1 podemos observar la resistencia al corte sin drenar vs el porcentaje de humedad para las dos aspas de veleta con el resorte de torsión N° 1. Se puede notar que la resistencia al corte sin drenar da valores superiores si se trabaja con el aspa de veleta pequeña (1,27 cm x 1, 27 cm), en comparación a los ensayos realizados con el aspa de veleta grande (2,54 cm x 1,905 cm). Esto se puede ver también en el gráfico 2 y en el gráfico 3 en los cuales lo único que vario fue el resorte utilizado.

En el Gráfico 4 podemos observar la resistencia al corte sin drenar vs el porcentaje de humedad para los tres resortes de torsión con el aspa de veleta grande (2,54 cm x 1,905 cm). El principal detalle que se nota en este gráfico es que para humedades menores al límite líquido la variación de la resistencia sin drenar obtenida con los diferentes resortes no presenta diferencias notorias. En cambio para humedades mayores al límite líquido y

sobre todo las más cercanas al límite plástico empieza a existir una mayor diferencia sobre todo para el resorte de torsión N° 1. En el Gráfico 5 podemos observar el mismo detalle con la diferencia que se construyo para los tres resortes y el aspa de veleta pequeña (1,27 cm x 1,27 cm).

Tanto en los Gráficos 1, 2 y 3 como en los Gráficos 4 y 5 podemos observar que la resistencia al corte aumenta a medida que la humedad natural del suelo disminuye. Esto es uno de los factores importantes de la resistencia al corte sin drenar (Lambe, 1998). Es importante destacar que la resistencia al corte sin drenar obtenida con este equipo puede tener algo de disipación del exceso de presión de poros por las oquedades de las hojas de la veleta durante el ensayo.

En el Gráfico 6 podemos observar que la relación de vacíos (cociente entre el volumen de huecos, poros o vacíos y el de las partículas sólidas) disminuye a medida que la resistencia al corte sin drenar aumenta. Esto se debe a que existen menos espacios ocupados por el agua.

En el Gráfico 7 se observa que el peso unitario saturado aumenta al incrementar la resistencia al corte sin drenar para cualquier relación veleta – resorte utilizado.

En el Gráfico 8 observamos que el peso unitario seco aumenta a medida que la resistencia al corte sin drenar aumenta, esto es lógico debido a que a menor porcentaje de humedad natural, el suelo se encuentra mas seco.

En el gráfico 9 se puede observar que el índice de liquidez disminuye a medida que la resistencia al corte sin drenar del suelo aumenta, ya que el índice de liquidez varía proporcionalmente a la humedad natural del suelo.

En las tablas 6 y 7 se hallo la sensibilidad de la muestra patrón ensayada. Se nota que la resistencia al corte sin drenar es mayor en la muestra inalterada que en la muestra remoldeada aunque la tasa de sensibilidad es mínima. Posteriormente en los ensayos de tixotropía (ver graficas 10 y 11) se observo que la resistencia al corte se recupera y aumenta con el tiempo si el contenido de humedad se mantiene constante. Es importante aclarar que el aumento de la resistencia al corte sin drenar no fue muy considerable, esto se debió a que el intervalo de tiempo entre un ensayo y otro fue muy corto, seguramente si se hubiese podido ensayar en un intervalo de tiempo mas largo se hubiese notado más el efecto.

En las Figuras 7 y 8, se observa el tipo de falla que se obtuvo después de haber ensayado la muestra patrón con la veleta grande y con la veleta pequeña respectivamente. Podemos notar que la falla es totalmente de forma cilíndrica comprobando de esta forma que la hipótesis hecha por Calding era correcta. En las figuras 9 y 10, se observa la deformación angular que ocurrió para ambas veletas. Para la veleta grande se puede ver que la deformación angular de la falla es aproximadamente 12 °, mientras que para la veleta pequeña es próxima a los 20°. La razón por la cual la deformación angular en mayor en la veleta pequeña es por que esta necesita mayor rango de deformación para fallar el suelo. En titulo aparte evaluaremos este aspecto con más detalle.

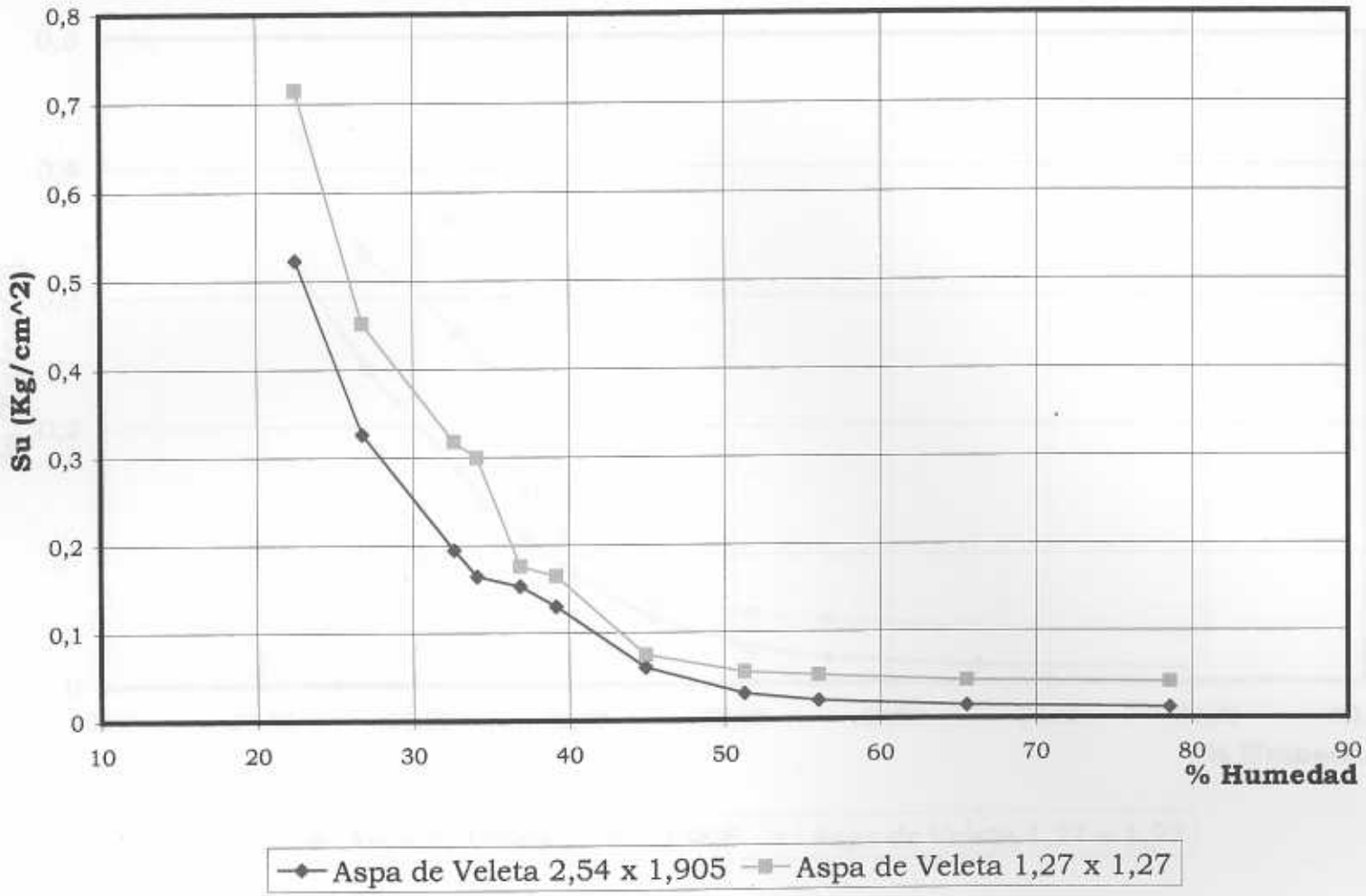


**Gráfico 1: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada Veleta bajo el Resorte de Torsión N° 1 con los distintos % de Humedad**

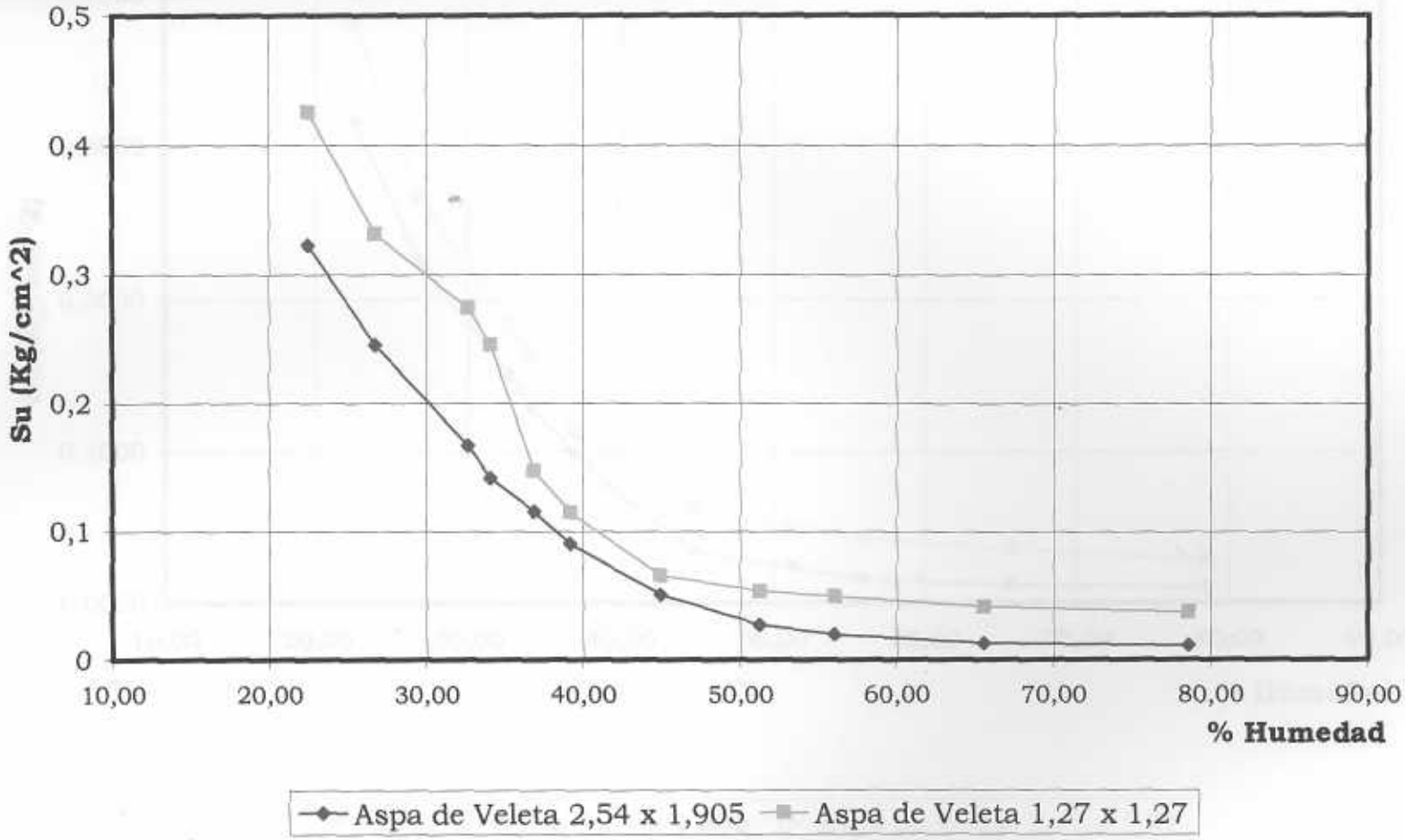


**Gráfico 2: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada Veleta bajo el Resorte de Torsión N° 2 con los distintos % de Humedad**

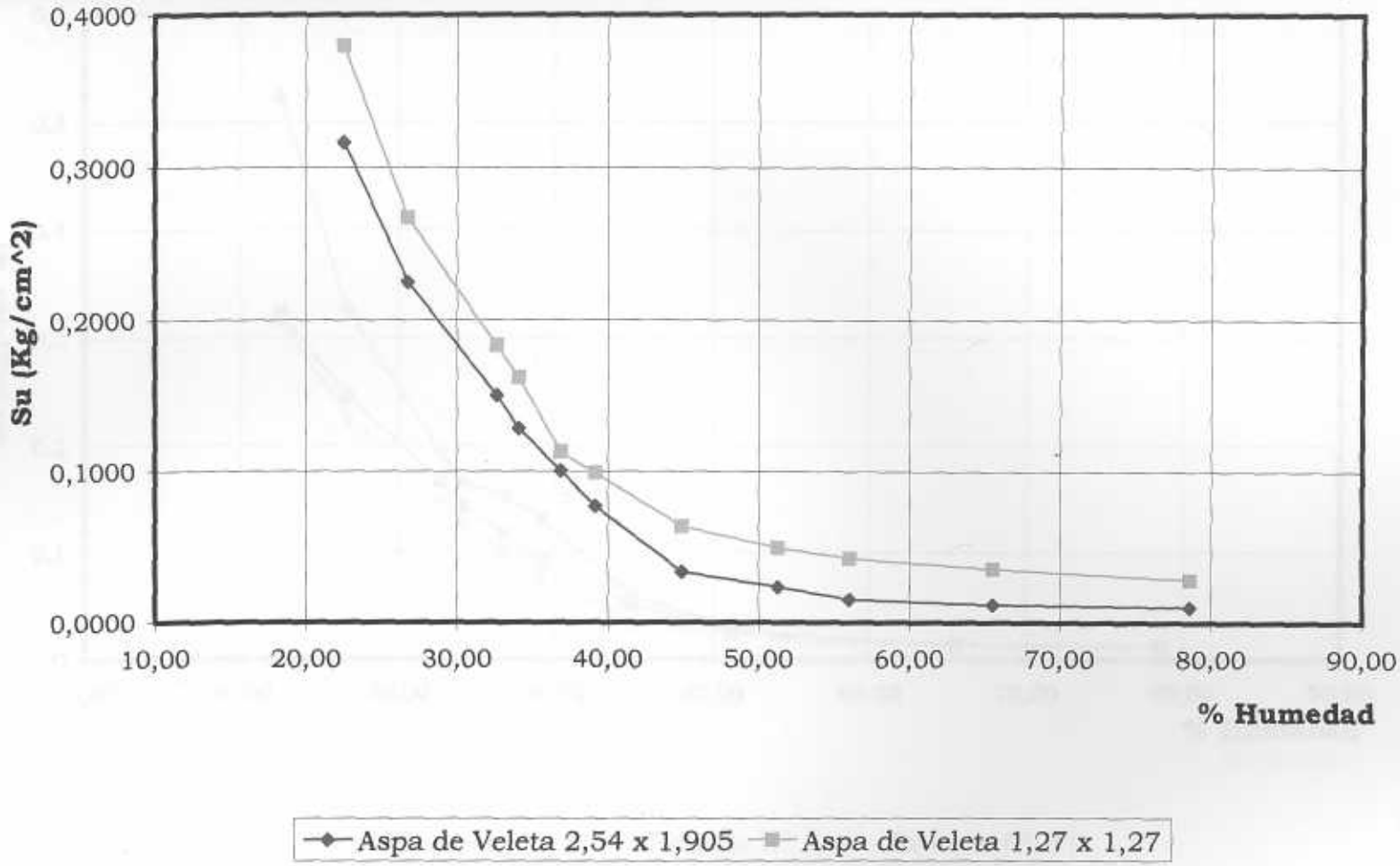


**Gráfico 3: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada Veleta bajo el Resorte de Torsión N° 3 con los distintos % de Humedad**

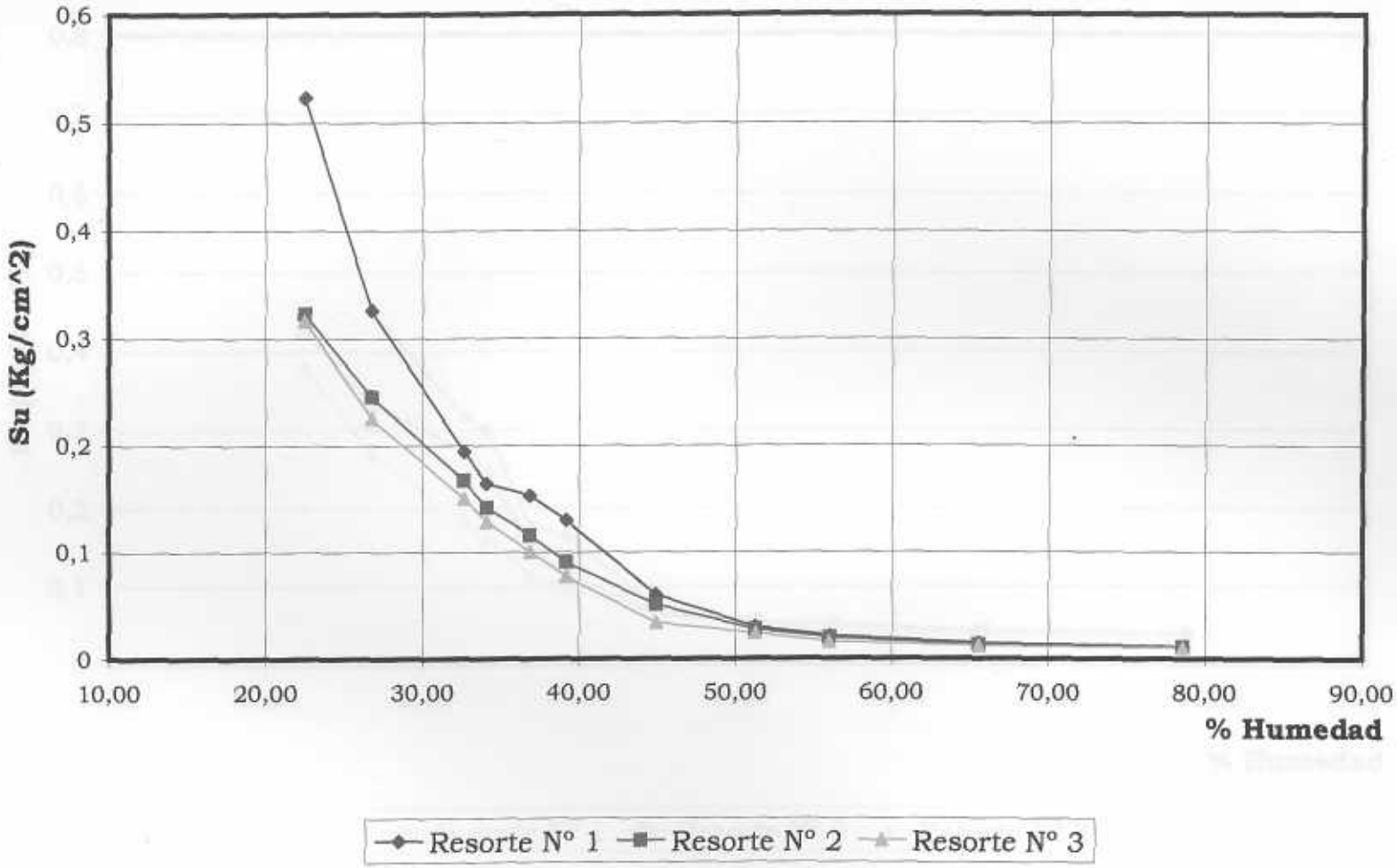


**Gráfico 4: Variación de la resistencia al corte sin drenar para cada resorte de torsión bajo el aspa de veleta 2,54 x 1,905 con los distintos % de Humedad**

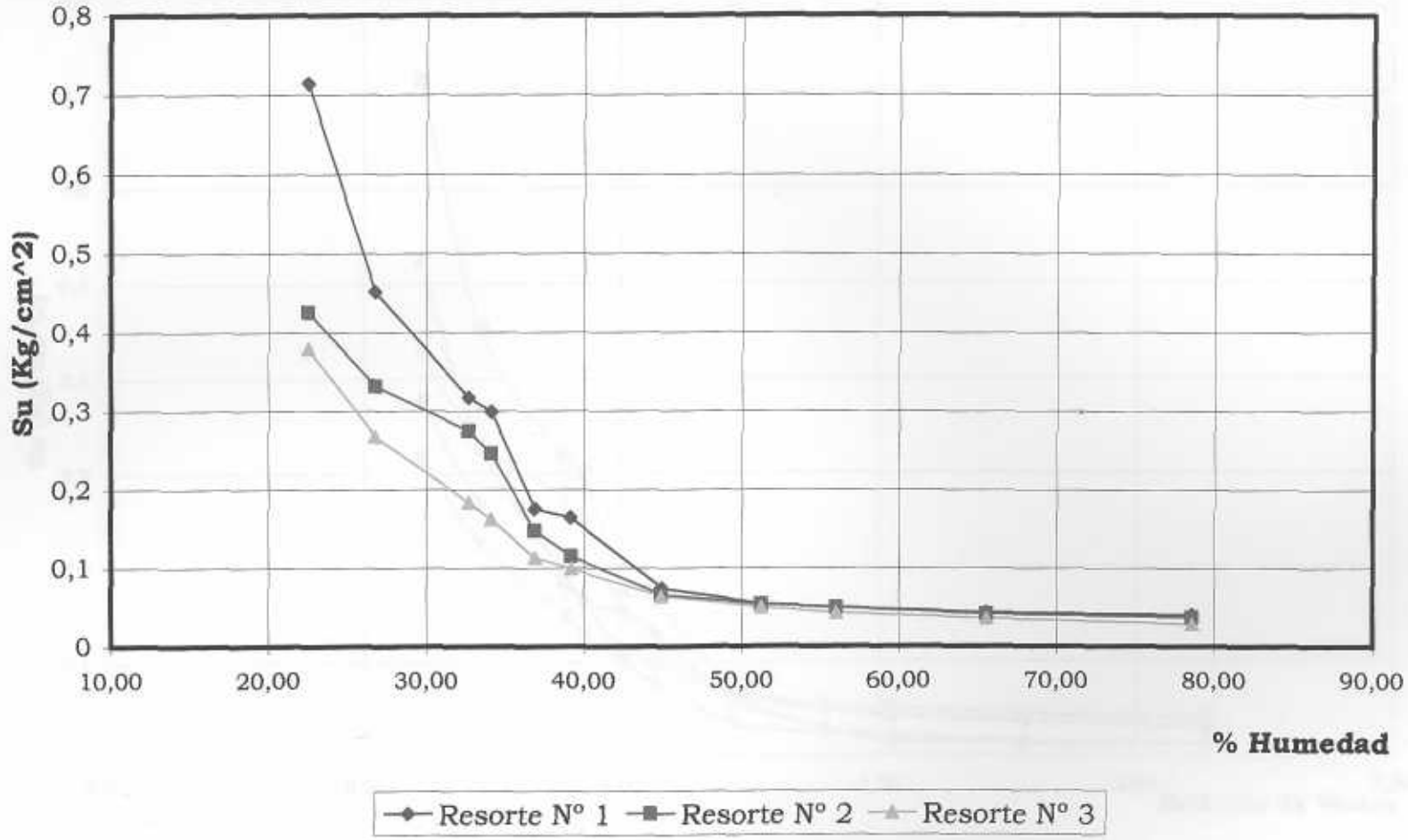


**Gráfico 5: Variación de la resistencia al Corte sin drenar para cada resorte de torsión bajo el aspa de veleta 1,27 x 1,27 con los distintos % de Humedad**

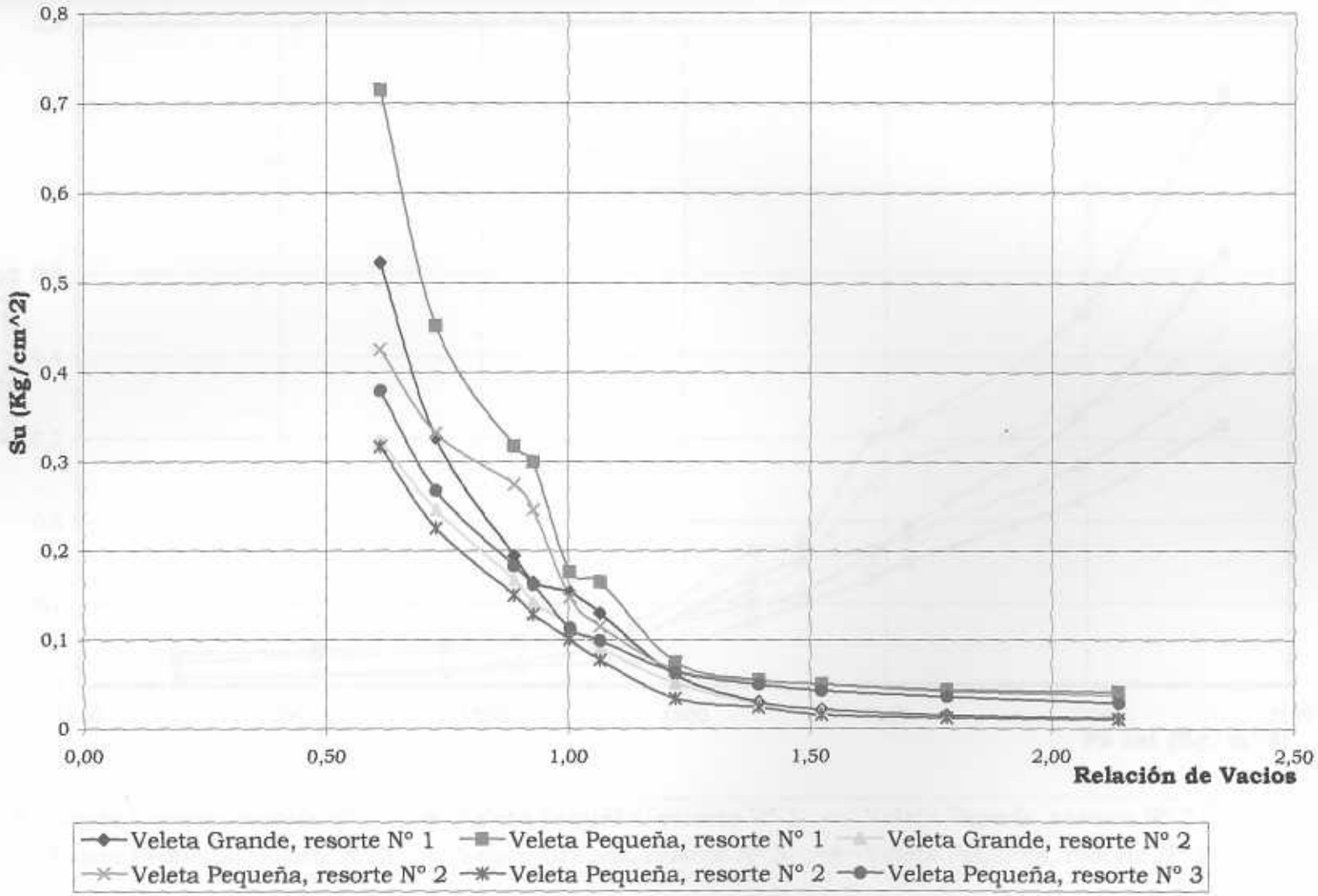


**Gráfico 6: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs. la relación de vacios para cada combinación veleta - resorte**

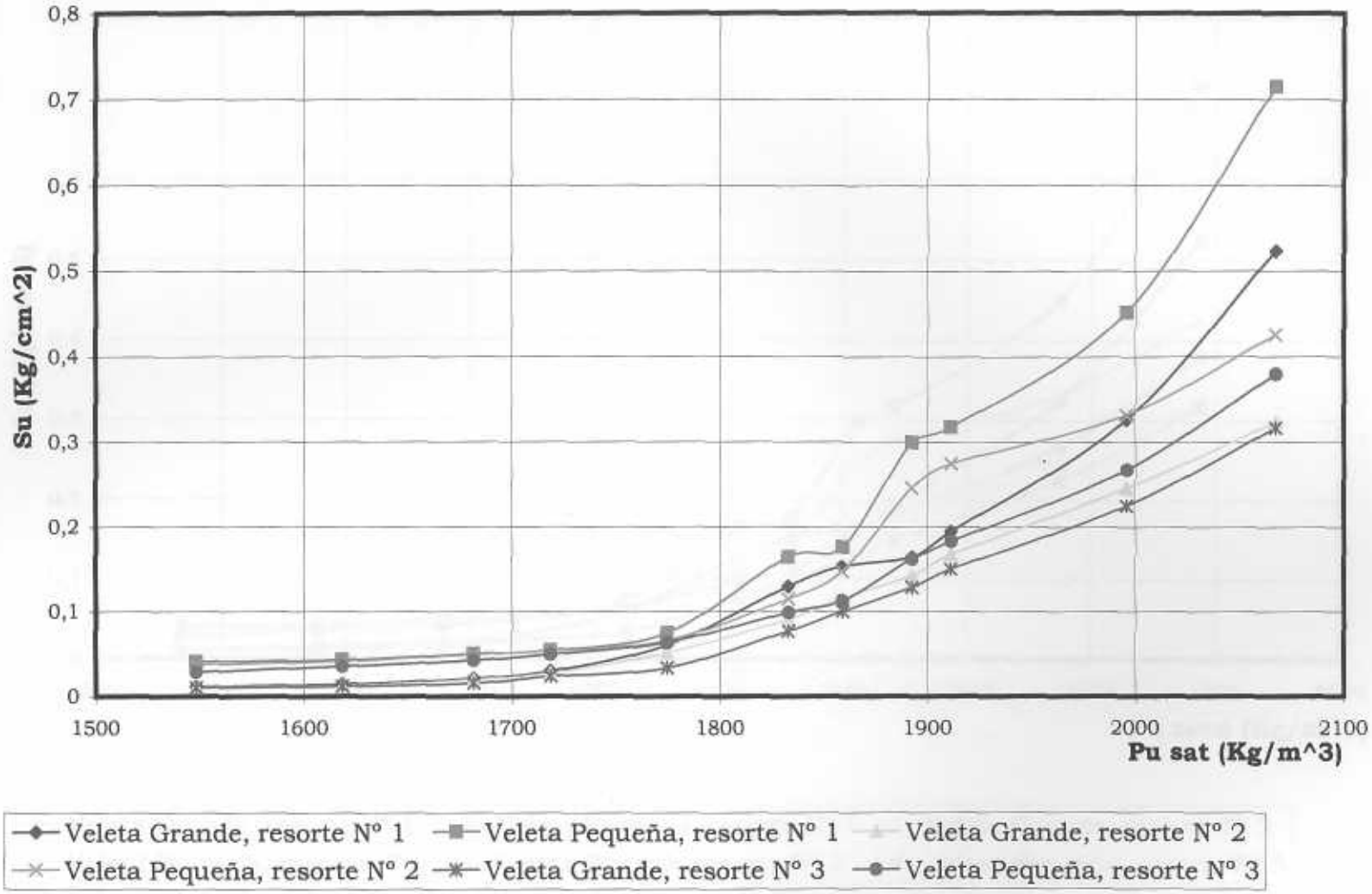


**Gráfico 7: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs. el peso unitario saturado para cada combinación veleta - resorte**

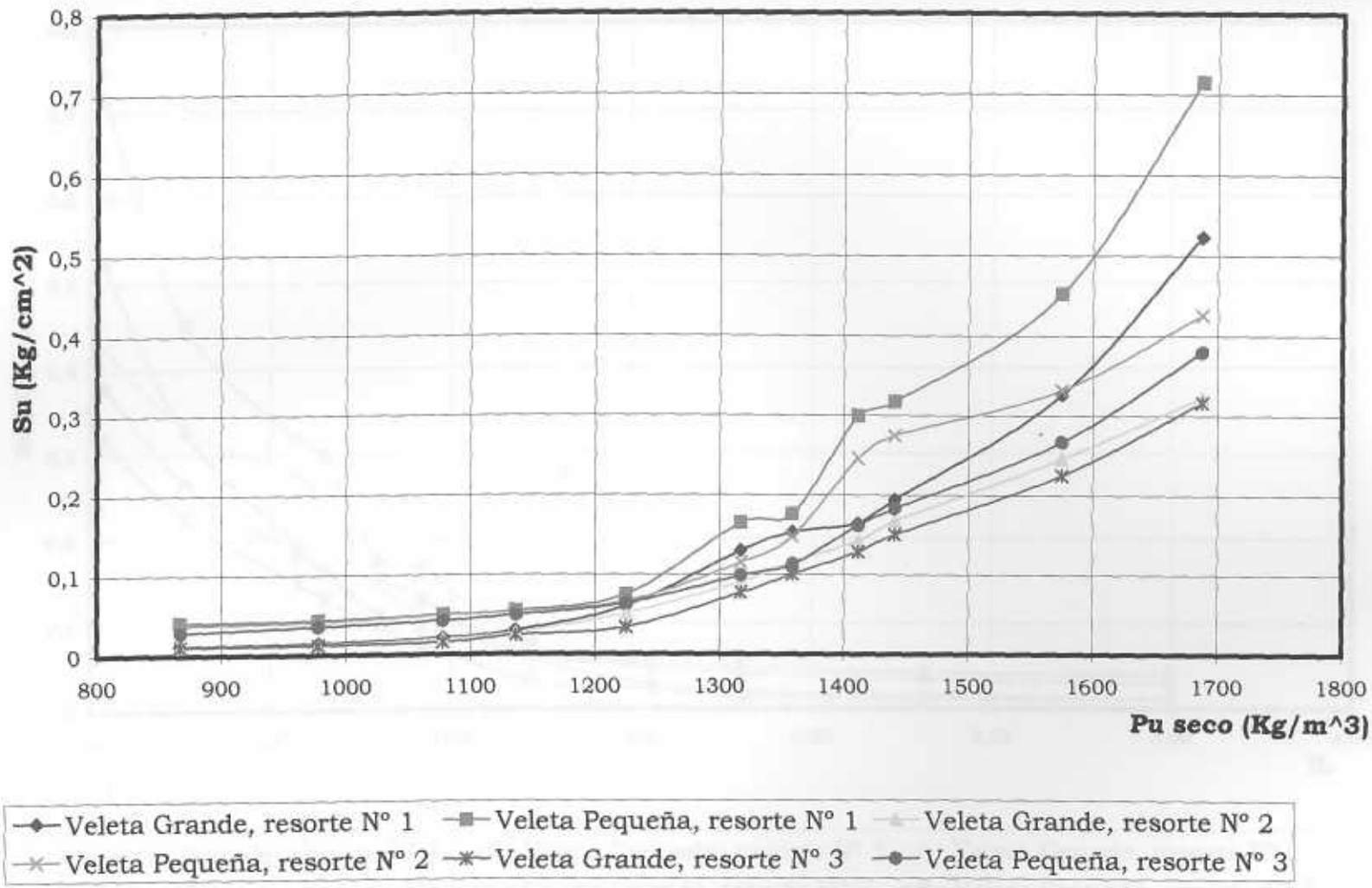


**Gráfico 8: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs. el peso unitario seco para cada combinación veleta - resorte**

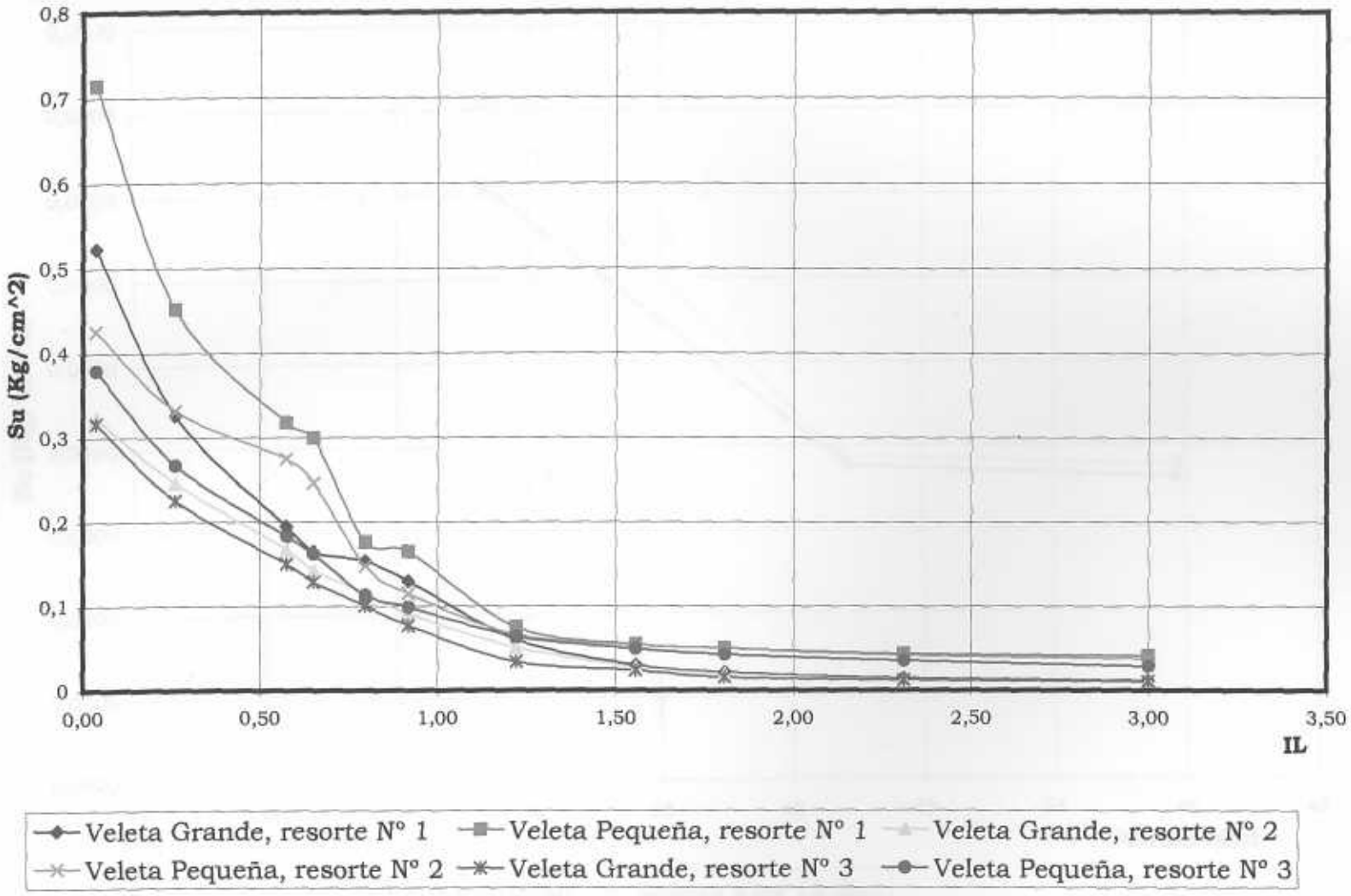


**Gráfico 9: Variación de la resistencia al corte sin drenar vs. el indice de liquidez para cada combinación veleta - resorte**

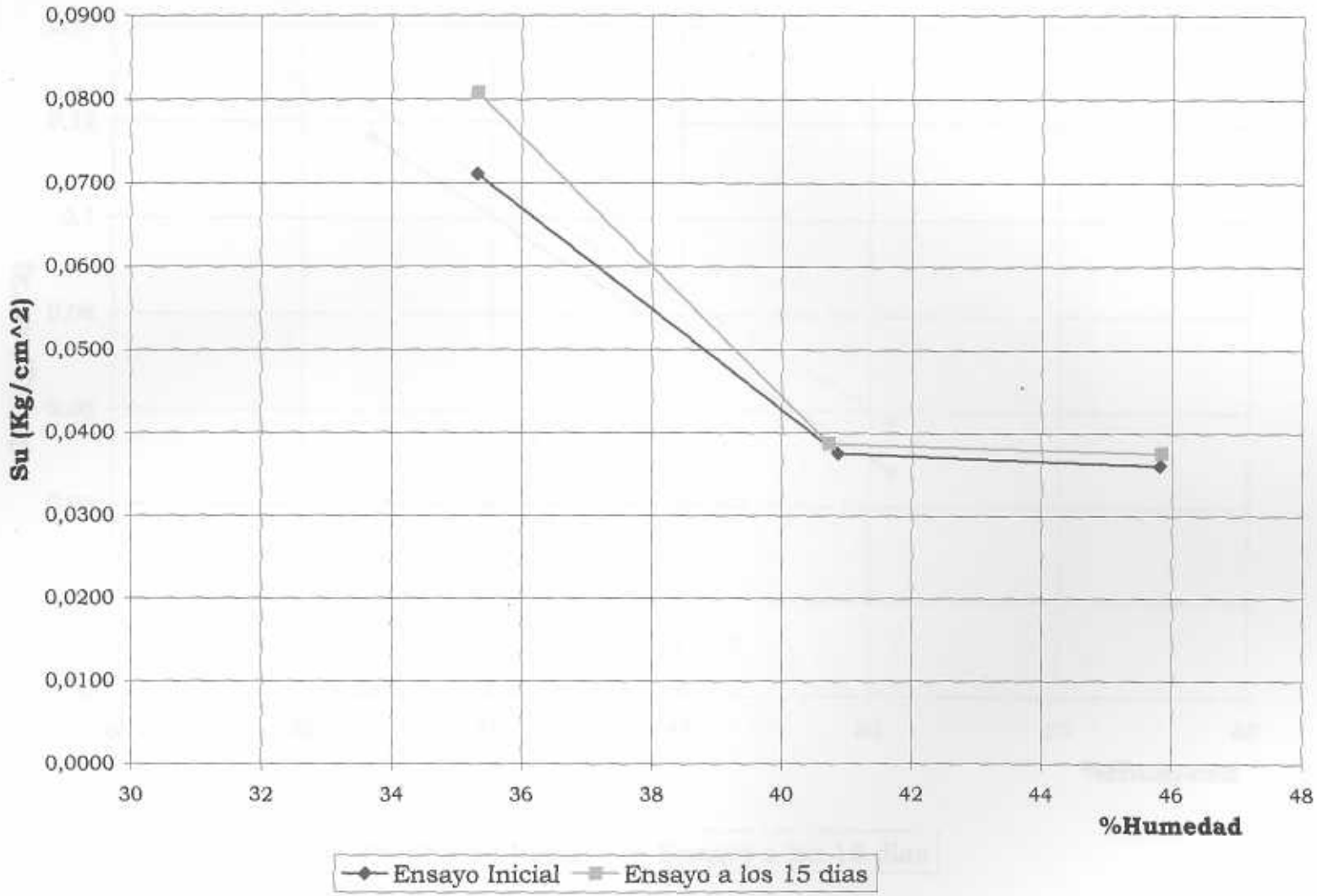


**Gráfico 10: Efecto tixotropico de las arcillas. Resorte N°1 y Aspa de Veleta 2,54 x 1,905**

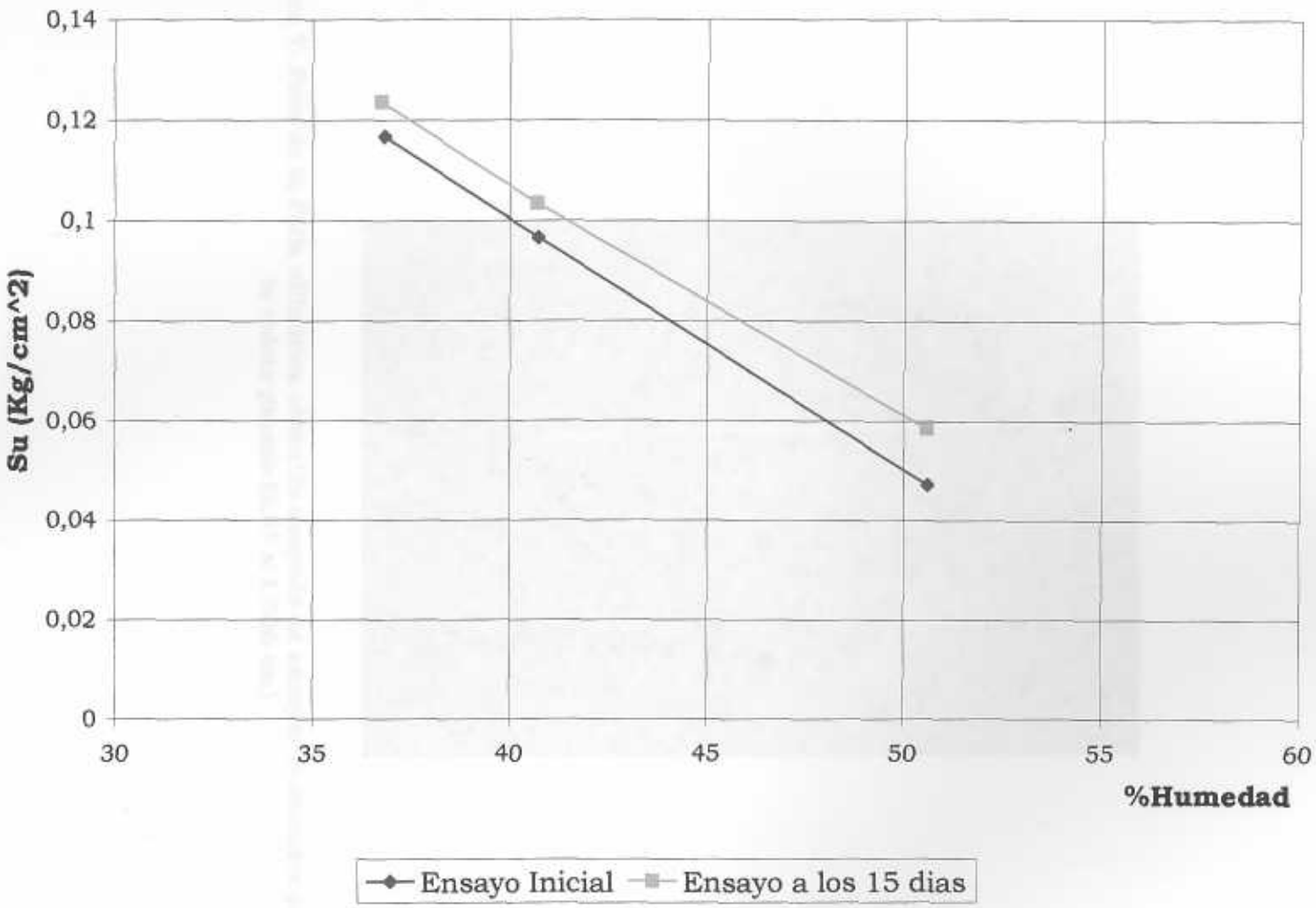


**Gráfico 11: Efecto tixotropico de las arcillas. Resorte N°1 y Aspa de Veleta 1,27 x 1,27**

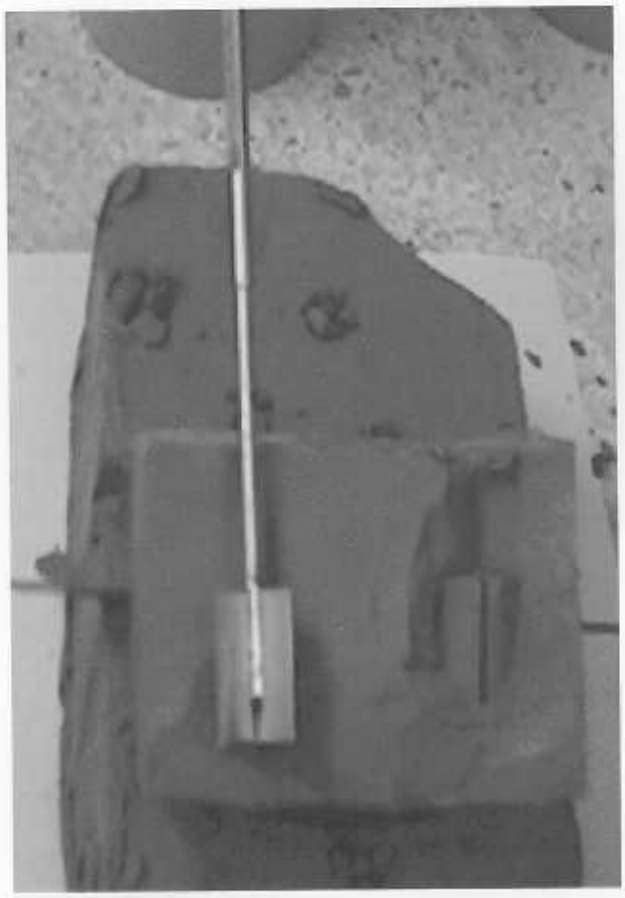

**Figura 7. Foto de la Falla cilíndrica obtenida después de ensayar la muestra patrón con la veleta grande (2,57 x 1,905 cm)**

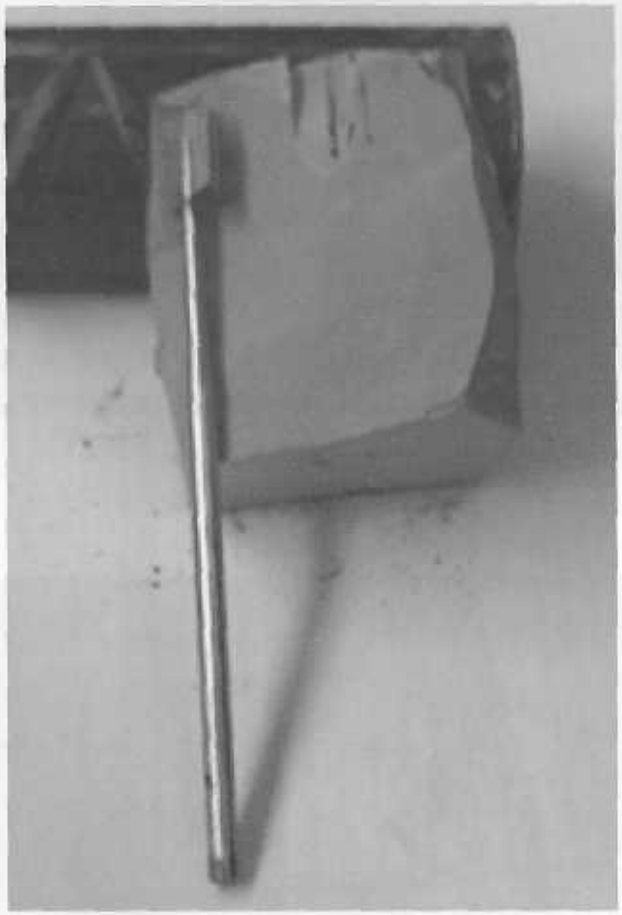

**Figura 8. Foto de la Falla cilíndrica obtenida después de ensayar la muestra patrón con la Veleta Pequeña (1,27 x 1,27 cm)**

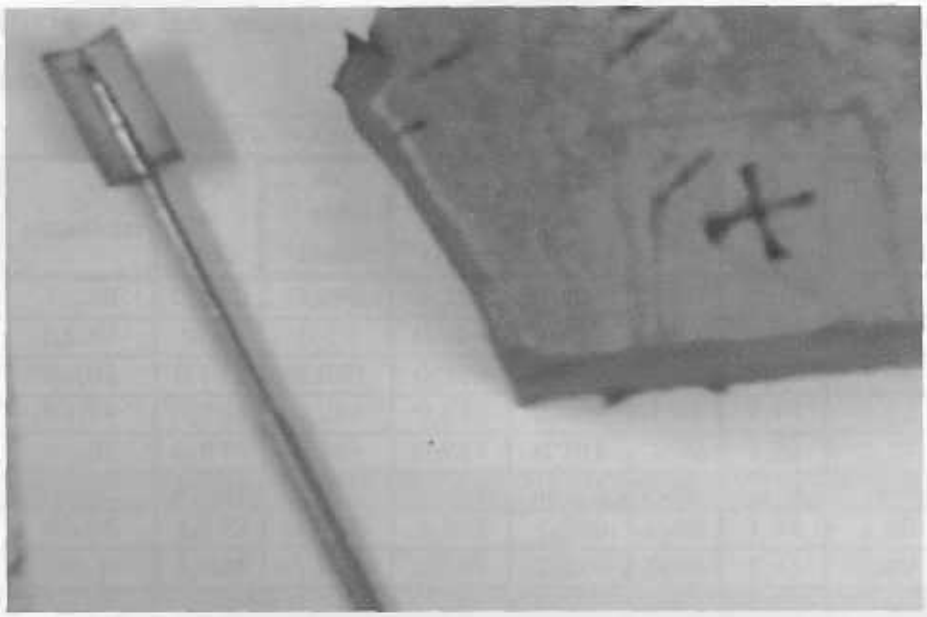

**Figura 9. Foto de la Deformación Angular producida por la Veleta Grande (2,54 x 1,905 cm) después de ensayar la muestra patrón**

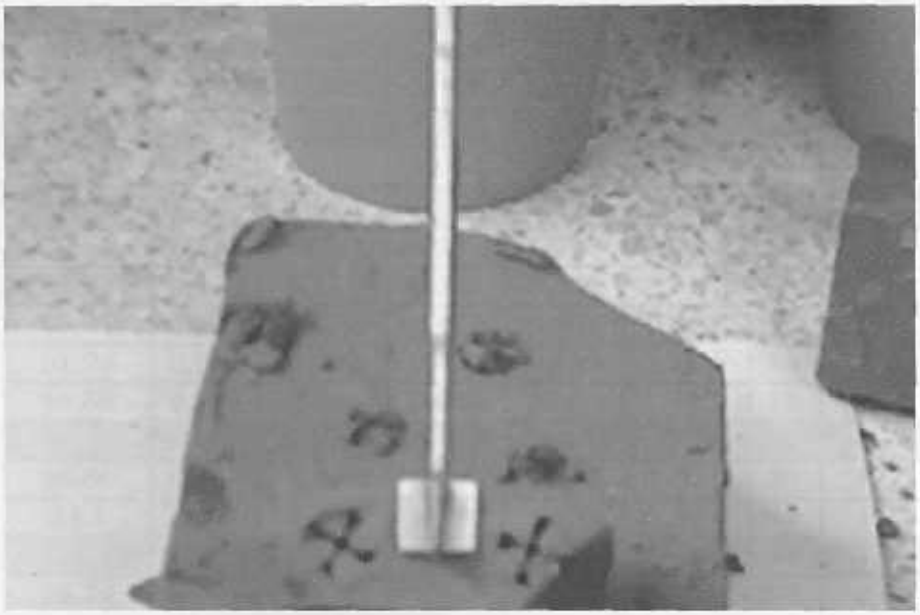

**Figura 10. Foto de la deformación angular producida por la veleta pequeña (1,27 x 1,27 cm) después de ensayar la muestra patrón**

## IV.5 Análisis de las variaciones cuantitativas y algunas conclusiones preliminares

| | | VELETA GRANDE | | VELETA PEQUEÑA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RESORTE N° | % HUMEDAD | Su 5° t/m2 | Su 10° t/m2 | Su 5° t/m2 | Su 10° t/m2 | IL | Pu seco t/m3 | Pu saturado t/m3 | Relación de Vacios |
| 1 | 78,58 | 0,082 | 0,098 | 0,382 | 0,404 | 3,00 | 0,87 | 1,55 | 2,14 |
| 1 | 65,53 | 0,12 | 0,14 | 0,404 | 0,427 | 2,31 | 0,98 | 1,62 | 1,78 |
| 1 | 56,01 | 0,147 | 0,203 | 0,359 | 0,494 | 1,81 | 1,08 | 1,68 | 1,52 |
| 1 | 51,24 | 0,233 | 0,284 | 0,516 | 0,539 | 1,55 | 1,14 | 1,72 | 1,39 |
| 1 | 44,88 | 0,543 | 0,584 | 0,741 | 0,741 | 1,22 | 1,22 | 1,77 | 1,22 |
| 1 | 39,16 | 0,924 | 1,167 | 1,302 | 1,505 | 0,92 | 1,32 | 1,83 | 1,07 |
| 1 | 36,86 | 1,172 | 1,416 | 1,369 | 1,598 | 0,80 | 1,36 | 1,86 | 1,00 |
| 1 | 34,1 | 1,324 | 1,639 | 2,357 | 2,874 | 0,65 | 1,41 | 1,89 | 0,93 |
| 1 | 32,65 | 1,69 | 1,938 | 2,47 | 2,75 | 0,57 | 1,44 | 1,91 | 0,89 |
| 1 | 26,74 | 2,131 | 2,74 | 3,413 | 4,243 | 0,26 | 1,57 | 2,00 | 0,73 |
| 1 | 22,49 | 2,217 | 4,222 | 5,366 | 6,645 | 0,04 | 1,69 | 2,07 | 0,61 |
| 2 | 78,58 | 0,058 | 0,078 | 0,368 | 0,368 | 3,00 | 0,87 | 1,55 | 2,14 |
| 2 | 65,53 | 0,097 | 0,103 | 0,409 | 0,409 | 2,31 | 0,98 | 1,62 | 1,78 |
| 2 | 56,01 | 0,145 | 0,155 | 0,49 | 0,49 | 1,81 | 1,08 | 1,68 | 1,52 |
| 2 | 51,24 | 0,203 | 0,242 | 0,49 | 0,531 | 1,55 | 1,14 | 1,72 | 1,39 |
| 2 | 44,88 | 0,455 | 0,484 | 0,654 | 0,654 | 1,22 | 1,22 | 1,77 | 1,22 |
| 2 | 39,16 | 0,668 | 0,833 | 0,981 | 1,144 | 0,92 | 1,32 | 1,83 | 1,07 |
| 2 | 36,86 | 0,94 | 1,153 | 1,308 | 1,431 | 0,80 | 1,36 | 1,86 | 1,00 |
| 2 | 34,1 | 1,172 | 1,395 | 2,166 | 2,371 | 0,65 | 1,41 | 1,89 | 0,93 |
| 2 | 32,65 | 1,046 | 1,337 | 1,798 | 2,371 | 0,57 | 1,44 | 1,91 | 0,89 |
| 2 | 26,74 | 1,376 | 2,015 | 1,063 | 1,717 | 0,26 | 1,57 | 2,00 | 0,73 |
| 2 | 22,49 | 1,928 | 2,984 | 3,556 | 4,087 | 0,04 | 1,69 | 2,07 | 0,61 |
| 3 | 78,58 | 0,1 | 0,1 | 0,281 | 0,281 | 3,00 | 0,87 | 1,55 | 2,14 |
| 3 | 65,53 | 0,116 | 0,116 | 0,351 | 0,351 | 2,31 | 0,98 | 1,62 | 1,78 |
| 3 | 56,01 | 0,15 | 0,15 | 0,421 | 0,421 | 1,81 | 1,08 | 1,68 | 1,52 |
| 3 | 51,24 | 0,216 | 0,233 | 0,421 | 0,491 | 1,55 | 1,14 | 1,72 | 1,39 |
| 3 | 44,88 | 0,299 | 0,333 | 0,562 | 0,6 | 1,22 | 1,22 | 1,77 | 1,22 |
| 3 | 39,16 | 0,666 | 0,732 | 0,913 | 0,983 | 0,92 | 1,32 | 1,83 | 1,07 |
| 3 | 36,86 | 0,799 | 0,998 | 0,983 | 1,123 | 0,80 | 1,36 | 1,86 | 1,00 |
| 3 | 34,1 | 1,15 | 1,215 | 1,474 | 1,614 | 0,65 | 1,41 | 1,89 | 0,93 |
| 3 | 32,65 | 1,131 | 1,414 | 1,755 | 1,825 | 0,57 | 1,44 | 1,91 | 0,89 |
| 3 | 26,74 | 1,414 | 1,747 | 2,387 | 2,667 | 0,26 | 1,57 | 2,00 | 0,73 |
| 3 | 22,49 | 2,096 | 2,945 | 3,229 | 3,51 | 0,04 | 1,69 | 2,07 | 0,61 |

**Tabla 8. Valores para Desplazamientos angulares de las aspas de veleta de 5 y 10°**

| IL | Veleta Grande y Resorte N° | | | Veleta Pequeña y Resorte N° | | | Rotación en Grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| | Valores de Su (t/m2) | | | Valores de Su (t/m2) | | | |
| 0,92 | 0,92 | 0,67 | 0,67 | 1,3 | 0,98 | 0,91 | 5 |
| 0,57 | 1,69 | 1,05 | 1,13 | 2,47 | 1,8 | 1,76 | 5 |
| 0,04 | 2,22 | 1,93 | 2,1 | 5,37 | 3,56 | 3,23 | 5 |
| 0,92 | 1,17 | 0,83 | 0,73 | 1,51 | 1,14 | 0,98 | 10 |
| 0,57 | 1,94 | 1,34 | 1,41 | 2,75 | 2,37 | 1,83 | 10 |
| 0,04 | 4,22 | 2,98 | 2,95 | 6,65 | 4,09 | 3,51 | 10 |

**Tabla 9. Cuadro comparativo de valores y variación porcentual. Análisis Cuantitativo**

La tabla 9 es un resumen de la tabla 8 y en ella se muestran los valores de la resistencia al corte sin drenar de cada combinación **Veleta – Resorte** para humedades cercanas al límite líquido, Limite Plástico e intermedia entre estas. Se coloco en función del índice de Liquidez para deformaciones angulares mostradas de 5 y 10°. Es importante destacar que tomar en cuenta solo estas deformaciones permite una comparación lineal de los resultados.

Preponderantemente:

- Para la rotación de 5° los valores mínimos se obtienen con la veleta grande y el resorte N° 2.
- Para la rotación de 10° los valores mínimos se obtienen con la veleta grande y el resorte N° 3.
- Para la rotación de 5° los valores máximos se obtienen con la veleta pequeña y el resorte N° 1.
- Para la rotación de 10 ° los valores máximos se obtienen con la veleta grande y el resorte N° 1.

- Para ambas rotaciones se puede observar que todos los valores máximos se obtuvieron con la veleta pequeña y todos los valores mínimos se obtuvieron con la veleta grande.

| IL | Rotación | Mínimo | Máximo | % Variación | Rotación | Mínimo | Máximo | % Variación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,92 | 5 | 0,67 | 0,98 | 68 | 10 | 0,73 | 1,51 | 48 |
| 0,57 | 5 | 1,05 | 2,47 | 43 | 10 | 1,34 | 2,75 | 49 |
| 0,04 | 5 | 1,93 | 5,37 | 36 | 10 | 2,95 | 6,65 | 44 |

**Tabla 10. Variaciones Porcentuales entre valores minimos y máximos para cada índice de liquidez (IL)**

De la tabla 10 se puede concluir que a menor humedad la variación porcentual es menor.

El promedio de variación para todos los casos de del 48%. Podemos afirmar que para el material ensayado la escogencia de una veleta y un resorte arroja diferencias en este orden porcentual en los valores de la resistencia al corte sin drenar en material remoldeado.

En las Graficas 12, 13 y 14 se puede observar la resistencia al corte sin drenar para las deflexiones angulares de 5 y 10° vs. El índice de plasticidad para cada combinación Veleta – Resorte.

En las gráficas 15 y 16 se muestra la variación de la resistencia al corte sin drenar para las deflexiones angulares de 5 y 10° de cada combinación Veleta – Resorte.

En el gráfico 17 se muestran la variación de volumen para cada porcentaje de humedad.

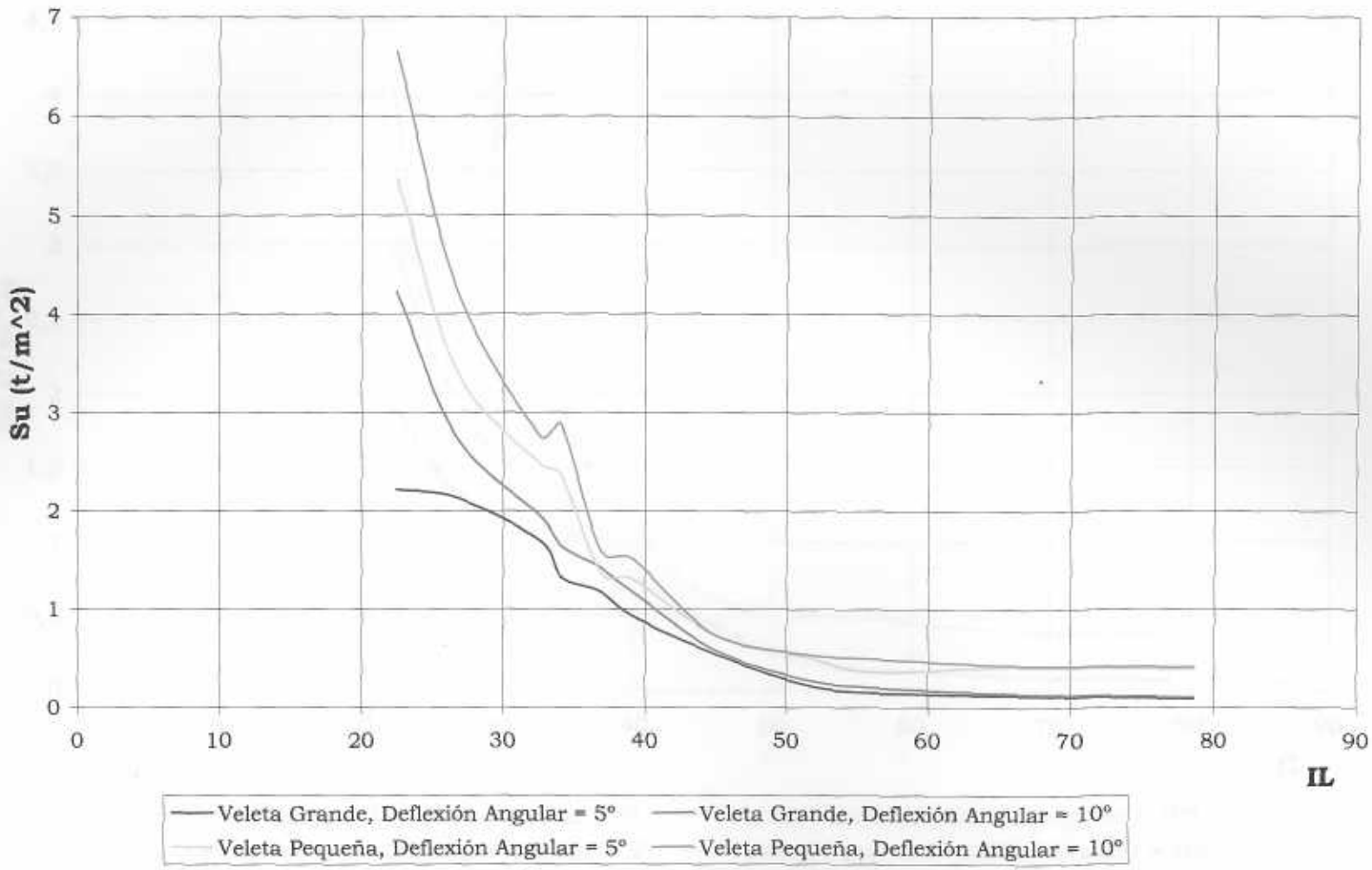


**Gráfico 12: Variación de la Resistencia al Corte sin drenar con respecto al indice de liquidez para el resorte de torsión N°1**

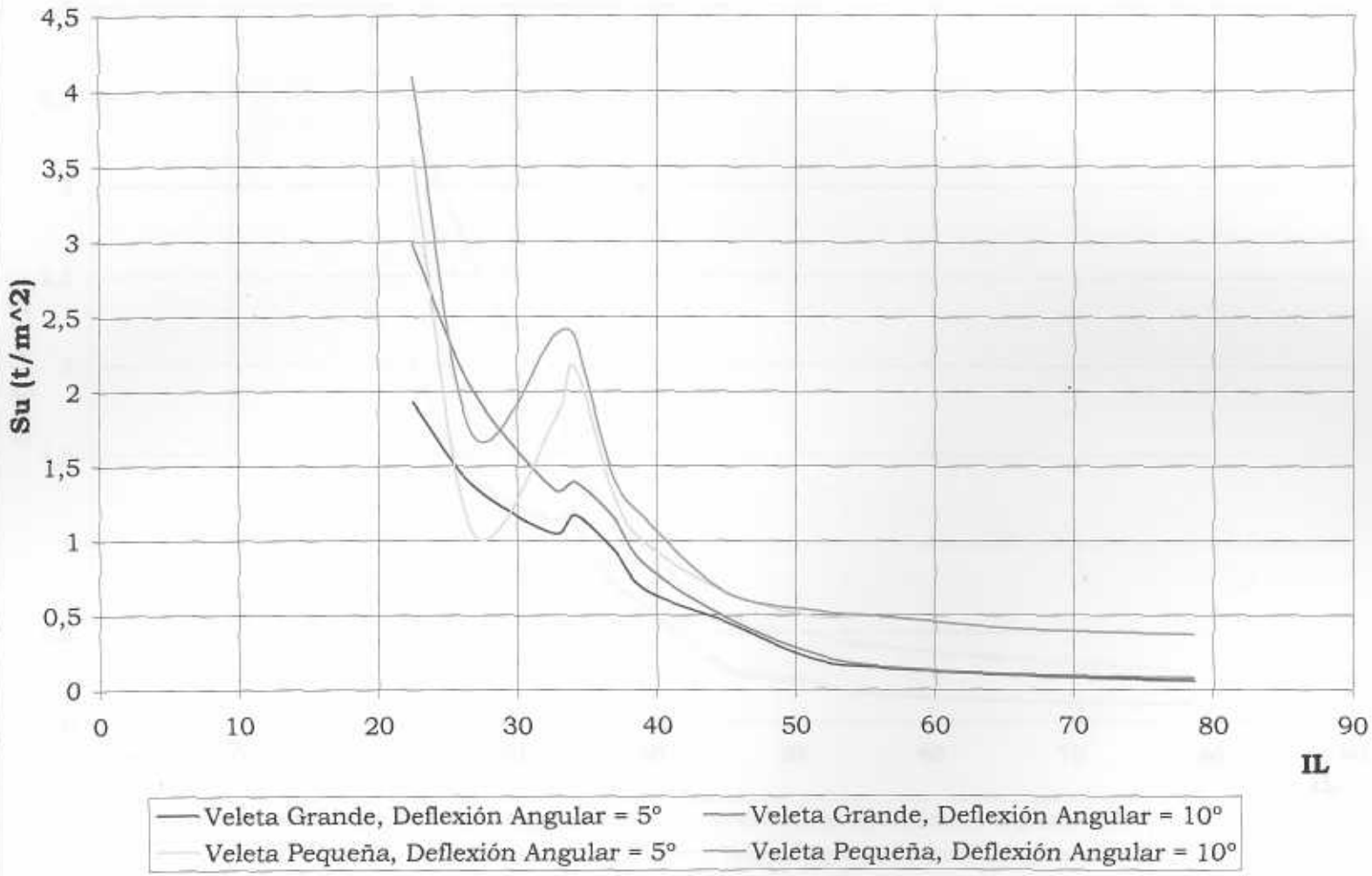


**Gráfico 13: Variación de la Resistencia al Corte sin drenar con respecto al indice de liquidez para el resorte de torsión N°2**

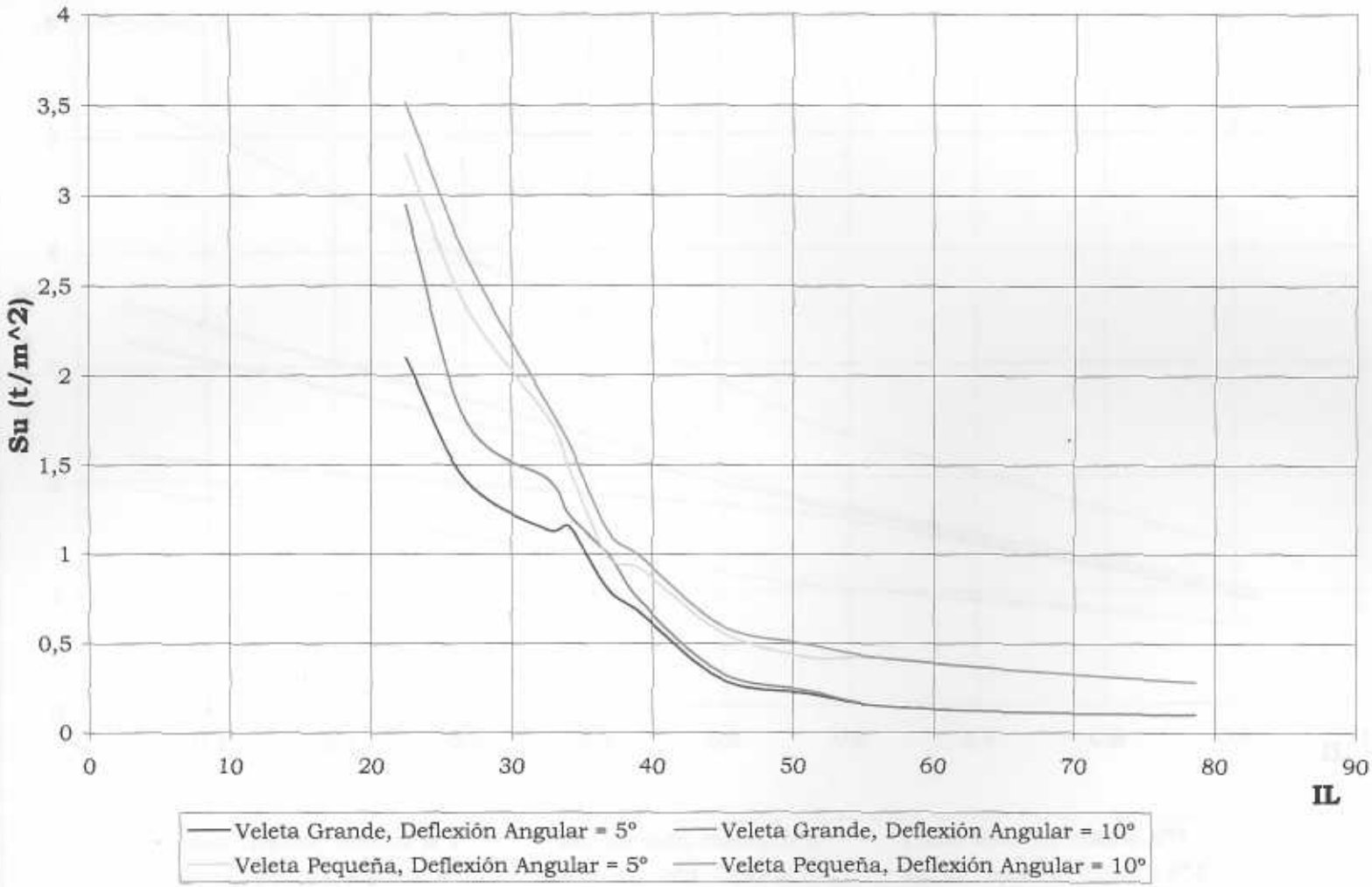


**Gráfico 14: Variación de la Resistencia al Corte sin drenar con respecto al indice de liquidez para el resorte de torsión N°3**

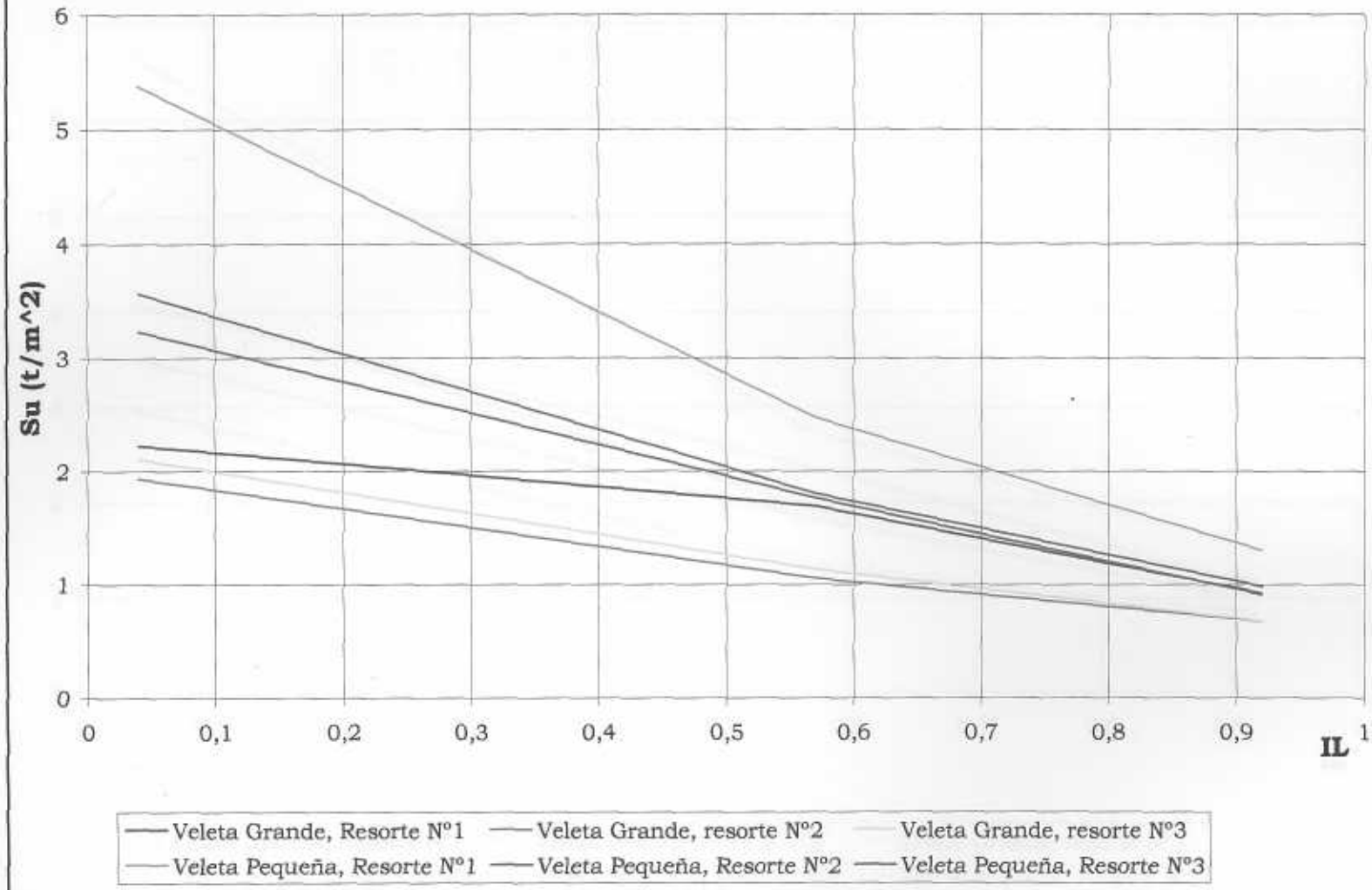


**Gráfico 15: Variación de la Resistencia al Corte sin drenar con respecto al indice de liquidez para una Deflexión Angular de 5°**

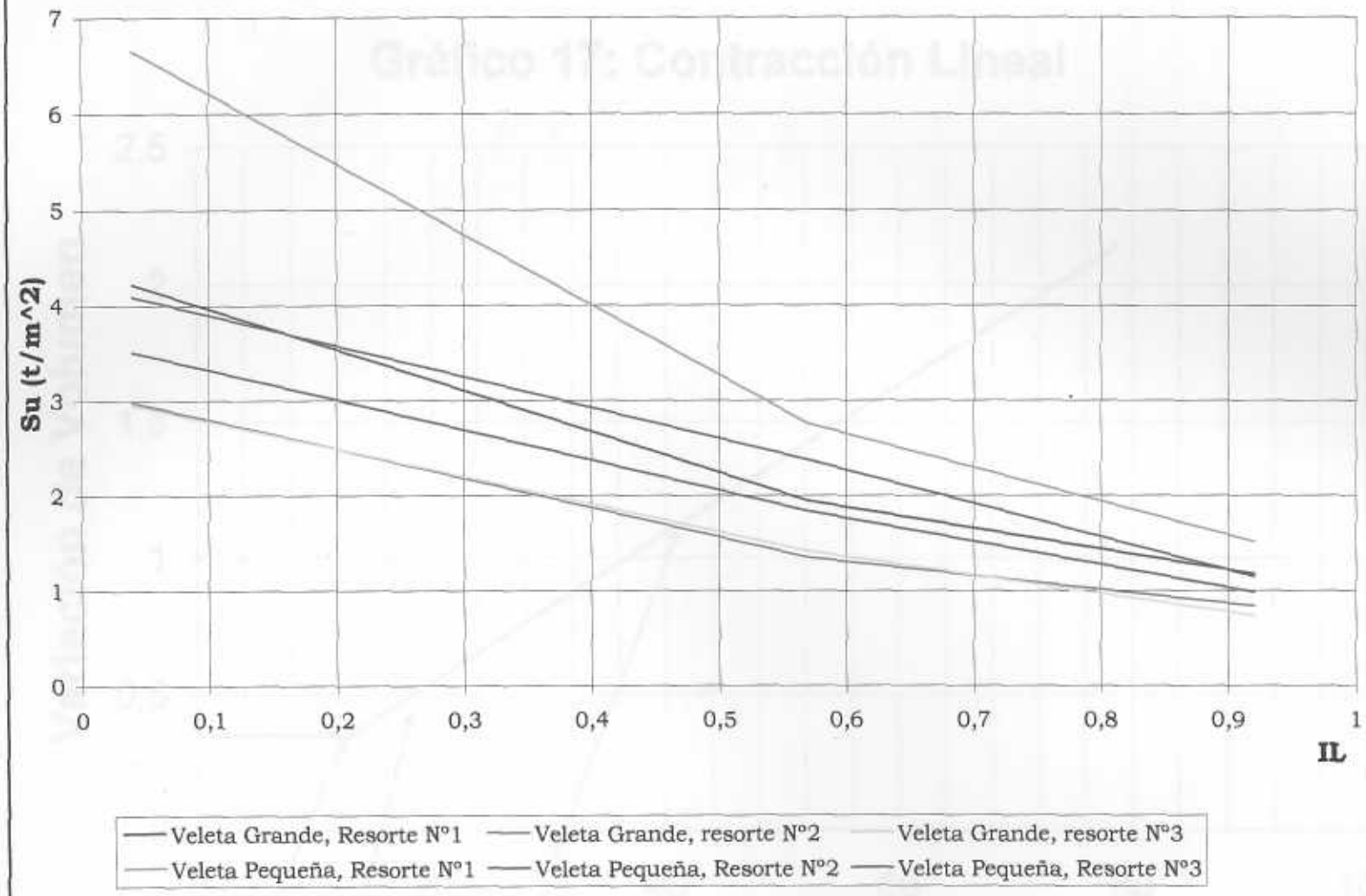


**Gráfico 16: Variación de la Resistencia al Corte sin drenar con respecto al indice de liquidez para una Deflexión Angular de 10°**

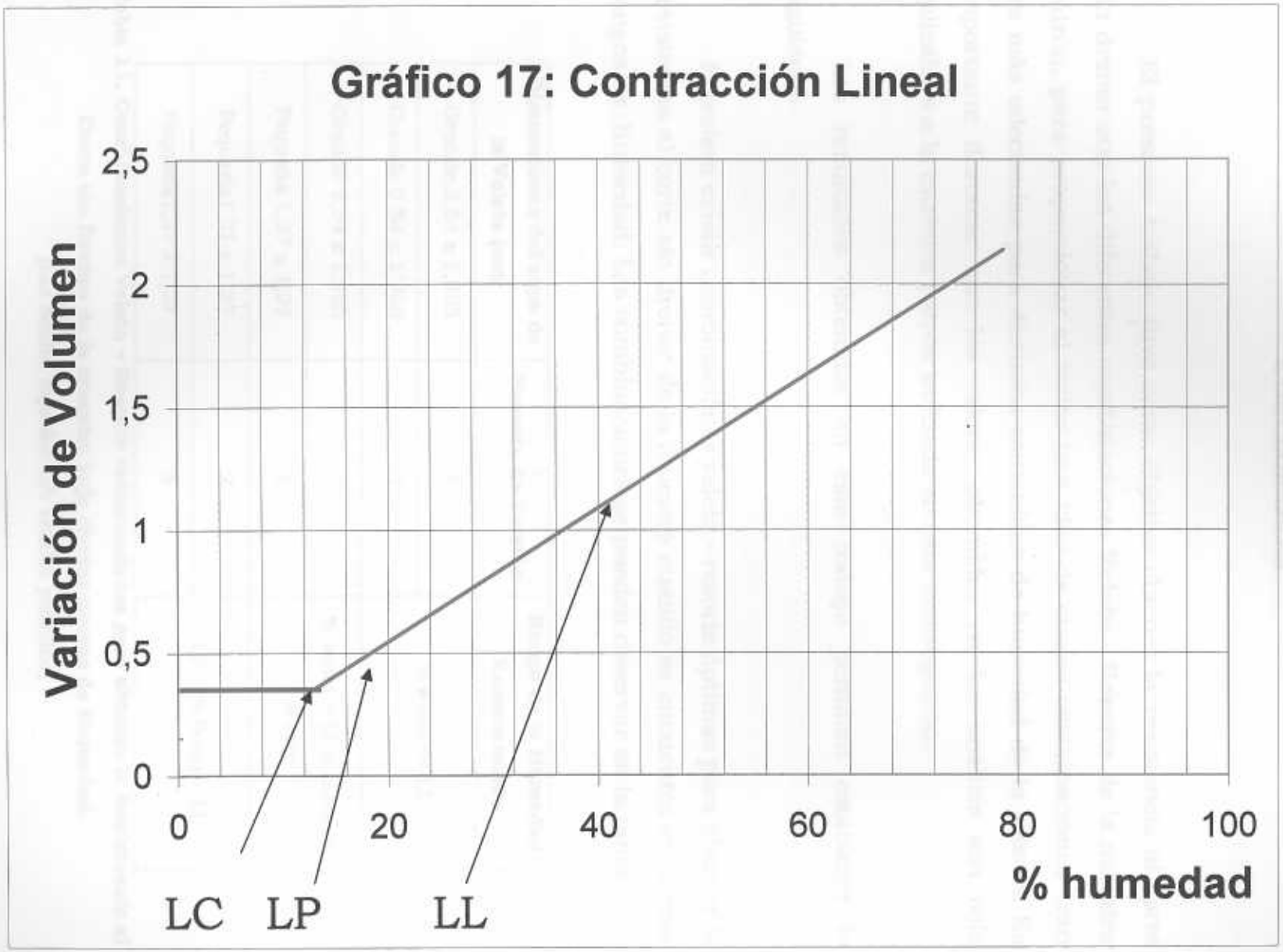
Gráfico 17: Contracción Lineal
Variación de Volumen
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
20
40
60
80
100
% humedad
LC
LP
LL

## CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo obtener la resistencia al corte sin drenar con las diferentes combinaciones **Veleta - Resorte** de la muestra patrón, para proporcionar al lector una idea de cuales combinaciones eran las más adecuadas para distintos contenidos de humedad de la misma. Es importante destacar que los valores obtenidos en los análisis son solo aplicables a la muestra patrón utilizada en esta investigación.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten establecer lo siguiente:

Pareciera existir combinaciónes veleta - resorte óptimas para obtener la resistencia al corte sin drenar de la muestra cuando se encuentra en ciertos rangos de humedad. Las combinaciones se pueden observar en la tabla 8.

| **Dimensiones del aspa de la Veleta (cm)** | **Resorte de Torsión** | **Rango de % Humedad Recomendado** |
|---|---|---|
| Grande 2,54 x 1,905 | 1 | %Wnat << LL |
| Grande 2,54 x 1,905 | 2 | |
| Grande 2,54 x 1,905 | 3 | % Wnat = LL o cercano a este |
| Pequeña 1,27 x 1,27 | 1 | |
| Pequeña1,27 x 1,27 | 2 | LP < % Wnat < LL |
| Pequeña1,27 x 1,27 | 3 | |

**Tabla 11. Combinaciones Veleta – Resorte recomendadas para obtener la Resistencia al Corte sin Drenas de la muestra bajo ciertos rangos de Humedad.**

**[LL: limite liquido; LP: Limite plástico]**

Esto pudiera ser por dos razones: la primera es que cada resorte tiene un límite de torsión que puede soportar, si este límite es superado, el resorte se daña y las lecturas obtenidas son erróneas. Por lo tanto el resorte N°1, el mas sensible, se debe utilizar solo para suelos saturados muy blando, el resorte N° 2 para suelos saturados blandos y el resorte 3 para suelos firmes. La segunda razón por la cual se utiliza la veleta grande para los suelos mas blandos, es por que esta tiene mayor superficie en contacto con el suelo lo que hace que en suelos firmes puedan doblarse las aspas, por lo tanto dar mayores lecturas de rotación y por ende mayor resistencia al corte.

En todo momento se pudo observar que la resistencia al corte aumentaba cuando el contenido de humedad del suelo disminuía, esto se debe a que las arcillas aumentan su consistencia a medida que disminuye su humedad, es decir las partículas se adhieren mas unas con otras.

La muestra patrón la cual se utilizo para todos los ensayos en el equipo de veleta miniatura presenta propiedades tixotropicas, es decir, aumenta su resistencia al corte con el tiempo después de haber sido perturbada.

El promedio de variación, entiendase dispersión de los valores obtenidos, arroja un 48% de variación en el porcentaje de dispersión para el mismo material a igual humedad con relación **Veleta – Resorte** diferente.

## RECOMENDACIONES

1. Se deben realizar mayor numero de ensayos con muestras diferentes, para afirmar con mas seguridad que las combinaciones veleta – resorte recomendadas en esta investigación son las mas sastifactorias, es decir, se debe hacer un ensayo cuantitativo en vez de cualitativo.

2. Para la obtención de la resistencia al corte con el equipo veleta miniatura de laboratorio se supuso que la distribución de la movilización de la resistencia cortante en los extremos del cilindro de suelo fue uniforme. Para posteriores investigaciones se recomienda estudiar más a fondo sobre este punto.

3. En posteriores investigaciones se debería incluir el resorte de torsión Nº 4 y las otras dos dimensiones de veleta; las cuales se obviaron en esta investigación debido al factor tiempo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS


1. Braja M. Das, 1983. Advanced Soil Mechanics. McGraw – Hill

2. Braja M. Das, 1984. Principles of Foundation Engineering. Third Edition. Intex Educational Publishers.

3. Braja M. Das, 1990. Principles of Geotechnical Engineering. Second Edition. PWS - KENT Publishing Company.

4. Braja M. Das, 2001. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. International Thomson Editores.

5. Editor D. J. Bazett, 1980. Canadian Geotecnical Journal. Published by the National Research Council of Canada.

6. Gregory P. Tschebotarioff, 1973. Foundations Retaining and Earth Structures. Second Edition. Editorial McGraw-Hill.

7. Gustavo Pérez Guerra, 1967. Criterios de Diseño de Fundaciones. Curso Panamericano de Suelos, U.C.A.B. Caracas, Venezuela.

8. Holtz R. Kovacs D., 1981. An introduction on geotecnical engineering. Prentice Hall.

9. J. A. Jiménez Salas; J.L. De Justo Alpañes y Alcibiales A. Serrano González. Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas. Segunda Edición. Editorial Rueda.

10. James K. Mitchell, 1976. Fundamentals of Soil Behavior.

11. José A. Jiménez Salas, 1951. Mecánica del Suelo y sus Aplicaciones a la Ingenieria. Editorial DOSSAT.

12. Joseph E. Bowles, 1988. Foundation Analysis and Design. Fourth Edition. Editorial McGraw - Hill.

13. Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1980. Mecánica de Suelos. Tomo I. Editorial Limusa.

14. K.H. Head, 1980. Manual of Soil Classification and Compaction Test.

15. Karl Terzaghi and Ralph B. Peck, 1975. Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Editorial el Ateneo.

16. Karl Terzaghi, 1948. Geotecnique. Volumen I. Published by The Institution of Civil Engineers.

17. M. Juul Hvorslev, 1949. Subsurface Exploration and sampling of soils for Civil Engineering purposes.

18. N. Tsytovich, 1981. Soil Mechanics. Mir Publishers Moscow.

19. Peter L. Berry and David Reid. Mecánica de Suelos. McGraw – Hill.

20. Ronald F. Scott and Jack J. Schosutra, 1968. Soil Mechanics and Engineering. McGraw - Hill.

21. R. Foott, C.C. Ladd, K. Ishihara, F. Schlosser, H.G. Poulos; *Proceedings of the ninth international Conference on Soil Mechanics* and Foundation Engineering. Volume 2. IX ICSMFE. Tokyo, 1997.

22. Robert M. Koerner, 1984. Construction and Geotechnical Methods in Foundation Engineering. McGraw - Hill.

23. Spangler and Handy, 1973. Soil Engineering. Third Edition. Intex Educational Publishers.

24. T. William Lambe and Robert V. Whitman, 1998. Mecánica de Suelos. Primera Edición. Editorial Limusa.

25. W. H. Glanville, 1952. Department of Scientific and Industrial Research road research laboratory. Soil Mechanics for road engineers