



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE SUELOS
ARCILLO ARENOSOS EN VENEZUELA UTILIZANDO EL
MINI CONO DE LABORATORIO FABRICADO POR ELE**

Trabajo de Investigación presentado por:

Zamy A. Varela R.

Profesor Guía:

Ing. Roberto Centeno W.

Caracas, Octubre 2015

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mi Dios nuestro señor, por haberme ayudado todos y cada uno de los días, puestos en dedicación, para que fuera sido posible la realización de este trabajo especial de grado.

Agradezco también a todas aquellas personas que de una u otra manera, contribuyeron en el desarrollo del TEG, que con cariño, profesionalismo, apoyo, exigencia y mucha paciencia, me ayudaron a superar, no solo los obstáculos que pudiera haber encontrado para la realización de la tesis, sino también que han hecho posible con sus referencias el logro de esta meta.

Ing. Roberto Centeno Werner, por su disposición en todo momento por creer en mis capacidades, por permitirme realizar este estudio en su área de trabajo, ser ejemplo de cómo llevar el ejercicio profesional, brindarme valiosos aportes en las etapas cumbres del trabajo especial de grado, y por darme la oportunidad de ser mi guía en el alcance de esta investigación.

Ing. Carlos Rodríguez Álvarez, por su desinteresada y muy apreciada colaboración para la realización de este trabajo de grado.

Laboratorista. Ramiro Meleán, por el apoyo, comprensión y por tener mucha paciencia, en la ayuda brindada a lo largo de la realización de los ensayos realizados en esta investigación.

A CENTENO-RODRÍGUEZ Y ASOCIADOS, S.C., por ser la fuente de información y prestar sus servicios.

“Que la gracia del señor Jesucristo sea con el espíritu de cada uno de ustedes”.
(Filipenses 4:23)

DEDICATORIA

Dedico como oración hacia ti mi Dios todo poderoso, cada día de dedicación en la realización de este trabajo especial de grado. Amén. Por darme fortaleza, sabiduría, por poner en mí camino a tantas personas buenas, y estar conmigo siempre guiándome en todo momento.

Este alcance de metas, no fuera sido posible sin la ayuda de algunas personas que estuvieron presentes en todo momento, no solo en el proceso de esta investigación, sino en toda mi vida personal.

- | | |
|------------------|---|
| A mis padres | Al ser que más quiero y amo con todo mi corazón en la vida, mi madre, Nancy Rosado, quien me ha acompañado en noches de estudio, por apoyarme en mi educación y lograr esta meta juntas. A mi papá Miguel Varela, por estar presente en la vida de mi mamá, mis hermanas y la mía, por su dedicación, apoyo incondicional, en la educación de mis hermanas y mía. |
| A mis hermanas | A cada una de ellas, Adela, Zaily y Leinad, por ser mis hermanas a las que Dios pudo darme el honor de poner a mi lado, quererme y cuidarme e incluso por demostrarme que nunca se está solo y que siempre podré contar con ustedes porque son mi única familia. |
| A mis profesores | A todos los que de una manera u otra han sido mis maestros, por ser fuente de conocimiento y enseñarme la importancia de compartir lo que sabemos. A mi tutor Roberto Centeno Werner, por su apoyo, comprensión y amistad. |
| A mis amigos | y aquellos seres excepcionales que me han acompañado por mucho tiempo y que han contribuido de muchas maneras a cumplir mis meta, tanto académicas como personales. |

Dedico a todos aquellos seres especiales que sientan que de una u otra manera han colaborado en la entrega del presente trabajo de investigación de grado. “Muchas Gracias”.

Dios bendiga a todos. Amén.

RESUMEN

El desarrollo de la presente investigación llevada a cabo en el laboratorio en forma absolutamente controlada, persigue obtener una ecuación de regresión mediante la cual se pueda determinar, con alta significación estadística, el límite líquido de suelos Venezolanos arcillo limosos de mediana a baja plasticidad; considerando nuevas variables como el contenido de arena y limo, la humedad relativa ambiental en el laboratorio, el tamaño de la taza en la que se realiza el ensayo de penetración con el cono miniatura y la influencia del peso de este último. Los ensayos de control realizados en la copa de Casagrande se han llevado a cabo bajo un estricto régimen de la velocidad de aplicación de los golpes dados por la taza en la base, previa determinación de la resiliencia de esta, como se exige en la especificación ASTM.

La ecuación obtenida como resultado de esta experimentación cumple con los requisitos exigidos por el estado del arte para el logro de una correlación estadística de muy alta significación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO I	1
<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</i>	<i>1</i>
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	<i>2</i>
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	<i>2</i>
<i>JUSTIFICACIÓN</i>	<i>2</i>
<i>ALCANCE Y LIMITACIONES.....</i>	<i>3</i>
CAPÍTULO II.....	4
<i>MARCO TEÓRICO</i>	<i>4</i>
ANTECEDENTES	4
FUNDAMENTO TEÓRICO	6
Arenas.....	7
Limos	7
Arcillas	7
Tixotropía	8
Textura.....	8
Plasticidad y límites de consistencia.....	9
Límite Líquido	11
Límite Plástico.....	12
Índice de Plasticidad	12
Consistencia Relativa	15
Índice de Liquidez	15
Naturaleza del mineral arcilloso	15
Contenido de Humedad	18
Gravedad Específica	18
Análisis por suspensión del suelo por el Método del Hidrómetro	19
Proceso para lograr un Peso Constante en la determinación del contenido de humedad para obtener el Límite Líquido a través de la Silicagel (Indicadora).....	20
Ensayo de ácido sulfúrico	20
Ensayos para determinar Límites de Atterberg.....	22
Límite Líquido por el Método de Casagrande ASTM-D 4318-05	22
Límite Líquido por el Método de Penetrómetro de Cono de BS 1377-2:1990	26
Resistencia al Corte de un suelo.....	31
Regresión	32
Coeficiente de Correlación de Pearson (R)	32
Significación Estadística	33
Análisis de la Varianza	34
Pruebas de Hipótesis	35

Prueba t-Student	35
Prueba F de Fisher	35
Prueba de Durbin– Watson (DW)	36
Requisitos para realizar un análisis de regresión en forma confiable	36
CAPÍTULO III	40
<i>METODOLOGÍA</i>	40
Combinaciones realizadas en (gr) para la preparación de las muestras prefabricadas en el laboratorio	41
Sitios provenientes de las muestras preparadas en el laboratorio:	41
CAPÍTULO IV	43
RESULTADOS DE LABORATORIO	43
Resultados de los ensayos con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio para la muestra de tamaño 40	43
Resultados de los ensayos con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio para la muestra de tamaño 8	45
Resultados de los ensayos con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio para la muestra de tamaño 20	45
Resumen general de las muestras ensayadas en el Laboratorio.....	47
Muestra: Terrazas de Auyarito	47
Muestra: Terrazas Detrás de Vallero	47
Muestra: Terrazas Vaquera	47
Muestra: Terrazas Reunión	48
Muestra: Material de Préstamo	48
Muestra: Valle de la Pascua VP2	48
Resumen de los resultados de los ensayos (muestra de tamaño 40)	49
Resumen de los resultados de los ensayos (muestra de tamaño 8)	50
Resumen de los resultados de los ensayos (muestra de tamaño 20)	50
<i>Resumen: Análisis Estadístico de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11</i>	51
Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200 (Muestra tamaño 40)	51
<i>Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido (Muestra de tamaño 40)</i>	52
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 40)</i>	53
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 20)</i>	54
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 (Muestra de tamaño 20)</i>	55
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 200</i>	56
<i>(Muestra de tamaño 20)</i>	56
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 20)</i>	57
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 8)</i>	58

<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 8)</i>	59
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	67
<i>MEMORÍA FOTOGRÁFICA</i>	68
<i>Otros Ensayos</i>	81
Hoja de cálculo para determinar el Límite Líquido y el Límite Plástico mediante el equipo de Casagrande.....	85
Hoja de cálculo para la obtención de datos, para determinar la resistencia al corte mediante la penetración del penetrómetro de cono o mini cono de laboratorio.....	86
Planilla de obtención de datos para el ensayo de Hidrómetro.....	87
Planilla de obtención de datos para el ensayo de Gravedad específica.....	88
Análisis Estadísticos	89
Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200 (Muestra tamaño 40).....	89
<i>Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido (Muestra de tamaño 40)</i>	91
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 40)</i>	94
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 20)</i>	97
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 (Muestra de tamaño 20)</i>	99
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 200</i>	101
<i>(Muestra de tamaño 20)</i>	101
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 20)</i>	103
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 8)</i>	106
<i>Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 8)</i>	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema hipotético del estado de un suelo antes y después del ensayo de límites Atterberg.....	12
Figura 2: Calibración del talón del equipo de Casagrande con ayuda del ranurador, para controlar que la altura de caída de la copa sea igual a 1.00 cm.	25
Figura 3: Penetrómetro de cono o Mini cono de laboratorio fabricado por ELE, marca Humboldt modelo H – 4236.	27
Figura 4: Peso total que actúa cuando está apoyado sobre la superficie de la muestra, cono ensamblado para ser colocado en equipo de medición de aproximadamente (a) 80 gr, (b) 100 gr.	30
Figura 5: Cono para Penetrómetro.....	30
Figura 6: Ejemplo de la resistencia al corte mediante el Penetrómetro de Cono.	31
Figura 7: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	89
Figura 8 :Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	91
Figura 9: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	94
Figura 10: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	97
Figura 11: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	99
Figura 12: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	101
Figura 13: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	103
Figura 14: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	106
Figura 15 :Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación.....	108

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Correlación entre el método de la taza de Casagrande y el del Cono para la determinación del límite líquido (WL).....	6
Gráfico 2: Gráficas esfuerzo – Deformación de una arcilla en su Estado Plástico. a) Real. b) Idealizada	10
Gráfico 3: Estados y límites de Consistencia de un suelo.	11
Gráfico4: Carta de plasticidad	13
Gráfico5: Papel Probabilístico Normal.....	38
Gráfico 6: Conjunto de muestras analizadas dentro de la Carta de Plasticidad (Muestra de tamaño 40).....	44
Gráfico 7: Conjunto de muestras analizadas dentro de la Carta de Plasticidad (Muestra de tamaño 8).....	46
Gráfico 8: Conjunto de muestras analizadas dentro de la Carta de Plasticidad (Muestra de tamaño 20).....	46
Gráfico 9 :Regresión lineal, representación de la Resistencia al corte vs Límite Líquido	93
Gráfico 10: Regresión Lineal, representación del Límite Líquido vs Resistencia al corte	96
Gráfico 11: Regresión Lineal, representación del Límite Líquido vs Resistencia al corte	105
Gráfico 12: Regresión Lineal, representación del Límite Líquido vs Resistencia al corte	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Representación de valores del índice de plasticidad para evaluar la plasticidad del suelo.	14
Tabla 2: Valores de los límites de Atterberg para minerales de arcilla.	17
Tabla 3: Composición mineral de partículas de diferentes rangos de tamaño.	17
Tabla 4: Valores de succión en función de la concentración del ácido sulfúrico.	22
Tabla 5 :Significación del valor D_{max} de la prueba de Kolmogorov.	39
Tabla 6: Combinaciones para muestras ensayadas con el recipiente pequeño de bronce, para ensayo Mini Cono de Laboratorio.	41
Tabla 7:Combinaciones para muestras ensayadas con el recipiente grande de bronce, para ensayo Mini Cono de Laboratorio.	41
Tabla 8: Resumen de muestras ensayadas con el equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio, cono ensamblado con sobrecarga de 100,11 gr. (Muestra de tamaño 40).....	43
Tabla 9: Resumen de muestras ensayadas con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio “Ensayo Controlado” (humedad relativa constante), para muestras seleccionadas a ser ensayadas con el cono ensamblado con sobrecarga de 80,13 gr.	45
Tabla 10: Resumen de muestras ensayadas con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio “Ensayo Controlado” (humedad relativa constante), para muestras seleccionadas a ser ensayadas con el cono ensamblado con sobrecarga de 100,11 gr.	45
Tabla 11: Resultados generales Terrazas de Auyarito.....	47
Tabla 12: Resultados generales Terrazas Detrás de Valleró.....	47
Tabla 13: Resultados generales Terrazas Vaquera	47
Tabla 14: Resultados generales Terrazas Reunión	48
Tabla 15: Resultados generales Material de Préstamo	48
Tabla 16: Resultados generales Valle de la Pascua VP2.....	48
Tabla 17: Síntesis de los resultados.....	49
Tabla 18: Síntesis de los resultados, ensayo controlado con cono ensamblado de 80,13 gr.....	50
Tabla 19: Síntesis de los resultados, ensayo controlado con cono ensamblado de 100,11 gr.....	50
Tabla 20: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	51
Tabla 21: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	52
Tabla 22: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	53
Tabla 23: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	54
Tabla 24: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	55
Tabla 25: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	56
Tabla 26: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	57
Tabla 27: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	58
Tabla 28: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11	59
Tabla 29:Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para la Resistencia al corte vs Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200.....	90
Tabla 30: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para la Resistencia al corte vs Límite Líquido.....	92
Tabla 31: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte.....	95
Tabla 32: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza.....	98
Tabla 33: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200	100
Tabla 34: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 200	102
Tabla 35: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte.....	104

**Determinación del Límite Líquido de suelos arcillo arenosos en Venezuela utilizando el mini cono de laboratorio
fabricado por ELE**

Tabla 36: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 40 y Diámetro de la Taza..... 107

Tabla 37: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte..... 109

INTRODUCCIÓN

El límite líquido de un suelo en estado remoldado es una propiedad esencial para lograr la identificación de los suelos finos, tal y como fue establecido a comienzos del siglo XX por el ingeniero químico sueco Albert Atterberg (1846-1916). La determinación de esta propiedad en aquellos suelos que contienen más del 40 % de arena y limo se hace muy complicada en la copa de Casagrande, por cuanto no se cumple estrictamente con la condición de flujo plástico de un pequeño talud de 10 mm de alto en la que se basa el ensayo.

Por otra parte, en la literatura técnica existente, se establece sobre el tema que la resistencia al corte del suelo remoldado en la humedad exacta que corresponde al Límite Líquido es 10 gramos por centímetro cuadrado y los experimentos realizados en varios laboratorios internacionales han determinado que la misma se ubica entre 12 y 30 gramos por centímetro cuadrado, lo cual impide establecer una especificación de carácter general para la determinación confiable del referido límite.

En otros trabajos especiales de grado realizados entre los años 2000 y 2013 en UCAB y UCV se han logrado obtener ecuaciones de regresión significativas; sin embargo en las mismas no se han considerado los estrictos controles experimentales tomados en consideración en la presente experimentación, razón por la cual no se pudo aislar la influencia de la humedad relativa ambiental en el laboratorio durante la ejecución del ensayo en la copa de Casagrande.

El cono miniatura de laboratorio es considerado un método más preciso (Norma Inglesa British Standard BS 1377:1990: part 2, cláusulas 4.3, 4.5) que la Copa de Casagrande para la medición instrumental de la resistencia al corte no drenada del suelo, por cuanto la primera es considerada una prueba estática que confía en la resistencia al corte del suelo, teniendo una precisión de 0.01 gr/cm², mientras que la alternativa Casagrande, introduce efectos dinámicos que introducen el efecto humano en el ensayo.

Se prepararan mezclas de proporción conocida de arena fina limpia con arcillas limosas, con la finalidad de obtener suelos areno arenosos prefabricados y determinar la resistencia

al corte que corresponden al límite líquido de tales muestras ensayadas en la copa de Casagrande (protocolo ASTM-D 4318-05), con la finalidad de determinar en las mismas muestras ensayadas la resistencia al corte en el límite líquido con el cono miniatura fabricado por ELE de laboratorio, a suponiendo que esta última puede estar influenciada por la fricción que produce la arena en la superficie lateral del cono miniatura.

Los valores obtenidos en Venezuela con el empleo del mini cono se compararan con los ya determinados originalmente por Casagrande (1958), con los obtenidos por Skempton y Northey (1953), Sowers (1959), Lomtadse (1952), Skopek (1975) y recientemente en la Universidad de San Carlos de Guatemala García Gonzales (2013). Los valores obtenidos por los citados investigadores están comprendidos entre (15 y 30) gr/cm². (Jiménez Salas, J.A. & De Justo Alpañes, J.L., 1975) y con los obtenidos por Mercedes Baquero en Caracas (2013).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La obtención de los valores de la resistencia al corte del suelo remoldado a una humedad correspondiente al límite líquido, debe ser establecida con suficiente precisión y exactitud para el caso de los suelos tropicales Venezolanos; la mayoría de los cuales son producto de procesos de meteorización de rocas metamórficas, como es el caso de las filitas y de las argilitas.

La gran ventaja y precisión que se obtiene con el empleo del cono miniatura en el laboratorio es mucho mayor que la que se obtiene con la taza diseñada por el profesor Arturo Casagrande, y es ello lo que permite que se obtenga un límite líquido más próximo a lo que se entiende por tal. Por cuanto en la mayoría de las ocasiones se viene empleando impropriamente la taza de Casagrande para tal fin; obteniendo resultados que se alejan del objetivo perseguido, por tratarse de suelos en los que predomina una textura arenosa, lo cual facilita su deslizamiento por la superficie del fondo de la taza de bronce y no se produce el flujo requerido para que falle el pequeño talud generado por lo exigido en la especificación ASTM.

El empleo del cono miniatura de laboratorio, consiste en ser un ensayo de penetración que permite determinar la consistencia de una muestra de suelos arcillo arenosos o areno arcillosos que se emplean con mucha frecuencia en los proyectos de carreteras y de terraplenes para aeropuertos al conocer la resistencia al corte del suelo en la humedad que corresponde al límite líquido, bajo condiciones fijas de carga, tiempo y temperatura. Este método fue normalizado en la Unión Soviética en 1949 (Lomtadse, 1952).

OBJETIVO GENERAL

Determinación de la resistencia al corte en la humedad exacta que corresponde al límite líquido de los suelos arcillo arenosos remoldeados en Venezuela, utilizando el cono miniatura marca ELE y la Copa de Casagrande como ensayo de control.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el límite líquido de suelos arcillosos, arcillo limosos de mediana y alta plasticidad para ser ensayados previamente en la copa de Casagrande (protocolo ASTM), con la finalidad de determinar en las mismas muestras ensayadas la resistencia al corte en el límite líquido con el cono miniatura fabricado por ELE de laboratorio.
- Preparar mezclas de proporción conocida de arena fina limpia con arcillas limosas utilizadas en el punto anterior, con la finalidad de obtener suelos areno arenosos prefabricados y determinar la resistencia al corte que corresponden al límite líquido.
- Analizar los datos disponibles en cada uno de los ensayos realizados, para hacer las correlaciones pertinentes en cada caso.
- Construir gráficos, donde se refleje la correlación del límite líquido en los ensayos de Casagrande y el mini cono de laboratorio fabricado por ELE.
- Verificación por medio de la prueba t-Student de la significación estadística de los coeficientes de la ecuación de regresión obtenida de los ensayos.
- Verificación por medio de la prueba de Fisher de la significación estadística del coeficiente de correlación de la ecuación de regresión obtenida de los ensayos.
- Prueba de Durbin- Watson para analizar posible correlación lineal de las variables independientes de la ecuación de regresión.

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación, justifica dos categorías que son de vital importancia, una de ellas son los posibles errores que puedan presentarse en los resultados arrojados por el ensayo de Casagrande, como consecuencia de la influencia del operador que lo esté manipulando, y la otra categoría es la necesidad de implementar un método estático, en el que el operador tiene escasa influencia, garantizando la mayor posibilidad de

obtener resultados que sean ciertos y confiables para la toma de una decisión en el empleo del resultado en proyectos de la vida real.

ALCANCE Y LIMITACIONES

El alcance va a limitarse a suelos arcillo arenosos, arcillo limosos (con arena fina), es decir suelos prefabricados, con un porcentaje conocido de arena, arcilla y limo.

Se debe tener en cuenta que una arcilla arenosa no es igual a una arena arcillosa, ambas influyen mucho en el porcentaje, para la fabricación de las diferentes texturas de muestras en el laboratorio. Se debe hacer una clara clasificación de dichos suelos para no generalizar los resultados de esta investigación a otro tipo de suelos.

Se ejecutaran ensayos en la copa de Casagrande, siendo esta operada siguiendo estrictamente lo que establece la norma ASTM. Una vez determinado el (LL) en la copa de Casagrande, se procederá a preparar muestras con esa misma humedad, para someterlas al ensayo de mini cono de laboratorio, de manera de poder encontrar la resistencia al corte no drenada para el suelo remoldeado.

Finalmente se establecerá una ecuación de regresión significativa entre el (LL) y el valor de la resistencia al corte obtenido con el equipo mini cono de laboratorio.

Se han empleado muestras provenientes de la zona de Auyare, vecina a la población de Guarenas en el Estado Miranda, por cuanto allí se construye actualmente la autopista Gran Mariscal de Ayacucho y ocurre una alta incidencia de erosión de la superficie de los taludes de corte ejecutados en la formación Guatire, causada por la acción dinámica de las gotas de lluvia en la superficie del talud. Ello también implica que durante la lluvia, la humedad superficial se hace próxima o igual al Límite Líquido del Suelo y se alcanza un valor del índice de liquidez vecino a uno, lo cual le confiere al suelo un estado de liquidez que lo hace fluir en sitio (formación de barro).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES

La mayoría de las investigaciones realizadas (prueba de cono), para determinar la resistencia de suelos remoldeados en la humedad correspondiente al límite líquido (LL), corresponde a suelos formados en ambientes de climas templados, es decir suelos de (4) cuatro estaciones, mientras que los suelos encontrados en Venezuela corresponden a ambientes de clima tropical, en el que predomina el aspecto de alteración química y no mecánica como ocurre en los climas de ambientes de clima templado.

El método más conocido y más empleado para la determinación del límite líquido es el ensayo de Casagrande. Este método se emplea principalmente en el continente americano y en algunos países de Europa; sin embargo el método más utilizado y estudiado en Inglaterra es el penetrómetro de cono, mejor conocido como mini cono de laboratorio. En nuestro país, Venezuela, este método es muy poco conocido por lo tanto casi no es utilizado por los laboratorios, debido a la costumbre de utilizar la Copa de Casagrande y al alto costo del equipo requerido. Para lograr una buena difusión en nuestro país de este método, se requiere de varios ensayos ejecutados en nuestros suelos que sirvan para confirmar la validez de dicho método.

Se ha observado por un sin número de autores estudios que deducen que todos los suelos plásticos que tengan una humedad igual a su límite líquido tienen la misma resistencia al corte; pruebas de laboratorio, como los de Skempton y Northey (1953), Casagrande (1958), Norman (1958), Youssef (1965) y Wood y Wroth (1978), mostraron que el límite líquido estaba definido como la resistencia al corte en un determinado contenido de humedad, estimando esta resistencia entre 1,7 KPa y 2,3 KPa (17 a 23 gr/cm²).

En la Norma British Standard BS 1377 de 1975, hace referencia a un trabajo publicado para suelos de clima templado, según el cual existe una buena correlación de la resistencia al corte no drenada, donde la penetración del cono miniatura con el límite líquido obtenido con la taza de Casagrande es de hasta (coeficiente de correlación próximo a 1). Por otra parte en la misma Norma BS 1377: Part 2 (1990), se detalla que la prueba de penetrómetro de cono (mini cono de laboratorio), ha sido comparada con los resultados mediante la cuchara de Casagrande por otros autores como Sridharan y Prakash (2000) concluyendo que para suelos con porcentaje de finos inferior al 40% los valores que se obtienen con el penetrómetro de cono aumentan en comparación con los resultados de la cuchara de Casagrande, y para muestras con porcentajes de finos superiores, los valores de límite líquido mediante el penetrómetro de cono disminuyen en comparación con los resultados obtenidos mediante la cuchara de Casagrande.

En la actualidad existen trabajos de investigación realizados de la determinación de la resistencia al corte, en suelos remoldados a la humedad del (LL), donde se han obtenido valores, donde en Norte América y países de clima templado del Norte de Europa (Inglaterra, Suecia, Noruega, Dinamarca y Argentina), se aproximan o están comprendidos entre (12-15 gr/cm²), arrojando resultados más consistentes que el dispositivo de Casagrande.

Por tal motivo, sería de gran valor, realizar un trabajo especial de grado, para determinar el valor de la resistencia al corte en el (LL), en nuestro país Venezuela; y es allí donde surge la necesidad de proponer el trabajo especial de grado.

Esta investigación ayudara a conocer este nuevo método y también proveerá información de las diferencias que existen entre los métodos señalados, tal y como se observa en el *Gráfico 1*.

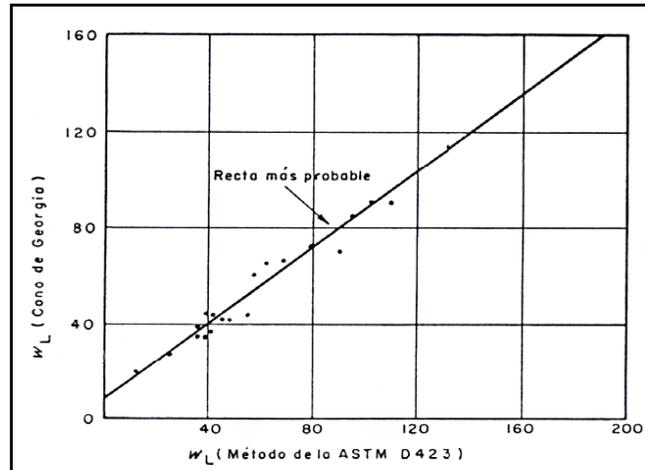


Gráfico 1: Correlación entre el método de la taza de Casagrande y el del Cono para la determinación del límite líquido (WL)

Fuente: Cortesía de la A.S.T.M., (Sowers et al., 1959)

FUNDAMENTO TEÓRICO

La técnica experimental de los ensayos de límites de consistencia propuesta por A. Atterberg, fue introducida a la Mecánica de Suelos por Terzaghi y posteriormente mejorada por Casagrande (Casagrande, A., 1932). Esto constituyó el primer intento por clasificar los suelos de acuerdo con sus principales propiedades ingenieriles.

Atterberg, originalmente pensó en dividir los suelos en base a la cantidad de agua retenida atendiendo a su comportamiento, es así como nace la idea fundamental para la clasificación y caracterización de los suelos, considerando los límites de consistencia (Límite Líquido y Límite Plástico), al igual que su correspondiente índice de plasticidad, para dicha diferenciación. Desde entonces se han realizado estudios para tratar de relacionar estos parámetros con otras propiedades de los suelos.

En (1932), Casagrande intenta definir el límite líquido en función de la resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad. Su trabajo de investigación proponía determinar el valor de la resistencia al corte de un suelo cuando éste se encontraba en el límite líquido.

Hasta ahora los límites de consistencia de los suelos se siguen definiendo casi exclusivamente en función del contenido de humedad.

Arenas

Son materiales cuyo origen es similar al de las gravas. La principal diferencia entre las gravas y las arenas es el tamaño de la partícula, entendiéndose que las arenas son partículas pequeñas de piedra de carácter silicio con un diámetro entre 0,02 y 2 mm; por su parte las gravas son mayores a los 2 mm. Este agregado al igual que las gravas tiene un uso indispensable en la construcción, por lo que se puede encontrar minas de este material en todo el mundo. Es un suelo que posee muy poca materia orgánica, de color claro, considerado suelo seco por ser permeable (no retiene el agua), y contener muy poca humedad.

Limos

Son suelos de grano fino con poca o ninguna plasticidad, derivado comúnmente de la fracturación mecánica de rocas, pudiendo ser inorgánicos como los producidos en las canteras u orgánicos como los que suelen encontrarse en los ríos con características plásticas, están formadas por granos de cuarzo y usualmente son llamadas harina de roca, contienen un porcentaje apreciable de partículas con formas de escamas, las llamadas limos plásticos. Se diferencia de la arcilla debido a su alta permeabilidad, permitiendo que al estar seco y frotarle con los dedos se logren desprender sus partículas fácilmente, poseen un color variante desde gris claro a muy oscuro.

Arcillas

Son materiales químicamente muy activos y mecánicamente muy plásticos al ser mezclados con agua, cuando esta húmedo o mojado, resulta pegajoso pero, cuando está seco suele contraerse y endurecerse fuertemente presentando un agrietamiento prismático, es muy fino y suave dado que la arcilla está formada por partículas diminutas de menos de 0,002 mm de diámetro. Al formar su estructura dentro de un ambiente acuático, pueden llegar a presentar muy altas humedades (hasta 5 o 6 veces más agua que sólidos, en peso), siendo entonces muy blandos y altamente compresibles, contando con muy baja resistencia al esfuerzo cortante y en algún momento se torna plástico, esto es fácilmente moldeable

como una textura jabonosa. Esta estructura posee relaciones de vacíos relativamente grandes y a pesar de ello son materiales muy poco permeables. Una de sus características es que cuando se someten estos suelos a la acción de esfuerzos compresivos, la deformación correspondiente no se presenta de manera instantánea, como en otros materiales, sino que evolucionará con el tiempo. Otra característica interesante es que cuando se remoldean pierden toda su cohesión, pero esta resistencia perdida la recuperarán parcialmente con el tiempo; este fenómeno se le conoce con el nombre de “tixotropía”, de naturaleza físico-química.

Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

Este aspecto es muy importante cuando se determina el límite líquido en la copa de Casagrande, por cuanto se requiere realizar el ensayo sin pérdida de tiempo para evitar que la resistencia al corte no drenada aumente por tixotropía.

Textura

Este término se refiere al grado de finura y la uniformidad de un suelo. Es descrito por expresiones como harinosa, suave, áspero o agudo, de acuerdo con la sensación producida por el roce del suelo entre él y los dedos.

Plasticidad y límites de consistencia

Existen suelos que al ser remodelados, cambiando su contenido de agua si es necesario, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se llamó plasticidad, como es el caso de las arcillas que son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una cubierta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Al tratar de definir en términos simples la plasticidad de un suelo, no resulta suficiente decir que un suelo plástico puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento, pues una arena fina y húmeda tiene estas características cuando la deformación se produce lentamente y sin embargo no es plástica, entre el comportamiento de la arcilla y el de la arena hay una importante diferencia, mientras que el volumen de la arena varía, el volumen de la arcillas se mantiene constante, además la arena se desmorona si se la somete a deformaciones rápidas.

En la mecánica de suelos se comprobó, que el concepto plasticidad basado en las ideas adquiridas podrían hasta cierto punto fundamentarse mejor teóricamente recurriendo a las relaciones esfuerzo-deformación. En la gráfica se muestran las curvas; real e idealizada de la relación esfuerzo-deformación de un material arcilloso suave, cuya forma depende de las características del material. Para esfuerzos bajos la relación esfuerzo-deformación es reversible (comportamiento elástico), para esfuerzos mayores es irreversible (comportamiento plástico).

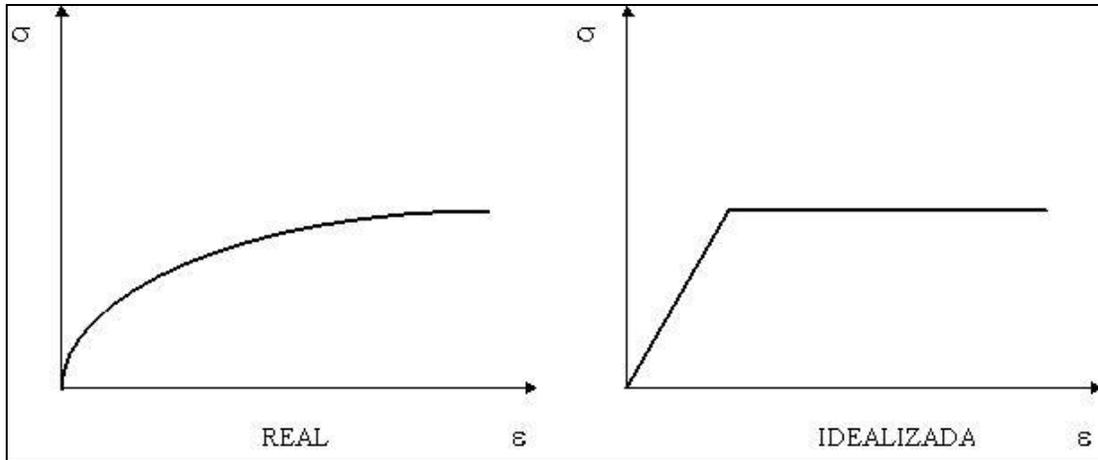


Gráfico 2: Gráficas esfuerzo – Deformación de una arcilla en su Estado Plástico. a) Real. b) Idealizada

Fuente: (Juárez Badillo E & Rico Rodríguez A., 2005)

La distinción entre el comportamiento elástico y plástico comprende dos aspectos:

- 1) Influencia de la historia de esfuerzos.
- 2) Razón de variación actual de esos esfuerzos.

El primero se relaciona con dos características o puntos de fluencia (de tensión y compresión), mostrando el material comportamiento elástico mientras el esfuerzo actual mantenga entre esos límites; al principio tales características son aproximadamente iguales y en el caso de material perfectamente plástico, permanecen constantes. Para materiales donde hay endurecimiento por deformación progresiva, los valores de esos límites dependen de la historia de esfuerzos.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cinco estados o modos de comportamiento de un suelo como lo son: sólido, semisólido, plástico, semilíquido o viscoso y líquido. El contenido de humedad y su efecto en el suelo fue la base para estos estados.

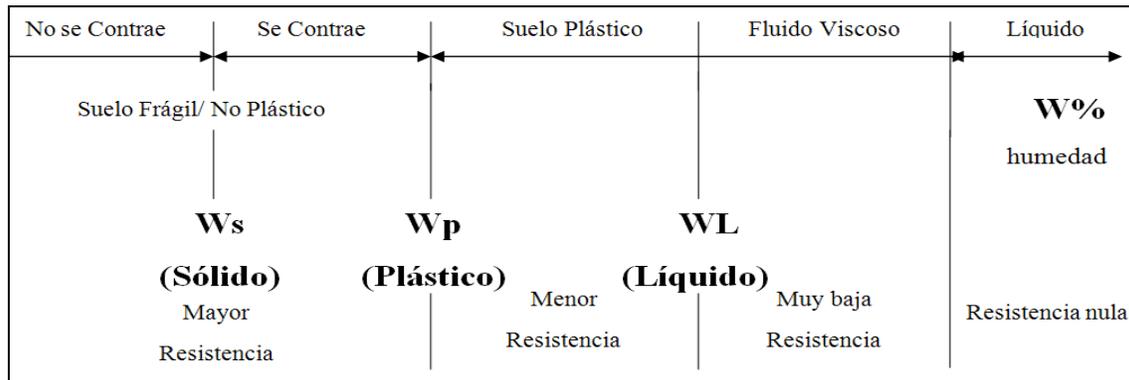


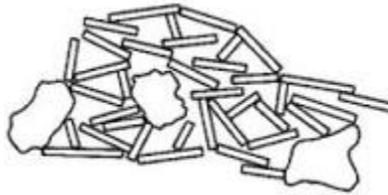
Gráfico 3: Estados y límites de Consistencia de un suelo.

Fuente: Ing. Roberto Centeno

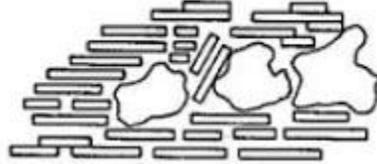
En el Gráfico 3, se puede observar, el estado líquido en el cual el suelo se comporta como un líquido o una suspensión, sin resistencia a la deformación por corte; el estado semi líquido, con las propiedades y apariencia de un fluido viscoso que puede fluir con cierta facilidad, su resistencia es casi nula; el estado plástico, en el, el suelo se comporta plásticamente y presenta una pequeña resistencia al corte; el estado semi sólido, el suelo aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado, se comporta como solido frágil, tiene una alta resistencia; y el estado sólido, tiene alta resistencia se comporta como un sólido frágil, el volumen del suelo no varía al ser secado.

Límite Líquido

Es el contenido de humedad en el cual el suelo cambia de una condición plástica a una condición semi líquida; expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remodelado o amasado. En las imágenes a continuación podemos observar un esquema hipotético del estado de un suelo antes y después del ensayo de Límites de Atterberg:



Estructura del Suelo Inalterado



Estructura del Suelo Remodelado o Amasado

Figura 1: Esquema hipotético del estado de un suelo antes y después del ensayo de límites Atterberg.

Fuente: http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html

Límite Plástico

Se define como el contenido de humedad en el cual el suelo cambia de una condición plástica a una semi sólida (frágil). Terzaghi (1926), basándose en los estudios de Atterberg (1911), redefinió el ensayo como el contenido de humedad necesaria para que un cilindro de muestra de suelo se rompa o se agriete cuando se enrolla a un diámetro de 1/8 de pulgada o 3 mm, esto sobre una superficie no absorbente, lisa, usualmente de vidrio, comienza a romperse al hacerlo rodar con la palma de la mano.

Índice de Plasticidad

Atterberg encontró que la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), denominado índice de plasticidad (IP), representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo.

$$\mathbf{IP = LL - LP}$$

Luego Casagrande (1932), estudió la relación que existe entre el índice de plasticidad y el límite líquido para una gran variedad de suelos, por lo que elaboro un sistema de ejes coordenados en el cual coloco en las ordenadas el índice de plasticidad y en las abscisas el límite líquido. Luego represento en dicho esquema los puntos

correspondientes a un sin número de ensayos realizados y obtuvo una nube de puntos inclinados respecto a la horizontal. Así Casagrande estableció que los suelos de un mismo depósito, generalmente no adoptan una posición caprichosa sino que se agrupan de modo específico en líneas o bandas inclinadas respondiendo a sus características de plasticidad. La inclinación confirmó el hecho de que la plasticidad depende de esos dos factores y reveló que la línea de frontera entre los suelos de alta plasticidad y los de baja plasticidad también debían ser una línea inclinada. Usando métodos estadísticos estableció que esa línea inclinada era una recta a la que llamó línea A, esta línea dividió el gráfico en dos campos, el superior ocupado por los suelos más plásticos “arcillas” y el inferior ocupado por los suelos menos plásticos “limos”. Empíricamente obtuvo las ecuaciones de las líneas que dividen el gráfico en las regiones donde se agrupan los tipos de suelo.

Se sabe que el límite líquido es una medida directa de la compresibilidad relativa del suelo, de manera que en el gráfico los suelos más comprensibles deben ubicarse hacia la derecha y las menos comprensibles hacia la izquierda o sea en la zona cuyos límites líquidos son menores.

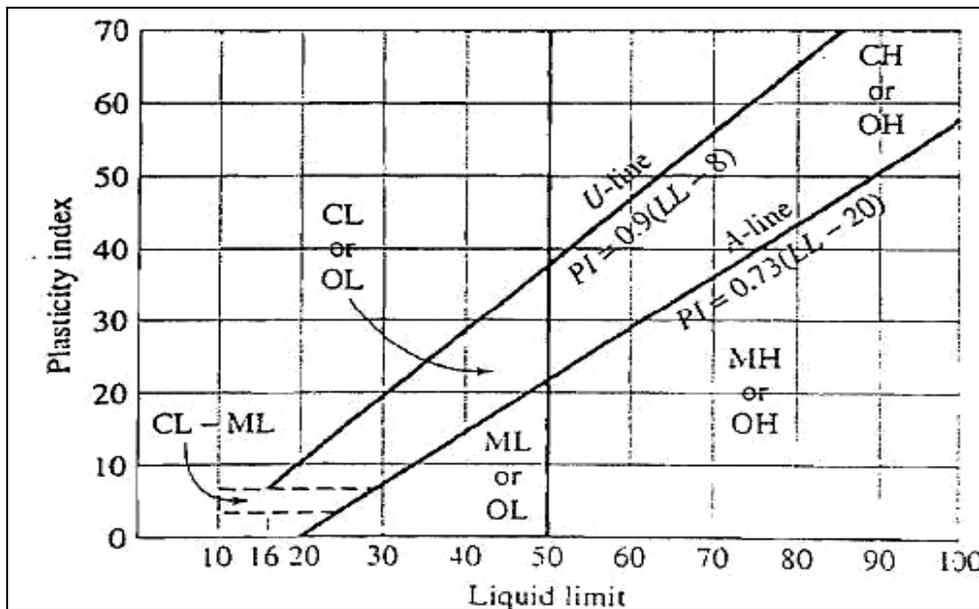


Gráfico4: Carta de plasticidad

Fuente: Casagrande (1932).

En el Gráfico 4, se tiene que, la línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos, las arcillas inorgánicas se encuentran por encima de esta línea y los limos inorgánicos por debajo de esta. Los limos orgánicos están situados por debajo de esta línea en el intervalo de 30 a 50 del límite líquido, las arcillas orgánicas se ubican por debajo de esta línea con un límite líquido mayor a 50. Un gran problema que se presentó dentro de este sistema de clasificación se produce en la frontera de las arcillas con baja comprensibilidad y los limos de baja comprensibilidad, esta zona ubicada a la izquierda de la gráfica, presenta un área limitada por las líneas correspondientes a un $I_p = 7$, $I_p = 4$ y la línea inclinada A, todo suelo al caer dentro de estos límites tendrá un doble símbolo CL – ML.

Una referencia que se presenta en la carta de plasticidad es que ningún suelo puede caer sobre la línea U, si se diera el caso se deberá repetir los ensayos en la muestra de suelo. La ecuación para esta línea está definida por $I_p = 0,9 * (W_L - 8)$.

Más tarde Sowers (1979), sugirió que el (LL) y el (LP), sirvieran de base en la clasificación de los suelos plásticos. Acorde al valor del índice de plasticidad, distinguió los siguientes materiales de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1: Representación de valores del índice de plasticidad para evaluar la plasticidad del suelo.

Fuente: Sowers (1979).

IP	Descripción
0 - 3	No plástico
3 - 15	Ligeramente plástico
15-30	Baja plasticidad
> 30	Alta plasticidad

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de

perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Consistencia Relativa

La consistencia relativa es una medida del comportamiento del suelo remoldado ante la presencia del agua. Viene dado por la siguiente expresión:

$$Cr = (LL-W) / IP.$$

Cuando la consistencia relativa es NULA ello indica que la humedad del suelo es igual a l límite líquido, como ocurre en el caso de las arcillas normalmente consolidadas en sitio.

Índice de Liquidez

El Índice de liquidez es una medida relativa del comportamiento del suelo, la cual nos indica la consistencia del mismo cuando se presentan cambios de humedad con respecto al LIMITE PLASTICO de la muestra remoldada.

Cuando la humedad se ubica en la muestra por debajo del límite plástico el índice de liquidez es negativo y es indicación de que el suelo es duro. Cuando el índice es nulo se entiende que el suelo se encuentra en el límite plástico y que su consistencia es la de un material plástico, y cuando su valor va siendo mayor que cero, el suelo va obteniendo una consistencia más próxima a la liquidez y su resistencia al corte es la mínima posible, quedando sujeto a la movilización en sitio por efecto dinámico o por la acción de una lluvia excepcional de larga duración e intensidad.

Naturaleza del mineral arcilloso

Originalmente Atterberg (1911, 1912) definió que solamente los minerales con estructuras laminares, mostraban plasticidad, y que minerales como los cuarzos que muestran una estructura tetraédrica no son plásticos. Por lo que se encasillan tres grandes grupos de materiales como la caolinita, la montmorillonita y la ilita, cuyos cristales están formados por hojas, también muestran propiedades plásticas, demostrando que el tipo de

arcilla contenida en el suelo es un parámetro importante de la cantidad de agua que puede absorber.

Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra alumínica que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente fuerte para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas. En consecuencia las caolinitas son relativamente estables en presencia de agua.

Las montmorilonitas están formadas por una capa aluminica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente, en este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento de volumen en los cristales lo cual se traduce macro físicamente en una expansión. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, estas arcillas presentan la característica expansión pero en un grado más agudo por lo que su comportamiento es realmente crítico. Este tipo de arcillas es muy común encontrar en zonas ricas en rocas ferro magnesianas, donde el clima sea árido y con altas temperaturas como por ejemplo en el área norte de nuestro país Venezuela.

Las ilitas están estructuradas análogamente que las montmorilonitas pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos en el material que reducen el área expuesta al agua, se comportan de manera más estable que las montmorilonitas. Sin embargo es menos estable que la caolinita y en consecuencia su actividad es mayor.

Aparte de los minerales ya mencionados, se puede encontrar otros minerales arcillosos, como son bentonitas del grupo de montmorilonitas, haloisita del grupo de las caolinitas, vermiculita, y la atipulgita, pertenecientes a las ilitas.

En general, cuanto mayor es la cantidad de minerales arcillosos en el suelo, mayor es la plasticidad, así como la compresibilidad y la cohesión, mientras que la permeabilidad y el ángulo de fricción interno disminuyen, de acorde a lo mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de los límites de Atterberg para minerales de arcilla.

Fuente: Mitchell, J.K. (1993).

Mineral ^a	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)
Montmorillonita (1)	100-900	50-100
Nontronita (1)(2)	37-72	19-27
Illita (3)	60-120	35-60
Caolinita (3)	30-110	25-40
Halosyta hidratada (1)	50-70	47-60
Halosyta deshidratada (3)	35-55	30-45
Atapulgita (4)	160-230	100-120
Clorita (5)	44-47	36-40

(1) Varias formas iónicas. Valores más altos para monovalentes; más bajos para di y trivalentes.
 (2) Todas las muestras contienen un 10% de arcilla y un 90% de arena y limo. (3) Varias formas iónicas. Valores más altos para formas di y trivalentes; más bajos para monovalentes. (4) Varias formas iónicas.
 (5) Algunas cloritas no son plásticas.

En referencia al tamaño de los minerales arcillosos, estos pueden presentarse en diferentes rangos de tamaño tal y como puede observarse en la Tabla 3.

Tabla 3: Composición mineral de partículas de diferentes rangos de tamaño.

Fuente: Mitchell, J.K. (1993).

Tamaño de Partícula (µm)	Constituyentes predominantes	Constituyentes comunes	Constituyentes raros
0,1	Montmorillonita- Beidellita	Mica intermedia	Illita
0,1-0,2	Mica intermedia	Caolinita- Montmorillonita	Illita- cuarzo
0,2-2,0	Caolinita	Illita- Mica intermedia Micas Halosyta	Cuarzo Montmorillonita Feldespatos
2,0-11,0	Micas Illitas Feldespatos	Cuarzo Caolinita	Halosyta Montmorillonita

Contenido de Humedad

El contenido de humedad (W), también se refiere al contenido de agua y se define como la relación entre el peso de agua y el peso de los sólidos en un volumen dado de suelo, esto es:

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Dónde:

W: Contenido de humedad en porcentaje

Ww: Peso de agua libre más la absorbida

Ws: Peso del suelo seco

Entre los métodos más usados para determinar la densidad de un suelo, se encuentran el método de “Secado al Horno” y el método del “Speedy”. El “Speedy” tiene la ventaja de determinar la humedad en pocos minutos, directamente en el sitio de trabajo, sin embargo el método aquí referido es el de “Secado al Horno” ya que con éste se obtienen resultados más representativos de la humedad real.

Gravedad Específica

La gravedad específica (Gs), de cualquier sustancia se define como el peso unitario del material de suelo en cuestión (γ_s) dividido por el peso unitario del agua destilada (γ_w) a 4°C, expresada adimensionalmente).

La gravedad específica de un suelo se toma como el valor promedio para los granos del suelo. Si no se aclara adecuadamente a que gravedad específica se refieren se pueden producir errores, pues la gravedad específica de los suelos es siempre bastante mayor a la gravedad específica volumétrica determinada incluyendo los vacíos de los suelos en el cálculo.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w 4^\circ C}$$

El valor de la gravedad específica se emplea también para determinar otras propiedades del suelo como son: porosidad, relación de vacíos de un suelo, la velocidad de caída de una partícula en el seno de un fluido viscoso (utilización del método del hidrómetro basado en la Ley de Stokes); es útil para predecir el peso unitario del suelo. Ocasionalmente el valor de la gravedad específica puede utilizarse en la clasificación de los minerales del suelo, algunos minerales de hierro tienen un valor de gravedad específica mayor que los provenientes de sílice.

Análisis por suspensión del suelo por el Método del Hidrómetro

El método del hidrómetro se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de las partículas en un líquido es función de su tamaño. La ley fundamental que se hace uso en el procedimiento del hidrómetro es la ley de Stokes, la cual proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas esféricas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas. Para poder llegar a esta ley se puede hacer observaciones empíricas como teóricas, siendo las segundas un poco más confiables a pesar de las generalidades que se presentan. Aplicando la ley de Stokes se obtiene el diámetro equivalente de la partícula que es el diámetro de una esfera, del mismo peso específico del suelo, que se sedimenta con la misma velocidad que la partícula real en partículas alargadas y planas de coloides. Este diámetro es aproximadamente igual al diámetro real medio, pero en partículas laminares este diámetro tiene una gran variación que puede llegar a ser el cuádruple del su equivalente. La ley de Stokes es válida solamente para tamaños menores de 0.002 mm aproximadamente, en tamaños mayores las turbulencias provocadas por el movimiento de la partícula alteran apreciablemente la ley de sedimentación, y para tamaños mayores a 0.2 micras, se dice que bajo este límite la partícula se ve afectado por el movimiento browniano y no se sedimenta.

Proceso para lograr un Peso Constante en la determinación del contenido de humedad para obtener el Límite Líquido a través de la Silicagel (Indicadora)

Para obtener el valor del límite líquido se saca los contenidos de humedad de cada muestra; por lo que una vez obtenida la muestra, esta será llevada de inmediato a una cápsula, se registra su peso y se seca al horno hasta obtener un peso constante, para determinar su contenido de humedad. La obtención de este peso constante se procede de la siguiente manera: al retirar las muestras del horno, se introducen en un recipiente previamente preparado con el producto Silicagel indicadora, el cual tendrá como función evitar que las muestras tengan (2) dos pesos diferentes.

El producto anteriormente mencionado Silicagel indicadora, de fórmula química molecular ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$); es de forma granular y porosa de dióxido de silicio hecho a partir de silicato de sodio, de color blanquecino, semitransparente y de aspecto cristalino; es un producto que se usa principalmente como desecante, absorbente de agua, motivo por el cual se utiliza para reducir la humedad relativa en espacios cerrados.

Una de las ventajas de este producto es que se puede regenerar una vez saturado, es decir, si se somete a una temperatura de entre 120-180 °C. Calentándolo desprenderá la humedad que haya absorbido por lo que puede reutilizarse una y otra vez sin que ello afecte a la capacidad de absorción. Debiéndose a que el cloruro de cobalto que se suele añadir para indicar la humedad del gel, si es tóxico. El cloruro de cobalto reacciona con la humedad, cuando está seco es de color azul y se vuelve rosa al absorber humedad.

Ensayo de ácido sulfúrico

A través de la utilización de un desecador o cámara de vacío, recipiente de vidrio con tapa que se adapta ajustadamente. El borde de vidrio es esmerilado y su tapa permite que el recipiente este herméticamente cerrado. El propósito de un desecador es preservar la sustancia de la humedad. La cámara principal de un desecador está vacía, lo que permite colocar cualquier sustancia en su interior. En la cámara secundaria, se coloca la sustancia desecante (ácido sulfúrico concentrado), la cual se encarga de mantener constante la humedad relativa del recipiente. Las cámaras principal y secundaria están generalmente

separadas por una plataforma extraíble, mientras que una tapa desmontable en la parte superior del desecador permite el acceso a los contenidos en proceso de desecación.

Mediante la solución de agua más ácido sulfúrico, se puede obtener diferentes humedades relativas en función de la concentración del ácido sulfúrico creado en la cámara de vacío. El propósito de este ensayo es mantener constante la humedad relativa de la muestra en la cámara de vacío a la hora de poder ensayarla por ambos métodos: Casagrande y Mini Cono de Laboratorio.

En la siguiente tabla se ilustran los diferentes valores que se obtienen, creando en la cámara de vacío, diferentes humedades relativas en función de la concentración del ácido sulfúrico, para esta investigación se tomó la concentración de ácido sulfúrico que corresponda a una humedad relativa de 97,73%, perteneciente a un suelo saturado, como es el caso de las muestras a ensayar.

$$Pf = 6,502 + \log_{10}(2 - \log_{10} H)$$

H = Humedad relativa generada por solución H_2SO_4 a 20 °C

Densidad del Ácido Sulfúrico puro= 1,84 (gr/cm³)

Soluciones de Agua + Ácido Sulfúrico

$$D_{sol} = \frac{1,84 * Vol.H_2SO_4 + 1,00 * Vol.Agua}{Vol.H_2SO_4 + Vol.Agua}$$

Tabla 4: Valores de succión en función de la concentración del ácido sulfúrico.

Fuente: Centeno y Lairet (1985).

Densidad Sol. (gr/ml)	Vol. H_2SO_4 (ml)	Vol. Agua (ml)	Vol. Total Sol. (ml)	Valores De Pf Succión	Densidad Del acido (gr/cm ³)	Humedad Relativa (%)
1,050	10	158,00	168,00	4,50	1,050	97,73
1,110	10	66,36	76,36	5,00	1,110	93,00
1,205	10	30,98	40,98	5,50	1,205	79,51
1,344	10	14,42	24,42	6,00	1,344	48,43
1,578	10	4,53	14,53	6,50	1,578	10,10
1,840	10	0	10,00	7,00	1,840	0,07

Ensayos para determinar Límites de Atterberg

Para determinar los límites de Atterberg se han utilizado varios métodos desde su definición, los que se usan actualmente están respaldados por normas, la más usada en Venezuela es la norma ASTM, aunque para la determinación del límite líquido se encuentra el ensayo de Casagrande, método más conocido y más empleado principalmente en el continente americano y en algunos países de Europa. Por el contrario existe otro método más utilizado y estudiado en Inglaterra para determinar el límite líquido, llamado penetrómetro de cono (Mini Cono de Laboratorio), método definitivo según la norma BS 1377.2 (Británica, 1990).

Límite Líquido por el Método de Casagrande ASTM-D 4318-05

El Método más conocido y más empleado para la determinación del límite líquido es el ensayo de Casagrande. Ensayo que se describe de manera bastante práctica para determinar el límite líquido de los suelos mediante la obtención de la curva de fluidez.

Casagrande, A. (1932) determinó que el límite líquido estaba definido como la resistencia al corte en un determinado contenido de humedad, estimando esta resistencia

entre 1,7 a 2,3 kPa (Skempton Northey (1953); Casagrande (1958); Norman (1958); Youssef (1965); Wrothy Wood (1978); Wood (1985)).

El esfuerzo cortante inducido por la Copa de Casagrande, produce un efecto dinámico, por golpe de aproximadamente de 1 gr/cm² y el objetivo del ensayo es encontrar la humedad a la que un surco de 2 milímetros de ancho hecho en la muestra se cierra a lo largo de 13 milímetros, con 25 golpes a una velocidad aproximada de 120 revoluciones por minuto, es decir a razón de dos (2) golpes por segundo.

Equipo utilizado

- Aparato de límite líquido, copa de Casagrande
- Ranurador plano
- Espátula metálica
- Recipientes apropiados para mezclar la muestra
- Tamiz #40 y #200
- Disposición de un Metrónomo, para la aplicación precisa de obtener los dos (2) golpes por segundo, es decir los ciento veinte (120) golpes por minuto como lo exige la Norma ASTM.
- Cápsulas para determinar el contenido de humedad
- Balanza con precisión de 0,01 gramos
- Probeta con agua destilada
- Horno

Procedimiento

Se prepara la muestra de suelo, secándolo al sol para luego molerlo y pasar una parte por el tamiz No. 40 y otra por el tamiz No. 200 hasta conseguir de 200 a 350 gramos de suelo, mezclarlo con agua destilada o desmineralizada para llevarlo a la humedad necesaria con la que cerraría el surco en la copa de Casagrande con unos 25 a 35 golpes y dejar reposar esta mezcla durante al menos 24 horas para homogenizar la humedad en la muestra.

Ya preparada la muestra se debe colocar la Copa de Casagrande en una superficie firme y horizontal, verificando que la altura de la caída del aparato sea la correcta, para esto se coloca un calibrador de un centímetro entre la copa del aparato y su base como se muestra en la *figura 2*, para que al girar la perilla en el sentido opuesto, se escuche un ligero campanilleo, pero sin levantar la copa.

Una vez calibrado el aparato se puede proceder al ensayo del material, para esto se coloca la muestra previamente humedecida en un contenedor que facilite su mezclado y homogenizado, comúnmente se utiliza una cápsula y una espátula. El mezclado se realiza con cada nuevo contenido de humedad hasta que la muestra logre un color uniforme.

Teniendo la mezcla homogenizada se coloca en la Copa de Casagrande extendiéndola con una espátula flexible y evitando que se formen burbujas de aire dentro de la muestra o en el contacto con la copa, luego se nivela de manera que la superficie quede horizontal respecto al punto más bajo de la corona de la Copa de Casagrande; Se separa entonces la mezcla con la ayuda del ranurador, divide el suelo que está en el recipiente del equipo de Casagrande en dos mitades, mediante un movimiento suave a lo largo del diámetro de éste, de atrás hacia la parte frontal. El movimiento debe ser cuidadoso propiciando la construcción de la ranura en un solo movimiento y de manera que esta llegue hasta el fondo, quede limpia y no se dañen los bordes de las mitades de suelo generadas, tratando de que sea por el eje simétrico de la copa y con la ayuda de la manivela del equipo, damos golpes sin parar a la cuchara a una velocidad constante de 2 golpes/segundo, hasta que las dos mitades se junten en una longitud de 13 milímetros; el cierre de este surco debe de ser muy parejo y simétrico, de lo contrario podría ser un indicador de una homogenización mal realizada. Se debe registrar el número de golpes en los cuales se cerró la ranura.

El resultado se puede encontrar realizando una prueba de un solo punto que quede lo más cercano posible a los 25 golpes, lo que podría ser entre 20 y 30 golpes, este método tiene la diferencia en que se debe de verificar que la humedad del material se encuentre uniforme, al realizar con la misma humedad dos veces el ensayo.

Si el surco se cierra con una diferencia no mayor a dos golpes, se puede utilizar la primera humedad, si no se debe de mezclar de nuevo el material y reintentar. El limitar la

utilización de este método al rango entre 20 y 30 golpes se debe a que la actividad de las arcillas afecta la pendiente de la recta de flujo, dando así un margen alto de variabilidad en el resultado real del límite ensayado.

Luego de cada ensayo se anotan los golpes que fueron necesarios para cerrar el surco a lo largo de 13 milímetros y se toma una porción de suelo, procurando tomarla del sector donde se cerró la ranura. La muestra tomada es llevada de inmediato a una cápsula, se registra su peso y se secan al horno hasta obtener un peso constante, para determinar su contenido de humedad. Para obtener el valor del límite líquido se saca los contenidos de humedad de cada muestra.

Según la norma ASTM D 2216 -80 el tiempo requerido para obtener un peso constante depende del tipo de material, el tamaño de la muestra, el tipo de horno y su capacidad, entre otros factores, pero en la mayoría de los casos secar la muestra durante la noche (unas 16 horas) es suficiente. En casos especiales en los que se tenga duda del buen secado de la muestra se debe continuar el secado hasta que se tengan dos pesos con una diferencia menor al 1% del peso de la muestra, separados por un lapso de tiempo mayor a media hora.



Figura 2: Calibración del talón del equipo de Casagrande con ayuda del ranurador, para controlar que la altura de caída de la copa sea igual a 1.00 cm.

Fuente: Laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados Ingenieros Consultores

Es de hacer notar el hecho que cuando se utiliza el ranurador plano en suelos areno arcillosos (pasa # 40) se tiende a cuartear la superficie de la muestra en la copa y el ensayo

no tiene validez; razón por la cual es necesario utilizar el cortador curvo tomando el cuidado de alisar la superficie en la copa para lograr obtener la altura de talud exigida por la especificación ASTM (10 mm).

Límite Líquido por el Método de Penetrómetro de Cono de BS 1377-2:1990

El Penetrómetro de cono, cono de caída libre o mini cono de laboratorio, es el método más utilizado y estudiado en algunos países del mundo como medio rápido y eficaz para medir la resistencia al corte, por ser esencialmente una prueba estática. Noruega, Inglaterra, URSS, Suecia, Continente Asiático, por ejemplo, han adoptado este método como una alternativa para determinar el límite líquido de los suelos, bajo condiciones fijas de carga, tiempo y temperatura, mediante la penetración del cono. De allí, que en esos países se hayan desarrollado conos normalizados, como es el caso del penetrómetro estándar (cono de aproximadamente de 80 gramos de peso, con un ángulo central de 30°), método definitivo según la norma BS 1377-2 (Británica, 1990). Sin embargo en Venezuela este método es muy poco conocido por lo tanto casi no utilizado por los laboratorios, y mucho menos estudiado.

El penetrómetro de cono es esencialmente una prueba de resistencia del suelo. Wroth y Wood (1979) establecen que mediante el límite líquido es posible obtener el contenido de humedad en que un suelo fino tiene cierta resistencia no drenada; es aplicable también para muestras tanto inalteradas como remoldeadas mientras que el método de Casagrande solo se aplica para muestras remoldeadas, parámetro este de gran importancia, en la caracterización de los suelos. La *figura 3* presenta el equipo utilizado en esta investigación y que corresponde a un penetrómetro de cono marca Humboldt compuesto de un dial para medir la penetración obtenida, un botón de desbloqueo que permite liberar y trabar el cono durante el ensayo y de recipientes de bronce para la preparación de las muestras.

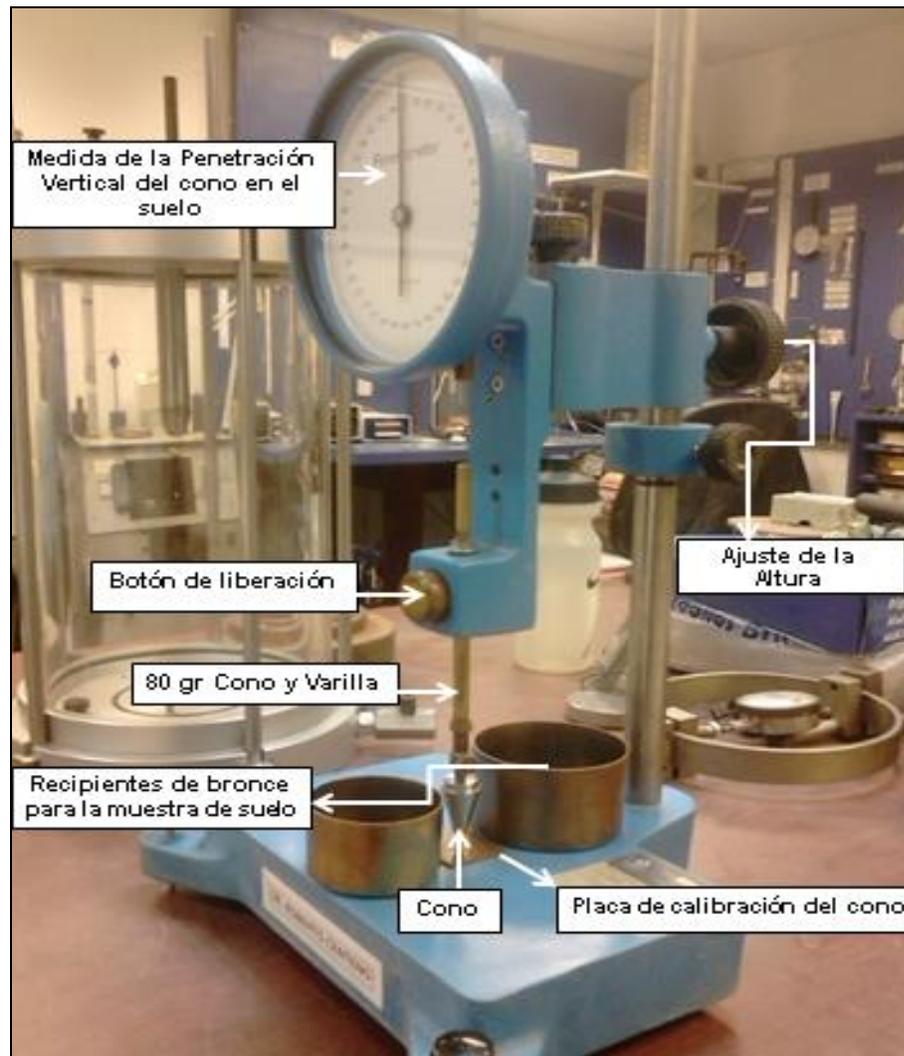


Figura 3: Penetrómetro de cono o Mini cono de laboratorio fabricado por ELE, marca Humboldt modelo H – 4236.

Fuente: Laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados. S.C.

Para poder realizar este ensayo se procede a preparar la muestra de suelo bajo las mismas condiciones que para los ensayos anteriores, porciones de suelo que pasen el tamiz No. 40 y por el No. 200.

Equipo utilizado

- Equipo penetrómetro de cono (Mini Cono de Laboratorio), graduado en 360 divisiones de decimas de milímetros de 0,01 milímetros.
- Cono de acero inoxidable de 35 milímetros de longitud y ángulo central de $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$, y con un peso de aproximadamente de 80 ± 1 gramos (ensamblado para ser colocado en equipo de medición).
- Dos tazas de bronce de $\varnothing 55 \times 35$ y 70×45 mm para colocar la muestra.
- Espátula metálica
- Recipientes apropiados para mezclar la muestra
- Tamiz #40 y # 200
- Cápsulas para determinar el contenido de humedad
- Cronómetro
- Lupa para verificar el contacto entre punta del cono y superficie de la muestra de suelo
- Balanza con precisión de 0,01 gramos
- Probeta con agua destilada
- Horno

Procedimiento

Se coloca el penetrómetro sobre una superficie firme y se nivela.

Se debe revisar el cono periódicamente introduciendo su punta en un agujero de $1,5 \pm 0,02$ milímetros de diámetro hecho en una lámina de $1,75 \pm 0,1$ milímetros de espesor. El cono se remplazará en el momento que al ser introducido en el agujero no se pueda palpar la punta del cono con el dedo al otro lado de la lámina.

La preparación de la muestra ha de ser la misma que se utiliza en el método de Casagrande, utilizando material que pase el tamiz No. 40 y No. 200 cuya humedad haya sido homogenizada 24 horas antes del ensayo.

Se recomienda que el mezclado de la muestra se realice por al menos 10 minutos, pero algunos tipos de arcillas muy plásticas pueden requerir hasta 40 minutos para que la

humedad sea homogénea en toda la muestra; el objetivo es que la primera penetración sea de unos 15 milímetros; al terminar la homogenización de la muestra se coloca en la taza de bronce con una espátula, tratando que no quede aire atrapado en el interior y luego rasando al borde para dejar una superficie lisa.

Hecho esto, el cono se mueve en el penetrómetro de forma de tener una lectura inicial del dial en 0 mm o con el mínimo posible de forma de tener una corrida adecuada para el ensayo, en esta posición se coloca la tasa de bronce con la muestra a ensayar de manera que el cono caiga en el centro geométrico de la tasa de bronce (para mantener en el ensayo una distribución uniforme de esfuerzo sobre el suelo), luego se baja el aparato sin perder la lectura inicial, teniendo precaución de dejarlo justo al ras de la muestra.

Una vez que la muestra de suelo se encuentre bajo la base del penetrómetro, se debe ajustar el cono de manera que solamente la punta del mismo toque la superficie de la muestra, una manera de asegurarnos de esto es mediante pequeños movimientos lateralmente a la tasa de bronce, evidenciando así marcas del cono en la superficie de la muestra. Se encera el micrómetro.

Se presiona el botón de desbloqueo, dejando caer el cono en caída libre durante un tiempo de 5 ± 1 s para luego detenerlo y tomar la lectura de penetración, si el aparato no cuenta con un freno automático hay que tener cuidado de no moverlo al momento de activarlo para no alterar el nivel ni la caída libre.

Después de determinar la penetración del cono, se debe determinar el contenido de humedad para dicho suelo, se tomara entonces una pequeña porción de la muestra de suelo en el área donde se penetra el cono, la misma es llevada de inmediato a una cápsula, se registra su peso y se lleva al horno hasta obtener un peso constante, para determinar su contenido de humedad.

El valor del límite líquido será el contenido de humedad en donde se obtiene una penetración del cono de aproximadamente 20 milímetros en una taza de suelos remoldeados en un lapso de 5 segundos.

Este procedimiento se repite para muestras con diferentes contenidos de humedad obteniendo así el límite líquido del ajuste que se obtiene con todos los ensayos realizados.

Dimensiones del Equipo Mini Cono de Laboratorio



(a) Cono ensamblado de 80 gr



(b) Cono ensamblado con sobrecarga de 100 gr

Figura 4: Peso total que actúa cuando está apoyado sobre la superficie de la muestra, cono ensamblado para ser colocado en equipo de medición de aproximadamente (a) 80 gr, (b) 100 gr.

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados. S.C.

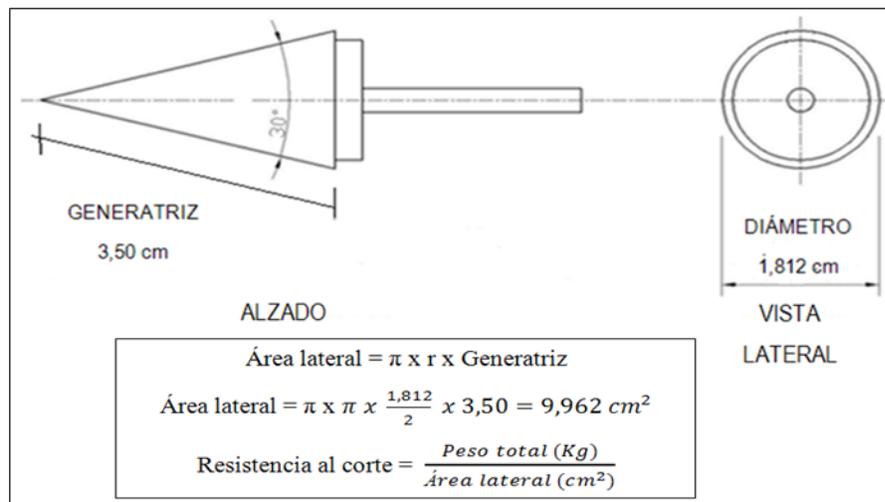


Figura 5: Cono para Penetrómetro

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte de un suelo

Cuando sometemos una masa de suelo a un incremento de presiones producida por algún tipo de estructura u obra de ingeniería, se generan en el suelo en cuestión, esfuerzos que tratarán de mantener el equilibrio existente antes de aplicada la sollicitación externa.

Cuando la carga exterior aplicada tiene una magnitud tal que supera a la resultante de los esfuerzos interiores de la masa de suelos, se romperá el equilibrio existente y se producirá lo que denominaremos, de aquí en adelante, Planos de Falla o de deslizamiento que no son otra cosa que planos en los cuales una masa de suelo tuvo un movimiento relativo respecto de otra.

El esfuerzo cortante de un suelo se define como el máximo esfuerzo cortante que una muestra de suelo puede soportar bajo determinadas condiciones, esto, a diferencia del esfuerzo cortante en la mayoría de los materiales estructurales, en el suelo factores como variación en el tamaño de los granos, junto con el grado de consolidación o la densidad, son factores determinantes en la resistencia al corte.

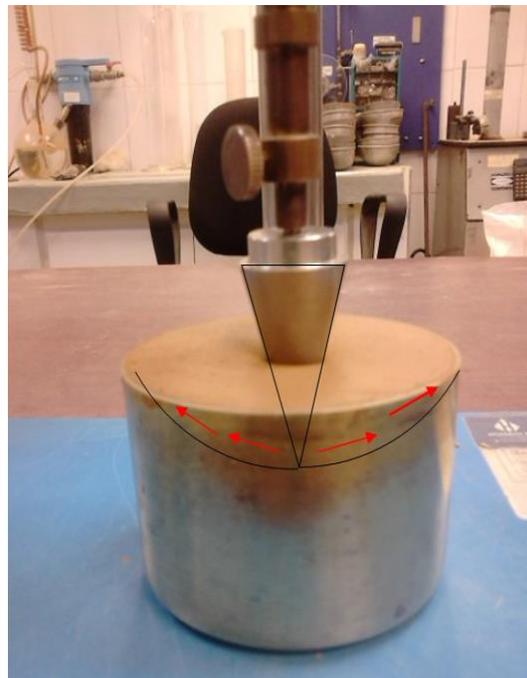
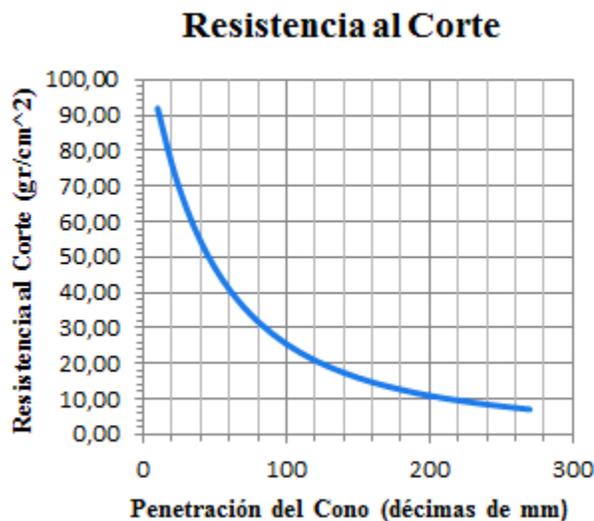


Figura 6: Ejemplo de la resistencia al corte mediante el Penetrómetro de Cono.

Fuente: Elaboración propia

Regresión

El objetivo de un análisis de regresión es investigar la relación estadística que existe entre una variable dependiente (Y) y una o más variables independientes (x_1, x_2, x_3, \dots). Para poder realizar esta investigación, se debe obtener una expresión matemática a partir del análisis de dos o más grupos de datos obtenidos por medición, ya bien sea en campo o en el laboratorio. Cada juego de datos conforma una variable en el modelo, denominándose dependiente o de pronóstico si va a ser estimada en base a otra u otras variables denominadas independientes, por cuanto generalmente son las que se obtienen por medición en el campo o en el laboratorio para poder estimar, en base a ellas, el valor de la variable dependiente, cuya medición directa puede implicar un alto costo para un determinado proyecto.

La expresión matemática de la ecuación de regresión puede ser del tipo lineal o de otro tipo, debido a su simplicidad analítica, la forma funcional que más se utiliza en la práctica es la relación lineal. Cuando solo existe una variable dependiente, esto se reduce a una línea recta.

El problema consiste en obtener estimaciones de estos coeficientes a partir de una muestra de observaciones sobre las variables (Y y X). En el análisis de regresión, estas estimaciones se obtienen por medio del método de mínimos cuadrados, aunque en la práctica el análisis se realiza por medio de computadoras.

Coefficiente de Correlación de Pearson (R)

Cuando hemos sido capaces de obtener la ecuación de regresión que sirva para ligar la variable dependiente con las variables independientes, resulta necesario e indispensable conocer cuan buena es la ecuación obtenida para pronosticar la variable dependiente. Este procedimiento de evaluación de la bondad de ajuste de la ecuación de regresión es lo que recibe el nombre de análisis de la correlación y conlleva al cálculo del Coeficiente R, cuyo valor determinara el grado de relación entre esas dos (2) variables, la bondad de ajuste del modelo de predicción y de la significación estadística que se asuma con la ocurrencia de

quien encargue la ecuación de regresión. Si la relación es lineal, decir perfecta, el valor del coeficiente de R, será [1.00].

En general, hay muchos casos en los que un coeficiente de correlación $R > 0.70$ puede ser suficiente para garantizar la bondad de ajuste del modelo, pues se ha empleado la prueba F de Fisher para evaluar la significación del referido coeficiente y se ha obtenido un valor de F lo suficientemente alto como para poder decir que la probabilidad de obtener valores menores a él sea cercano a cero.

Algunas ecuaciones de regresión que han sido obtenidas mediante la medición experimental de más de dos variables, llegándose al caso de ecuaciones de regresión obtenidas mediante la medición experimental de hasta cinco variables independientes, no resultan buenas para pronosticar el valor de la variable dependiente, pese a que su coeficiente de correlación R sea altamente significativo, por cuanto uno o más de los coeficientes que multiplican las variables, e incluso hasta el término independiente de la ecuación, podrían no aportar valor agregado a la ecuación y su inclusión solo contribuiría mayor inversión económica sin obtener valor agregado alguno.

El valor aceptable del coeficiente de correlación R, va a depender del tamaño de la muestra empleada, que hemos realizado en el cálculo y del nivel de seguridad con el que queramos extraer nuestras conclusiones, siendo este factor de importancia en cuanto a la exigencia requerida en cualquier proyecto.

Significación Estadística

Se refiere al área entre cada cola y depende si se trabaja por una cola o por las dos. Cuando se trata de problemas en los que ambas colas tienen una importancia determinada como es el caso de la medicina y la fabricación de fármacos se trabaja con las (2) dos colas.

En la ingeniería depende del caso, pues por ejemplo en la dosificación de mezclas de concreto si se utiliza poco cemento se obtienen resistencias bajas, y si por el contrario se utiliza mucho cemento se obtienen muestras que se agrietan al fraguar, y que además resultan costosas; en el caso de las mezclas asfálticas el porcentaje de vacíos totales en la mezcla no debe ser superior al 8% para que la muestra no resulte porosa e permeable, ni

menor del 2% para que la mezcla no vaya a resultar muy rígida e quebradiza. En el caso de los suelos caso (CBR), la densidad de campo no debe ser menor del 94% con respecto a la densidad máxima seca del laboratorio para que el suelo resulte resistente y no debe ser mayor del 99% de la densidad máxima seca del laboratorio, para que el suelo arcilloso no resulte expansivo.

En los casos convencionales la significación estadística deseada la cual se exige que sea como máximo 5%, lo que equivale a (0,05): en los casos más críticos se emplea el 2,5%, equivalente a (0,025) de manera de garantizar que todos los valores que se obtengan de la ecuación de correlación y de los ensayos correspondan al rango determinado por ambos valores límites descritos anteriormente.

Análisis de la Varianza

El Análisis de la Varianza tiene por objeto determinar donde residen las fuentes de la varianza en un determinado proceso de medición. Ello significa que quien trabaja con data obtenida en el campo o en el laboratorio debe ser capaz de determinar, sin duda razonable, si la varianza que muestra dicho proceso proviene del error humano, del equipo empleado para la medición o si es atribuible al azar.

Cuando se trata de explicar cómo funciona el Análisis de la Varianza es necesario saber el significado de “Grado de Libertad”, ya que es en base a este concepto que serán analizadas las fuentes de la varianza en el caso de analizar un conjunto de resultados de mediciones realizadas en cada una de las variables (dependientes e independientes).

Por tal motivo, cuando se utiliza la técnica del Análisis de la Varianza (ANOVA), la fuente de la varianza atribuible a la regresión, el número de grados de libertad es $GLR = NVI$, siendo GLR el número de grados de libertad de la regresión y NVI el número de variables independientes.

Es por eso que la ecuación de regresión permite estimar los valores puntuales que registra la variable dependiente para cada valor medido en el laboratorio o en obra para cada una las variables independientes, y en consecuencia tal estimación está sujeta a un “residuo” que corresponde a la diferencia entre el valor estimado y el valor medido.

Entonces habrá tantos “residuos” como mediciones se hayan realizado durante el desarrollo del experimento.

Pruebas de Hipótesis

Prueba t-Student

Se aplica para verificar la significación estadística de la variable predictora y el término independiente, aplicando la hipótesis nula de que no existe correlación entre las variables, es decir, que los coeficientes de las variables son iguales a cero, si se verifica que el valor de t -Student calculado para cada variable es mayor que el valor fijo con n-2 grados de libertad y con el nivel de significación esperado, la hipótesis nula deberá ser rechazada, concluyéndose que todas las variables son importantes en el modelo.

Prueba F de Fisher

Esta prueba es utilizada para evaluar el coeficiente de correlación obtenido en el análisis de regresión, que es considerado SIGNIFICATIVO. El estadístico F resulta de suma utilidad para poder comprobar el aporte de las variables independientes a la estimación del valor de la variable dependiente con la ecuación de regresión, pues nos permite medir con una significación estadística cuantificable, mediante el uso del valor del coeficiente de correlación R, el porcentaje de aporte de las referidas variables independiente a la estimación de la variable dependiente. Así, cuando se dice que el valor de R es 0,76 para un nivel de significación del 5%, ello quiere decir que las variables independientes consideradas aportan el 76% de la estimada variable dependiente.

Si el estadístico F excede el valor crítico f por tabla estadística (GEIGY o similar) o por la HOJA EXCEL, se concluye que existe una cantidad significativa de variación de la respuesta contabilizada por el modelo en función de la línea recta. Si sucede lo contrario, se concluye que los datos no reflejan evidencia suficiente para respaldar el modelo de regresión lineal.

Prueba de Durbin– Watson (DW)

El estadístico Durbin Watson, generado por el conocido economista Watson en el año 1951, es una estadística de prueba que se utiliza para detectar la presencia de autocorrelación, es decir, una relación entre los valores separados el uno del otro por un intervalo de tiempo dado; proporciona buena información sobre el grado de independencia que existe entre los residuos o errores de predicción de un análisis de regresión, este puede oscilar entre 0 y 4, dependiendo del tamaño de la muestra y del número de variables independientes. El estadístico DW toma el valor 2 cuando las variables son completamente independientes. Los valores menores que 2 indican autocorrelación positiva y los mayores que 2 autocorrelación negativa. Es posible decir que los residuos son independientes; es decir que no están auto correlacionados cuando el estadístico DW está comprendido entre 1,5 y 2,5.

Requisitos para realizar un análisis de regresión en forma confiable

Cuando se trabaja con data proveniente de muestras de tamaño pequeño y cuya desviación estándar es desconocida, resulta imprescindible verificar si la distribución de los valores correspondientes a dicha data responde a un modelo NORMAL (Distribución de Gauss). Para ello se recurre a la Prueba Kolmogorov-Smirnov para muestras cuyo tamaño N es menor de 35 y se aplica el criterio de Lilliefords para desviación estándar desconocida. Mientras que en el caso de conocer la desviación estándar, el criterio a utilizar en la prueba de normalidad es el de Massey. Sin embargo, este criterio El criterio debe ser empleado solamente cuando se está seguro de que se trata de un proceso bien conocido.

La Prueba Kolmogorov-Smirnov, consiste en verificar gráficamente como se adapta la data de laboratorio o de campo a la distribución normal acumulativa representada con el papel probabilístico. En el referido papel, se dibujan hipérbolas de confianza y de tolerancia para un valor de probabilidad $P/2= 0,05$ y $0,01$ respectivamente, y la curva representativa de la distribución normal acumulativa está representada por una línea recta.

A continuación se muestran algunos requisitos indispensables para realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov:

- 1) La prueba debe ser realizada en todas las variables a ser estudiadas, especialmente en el caso de las regresiones múltiples de más de dos variables
.
- 2) Es preciso realizar un ensayo para determinar la homocedasticidad (igualdad de varianzas), de todas y cada una de las variables, por cuanto una correlación confiable exige que todas las variables sean homocedasticas. Esta constatación, indispensable, no se hace en muchos trabajos que se presentan a la consideración de jurados calificados en las universidades, y por tal motivo no le confieren a las ecuaciones de regresión logradas la calidad que se espera de ellas.
- 3) No basta con analizar el valor absoluto obtenido por el método de Mínimos Cuadrados, por cuanto el valor adecuado depende del tamaño de la muestra utilizada. El análisis debe ser realizado para una significación estadística no mayor del 5% en los trabajos de Ingeniería Civil. (El análisis se hace utilizando la prueba F de Fisher). En el caso de obras riesgosas como represas de tierra se emplea el valor $p = 0,025$ en vez de $p = 0,05$. En la industria farmacéutica se emplea $p = 0,001$ por estar comprometida la salud y la vida.
- 4) Resulta necesario verificar la bondad de ajuste de la ecuación obtenida, al utilizar cualquier paquete estadístico inclusive el Excel. Esto conlleva al análisis de significación de los coeficientes de cada una de las variables y del término independiente, empleando para ello la prueba t-Student (Gossen).
- 5) Sin haber verificado el cumplimiento de todos y cada uno de los anteriores requisitos, no es posible garantizar que la ecuación de regresión obtenida resulte significativa; por ello algunos trabajos de investigación realizados por aspirantes a obtener el título de Ingeniero Civil, no podrían ser sometidos a la consideración de una comisión de arbitraje.

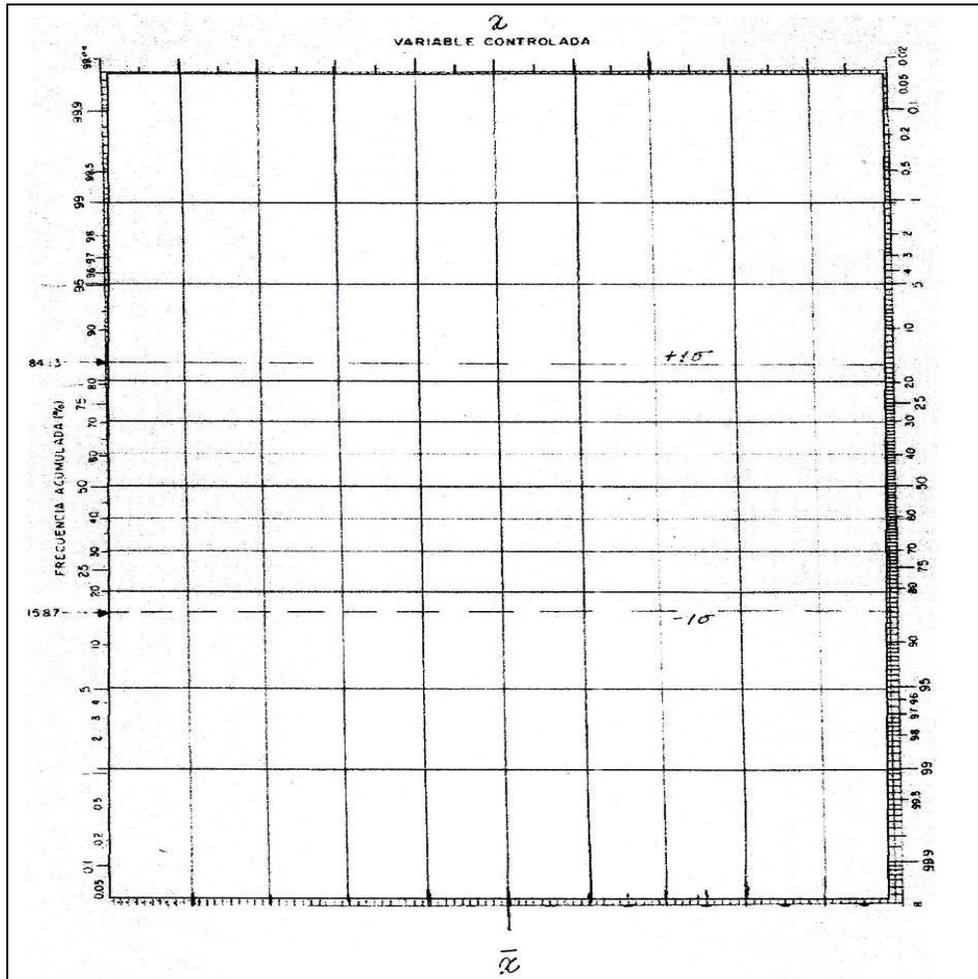


Gráfico5: Papel Probabilístico Normal.

Fuente: Buscador Google de Internet “Papel Probabilístico Normal”.

Tabla 5 :Significación del valor D_{max} de la prueba de Kolmogorov.

Fuente: Centeno W, Roberto., (1982)

Tamaño de la muestra n	σ Conocido		σ Desconocido	
	Massey		Lilliefors	
	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
1	0.975	0.995	—	—
2	0.842	0.929	—	—
3	0.708	0.828	—	—
4	0.624	0.733	0.381	0.417
5	0.565	0.669	0.337	0.405
6	0.521	0.618	0.319	0.364
7	0.486	0.577	0.300	0.348
8	0.457	0.543	0.285	0.331
9	0.432	0.514	0.271	0.311
10	0.410	0.490	0.258	0.294
11	0.391	0.468	0.249	0.284
12	0.375	0.450	0.242	0.275
13	0.361	0.433	0.234	0.268
14	0.349	0.418	0.227	0.261
15	0.338	0.404	0.220	0.257
16	0.328	0.392	0.213	0.250
17	0.318	0.381	0.206	0.245
18	0.309	0.371	0.200	0.239
19	0.301	0.363	0.195	0.235
20	0.294	0.356	0.190	0.231
25	0.27	0.32	0.180	0.203
30	0.24	0.29	0.161	0.187
35	0.23	0.27	—	—
sup. a 35	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$	$\frac{0.886}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.031}{\sqrt{n}}$

Nota: El valor de D_{max} que muestra la tabla debe ser multiplicado por 100 para poder introducirlo en la ordenada del gráfico (Gráfico 5) de Kolmogorov-Smirnov, por cuanto si se observa dicha ordenada, los valores vienen expresados en porcentaje.

Podrá observarse al analizar la tabla de los valores de D_{max} , que en el caso de aplicar el criterio de Massey el valor de D_{max} , es mayor que el correspondiente al criterio Lilliefors, lo cual se explica por el simple hecho de que al ser conocida la desviación estándar el área entre las curvas límites en el gráfico dibujado en papel probabilístico es mayor y caben más puntos del ensayo entre dichas líneas de control.

En el caso de la aplicación del criterio de Lilliefors, para desviación estándar desconocida, el área entre las curvas límites es inferior que en el caso del criterio de Massey, por cuanto al no estar seguros del valor de la desviación estándar es necesario limitar el área de aceptación para no incurrir en errores de decisión.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Este será un Trabajo Especial de Grado, donde se va a utilizar la metodología de diseño experimental, cuantitativo y correlacional ya que los datos necesarios para el desarrollo del mismo se obtienen mediante la ejecución de distintos ensayos de laboratorio (experimentos), basándose en al menos una variable manipulada, y las unidades son aleatoriamente asignadas a los distintos niveles o categorías de las variables manipuladoras. (Pedhazur, 1991). Una investigación experimental se caracteriza en lo siguiente:

1. Manipulación: es la intervención deliberada del investigador para provocar cambios en la variable dependiente.
2. Aleatorización: mayor tamaño de los efectos frente a la equiparación.

❖ **Ventajas del diseño experimental:**

- Se elimina el efecto de las variables perturbadoras o extrañas, mediante el efecto de la aleatorización.
- El control y manipulación de las variables predictoras clasifican la dirección y naturaleza de la causa.
- Flexibilidad, eficiencia, simetría y manipulación estadística.

La investigación correlacional, persigue medir el grado de relación entre dos o más variables, en este caso se tratan de relacionar el límite líquido obtenido por el ensayo de la Copa de Casagrande y la resistencia al corte obtenida con el Mini Cono de Laboratorio.

Para el desarrollo de este estudio se escogieron distintas muestras de suelos correspondientes de la obra de la Autopista Rómulo Betancourt, ubicada en la ciudad de Guarenas del estado Miranda; y otras muestras de suelos provenientes de la ciudad Valle de la Pascua del estado Guárico.

Combinaciones realizadas en (gr) para la preparación de las muestras prefabricadas en el laboratorio

Tabla 6: Combinaciones para muestras ensayadas con el recipiente pequeño de bronce, para ensayo Mini Cono de Laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Pasante N° 200		Pasante N° 40	
(gr)	(%)	(gr)	(%)
200	100	0	0
180	90	20	10
160	80	40	20
140	70	60	30
120	60	80	40
100	50	100	50

Tabla 7: Combinaciones para muestras ensayadas con el recipiente grande de bronce, para ensayo Mini Cono de Laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Pasante N° 200		Pasante N° 40	
(gr)	(%)	(gr)	(%)
350	100	0	0
315	90	35	10
280	80	70	20

Sitios provenientes de las muestras preparadas en el laboratorio:

Obra: Autopista Rómulo Betancourt

Ubicación:

- ✓ Terrazas Auyarito, Guarenas – estado Miranda
- ✓ Terrazas Detrás de Vallero, Guarenas – estado Miranda
- ✓ Terrazas Vaquera, Guarenas – estado Miranda
- ✓ Terrazas Reunión, Guarenas – estado Miranda
- ✓ Material de Préstamo, Guarenas – estado Miranda

Obra: Valle de la Pascua

Ubicación: Estado Guárico

Para las distintas combinaciones, la preparación de la mezcla para los (3) tres componentes: arcilla, limo y arena fina limpia, se tiene que fueron previamente preparadas en el laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados. S.C., en diferentes proporciones; se empleará para realizar el análisis de toda la información obtenida a partir de los ensayos en el programa estadístico experimental SYSTAT versión 11, para ver el comportamiento del análisis estadístico entre la variable dependiente vs la(s) variables independientes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LABORATORIO

Resultados de los ensayos con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio para la muestra de tamaño 40

Tabla 8: Resumen de muestras ensayadas con el equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio, cono ensamblado con sobrecarga de 100,11 gr. (Muestra de tamaño 40)

Fuente: Elaboración propia.

N° Muestra	Sitio de Origen Ubicación	% Mezcla Pasante N° 200	% Mezcla Pasante N° 40	Casagrande			Clasificación Sistema Unificado	Cono (Peso 100,11 gr)			
				Límite Líquido LL (%)	Límite Plástico LP (%)	Índice Plástico IP (%)		Penetración Taza Pequeña (0,1 mm)	Penetración (cm)	w(%)	σ (g/cm ²)
1	Terrazas Auyarito	100	0	47,5	32,8	14,7	ML-OL	200	2,00	48,23	28,72
2		90	10	47,1	29,6	17,6		182	1,82	47,49	34,73
3		80	20	45,0	33,0	12,0		179	1,79	45,09	35,88
4		70	30	43,3	27,0	16,3		167	1,67	43,30	41,29
5		60	40	41,1	27,8	13,3		184	1,84	41,44	34,01
6		50	50	39,9	25,5	14,4		182	1,82	40,54	34,73
7		0	100	37,4	23,7	13,7		182	1,82	36,04	34,73
8	Terrazas Detrás de Vallero	100	0	35,3	23,6	11,7	CL-ML	179	1,79	35,22	35,88
9		90	10	34,2	22,1	12,1		197	1,97	34,53	29,65
10		80	20	34,1	21,2	12,9		198	1,98	34,55	29,34
11		70	30	32,6	19,4	13,1		178	1,78	32,82	36,31
12		60	40	32,5	23,2	9,3		195	1,95	32,93	30,27
13		50	50	31,7	21,7	10,1		186	1,86	31,80	33,28
14		0	100	28,1	17,5	10,6		187	1,87	28,74	32,91
15	Terrazas Vaquera	100	0	29,4	21,5	7,8	CL-ML	159	1,59	28,84	45,49
16		90	10	29,8	20,1	9,7		189	1,89	30,55	32,19
17		80	20	30,0	20,0	9,9		188	1,88	30,39	32,55
18		70	30	29,3	19,1	10,2		186	1,86	29,54	33,28
19		60	40	30,2	19,1	11,1		182	1,82	30,26	34,73
20		50	50	30,7	17,5	13,2		172	1,72	30,58	38,89
21	Terrazas Reunión	100	0	35,6	20,6	15,0	CL-ML	204	2,04	33,72	27,66
22		90	10	36,3	23,2	13,1		196	1,96	37,32	29,96
23		80	20	38,0	23,3	14,7		195	1,95	38,33	30,27
24		70	30	36,5	22,5	14,0		191	1,91	37,17	31,51
25		60	40	35,0	22,5	12,6		187	1,87	35,02	32,91
26		50	50	38,8	22,6	16,2		184	1,84	38,54	34,01
27		0	100	27,5	20,6	6,9		179	1,79	27,77	35,88
28	Material De Préstamo	100	0	36,9	22,7	14,2	CL-ML	181	1,81	35,32	35,09
29		90	10	35,7	20,8	14,9		192	1,92	37,37	31,2
30		80	20	36,4	22,1	14,3		181	1,81	36,11	35,09
31		70	30	37,7	23,6	14,0		191	1,91	37,66	31,51
32		60	40	37,4	23,1	14,3		186	1,86	37,74	33,28
33		50	50	37,4	22,1	15,3		171	1,71	34,80	39,32
34		0	100	35,0	19,7	15,3		189	1,89	34,30	32,19
35	Valle De La Pascua VP2	100	0	49,8	23,8	26,0	CL	199	1,99	48,94	29,03
36		90	10	48,6	23,8	24,8		197	1,97	49,93	29,65
37		80	20	47,4	21,4	26,0		195	1,95	46,42	30,27
38		70	30	46,8	26,1	20,8		193	1,93	46,80	30,89
39		60	40	44,9	24,0	20,9		190	1,90	45,41	31,82
40		50	50	47,9	22,9	25,0		180	1,80	47,61	35,45

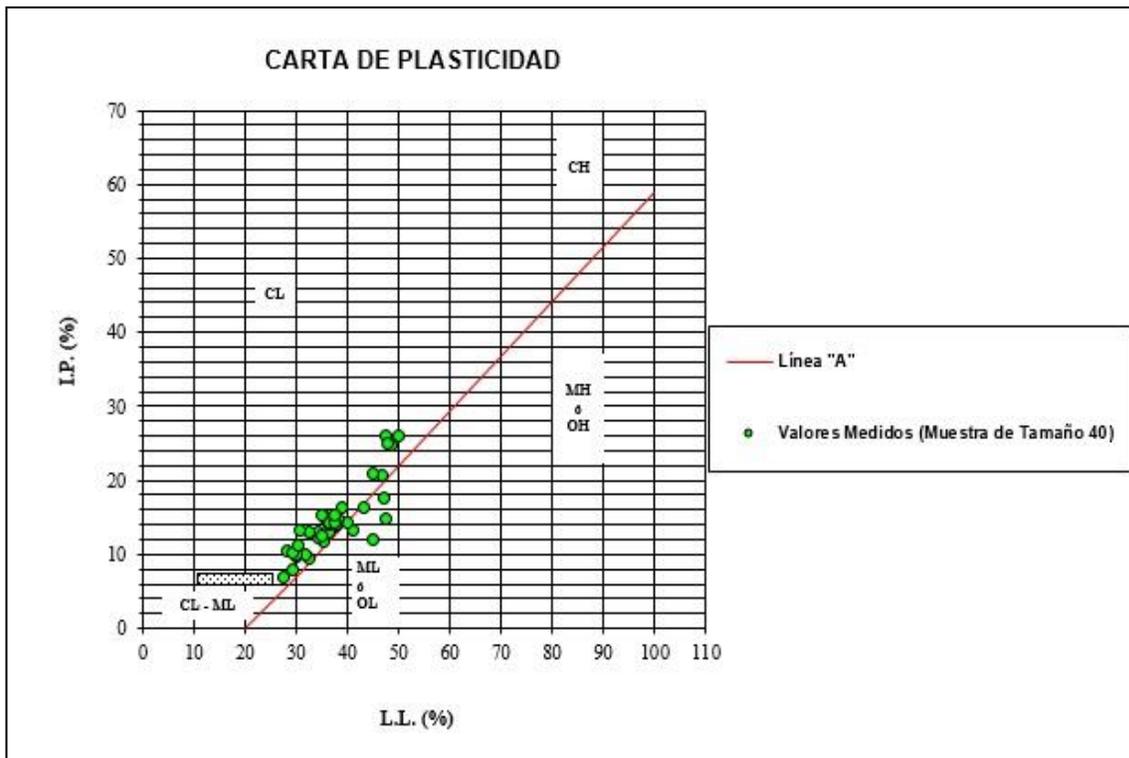


Gráfico 6: Conjunto de muestras analizadas dentro de la Carta de Plasticidad (Muestra de tamaño 40)

Fuente: Elaboración propia

Resultados de los ensayos con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio para la muestra de tamaño 8

Tabla 9: Resumen de muestras ensayadas con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio “Ensayo Controlado” (humedad relativa constante), para muestras seleccionadas a ser ensayadas con el cono ensamblado con sobrecarga de 80,13 gr.

Fuente: Elaboración propia.

Taza	Muestra	Sitio de Origen	% Mezcla Pasante N° 200	% Mezcla Pasante N° 40	Casagrande			Cono			
					Límite Líquido LL (%)	Límite Plástico LP (%)	Índice Plástico IP (%)	Penetración (0,1 mm)	Penetración (cm)	w(%)	σ (g/cm ²)
Pequeña	1	Terrazas	0	100	37,4	23,7	13,7	169	1,69	36,64	32,23
Grande	2		Auyarito	0	100	37,4	23,7	13,7	182	1,82	36,04
Pequeña	3	Detrás de Vallero	0	100	28,1	17,5	10,6	154	1,54	28,12	38,89
Grande	4		Vallero	0	100	28,1	17,5	10,6	158	1,58	27,67
Pequeña	5	Terrazas	0	100	27,51	20,6	6,9	145	1,45	27,34	43,89
Grande	6		Reunión	0	100	27,51	20,6	6,9	163	1,63	28,51
Pequeña	7	Material de Préstamo	0	100	34,95	19,7	15,3	156	1,56	33,63	37,90
Grande	8		Préstamo	0	100	34,95	19,7	15,3	184	1,84	34,42

Resultados de los ensayos con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio para la muestra de tamaño 20

Tabla 10: Resumen de muestras ensayadas con equipo de Casagrande y Mini Cono de Laboratorio “Ensayo Controlado” (humedad relativa constante), para muestras seleccionadas a ser ensayadas con el cono ensamblado con sobrecarga de 100,11 gr.

Fuente: Elaboración propia.

Taza	Muestra	Sitio de Origen	% Mezcla Pasante N° 200	% Mezcla Pasante N° 40	Casagrande			Cono				
					Límite Líquido LL (%)	Límite Plástico LP (%)	Índice Plástico IP (%)	Penetración (0,1 mm)	Penetración (cm)	w(%)	σ (g/cm ²)	
Pequeña	1	Terrazas Auyarito	100	0	49,7	31,1	18,6	190	1,90	49,70	31,82	
	2		90	10	49,7	31,7	18,0	188	1,88	50,20	32,55	
	3		80	20	50,7	30,3	20,4	178	1,78	50,11	36,31	
	4		0	100	37,4	23,7	13,7	182	1,82	36,04	34,73	
Grande	5		100	0	49,7	31,1	18,6	202	2,02	48,88	28,19	
	6		90	10	49,7	31,7	18,0	197	1,97	48,73	29,65	
	7		80	20	50,7	30,3	20,4	183	1,83	50,56	34,37	
	8		0	100	37,4	23,7	13,7	206	2,06	37,20	27,12	
Pequeña	9	Detrás de Vallero	100	0	34,5	22,0	12,5	180	1,80	34,71	35,45	
	10		90	10	35,1	22,0	13,1	166	1,66	34,78	41,8	
	11		80	20	34,1	21,2	12,9	165	1,65	34,47	42,31	
	12		0	100	28,1	17,5	10,6	187	1,87	28,74	32,91	
Grande	13		100	0	34,5	22,0	12,5	195	1,95	34,94	30,27	
	14		90	10	35,1	22,0	13,1	173	1,73	35,79	38,46	
	15		80	20	34,1	21,2	12,9	171	1,71	33,58	39,32	
	16		0	100	28,1	17,51	10,59	188	1,88	27,74	32,55	
Pequeña	17		Terrazas Reunión	0	100	27,51	20,6	6,9	179	1,79	27,77	35,88
Grande	18			0	100	27,51	20,6	6,9	181	1,81	28,48	35,09
Pequeña	19		Material de Préstamo	0	100	34,95	19,7	15,3	189	1,89	34,30	32,19
Grande	20			0	100	34,95	19,7	15,3	206	2,06	34,81	27,12

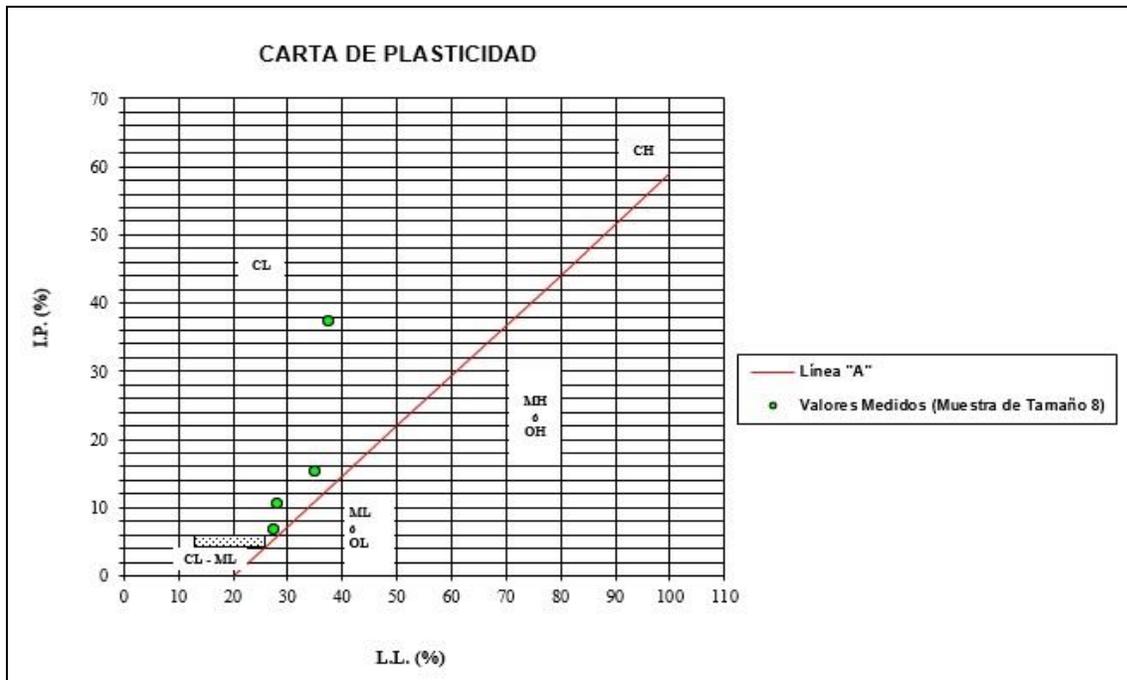


Gráfico 7: Conjunto de muestras analizadas dentro de la Carta de Plasticidad (Muestra de tamaño 8)
Fuente: Elaboración propia

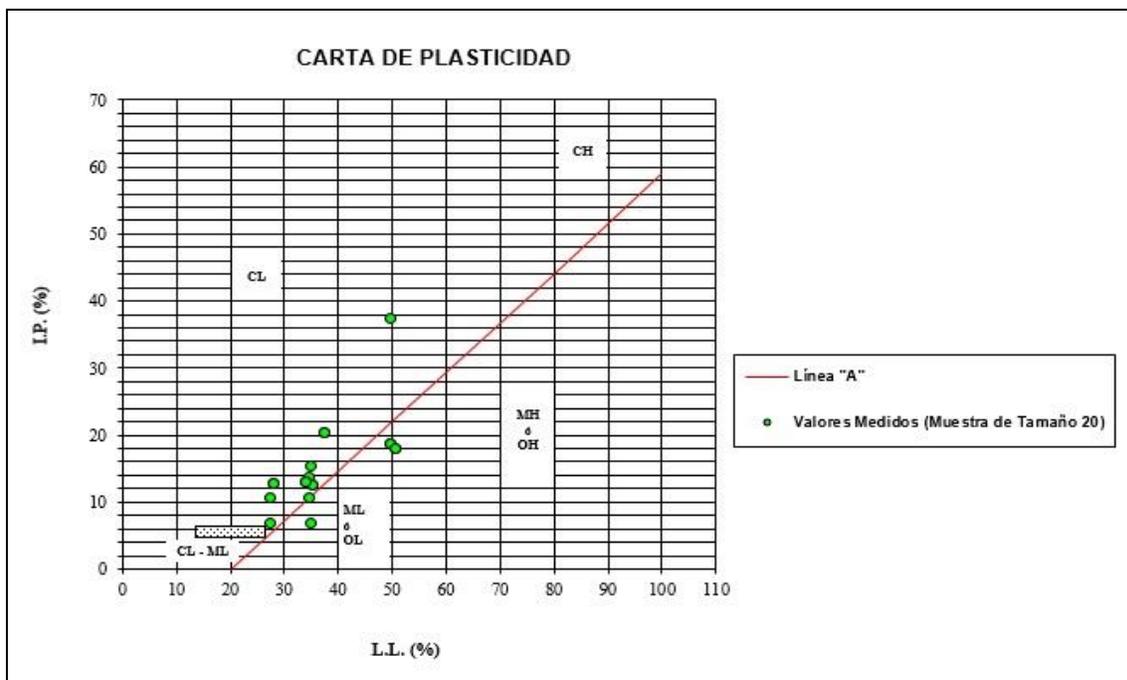


Gráfico 8: Conjunto de muestras analizadas dentro de la Carta de Plasticidad (Muestra de tamaño 20)
Fuente: Elaboración propia

Resumen general de las muestras ensayadas en el Laboratorio

Muestra: Terrazas de Auyarito

Tabla 11: Resultados generales Terrazas de Auyarito

Fuente: Elaboración propia.

Sitio de Origen Ubicación		Terrazas Auyarito	
Tipo de Muestra		Preparada en Laboratorio	
Clasificación Sistema Unificado		ML - OL	
Índice de Plasticidad			
No Plástico	Ligeramente Plástico	Baja Plasticidad	Alta Plasticidad
0 - 3	3 - 15	15 - 30	> 30
Índice de Plasticidad		12 - 20,4	
Límite Líquido		37,4 - 50,7	
Penetración con el Cono (0,1 mm)		167 - 200	
Resistencia al Corte (gr/cm ²)		28,72 - 41,29	

Muestra: Terrazas Detrás de Vallero

Tabla 12: Resultados generales Terrazas Detrás de Vallero

Fuente: Elaboración propia.

Sitio de Origen Ubicación		Terrazas Detrás de Vallero	
Tipo de Muestra		Preparada en Laboratorio	
Clasificación Sistema Unificado		CL - ML	
Índice de Plasticidad			
No Plástico	Ligeramente Plástico	Baja Plasticidad	Alta Plasticidad
0 - 3	3 - 15	15 - 30	> 30
Índice de Plasticidad		9,3 - 13,1	
Límite Líquido		28,1 - 35,3	
Penetración con el Cono (0,1 mm)		154 - 198	
Resistencia al Corte (gr/cm ²)		29,34 - 42,31	

Muestra: Terrazas Vaquera

Tabla 13: Resultados generales Terrazas Vaquera

Fuente: Elaboración propia.

Sitio de Origen Ubicación		Terrazas Vaquera	
Tipo de Muestra		Preparada en Laboratorio	
Clasificación Sistema Unificado		CL - ML	
Índice de Plasticidad			
No Plástico	Ligeramente Plástico	Baja Plasticidad	Alta Plasticidad
0 - 3	3 - 15	15 - 30	> 30
Índice de Plasticidad		7,8 - 13,2	
Límite Líquido		29,3 - 30,7	
Penetración con el Cono (0,1 mm)		159 - 189	
Resistencia al Corte (gr/cm ²)		32,19 - 45,49	

Muestra: Terrazas Reunión

Tabla 14: Resultados generales Terrazas Reunión

Fuente: Elaboración propia.

Sitio de Origen Ubicación		Terrazas Reunión	
Tipo de Muestra		Preparada en Laboratorio	
Clasificación Sistema Unificado		CL - ML	
Índice de Plasticidad			
No Plástico	Ligeramente Plástico	Baja Plasticidad	Alta Plasticidad
0 - 3	3 - 15	15 - 30	> 30
Índice de Plasticidad		6,9 - 16,2	
Límite Líquido		27,5 - 38,8	
Penetración con el Cono (0,1 mm)		145 - 204	
Resistencia al Corte (gr/cm ²)		27,66 - 43,89	

Muestra: Material de Préstamo

Tabla 15: Resultados generales Material de Préstamo

Fuente: Elaboración propia.

Sitio de Origen Ubicación		Material de Préstamo	
Tipo de Muestra		Preparada en Laboratorio	
Clasificación Sistema Unificado		CL - ML	
Índice de Plasticidad			
No Plástico	Ligeramente Plástico	Baja Plasticidad	Alta Plasticidad
0 - 3	3 - 15	15 - 30	> 30
Índice de Plasticidad		14 - 15,3	
Límite Líquido		34,95 - 37,7	
Penetración con el Cono (0,1 mm)		156 - 192	
Resistencia al Corte (gr/cm ²)		31,2 - 39,32	

Muestra: Valle de la Pascua VP2

Tabla 16: Resultados generales Valle de la Pascua VP2

Fuente: Elaboración propia.

Sitio de Origen Ubicación		Valle de la Pascua VP2	
Tipo de Muestra		Preparada en Laboratorio	
Clasificación Sistema Unificado		CL	
Índice de Plasticidad			
No Plástico	Ligeramente Plástico	Baja Plasticidad	Alta Plasticidad
0 - 3	3 - 15	15 - 30	> 30
Índice de Plasticidad		20,8 - 26	
Límite Líquido		44,9 - 49,8	
Penetración con el Cono (0,1 mm)		180 - 199	
Resistencia al Corte (gr/cm ²)		29,03 - 35,45	

Resumen de los resultados de los ensayos (muestra de tamaño 40)

Tabla 17: Síntesis de los resultados

Fuente: Elaboración propia.

N° Muestra	Límite Líquido LL (%)	σ (g/cm ²)
1	47,5	28,72
2	47,1	34,73
3	45,0	35,88
4	43,3	41,29
5	41,1	34,01
6	39,9	34,73
7	37,4	34,73
8	35,3	35,88
9	34,2	29,65
10	34,1	29,34
11	32,6	36,31
12	32,5	30,27
13	31,7	33,28
14	28,1	32,91
15	29,4	45,49
16	29,8	32,19
17	30,0	32,55
18	29,3	33,28
19	30,2	34,73
20	30,7	38,89
21	35,6	27,66
22	36,3	29,96
23	38,0	30,27
24	36,5	31,51
25	35,0	32,91
26	38,8	34,01
27	27,5	35,88
28	36,9	35,09
29	35,7	31,2
30	36,4	35,09
31	37,7	31,51
32	37,4	33,28
33	37,4	39,32
34	35,0	32,19
35	49,8	29,03
36	48,6	29,65
37	47,4	30,27
38	46,8	30,89
39	44,9	31,82
40	47,9	35,45

Resumen de los resultados de los ensayos (muestra de tamaño 8)

Tabla 18: Síntesis de los resultados, ensayo controlado con cono ensamblado de 80,13 gr
Fuente: Elaboración propia

Taza	Nº Muestra	Límite Líquido LL (%)	σ (g/cm ²)
Pequeña	1	37,4	32,23
Grande	2	37,4	27,80
Pequeña	3	28,1	38,89
Grande	4	28,1	36,91
Pequeña	5	27,51	43,89
Grande	6	27,51	34,69
Pequeña	7	34,95	37,90
Grande	8	34,95	27,22

Resumen de los resultados de los ensayos (muestra de tamaño 20)

Tabla 19: Síntesis de los resultados, ensayo controlado con cono ensamblado de 100,11 gr
Fuente: Elaboración propia

Taza	Nº Muestra	Límite Líquido LL (%)	σ (g/cm ²)
Pequeña	1	49,7	31,82
	2	49,7	32,55
	3	50,7	36,31
	4	37,4	34,73
Grande	5	49,7	28,19
	6	49,7	29,65
	7	50,7	34,37
	8	37,4	27,12
Pequeña	9	34,5	35,45
	10	35,1	41,8
	11	34,1	42,31
	12	28,1	32,91
Grande	13	34,5	30,27
	14	35,1	38,46
	15	34,1	39,32
	16	28,1	32,55
Pequeña	17	27,51	35,88
Grande	18	27,51	35,09
Pequeña	19	34,95	32,19
Grande	20	34,95	27,12

Resumen: Análisis Estadístico de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200 (Muestra tamaño 40)

Tabla 20: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	40
Coefficiente de Correlación R	0,262
Coefficiente de Determinación R ²	0,068
Coefficiente de Determinación corregido	0,018
Error típico de estimación	3.559
Grados de Libertad de la Regresión	2
Grados de Libertad de los Residuos	37
Coefficiente de la Constante	37.073
Valor t de la constante	9.785
P para dos (2) colas	0,000
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Límite Líquido)	-0,112
(Mezcla pasante #40)	0,016
(Mezcla pasante #200)	-
Valor de t:	
(Límite Líquido)	-1,199
(Mezcla pasante #40)	0,736
(Mezcla pasante #200)	-
Valor P para dos (2) colas:	
(Límite Líquido)	0,238
(Mezcla pasante #40)	0,466
(Mezcla pasante #200)	-
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	34.432
Grados de Libertad	2
Cuadrados Medios	17.216
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	468.563
Grados de Libertad	37
Cuadrados Medios	12.664
Relación de F	1.359
Valor de P	0,269
Valor del Estadístico Durbin Watson	2.004

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 7* y la *Tabla 21*.

Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido (Muestra de tamaño 40)

Tabla 21: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	40
Coefficiente de Correlación R	0,234
Coefficiente de Determinación R ²	0,055
Coefficiente de Determinación corregido	0,030
Error típico de estimación	3.537
Grados de Libertad de la Regresión	1
Grados de Libertad de los Residuos	38
Coefficiente de la Constante	38.324
Valor t de la constante	11.385
P para dos (2) colas	0,000
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Límite Líquido)	-0,132
Valor de t:	
(Límite Líquido)	-1,484
Valor P para dos (2) colas:	
(Límite Líquido)	0,146
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	27.568
Grados de Libertad	1
Cuadrados Medios	27.568
Intervalo de Confianza	[-0.31 , 0.046]
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	475.426
Grados de Libertad	38
Cuadrados Medios	12.511
Relación de F	2.203
Valor de P	0,146
Valor del Estadístico Durbin Watson	1.881

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 8, Tabla 23 y el Gráfico 9.*

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 40)

Tabla 22: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	40
Coefficiente de Correlación R	0,234
Coefficiente de Determinación R ²	0,055
Coefficiente de Determinación corregido	0,030
Error típico de estimación	6.297
Grados de Libertad de la Regresión	1
Grados de Libertad de los Residuos	38
Coefficiente de la Constante	51.389
Valor t de la constante	5.450
P para dos (2) colas	0,000
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-0,417
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-1,484
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,146
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	87.378
Grados de Libertad	1
Cuadrados Medios	87.378
Intervalo de Confianza	[-0.979 , 0.145]
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	1.506.866
Grados de Libertad	38
Cuadrados Medios	39.654
Relación de F	2.203
Valor de P	0,146
Valor del Estadístico Durbin Watson	0,420

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 9, Tabla 25 y el Gráfico 10.*

**Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40,
Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 20)**

Tabla 23: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	20
Coefficiente de Correlación R	0,760
Coefficiente de Determinación R ²	0,577
Coefficiente de Determinación corregido	0,498
Error típico de estimación	6.030
Grados de Libertad de la Regresión	3
Grados de Libertad de los Residuos	16
Coefficiente de la Constante	79.849
Valor t de la constante	3.949
P para dos (2) colas	0,001
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-1,022
(Mezcla pasante #40)	-
(Mezcla pasante #200)	0,137
(Diámetro de la Taza)	-0,230
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-2,861
(Mezcla pasante #40)	-
(Mezcla pasante #200)	4.343
(Diámetro de la Taza)	-1,170
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,011
(Mezcla pasante #40)	-
(Mezcla pasante #200)	0,001
(Diámetro de la Taza)	0,259
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	794.948
Grados de Libertad	3
Cuadrados Medios	264.983
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	581.738
Grados de Libertad	16
Cuadrados Medios	36.359
Relación de F	7.288
Valor de P	0,003
Valor del Estadístico Durbin Watson	1.080

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 10* y la *Tabla 27*.

**Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40,
Mezcla Pasante # 200 (Muestra de tamaño 20)**

Tabla 24: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	20
Coeficiente de Correlación R	0,736
Coeficiente de Determinación R ²	0,541
Coeficiente de Determinación corregido	0,487
Error típico de estimación	6.095
Grados de Libertad de la Regresión	2
Grados de Libertad de los Residuos	17
Coeficiente de la Constante	59.882
Valor t de la constante	5.468
P para dos (2) colas	0,000
Coeficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-0,851
(Mezcla pasante #40)	-
(Mezcla pasante #200)	0,133
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-2,584
(Mezcla pasante #40)	-
(Mezcla pasante #200)	4.193
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,019
(Mezcla pasante #40)	-
(Mezcla pasante #200)	0,001
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	745.207
Grados de Libertad	2
Cuadrados Medios	372.603
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	631.479
Grados de Libertad	17
Cuadrados Medios	37.146
Relación de F	10.031
Valor de P	0,001
Valor del Estadístico Durbin Watson	0,919

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 11* y la *Tabla 29*.

**Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 200
(Muestra de tamaño 20)**

Tabla 25: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	20
Coefficiente de Correlación R	0,736
Coefficiente de Determinación R ²	0,542
Coefficiente de Determinación corregido	0,488
Error típico de estimación	6.093
Grados de Libertad de la Regresión	2
Grados de Libertad de los Residuos	17
Coefficiente de la Constante	59.892
Valor t de la constante	5.472
P para dos (2) colas	0,000
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-0,851
(Mezcla pasante #200)	0,133
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-2,586
(Mezcla pasante #200)	4.195
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,019
(Mezcla pasante #200)	0,001
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	745.593
Grados de Libertad	2
Cuadrados Medios	372.797
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	631.093
Grados de Libertad	17
Cuadrados Medios	37.123
Relación de F	10.042
Valor de P	0,001
Valor del Estadístico Durbin Watson	0,919

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 12* y la *Tabla 31*.

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 20)

Tabla 26: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	20
Coefficiente de Correlación R	0,259
Coefficiente de Determinación R ²	0,067
Coefficiente de Determinación corregido	0,015
Error típico de estimación	8.448
Grados de Libertad de la Regresión	1
Grados de Libertad de los Residuos	18
Coefficiente de la Constante	55.203
Valor t de la constante	3.655
P para dos (2) colas	0,002
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-0,502
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-1,136
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,271
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	92.163
Grados de Libertad	1
Cuadrados Medios	92.163
Intervalo de Confianza	[-1.386 , 0,382]
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	1.284.522
Grados de Libertad	18
Cuadrados Medios	71.362
Relación de F	1.291
Valor de P	0,271
Valor del Estadístico Durbin Watson	0,700

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 13, Tabla 33 y el Gráfico 11.*

**Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40 y
Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 8)**

Tabla 27: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	8
Coefficiente de Correlación R	0,904
Coefficiente de Determinación R ²	0,817
Coefficiente de Determinación corregido	0,743
Error típico de estimación	2.317
Grados de Libertad de la Regresión	2
Grados de Libertad de los Residuos	5
Coefficiente de la Constante	89.616
Valor t de la constante	6.397
P para dos (2) colas	0,001
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-0,925
(Mezcla pasante #40)	-
(Diámetro de la Taza)	-0,405
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-4,721
(Mezcla pasante #40)	-
(Diámetro de la Taza)	-2,917
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,005
(Mezcla pasante #40)	-
(Diámetro de la Taza)	0,033
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	119.625
Grados de Libertad	2
Cuadrados Medios	59.813
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	26.839
Grados de Libertad	5
Cuadrados Medios	5.368
Relación de F	11.143
Valor de P	0,014
Valor del Estadístico Durbin Watson	3.254

Nota: Las hojas de cálculo de dichos resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 14* y la *Tabla 35*.

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 8)

Tabla 28: Resumen de los valores obtenidos por el programa SYSTAT 11

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra	8
Coefficiente de Correlación R	0,711
Coefficiente de Determinación R ²	0,505
Coefficiente de Determinación corregido	0,422
Error típico de estimación	3.476
Grados de Libertad de la Regresión	1
Grados de Libertad de los Residuos	6
Coefficiente de la Constante	51.964
Valor t de la constante	6.363
P para dos (2) colas	0,001
Coefficiente de la Variable Independiente:	
(Resistencia al Corte)	-0,572
Valor de t:	
(Resistencia al Corte)	-2,474
Valor P para dos (2) colas:	
(Resistencia al Corte)	0,048
FACTOR DE LA VARIANZA REGRESIÓN	
Suma de los Cuadrados de la Regresión	73.962
Grados de Libertad	1
Cuadrados Medios	73.962
Intervalo de Confianza	[-0.11 , -1.034]
FACTOR DE LA VARIANZA DE LOS RESIDUOS	
Suma de los Cuadrados de los Residuos	72.503
Grados de Libertad	6
Cuadrados Medios	12.084
Relación de F	6.121
Valor de P	0,048
Valor del Estadístico Durbin Watson	2.469

Nota: Las hojas de cálculo de dicho resultados del análisis estadístico, se justifican en la *Figura 15, Tabla 37 y el Gráfico 12.*

CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación, amplía notablemente el conocimiento del empleo del método Mini Cono de Laboratorio o Cono de caída libre, para determinar la resistencia al corte en las muestras de suelo que fueron seleccionadas en Guarenas Estado Miranda. El aporte se logró porque las muestras fueron ensayadas con la humedad correspondiente al límite líquido, bajo condiciones normalizadas, de carga, tiempo y temperatura, pero sobre todo manteniendo la humedad relativa del ambiente.

La investigación se trató con mucha disciplina en la realización de cada uno de los ensayos, el cumplimiento del procedimiento de acuerdo a lo establecido en las normas vigentes ASTM y BS 1377 referidas en el texto; sin embargo se puede notar una variación en los resultados obtenidos en el límite líquido, cuando se usa el equipo de Casagrande, para diferentes operadores. Los resultados obtenidos con la utilización del equipo Mini Cono de Laboratorio, no presentaron esta variación ya que el procedimiento es más sencillo y el operador solo tiene que presionar un botón de desbloqueo para disparar el cono y limitarse a tomar la lectura de un micrómetro.

En el desarrollo de la investigación, con el Mini Cono de Laboratorio, se presentaron incertidumbres, una de ellas fue determinar con cual taza de equipo se debía realizar el ensayo, debido a que el fabricante entrega dos: una grande y una pequeña sin ninguna especificación de uso.

La segunda incertidumbre se refiere al peso del cono ensamblado el cual debe ser de 80grs y no de 100grs con el empleo de una sobre carga que viene con el equipo, igualmente sin instrucción de uso.

Tomando en cuenta estas limitaciones, la investigación realizó mediciones de resistencia a la penetración con diferentes muestras variando el tamaño de la taza y el peso del cono, los resultados demuestran que se debe utilizar la taza de tamaño grande que evita la influencia del roce en las paredes durante la penetración.

El análisis de la muestra de tamaño 40, se tiene que el coeficiente de correlación al cuadrado es bajo R^2 [0.055 – 0.068], por lo que la ecuación de regresión no tiene significación estadística y por tanto no tiene buena bondad de ajuste. Ello se debió a que no se tenía conocimiento sobre las precauciones que ahora conocemos, sobre la importancia de la humedad relativa del ambiente, con el empleo de un humidificador en frío, esto para evitar el resacamiento de cada muestra durante la ejecución de los ensayos.

Para el caso de la muestra de tamaño 20, se tiene que el coeficiente de correlación al cuadrado está entre R^2 [0.541 – 0.542], indicando que la ecuación de regresión tiene significación estadística, para el caso del estudio de las combinaciones estudiadas (*figura 13 y 14*) por el programa SYSTAT 11, obteniendo un valor $-p < 0.05$, que cumple con la bondad de ajuste y, por consiguiente el número de grados de libertad es “suficiente”; mientras que en los casos de combinaciones (*figura 12 y 15*) se tiene un valor $-p > 0.05$, donde no podemos garantizar la hipótesis de que haya significación estadística, dentro del intervalo de confianza de 95%.

Si no se hubiera llevado a cabo el **análisis de la varianza** no hubiera sido posible juzgar la suficiencia del valor de R y hubiéramos estado en las nebulosas, de suceder en el caso de establecer a simple vista la diferencia relativa entre $R = 0,736$ (caso *Figura 14*) con $R = 1,000$: como ocurre con la mayoría de quienes no dominan esta materia

Por último para el caso de la muestra de tamaño 8, se tiene que el coeficiente de correlación al cuadrado está entre R^2 [0.505 – 0.817], presentando variabilidad entre las variables estudiadas. En cuanto al valor $-p$, para cada combinación estudiada (*figura 16 y 17*), fue $p < 0.05$, resultando que la relación es estadísticamente significativa. Sin embargo cabe mencionar que la muestra de tamaño 8 ensayada, no es bastante para determinar con suficiente significación estadística, la influencia del diámetro de la taza utilizada para determinar la resistencia de penetración con el cono.

Definitivamente el diámetro de la taza de bronce empleada en el equipo mini cono de laboratorio, esta “si tiene” una influencia fundamental en el resultado de la penetración, por cuanto en la taza pequeña hay efecto de la pared cuando se utiliza el cono ensamblado de peso con sobrecarga 100,11gr

No ocurre lo mismo cuando se utiliza el cono ensamblado de peso de 80,13 gramos, sin sobrecarga de 20 gramos para una carga total de 100,11 gramos de carga total sobre el cono como lo exige la norma BS 1377-2:1990. En consecuencia no se debe emplear la sobrecarga de 20 gramos, por cuanto habría resistencia de las paredes del envase y no se obtendría la resistencia al corte aun y cuando se utilizara la taza de mayor diámetro. Tal situación encontrada en esta investigación realizada en el laboratorio, en el presente año 2015 exige que la casa fabricante del equipo MINICONO ELE explique para que viene incluida la pesa de 20 gramos, con la finalidad de evitar errores es su empleo para la determinación del límite líquido del suelo.

RECOMENDACIONES

Para cualquier proceso de investigación que genere ecuaciones de regresión, debe tenerse en cuenta como requisito experimental lo siguiente:

- Debe resultar “valido”, para lo cual resulta indispensable haber seguido las especificaciones establecidas por una institución de carácter científico confiable tal como ASTM, Bristish Standard, DIN o AFNOR.
- Debe resultar “confiable”, para lo cual es indispensable que los ensayos hayan sido realizados en una muestra de tamaño aceptable desde el punto de vista estadístico, lo cual solo es posible al analizar el resultado del análisis de la varianza.
- Deberían ser de tipo general la ecuación obtenida; aunque este requisito no es indispensable, por cuanto el origen geológico de los suelos que constituyen las muestras analizadas, juega un papel muy importante (no es posible realizar comparación de suelos de tipo residual con suelos de origen sedimentario).

Es de hacer notar que el programa SYSTAT 11 requiere de un mínimo de veinte (20) datos para poder utilizar la función de bondad de ajuste de las distribuciones que se analicen como posibles para la data que se pretende estudiar.

Cuando se tiene el caso de una regresión lineal múltiple, es necesario eliminar cualquier variable independiente que no sea estadísticamente significativa, por lo que se debe fijar el nivel crítico de significación en 5% (0,05), para eliminar aquellas variables que “no sirven” y así tener una regresión limpia y económica.

El uso de recipientes para mantener la humedad de las muestras durante los ensayos es recomendable, debido principalmente a que en suelos finos, como los limos, se secan rápidamente a una temperatura ambiente. Para que no surjan variaciones en la humedad de la muestra. Por lo que es indispensable garantizar una humedad fija, es decir, lo menos variable posible para evitar que el suelo se endurezca en la taza de Casagrande. Para ello es necesario conservar las muestras de suelo en la cámara de vacío con una solución de agua y

ácido sulfúrico que garantice una humedad relativa de aproximadamente el 97%, antes de proceder algún ensayo ya bien sea con el mini cono de laboratorio o con el equipo de Casagrande.

Recordar que siempre la mezcla con suelo y agua se deja reposar por lo menos 18 horas en ambiente de humedad relativa vecina al 90 %; por lo cual es recomendable mantener la muestra previamente mezclada en la cámara húmeda. Es a partir del momento de la preparación definitiva de la muestra de suelo para lograr 25 golpes en la copa de Casagrande, cuando se debe colocar la muestra en la cámara de vacío, para luego ensayarla con el equipo mini cono de laboratorio, sin que haya perdido humedad; ya que se pudo notar en los primeros ensayos (Muestra de tamaño 40), sin el debido control de la humedad relativa, que generaron resultados dispersos y no permitieron obtener homocedasticidad.

Como se muestra al utilizar el peso con el cono ensamblado con sobrecarga de 100,11 gr, exclusivamente con la taza de 55 mm, no se obtiene buen resultado, por cuanto tanto el valor de la prueba F de Fisher y t-student para controlar la significación estadística de los coeficientes de las variables dependientes generan ecuaciones de regresión que no son buenas predictoras; por lo tanto el límite líquido no se puede obtener en función del resultado obtenido por el equipo del mini cono de laboratorio operado con sobrecarga de 20 gramos.

Cualquier intento de evaluar ecuaciones de regresión sin el empleo de la prueba t de Student en el análisis de regresión es una pérdida de tiempo y de dinero, por cuanto es posible que algunas de las variables dependientes no aporten valor agregado y que en consecuencia se invierta dinero inútil en la realización de ensayos costosos de laboratorio y se pierda valioso tiempo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Libro

- Centeno W, Roberto (1982). Prueba Kolmogorov, en *Inspección y control de obras civiles*. Caracas: Vega
- BS 1377: Part 2. (1990). "Method of test for civil engineering purposes British". Standard Institution, London

Artículos

- Jiménez Salas, J.A. And De Justo Alpañes, J.L. (1975). Límites de atterberg, Gráfico de Casagrande, Índice de fluidez, Propiedades físico-químicas de las arcillas, Actividad, Susceptibilidad y tixotropía, En *Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas* (2da ed., pp. 71-78). Madrid, España: Rueda.
- Casagrande, A., (1932). "Research on the Atterberg Limits of Soil", *Public Roads*, Vol. 13. p. 121.
- Juárez Badillo E& Rico Rodríguez A. (2005). *Mecánica de Suelos Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Pg. 126.
- Wroth, C.P., And Wood, D.M., (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils, En *Canadian Geotechnical Journal*, Vol, 15 No. 2, pp. 137-145.

Trabajos Académicos

- Alvarado, S. & Baquero, M. (2011). *Calibración de cono miniatura de laboratorio para determinar el límite líquido de los suelos*. (Trabajo Especial de Grado de Ingeniería Civil publicado). Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.
- González, M. y Herrera. A. (1987). *Investigación del comportamiento de algunos suelos Venezolanos en estado remoldeado*. (Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Páginas Web

- García, S. (2013). *Aplicabilidad del método del cono para medir los límites líquido y plástico de suelos de Guatemala*. (Trabajo de Grado de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Obtenido el 08 de Diciembre de 2014 en http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3529_C.pdf
- Cevallos, A. (2012). *Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del penetrómetro cónico*. (Trabajo de Grado de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador). Obtenido el 01 de Junio de 2015 en <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/6403/9.20.001327.pdf?sequence=4>
- Osorio, S. (2010, Noviembre 19). Consistencia del suelo, límites de atterberg, límite líquido [Mensaje de Blog en la Web]. Recuperado de http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html
- Estudio de Suelos. (2010, Junio 9). Ensayo de granulometría por hidrómetro. [Mensaje de Blog en la Web]. Recuperado de <http://suelosyestudio.blogspot.com/2010/06/ensayo-de-granulometria-por-hidrometro.html>

Trabajo Publicado en los Proceedings de un Congreso

- Dueñas, J.P., & Poblete, M. (2014). Utilización del penetrómetro de cono en la determinación del límite líquido en suelos de baja plasticidad. VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica 8. Recuperado de https://www.google.co.ve/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.sochige.cl%2Fdownload.php%3Ffile%3DA_29.pdf&ei=UNBoVaXJefWIsQTujYC4Cg&usg=AFQjCNGqPUKCaW-p1axaba2FG5L1UusyUKQ

ANEXOS

MEMORÍA FOTOGRÁFICA

Cantidad de suelo representativo de las muestras analizadas



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Muestra triturada y tamizada a través de la malla # 40 y # 200.



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Preparación de la muestra tamizada, según las distintas combinaciones realizadas en (gr) para la elaboración de las muestras prefabricadas en el laboratorio



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Selección de la muestra con suficiente cantidad de agua



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Mezclado de la muestra con el agua, hasta obtener una pasta uniforme, para luego dejarla reposar durante 24 horas



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Muestra homogénea después de las 24 horas



Fuente: El Autor

Algunas muestras ya listas para ser ensayadas



Fuente. El Autor

Material usado en el ensayo de Ácido Sulfúrico, para mantener la humedad relativa de la muestra



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Preparación de la concentración de ácido sulfúrico que corresponda a una humedad relativa de 97,73%, perteneciente a un suelo saturado e introducción de la misma en la cámara de vacío.

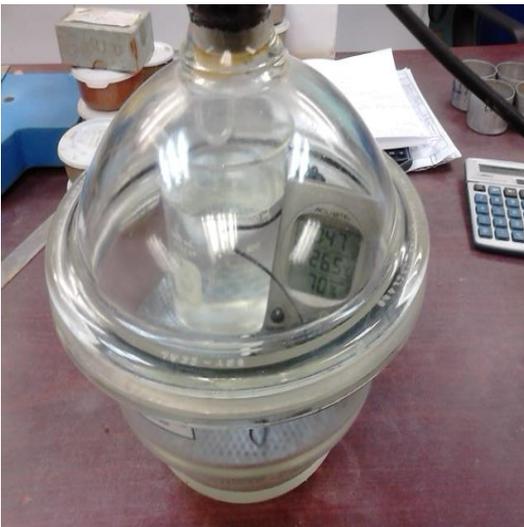


Fuente: El autor



Fuente: El autor

A través de la cámara de vacío se coloca un aparato termo higrómetro, para que mida la temperatura y la humedad relativa de las muestras colocadas para luego ensayarlas.



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Colocación de las muestras dentro de la cámara de vacío, indicando el termo higrómetro humedad relativa a la cual fue preparado, para que las muestras introducidas permanezcan en equilibrio y puedan ser luego ensayadas por los métodos de Casagrande y Mini cono de laboratorio



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Equipo de Casagrande para determinar el Límite Líquido



Fuente: El Autor

Copa de Casagrande colocación de la muestra prefabricada en el laboratorio



Fuente: El Autor

Enrasado de la muestra, con ayuda de la espátula hasta emparejar la superficie en el aparato de Casagrande



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Nivelado de la muestra en el aparato de Casagrande



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Trazado de un canal sobre el eje de la copa con la ayuda del ranurador plano, para que la muestra quede dividida en dos partes



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Cierre o unión de las dos mitades en una longitud aproximada de 13 milímetros



Fuente: El Autor

Equipo Mini Cono de Laboratorio para determinar el Límite Líquido



Fuente: El Autor

Cono de acero inoxidable de 35 milímetros de longitud y ángulo central de $30^\circ \pm 1$



Fuente: El Autor

Tazas de bronce de $\text{Ø}55 \times 35$ y 70×45 mm para colocación de las muestras prefabricadas



Fuente: El Autor

Muestra ensayada



Fuente: El Autor

Penetración del cono en la muestra



Fuente: El Autor

Penetración del cono en la muestra luego de caída libre de 5 segundos



Fuente: El Autor

Muestra penetrada, con enmarcación para tomar una porción de dicha muestra penetrada



Fuente: El Autor

Parte sobrante de la pequeña porción extraída del área donde se penetra el cono



Fuente: El Autor

Balanza con precisión de 0,1 gramos, para registrar el peso de la muestra húmeda



Fuente: El Autor

Muestra Húmeda colocada en el horno a una temperatura constante de aproximadamente 110°C durante 24 horas



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Material utilizado para introducir las muestras después de retirarlas del horno, Silicagel indicadora proceso para la obtención de un peso constante de dichas muestras ensayadas.



Fuente: El Autor

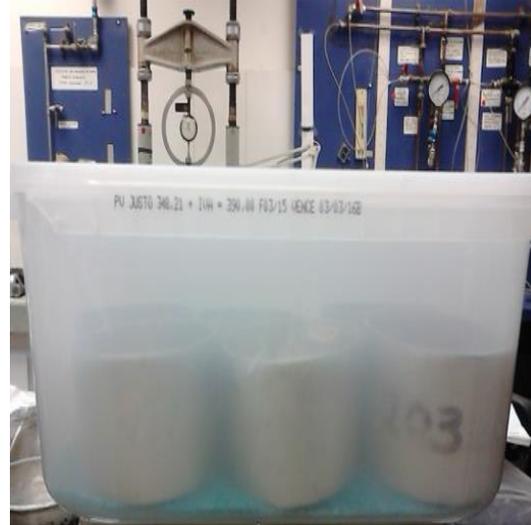


Fuente: El Autor

Proceso para el peso de la muestra seca, una vez retirada del horno



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

Detalle de la muestra agrietada al Límite Plástico



Fuente: El autor

Preparación de los cubos para determinar el Límite Plástico e introducir las muestras al horno



Fuente: El autor

Proceso de secado de la muestra seca, una vez retirada del horno



Fuente: El autor



Fuente: El autor

Detalle final de las muestras secas, con peso constante



Fuente: El autor



Fuente: El autor

Otros Ensayos

Ensayo de Gravedad Específica

Hervir la muestra de suelo dentro de un picnómetro Agitación del picnómetro para facilitar la remoción del aire, a través de una bomba de vacío



Fuente: El autor



Fuente: El autor

Muestra en reposo, sin formación de burbujas



Fuente: El autor

Llenado con agua destilada, para registro de peso



Fuente: El autor

Ensayo por suspensión del suelo “Método del Hidrómetro”

Muestra de suelo saturada con agua destilada



Fuente: El autor

Agente defloculante: Polifosfato de sodio



Fuente: El autor

Batidora, para licuar la muestra de suelo a ensayar con cierta cantidad de agua.



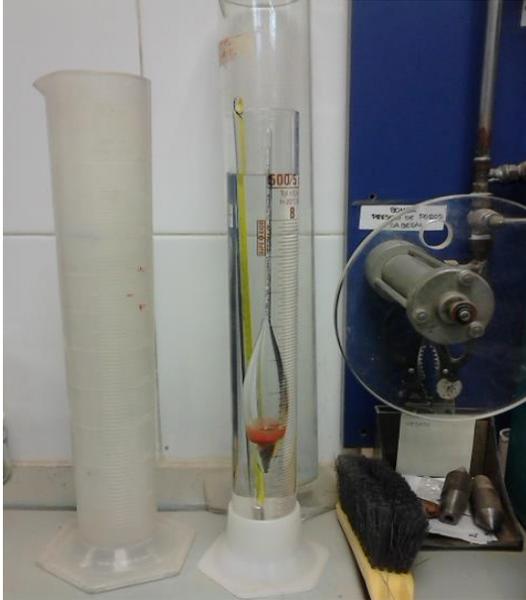
Fuente: El autor

Muestra de suelo con agua y con cierta cantidad del defloculante para formar una solución de 1000ml



Fuente: El autor

Hidrómetro suspendido en agua destilada



Fuente: El autor

Sedimentación de la muestra de suelo en el agua



Fuente: El autor

Ensayo de Azul de Metileno



Fuente: El autor



Fuente: El autor

Exposición de consistencia pegajosa en muestra prefabricada en el laboratorio para ser ensayada

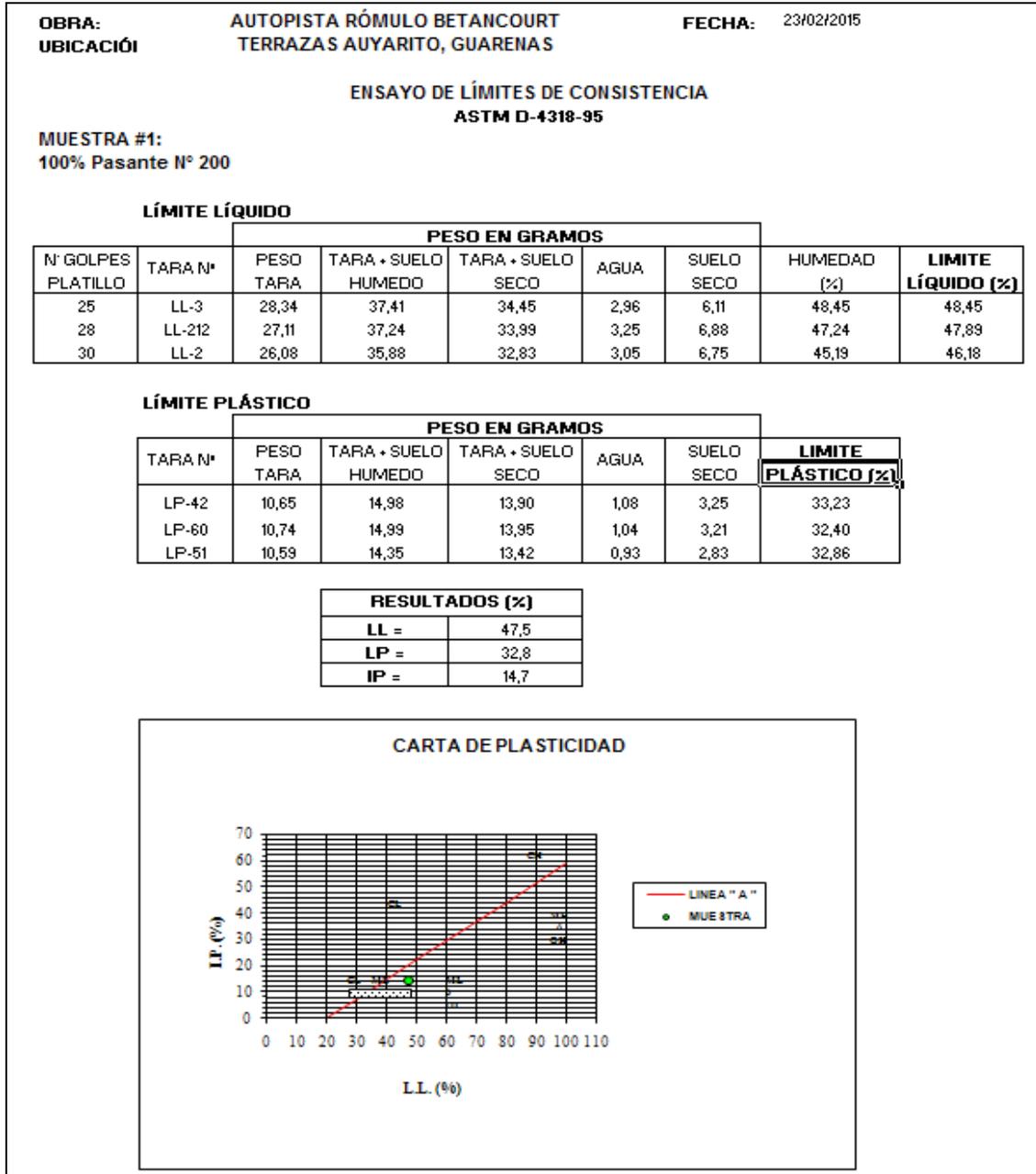


Fuente: El autor



Fuente: El autor

Hoja de cálculo para determinar el Límite Líquido y el Límite Plástico mediante el equipo de Casagrande.



Fuente: Laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados. S.C.

Hoja de cálculo para la obtención de datos, para determinar la resistencia al corte mediante la penetración del penetrómetro de cono o mini cono de laboratorio.

CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS S.C.
 Ingenieros Consultores
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: _____ FECHA: _____
 UBICACIÓN: _____

**ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO
 EMPLEANDO EL PENETRÓMETRO DE CONO**

Muestra	Penetración (0,1 mm)	Determinación de Humedad						
		Tara	Peso tara (g)	Tara + suelo húmedo (g)	Tara + suelo seco (g)	Agua (g)	Suelo Seco (g)	w (%)

Rango de Penetración para la determinación del límite líquido

Penetración (0,1 mm)	σ (g/cm ²)
270	15,75
260	16,99
250	18,38
240	19,94
230	21,71
220	23,73
210	26,04
200	28,71

OBSERVACIONES:

Elaborado por: _____ Revisado por: _____

Fuente: Laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados. S.C.

Planilla de obtención de datos para el ensayo de Gravedad específica

CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES.					
ENSAYO DE PESO ESPECIFICO (Empleando Suelo Seco)					
Obra: _____			Fecha: _____		
Ubicación: _____					
Perforación N°: _____		Calicata N°: _____		Progresiva: _____	
Muestra					
N° de laboratorio					
Picnómetro N°					
Capacidad picnómetro (cm ³)					
Peso en gramos	Tara del picnómetro				
	Picnómetro + Suelo Seco				
	Suelo Seco (W _o)				
	Picnómetro + Agua + Suelo (W ₁)				
	Picnómetro + Agua a cap. total (W ₂)				
Temperatura de ensayo (°C)					
Peso específico referido a temperatura de ensayo (Gs)					
Peso específico referido a temperatura de 20 °C (Gs _{20°})					
DENSIDAD RELATIVA DEL AGUA Y FACTOR DE CONVERSION "K" PARA VARIAS TEMPERATURAS					
TEMP. (°C)	DENSIDAD RELATIVA	FACTOR K	TEMP. (°C)	DENSIDAD RELATIVA	FACTOR K
19	0,9984347	1,0002	25	0,9970770	0,9989
20	0,9982343	1,0000	26	0,9968156	0,9986
21	0,9980233	0,9998	27	0,9965451	0,9983
22	0,9978019	0,9996	28	0,9962652	0,9980
23	0,9975702	0,9993	29	0,9959761	0,9977
24	0,9973286	0,9991	30	0,9956780	0,9974
$G_s = \frac{W_o}{W_o - (W_1 - W_2)}$ $G_{s(20^\circ)} = G_s \times \text{FACTOR K}$					
Observaciones:					
ELABORADO POR:			APROBADO POR:		
<i>Laboratorio de Mecánica de Suelo</i>					

Fuente: Laboratorio de suelos de Centeno Rodríguez y Asociados. S.C.

Análisis Estadísticos

Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200 (Muestra tamaño 40)

Variable Dependiente: Resistencia al Corte

Variable Independiente: Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200

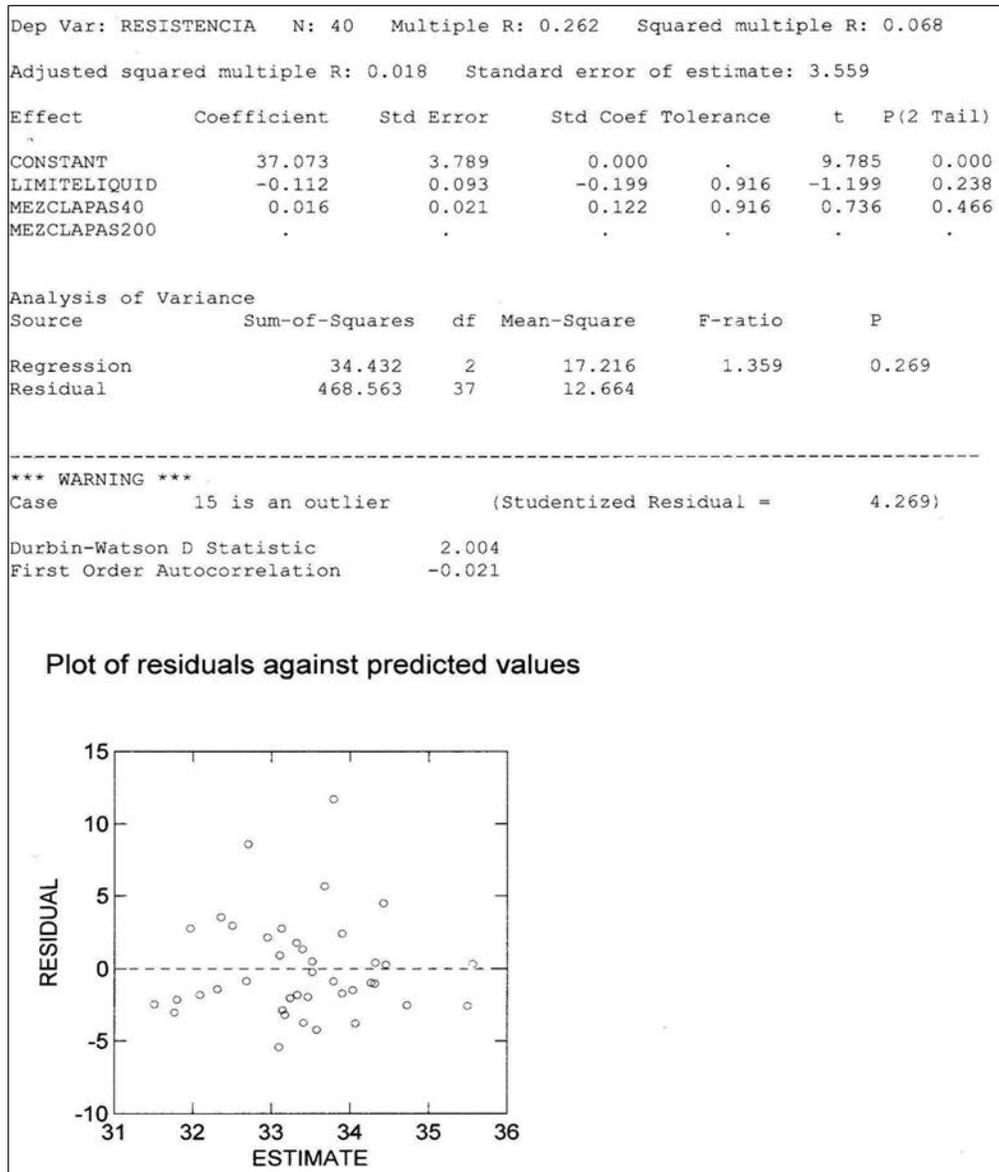


Figura 7: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con gráfico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 29: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para la Resistencia al corte vs Límite Líquido, Mezcla pasante # 40 y Mezcla pasante # 200
Fuente: Elaboración propia

Límite Líquido LL (%)	% Mezcla Pasante N° 40	% Mezcla Pasante N° 200	Resistencia al Corte Calculada por la Ec. De Correlación	Resistencia al Corte (gr/cm2)
47,5	0	100	31,75	28,72
47,1	10	90	31,95	34,73
45,0	20	80	32,36	35,88
43,3	30	70	32,70	41,29
41,1	40	60	33,11	34,01
39,9	50	50	33,40	34,73
37,4	100	0	34,49	34,73
35,3	0	100	33,12	35,88
34,2	10	90	33,40	29,65
34,1	20	80	33,57	29,34
32,6	30	70	33,91	36,31
32,5	40	60	34,07	30,27
31,7	50	50	34,32	33,28
28,1	100	0	35,53	32,91
29,4	0	100	33,78	45,49
29,8	10	90	33,89	32,19
30,0	20	80	34,04	32,55
29,3	30	70	34,27	33,28
30,2	40	60	34,33	34,73
30,7	50	50	34,43	38,89
35,6	0	100	33,09	27,66
36,3	10	90	33,17	29,96
38,0	20	80	33,13	30,27
36,5	30	70	33,46	31,51
35,0	40	60	33,79	32,91
38,8	50	50	33,53	34,01
27,5	100	0	35,59	35,88
36,9	0	100	32,94	35,09
35,7	10	90	33,23	31,2
36,4	20	80	33,32	35,09
37,7	30	70	33,33	31,51
37,4	40	60	33,53	33,28
37,4	50	50	33,69	39,32
35,0	100	0	34,76	32,19
49,8	0	100	31,50	29,03
48,6	10	90	31,79	29,65
47,4	20	80	32,08	30,27
46,8	30	70	32,31	30,89
44,9	40	60	32,69	31,82
47,9	50	50	32,51	35,45

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$\text{Resistencia al Corte} = -0,112*(\text{LL})+0,016*(\text{Mezcla Pas \# 40})+37,073$$

Análisis Estadístico Resistencia al Corte vs Límite Líquido (Muestra de tamaño 40)

Variable Dependiente: Resistencia al Corte

Variable Independiente: Límite Líquido

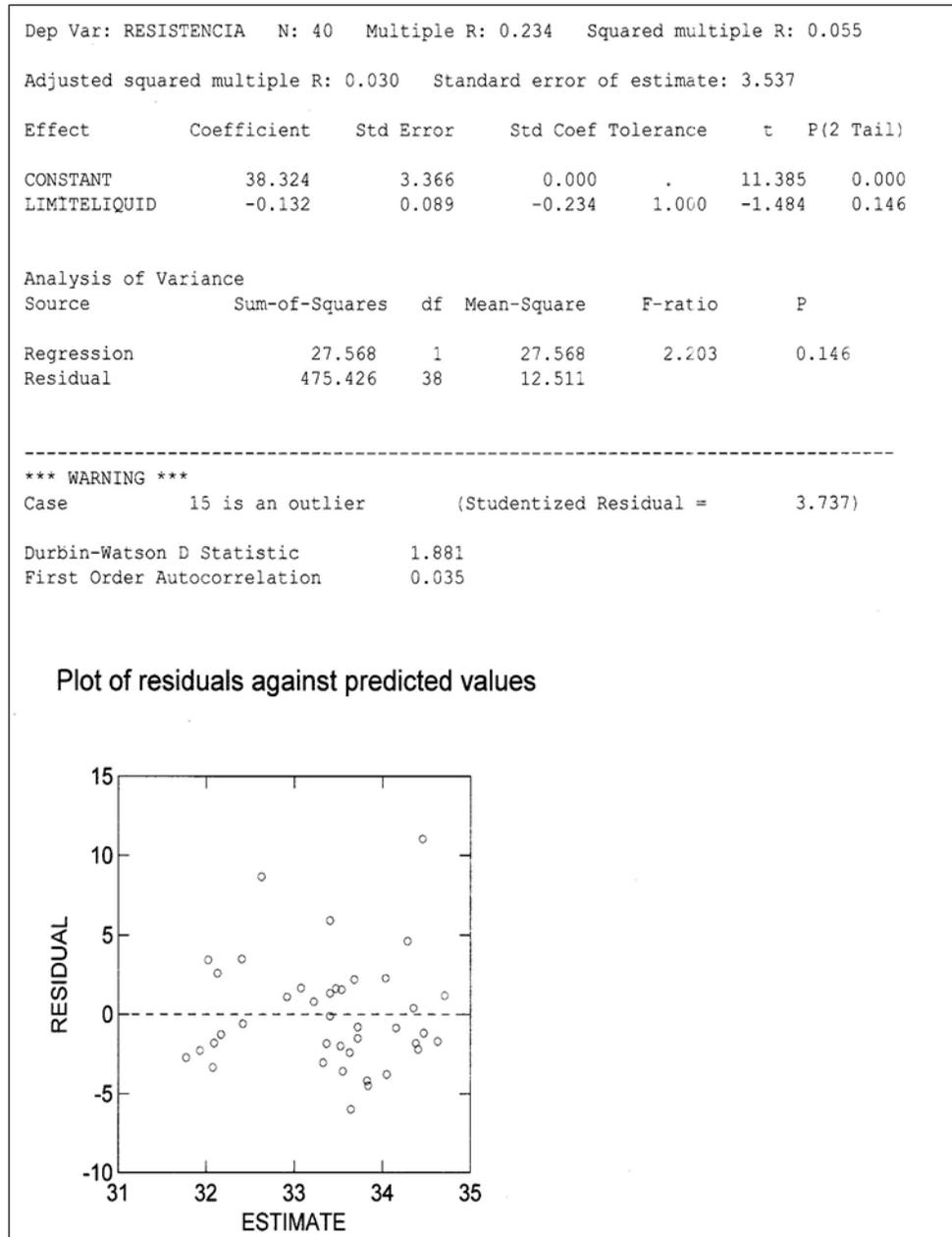


Figura 8 :Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 30: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para la Resistencia al corte vs Límite Líquido

Fuente: Elaboración propia

Límite Líquido LL (%)	Resistencia al Corte Calculada por la Ec. De Correlación	Resistencia al Corte (gr/cm2)
47,5	32,05	28,72
47,1	32,10	34,73
45,0	32,39	35,88
43,3	32,61	41,29
41,1	32,90	34,01
39,9	33,06	34,73
37,4	33,39	34,73
35,3	33,67	35,88
34,2	33,81	29,65
34,1	33,82	29,34
32,6	34,03	36,31
32,5	34,03	30,27
31,7	34,14	33,28
28,1	34,61	32,91
29,4	34,45	45,49
29,8	34,39	32,19
30,0	34,37	32,55
29,3	34,46	33,28
30,2	34,34	34,73
30,7	34,27	38,89
35,6	33,63	27,66
36,3	33,53	29,96
38,0	33,31	30,27
36,5	33,51	31,51
35,0	33,70	32,91
38,8	33,20	34,01
27,5	34,69	35,88
36,9	33,45	35,09
35,7	33,61	31,2
36,4	33,52	35,09
37,7	33,35	31,51
37,4	33,39	33,28
37,4	33,39	39,32
35,0	33,71	32,19
49,8	31,75	29,03
48,6	31,91	29,65
47,4	32,06	30,27
46,8	32,14	30,89
44,9	32,40	31,82
47,9	32,00	35,45

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$\text{Resistencia al Corte} = -0,132*(LL) + 38,324$$

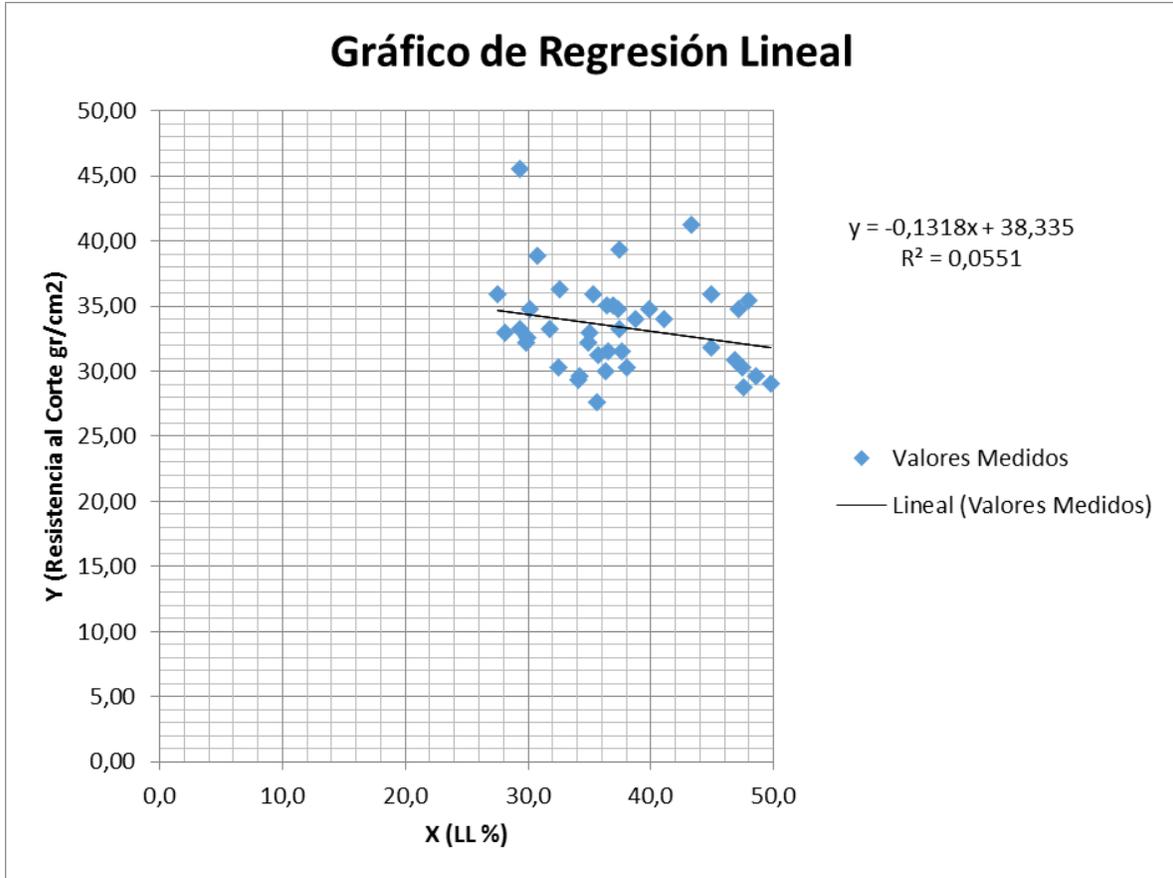


Gráfico 9 :Regresión lineal, representación de la Resistencia al corte vs Límite Líquido

Fuente: Elaboración propia

Nota: El pronóstico de este gráfico indica una correlación no importante, entre las variables estudiadas, existe un mal ajuste de la recta a la nube de puntos.

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 40)

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte

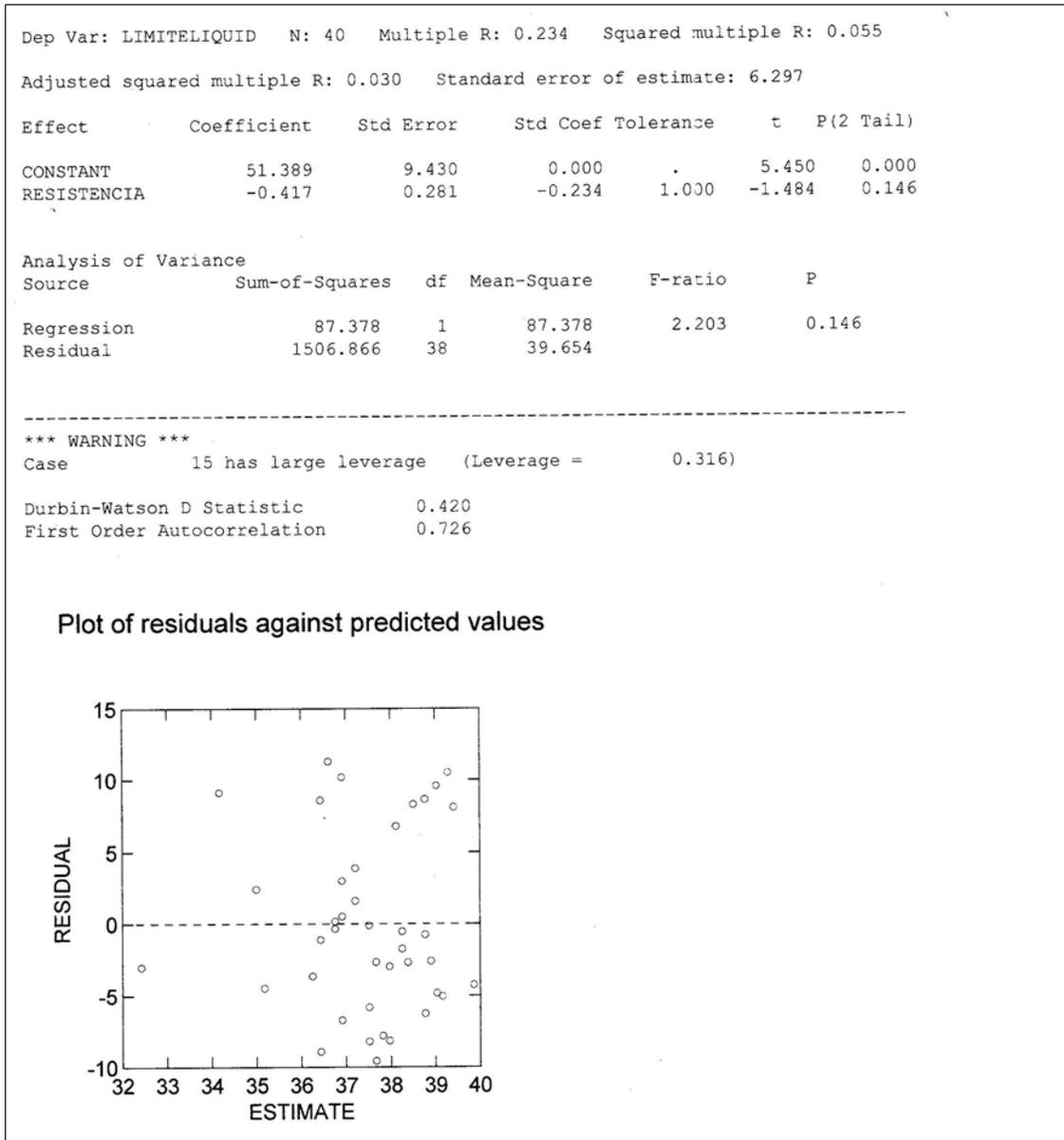


Figura 9: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con gráfico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 31: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm ²)	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
28,72	39,41	47,5
34,73	36,91	47,1
35,88	36,43	45,0
41,29	34,17	43,3
34,01	37,21	41,1
34,73	36,91	39,9
34,73	36,91	37,4
35,88	36,43	35,3
29,65	39,02	34,2
29,34	39,15	34,1
36,31	36,25	32,6
30,27	38,77	32,5
33,28	37,51	31,7
32,91	37,67	28,1
45,49	32,42	29,4
32,19	37,97	29,8
32,55	37,82	30,0
33,28	37,51	29,3
34,73	36,91	30,2
38,89	35,17	30,7
27,66	39,85	35,6
29,96	38,90	36,3
30,27	38,77	38,0
31,51	38,25	36,5
32,91	37,67	35,0
34,01	37,21	38,8
35,88	36,43	27,5
35,09	36,76	36,9
31,2	38,38	35,7
35,09	36,76	36,4
31,51	38,25	37,7
33,28	37,51	37,4
39,32	34,99	37,4
32,19	37,97	35,0
29,03	39,28	49,8
29,65	39,02	48,6
30,27	38,77	47,4
30,89	38,51	46,8
31,82	38,12	44,9
35,45	36,61	47,9

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -0,417*(Resistencia\ al\ Corte) + 51,389$$

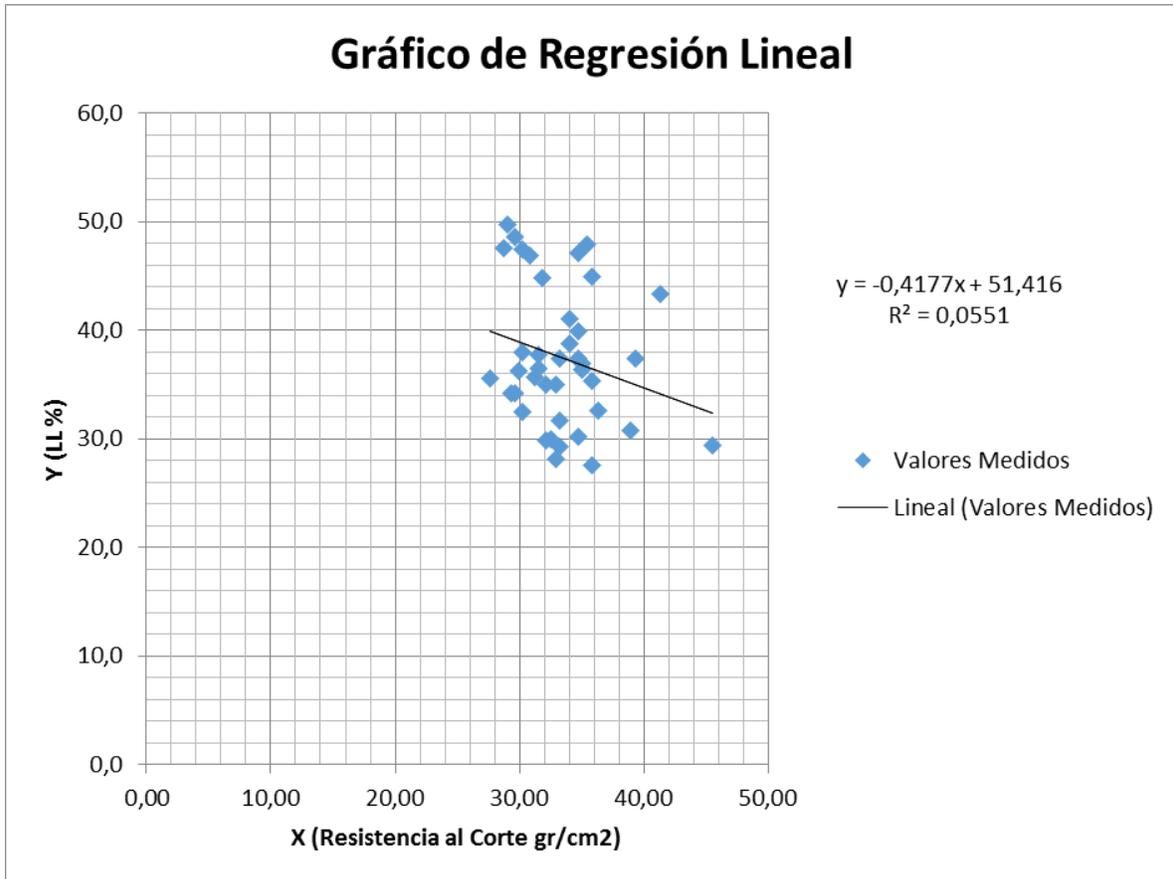


Gráfico 10: Regresión Lineal, representación del Límite Líquido vs Resistencia al corte

Fuente: Elaboración propia

Nota: Este gráfico indica una correlación no importante, entre las variables estudiadas, por lo que existe un mal ajuste de la recta a la nube de puntos.

**Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40,
Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 20)**

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza

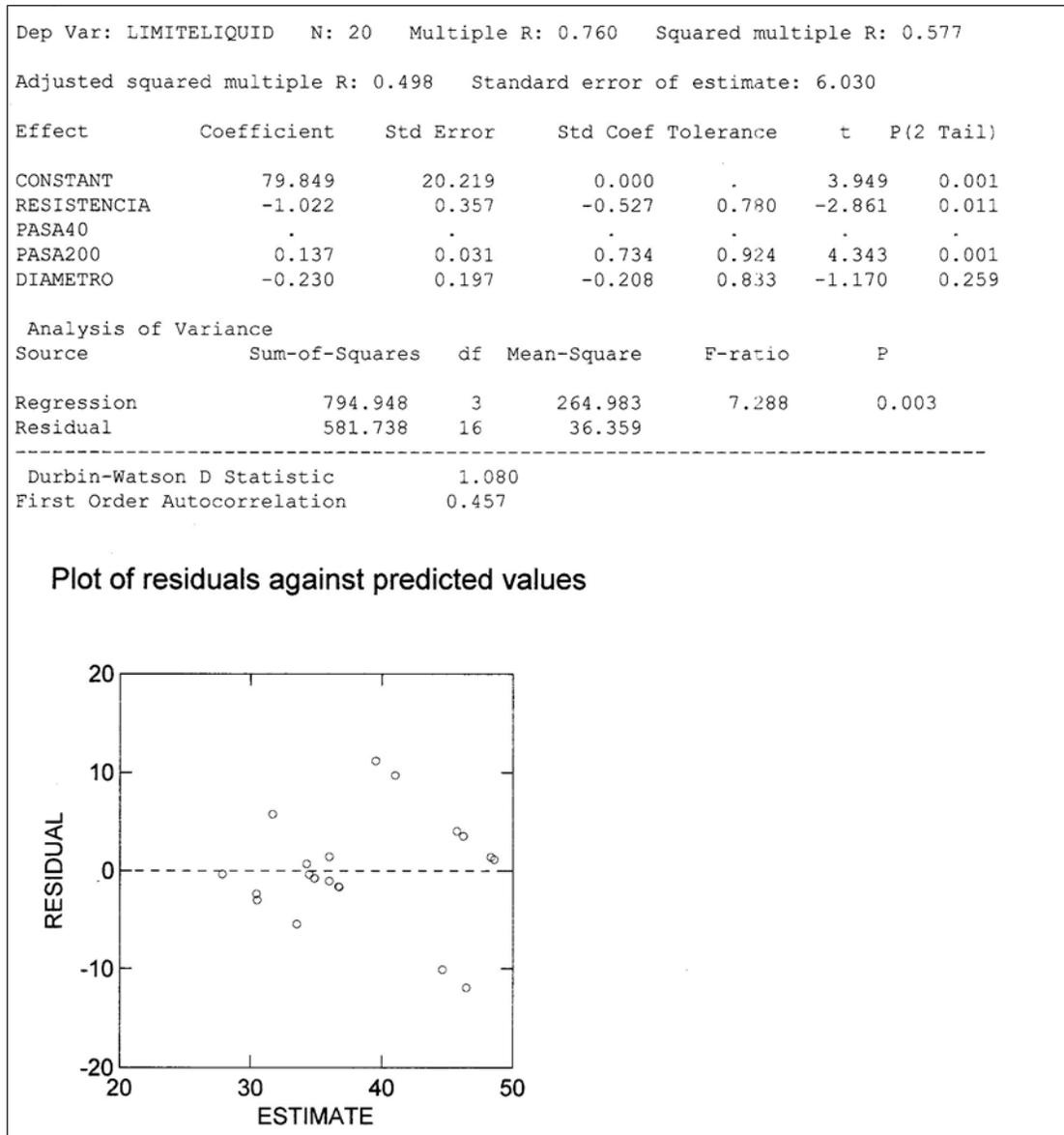


Figura 10: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 32: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200 y Diámetro de la Taza

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm ²)	% Mezcla Pasante N° 40	% Mezcla Pasante N° 200	Diámetro de la Taza (mm)	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
31,82	0	100	55	48,38	49,7
32,55	10	90	55	46,26	49,7
36,31	20	80	55	41,05	50,7
34,73	100	0	55	31,70	37,4
28,19	0	100	70	48,64	49,7
29,65	10	90	70	45,78	49,7
34,37	20	80	70	39,58	50,7
27,12	100	0	70	36,03	37,4
35,45	0	100	55	44,67	34,5
41,8	10	90	55	36,81	35,1
42,31	20	80	55	34,92	34,1
32,91	100	0	55	33,56	28,1
30,27	0	100	70	46,51	34,5
38,46	10	90	70	36,77	35,1
39,32	20	80	70	34,52	34,1
32,55	100	0	70	30,48	28,1
35,88	100	0	55	30,53	27,51
35,09	100	0	70	27,89	27,51
32,19	100	0	55	34,30	34,95
27,12	100	0	70	36,03	34,95

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -1,022*(Resistencia al Corte) + 0,137*(Mezcla Pas #200) - 0,230*(Diámetro Taza) + 79,849$$

**Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40,
Mezcla Pasante # 200 (Muestra de tamaño 20)**

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200

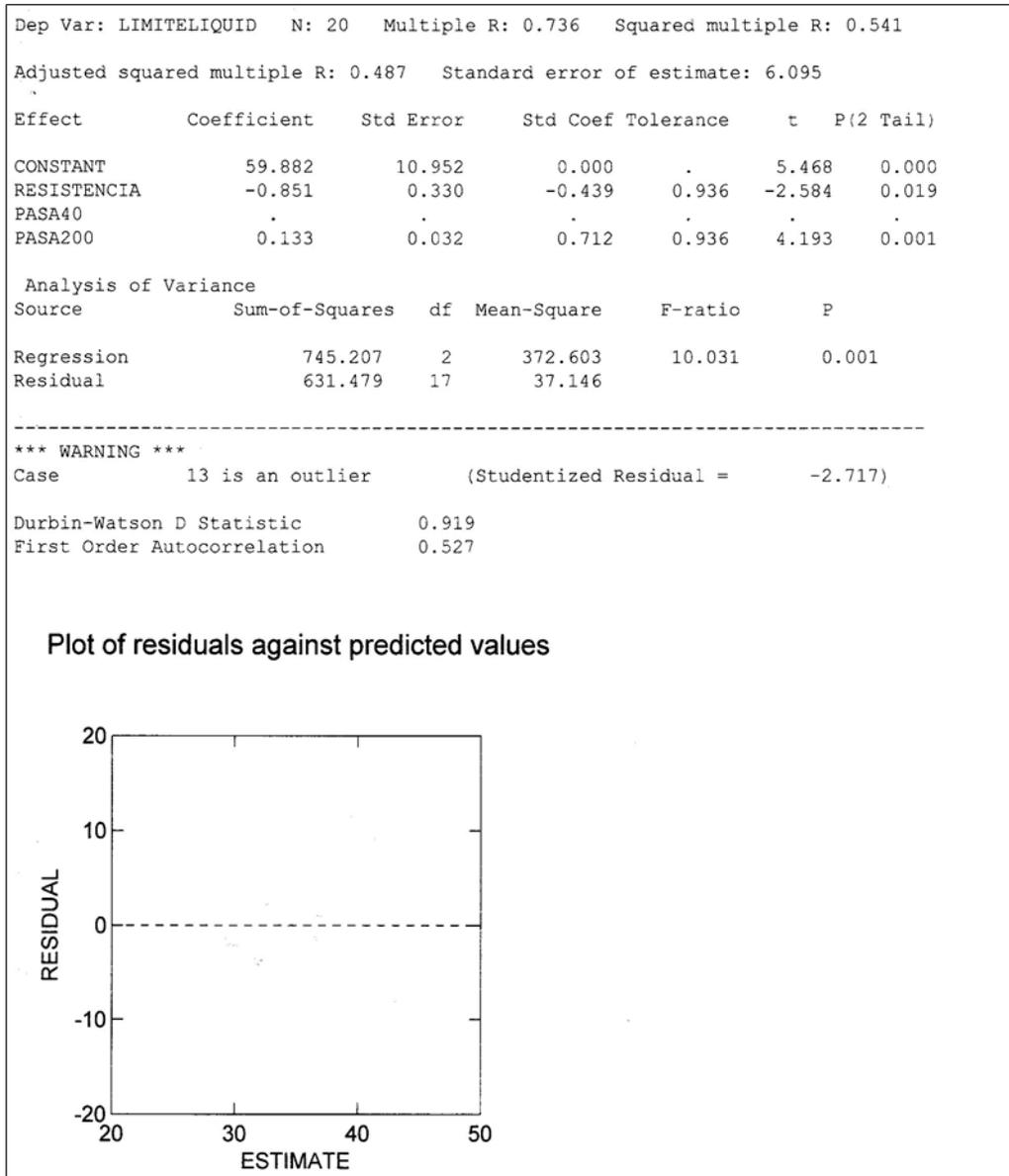


Figura 11: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 33: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 40, Mezcla Pasante # 200

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm2)	% Mezcla Pasante N° 40	% Mezcla Pasante N° 200	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
31,82	0	100	46,10	49,7
32,55	10	90	44,15	49,7
36,31	20	80	39,62	50,7
34,73	100	0	30,33	37,4
28,19	0	100	49,19	49,7
29,65	10	90	46,62	49,7
34,37	20	80	41,27	50,7
27,12	100	0	36,80	37,4
35,45	0	100	43,01	34,5
41,8	10	90	36,28	35,1
42,31	20	80	34,52	34,1
32,91	100	0	31,88	28,1
30,27	0	100	47,42	34,5
38,46	10	90	39,12	35,1
39,32	20	80	37,06	34,1
32,55	100	0	32,18	28,1
35,88	100	0	29,35	27,51
35,09	100	0	30,02	27,51
32,19	100	0	32,49	34,95
27,12	100	0	36,80	34,95

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -0,851*(Resistencia al Corte) + 0,133*(Mezcla Pas #200) + 59,882$$

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 200 (Muestra de tamaño 20)

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 200

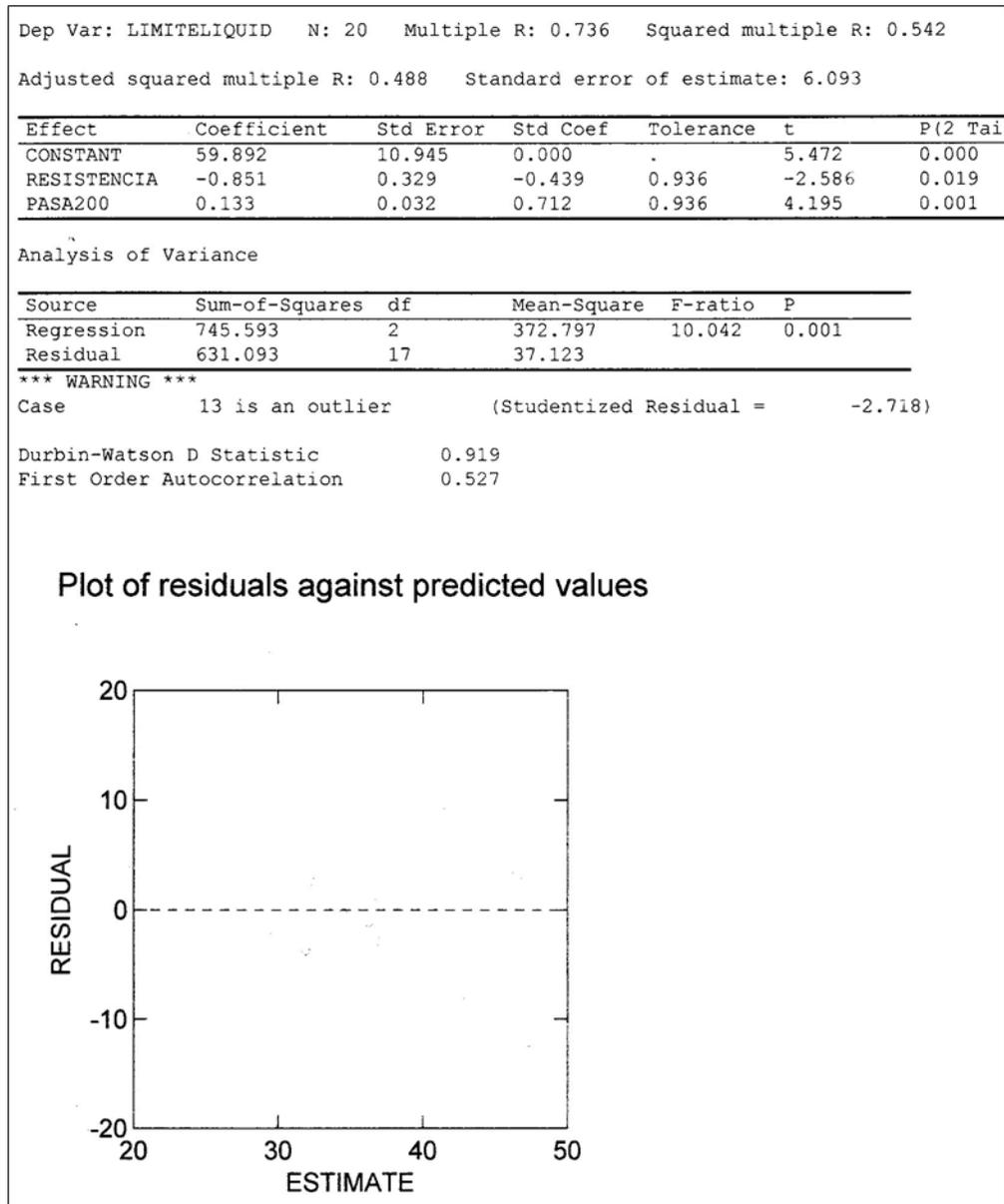


Figura 12: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 34: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 200

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm ²)	% Mezcla Pasante N° 200	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
31,82	100	46,11	49,7
32,55	90	44,16	49,7
36,31	80	39,63	50,7
34,73	0	30,34	37,4
28,19	100	49,20	49,7
29,65	90	46,63	49,7
34,37	80	41,28	50,7
27,12	0	36,81	37,4
35,45	100	43,02	34,5
41,8	90	36,29	35,1
42,31	80	34,53	34,1
32,91	0	31,89	28,1
30,27	100	47,43	34,5
38,46	90	39,13	35,1
39,32	80	37,07	34,1
32,55	0	32,19	28,1
35,88	0	29,36	27,51
35,09	0	30,03	27,51
32,19	0	32,50	34,95
27,12	0	36,81	34,95

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -0,851*(Resistencia\ al\ Corte) + 0,133*(Mezcla\ Pas\ \#200) + 59,892$$

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 20)

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte

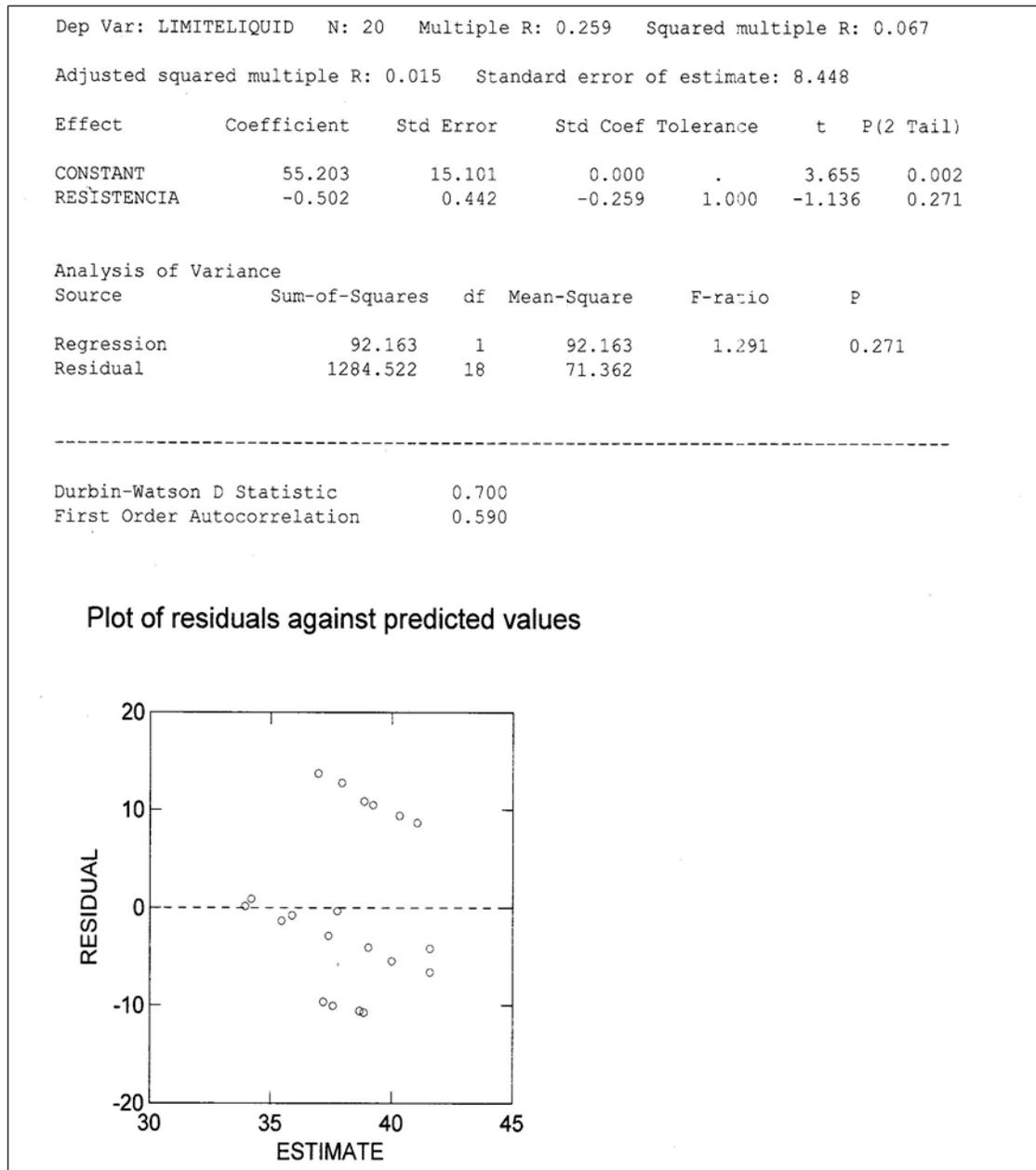


Figura 13: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 35: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm²)	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
31,82	39,23	49,7
32,55	38,86	49,7
36,31	36,98	50,7
34,73	37,77	37,4
28,19	41,05	49,7
29,65	40,32	49,7
34,37	37,95	50,7
27,12	41,59	37,4
35,45	37,41	34,5
41,8	34,22	35,1
42,31	33,96	34,1
32,91	38,68	28,1
30,27	40,01	34,5
38,46	35,90	35,1
39,32	35,46	34,1
32,55	38,86	28,1
35,88	37,19	27,51
35,09	37,59	27,51
32,19	39,04	34,95
27,12	41,59	34,95

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -0,502*(Resistencia\ al\ Corte) + 55,203$$

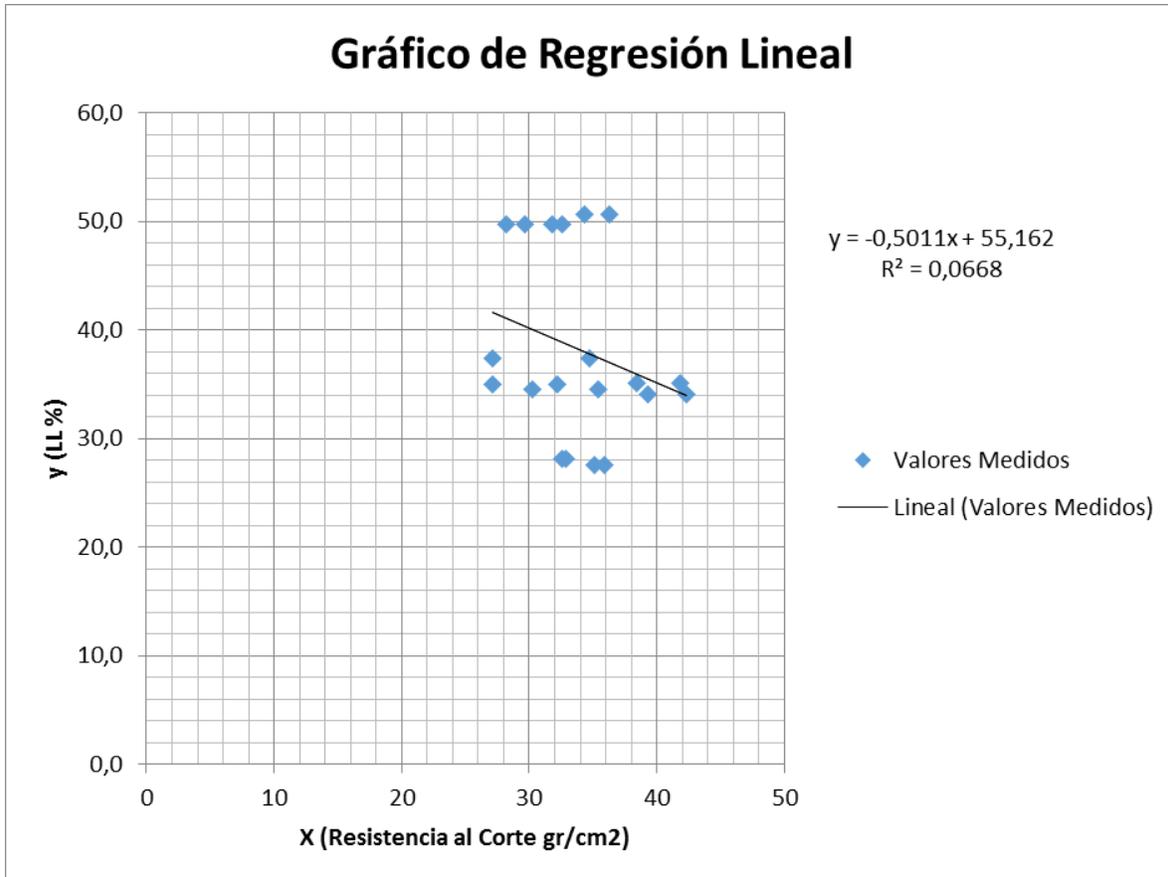


Gráfico 11: Regresión Lineal, representación del Límite Líquido vs Resistencia al corte

Fuente: Elaboración propia

Nota: Este gráfico indica una correlación no muy buena, entre las variables estudiadas, existe un mal ajuste de la recta a la nube de puntos.

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40 y Diámetro de la Taza (Muestra de tamaño 8)

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte, Mezcla Pasante # 40 y Diámetro de la Taza

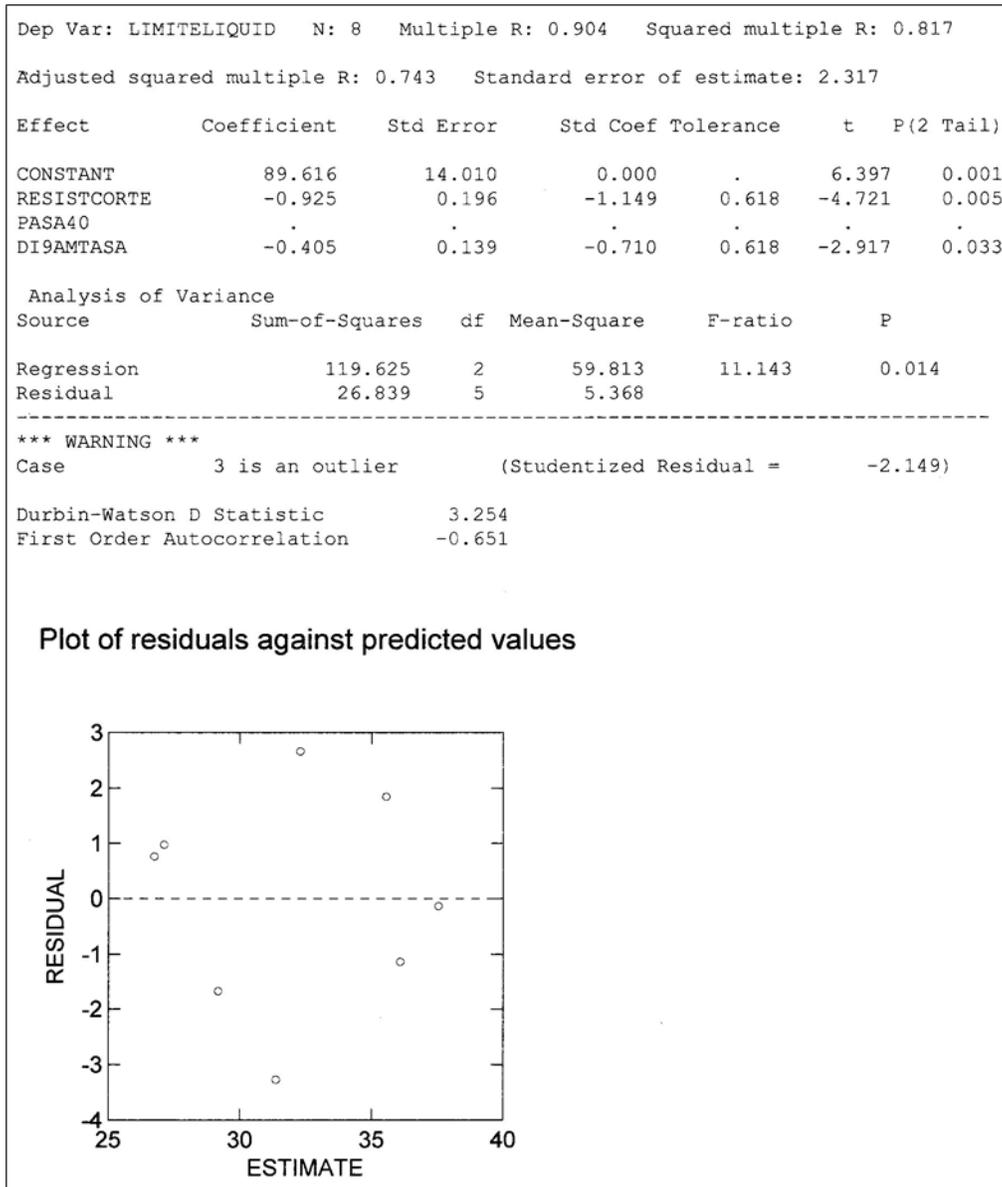


Figura 14: Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 36: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte, Mezcla Pasante # 40 y Diámetro de la Taza

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm ²)	% Mezcla Pasante N° 40	Diámetro de la Taza (mm)	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
32,23	100	55	37,53	37,4
27,80	100	70	35,55	37,4
38,89	100	55	31,37	28,1
36,91	100	70	27,12	28,1
43,89	100	55	26,74	27,51
34,69	100	70	29,18	27,51
37,90	100	55	32,28	34,95
27,22	100	70	36,09	34,95

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -0,925*(Resistencia\ al\ Corte) - 0,405*(Diámetro\ Taza) + 89,616$$

Análisis Estadístico Límite Líquido vs Resistencia al Corte (Muestra de tamaño 8)

Variable Dependiente: Límite Líquido

Variable Independiente: Resistencia al Corte

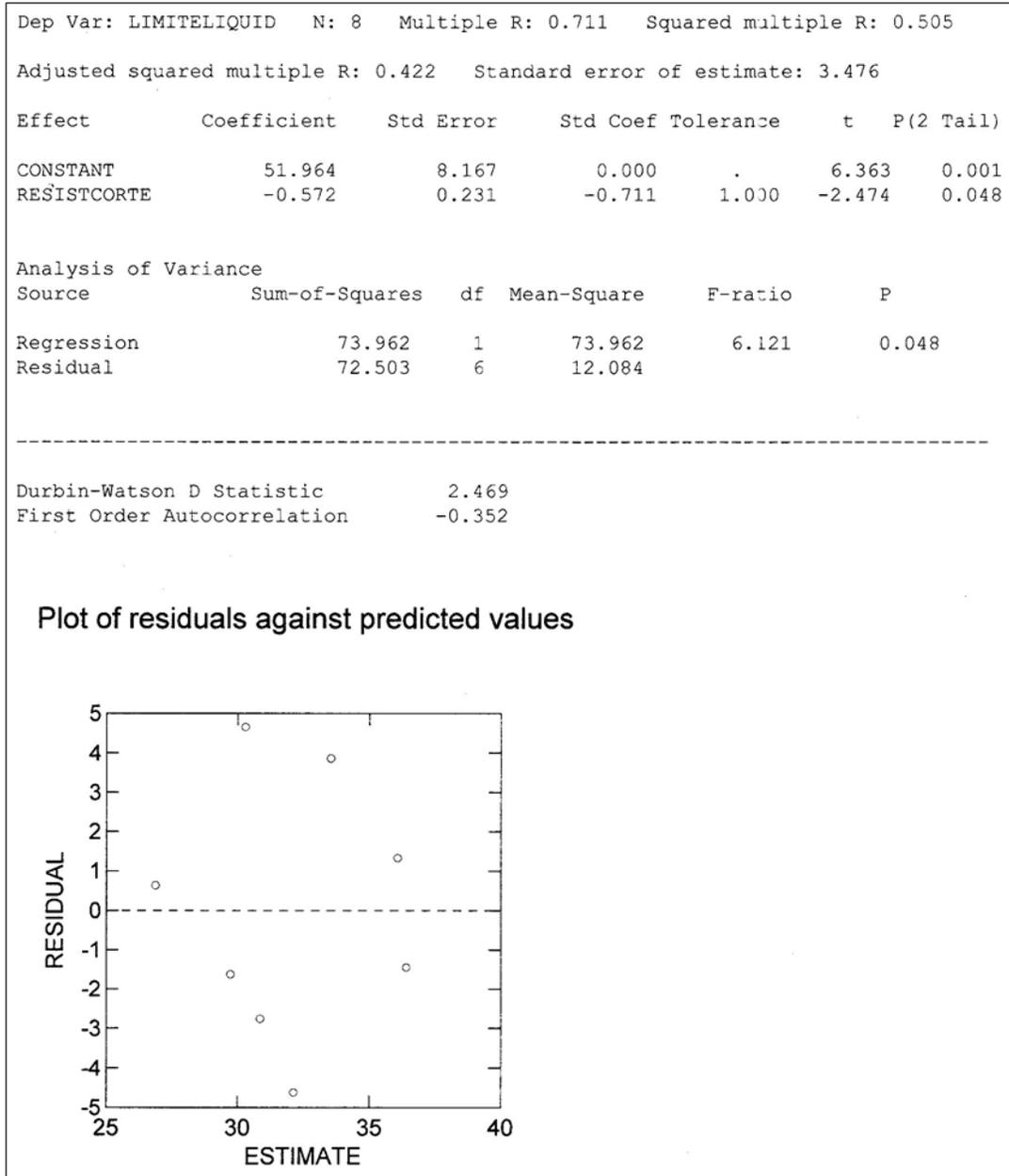


Figura 15 :Resultados extraídos del programa SYSTAT 11, con grafico de residuos vs estimación

Fuente: Programa SYSTAT 11

Tabla 37: Representación de los valores obtenidos de los ensayos por ecuación de regresión para el Límite Líquido vs la Resistencia al corte

Fuente: Elaboración propia

Resistencia al Corte (gr/cm2)	Límite Líquido Calculado por la Ec. De Correlación	Límite Líquido LL (%)
32,23	33,53	37,4
27,80	36,06	37,4
38,89	29,72	28,1
36,91	30,85	28,1
43,89	26,86	27,51
34,69	32,12	27,51
37,90	30,29	34,95
27,22	36,39	34,95

Ecuación de Correlación arrojada por el programa SYSTAT 11

$$LL = -0,572*(Resistencia\ al\ Corte) + 51,964$$

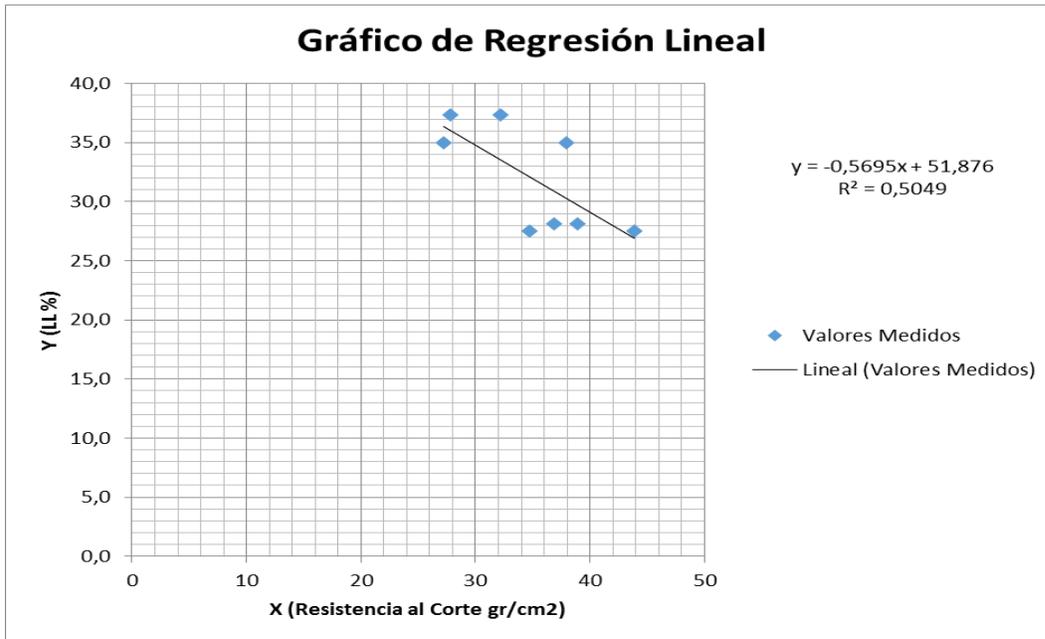


Gráfico 12: Regresión Lineal, representación del Límite Líquido vs Resistencia al corte

Fuente: Elaboración propia

Nota: Este gráfico indica una correlación buena, entre las variables estudiadas, sin embargo se puede notar a simple vista que pareciera bueno, debido al tamaño de la muestra estudiada.