



**Facultad de Ingeniería
Escuela de Construcción Civil**

**“Evaluación de la incorporación de Metacaolin
sobre el CBR y la expansión en suelos
granulares”**

Por

Carlos Ignacio Romero Llanos

Trabajo de Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la
Construcción y al Título de Ingeniero Constructor.

Prof. Guía: Nelson Ricardo Valdés Moya

Marzo, 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Luis y María Jesús por el apoyo durante todo este proceso, a mis hermanos y a Paula por el cariño.

A Don Juan Abarca y al profesor Nelson Valdés por la entrega y disponibilidad permanente ante cualquier inquietud.

A Emperatriz y Fabi por la buena disposición y voluntad durante todo el tiempo.

Finalmente, gracias a cada uno de los amigos, compañeros y profesores que fueron parte de esta etapa.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	2
INDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
1. Antecedentes generales	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Objetivos	16
1.2.1 General	16
1.2.2 Específicos	16
1.3 Alcances	16
1.4 Metodología de la investigación	17
1.5 Estructura de tesis	22
2. Mecánica de suelos y la estabilización	23
2.1 Clasificación de suelos	23
2.1.1 Generalidades	23
2.1.2 Granulometría	23
2.1.3 Límites de Atterberg.....	24
2.1.3.1 Límite Líquido	24
2.1.3.2 Límite Plástico	24
2.1.3.3 Índice de Plasticidad.....	25
2.1.4 Relaciones humedad/densidad	25
2.1.5 Capacidad de soporte C.B.R. y Expansión	25
2.2 Arena limosa (maicillo).....	26
2.3 Arena arcillosa	27
2.4 Metacaolin.....	28
2.5 Estabilización de suelos	29
2.5.1 Tipos de Estabilizaciones	29
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
3.1 Variables de la investigación	32
3.1.1 Variables independientes	32
3.1.2 Variables dependientes	33

3.1.2.1 Capacidad de soporte CBR (California bearing ratio):	33
3.1.2.2 Expansión volumétrica.....	33
3.2 Caracterización del metacaolin.....	33
3.2.1 Granulometría del Metacaolin.....	34
3.2.2 Peso específico del metacaolin	34
3.2.3 Índice de Plasticidad (IP) del metacaolin.....	35
3.3 Caracterización de los suelos: Etapa I	35
3.3.1 Obtención de los suelos granulares	35
3.3.2 Clasificación del suelo	35
3.3.3 Compactación del suelo	36
3.3.4 Capacidad de soporte (CBR)	36
3.3.5 Expansión volumétrica.....	36
3.4 Etapa II: Suelo-metacaolin.....	37
3.4.1 Suelo estabilizado con metacaolin	38
3.4.2 Compactación del suelo	39
3.4.3 Capacidad de Soporte	39
3.4.4 Expansión	39
4. DESARROLLO EN LABORATORIO	40
4.1 SUELO 1: Arena arcillosa.....	40
4.1.1 Etapa I: Caracterización del suelo patrón 1.....	40
4.1.1.1 Análisis Granulométrico.....	40
4.1.1.2 Límites de Atterberg del suelo natural 1	41
4.1.1.3 Clasificación del suelo natural 1	42
4.1.1.4 Proctor modificado suelo natural 1	44
4.1.1.5 Determinación de C.B.R suelo natural 1	45
4.1.1.6 Expansión Volumétrica para suelo natural 1	47
4.1.2 ETAPA II: Suelo Natural 1 – % Metacaolin	48
4.1.2.1 Límites de consistencia	48
4.1.2.2 Proctor Modificado suelo natural 1 – % Metacaolin	49
4.1.2.3 Capacidad de soporte suelo natural 1 – % Metacaolin	55
4.1.2.4 Expansión volumétrica suelo natural 1 - % Metacaolin.....	63
4.2 SUELO 2: Arena limosa.....	65
4.2.1 Etapa I: Caracterización del suelo patrón 2.....	65
4.2.1.1 Análisis Granulométrico.....	65
4.2.1.2 Límites de Atterberg del suelo natural 2.....	66
4.2.1.3 Clasificación del suelo natural 2	66
4.2.1.4 Proctor modificado suelo natural 2	68

4.2.1.5 Determinación de C.B.R. suelo natural 2	69
4.2.1.6 Expansión Volumétrica para suelo natural 2	71
4.2.2 ETAPA II: Suelo Natural 2 – % Metacaolin	72
4.2.2.1 Límites de consistencia	72
4.2.2.2 Proctor Modificado Suelo Natural 2 – % Metacaolin	72
4.2.2.3 Capacidad de soporte suelo natural 2 - % Metacaolin.....	76
4.2.2.4 Expansión volumétrica suelo natural 2 - % Metacaolin.....	82
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
5.1 Suelo 1 - % Metacaolin	84
5.1.1 Análisis comparativo del suelo	84
5.1.2 Densidad máxima compactada seca (DMCS)	85
5.1.3 Capacidad de soporte	85
5.1.4 Expansión Volumétrica.....	86
5.2 Suelo 2 - % Metacaolin	87
5.2.1 Análisis comparativo del suelo	87
5.2.2 Densidad máxima compactada seca (DMCS)	88
5.2.3 Capacidad de soporte	89
5.2.4 Expansión volumétrica	90
6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	91
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas 1.1: Dosificación suelo – Metacaolin (Proctor Modificado).	17
Tablas 1.2: Dosificación Suelo - Metacaolin (CBR).	18
Tabla 3.1: Granulometría Metacaolin.	34
Tabla 3.2: Ensayos a realizar en la etapa I.	37
Tabla 3.3: Ensayos a realizar en la etapa II.	38
Tabla 4.1: Granulometría promedio suelo natural.	40
Tabla 4.2: Ensayo límite líquido promedio suelo natural 1.	41
Tabla 4.3: Ensayo límite plástico promedio suelo natural 1.	42
Tabla 4.4: Determinación del índice de plasticidad promedio del suelo.	42
Tabla 4.5: Clasificación de suelos según Sistema USCS.	43
Tabla 4.6: Clasificación de suelos según Sistema AASHTO.	44
Tabla 4.7: Resultados Proctor modificado suelo natural 1 (promedio).	45
Tabla 4.8: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 1.	46
Tabla 4.9: Promedio CBR al 95% de DMCS y a 0,2” de penetración suelo natural 1.	46
Tabla 4.10: Grado de saturación promedio suelo natural 1.	47
Tabla 4.11: Expansión volumétrica de suelo natural.	47
Tabla 4.12: Resumen de suelo natural 1.	48
Tabla 4.13: Resumen de Límites de Consistencia Promedio suelo natural – % Metacaolin.	48
Tabla 4.14: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 5%.	50
Tabla 4.15: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 10%.	51
Tabla 4.16: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 15%.	52
Tabla 4.17: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 30%.	53
Tabla 4.18: Resumen Promedio Proctor Modificado suelo natural – porcentajes de metacaolin.	54
Tabla 4.19: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 5%.	56
Tabla 4.20: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 5%.	56
Tabla 4.21: Grado de saturación promedio - Metacaolin 5%.	57
Tabla 4.22: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 10%.	57
Tabla 4.23: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 10%.	58
Tabla 4.24: Grado de saturación promedio - Metacaolin 10%.	58
Tabla 4.25: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 15%.	59
Tabla 4.26: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 15%.	59

Tabla 4.27: Grado de saturación promedio - Metacaolin 15%.....	60
Tabla 4.28: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 30%.	60
Tabla 4.29: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 30%.....	61
Tabla 4.30: Grado de saturación promedio - Metacaolin 30%.....	61
Tabla 4.31: Resumen Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural – % de metacaolin.....	62
Tabla 4.32: Expansión volumétrica suelo natural - % Metacaolin.	63
Tabla 4.33: Resumen etapa II, suelo natural 1 - % Metacaolin.	64
Tabla 4.34: Granulometría promedio suelo natural 2.....	65
Tabla 4.35: Clasificación de suelos según Sistema USCS.....	67
Tabla 4.36: Clasificación de suelos según Sistema AASHTO.....	68
Tabla 4.37: Resultados Proctor modificado suelo natural 2 (promedio).	68
Tabla 4.38: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2.	70
Tabla 4.39: Promedio CBR al 95% de DMCS y a 0,2" de penetración suelo natural 2.....	70
Tabla 4.40: Grado de saturación promedio suelo natural 2.....	71
Tabla 4.41: Expansión volumétrica de suelo natural 2.	71
Tabla 4.42: Resumen de suelo natural 2.	71
Tabla 4.43: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 2 – metacaolin 5%.....	72
Tabla 4.44: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 2 – metacaolin 10%.	73
Tabla 4.45: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 2 – metacaolin 15%.	74
Tabla 4.46: Resumen Proctor Modificado suelo natural 2 – porcentajes de metacaolin.....	75
Tabla 4.47: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 5%.	77
Tabla 4.48: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 5%.	78
Tabla 4.49: Grado de saturación promedio - Metacaolin 5%.....	78
Tabla 4.50: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 10%.	78
Tabla 4.51: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 10%.	79
Tabla 4.52: Grado de saturación promedio - Metacaolin 10%.....	79
Tabla 4.53: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 15%.	80
Tabla 4.54: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 15%.	81
Tabla 4.55: Grado de saturación promedio - Metacaolin 15%.....	81
Tabla 4.56: Resumen promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural – % de metacaolin.....	81
Tabla 4.57: Expansión volumétrica suelo natural - % Metacaolin.	82

Tabla 4.58: Resumen etapa II, suelo natural 2 - % Metacaolin.	83
Tabla 5.1: Resumen de resultados obtenidos para suelo 1 – SC(CL).....	84
Tabla 5.2: Suelo natural v/s Suelo + contenido óptimo de metacaolin.	84
Tabla 5.3: Resumen de resultados obtenidos para suelo 2 – (SW-SM).....	87
Tabla 5.4: Suelo natural v/s Suelo + contenido óptimo de metacaolin.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Curva granulométrica Metacaolin.	34
Figura 4.1: Curva granulométrica promedio suelo natural.	40
Figura 4.2: Curva de fluidez suelo natural 1.	41
Figura 4.3: Proctor modificado promedio suelo natural 1.	45
Figura 4.4: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1.	46
Figura 4.5: % de Metacaolin v/s Índice de Plasticidad.	49
Figura 4.6: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 5%.	50
Figura 4.7: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 10%.	51
Figura 4.8: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 15%.	52
Figura 4.9: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 30%.	53
Figura 4.10: % de metacaolin v/s DMCS.	54
Figura 4.11: % de metacaolin v/s H. óptima.	55
Figura 4.12: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 5%.	56
Figura 4.13: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 10%.	58
Figura 4.14: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 15%.	59
Figura 4.15: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 30%.	61
Figura 4.16: % CBR v/s % de metacaolin.	62
Figura 4.17: Comportamiento de la expansión v/s contenido de metacaolin.	63
Figura 4.18: Curva granulométrica promedio suelo natural.	65
Figura 4.19: Proctor modificado promedio suelo natural 2.	69
Figura 4.20: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2.	70
Figura 4.21: Proctor modificado promedio suelo natural 2 – metacaolin 5%.	73
Figura 4.22: Proctor modificado promedio suelo natural 2 – metacaolin 10%.	74
Figura 4.23: Proctor modificado promedio suelo natural 2 – metacaolin 15%.	75
Figura 4.24: % de metacaolin v/s DMCS.	76
Figura 4.25: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 5%.	77
Figura 4.26: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 10%.	79
Figura 4.27: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 15%.	80
Figura 4.28: % CBR v/s % de metacaolin.	82
Figura 4.29: Comportamiento de la expansión v/s contenido de metacaolin.	83
Figura 5.1: Variación de la DMCS suelo 1.	85
Figura 5.2: Variación de la capacidad de soporte suelo 1.	86
Figura 5.3: Variación de la expansión volumétrica suelo 1.	87
Figura 5.4: Variación de la DMCS suelo 2.	88

Figura 5.5: Variación de la capacidad de soporte suelo 2.	89
Figura 5.6: Variación de la expansión volumétrica suelo 2.....	90

RESUMEN

El suelo es el material de construcción más antiguo y abundante del mundo, a pesar de ser muy utilizado presenta limitaciones en su aplicación debido a que su resistencia mecánica es limitada, es vulnerable a la humedad y erosiona por acción de agentes externos (Barros & Imhoff, 2010), por lo que siempre se procede a extraer el suelo de mala calidad y reemplazarlo por uno de mejor calidad, enviando el suelo extraído a botaderos.

El objetivo del presente trabajo es estabilizar dos tipos de suelos; uno granular con plasticidad y otro granular sin plasticidad, para así mejorar su capacidad de soporte, y promover la utilización de los suelos locales. Se tiene una muestra patrón, que corresponde a los suelos en su estado natural (sin presencia de metacaolin), y se busca evaluar la influencia que tendría la adición de metacaolin en diferentes dosis sobre la capacidad de soporte CBR de los suelos y la expansión.

Se espera que con adiciones de metacaolin en diferentes dosis la capacidad de soporte de los suelos mejore a la vez que su expansión volumétrica se reduzca con respecto al suelo patrón, obteniendo una solución más resistente y menos expansiva, por lo que estos suelos técnicamente podrían ser utilizados en la construcción de subrasantes u otras aplicaciones.

ABSTRACT

Soil is the oldest and most abundant building material in the world, although it is widely used, it has limitations in its application because its mechanical resistance is limited, it is vulnerable to moisture and erodes by the action of external agents (Barros & Imhoff, 2010), so we always proceed to extract the poor quality soil and replace it with one of better quality, sending the extracted soil to dumps.

The objective of the present work is to stabilize two types of soils; one granular with plasticity and another granular without plasticity, in order to improve its support capacity, and promote the use of local soils. There is a standard sample, which corresponds to the soils in their natural state (without the presence of metacaolin), the aim is to evaluate the influence that the addition of metacaolin in different doses on the CBR support capacity of soils and expansion would have.

It is expected that with additions of metacaolin in different doses the soil support capacity will improve while its volumetric expansion will be reduced with respect to the standard soil, obtaining a more resistant and less expansive solution, so these soils could technically be used in the construction of subgrade or other applications.

1. Antecedentes generales

1.1 Planteamiento del problema

Los suelos son el material de construcción más antiguo y complejo (Sánchez, 2006), además, el más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente, donde se ha utilizado desde hace muchos años en la construcción de sub-rasantes para vías de comunicación (Lambe & Whitman, 1972).

Viñuelas (2007), señala que el suelo posee un grupo importante de ventajas como material de construcción, entre ellas, que es un material inocuo, no contiene ninguna sustancia tóxica, es reciclable, fácil de obtener localmente con poco gasto energético, sin embargo, a pesar de sus características aislantes, inerciales y resistentes, la tierra presenta limitaciones en su aplicación. Su resistencia mecánica es reducida, vulnerable a la humedad y se erosiona por acción de agentes externos (Barros & Imhoff, 2010). Además, un grupo de suelos llamados expansivos o activos, hacen parte de los llamados suelos “problemas”, y son suelos arcillosos que cambian de consistencia debido a variaciones en el contenido de humedad, afectando principalmente su resistencia mecánica y estabilidad volumétrica originando la formación de fisuras y grietas en estructuras livianas como pavimentos y, en general en cualquier obra (Meza, 2012). Este comportamiento de los suelos expansivos se atribuye a la presencia de Mineral montmorillonita, que tiene una red en expansión por moléculas de agua. Muchas investigaciones, en todo el mundo, están trabajando para métodos de tratamiento de los suelos, que sean más efectivos y prácticos, para mitigar los problemas planteados en la construcción de pavimentos sobre suelos expansivos (Gor et ál., 2013).

La construcción de subrasantes para obras viales, como principio, se basa en el aprovechamiento de terrenos locales como material de fácil obtención y de bajo costo, pero que en ocasiones necesitan ser mejorados, dado que no cumplen las exigencias mínimas para su empleo (Junco, 2011).

Frente a estas situaciones es frecuente que el ingeniero encuentre inadecuados, en algún sentido, los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico (Mahon et ál., 1969), por lo que se hace necesaria su estabilización. Se denomina estabilización de suelos al proceso de someter los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades, de manera que puedan soportar las condiciones adversas de clima, rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera (Crespo, 1998), además, se define como el Conjunto de procesos físicos, químicos, y físico-químicos que pretenden modificar las propiedades de los suelos que interesan para un determinado uso en ingeniería (Alvarez, 2010). La estabilización permite minimizar el impacto al

entorno (Molero & Galvis, 2011), debido a que el aprovechamiento de suelos locales o de la traza contribuye a evitar el uso de áridos de calidad, y con ello, reducir los yacimientos o recursos naturales disponibles, se disminuye la necesidad de vertederos (Diaz, 2011), La eliminación del transporte de los suelos disminuye las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, y reduce el daño que generan los combustibles y aceites (IECA, 2013). Sin lugar a dudas la estabilización de suelos se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas se suman importantes beneficios económicos (IECA, 2011).

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, que al ser mezclados, normalmente se produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí produciendo un incremento en su resistencia (De Solminihac et ál., 2012). Estos aditivos pueden ser de tipo puzolánicos, que son aquellos de composición rica en SiO₂ (Orziola, 2006).

Además de los materiales cementicios suplementarios de origen artificial (la microsilíce, la escoria granulada de alto horno y las cenizas volantes), se encuentran otros de origen natural como lo son ciertas arcillas (metacaolin) y puzolanas volcánicas naturales. Estas últimas de gran abundancia en Centroamérica y América del Sur (Mehta & Monteiro, 2006).

Actualmente, uno de los materiales cementicios suplementarios más estudiados y usados los constituyen las arcillas calcinadas en forma de metacaolin. Estos materiales, obtenidos a partir del tratamiento térmico de depósitos naturales de mineral caolín, muestran excelentes propiedades puzolánicas debido fundamentalmente a su composición química, estructura amorfa, y alta superficie específica (Goncalves et ál., 2009).

En la obtención del metacaolin, se sabe que a mayor temperatura de calcinación mayor es su índice de actividad puzolánica. Según algunos estudios realizados se ha llegado a la conclusión que la temperatura de calcinación que brinda las mejores propiedades puzolánicas son los 950° C, donde su uso en hormigones ha alcanzado los mejores resultados mecánicos y de durabilidad (Acuña & Figueredo, 2006).

En la actualidad se señala que el metacaolin es uno de los materiales puzolánicos más utilizados en la industria de la construcción, sobre todo para la producción de concretos de alto desempeño, considerado como puzolana de alta reactividad (Torres et ál.,2011). Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad

(Restrepo et ál., 2006). Echeverría (2014) agrega que su actividad puzolánica, a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes.

Buscando crear nuevas soluciones constructivas se evaluará la incorporación de metacaolín sobre el CBR y la expansión en dos tipos de suelos.

La investigación se centrará en el análisis del comportamiento que presenta la adición de metacaolín, para luego utilizarlo parcialmente en dos suelos granulares de la quinta región. El estudio con esta mezcla suelo-metacaolín se concentrará en utilizar este último producto como estabilizante y así, mejorar la capacidad de soporte CBR, mejorando la resistencia al esfuerzo cortante y, además, reducir la expansión volumétrica del suelo.

La investigación se va a complementar con ensayo granulométrico, ensayo proctor y límites de atterberg. Se busca encontrar un nuevo material con la dosis adecuada que sirva para incorporar a los suelos granulares que necesitan ser estabilizados mejorando su capacidad portante, mejorar sus propiedades físicas y lograr aportar al medio ambiente a través del reciclaje del suelo local, reduciendo la explotación de los yacimientos o recursos naturales.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Evaluar la incorporación de metacaolín sobre el CBR y la expansión en suelos granulares.

1.2.2 Específicos

- Determinar la influencia del metacaolín en la capacidad de soporte (CBR) de los suelos.
- Determinar la influencia del metacaolín en la expansión de los suelos.

1.3 Alcances

- Se trabajará con metacaolín reciclado de la empresa Industrias Princesa Ltda., el cual se produce al calcinar el caolín a una temperatura de 920°C.
- La investigación se realizará con un suelo granular que posee plasticidad y un suelo granular sin plasticidad, ambos obtenidos de la quinta región, comuna de Casablanca.
- Todas las pruebas, análisis y conclusiones se basarán en la información obtenida en los ensayos realizados en el laboratorio de la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso.

1.4 Metodología de la investigación

Para realizar este trabajo fue necesario comenzar con una revisión bibliográfica del tema que se quiere desarrollar, que trata acerca de la estabilización y la adición de puzolanas con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos. Se logró conocer más acerca de otras investigaciones realizadas y a través de estas se desarrolló el estado del arte del tema investigado, de donde se pudo desprender un problema, que será donde se basará la investigación. También se definen los objetivos generales, objetivos específicos y alcances de la investigación.

Cuando tenemos nuestros objetivos en torno a los cuales se va a desarrollar la investigación, será necesario definir variables dependientes e independientes como también será necesario definir los factores (contenido de metacaolin). Una vez definidos estos factores, se puede continuar con los ensayos de laboratorio necesarios para determinar la capacidad de soporte de los suelos y su expansividad. Las propiedades a evaluar serán; granulometría, límites de atterberg, Proctor modificado, capacidad de soporte (CBR) y expansión. Estos ensayos serán realizados a una muestra patrón para saber cuál es su capacidad de soporte en su estado natural y a la vez determinar si se trata de un suelo expansivo o no, posteriormente se realizarán los ensayos de Proctor modificado y capacidad de soporte (CBR) a los suelos con adiciones de 5%, 10% y 15% de metacaolin, y de esta manera comparar los resultados obtenidos con la muestra patrón.

Muestras:

Se realizarán las siguientes mezclas, en peso, por cada ensayo que se realice:

Ensayos: Relaciones humedad/densidad

Tablas 1.1: Dosificación suelo – Metacaolin (Proctor Modificado).

	% Suelo 1	% metacaolin		% Suelo 2	% metacaolin
Ensayo 1	95	5	Ensayo 1	95	5
Ensayo 2	90	10	Ensayo 2	90	10
Ensayo 3	85	15	Ensayo 3	85	15

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Ensayos: Capacidad de soporte (CBR)**Tablas 1.2: Dosificación Suelo - Metacaolin (CBR).**

	% Suelo 1	% metacaolin		% Suelo 2	% metacaolin
1	95	5	1	95	5
2	90	10	2	90	10
3	85	15	3	85	15

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Ensayos en laboratorio:

Metacaolin:

- Se utilizará metacaolin reciclado de la empresa Industrias Princesa Ltda.
- La obtención del metacaolin se dará mediante la molienda de ladrillos que tienen como materia prima el caolín y otras arcillas caoliníticas.
- La temperatura a la que se calcinan llega a un máximo de 920°C.

Granulometría de los áridos:

- Se utilizarán suelos granulares de acuerdo al procedimiento de la norma chilena NCh165.Of2009.

Proctor modificado: % metacaolin (5% - 10% - 15%)

- Por cada porcentaje de adición de metacaolin se realizarán 3 ensayos de Proctor modificado para determinar la relación entre la humedad y la densidad de acuerdo al procedimiento de la norma chilena NCh1534/2. Of2008, donde por cada ensayo se dispondrá de 5 probetas, dando un total de 15 probetas por cada porcentaje de metacaolin.

Para este ensayo se va a utilizar un molde metálico, cilíndrico de 100 mm de diámetro nominal, con una capacidad (V) de 0,944 +/- 0,008 L, con un diámetro interno de 101,6 +/- 0,4 mm y una altura de 116,4 +/- 0,1 mm.

Capacidad de soporte (CBR): % metacaolin (5% - 10% - 15%)

- Por cada porcentaje de adición de metacaolin se realizarán 3 ensayos para determinar la razón de soporte de los suelos compactados en laboratorio de acuerdo al procedimiento de la norma chilena NCh1852.Of2010, donde por cada ensayo se dispondrá de 3 probetas compactadas con 10, 25 y 56 golpes de pisón, dando un total de 9 probetas por cada porcentaje de metacaolin.

Para este ensayo se va a utilizar un molde metálico, cilíndrico con un diámetro interno de 152,4 +/- 0,7 mm y una altura de 177,8 +/- 0,1 mm, que además debe tener un collar de extensión metálico de 50,8 mm de altura.

Expansión: % metacaolin (5% - 10% - 15%)

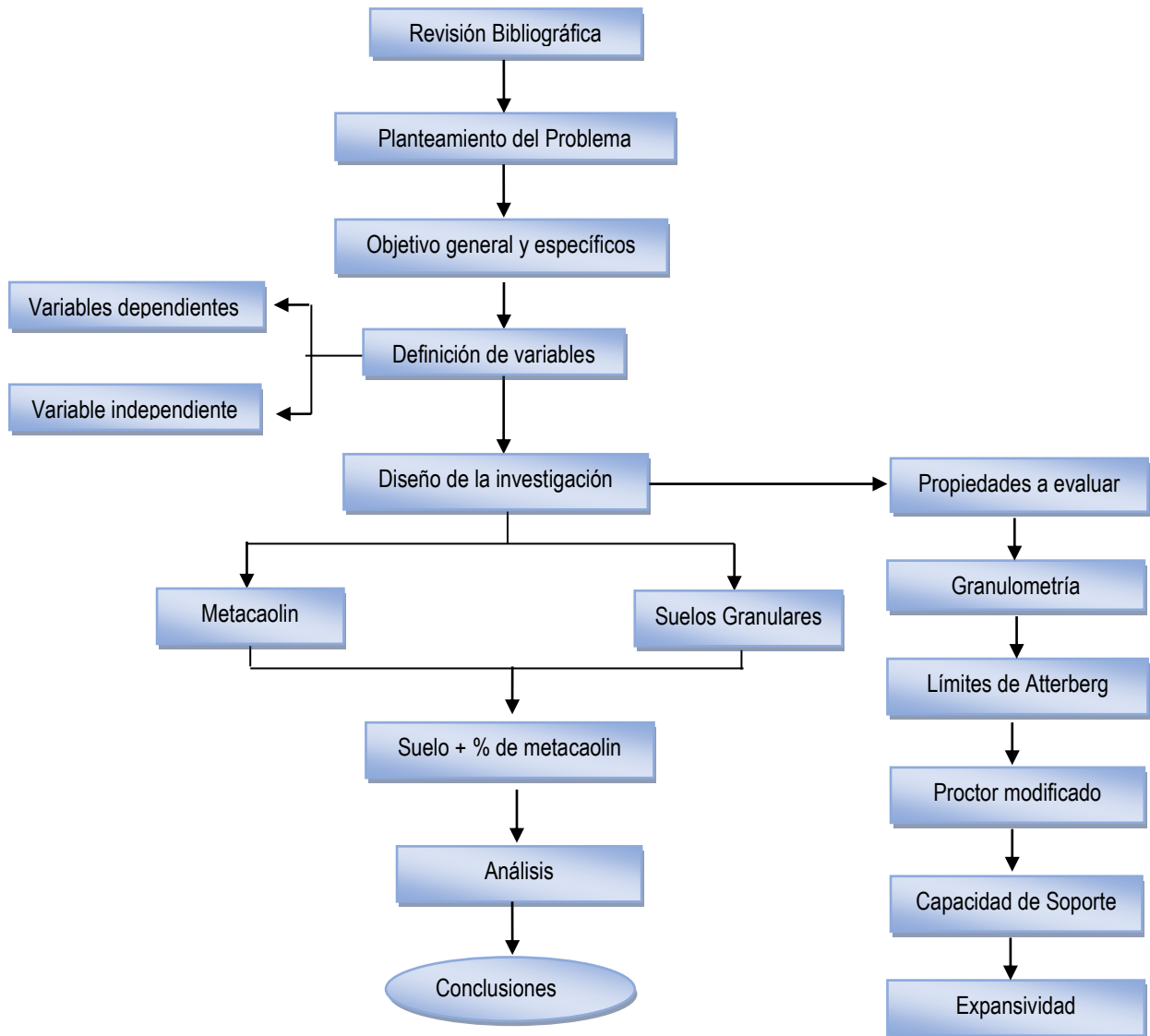
- A través del ensayo de capacidad de soporte vamos a determinar la expansión de los suelos en los porcentajes de adición determinados. Se van sumergir las probetas durante 96 horas, habiendo registrado primeramente las mediciones iniciales para la expansión y asentamiento, y luego al término del periodo de inmersión se van a tomar las mediciones finales de la expansión y se calculará como porcentaje de la altura inicial de la probeta. Este ensayo de laboratorio se realizará de acuerdo al procedimiento de la norma chilena NCh1852 Of2010.

Luego de realizados los ensayos de laboratorio bajo las normas chilenas:

- NCh1515. Of79: Determinación de la humedad.
- NCh165. Of.2009: Áridos para morteros y hormigones. Tamizado y determinación de la granulometría.
- NCh1517/1. Of79. Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido.
- NCh1517/2. Of79. Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico.

- NCh1534/2. Of2008. Mecánica de suelos - Relaciones humedad/densidad -. Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída.
- NCh1852. Of2010. Mecánica de suelos – Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio.

Se realizará un análisis de los resultados obtenidos en laboratorio a través de los cuales podremos determinar cuál fue la adición que brindó los mejores resultados tanto de resistencia como en disminución de la expansión, y así a través de estos realizar las conclusiones pertinentes a la investigación.

Metodología de trabajo:

1.5 Estructura de tesis

La presente tesis está organizada en 6 capítulos con el fin de dar cumplimiento a los objetivos establecidos en esta investigación.

En el capítulo I se plantea el problema que da origen a la presente investigación, justificando las razones de su elección y así, exponer lo que se espera conseguir con el estudio, estableciendo objetivos y alcances.

En el capítulo II se desarrolla el marco teórico, donde se destacan términos, definiciones, características y normas asociadas a la mecánica de suelos, arcillas, suelos arcillosos, maicillo y por último se presentan las propiedades y características del metacaolin.

En el capítulo III se describe el programa experimental, respecto a las variables involucradas y sus factoriales de laboratorio, siendo este uno de los más importantes debido a que a través de lo planteado en este capítulo se debe lograr alcanzar los objetivos planteados en esta investigación.

En el capítulo IV se da comienzo a la realización de la investigación en los laboratorios, ejecutando los ensayos y etapas propuestas en el capítulo anterior.

En el capítulo V se presenta el análisis de los resultados obtenidos, a partir de los distintos ensayos de laboratorio realizados.

El capítulo VI presenta las conclusiones obtenidas en función a los objetivos planteados, trabajo experimental y análisis de datos.

2. Mecánica de suelos y la estabilización

2.1 Clasificación de suelos

2.1.1 Generalidades

Como etapa inicial se realizarán tres ensayos de análisis granulométricos para así obtener el porcentaje de finos que pasan por la malla N°200.

Posterior a esto, se procede a determinar los límites de consistencia o atterberg de acuerdo a la norma NCh 1517.Of 79, donde se podrá determinar el límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad para cada una de las tres muestras de suelo.

Con los resultados de los ensayos antes mencionados se procede a realizar la clasificación de suelos mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) y el sistema AASHTO, ingresando a las tablas, obteniendo así el grupo al cual pertenece cada suelo.

2.1.2 Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución en porcentaje de los distintos tamaños dentro de un suelo.

El análisis granulométrico por tamizado es un proceso mecánico desarrollado en laboratorio bajo el procedimiento que establece la norma Nch 3236-2010, haciendo pasar suelo seco bien desmenuzado por diferentes tamices que van en orden decreciente para así separar las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra.

2.1.3 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos.

Se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según la humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco. Al agregarle agua va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente Líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

El método usado para medir estos límites se conoce como método de atterberg, debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg (1846-1916), el cual posteriormente fueron redefinidos por Casagrande para su uso en la mecánica de suelos de la manera como hoy se conocen.

2.1.3.1 Límite Líquido

El Límite líquido representa el menor contenido de humedad necesario para reducir la masa de suelo a una condición de semi-fluido, con una cohesión insignificante, expresado como porcentaje respecto al peso del suelo seco.

Está definido, como el contenido de humedad con el cual una masa de suelo colocada en un recipiente en forma de cuchara (aparato de Casagrande), se separa con una herramienta patrón (ranurador), se deja caer desde una altura de 1 centímetro y sufre el cierre de esa ranura en 1 centímetro después de 25 golpes de la cuchara contra una base de caucho dura o similar. (NCh 1517/1.Of.1979)

2.1.3.2 Límite Plástico

El límite plástico es el menor contenido de agua para el cual el suelo mantiene características plásticas, expresado como porcentaje respecto al peso del suelo seco.

Se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro de éste se rompe o resquebraja al amasado presentando un diámetro de aproximadamente 3 mm. (NCh 1517/2.Of.1979).

2.1.3.3 Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad se define como la diferencia numérica que hay entre el límite líquido y el límite plástico, y corresponde a la capacidad que posee un suelo de absorber agua sin perder su cohesión o pasar al estado semi-fluido, conservándose en su estado plástico.

2.1.4 Relaciones humedad/densidad

Para determinar la relación de humedad – densidad se realizan ensayos como el proctor estándar y el proctor modificado. El ensayo consiste en compactar muestras de un mismo suelo en un molde metálico de volumen conocido, pero con distintas humedades crecientes y con la misma energía de compactación. Se registran las densidades secas y el contenido de humedad de cada molde (ideal 5), graficando los resultados, dando origen a la curva humedad/densidad, donde el punto más alto de la curva representa la densidad máxima y su proyección en la abscisa la humedad óptima. Este procedimiento se encuentra normalizado a través de NCh 1534 I / II Of.2008.

2.1.5 Capacidad de soporte C.B.R. y Expansión

Este método consiste en medir la presión necesaria para hacer penetrar un pistón de 50 mm de diámetro en una masa de suelo compactada en un molde cilíndrico de acero, a una velocidad de 1,27 mm/min, para producir deformaciones de hasta 12,7 mm (1/2"). El índice CBR es la relación, expresada en porcentaje, entre dicha presión y la que se requiere para producir las mismas deformaciones en un material chancado normalizado, al cual se le asigna un valor de 100%. Para la ejecución del ensayo se compactan al menos tres probetas con la humedad óptima y niveles de densidad variables (56, 25 y 10 golpes) (NCh 1852.Of.2010).

Antes de determinar la resistencia a la penetración, generalmente las probetas se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables y para determinar su posible expansión, esto debido a que las precipitaciones anuales de la quinta región son superiores a 50 mm.

- **Manual de Carreteras:**

1.- Materiales inadecuados: Se considerarán materiales inadecuados aquellos que cumplan con al menos una de las siguientes condiciones:

- a) Materiales con un poder de soporte inferior a 3% CBR. No se considerará material inadecuado, aquel que teniendo un soporte inferior a 3% CBR, medido a densidad natural, pueda ser compactado en sitio y lograr un soporte igual o superior a 3% CBR.
- b) Materiales que contengan más de 3% en peso de materia orgánica seca al horno a 60°C.
- c) Material cuyo porcentaje de expansión sea mayor que 3%.

2.- Terraplenes: Según lo indicado en el manual de carreteras, los materiales a emplear en la construcción del cuerpo de los terraplenes deberán tener un poder de soporte no inferior a 10% CBR, medido a 95% de la DMCS.

2.2 Arena limosa (maicillo)

El maicillo es el producto de la meteorización de rocas graníticas del batolito costero y es uno de los suelos residuales más comunes y abundantes en Chile. Se clasifica como arena arcillosa en superficie, para transformarse en arena limosa en profundidad. El batolito costero es una gran masa de roca intrusiva que se ha formado en paralelo a la zona de subducción, a partir del enfriamiento del magma a varios kilómetros de profundidad y que se emplaza a lo largo de la cordillera de la costa desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta en el sur de Chile.

El maicillo presenta una composición tan compleja que es imposible establecer si su respuesta mecánica corresponde a la de una roca meteorizada o de un suelo o probablemente la mezcla de ambos.

Los problemas que se presentan en el maicillo afectan la estabilidad de taludes de caminos forestales, así como la estabilidad de viviendas que se fundan sobre él. Este tipo de suelo puede mantener los planos de clivaje o diaclasas de la roca granítica que le dio origen, los que en ocasiones se encuentran arcillizados, constituyendo planos de debilidad. Según la frecuencia y orientación de estos planos con respecto al talud del corte se generan deslizamientos a través de ellos, dando origen a fallas de talud que van desde desprendimientos locales a fallas masivas. Las diaclasas heredadas de

la roca granítica madre poseen resistencia al corte muy baja en condiciones normales que disminuyen drásticamente esta resistencia por la acción del agua.

2.3 Arena arcillosa

Corresponde a arena que contiene una proporción aproximada de arcilla del 10% o más, obteniendo características intermedias entre los suelos arenosos y los suelos arcillosos.

Entendemos por arena un conjunto de fragmentos sueltos de rocas o minerales de pequeño tamaño, entre los 0,063 y 2 milímetros. Toda partícula dentro de ese rango será un “grano de arena”. Si una multitud de estas partículas componen una piedra mayor, se denomina arenisca.

La composición de la arena varía de un lugar a otro. El sílice, generalmente en forma de cuarzo, es uno de los componentes más habituales. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones locales de la roca. Por ejemplo, la caliza molida se encuentra en su mayoría en los arrecifes de coral, y en otros lugares puede hallarse arena con hierro o feldespato. Dependiendo de la roca de la que proceda, su apariencia varía.

Generalmente la arena tiene un origen natural: se extrae de canteras aluviales, ríos, lagos o depósitos volcánicos, pero también se puede obtener en forma artificial mediante la trituración de rocas por medios mecánicos.

Estos tipos de suelos, cuando carecen de finos, son permeables, fáciles de compactar, la humedad los afecta solo ligeramente y no se ven sujetos a la acción de las heladas. Las arenas compactadas, bien graduadas son materiales muy estables.

Por otro lado, la Arcilla es un tipo de Roca Natural Sedimentaria proveniente de la descomposición de las Rocas Feldespato, siendo un silicato de aluminio hidratado. Es un material terroso de grano muy fino (diámetro de partículas menor que 0,002 mm) y capaz de convertirse en una masa plástica al mezclarse con cierta cantidad de agua. Las arcillas son finos plásticos; tienen baja resistencia a la deformación en estado húmedo, pero, al secarse, forman masas cohesivas y duras. Las arcillas son virtualmente impermeables, difíciles de compactar cuando están húmedas e imposibles de drenar por medios ordinarios. Son características de algunas arcillas, las grandes expansiones y contracciones que sufren de acuerdo con los cambios en su contenido de agua.

Los minerales de arcilla poseen dos componentes estructurales básicos: uno es el tetraedro de Silicio – Oxígeno y el otro es el octaedro, en el cual un átomo de aluminio, magnesio y/o hierro es rodeado por seis aniones.

2.4 Metacaolín

El metacaolín (MK) es un material cementante suplementario, producido por el tratamiento térmico del caolín (Mineral que existe en la naturaleza) a temperaturas alrededor de los 600°C. El caolín consta de capas alternativas de sílice y alúmina. Esta estructura cristalina laminar, eléctricamente neutra y común a los minerales arcillosos, da lugar a partículas muy finas y permite que éstas se desplacen fácilmente las unas sobre las otras. A esta estructura debe el material sus propiedades físicas más características: la suavidad, el tacto jabonoso y la facilidad de exfoliación (Kingery et ál., 1976).

Químicamente, el caolín es un filosilicato formado por capas alternadas de tetraedros de sílice (SiO_2) y octaedros de alúmina (Al_2O_3) unidas por grupos hidroxilo (OH). Esta estructura cristalina, eléctricamente neutra, conduce a pequeños tamaños de partícula y a una morfología laminar permitiendo a las partículas moverse fácilmente unas sobre otras. La caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es el término mineralógico para el principal componente del caolín (40-70%). Otros materiales constituyentes del caolín son dickita, nacrita y halloysita acompañadas por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados (Siddique, 2007).

El caolín, es una arcilla blanca y fina que se utiliza para la fabricación de porcelanas, papel, plásticos, cosméticos y pintura, entre otros.

Cuando el mineral caolín se somete a un tratamiento térmico, se crea una fase de transición (fase amorfa) de elevada reactividad. Este tratamiento térmico (calcinación) descompone la estructura del caolín de forma que las capas de alúmina y sílice pierden su orden estructural de largo alcance, conduciendo a la formación del metacaolín (MK). Este material puzolánico amorfo presenta propiedades hidráulicas latentes que permiten su utilización como materiales cementicios suplementarios.

En el área de la mecánica de suelos se señala que se ha conseguido importantes mejoras en la capacidad de soporte de estos, además, consiguiendo suelos más estables volumétricamente, convirtiéndolos en suelos aptos para soportar estructuras livianas como pavimentos.

2.5 Estabilización de suelos

El suelo en un sitio de construcción que no siempre será totalmente adecuado para soportar estructuras como edificios, puentes, carreteras y presas, esto debido a que a pesar de las buenas características que poseen, los suelos presentan limitaciones en su aplicación, debido a que su resistencia mecánica es reducida, muchas veces son vulnerables a la humedad y erosionan por acción de agentes externos.

La decisión de estabilizar un suelo o no, cae en los resultados de un análisis económico que considere los costos de la sustitución del suelo inadecuado y el de los diferentes métodos de estabilización.

La estabilización de suelos consiste en un tratamiento químico o mecánico para mejorar o mantener la estabilidad de una masa de suelo o para mejorar sus propiedades ingenieriles, características físicas indeseables del suelo para obtener una estructura, resistencia al corte y relación de vacíos deseables, aprovechando así las mejores cualidades de este.

La necesidad de estabilizar un suelo puede deberse a algunos de los siguientes requerimientos; Disminuir asentamientos de estructuras, disminuir el potencial de expansión y contracción de los suelos, aumentar la resistencia, facilitar el trabajo de construcción, reducir la permeabilidad y por escases de materiales de construcción.

La estabilización, se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas, se suman importantes beneficios económicos.

2.5.1 Tipos de Estabilizaciones

a) Estabilización física de suelos:

La estabilización como tratamiento físico permite modificar las características de los suelos. Las formas más comunes de hacerlo son a través de mezcla de suelos o la incorporación de un geotextil.

Mezclas de suelos: Técnica consistente en combinar dos o más suelos de diferentes propiedades fisicoquímicas con el objetivo de lograr una única capa de suelo resultante cuyas propiedades geotécnicas sean mejores que las de los suelos por separado. Lo que se busca es una adecuada granulometría. Se hacen generalmente cuando la sub-rasante o la estructura del pavimento no cumplen con los requerimientos del proyecto o bien el material encontrado no sirve para utilizarlo como sub-base o base. Usualmente se usa material granular procesado, ya que de esa forma cumple con todas las condiciones que exige un determinado proyecto.

Geotextiles: Son telas permeables no biodegradables que pueden emplearse como filtros y para controlar la erosión de suelos. La utilización de los geotextiles es recomendable en la construcción de terraplenes, carreteras, caminos no pavimentados, pistas mineras, aeropuertos, zonas de aparcamiento, bajo balasto en construcciones ferroviarias y demás obras proyectadas sobre suelos de limitada resistencia al corte. Sus buenas características de resistencia a la tracción longitudinal y transversal, así como su alta resistencia al punzonamiento, mejoran la capacidad portante del suelo y aportarían estabilidad y refuerzo al sistema constructivo.

b) Estabilización química de suelos

La estabilización química de suelos consiste en incorporar compuestos químicos que reaccionan con el suelo natural, modificando las propiedades y comportamientos mecánicos del mismo, y en algunos casos, pegan los granos de suelo entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia, mejorando las características de manera tal de transformarlos en suelos estables y aptos para la construcción de caminos.

Las sustancias químicas más comunes para realizar una estabilización de este tipo son la cal, el cemento, productos asfálticos, cloruro de sodio y cloruro de calcio, escorias de fundición, polímeros y hule de neumáticos.

c) Estabilización mecánica de suelos

Se define simplemente como el proceso artificial por el que las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto los unos con los otros, disminuyendo la cantidad de vacíos. Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan

reacciones químicas de importancia. La compactación se define como un proceso mecánico que mejora las propiedades ingenieriles de los suelos tales como; Aumentar la resistencia al corte, disminuir la compresibilidad, disminuir la relación de vacíos y reducir el potencial de expansión.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En el capítulo siguiente se describe el programa experimental que se llevará a cabo en la investigación, donde se definirán las variables involucradas y sus factoriales de laboratorio en torno a los cuales se trabajará para alcanzar los objetivos planteados con anterioridad.

El estudio se llevará a cabo en dos etapas para así dar cumplimiento a la totalidad de la investigación. Como primera etapa se realizará la caracterización de los suelos en su estado natural, permitiendo clasificar los suelos y determinar si las distintas muestras de estos corresponden en su mayoría al mismo material. Como segunda etapa, cuando el suelo ya se encuentra caracterizado se procederá a realizar el análisis del suelo estabilizado con metacaolin, donde posteriormente se compararán con los resultados obtenidos en la primera etapa.

En esta investigación se trabajará con dos tipos de suelos granulares, a los que se va a referir de la siguiente manera:

SUELO 1: Corresponde a un suelo granular con un alto contenido de material fino (bajo Tamiz #200), un suelo granular con plasticidad.

SUELO 2: Corresponde a un suelo granular tipo maicillo, que presenta en su composición muy poco contenido de material fino, corresponde a un suelo que no tiene plasticidad.

3.1 Variables de la investigación

3.1.1 Variables independientes

Se considera solo una variable independiente, que corresponde al contenido de metacaolin, el cual será muy importante respecto al incremento de la capacidad portante que se espera obtener, además de la disminución del porcentaje de expansión y plasticidad de los suelos. Los porcentajes de adición a evaluar son un 5%, 10% y 15% para los dos tipos de suelos utilizados. En el punto 3.3.1 se señala el motivo por el que se eligieron estos contenidos de metacaolin.

3.1.2 Variables dependientes

La capacidad de soporte y la expansión volumétrica son los parámetros de medición que van responder lo que se busca en esta investigación.

3.1.2.1 Capacidad de soporte CBR (California bearing ratio):

Corresponde a la capacidad portante del suelo, obtenida a partir de los variables contenidos de metacaolin. Este ensayo se realiza según los procedimientos que establece la norma NCh 1852.Of.2010.

3.1.2.2 Expansión volumétrica

Corresponde a la variación de volumen del suelo que se produce luego de sumergir las probetas durante 96 horas, a partir de los contenidos variables de metacaolin. Este ensayo se realiza según la norma NCh 1852.Of.2010.

3.2 Caracterización del metacaolin

Para esta investigación se utilizará metacaolin reciclado de la empresa Industrias Princesa Ltda. Con el fin de determinar la distribución de partículas que tiene el metacaolin que se utilizará como estabilizante se procede a realizar dos análisis granulométricos a este, los cuales posteriormente se van a comparar, verificando que dentro de todo el material las partículas se encuentren uniformemente distribuidas. Se busca obtener una granulometría similar a la de la cal ya que la reacción que se pretende lograr es similar a esta, además se señala que las partículas más pequeñas de los materiales puzolánicos son más reactivas en la solución, una de las razones es que estas tienen una mayor superficie de contacto con sustancias químicas. Los materiales con grandes cantidades de partículas finas producen mezclas con menor porosidad y resistencias mecánicas superiores (Kong & Sanjayan, 2008).

3.2.1 Granulometría del Metacaolin

Tabla 3.1: Granulometría Metacaolin.

TAMICES		Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
Nch (mm)	ASTM			
0,5	n°40	0	0,00	100
0,2	n°100	0	0,00	100
0,08	n°200	97,56	19,51	80
Residuo		14,02		

Fuente: Elaboración propia, 2017.

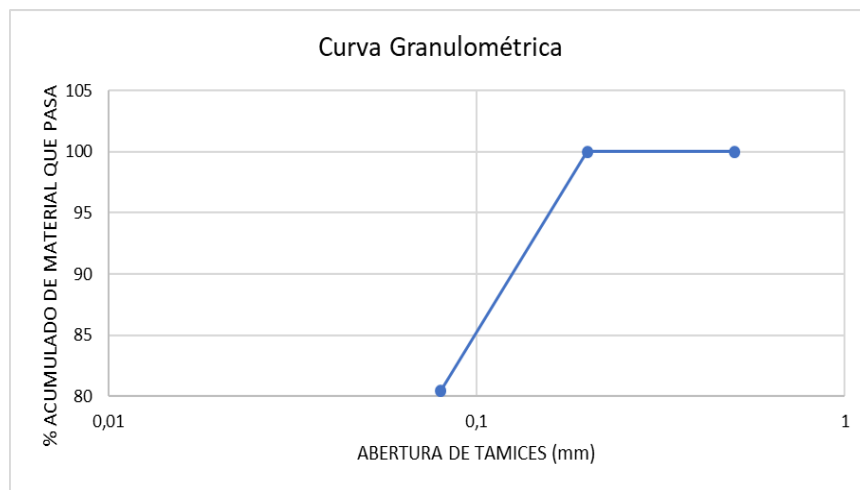


Figura 3.1: Curva granulométrica Metacaolin.

3.2.2 Peso específico del metacaolin

A través del método para determinar la densidad de partículas sólidas se obtiene el peso específico del metacaolin (NCh1532. Of80).

Peso Específico: 2,66 (grs/cm³).

3.2.3 Índice de Plasticidad (IP) del metacaolin

- $IP = NP$.

3.3 Caracterización de los suelos: Etapa I

3.3.1 Obtención de los suelos granulares

Las muestras de los dos tipos de suelos se obtuvieron en la comuna de Casablanca, suelos que corresponden a un material representativo de la zona, como lo es una arena arcillosa y además una arena limosa (maicillo).

Se obtuvo una cantidad aproximada de 700 kg de cada suelo, para así poder realizar la totalidad de los ensayos de laboratorio incluyendo además un porcentaje de pérdida. Se acopió en un lugar limpio, separado de cualquier otro material que pudiese alterar las muestras de los suelos.

3.3.2 Clasificación del suelo

Como etapa inicial se realizarán tres ensayos de análisis granulométricos por cada suelo, para así obtener el porcentaje de finos que pasan por la malla N°200.

Posterior a esto, se procede a determinar los límites de consistencia o atterberg de acuerdo al procedimiento de la norma NCh 1517.Of 79, donde se podrá determinar el límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad para cada una de las tres muestras de cada suelo.

Con los resultados de los ensayos antes mencionados se procede a realizar la clasificación de suelos mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) y el sistema AASHTO, ingresando a las tablas, obteniendo así el grupo al cual pertenece cada suelo.

3.3.3 Compactación del suelo

Para determinar la densidad máxima compactada seca y la humedad óptima se realizará el ensaye proctor modificado (Método A) de acuerdo a las especificaciones de la norma NCh 1534/2 Of. 79. Se realizarán seis análisis proctor, tres por cada muestra de suelo, esto con la finalidad de asegurarse que los resultados obtenidos sean correctos.

3.3.4 Capacidad de soporte (CBR)

La capacidad de soporte de los suelos se hará a través del ensayo de penetración C.B.R de acuerdo a las recomendaciones que establece la norma NCh 1852 Of. 2010. Para la ejecución del ensaye se compactan tres probetas con la humedad óptima y niveles de densidad variables (56, 25 y 10 golpes).

El C.B.R. se determinará al 95% de la D.M.C.S. y a 0,2" de penetración. Generalmente las probetas se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables, esto debido a que las precipitaciones anuales de la quinta región son superiores a 50 mm.

3.3.5 Expansión volumétrica

La medición del hinchamiento o expansión se realizará luego de haber sumergido las probetas durante 96 horas. Para este ensaye se utiliza un trípode y un dial que mide la expansión cada 0,025 mm. El procedimiento se realizará de acuerdo a lo que establece la norma NCh. 1852 Of. 2010.

Todos los ensayos que se realizarán en la etapa número 1 se resumen a continuación:

Tabla 3.2: Ensayos a realizar en la etapa I.

ETAPA I	MUESTRAS	GRANULOMETRÍA	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	PROCTOR MODIFICADO						C.B.R. Y EXPANSIÓN		
		N° DE PROBETAS											
SUELO NATURAL 1	1												
	2												
	3												
SUELO NATURAL 2	1												
	2												
	3												
METACAOLIN	1												
	2												

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Total probetas Proctor modificado	= 30
Total probetas CBR y expansión	= 18
Total probetas etapa I	= 48

3.4 Etapa II: Suelo-metacaolin

En esta etapa de la investigación se evaluará el aporte del metacaolin sobre los suelos para así dar cumplimiento a los objetivos planteados anteriormente. Se utilizarán como antecedentes previos los resultados obtenidos en la etapa I donde se analizaron las características de los suelos en su estado natural.

3.4.1 Suelo estabilizado con metacaolin

Una vez que se ha logrado determinar que los suelos con los que nos encontramos trabajando son de iguales características o propiedades en sus tres muestras respectivas, se señala que el suelo se encuentra en condiciones de recibir un tratamiento con el estabilizante y así determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-metacaolin que nos permita conseguir los objetivos propuestos.

La incorporación de metacaolin se realizará en concentraciones de un 5, 10 y 15% en el caso del suelo 2 (arena limosa), y de un 5, 10, 15 y 30% de metacaolin para el suelo 1 (arena arcillosa). Se eligen estos porcentajes debido a que en una investigación desarrollada por Vaishali, Liviu y Biyani el año 2013, en este rango de valores se encuentra la dosis que presenta los mejores resultados tanto para la capacidad de soporte CBR del suelo como para el hinchamiento, es decir, se pretende encontrar entre estos porcentajes la dosificación óptima que me permita mejorar las propiedades mencionadas anteriormente, además de lograr una disminución en la plasticidad de los suelos.

En la siguiente tabla se representa de manera más clara cómo será la estabilización de los suelos con metacaolin.

Tabla 3.3: Ensayos a realizar en la etapa II.

Suelo-Metacaolin	ADICION (%) METACAOLIN	MUESTRA	Cantidad de Probetas									
ETAPA II			PROCTOR MODIFICADO				C.B.R. Y EXPANSIÓN					
SUELO NATURAL 1	5%	1										
		2										
	10%	1										
		2										
	15%	1										
		2										
	30%	1										
		2										
SUELO NATURAL 2	5%	1										
		2										
	10%	1										
		2										
	15%	1										
		2										

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Total probetas Proctor modificado	= 70
Total probetas CBR y expansión	= 42
Total probetas etapa II	= 112

Como se puede apreciar en la tabla anterior, para cada una de las adiciones que se señalan, se realizarán un mínimo de dos muestras por cada suelo, es decir, por cada porcentaje de adición se realizarán 2 ensayos de proctor modificado y 2 ensayos CBR como mínimo para así lograr resultados que se acerquen de mejor manera a lo correcto.

3.4.2 Compactación del suelo

Para determinar la densidad máxima compactada seca y la humedad óptima de compactación de los suelos con sus respectivos contenidos de estabilizante, se realizará el ensaye proctor modificado (Método A) de acuerdo a la norma NCh 1534/2 Of. 2008. Se realizarán dos análisis proctor por cada contenido de metacaolin.

3.4.3 Capacidad de Soporte

Se determinará la capacidad de soporte CBR de los suelos estabilizados con metacaolin de acuerdo a los procedimientos que establece la norma NCh. 1852 Of. 2010, dichos resultados serán comparados posteriormente con los de los suelos sin contenido de metacaolin.

3.4.4 Expansión

La medición del hinchamiento o expansión se realizará luego de haber sumergido las probetas durante 96 horas. El ensaye se realizará de acuerdo al procedimiento que establece la norma NCh. 1852 Of. 2010.

4. DESARROLLO EN LABORATORIO

4.1 SUELO 1: Arena arcillosa

4.1.1 Etapa I: Caracterización del suelo patrón 1

4.1.1.1 Análisis Granulométrico

Se tomaron tres muestras representativas del suelo, realizando un análisis a cada una de estas.

En la siguiente tabla se muestra el promedio de las tres granulometrías realizadas al suelo en su estado natural.

Tabla 4.1: Granulometría promedio suelo natural.

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	2,57	0,51	99
2	n°10	18,30	3,66	96
0,5	n°40	139,96	27,99	68
0,08	n°200	140,95	28,19	40
	Residuo	5,38		

Fuente: Elaboración propia, 2017.

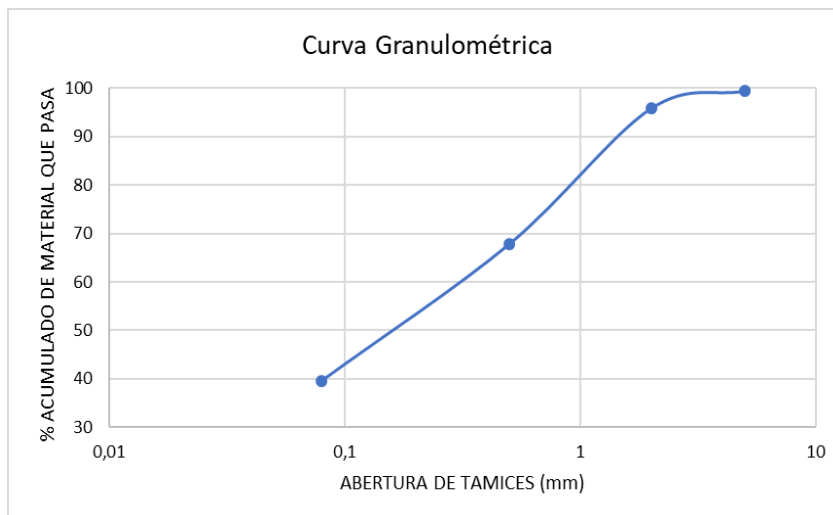


Figura 4.1: Curva granulométrica promedio suelo natural.

4.1.1.2 Límites de Atterberg del suelo natural 1

Límite líquido:

Tabla 4.2: Ensayo límite líquido promedio de 3 muestras para suelo natural 1.

Ensayo N°	1	2	3	4	5
Contenido de Humedad %	29,43	28,76	27,86	26,86	26,70
Número de Golpes, N	16	21	27	31	34

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Al realizar la interpolación para N=25 golpes, da un contenido de humedad de 28%, el cual corresponde al límite líquido para el suelo 1 en su estado natural.

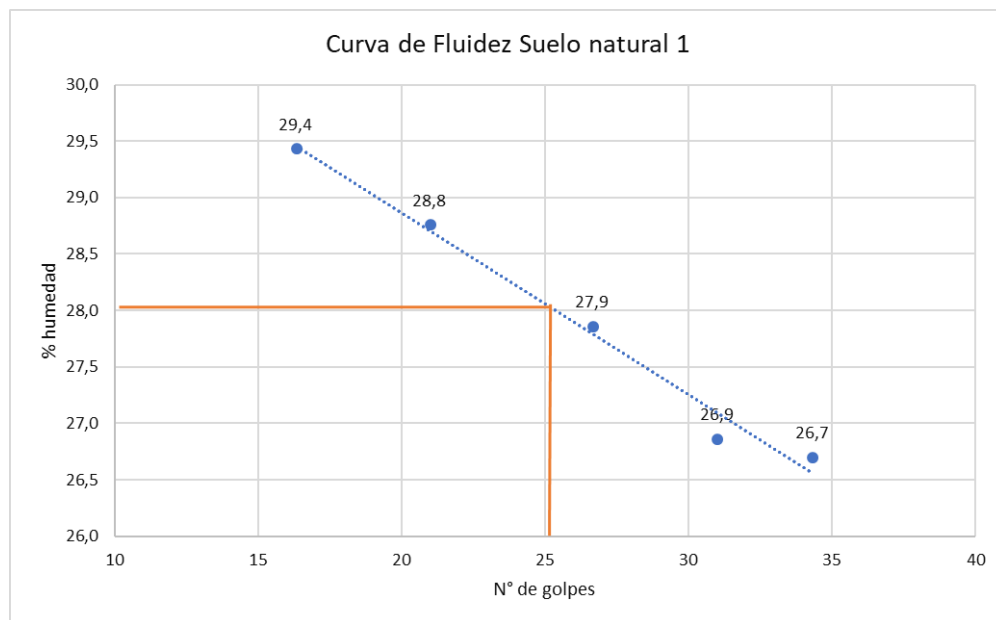


Figura 4.2: Curva de fluidez suelo natural 1.

Límite Plástico:**Tabla 4.3: Ensayo límite plástico promedio de 3 muestras para suelo natural 1.**

Ensayo N°	1	2	3	PROMEDIO
Contenido de Humedad %	14,80	14,99	14,70	14,83

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) corresponde a la diferencia numérica que existe entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP).

En la tabla siguiente se muestra el índice de plasticidad promedio (de 3 muestras), siendo un valor representativo de las muestras de suelo. IP Promedio = 13,17.

Cuando se conoce el índice de plasticidad se puede realizar la clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y el método AASHTO, ingresando a las tablas, obteniendo así el grupo al cual pertenece cada suelo.

Tabla 4.4: Determinación del índice de plasticidad promedio (de 3 muestras) del suelo.

LL	LP	IP
28,00	14,83	13,17

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.1.1.3 Clasificación del suelo natural 1

La clasificación de suelos consiste en la agrupación de estos en grupos y/o subgrupos que presentan un comportamiento semejante con propiedades ingenieriles similares, utilizando diferentes sistemas y métodos para esta agrupación.

- **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)**

Al tener un suelo en donde menos del 50% de las partículas pasa por el tamiz N°200, estamos hablando de un suelo grueso. Se utilizará la siguiente tabla donde principalmente se ocupa el % de las partículas que pasa por el tamiz N° 4, N° 200, el límite líquido promedio y el índice de plasticidad promedio obtenidos previamente, resultando así en la clasificación mediante este método una Arena arcillosa (SC(CL)).

Tabla 4.5: Clasificación de suelos según Sistema USCS.

SISTEMA CLASIFICACION USCS							
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)							
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP	
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3		
	GP			≤ 6	<16>3		
	GM		> 12				< 0.73 (wl-20) ó <4
	GC						> 0.73 (wl-20) ó >7
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3		
	SP			≤ 6	<16>3		
	SM		> 12				< 0.73 (wl-20) ó <4
	SC						> 0.73 (wl-20) y >7
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM,SW-SM, SP-SC.							
*** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm							
** Si IP ≥ 0.73 (wl-20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0.73 (wl-20), usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.							
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.							
$C_u = (D_{60}) / (D_{10})$				$C_c = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$			

Fuente: FPI Ingeniería, 2016.

- **Sistema de Clasificación de suelo American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)**

Al poseer un suelo donde el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es mayor a 35%, se clasifica como un suelo fino. La clasificación se complementa con el índice de grupos (IG).

$$IG = (F - 35) (0,2 + 0,005 (LL - 40)) + 0,01 (F-15) (IP - 10)$$

IG=2.

Donde

IG: Índice de grupo

F: % de fino que pasa por el tamiz N°200

LL: Límite líquido

IP: Índice de plasticidad

Según la tabla de clasificación de suelos AASHTO, este suelo corresponde a un A-6(2), un suelo arcilloso.

Tabla 4.6: Clasificación de suelos según Sistema AASHTO.

SISTEMA DE CLASIFICACION AASHTO											
Clasif. General	Suelos Granulares (≤ 35 % pasa 0.08 mm)						Suelos Finos (> 35 % bajo 0.08 mm)				
Grupo	A-1		A-3	A-3			A-4	A-5	A-6	A-7	
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*			A-7-5**	
2 mm	≤ 50										
0.5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0.08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35			≥ 36				
W _L				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena fina	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		
	** A-7-5: IP \leq (W _L - 30)						A-7-6: IP $>$ (W _L - 30)				
	IG = (B/0.08 - 35) (0.2 + 0.005 (W _L - 40)) + (B/0.08 - 15) (IP - 10) * 0.01										
	* Para A-2-6 y A-2-7: IG = (B/0.08 - 15) (IP - 10) * 0.01										

Fuente: FPI Ingeniería, 2016.

4.1.1.4 Proctor modificado suelo natural 1

Para determinar la densidad máxima compactada seca y la humedad óptima se procede a realizar el ensaye proctor modificado (Método A) de acuerdo a las especificaciones de la norma NCh 1534/2 Of. 79.

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 3 muestras) de los valores de la humedad óptima y la densidad seca obtenida en cada una de las probetas.

Tabla 4.7: Resultados Proctor modificado suelo natural 1 (promedio).

H. promedio (%)	6,84	8,69	10,66	12,72
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,93	2,03	2,04	1,93

Fuente: Elaboración propia, 2017.

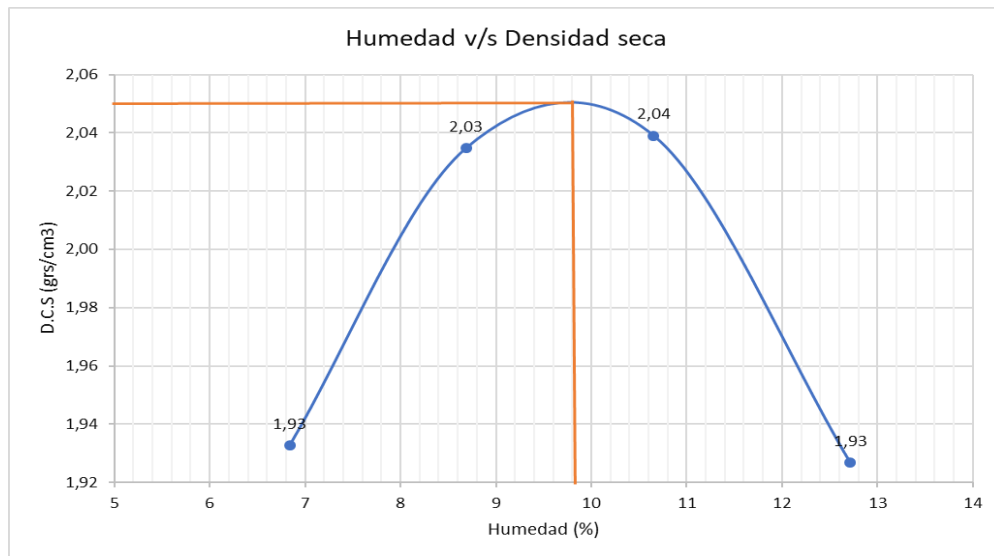


Figura 4.3: Proctor modificado promedio suelo natural 1.

DMCS (grs/cm ³)	2,05
H. óptima (%)	9,83

4.1.1.5 Determinación de C.B.R suelo natural 1

Se determinará el C.B.R. a 0,2" de penetración y al 95% de la DMCS. Previamente se habrán compactado tres probetas con la humedad óptima y niveles de densidad variables (56, 25 y 10 golpes). Las probetas se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más

desfavorables, para luego ser penetradas. Esto debido a que las precipitaciones anuales de la quinta región son superiores a 50 mm.

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad seca promedios (de 3 muestras) obtenida en cada una de las probetas.

Tabla 4.8: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	2,06	31
25 Golpes	1,97	18
10 Golpes	1,80	5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

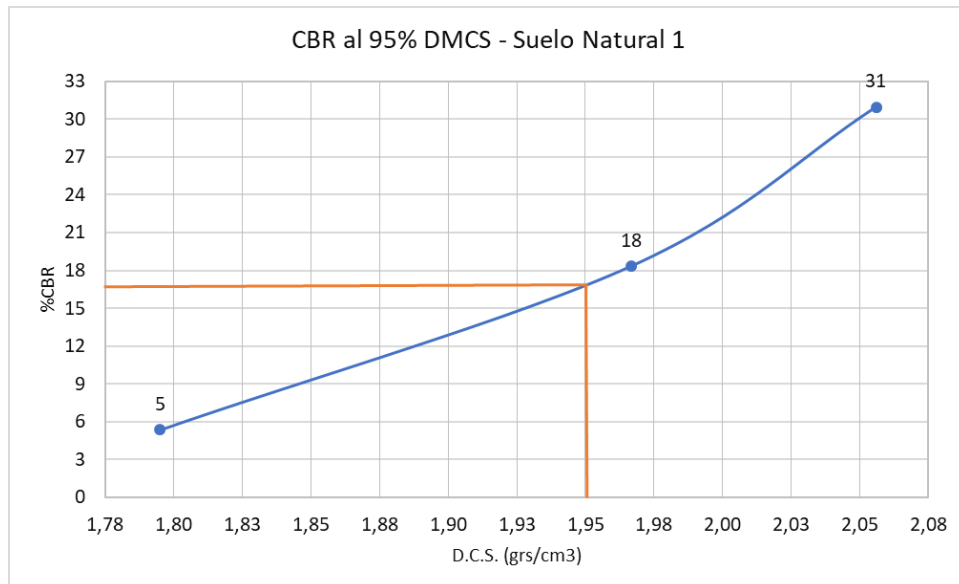


Figura 4.4: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1.

Tabla 4.9: Promedio CBR al 95% de DMCS y a 0,2" de penetración suelo natural 1.

DMCS (grs/cm ³)	2,06
95% DMCS (grs/cm ³)	1,95
CBR (%)	17,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación suelo natural 1

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.10: Grado de saturación promedio suelo natural 1.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	124,473	93,997	96,068	106,752	89,834	85,771	85,020	75,396	79,543

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.1.1.6 Expansión Volumétrica para suelo natural 1

Para la medición de la expansión del suelo, se tomaron las medidas antes del proceso de inmersión y luego se realizaron posterior a 96 horas de sumergidas las probetas de C.B.R.

Tabla 4.11: Expansión volumétrica de suelo natural.

Muestra	56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)
1	0,5842	116,4	0,50	1,0922	116,4	0,94	1,2446	116,4	1,07
2	1,0414	116,4	0,89	1,6002	116,4	1,37	2,413	116,4	2,07
3	2,7432	116,4	2,36	2,8702	116,4	2,47	3,2512	116,4	2,79

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la tabla siguiente se muestra un resumen de los resultados que se obtuvieron para el suelo 1 en su estado natural.

Tabla 4.12: Resumen de suelo natural 1.

RESUMEN	SUELO NATURAL
Límite líquido (%)	28
Límite Plástico (%)	14,83
Índice de Plasticidad (%)	13,17
Peso específico (grs/cm ³)	2,7
Humedad óptima (%)	9,83
D.M.C.S (grs/cm ³)	2,05
Expansión (%)	1,61
C.B.R (%)	17
Grado de saturación (%)	95,91
Clasificación USCS	Arena Arcillosa-SC(CL)
Clasificación AASHTO	A-6 (2)

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.1.2 ETAPA II: Suelo Natural 1 – % Metacaolin

4.1.2.1 Límites de consistencia

Se realizaron los límites de consistencia para cada una de las mezclas de suelo y de esta manera visualizar como se va comportando el suelo con los distintos contenidos de metacaolin.

Tabla 4.13: Resumen de Límites de Consistencia Promedio suelo natural – % Metacaolin.

Metacaolin	LL	LP	IP
0%	28,00	14,83	13,17
5%	26,99	15,55	11,44
10%	29,70	16,83	12,87
15%	30,98	17,36	13,61
30%	30,70	19,30	11,40

Fuente: Elaboración propia, 2017.

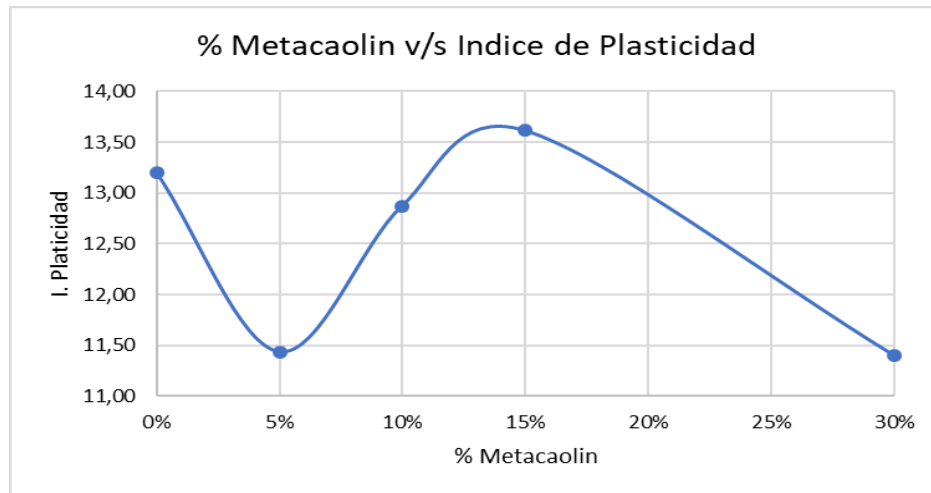


Figura 4.5: % de Metacaolin v/s Índice de Plasticidad.

De la tabla 4.13 y la Figura 4.5 se desprende que el índice de plasticidad disminuye un 13,43% con respecto a la muestra patrón, agregando un 30% de metacaolin, lo que nos brinda información de cómo se va a comportar la capacidad de soporte con el mismo contenido de este.

En un principio el índice de plasticidad disminuye en un 13,13% con un 5% de metacaolin, pero al aumentar los contenidos de metacaolin hasta un 10% y 15% el índice de plasticidad aumenta alrededor de un 3% con respecto a la muestra patrón.

4.1.2.2 Proctor Modificado suelo natural 1 – % Metacaolin

Se procede a realizar los ensayos de proctor modificado para así determinar la D.M.C.S y la humedad óptima para un 5%-10%-15% y 30% de metacaolin, realizando dos muestras por cada contenido planteado.

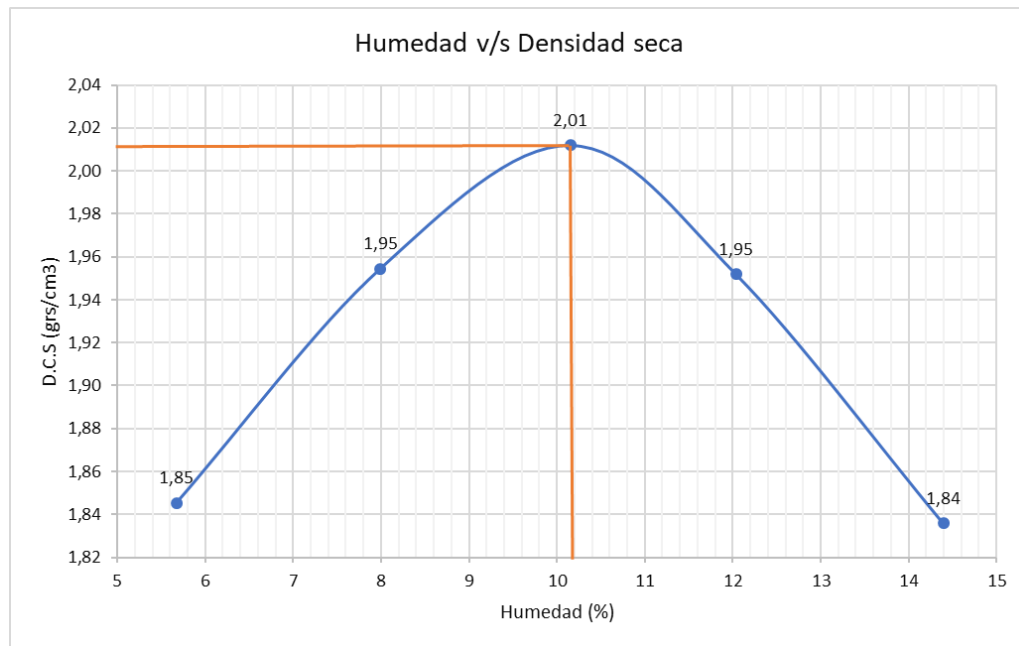
Muestra de Suelo 1 – Metacaolin 5%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad óptima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 5% de metacaolin.

Tabla 4.14: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 5%.

H. promedio (%)	5,67	7,99	10,15	12,04	14,40
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,85	1,95	2,01	1,95	1,84

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 4.6: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 5%.**

DMCS (grs/cm ³)	2,01
H. óptima (%)	10,2

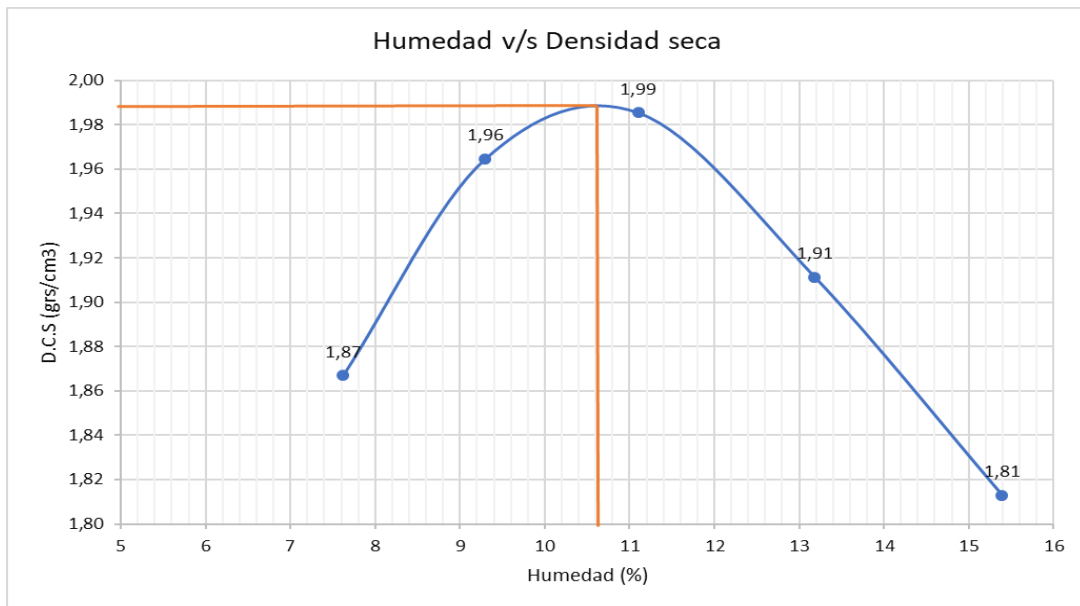
Muestra de Suelo 1 – Metacaolin 10%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad óptima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 10% de metacaolin.

Tabla 4.15: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 10%.

H. promedio (%)	7,62	9,30	11,10	13,18	15,39
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,87	1,96	1,99	1,91	1,81

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 4.7: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 10%.**

DMCS (grs/cm ³)	1,99
H. óptima (%)	10,63

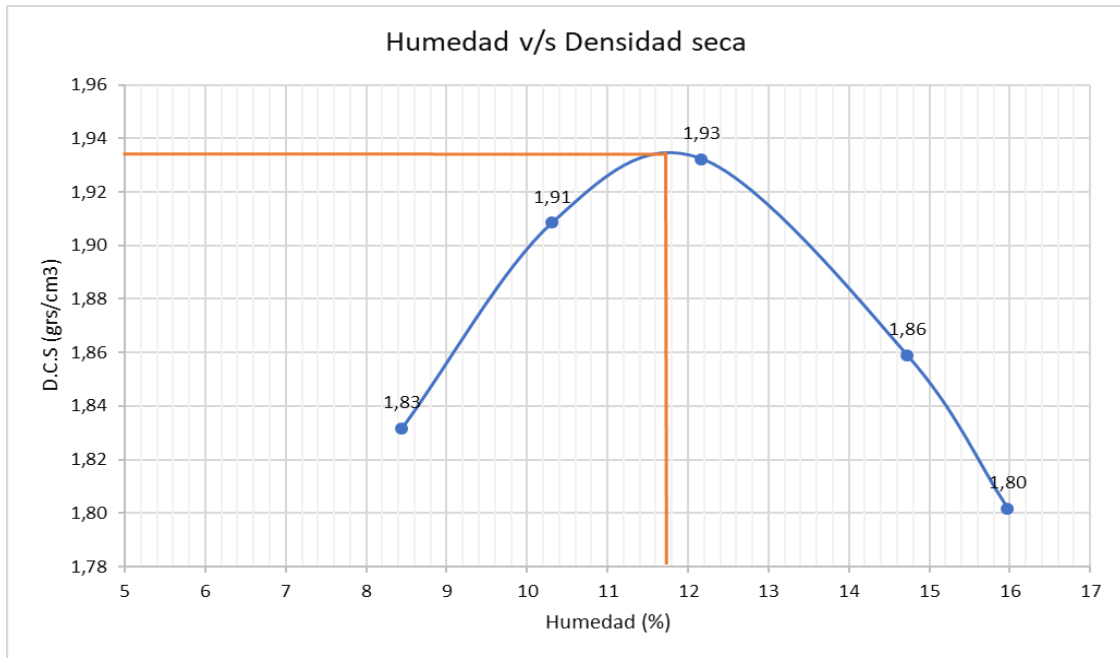
Muestra de Suelo 1 – Metacaolin 15%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad óptima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 15% de metacaolin.

Tabla 4.16: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 15%.

H. promedio (%)	8,44	10,31	12,17	14,72	15,97
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,83	1,91	1,93	1,86	1,80

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 4.8: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 15%.**

DMCS (grs/cm ³)	1,94
H. óptima (%)	11,75

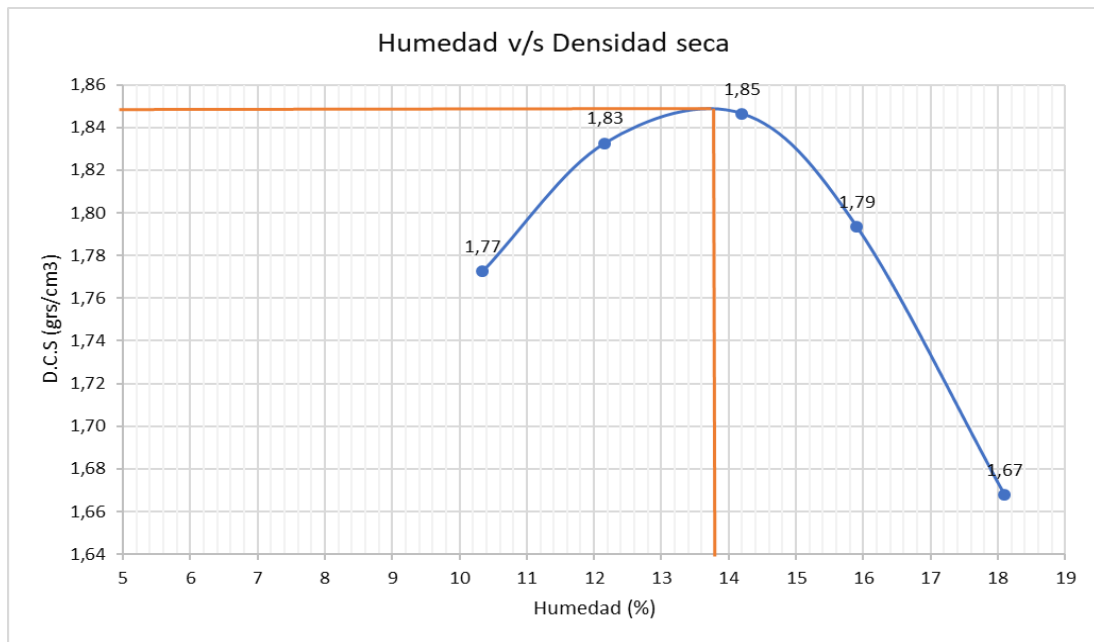
Muestra de Suelo 1 – Metacaolin 30%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad óptima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 30% de metacaolin.

Tabla 4.17: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 1 – metacaolin 30%.

H. promedio (%)	10,34	12,16	14,20	15,90	18,10
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,77	1,83	1,85	1,79	1,67

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 4.9: Proctor modificado promedio suelo natural 1 – metacaolin 30%.**

DMCS (grs/cm ³)	1,85
H. óptima (%)	13,8

Tabla 4.18: Resumen Promedio Proctor Modificado suelo natural – porcentajes de metacaolin.

Contenido de metacaolin	DMCS(g/cm ³)	H. óptima (%)
0%	2,05	9,83
5%	2,01	10,20
10%	1,99	10,63
15%	1,94	11,75
30%	1,85	13,80

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla anterior se desprende el siguiente grafico para visualizar como se va comportando el suelo con los distintos porcentajes de metacaolin.

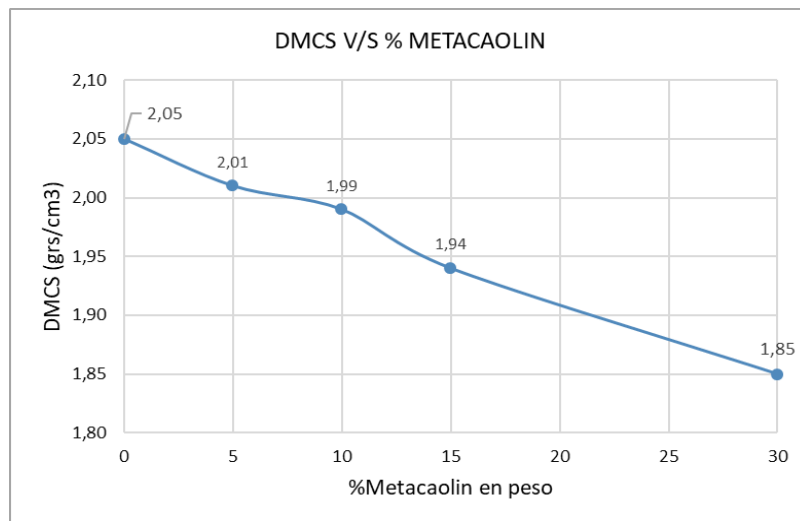


Figura 4.10: % de metacaolin v/s DMCS.

De la figura 4.10 se puede observar como a medida que aumenta el contenido de metacaolin, se va produciendo una disminución de la DMCS del suelo, que va desde 2,05 (grs/cm³) en el suelo natural hasta 1,85 (grs/cm³) al incorporar un 30% de metacaolin, disminuyendo en un 9,7% la densidad. Este fenómeno se debe al cambio granulométrico que presenta el suelo al incorporar este producto en su composición, además de las diferencias de densidades entre el suelo en su estado natural y el metacaolin.

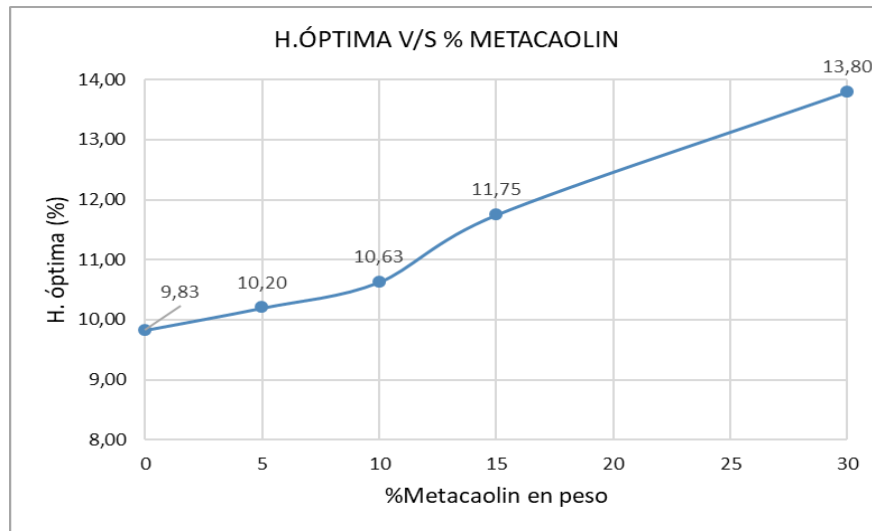


Figura 4.11: % de metacaolín v/s H. óptima.

Como se puede observar en la figura 4.11, al incrementar los contenidos de metacaolín se produce un aumento en la humedad óptima de compactación, aumentando en un 28,7% al incorporar un 30% de metacaolín. Esto se debe a que las partículas de metacaolín son muy pequeñas por lo que, al ir aumentando en porcentaje, aumenta la superficie específica, y de esta manera la mezcla suelo – metacaolín necesita más humedad para lubricar todas las partículas. Lo que influye considerablemente en la disminución de la DMCS debido principalmente a que la densidad del agua es inferior a la del suelo por lo que a medida que se suben los contenidos de metacaolín, va aumentando progresivamente la cantidad de agua en la muestra y de esta manera decreciendo la DMCS.

4.1.2.3 Capacidad de soporte suelo natural 1 – % Metacaolín

Se realiza el ensayo de capacidad de soporte con la humedad óptima obtenida en el ensayo proctor modificado para cada porcentaje de metacaolín, buscando encontrar el contenido de metacaolín con el que se obtenga el mayor valor de CBR.

Luego de compactadas las probetas, estas se sumergen durante 96 horas para así medir el % de expansión, y de esta manera determinar si al incorporar este nuevo producto se produce alguna variación en los valores de expansión obtenidos con el suelo en su estado natural.

Muestra de suelo 1 – Metacaolin 5%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 5% de metacaolin.

Tabla 4.19: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 5%.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	2,04	20
25 Golpes	1,91	11
10 Golpes	1,77	4

Fuente: Elaboración propia, 2017.

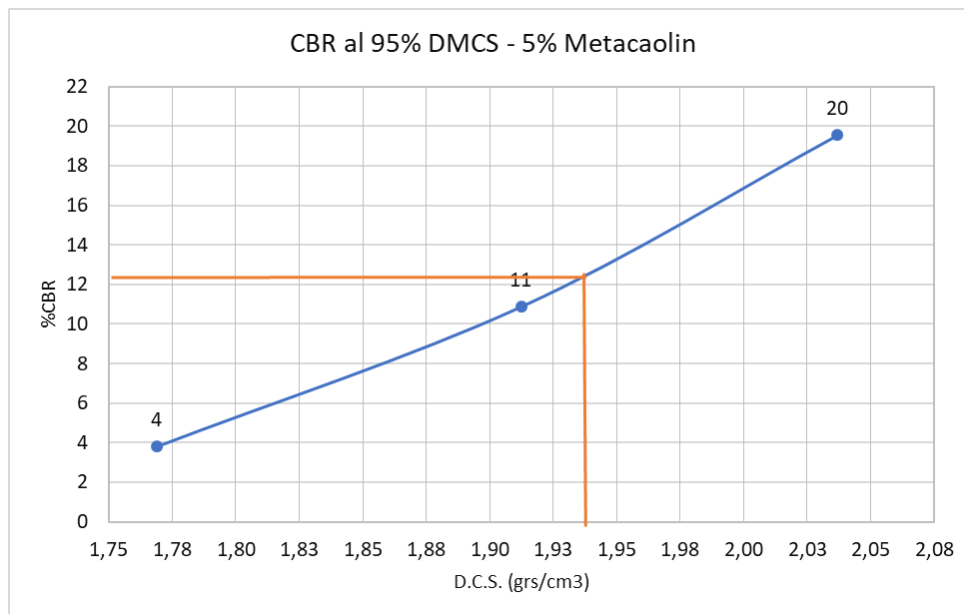


Figura 4.12: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 5%.

Tabla 4.20: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2” de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 5%.

DMCS (grs/cm ³)	2,04
95% DMCS (grs/cm ³)	1,94
CBR (%)	12,4

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolin 5%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 5% de metacaolin, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.21: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolin 5%.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	118,066	98,199	99,115	98,374	85,007	91,966	94,474	82,286	81,796

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Muestra de suelo 1 – Metacaolin 10%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 10% de metacaolin.

Tabla 4.22: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 10%.

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)
56 Golpes	2,01	45
25 Golpes	1,91	13
10 Golpes	1,75	5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

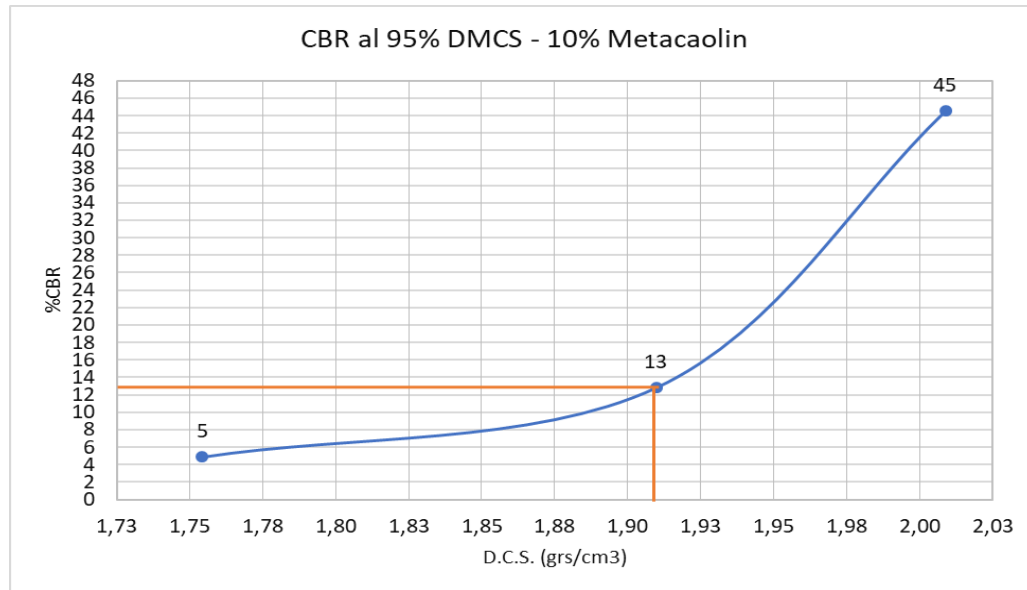


Figura 4.13: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 10%.

Tabla 4.23: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 10%.

DMCS (grs/cm ³)	2,01
95% DMCS (grs/cm ³)	1,91
CBR (%)	13,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolin 10%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 10% de metacaolin, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.24: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolin 10%.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	119,656	93,222	97,489	110,671	90,330	96,224	100,712	82,317	81,283

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Muestra de suelo 1 – Metacaolin 15%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 15% de metacaolin.

Tabla 4.25: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 15%.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	1,97	72
25 Golpes	1,90	34
10 Golpes	1,75	9

Fuente: Elaboración propia, 2017.

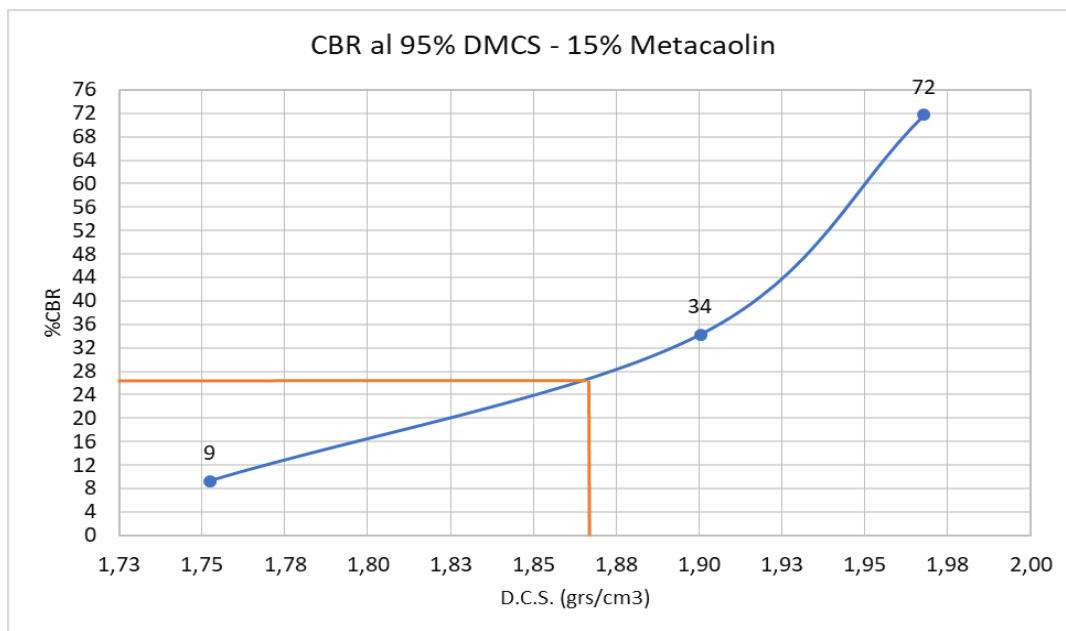


Figura 4.14: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 15%.

Tabla 4.26: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 15%.

DMCS (grs/cm ³)	1,97
95% DMCS (grs/cm ³)	1,87
CBR (%)	26,5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolin 15%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 15% de metacaolin, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.27: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolin 15%.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	102,880	87,930	96,546	112,182	87,894	93,646	98,089	85,276	84,397

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Muestra de suelo 1 – Metacaolin 30%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 30% de metacaolin.

Tabla 4.28: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolin 30%.

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)
56 Golpes	1,87	72
25 Golpes	1,81	32
10 Golpes	1,68	12

Fuente: Elaboración propia, 2017.

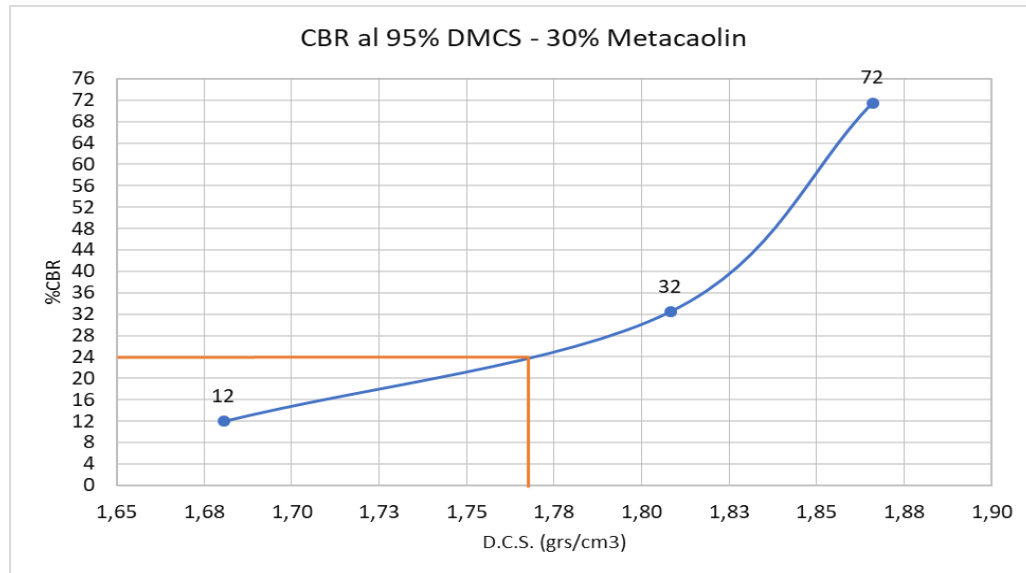


Figura 4.15: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolín 30%.

Tabla 4.29: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 1 – Metacaolín 30%.

DMCS (grs/cm ³)	1,87
95% DMCS (grs/cm ³)	1,77
CBR (%)	24,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolín 30%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 30% de metacaolín, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.30: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolín 30%.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	115,074	89,533	99,196	115,208	94,698	96,777	102,560	85,408	88,674

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.31: Resumen Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural – % de metacaolin.

Contenido de metacaolin (%)	CBR saturado (%)
0	17,0
5	12,4
10	13,0
15	26,5
30	24,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla anterior se desprende el siguiente gráfico para visualizar como se va comportando el suelo con los distintos contenidos de metacaolin.

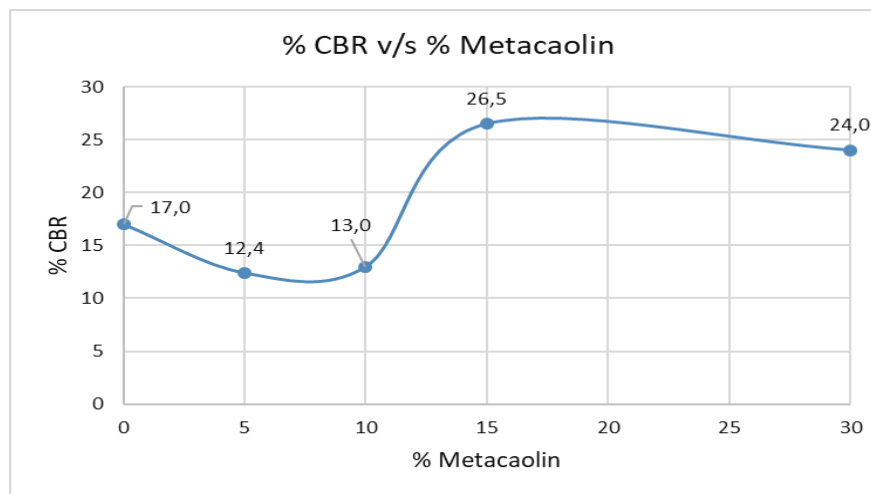


Figura 4.16: % CBR v/s % de metacaolin.

En la figura 4.16 se puede observar que con un 15% de metacaolin se alcanza el máximo de la capacidad de soporte (CBR) del suelo con un 26,5%, aumentando en un 35,8% con respecto al suelo en su estado natural. Este aumento en el CBR con respecto a la muestra patrón (0% Metacaolin) se produce luego de haber disminuido considerablemente al agregar un 5% y 10%, esto nos permite concluir que con pequeñas adiciones de metacaolin no se obtienen buenos resultados, ya que se busca producir un incremento en el CBR y en pequeñas dosis esto no se logra.

4.1.2.4 Expansión volumétrica suelo natural 1 - % Metacaolin

Tabla 4.32: Expansión volumétrica suelo natural - % Metacaolin.

Metacaolin	56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes			Expansión promedio (%)
	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	
0%	1,4563	116,4	1,25	1,8542	116,4	1,59	2,3029	116,4	1,98	1,61
5%	3,2639	116,4	2,80	3,3401	116,4	2,87	3,683	116,4	3,16	2,95
10%	2,6543	116,4	2,28	2,7432	116,4	2,36	3,2766	116,4	2,81	2,48
15%	1,37795	116,4	1,18	1,6891	116,4	1,45	2,1717	116,4	1,87	1,50
30%	0,5461	116,4	0,47	0,7366	116,4	0,63	0,62865	116,4	0,54	0,55

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla 4.32 se desprende un gráfico para visualizar de mejor manera la influencia que tendría el metacaolin en la expansión volumétrica de los suelos.

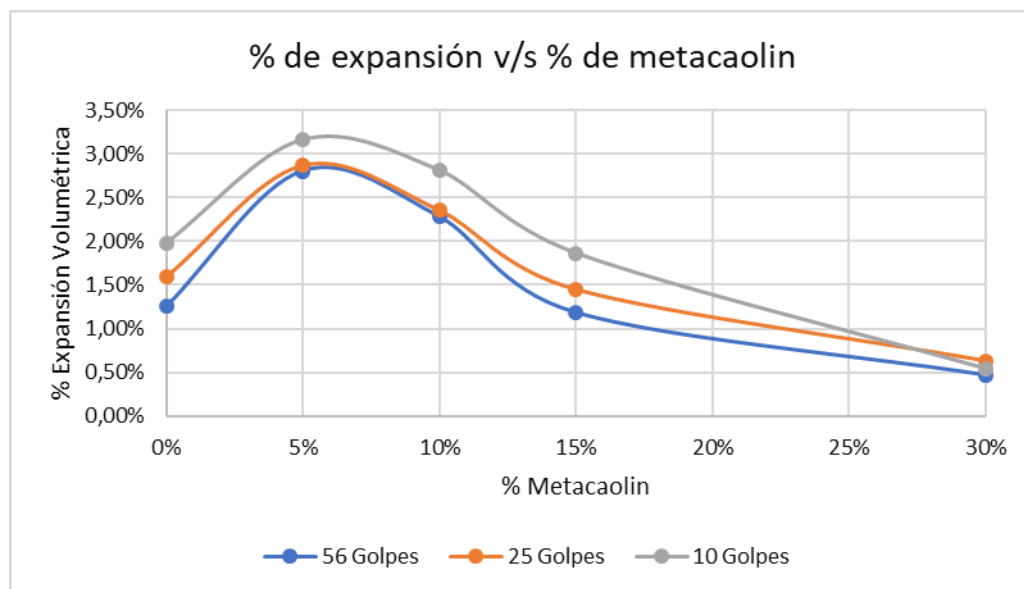


Figura 4.17: Comportamiento de la expansión v/s contenido de metacaolin.

De la figura 4.17 se puede observar como al incorporar pequeñas dosis de metacaolin se produce un aumento en la expansión volumétrica del suelo y lo que se busca es disminuirla, de tal modo que con un 15% recién se produjo una disminución en la expansión con respecto a la muestra patrón (0% metacaolin), y luego con un 30% se alcanza la expansión más baja con un 0,55%, concluyendo nuevamente al igual que en la figura 4.16, que con pequeñas adiciones de metacaolin no se obtienen buenos resultados.

Tabla 4.33: Resumen etapa II, suelo natural 1 - % Metacaolin.

RESUMEN	SUELO NATURAL	Suelo + 5% Metacaolin	Suelo + 10% Metacaolin	Suelo + 15% Metacaolin	Suelo + 30% Metacaolin
Límite líquido (%)	28,00	26,99	29,70	30,98	30,70
Límite Plástico (%)	14,83	15,55	16,83	17,36	19,30
Índice de Plasticidad (%)	13,17	11,44	12,87	13,61	11,40
Peso específico (grs/cm ³)	2,70	2,68	2,646	2,634	2,608
Humedad óptima (%)	9,83	10,20	10,63	11,75	13,80
D.M.C.S (grs/cm ³)	2,05	2,01	1,99	1,94	1,85
Expansión (%)	1,61	2,95	2,48	1,50	0,55
C.B.R (%)	17,0	12,4	13	26,5	24
Grado de saturación (%)	95,91	96,07	99,48	95,71	100,41

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la tabla 4.33 se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos tanto para el suelo en su estado natural como para el suelo con los distintos contenidos de metacaolin, de esta forma se puede observar de manera más clara el comportamiento que va teniendo el suelo con las distintas dosis.

4.2 SUELO 2: Arena limosa

4.2.1 Etapa I: Caracterización del suelo patrón 2

4.2.1.1 Análisis Granulométrico

Se tomaron tres muestras representativas del suelo, realizando un análisis a cada una de estas.

En la siguiente tabla se muestra el promedio de las tres granulometrías realizadas al suelo en su estado natural.

Tabla 4.34: Granulometría promedio suelo natural 2.

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	17,16	3,43	97
2	n°10	118,09	23,62	73
0,5	n°40	237,47	47,49	26
0,08	n°200	102,51	20,50	5
	Residuo	6,06		

Fuente: Elaboración propia, 2017.

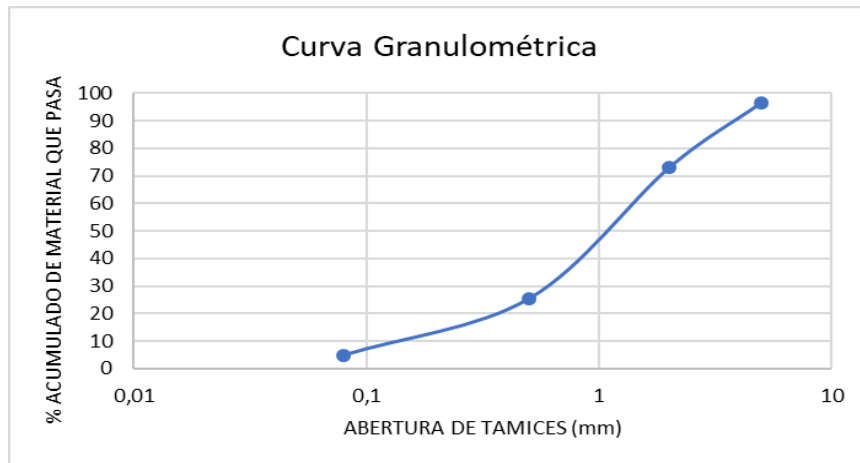


Figura 4.18: Curva granulométrica promedio suelo natural.

4.2.1.2 Límites de Atterberg del suelo natural 2

Límite líquido – Límite plástico

No se determinan los límites de consistencia a este tipo de suelo debido a que no posee plasticidad. Cuando se intenta obtener el límite líquido mediante el método de la cuchara de Casagrande, no se logra alcanzar los 25 golpes que establece la norma. De esta forma, no es posible determinar el límite líquido a este tipo de suelo.

Al ser un suelo sin plasticidad, no se puede obtener el límite plástico de acuerdo a las especificaciones de la norma Nch 1517.Of 79.

4.2.1.3 Clasificación del suelo natural 2

La clasificación de suelos consiste en la agrupación de estos en grupos y/o subgrupos que presentan un comportamiento semejante con propiedades ingenieriles similares, utilizando diferentes sistemas y métodos para esta agrupación.

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)

Al tener un suelo en donde menos del 50% de las partículas pasa por el tamiz N°200, estamos hablando de un suelo grueso. Se utilizará la siguiente tabla donde principalmente se ocupa el % de las partículas que pasa por el tamiz N° 4, N° 200, el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura, resultando así en la clasificación mediante este método una Arena limosa bien graduada (SW-SM).

Tabla 4.35: Clasificación de suelos según Sistema USCS.

SISTEMA CLASIFICACION USCS						
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)						
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	
	GP			≤ 6	<16>3	
	GM		> 12			< 0.73 (wl-20) ó <4
	GC					> 0.73 (wl-20) ó >7
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	
	SP			≤ 6	<16>3	
	SM		> 12			< 0.73 (wl-20) ó <4
	SC					> 0.73 (wl-20) y >7
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC. *** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm						
** Si $IP \geq 0.73 (wl-20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (wl-20)$, usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.						
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.						
$C_U = (D_{60}) / (D_{10})$				$C_C = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$		

Fuente: FPI Ingeniería, 2016.

- **Sistema de Clasificación de suelo American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)**

Al poseer un suelo donde el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es menor a 35%, se clasifica como un suelo granular.

Según la tabla de clasificación de suelos AASHTO, este suelo corresponde a un A-1b (0).

Tabla 4.36: Clasificación de suelos según Sistema AASHTO.

SISTEMA DE CLASIFICACION AASHTO											
Clasif. General	Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa 0.08 mm)						Suelos Finos ($> 35\%$ bajo 0.08 mm)				
Grupo	A - 1		A-3	A-3			A - 4	A - 5	A - 6	A - 7	
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*			A-7-5**	
2 mm	≤ 50										
0.5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0.08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35			≥ 36				
W _L				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena fina	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		
	** A - 7 - 5 : IP $\leq (W_L - 30)$						A - 7 - 6 : IP $> (W_L - 30)$				
	IG = (B/0.08 - 35) (0.2 + 0.005 (W _L - 40)) + (B/0.08 - 15) (IP - 10) * 0.01										
	* Para A - 2 - 6 y A - 2 - 7: IG = (B/0.08 - 15) (IP - 10) * 0.01										

Fuente: FPI Ingeniería, 2016.

4.2.1.4 Proctor modificado suelo natural 2

Para determinar la densidad máxima compactada seca y la humedad óptima se procede a realizar el ensaye proctor modificado (Método A) de acuerdo a las especificaciones de la norma NCh 1534/2 Of. 79. Se realiza un ensaye para cada muestra de suelo.

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 3 muestras) de los valores de la humedad óptima y la densidad seca obtenida en cada una de las probetas.

Tabla 4.37: Resultados Proctor modificado suelo natural 2 (promedio).

H. promedio (%)	6,41	8,25	10,29	12,15	13,83
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,95	1,98	2,02	1,96	1,91

Fuente: Elaboración propia, 2017.

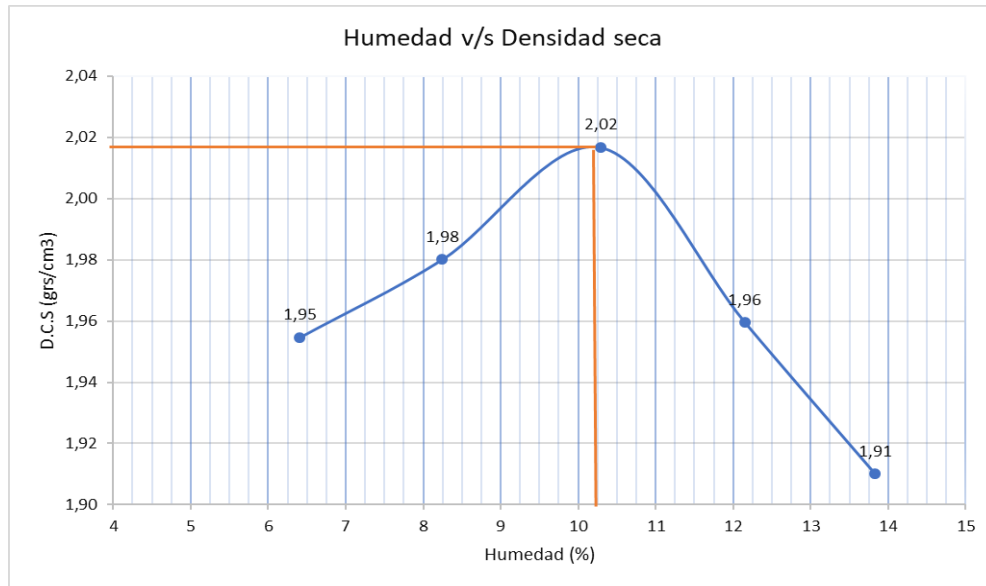


Figura 4.19: Proctor modificado promedio suelo natural 2.

DMCS (grs/cm ³)	2,02
H. óptima (%)	10,24

4.2.1.5 Determinación de C.B.R. suelo natural 2

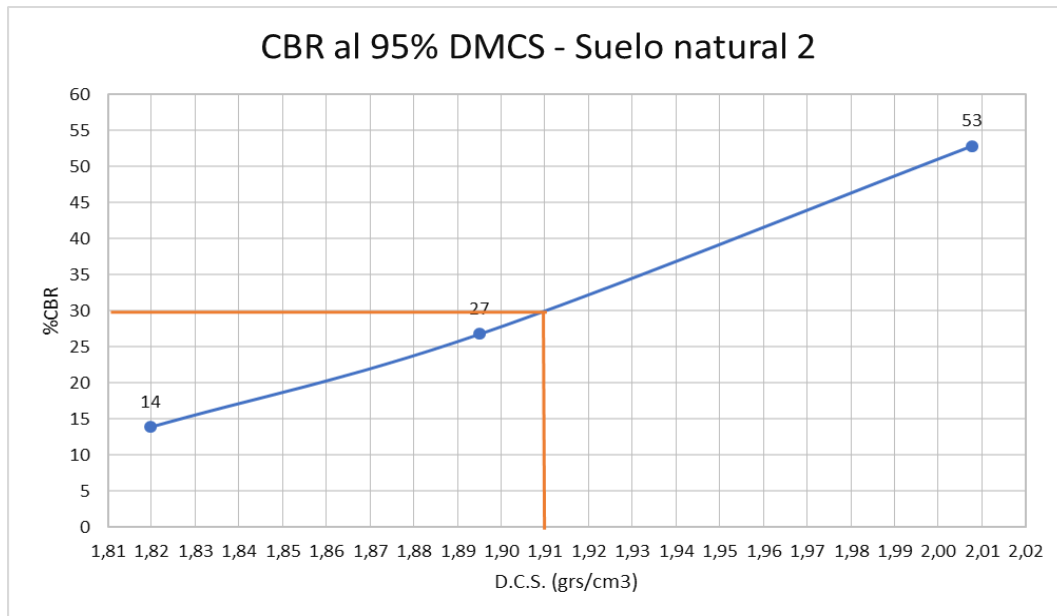
Se determinará el C.B.R. a 0,2" de penetración y al 95% de la DMCS. Previamente se habrán compactado tres probetas con la humedad óptima y niveles de densidad variables (56, 25 y 10 golpes). Las probetas se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables, para luego ser penetradas. Esto debido a que las precipitaciones anuales de la quinta región son superiores a 50 mm.

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad seca promedios (de 3 muestras) obtenida en cada una de las probetas.

Tabla 4.38: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	2,01	53
25 Golpes	1,89	27
10 Golpes	1,82	14

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 4.20: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2.****Tabla 4.39: Promedio CBR al 95% de DMCS y a 0,2" de penetración suelo natural 2.**

DMCS (grs/cm ³)	2,01
95% DMCS (grs/cm ³)	1,91
CBR (%)	30,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación suelo natural 2

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.40: Grado de saturación promedio (de 3 muestras) suelo natural 2.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	95,074	78,628	91,112	86,340	77,710	87,957	84,208	80,124	85,421

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.2.1.6 Expansión Volumétrica para suelo natural 2

Para la medición de la expansión del suelo, se tomaron las medidas antes del proceso de inmersión y luego se realizaron posterior a 96 horas de sumergidas las probetas de C.B.R.

Tabla 4.41: Expansión volumétrica de suelo natural 2.

Muestra	56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)
1	0,1778	116,4	0,15	0,0762	116,4	0,07	0,127	116,4	0,11
2	0,254	116,4	0,22	0,2286	116,4	0,20	0,2413	116,4	0,21
3	0,2794	116,4	0,24	0,2032	116,4	0,17	0,1778	116,4	0,15

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la tabla siguiente se muestra un resumen de los resultados que se obtuvieron para el suelo 2 en su estado natural.

Tabla 4.42: Resumen de suelo natural 2.

RESUMEN	SUELO NATURAL
Índice de Plasticidad (%)	NP
Peso específico (grs/cm ³)	2,73
Humedad óptima (%)	10,24
D.M.C.S (grs/cm ³)	2,02
Expansión (%)	0,17
C.B.R (%)	30
Grado de saturación (%)	83,68
Clasificación USCS	Arena limosa bien graduada (SW-SM)
Clasificación AASHTO	A-1b (0)

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.2.2 ETAPA II: Suelo Natural 2 – % Metacaolin

4.2.2.1 Límites de consistencia

No es posible determinar los límites de consistencia a este tipo de suelo de acuerdo al procedimiento de la norma NCh1517. Of79, ya que corresponde a un suelo que no tiene plasticidad, donde su $IP=0$ (NP).

4.2.2.2 Proctor Modificado Suelo Natural 2 – % Metacaolin

Se procede a realizar los ensayos de proctor modificado para así determinar la D.M.C.S y la humedad óptima con los contenidos de metacaolin planteados en la tabla 3.2, realizando dos muestras por cada contenido de metacaolin.

Muestra de Suelo 2 – Metacaolin 5%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad optima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 5% de metacaolin.

Tabla 4.43: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 2 – metacaolin 5%.

H. promedio (%)	8,55	10,57	12,39	14,20	16,52
Densidad Seca (grs/cm3)	1,96	1,98	1,96	1,90	1,85

Fuente: Elaboración propia, 2017.

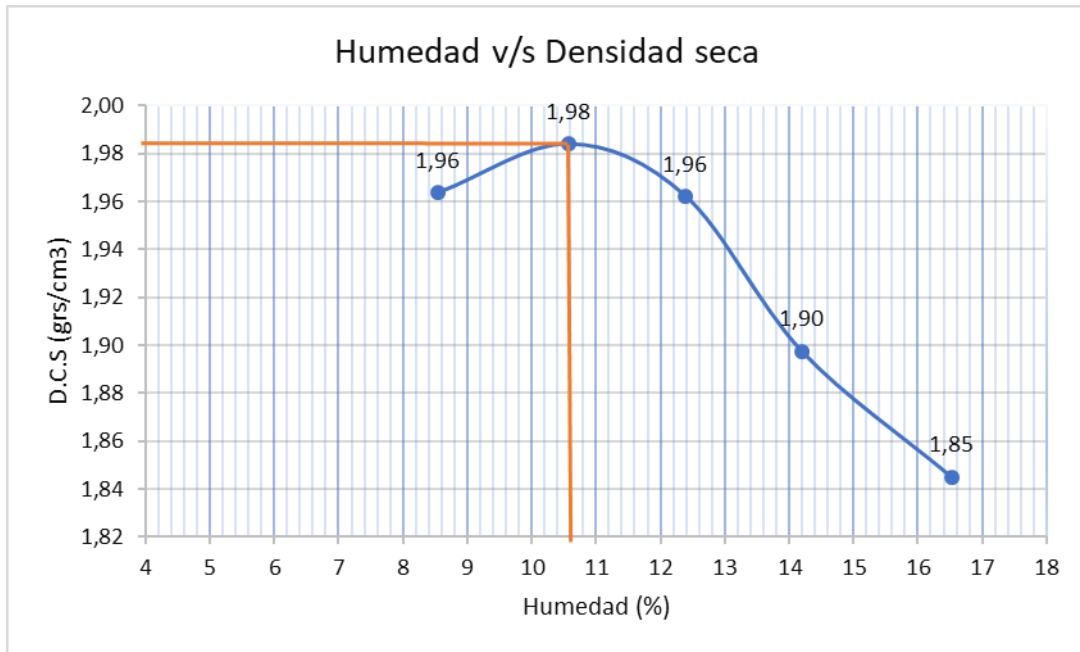


Figura 4.21: Proctor modificado promedio suelo natural 2 – metacaolín 5%.

DMCS (grs/cm ³)	1,98
H. óptima (%)	10,6

Muestra de Suelo 2 – Metacaolín 10%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad óptima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 10% de metacaolín.

Tabla 4.44: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 2 – metacaolín 10%.

H. promedio (%)	6,35	8,39	10,58	12,28	13,68
Densidad Seca (grs/cm ³)	1,93	1,95	1,99	1,97	1,91

Fuente: Elaboración propia, 2017.

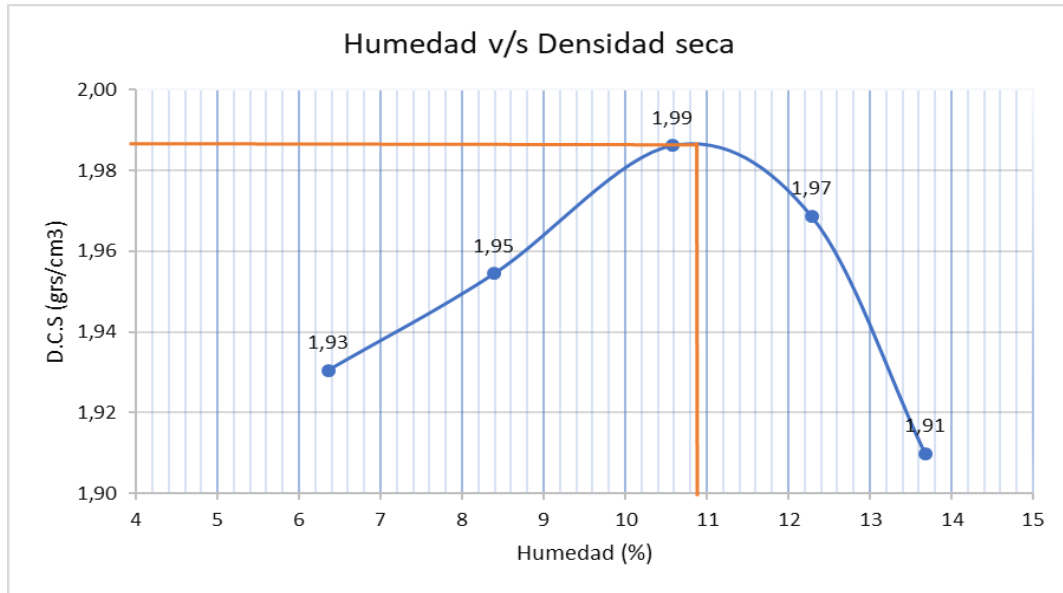


Figura 4.22: Proctor modificado promedio suelo natural 2 – metacaolin 10%.

DMCS (grs/cm3)	1,99
H. óptima (%)	10,83

Muestra de Suelo 2 – Metacaolin 15%

En la siguiente tabla se representa el promedio (de 2 muestras) de los valores de humedad óptima y densidad seca obtenida en cada una de las probetas realizadas en el ensayo para un 15% de metacaolin.

Tabla 4.45: Resultados promedio de Proctor modificado suelo natural 2 – metacaolin 15%.

H. promedio (%)	6,88	8,62	10,78	12,46	14,73
Densidad Seca (grs/cm3)	1,93	1,94	1,98	1,95	1,87

Fuente: Elaboración propia, 2017.

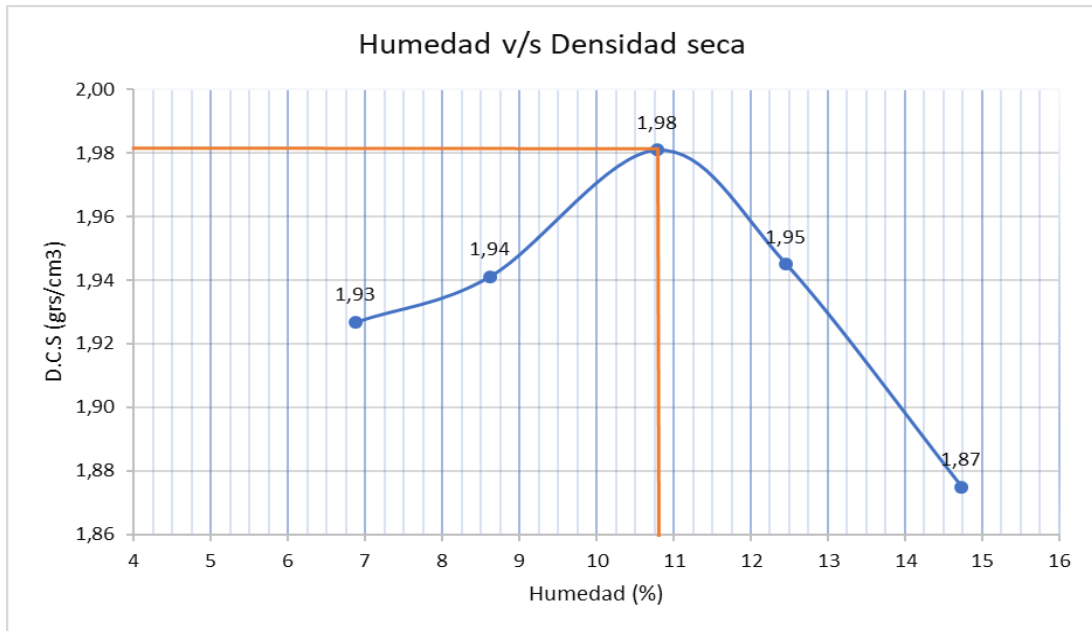


Figura 4.23: Proctor modificado promedio suelo natural 2 – metacaolín 15%.

DMCS (grs/cm ³)	1,98
H. óptima (%)	10,77

Tabla 4.46: Resumen Proctor Modificado suelo natural 2 – porcentajes de metacaolín.

Contenido de metacaolín	DMCS (g/cm ³)	H. óptima (%)
0%	2,02	10,24
5%	1,98	10,60
10%	1,99	10,83
15%	1,98	10,77

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla anterior se desprende el siguiente gráfico para visualizar como se va comportando el suelo con los distintos porcentajes de metacaolín.

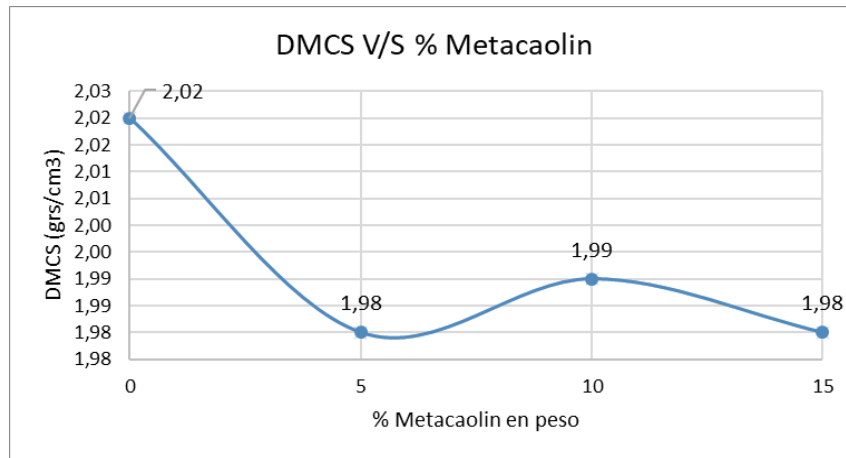


Figura 4.24: % de metacaolin v/s DMCS.

De la figura 4.24 se puede observar como al incorporar un 5% de metacaolin, se produjo una disminución de la DMCS del suelo, que va desde 2,02 (grs/cm³) en el suelo natural hasta 1,98 (grs/cm³) con un 5% de metacaolin. Luego al continuar con un 10% y posteriormente con un 15% de metacaolin, la densidad compactada seca no varía significativamente, alcanzando el valor mínimo con un 10% y un 15% de metacaolin, disminuyendo la densidad en un 1,98% con respecto al suelo patrón (0% metacaolin).

4.2.2.3 Capacidad de soporte suelo natural 2 - % Metacaolin

Se realiza el ensayo de capacidad de soporte con la humedad óptima obtenida en el ensayo proctor modificado para cada porcentaje de metacaolin, buscando encontrar el contenido de metacaolin con el que se obtenga el mayor valor de CBR.

Luego de compactadas las probetas, estas se sumergen durante 96 horas para así medir el % de expansión, y de esta manera determinar si al incorporar este nuevo producto se produce alguna variación en los valores de expansión obtenidos con el suelo en su estado natural.

Muestra de suelo 2 – Metacaolin 5%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 5% de metacaolin.

Tabla 4.47: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 5%.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	2,01	64
25 Golpes	1,92	35
10 Golpes	1,84	18

Fuente: Elaboración propia, 2017.

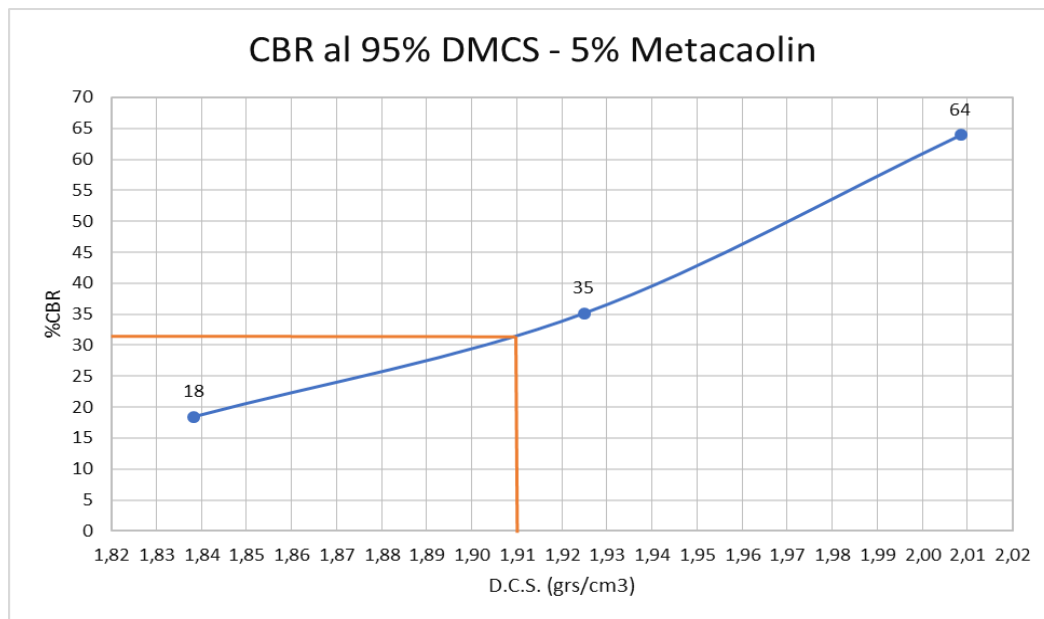


Figura 4.25: Promedio CBR a 0,2” de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 5%.

Tabla 4.48: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 5%.

DMCS (grs/cm ³)	2,01
95% DMCS (grs/cm ³)	1,91
CBR (%)	31,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolin 5%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 5% de metacaolin, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.49: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolin 5%.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	96,996	78,583	92,471	93,627	78,772	90,669	89,009	77,958	89,278

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Muestra de suelo 2 – Metacaolin 10%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 10% de metacaolin.

Tabla 4.50: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 10%.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	1,99	88
25 Golpes	1,92	43
10 Golpes	1,84	20

Fuente: Elaboración propia, 2017.

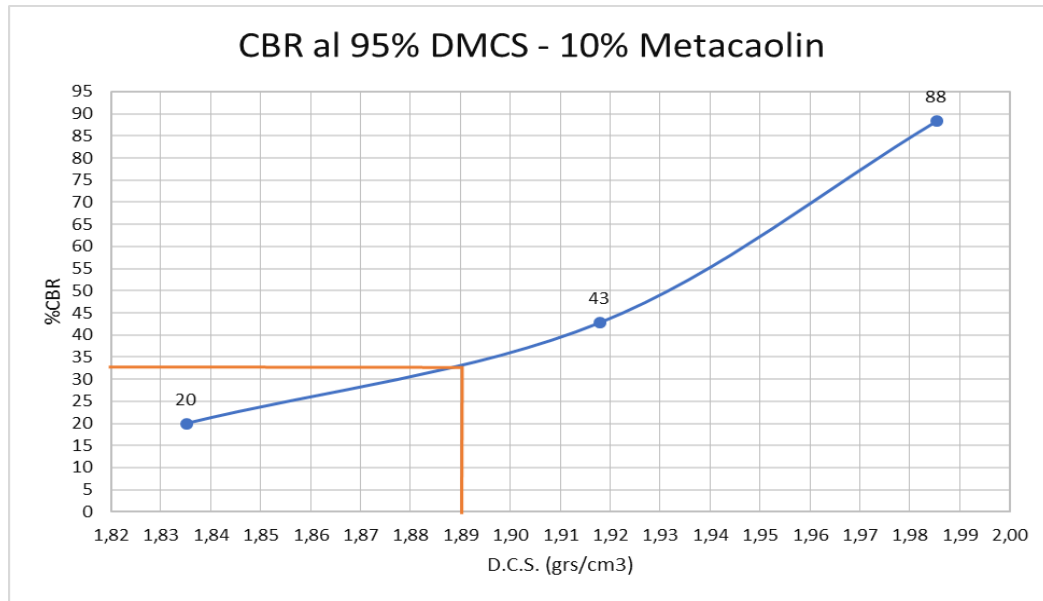


Figura 4.26: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 10%.

Tabla 4.51: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 10%.

DMCS (grs/cm ³)	1,99
95% DMCS (grs/cm ³)	1,89
CBR (%)	32,5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolin 10%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 10% de metacaolin, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.52: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolin 10%.

N° Golpes	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MUESTRA									
GRADO DE SATURACION (S)	93,983	79,670	91,457	94,973	79,627	88,574	91,721	81,889	83,679

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Muestra de suelo 2 – Metacaolin 15%

En la siguiente tabla se representan los valores en porcentaje de la capacidad de soporte CBR y la densidad compactada seca promedio (de 2 muestras) obtenida en cada una de las probetas de suelo con un 15% de metacaolin.

Tabla 4.53: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 15%.

N° de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)
56 Golpes	1,98	94
25 Golpes	1,94	44
10 Golpes	1,82	20

Fuente: Elaboración propia, 2017.

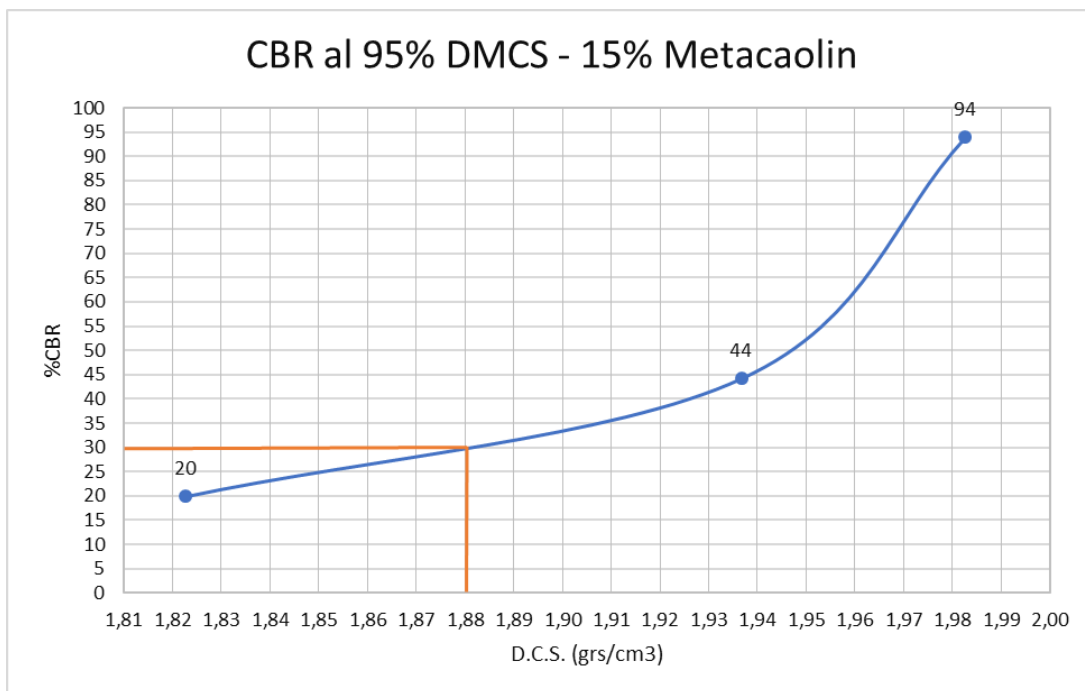


Figura 4.27: Promedio CBR a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 15%.

Tabla 4.54: Promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural 2 – Metacaolin 15%.

DMCS (grs/cm3)	1,98
95% DMCS (grs/cm3)	1,88
CBR (%)	30,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Grado de Saturación: Metacaolin 15%

En la siguiente tabla se visualiza el grado de saturación de las tres probetas para un 15% de metacaolin, tomando tres humedades (superior, media e inferior) por cada una de ellas.

Tabla 4.55: Grado de saturación promedio (de 2 muestras) - Metacaolin 15%.

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	99,360	81,490	92,967	100,574	84,981	98,119	91,222	80,075	88,501

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.56: Resumen promedio CBR al 95% de la DMCS y a 0,2" de penetración de suelo natural – % de metacaolin.

Contenido de metacaolin (%)	CBR saturado (%)
0	30,0
5	31,0
10	32,5
15	30,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla anterior se desprende el siguiente gráfico para visualizar como se va comportando el suelo con los distintos contenidos de metacaolin.

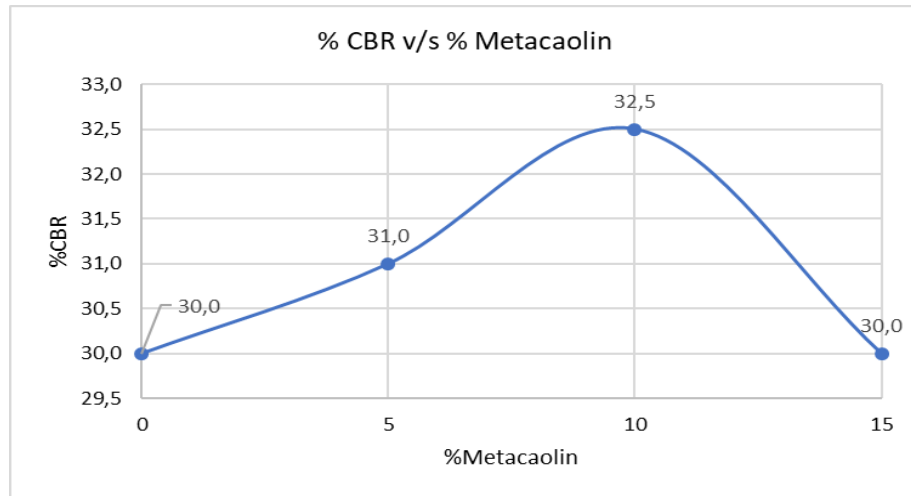


Figura 4.28: % CBR v/s % de metacaolín.

En la figura 4.28 se puede observar que con un 10% de metacaolín se alcanza el máximo de la capacidad de soporte (CBR) aumentando en un 7,7% con respecto a la muestra patrón (0% metacaolín).

A diferencia de lo que ocurre con el suelo 1 (arena arcillosa) donde se produce un incremento de un 35,8% en la capacidad de soporte, para este tipo de suelo la variación que se produce se podría despreciar, debido a que este pequeño aumento está dentro del margen de error al momento de realizar el ensayo.

4.2.2.4 Expansión volumétrica suelo natural 2 - % Metacaolín

Tabla 4.57: Expansión volumétrica suelo natural - % Metacaolín.

% Metacaolín	56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes			Expansión promedio (%)
	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	Expansión (mm)	Altura de molde (mm)	Expansión (%)	
0%	0,2371	116,4	0,20	0,16933	116,4	0,15	0,1820	116,4	0,16	0,17
5%	0,1397	116,4	0,12	0,1143	116,4	0,10	0,05715	116,4	0,05	0,09
10%	0,13335	116,4	0,11	0,10795	116,4	0,09	0,1143	116,4	0,10	0,10
15%	0,0508	116,4	0,04	0,1778	116,4	0,15	0,1651	116,4	0,14	0,11

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla 4.57 se desprende un gráfico para visualizar de mejor manera la influencia que tendría el metacaolin en la expansión volumétrica de los suelos.

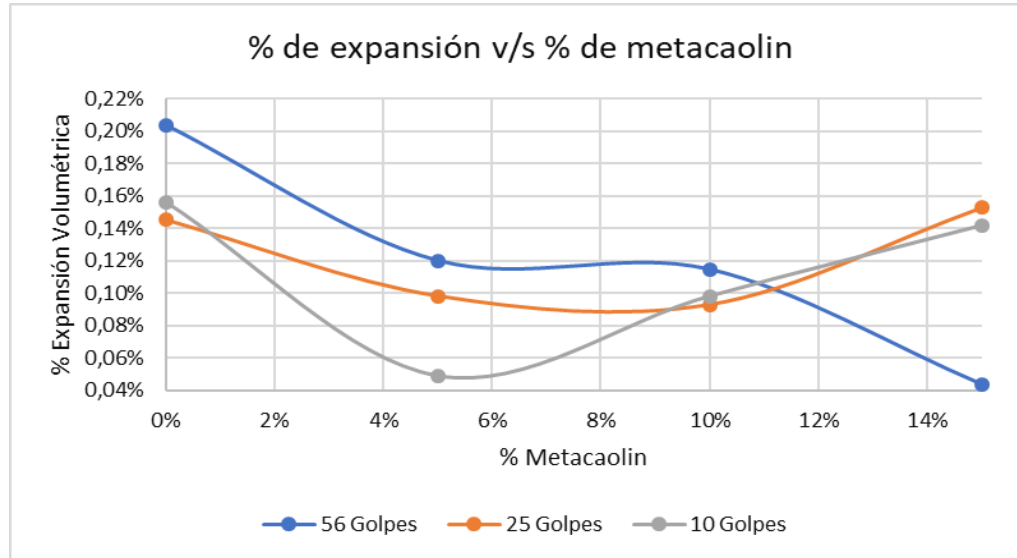


Figura 4.29: Comportamiento de la expansión v/s contenido de metacaolin.

De la figura 4.29 se puede observar como al incorporar un 5% de metacaolin se produce la mayor disminución en la expansión volumétrica del suelo, disminuyendo en un 47% con respecto a la muestra patrón (0% Metacaolin), luego con un 10% y un 15% la expansión se mantiene sin mayores variaciones con un 0,10% y 0,11% respectivamente.

Tabla 4.58: Resumen etapa II, suelo natural 2 - % Metacaolin.

RESUMEN	SUELO NATURAL	Suelo + 5% Metacaolin	Suelo + 10% Metacaolin	Suelo + 15% Metacaolin
Índice de Plasticidad (%)	NP	NP	NP	NP
Peso específico (grs/cm ³)	2,73	2,69	2,69	2,67
Humedad óptima (%)	10,24	10,60	10,83	10,77
D.M.C.S (grs/cm ³)	2,02	1,98	1,99	1,98
Expansión (%)	0,17	0,09	0,10	0,11
C.B.R (%)	30,0	31,0	32,5	30,0
Grado de saturación (%)	83,68	85,82	86,98	89,62

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la tabla 4.58 se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos tanto para el suelo en su estado natural como para el suelo con los distintos contenidos de metacaolin, de esta forma se puede observar de manera más clara el comportamiento que va teniendo el suelo con las distintas dosis.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Suelo 1 - % Metacaolin

5.1.1 Análisis comparativo del suelo

En la siguiente tabla se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el suelo 1.

Tabla 5.1: Resumen de resultados obtenidos para suelo 1 – SC(CL).

SUELO 1	% Metacaolin en peso	ENSAYOS			
		PROCTOR MODIFICADO		CAPACIDAD DE SOPORTE	
		H. Óptima (%)	DMCS (grs/cm ³)	CBR (%)	EXPANSIÓN (%)
	0	9,83	2,05	17,0	1,61
	5	10,20	2,01	12,4	2,95
	10	10,63	1,99	13,0	2,48
	15	11,75	1,94	26,5	1,50
	30	13,80	1,85	24,0	0,55

Fuente: Elaboración propia, 2017.

A partir de la tabla 5.1 se desprende la tabla 5.2 que nos muestra por separado el suelo en su estado natural y, además, el suelo con un 15% de metacaolin que fue con el que se obtuvieron los mejores resultados.

Tabla 5.2: Suelo natural v/s Suelo + contenido óptimo de metacaolin.

	% Metacaolin en peso	DMCS (grs/cm ³)	CBR (%) al 95% DMCS y a 0,2" de penetración	EXPANSIÓN PROMEDIO (%)
SUELO NATURAL	0	2,05	17,0	1,61
	15	1,94	26,5	1,50

Fuente: Elaboración propia, 2017.

5.1.2 Densidad máxima compactada seca (DMCS)

De la tabla 5.2 se desprende el siguiente grafico para visualizar de manera más clara las diferencias que se producen entre el suelo natural y el suelo con un 15% de metacaolin.

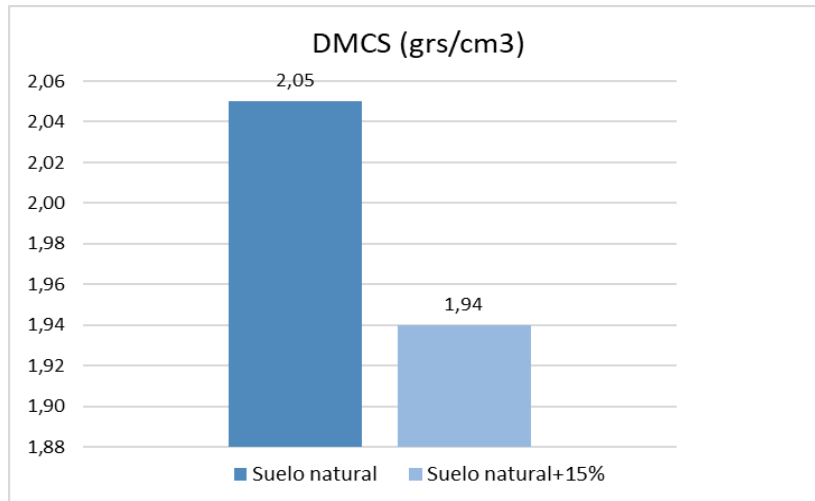


Figura 5.1: Variación de la DMCS suelo 1.

De la figura 5.1 se puede observar que la densidad máxima compactada seca disminuyó un 5,3% al agregar un 15% de metacaolin al suelo en su estado natural, lo que corresponde a una disminución de 0,11 (grs/cm³) en la densidad. Esto debido fundamentalmente a que el peso específico del metacaolin es inferior al del suelo, de tal manera que a medida que se aumentan los contenidos de este, la disminución de la densidad será progresiva, obteniéndose una mezcla de suelo más liviana sin disminuir la capacidad de soporte, lo que se podría aprovechar para su utilización en rellenos estructurales que requieren de esta condición, como por ejemplo en zonas posteriores a muros de contención donde hay que rellenar con un material más liviano debido que el empuje que se produce sobre el muro está directamente relacionado con la densidad del suelo.

5.1.3 Capacidad de soporte

De la tabla 5.2 se desprende el siguiente grafico para visualizar de manera más clara las diferencias que se producen entre el suelo natural y el suelo con un 15% de metacaolin.

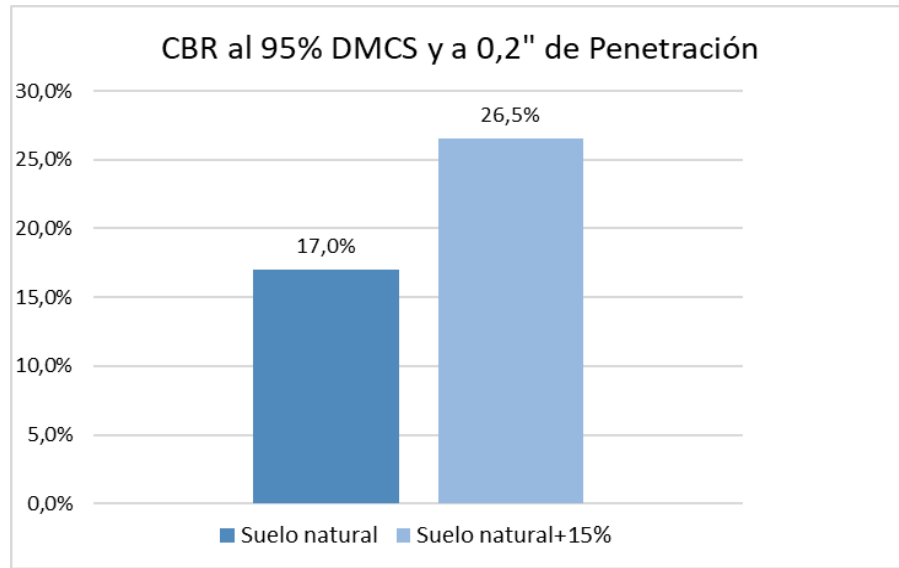


Figura 5.2: Variación de la capacidad de soporte suelo 1.

De la figura 5.2 se puede observar un aumento de un 36% en el CBR, al incorporar un 15% de metacaolín, alcanzando una capacidad de soporte de un 26,5%, permitiendo utilizar este material en la construcción de terraplenes según el manual de carreteras, como se indica en el punto 2.1.5.

5.1.4 Expansión Volumétrica

De la tabla 5.2 se desprende el siguiente gráfico para visualizar de manera más clara las diferencias que se producen entre el suelo natural y el suelo con un 15% de metacaolín.

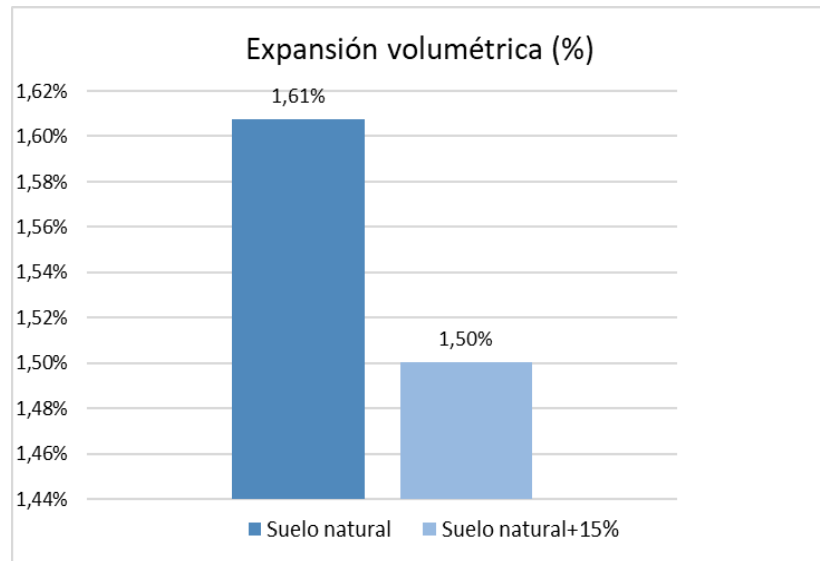


Figura 5.3: Variación de la expansión volumétrica suelo 1.

En la figura 5.3 se puede observar una disminución en la expansión volumétrica del suelo. Al agregar un 15% de metacaolin, la expansión disminuyó en un 6,83% alcanzando así un 1,5% de expansión.

5.2 Suelo 2 - % Metacaolin

5.2.1 Análisis comparativo del suelo

En la siguiente tabla se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el suelo 2.

Tabla 5.3: Resumen de resultados obtenidos para suelo 2 – (SW-SM).

SUELO 2	% Metacaolin en peso	ENSAYOS			
		PROCTOR MODIFICADO		CAPACIDAD DE SOPORTE	
		H. Óptima (%)	DMCS (grs/cm3)	CBR (%)	EXPANSIÓN (%)
	0	10,24	2,02	30,0	0,17
	5	10,60	1,98	31,0	0,09
	10	10,83	1,99	32,5	0,10
	15	10,77	1,98	30,0	0,11

Fuente: Elaboración propia, 2017.

A partir de la tabla 5.3 se desprende la tabla 5.4 que nos muestra por separado el suelo en su estado natural y, además, el suelo con un 10% de metacaolin que fue con el que se obtuvieron los mejores resultados.

Tabla 5.4: Suelo natural v/s Suelo + contenido óptimo de metacaolin.

	% Metacaolin en peso	DMCS (grs/cm ³)	CBR (%) al 95% DMCS y a 0,2" de penetración	EXPANSIÓN PROMEDIO (%)
SUELO NATURAL	0	2,02	30,0	0,17
	10	1,99	32,5	0,10

Fuente: Elaboración propia, 2017.

5.2.2 Densidad máxima compactada seca (DMCS)

De la tabla 5.4 se desprende el siguiente grafico para visualizar de manera más clara las diferencias que se producen entre el suelo natural y el suelo con un 10% de metacaolin.

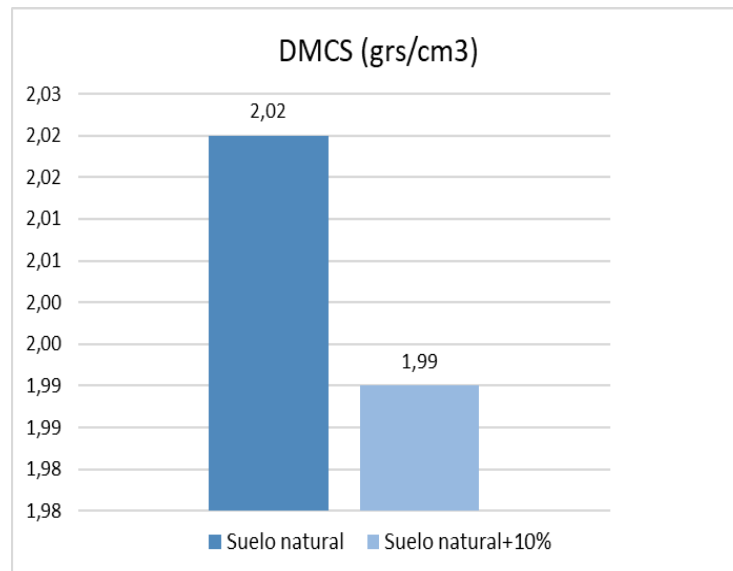


Figura 5.4: Variación de la DMCS suelo 2.

De la figura 5.4 se puede observar que la densidad máxima compactada seca disminuyó en un 1,48% al agregar un 10% de metacaolin al suelo en su estado natural. Esta disminución en la densidad al incorporar un 5% de metacaolin se debe a que el peso específico de este es inferior al del suelo, pero luego con un 10% y un 15% ya no se producen más variaciones en la densidad de la mezcla, manteniéndose prácticamente constante, esto se debe a que el suelo se saturó con metacaolin, por lo tanto, ya no hay una reacción entre este y el suelo, debido a que el porcentaje de finos que posee, es muy bajo en comparación a la arena arcillosa (Suelo 1), es decir, disminuye la reacción química con la arena limosa (suelo 2) por falta de partículas finas con las cuales reaccionar.

5.2.3 Capacidad de soporte

De la tabla 5.4 se desprende el siguiente gráfico para visualizar de manera más clara las diferencias que se producen entre el suelo natural y el suelo con un 10% de metacaolin.

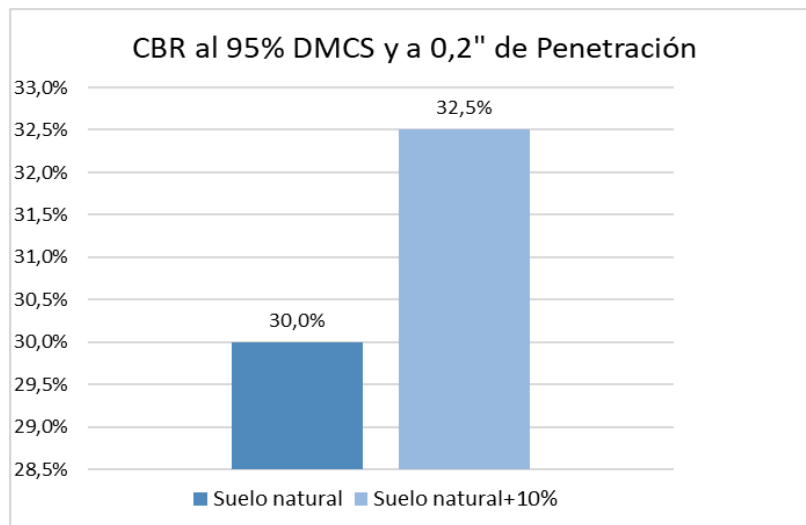


Figura 5.5: Variación de la capacidad de soporte suelo 2.

De la figura 5.5 se puede observar un aumento en un 7,7% al agregar un 10% de metacaolin, alcanzando una capacidad de soporte de un 32,5%, observándose nuevamente que con una arena limosa (maicillo) no se producen mayores variaciones al incorporar metacaolin en su composición, a diferencia de lo que ocurre con la arena arcillosa (suelo 1) mencionado anteriormente.

5.2.4 Expansión volumétrica

De la tabla 5.4 se desprende el siguiente gráfico para visualizar de manera más clara las diferencias que se producen entre el suelo natural y el suelo con un 10% de metacaolín.

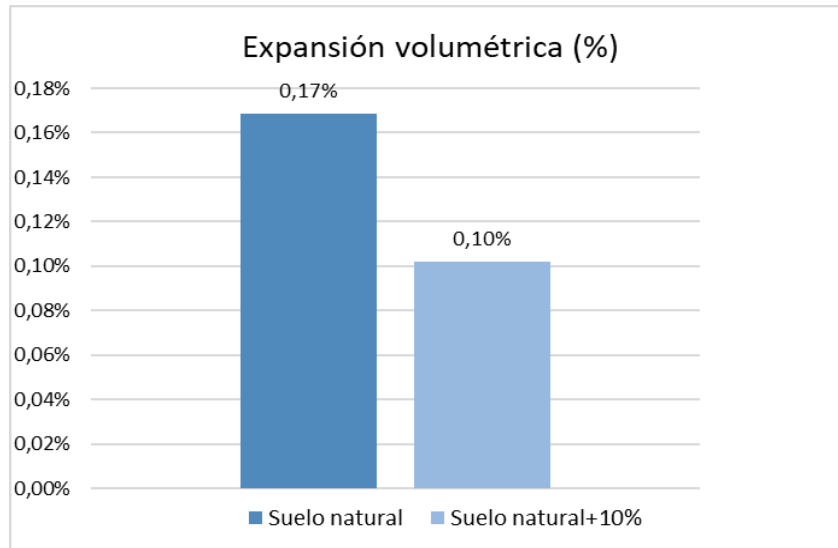


Figura 5.6: Variación de la expansión volumétrica suelo 2.

En la figura 5.6 se puede observar una disminución en la expansión volumétrica del suelo. Al agregar un 10% de metacaolín, la expansión disminuyó en un 41% alcanzando así un 0,1% de expansión.

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

SUELO 1 (Arena Arcillosa) – Metacaolin

Al incorporar metacaolin al suelo natural, se produce una disminución de la DMCS, que se obtiene del ensayo de proctor modificado, esto se debe a que se produce un cambio en la granulometría del suelo natural al incorporar este nuevo producto, que es considerablemente más fino como se puede observar en la tabla 3.1, además, esta disminución se produce al reemplazar el suelo por un material de menor peso específico por lo que dicho suelo tiende a disminuir su densidad a medida que suben las adiciones de metacaolin. Caso contrario sucede con la humedad óptima de compactación, que a medida que vamos aumentando los contenidos de metacaolin, ésta también lo hace. Este incremento en los requerimientos de agua es debido a que las partículas de metacaolin son muy pequeñas, por lo que, si se aumenta el porcentaje, también lo hace la superficie específica de la mezcla, necesitando más humedad para lubricar todas las partículas. Éste fenómeno influye considerablemente en la reducción de la DMCS debido principalmente a que la densidad del agua es inferior a la del suelo, de esta manera a medida que crecen los contenidos de metacaolin, va aumentando progresivamente la cantidad de agua y de esta manera decreciendo la DMCS, obteniéndose una mezcla un 5,36% más liviana al agregar un 15% de metacaolin.

La adición de metacaolin a la masa de suelo produjo un aumento de un 36% en el CBR incorporando un 15% de metacaolin con respecto a la muestra patrón, alcanzando un 26,5%, permitiendo utilizar este suelo en la construcción de rellenos o terraplenes. Este aumento en la capacidad de soporte se debe fundamentalmente a que la reacción química que se produce es a nivel molecular, y este tipo de suelo (Arena Arcillosa) posee un 40% de material fino que reacciona químicamente con la incorporación de metacaolin, resultando una masa de suelo con mejores características, más estable que la masa de suelo en su estado natural (sin metacaolin).

Cuando se incorpora un 15% de metacaolin la expansión volumétrica del suelo sufre una disminución con respecto a la muestra patrón, disminuyendo en un 6,83%, alcanzando un 1,5% de expansión, pero como se puede observar en la figura 4.17, con un 30% de metacaolin la expansión del suelo sigue disminuyendo, pero se le da un mayor énfasis a lo que sucede con un 15% de metacaolin que es el contenido con el que se obtiene una mayor capacidad de soporte y además el porcentaje de expansión es inferior a lo que el manual de carreteras define como material inadecuado (Material inadecuado > 3%), permitiendo su utilización.

SUELO 2 (Arena Limosa) – Metacaolin

Al incorporar metacaolin al suelo natural se produce una disminución de la DMCS. Como se puede observar en la figura 4.24, con un 5% de metacaolin, la DMCS disminuye en un 1,98%, luego al continuar con un 10% y posteriormente con un 15% de metacaolin, la densidad compactada seca no varía significativamente, manteniéndose prácticamente constante. El mismo comportamiento se puede observar con la humedad óptima de compactación, pero de manera inversa, debido a que al agregar un 5% de metacaolin aumenta la cantidad de agua requerida, pero luego al incorporar un 10% y un 15% de metacaolin, esta se mantiene sin grandes variaciones a diferencia de la mezcla con un 5%. Esto se debe fundamentalmente a que la reacción química que permite originar mayores cambios en las propiedades del suelo se produce a nivel molecular, y este tipo de suelo (Arena limosa) solo posee un 5% de material fino que podría reaccionar químicamente con la incorporación de metacaolin, a diferencia de la arena arcillosa (Suelo 1) que posee un 40% de material fino, lo que lo hace más activo químicamente a diferencia de los limos, por esta razón no se obtienen mayores variaciones al incorporar metacaolin a un suelo limoso.

La incorporación de metacaolin a la masa de suelo no produjo un aumento considerable, casi despreciable, en la capacidad de soporte con respecto a la muestra patrón, aumentando en un 7,7% el CBR con un 10% de metacaolin, aumento que podría atribuirse mas a una mejora en la graduación del suelo que a una reacción, suelo – Metacaolin, por las razones anteriormente mencionadas.

Cuando se incorpora un 5% de metacaolin la expansión volumétrica del suelo sufre una disminución con respecto a la muestra patrón, disminuyendo en un 47%, alcanzando un 0,09% de expansión, luego al continuar con un 10% y posteriormente con un 15% de metacaolin, la expansión del suelo no varía significativamente, manteniéndose prácticamente constante con un 0,10% y 0,11% de expansión respectivamente.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, L., & Figueredo, M. (2006). *TRATAMIENTO TÉRMICO DEL CAOLÍN Y SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES*. Universidad Nacional de Asunción, Asunción.
- Alvarez Pabón, J. (2010). Estabilización de sub rasantes.
- Barros, L. P., & Imhoff, F. A. (2010). Resistencia sísmica del suelo-cemento post tensado en construcciones de baja complejidad geométrica. *Revista de la construcción*, 9, 26-38.
- Crespo Villalaz, C. (1998). *Mecánica de suelos y Cimentaciones* (Limusa Ed. 5 ed.). México.
- De Solminihac T., H., Echeverría G., G., & Thenoux Z., G. (2012). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*. Pontificia Universidad Católica de Chile,
- Díaz, J. (2011). Suelocemento in situ. In IECA (Ed.).
- Echeverría Melo, N. A. (2014). Evaluación de diferentes adiciones frente a su capacidad para fijar ión cloruro en morteros. *Departamento de Ingeniería de la construcción*.
- Goncalves, J. P., Tavares, L. M., Toledo Filho, R. D., & Fairbairn, E. M. R. (2009). *Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick*. Universidad Federal de Bahía,
- Gor, V. S., Thakur, L. S., & Biyani, K. R. (2013). *Study of Typical Characteristics of Expansive Subgrade With Geotextiles and Cushion Materials*. Paper presented at the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- IECA. (2011). SueloCemento in situ. In I. E. d. C. y. s. Aplicaciones (Ed.). España.
- IECA. (2013). Estabilización de suelos con cemento. In I. E. d. C. y. s. Aplicaciones (Ed.). España.
- Kingery, W. D.; Uhlmann, D. R.; Bowen, H. K.: Introduction to Ceramics. 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1976

- Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986–991. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001
- Lambe, W., & Whitman, R. (1972). *Mecánica de suelos* (Limusa Ed.).
- Mahon, T., Thurmul, F., & Halstead, J. (1969). *Quality assurance in highway Constructions* (Vol. 35).
- Meza Ochoa, V. E. (2012). *SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACIÓN A LA CÁTEDRA UNIVERSITARIA*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. (31)
- Molero, C., & Galvis, R. (2011). *La variable ambiental en la estabilización de suelos para uso en pavimentos asfálticos*.
- Orziola, S. (2006). *Uso de Escoria de Cobre en Cementos*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- P.K., M., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete : microstructure, properties, and materials* (Fourth Ed. 3 ed.). New York.
- pino, J. d. (2011). Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. *Revista de arquitectura e Ingeniería*, 5.
- Restrepo, J., Restrepo, O., & Tobón, J. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *scielo*.
- Sánchez, R. (2006). *Estudio de Mecánica de suelos en la Planta Procesadora de Nopal Los Remedios San Bernardino Tlaxacalancingo, Municipio San Andrés Choluda, Puebla*. Universidad de las Américas Puebla, México.
- Siddique Rafat. *Waste Materials and By-Products in Concrete*. 1 ed. Springer, 2007. ISBN-10: 354074293X.
- Torres-Agredo, J., Mejía-de-Gutiérrez, R., & Delvasto-Arjona, S. (2011). Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado. *Ingeniería y Universidad*, 15, 77-90.

Viñuelas, G. (2007). Tecnología y construcción con tierra. *Journal of Cultural Heritage Studies*, 220-231.

ANEXOS

SUELO 1:

Proctor suelo natural 1 - muestra 1

CAPAS	5		N° de golpes		25			
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm			
DETERMINACION DE LA HUMEDAD								
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	168,43	170,06	214,26	197,22	198,65	230,92	184,5	210,47
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	159,84	161,94	200,44	184,06	182,64	212,51	167,07	189,55
MASA RECIPIENTE (g)	45,89	50,65	50,46	40,27	37,1	47,43	34,48	30,75
MASA SUELO SECO (g)	113,95	111,29	149,98	143,79	145,54	165,08	132,59	158,8
MASA AGUA (g)	8,59	8,12	13,82	13,16	16,01	18,41	17,43	20,92
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7,53839	7,29625	9,21456	9,15224	11,0004	11,1522	13,1458	13,1738
HUMEDAD PROMEDIO (%)	7,417		9,183		11,076		13,160	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD								
MUESTRA N°	1	2	3	4				
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3710	3725	3756	3669				
MASA MOLDE (g)	1747	1625	1625	1625				
MASA SUELO HUMEDO (g)	1963	2100	2131	2044				
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	940	950	950	950				
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,0883	2,21053	2,24316	2,15158				
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,9441	2,0246	2,01947	1,90136				

Proctor suelo natural 1 - muestra 2

CAPAS	5		N° de golpes		25			
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm			
DETERMINACION DE LA HUMEDAD								
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	189,82	217,77	207,9	207,12	188,05	191,46	209,93	212,7
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	181,5	206,81	195,81	195,01	174,49	176,85	192,4	193,19
MASA RECIPIENTE (g)	46,05	24,28	48,24	45,89	40,75	30,75	50,46	31,26
MASA SUELO SECO (g)	135,45	182,53	147,57	149,12	133,74	146,1	141,94	161,93
MASA AGUA (g)	8,32	10,96	12,09	12,11	13,56	14,61	17,53	19,51
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,14249	6,00449	8,19272	8,12098	10,1391	10	12,3503	12,0484
HUMEDAD PROMEDIO (%)	6,073		8,157		10,070		12,199	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD								
MUESTRA N°	1	2	3	4				
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3579	3854	3778	3820				
MASA MOLDE (g)	1625	1747	1625	1747				
MASA SUELO HUMEDO (g)	1954	2107	2153	2073				
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	940	950	940				
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,05684	2,24149	2,26632	2,20532				
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,93907	2,07244	2,05899	1,96554				

Proctor suelo natural 1 - muestra 3

CAPAS	5		N° de golpes		25			
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm			
DETERMINACION DE LA HUMEDAD								
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	228,32	295,54	195,11	265,8	244,21	224,07	180,3	161,05
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	215,6	279,6	180,73	247,81	224,5	207,44	163,99	146,75
MASA RECIPIENTE (g)	37,1	50,65	24,28	30,75	46,05	50,46	40,75	31,26
MASA SUELO SECO (g)	178,5	228,95	156,45	217,06	178,45	156,98	123,24	115,49
MASA AGUA (g)	12,72	15,94	14,38	17,99	19,71	16,63	16,31	14,3
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7,12605	6,96222	9,19143	8,28803	11,0451	10,5937	13,2343	12,382
HUMEDAD PROMEDIO (%)	7,044		8,740		10,819		12,808	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD								
MUESTRA N°	1	2	3	4				
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3686	3705	3880	3688				
MASA MOLDE (g)	1747	1625	1747	1625				
MASA SUELO HUMEDO (g)	1939	2080	2133	2063				
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	940	950	940	950				
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,06277	2,18947	2,26915	2,17158				
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,92702	2,0135	2,04761	1,92502				

Capacidad de soporte suelo natural 1 - muestra 1

N° de molde	24	19	13
N° de golpes	56	25	10
masa molde	5105	4545	4978
cap volumen	2108	2112	2100
m molde + suelo	9855	9143	9191
masa suelo comp	4750	4598	4213
densidad humeda	2,25	2,18	2,01

H. antes de inmersión							
N° Golpes	56		25		10		
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	183,31	170,12	228,26	170,76	226,66	170,38	
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	171,71	158,52	213,1	160,02	212,04	158,93	
MASA RECIPIENTE (g)	42,49	31,72	48,24	43,25	52,44	30,25	
MASA SUELO SECO (g)	129,22	126,8	164,86	116,77	159,6	128,68	
MASA AGUA (g)	11,6	11,6	15,16	10,74	14,62	11,45	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,9769386	9,148265	9,19568118	9,19756787	9,160401	8,8980417	
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,063		9,197		9,029		

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M24			M19			M13		
MUESTRA N°	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	99,68	92,97	89,77	89,11	104,58	105,51	60,99	50,17	57,6
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	92,3	87,08	84,05	81,34	96,31	97,84	54,63	45,98	52,43
MASA RECIPIENTE (g)	27,2	27,46	28,58	25,83	27,17	29,6	13,01	13,08	13,01
MASA SUELO SECO (g)	65,1	59,62	55,47	55,51	69,14	68,24	41,62	32,9	39,42
MASA AGUA (g)	7,38	5,89	5,72	7,77	8,27	7,67	6,36	4,19	5,17
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11,336406	9,879235	10,3118803	13,9974779	11,961238	11,239742	15,28111	12,73556	13,11517
HUMEDAD PROMEDIO (%)	10,509			12,399			13,711		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	23	43	49
Expansión en mm	0,5842	1,0922	1,2446
% de expansión	0,50%	0,94%	1,07%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,06
56 Golpes	2,06	37,90	95% DMCS (grs/cm3)	1,96
25 Golpes	2,00	21,86	CBR (%)	17,0
10 Golpes	1,84	5,06		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	60	1,3	0,25	39	1,0	0,25	1	0,4
0,50	112	2,1	0,50	61	1,3	0,50	2	0,4
0,75	150	2,6	0,75	77	1,5	0,75	2,5	0,4
1,00	175	3,0	1,00	91	1,7	1,00	5	0,5
1,25	192	3,2	1,25	100	1,9	1,25	5,5	0,5
1,50	204	3,4	1,50	109	2,0	1,50	6	0,5
1,75	224	3,7	1,75	113	2,1	1,75	7,8	0,5
2,00	236	3,9	2,00	125	2,2	2,00	8,8	0,5
2,25	249	4,1	2,25	131	2,3	2,25	10	0,5
2,50	265	4,3	2,50	138	2,4	2,50	11	0,6
2,75	277	4,5	2,75	144	2,5	2,75	12,1	0,6
3,00	289	4,7	3,00	151	2,6	3,00	12,8	0,6
3,25	297	4,8	3,25	156	2,7	3,25	14	0,6
3,50	310	5,0	3,50	162	2,8	3,50	15	0,6
3,75	321	5,2	3,75	166	2,9	3,75	15,5	0,6
4,00	334	5,4	4,00	170	2,9	4,00	16,5	0,6

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	104,222	90,826	94,803	112,000	95,707	89,934	91,862	76,559	78,841

Capacidad de soporte suelo natural 1 - muestra 2

N° de molde	22	23	6			
N° de golpes	56	25	10			
masa molde	5281	5218	4674			
cap volumen	2106	2122	2120			
m molde + suelo	10068	9690	8638			
masa suelo comp	4787	4472	3964			
densidad humeda	2,27	2,11	1,87			
H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	216,3	234,55	215,77	194,7	243,53	201,59
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	202,43	219,33	201,39	182,61	228,26	189,96
MASA RECIPIENTE (g)	46,71	51,39	33,63	45,89	50,46	50,65
MASA SUELO SECO (g)	155,72	167,94	167,76	136,72	177,8	139,31
MASA AGUA (g)	13,87	15,22	14,38	12,09	15,27	11,63
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,907012587	9,062761	8,571769	8,842890579	8,5883015	8,348288
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,985		8,707		8,468	

H. Despues de inmersión		M22			M23			M6		
N° Golpes		56			25			10		
MUESTRA N°		Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)		111,1	97,55	101,78	106,24	100,5	88,79	178,92	190,87	211,82
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)		100,43	91,19	95,18	96,66	92,91	82,65	158,76	169,78	188,47
MASA RECIPIENTE (g)		29,67	28,37	30,1	28,87	27,98	28,61	32,52	30,7	46,02
MASA SUELO SECO (g)		70,76	62,82	65,08	67,79	64,93	54,04	126,24	139,08	142,45
MASA AGUA (g)		10,67	6,36	6,6	9,58	7,59	6,14	20,16	21,09	23,35
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		15,07914076	10,12416	10,14136	14,13187786	11,689512	11,36195	15,96958	15,16393	16,39172
HUMEDAD PROMEDIO (%)		11,782			12,394			15,842		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	41	63	95
Expansión en mm	1,0414	1,6002	2,413
% de expansión	0,89%	1,37%	2,07%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,08
56 Golpes	2,08	31,54	95% DMCS (grs/cm3)	1,98
25 Golpes	1,94	14,99	CBR (%)	18,5
10 Golpes	1,72	4,95		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	35	0,9	0,25	22	0,7	0,25	1	0,4
0,50	69	1,4	0,50	33,5	0,9	0,50	2	0,4
0,75	96,5	1,8	0,75	43	1,0	0,75	2,5	0,4
1,00	121,5	2,2	1,00	51,5	1,2	1,00	4	0,4
1,25	142	2,5	1,25	60	1,3	1,25	5	0,5
1,50	159,5	2,8	1,50	65,9	1,4	1,50	6	0,5
1,75	176	3,0	1,75	72	1,5	1,75	7,5	0,5
2,00	192	3,2	2,00	77,5	1,5	2,00	8	0,5
2,25	207	3,5	2,25	82,5	1,6	2,25	9,5	0,5
2,50	222,8	3,7	2,50	86,5	1,7	2,50	10,5	0,5
2,75	244	4,0	2,75	92	1,8	2,75	11	0,6
3,00	263	4,3	3,00	96	1,8	3,00	12	0,6
3,25	279	4,5	3,25	100	1,9	3,25	13	0,6
3,50	292,5	4,7	3,50	105	2,0	3,50	14	0,6
3,75	308,5	5,0	3,75	110	2,0	3,75	15,5	0,6
4,00	330,5	5,3	4,00	114,4	2,1	4,00	16	0,6

N° Golpes		56			25			10		
MUESTRA N°		Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)		144,724	97,168	97,333	101,503	83,961	81,608	78,177	74,233	80,244

Capacidad de soporte suelo natural 1 - muestra 3

N° de molde	23	6	22				
N° de golpes	56	25	10				
masa molde	5218	4674	5281				
cap volumen	2122	2120	2106				
m molde + suelo	9991	9301	9541				
masa suelo comp	4773	4627	4260				
densidad humeda	2,25	2,18	2,02				
H. antes de inmersión							
N° Golpes		56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	168,37	181,16	171,67	146,52	184,8	173,62	
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	155,47	166,49	158,41	134,66	170,38	159,14	
MASA RECIPIENTE (g)	37,46	40,27	33,91	31,39	39,94	30,25	
MASA SUELO SECO (g)	118,01	126,22	124,5	103,27	130,44	128,89	
MASA AGUA (g)	12,9	14,67	13,26	11,86	14,42	14,48	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	10,93127701	11,62256	10,6506	11,48445822	11,05489	11,23439	
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,277		11,068		11,145		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	108	113	128
Expansión en mm	2,7432	2,8702	3,2512
% de expansión	2,36%	2,47%	2,79%

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	19	0,7	0,25	19	0,7	0,25	1	0,4
0,50	40	1,0	0,50	34	0,9	0,50	3	0,4
0,75	58	1,3	0,75	46	1,1	0,75	5	0,5
1,00	74	1,5	1,00	60	1,3	1,00	8	0,5
1,25	90	1,7	1,25	70	1,4	1,25	10	0,5
1,50	106	2,0	1,50	82	1,6	1,50	11,5	0,6
1,75	119	2,2	1,75	93	1,8	1,75	13,5	0,6
2,00	136	2,4	2,00	100	1,9	2,00	16	0,6
2,25	150	2,6	2,25	110	2,0	2,25	17,5	0,7
2,50	158	2,7	2,50	118	2,1	2,50	20	0,7
2,75	175	3,0	2,75	127	2,3	2,75	21	0,7
3,00	186	3,2	3,00	135	2,4	3,00	24	0,7
3,25	198	3,3	3,25	141	2,5	3,25	25,5	0,8
3,50	210	3,5	3,50	147	2,6	3,50	26,5	0,8
3,75	220	3,7	3,75	155	2,7	3,75	27	0,8
4,00	227	3,8	4,00	162	2,8	4,00	28,5	0,8

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)
56 Golpes	2,02	23,45
25 Golpes	1,96	18,24
10 Golpes	1,82	6,10

Proctor modificado + 5% de metacaolin muestra 1 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	240,16	276,32	197,59	261,08	226,27	181,41	232,05	211,13	141,4	150,21
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	227,89	262,26	184,55	243,64	208,56	167,3	211,92	191,38	126,46	134,67
MASA RECIPIENTE (g)	45,89	50,65	40,75	50,46	37,1	33,88	51,39	30,75	31,03	33,63
MASA SUELO SECO (g)	182	211,61	143,8	193,18	171,46	133,42	160,53	160,63	95,43	101,04
MASA AGUA (g)	12,27	14,06	13,04	17,44	17,71	14,11	20,13	19,75	14,94	15,54
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,74176	6,6443	9,06815	9,02785	10,3289	10,5756	12,5397	12,2953	15,6555	15,38
HUMEDAD PROMEDIO (%)	6,693		9,048		10,452		12,418		15,518	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3538	3688	3747	3684	3578					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1913	2063	2122	2059	1953					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,01368	2,17158	2,23368	2,16737	2,05579					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,88736	1,9914	2,02231	1,92796	1,77963					

Proctor modificado + 5% de metacaolin muestra 2 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	206,4	224,22	218,37	204	188,13	215,93	176,22	196,24	300,88	322,92
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	198,74	216,22	206,43	193,74	174,11	200,61	161,02	179,02	269,39	290,76
MASA RECIPIENTE (g)	32,3	46,05	33,88	46,05	32,3	44,71	30,65	31,34	33,28	47,43
MASA SUELO SECO (g)	166,44	170,17	172,55	147,69	141,81	155,9	130,37	147,68	236,11	243,33
MASA AGUA (g)	7,66	8	11,94	10,26	14,02	15,32	15,2	17,22	31,49	32,16
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	4,60226	4,70118	6,91973	6,94698	9,88647	9,82681	11,6591	11,6603	13,337	13,2166
HUMEDAD PROMEDIO (%)	4,652		6,933		9,857		11,660		13,277	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3418	3573	3714	3721	3661					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1793	1948	2089	2096	2036					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	1,88737	2,05053	2,19895	2,20632	2,14316					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,80348	1,91757	2,00165	1,97593	1,89197					

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 5% de metacaolin (suelo 1).

N° de molde	1	5	2
N° de golpes	56	25	10
masa molde	4566	4549	4635
cap volumen	2120	2132	2122
m molde + suelo	9253	8993	8689
masa suelo comp	4687	4444	4054
densidad humeda	2,21	2,08	1,91

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	235,37	180,14	185,05	183,19	137,51	163,32
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	220,37	169,3	174,1	172,2	129,62	153,8
MASA RECIPIENTE (g)	42,85	44,71	42,49	45,05	33,88	40,75
MASA SUELO SECO (g)	177,52	124,59	131,61	127,15	95,74	113,05
MASA AGUA (g)	15	10,84	10,95	10,99	7,89	9,52
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,4497521	8,700538	8,32003647	8,64333464	8,2410696	8,4210526
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,575		8,482		8,331	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M1			M5			M2		
MUESTRA N°	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	176,94	204,48	197,39	155,08	195,86	184,44	169,65	242,64	208,89
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	159,37	186,61	180,67	139,67	179,3	165,77	147,13	215,91	185,81
MASA RECIPIENTE (g)	37,15	42,75	43,28	33,93	50,67	30,84	24,33	47,48	40,35
MASA SUELO SECO (g)	122,22	143,86	137,39	105,74	128,63	134,93	122,8	168,43	145,46
MASA AGUA (g)	17,57	17,87	16,72	15,41	16,56	18,67	22,52	26,73	23,08
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	14,375716	12,4218	12,1697358	14,5734821	12,874135	13,836804	18,33876	15,87009	15,8669
HUMEDAD PROMEDIO (%)	12,989			13,761			16,692		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	129	132	140
Expansión en mm	3,2766	3,3528	3,556
% de expansión	2,81%	2,88%	3,05%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,04
56 Golpes	2,04	20,70	(grs/cm3)	1,93
25 Golpes	1,92	9,64	CBR (%)	10,0
10 Golpes	1,76	3,79		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	16	0,6	0,25	5	0,5	0,25	0	0,4
0,50	38,5	1,0	0,50	13	0,6	0,50	0	0,4
0,75	57	1,2	0,75	19	0,7	0,75	0	0,4
1,00	73	1,5	1,00	24	0,7	1,00	0	0,4
1,25	84	1,6	1,25	28	0,8	1,25	0	0,4
1,50	98	1,8	1,50	33,5	0,9	1,50	0	0,4
1,75	106	2,0	1,75	37	0,9	1,75	0	0,4
2,00	117	2,1	2,00	40,5	1,0	2,00	0	0,4
2,25	125	2,2	2,25	43	1,0	2,25	0	0,4
2,50	134	2,4	2,50	45,5	1,1	2,50	0	0,4
2,75	138,5	2,5	2,75	49,5	1,1	2,75	0	0,4
3,00	145,5	2,6	3,00	53,5	1,2	3,00	0	0,4
3,25	153	2,7	3,25	56	1,2	3,25	0	0,4
3,50	157	2,7	3,50	58	1,3	3,50	0	0,4
3,75	165	2,8	3,75	60	1,3	3,75	0	0,4
4,00	172,5	3,0	4,00	61,5	1,3	4,00	0	0,4

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	119,726	103,453	101,354	96,935	85,632	92,035	93,576	80,979	80,963

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 5% de metacaolin (suelo 1).

N° de molde	3	23	22
N° de golpes	56	25	10
masa molde	4544	5218	5281
cap volumen	2126	2122	2106
m molde + suelo	9262	9643	9359
masa suelo comp	4718	4425	4078
densidad humeda	2,22	2,09	1,94

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	184,39	169,14	169,75	165,98	171,1	156,14
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	171,94	158,81	158,29	154,31	159,34	146,3
MASA RECIPIENTE (g)	31,26	42,84	33,78	31,03	31,49	37,52
MASA SUELO SECO (g)	140,68	115,97	124,51	123,28	127,85	108,78
MASA AGUA (g)	12,45	10,33	11,46	11,67	11,76	9,84
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,84987205	8,907476	9,20408	9,466255678	9,1982792	9,04578
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,879		9,335		9,122	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M3			M23			M22		
MUESTRA N°	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	115,67	124,09	103,04	109,11	137,77	133,77	110,39	107,95	125,14
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	105,35	114,55	95,2	98,12	125,31	120,79	97,28	95,17	111,9
MASA RECIPIENTE (g)	31,12	28,61	27,44	26,2	28,86	28,53	25,81	15,68	28,59
MASA SUELO SECO (g)	74,23	85,94	67,76	71,92	96,45	92,26	71,47	79,49	83,31
MASA AGUA (g)	10,32	9,54	7,84	10,99	12,46	12,98	13,11	12,78	13,24
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,90273474	11,10077	11,57025	15,28086763	12,918611	14,06894	18,34336	16,07749	15,89245
HUMEDAD PROMEDIO (%)	12,191			14,089			16,771		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	128	131	150
Expansión en mm	3,2512	3,3274	3,81
% de expansión	2,79%	2,86%	3,27%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,04
56 Golpes	2,04	18,39	(grs/cm3)	1,94
25 Golpes	1,91	12,10	CBR (%)	14,0
10 Golpes	1,77	3,79		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	13	0,6	0,25	13	0,6	0,25	0	0,4
0,50	30	0,8	0,50	23,5	0,7	0,50	0	0,4
0,75	47	1,1	0,75	32	0,9	0,75	0	0,4
1,00	62	1,3	1,00	38	1,0	1,00	0	0,4
1,25	74	1,5	1,25	43	1,0	1,25	0	0,4
1,50	84	1,6	1,50	48	1,1	1,50	0	0,4
1,75	93	1,8	1,75	53	1,2	1,75	0	0,4
2,00	101	1,9	2,00	57,5	1,2	2,00	0	0,4
2,25	108,5	2,0	2,25	62	1,3	2,25	0	0,4
2,50	114	2,1	2,50	65,5	1,4	2,50	0	0,4
2,75	121,5	2,2	2,75	67	1,4	2,75	0	0,4
3,00	128	2,3	3,00	72	1,5	3,00	0	0,4
3,25	135	2,4	3,25	74	1,5	3,25	0	0,4
3,50	141	2,5	3,50	76	1,5	3,50	0	0,4
3,75	148	2,6	3,75	82	1,6	3,75	0	0,4
4,00	154	2,7	4,00	84	1,6	4,00	0	0,4

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	116,405	92,945	96,876	99,813	84,383	91,897	95,373	83,592	82,630

Proctor modificado + 10% de metacaolin muestra 1 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	223,17	238,01	183,4	183,21	190,67	166,78	185,99	211,81	203,78	192,24
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	213,38	227,08	172,52	172,69	178,72	156,64	171,1	193,65	185,53	174,65
MASA RECIPIENTE (g)	45,91	40,27	32,75	31,72	51,39	50,65	39,94	37,1	52,44	47,43
MASA SUELO SECO (g)	167,47	186,81	139,77	140,97	127,33	105,99	131,16	156,55	133,09	127,22
MASA AGUA (g)	9,79	10,93	10,88	10,52	11,95	10,14	14,89	18,16	18,25	17,59
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	5,84582	5,85086	7,78422	7,46258	9,38506	9,56694	11,3525	11,6001	13,7125	13,8264
HUMEDAD PROMEDIO (%)	5,848		7,623		9,476		11,476		13,769	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3435	3534	3675	3722	3666					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1810	1909	2050	2097	2041					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	1,90526	2,00947	2,15789	2,20737	2,14842					
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,79999	1,86713	1,97111	1,98012	1,8884					

Proctor modificado + 10% de metacaolin muestra 2 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	202,41	201	224,26	162,86	192,36	184,35	244,21	217,24		
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	189,38	187,02	207,32	150,24	175	168,2	217,42	194,92		
MASA RECIPIENTE (g)	47,43	32,75	50,65	31,72	37,1	39,94	40,27	52,44		
MASA SUELO SECO (g)	141,95	154,27	156,67	118,52	137,9	128,26	177,15	142,48		
MASA AGUA (g)	13,03	13,98	16,94	12,62	17,36	16,15	26,79	22,32		
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,17929	9,06203	10,8125	10,648	12,5888	12,5916	15,1228	15,6654		
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,121		10,730		12,590		15,394			
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3655	3719	3694	3612						
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625						
MASA SUELO HUMEDO (g)	2030	2094	2069	1987						
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	950	950	950	950						
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	2,13684	2,20421	2,17789	2,09158						
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,95824	1,99061	1,93436	1,81255						

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 10% de metacaolin (suelo 1).

N° de molde	11	10	17
N° de golpes	56	25	10
masa molde	4917	4687	4931
cap volumen	2136	2099	2138
m molde + suelo	9571	9129	9077
masa suelo comp	4654	4442	4146
densidad humeda	2,18	2,12	1,94

H. antes de inmersión							
N° Golpes							
		56		25		10	
MUESTRA N°							
		A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)		181,74	152,56	195,26	160,76	174,72	174,37
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)		170,11	142,45	181,43	150,18	161,9	162,95
MASA RECIPIENTE (g)		52,52	39,97	42,37	44,76	31,8	47,45
MASA SUELO SECO (g)		117,59	102,48	139,06	105,42	130,1	115,5
MASA AGUA (g)		11,63	10,11	13,83	10,58	12,82	11,42
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		9,8902968	9,86534	9,94534733	10,0360463	9,8539585	9,8874459
HUMEDAD PROMEDIO (%)		9,878		9,991		9,871	

H. Despues de inmersión											
N° Golpes											
			M11			M10			M17		
MUESTRA N°			Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)			115,8	126,5	112,06	118,72	106,9	105,74	131,07	119,7	127,6
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)			104,55	116,82	103,44	106,63	97,79	96,73	115,58	107,26	114,13
MASA RECIPIENTE (g)			29,58	28,56	28,92	32,32	27,14	30,1	32,31	28,36	27,16
MASA SUELO SECO (g)			74,97	88,26	74,52	74,31	70,65	66,63	83,27	78,9	86,97
MASA AGUA (g)			11,25	9,68	8,62	12,09	9,11	9,01	15,49	12,44	13,47
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)			15,006002	10,9676	11,5673645	16,2696811	12,894551	13,522437	18,60214	15,76679	15,4881
HUMEDAD PROMEDIO (%)			12,514			14,229			16,619		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	99	112	125
Expansión en mm	2,5146	2,8448	3,175
% de expansión	2,16%	2,44%	2,73%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,98
56 Golpes	1,98	45,41	(grs/cm3)	1,88
25 Golpes	1,92	14,20	CBR (%)	10,0
10 Golpes	1,76	4,87		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	48	1,1	0,25	13,5	0,6	0,25	1	0,4
0,50	123	2,2	0,50	24,5	0,8	0,50	1,5	0,4
0,75	170	2,9	0,75	34,5	0,9	0,75	2	0,4
1,00	198	3,3	1,00	43	1,0	1,00	3	0,4
1,25	226	3,8	1,25	51	1,1	1,25	4,5	0,5
1,50	250	4,1	1,50	57	1,2	1,50	5,5	0,5
1,75	268	4,4	1,75	62	1,3	1,75	6,5	0,5
2,00	288	4,7	2,00	72	1,5	2,00	7,5	0,5
2,25	308	5,0	2,25	76	1,5	2,25	8,5	0,5
2,50	321	5,2	2,50	81	1,6	2,50	10	0,5
2,75	337	5,4	2,75	86,5	1,7	2,75	11	0,6
3,00	350	5,6	3,00	91,5	1,8	3,00	11,5	0,6
3,25	362	5,8	3,25	97,5	1,8	3,25	12	0,6
3,50	377	6,0	3,50	104	1,9	3,50	12,5	0,6
3,75	392	6,2	3,75	108,5	2,0	3,75	13	0,6
4,00	400	6,3	4,00	112	2,1	4,00	13,5	0,6

N° Golpes											
MUESTRA N°											
			Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)			118,750	86,792	91,538	114,724	90,925	95,352	98,607	83,577	82,100

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 10% de metacaolin (suelo 1).

Nº de molde	19	13	20			
Nº de golpes	56	25	10			
masa molde	4545	4978	5019			
cap volumen	2112	2100	2099			
m molde + suelo	9246	9335	9031			
masa suelo comp	4701	4357	4012			
densidad humeda	2,23	2,07	1,91			
H. antes de inmersión						
Nº Golpes	56			25		10
MUESTRA Nº	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	165,52	143,45	193,13	166,66	156,12	135,83
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	154,25	134,79	180,13	155,76	146,05	126,72
MASA RECIPIENTE (g)	33,93	42,75	43,28	39,97	40,75	32,75
MASA SUELO SECO (g)	120,32	92,04	136,85	115,79	105,3	93,97
MASA AGUA (g)	11,27	8,66	13	10,9	10,07	9,11
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,36668883	9,408953	9,499452	9,413593575	9,5631529	9,694583
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,388		9,457		9,629	

H. Despues de inmersión			M19			M13			M20		
Nº Golpes			56			25			10		
MUESTRA Nº			Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)			190,12	220,42	177,51	225,84	250,12	198,45	199,05	198,22	254,03
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)			172,76	202,69	162,8	201,2	225	177,17	171,2	175,44	225,68
MASA RECIPIENTE (g)			45,91	45,95	37,52	46,75	37,92	30,7	32,74	31,78	45,58
MASA SUELO SECO (g)			126,85	156,74	125,28	154,45	187,08	146,47	138,46	143,66	180,1
MASA AGUA (g)			17,36	17,73	14,71	24,64	25,12	21,28	27,85	22,78	28,35
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)			13,68545526	11,31173	11,7417	15,95338297	13,427411	14,52857	20,11411	15,85688	15,74125
HUMEDAD PROMEDIO (%)			12,246			14,636			17,237		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	110	104	133
Expansión en mm	2,794	2,6416	3,3782
% de expansión	2,40%	2,27%	2,90%

Nº de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,03
56 Golpes	2,03	43,68	95% DMCS (grs/cm3)	1,93
25 Golpes	1,90	11,45	CBR (%)	16,0
10 Golpes	1,74	4,86		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	46	1,1	0,25	10	0,5	0,25	1	0,4
0,50	96	1,8	0,50	17	0,6	0,50	2,2	0,4
0,75	147	2,6	0,75	24	0,7	0,75	3,5	0,4
1,00	185	3,1	1,00	30	0,8	1,00	4,5	0,5
1,25	213	3,6	1,25	36	0,9	1,25	5,5	0,5
1,50	237	3,9	1,50	42	1,0	1,50	6,5	0,5
1,75	256	4,2	1,75	47	1,1	1,75	7	0,5
2,00	276	4,5	2,00	53	1,2	2,00	7,4	0,5
2,25	290	4,7	2,25	58	1,3	2,25	7,7	0,5
2,50	305	4,9	2,50	63	1,3	2,50	8	0,5
2,75	319	5,1	2,75	68	1,4	2,75	9	0,5
3,00	331	5,3	3,00	72	1,5	3,00	9,4	0,5
3,25	347	5,6	3,25	76	1,5	3,25	9,7	0,5
3,50	361	5,8	3,50	81	1,6	3,50	10	0,5
3,75	372	5,9	3,75	83,5	1,6	3,75	10,5	0,5
4,00	383	6,1	4,00	88	1,7	4,00	11	0,6

Nº Golpes			56			25			10		
MUESTRA Nº			Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)			120,562	99,651	103,439	106,617	89,736	97,095	102,818	81,056	80,465

Proctor modificado + 15% de metacaolin muestra 1 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	214,7	205,39	212,95	186,39	162,41	175,52	158,75	186,15	179,84	165,06
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	201,93	192,17	197,13	173,42	148,2	163,33	142,31	168,65	160,07	148,74
MASA RECIPIENTE (g)	48,24	32,63	43,25	42,84	40,75	45,05	33,88	45,91	39,94	37,46
MASA SUELO SECO (g)	153,69	159,54	153,88	130,58	107,45	118,28	108,43	122,74	120,13	111,28
MASA AGUA (g)	12,77	13,22	15,82	12,97	14,21	12,19	16,44	17,5	19,77	16,32
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,30893	8,28632	10,2807	9,93261	13,2248	10,3061	15,1619	14,2578	16,4572	14,6657
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,298		10,107		11,765		14,710		15,561	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3498	3618	3684	3666	3630					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1873	1993	2059	2041	2005					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	1,97158	2,09789	2,16737	2,14842	2,11053					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,82052	1,90533	1,93921	1,87292	1,82632					

Proctor modificado + 15% de metacaolin muestra 2 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	164,46	203,24	211,48	204,27	168,34	197,7	183,2	167,25	166,5	153,58
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	153,95	190,79	196,26	189,75	154,37	179,26	165,68	149,63	147,61	136,11
MASA RECIPIENTE (g)	31,78	45,61	52,5	50,66	42,33	33,73	46,11	30,69	31,35	30,29
MASA SUELO SECO (g)	122,17	145,18	143,76	139,09	112,04	145,53	119,57	118,94	116,26	105,82
MASA AGUA (g)	10,51	12,45	15,22	14,52	13,97	18,44	17,52	17,62	18,89	17,47
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,60277	8,57556	10,5871	10,4393	12,4688	12,6709	14,6525	14,8142	16,2481	16,5092
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,589		10,513		12,570		14,733		16,379	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3526	3632	3684	3636	3590					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1901	2007	2059	2011	1965					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,00105	2,11263	2,16737	2,11684	2,06842					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,84277	1,91166	1,92535	1,84501	1,77732					

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 15% de metacaolin (suelo 1).

N° de molde	2	1	5
N° de golpes	56	25	10
masa molde	4635	4566	4549
cap volumen	2122	2120	2132
m molde + suelo	9281	9058	8766
masa suelo comp	4646	4492	4217
densidad humeda	2,19	2,12	1,98

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	135,08	178,98	175,49	203,53	178,13	196,33
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	124,88	164,2	161,57	187,42	163,2	179,46
MASA RECIPIENTE (g)	32,49	31,46	37,93	44,75	31,11	31,38
MASA SUELO SECO (g)	92,39	132,74	123,64	142,67	132,09	148,08
MASA AGUA (g)	10,2	14,78	13,92	16,11	14,93	16,87
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11,040156	11,13455	11,2584924	11,2917922	11,3029	11,392491
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,087		11,275		11,348	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	212,89	234,23	165,78	182,58	216,83	207,56	211,71	178,66	219,33
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	193,28	215,08	151,87	161,59	197,18	186,81	183,9	157,99	193,92
MASA RECIPIENTE (g)	45,89	48,69	42,83	32,43	47,41	38,19	31,45	32,46	30,79
MASA SUELO SECO (g)	147,39	166,39	109,04	129,16	149,77	148,62	152,45	125,53	163,13
MASA AGUA (g)	19,61	19,15	13,91	20,99	19,65	20,75	27,81	20,67	25,41
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,304838	11,50911	12,7567865	16,2511614	13,120118	13,961782	18,24205	16,46618	15,57653
HUMEDAD PROMEDIO (%)	12,524			14,444			16,762		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	24,5	33	42
Expansión en mm	0,6223	0,8382	1,0668
% de expansión	0,53%	0,72%	0,92%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,97
56 Golpes	1,97	78,51	95% DMCS (grs/cm3)	1,87
25 Golpes	1,90	37,03	CBR (%)	27,0
10 Golpes	1,78	10,08		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	89	1,7	0,25	28	0,8	0,25	10	0,5
0,50	182	3,1	0,50	72	1,5	0,50	15	0,6
0,75	270	4,4	0,75	114	2,1	0,75	22	0,7
1,00	341	5,5	1,00	148	2,6	1,00	27	0,8
1,25	386	6,1	1,25	172	2,9	1,25	32	0,9
1,50	442	7,0	1,50	191	3,2	1,50	37	0,9
1,75	485	7,6	1,75	212	3,5	1,75	40	1,0
2,00	517	8,1	2,00	230	3,8	2,00	43,5	1,0
2,25	551	8,6	2,25	246	4,1	2,25	47	1,1
2,50	585	9,1	2,50	261,5	4,3	2,50	50	1,1
2,75	611	9,5	2,75	271	4,4	2,75	52,5	1,2
3,00	646	10,0	3,00	283	4,6	3,00	55,5	1,2
3,25	675	10,4	3,25	293	4,7	3,25	58,5	1,3
3,50	688	10,6	3,50	299	4,8	3,50	61,5	1,3
3,75	709	10,9	3,75	310	5,0	3,75	63,5	1,3
4,00	721	11,1	4,00	319	5,1	4,00	67	1,4

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	104,226	90,158	99,932	111,738	90,210	95,997	99,563	89,871	85,015

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 15% de metacaolin (suelo 1).

N° de molde	21	16	8
N° de golpes	56	25	10
masa molde	4692	4569	5110
cap volumen	2140	2116	2132
m molde + suelo	9348	9018	9194
masa suelo comp	4656	4449	4084
densidad humeda	2,18	2,10	1,92

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	201,91	153,25	177,4	188,67	186,87	202,57
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	186,79	143,18	164,44	173,52	171,92	185,7
MASA RECIPIENTE (g)	46,76	48,71	45,09	33,86	32,8	31,36
MASA SUELO SECO (g)	140,03	94,47	119,35	139,66	139,12	154,34
MASA AGUA (g)	15,12	10,07	12,96	15,15	14,95	16,87
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	10,79768621	10,65947	10,85882	10,84777316	10,746118	10,93041
HUMEDAD PROMEDIO (%)	10,729		10,853		10,838	

H. Despues de inmersión			M21			M16			M8		
N° Golpes	56			25			10				
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf		
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	119,99	133,44	119,36	134,46	142,42	124,8	136,54	160,6	132,67		
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	109,82	122,98	109,54	119,38	129,77	113,38	119,38	142,86	117,64		
MASA RECIPIENTE (g)	32,3	28,52	27,96	28,61	29,56	28,58	30,08	32,31	27,44		
MASA SUELO SECO (g)	77,52	94,46	81,58	90,77	100,21	84,8	89,3	110,55	90,2		
MASA AGUA (g)	10,17	10,46	9,82	15,08	12,65	11,42	17,16	17,74	15,03		
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,11919505	11,07347	12,03726	16,61341853	12,623491	13,46698	19,21613	16,04704	16,66297		
HUMEDAD PROMEDIO (%)	12,077			14,235			17,309				

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	84	100	129
Expansión en mm	2,1336	2,54	3,2766
% de expansión	1,83%	2,18%	2,81%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,96
56 Golpes	1,96	64,92	95% DMCS (grs/cm3)	1,87
25 Golpes	1,90	31,54	CBR (%)	26,0
10 Golpes	1,73	8,49		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	96	1,8	0,25	66	1,4	0,25	8	0,5
0,50	200	3,4	0,50	108	2,0	0,50	13	0,6
0,75	268	4,4	0,75	133,5	2,4	0,75	19	0,7
1,00	311	5,0	1,00	149	2,6	1,00	21	0,7
1,25	345	5,5	1,25	165	2,8	1,25	21,3	0,7
1,50	375	6,0	1,50	174	3,0	1,50	22,5	0,7
1,75	396	6,3	1,75	187,5	3,2	1,75	26	0,8
2,00	423	6,7	2,00	192	3,2	2,00	32,5	0,9
2,25	441	7,0	2,25	204	3,4	2,25	33,5	0,9
2,50	459	7,2	2,50	211,5	3,5	2,50	34,5	0,9
2,75	470	7,4	2,75	219,5	3,7	2,75	35	0,9
3,00	489	7,7	3,00	222,5	3,7	3,00	35,5	0,9
3,25	500	7,8	3,25	230	3,8	3,25	36	0,9
3,50	519	8,1	3,50	235	3,9	3,50	37,5	0,9
3,75	533	8,3	3,75	238	3,9	3,75	38	1,0
4,00	550	8,6	4,00	241	4,0	4,00	39,5	1,0

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	101,534	85,701	93,160	112,626	85,578	91,296	96,615	80,681	83,778

Proctor modificado + 30% de metacaolin muestra 1 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	163,99	161,96	154,76	145,81	176,5	178,54	180,59	173,44	132,6	135,85
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	151,26	149,76	142,69	133,62	160,16	160,41	162,1	153,75	117,29	119,95
MASA RECIPIENTE (g)	30,31	30,82	42,77	34,54	45,56	33,73	45,9	30,7	32,81	31,38
MASA SUELO SECO (g)	120,95	118,94	99,92	99,08	114,6	126,68	116,2	123,05	84,48	88,57
MASA AGUA (g)	12,73	12,2	12,07	12,19	16,34	18,13	18,49	19,69	15,31	15,9
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	10,525	10,2573	12,0797	12,3032	14,2583	14,3117	15,9122	16,0016	18,1226	17,9519
HUMEDAD PROMEDIO (%)	10,391		12,191		14,285		15,957		18,037	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3480	3570	3627	3596	3492					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1855	1945	2002	1971	1867					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	1,95263	2,04737	2,10737	2,07474	1,96526					
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,76883	1,82489	1,84396	1,78923	1,66495					

Proctor modificado + 30% de metacaolin muestra 2 (suelo 1).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	177,38	165,33	160,54	164,2	166,48	177,43	157,94	175,35	143,87	132,35
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	165,15	153,87	146,43	150,03	149,43	159,88	140,43	158,4	128,6	116,87
MASA RECIPIENTE (g)	45,9	42,86	30,68	32,42	30,3	33,71	32,81	48,49	44,77	31,39
MASA SUELO SECO (g)	119,25	111,01	115,75	117,61	119,13	126,17	107,62	109,91	83,83	85,48
MASA AGUA (g)	12,23	11,46	14,11	14,17	17,05	17,55	17,51	16,95	15,27	15,48
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	10,2558	10,3234	12,1901	12,0483	14,3121	13,9098	16,2702	15,4217	18,2154	18,1095
HUMEDAD PROMEDIO (%)	10,290		12,119		14,111		15,846		18,162	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3486	3585	3629	3603	3500					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1861	1960	2004	1978	1875					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	1,95895	2,06316	2,10947	2,08211	1,97368					
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,77619	1,84015	1,84862	1,79731	1,67031					

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 30% de metacaolin (suelo 1).

Nº de molde	23	24	17
Nº de golpes	56	25	10
masa molde	5218	5105	4931
cap volumen	2122	2108	2138
m molde + suelo	9715	9471	9052
masa suelo comp	4497	4366	4121
densidad humeda	2,12	2,07	1,93

H. antes de inmersión						
Nº Golpes	56		25		10	
MUESTRA Nº	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	166,7	132,01	143,79	183,64	148,04	175,14
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	152,76	120,76	131,99	168,52	133,59	160,06
MASA RECIPIENTE (g)	46,74	33,84	39,95	52,47	24,29	46,08
MASA SUELO SECO (g)	106,02	86,92	92,04	116,05	109,3	113,98
MASA AGUA (g)	13,94	11,25	11,8	15,12	14,45	15,08
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,148463	12,94294	12,8205128	13,0288669	13,220494	13,230391
HUMEDAD PROMEDIO (%)	13,046		12,925		13,225	

H. Despues de inmersión									
Nº Golpes	M23			M24			M17		
MUESTRA Nº	56		25		10				
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	155,51	181,59	164,34	177,54	218,6	188,45	234,53	219,35	195,65
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	138,6	163,93	148,1	154,92	194,72	168,88	201,83	191,29	173,39
MASA RECIPIENTE (g)	30,32	29,97	37,52	32,42	37,17	42,75	45,96	31,47	47,44
MASA SUELO SECO (g)	108,28	133,96	110,58	122,5	157,55	126,13	155,87	159,82	125,95
MASA AGUA (g)	16,91	17,66	16,24	22,62	23,88	19,57	32,7	28,06	22,26
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	15,616919	13,18304	14,6862	18,4653061	15,157093	15,515738	20,97902	17,55725	17,67368
HUMEDAD PROMEDIO (%)	14,495			16,379			18,737		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	9	11	15
Expansión en mm	0,2286	0,2794	0,381
% de expansión	0,20%	0,24%	0,33%

Nº de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,87
56 Golpes	1,87	87,90	95% DMCS (grs/cm3)	1,78
25 Golpes	1,83	39,78	CBR (%)	26,0
10 Golpes	1,70	15,86		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	64,5	1,3	0,25	64	1,3	0,25	27	0,8
0,50	150	2,6	0,50	110	2,0	0,50	45	1,1
0,75	230	3,8	0,75	145	2,5	0,75	57	1,2
1,00	311	5,0	1,00	172	2,9	1,00	66	1,4
1,25	392	6,2	1,25	195	3,3	1,25	70	1,4
1,50	462	7,3	1,50	217	3,6	1,50	77	1,5
1,75	523	8,2	1,75	235	3,9	1,75	80	1,6
2,00	582	9,0	2,00	249	4,1	2,00	83,5	1,6
2,25	635	9,8	2,25	265	4,3	2,25	87	1,7
2,50	680,5	10,5	2,50	277	4,5	2,50	91	1,7
2,75	725	11,2	2,75	287	4,7	2,75	95,5	1,8
3,00	767	11,8	3,00	296	4,8	3,00	100	1,9
3,25	805	12,4	3,25	305	4,9	3,25	104	1,9
3,50	845	13,0	3,50	312	5,0	3,50	107	2,0
3,75	881	13,5	3,75	317	5,1	3,75	110	2,0
4,00	914	14,0	4,00	328	5,3	4,00	114	2,1

Nº Golpes									
MUESTRA Nº	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S)	104,117	87,891	97,912	114,132	93,684	95,901	102,846	86,071	86,642

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 30% de metacaolin (suelo 1).

N° de molde	17	24	8
N° de golpes	56	25	10
masa molde	4931	5105	5110
cap volumen	2138	2108	2132
m molde + suelo	9350	9297	9058
masa suelo comp	4419	4192	3948
densidad humeda	2,07	1,99	1,85

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	136,24	117,72	149,21	169,17	134,89	169,56
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	126,32	108,77	138,81	156,22	124,19	156,38
MASA RECIPIENTE (g)	37,17	30,35	48,46	44,77	32,44	42,86
MASA SUELO SECO (g)	89,15	78,42	90,35	111,45	91,75	113,52
MASA AGUA (g)	9,92	8,95	10,4	12,95	10,7	13,18
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11,12731352	11,4129	11,51079	11,61956034	11,662125	11,61029
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,270		11,565		11,636	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	199,83	154,29	164,72	144,49	190,84	217,79	191,37	158,22	192,97
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	174,26	139,32	148,04	125,12	169,57	190,3	164,05	138,29	166,33
MASA RECIPIENTE (g)	43,29	33,33	40,88	31,32	44,43	31,78	42,31	31,11	32,48
MASA SUELO SECO (g)	130,97	105,99	107,16	93,8	125,14	158,52	121,74	107,18	133,85
MASA AGUA (g)	25,57	14,97	16,68	19,37	21,27	27,49	27,32	19,93	26,64
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	19,52355501	14,12397	15,56551	20,65031983	16,996963	17,34166	22,44127	18,59489	19,90288
HUMEDAD PROMEDIO (%)	16,404			18,330			20,313		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	34	47	34,5
Expansión en mm	0,8636	1,1938	0,8763
% de expansión	0,74%	1,03%	0,75%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,86
56 Golpes	1,86	55,10	95% DMCS (grs/cm3)	1,76
25 Golpes	1,78	25,18	CBR (%)	21,0
10 Golpes	1,66	8,13		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	81	1,6	0,25	37	0,9	0,25	1,5	0,4
0,50	148	2,6	0,50	62	1,3	0,50	6,5	0,5
0,75	200	3,4	0,75	80	1,6	0,75	10	0,5
1,00	242	4,0	1,00	95	1,8	1,00	14	0,6
1,25	275	4,5	1,25	110	2,0	1,25	19	0,7
1,50	300	4,9	1,50	124	2,2	1,50	21,5	0,7
1,75	326	5,2	1,75	136	2,4	1,75	25,5	0,8
2,00	355	5,7	2,00	148	2,6	2,00	30	0,8
2,25	383	6,1	2,25	159	2,8	2,25	31	0,9
2,50	409	6,5	2,50	170	2,9	2,50	34	0,9
2,75	436	6,9	2,75	178	3,0	2,75	36	0,9
3,00	463	7,3	3,00	189,5	3,2	3,00	39	1,0
3,25	485	7,6	3,25	196,5	3,3	3,25	41,5	1,0
3,50	509	8,0	3,50	205	3,4	3,50	44	1,0
3,75	532	8,3	3,75	214	3,6	3,75	47	1,1
4,00	555	8,6	4,00	222	3,7	4,00	50	1,1

N° Golpes									
MUESTRA N°	56			25			10		
GRADO DE SATURACION (S)	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
	126,031	91,175	100,480	116,285	95,712	97,653	102,274	84,745	90,706

SUELO 2:

Proctor suelo natural 2 - muestra 1

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	221,72	235,55	180,67	200,56	188,77	212,97	173,04	180,55	209,37	258,24
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	212,52	226,2	171,82	190,7	175,68	197,94	159,35	165,42	189,56	232,35
MASA RECIPIENTE (g)	32,75	45,09	40,76	40,93	32,81	31,35	33,87	30,32	31,15	37,95
MASA SUELO SECO (g)	179,77	181,11	131,06	149,77	142,87	166,59	125,48	135,1	158,41	194,4
MASA AGUA (g)	9,2	9,35	8,85	9,86	13,09	15,03	13,69	15,13	19,81	25,89
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	5,11765	5,162608	6,752632	6,583428	9,162175	9,02215	10,91011	11,19911	12,50552	13,3179
HUMEDAD PROMEDIO (%)	5,140		6,668		9,092		11,055		12,912	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3569	3616	3711	3711	3714					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1944	1991	2086	2086	2089					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,046316	2,095789	2,195789	2,195789	2,198947					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,946275	1,964778	2,012784	1,977216	1,947493					

Proctor suelo natural 2 - muestra 2

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	215,17	199,58	207,07	202,13	249,92	225,27	220,84	226,03	202,09	225,82
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	203,46	188,95	193,5	187,89	229,92	207,92	199,74	205,15	182,22	204,92
MASA RECIPIENTE (g)	40,24	37,14	44,42	31,31	51,42	45,96	37,52	31,77	45,58	52,5
MASA SUELO SECO (g)	163,22	151,81	149,08	156,58	178,5	161,96	162,22	173,38	136,64	152,42
MASA AGUA (g)	11,71	10,63	13,57	14,24	20	17,35	21,1	20,88	19,87	20,9
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7,174366	7,002174	9,102495	9,094393	11,20448	10,71252	13,00703	12,04291	14,54186	13,71211
HUMEDAD PROMEDIO (%)	7,088		9,098		10,959		12,525		14,127	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3614	3695	3750	3720	3681					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1989	2070	2125	2095	2056					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,093684	2,178947	2,236842	2,205263	2,164211					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,955101	1,99723	2,015927	1,959799	1,896318					

Proctor suelo natural 2 - muestra 3

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	183,07	208,23	167,91	230,85	201,7	200,27	193,77	198,11	238,6	233,97
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	173,25	197,53	157,45	215,19	185,03	183,97	175,16	179,37	212,7	208,9
MASA RECIPIENTE (g)	32,73	45,08	40,75	40,91	32,81	31,35	33,87	30,28	37,93	31,1
MASA SUELO SECO (g)	140,52	152,45	116,7	174,28	152,22	152,62	141,29	149,09	174,77	177,8
MASA AGUA (g)	9,82	10,7	10,46	15,66	16,67	16,3	18,61	18,74	25,9	25,07
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,988329	7,018695	8,963153	8,985541	10,95125	10,68012	13,17149	12,56959	14,81948	14,10011
HUMEDAD PROMEDIO (%)	7,004		8,974		10,816		12,871		14,460	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3620	3673	3753	3707	3676					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1995	2048	2128	2082	2051					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,1	2,155789	2,24	2,191579	2,158947					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,962552	1,978254	2,021374	1,941675	1,886206					

Capacidad de soporte suelo natural 2 - muestra 1

N° de golpes	56	25	10
masa molde	4549	4635	4516
cap volumen	2132	2132	2120
m molde + suelo	9088	8965	8688
masa suelo comp	4539	4330	4172
densidad humeda	2,13	2,03	1,97

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	191,2	205,68	203,56	219,95	188,41	158,83
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	181,37	195,52	191,72	208,1	177,3	150,14
MASA RECIPIENTE (g)	42,34	50,62	33,75	46,11	30,7	31,29
MASA SUELO SECO (g)	139,03	144,9	157,97	161,99	146,6	118,85
MASA AGUA (g)	9,83	10,16	11,84	11,85	11,11	8,69
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7,070416	7,011732	7,495094	7,315266	7,578445	7,311737
HUMEDAD PROMEDIO (%)	7,041		7,405		7,445	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M5			M2			M1		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	128,11	167,14	145,96	172,79	158,76	138,69	143,83	157,66	143,75
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	116,23	154,26	133,02	154,41	142,35	125,02	128,05	141,25	128,3
MASA RECIPIENTE (g)	27,15	28,57	28,35	28,89	15,66	26,14	28,52	29,72	27,98
MASA SUELO SECO (g)	89,08	125,69	104,67	125,52	126,69	98,88	99,53	111,53	100,32
MASA AGUA (g)	11,88	12,88	12,94	18,38	16,41	13,67	15,78	16,41	15,45
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,33633	10,24743	12,36266	14,64308	12,95288	13,82484	15,85452	14,71353	15,40072
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,982			13,807			15,323		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	7	3	5
Expansión en mm	0,1778	0,0762	0,127
% de expansión	0,15%	0,07%	0,11%

N° de golpes	CS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,99
56 Golpes	1,99	49,17	95% DMCS (grs/cm3)	1,89
25 Golpes	1,89	25,47	CBR (%)	25,5
10 Golpes	1,83	12,75		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	ón pulgadas	lectura	Tensión Mpa	ón pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	50	1,1	0,25	26	0,8	0,25	9	0,5
0,50	100	1,9	0,50	50	1,1	0,50	19	0,7
0,75	150	2,6	0,75	72	1,5	0,75	27,5	0,8
1,00	192	3,2	1,00	91	1,7	1,00	36	0,9
1,25	225	3,7	1,25	107	2,0	1,25	43	1,0
1,50	256	4,2	1,50	123	2,2	1,50	50	1,1
1,75	287	4,7	1,75	137	2,4	1,75	56	1,2
2,00	314	5,1	2,00	150	2,6	2,00	62	1,3
2,25	340	5,4	2,25	162	2,8	2,25	69	1,4
2,50	363	5,8	2,50	175	3,0	2,50	74,5	1,5
2,75	382	6,1	2,75	188	3,2	2,75	80	1,6
3,00	403	6,4	3,00	198	3,3	3,00	87	1,7
3,25	420	6,6	3,25	207	3,5	3,25	92	1,8
3,50	437	6,9	3,50	222	3,7	3,50	97	1,8
3,75	452	7,1	3,75	232	3,8	3,75	103	1,9
4,00	467	7,3	4,00	242	4,0	4,00	110	2,0

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	98,396	75,606	91,212	90,614	80,155	85,551	88,702	82,318	86,163

Capacidad de soporte suelo natural 2 - muestra 2

Nº de golpes	56	25	10			
masa molde	4689	5218	4731			
cap volumen	2099	2122	2090			
m molde + suelo	9316	9612	8896			
masa suelo comp	4627	4394	4165			
densidad humeda	2,20	2,07	1,99			
H. antes de inmersión						
Nº Golpes	56		25		10	
MUESTRA Nº	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
ASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	176,98	161,65	182,88	169,22	169,87	198,14
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	165,38	150,31	169,07	157,47	158,1	184,73
MASA RECIPIENTE (g)	46,76	31,1	30,29	33,86	32,82	40,9
MASA SUELO SECO (g)	118,62	119,21	138,78	123,61	125,28	143,83
MASA AGUA (g)	11,6	11,34	13,81	11,75	11,77	13,41
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,779127	9,512625	9,951002	9,505703	9,394955	9,323507
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,646		9,728		9,359	

H. Despues de inmersión	M10			M23			M12		
Nº Golpes	56			25			10		
MUESTRA Nº	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
ASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	146,83	164,24	140,54	151,99	172,54	135,73	147,75	182,01	150,36
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	133,99	151,76	128,54	137,24	156,71	121,95	131,8	161,83	133,35
MASA RECIPIENTE (g)	31,11	28,57	29,55	32,3	30,12	29,54	28,89	26,87	27,45
MASA SUELO SECO (g)	102,88	123,19	98,99	104,94	126,59	92,41	102,91	134,96	105,9
MASA AGUA (g)	12,84	12,48	12	14,75	15,83	13,78	15,95	20,18	17,01
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	12,48056	10,13069	12,12244	14,05565	12,50494	14,91181	15,49898	14,95258	16,06232
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,578			13,824			15,505		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	10	9	9,5
Expansión en mm	0,254	0,2286	0,2413
% de expansión	0,22%	0,20%	0,21%

Nº de golpes	CS (g/cm ³)	CBR (%)	DMCS (grs/cm ³)	2,01
56 Golpes	2,01	50,04	95% DMCS (grs/cm ³)	1,91
25 Golpes	1,89	24,46	CBR (%)	29,0
10 Golpes	1,82	13,62		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	45	1,1	0,25	23	0,7	0,25	10	0,5
0,50	90	1,7	0,50	45	1,1	0,50	22	0,7
0,75	137	2,4	0,75	65	1,4	0,75	31	0,9
1,00	175	3,0	1,00	83	1,6	1,00	39	1,0
1,25	215	3,6	1,25	102	1,9	1,25	47	1,1
1,50	255	4,2	1,50	116	2,1	1,50	55	1,2
1,75	288	4,7	1,75	130	2,3	1,75	62	1,3
2,00	320	5,2	2,00	143	2,5	2,00	68	1,4
2,25	349	5,6	2,25	155	2,7	2,25	75	1,5
2,50	380	6,0	2,50	166	2,9	2,50	81,5	1,6
2,75	407	6,4	2,75	180	3,1	2,75	88	1,7
3,00	430	6,8	3,00	186	3,2	3,00	93	1,8
3,25	455	7,2	3,25	199	3,4	3,25	99	1,9
3,50	479	7,5	3,50	208	3,5	3,50	107	2,0
3,75	497	7,8	3,75	219	3,6	3,75	112	2,1
4,00	517	8,1	4,00	228	3,8	4,00	120	2,2

Nº Golpes	56			25			10		
MUESTRA Nº	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	95,888	77,834	93,137	86,406	76,873	91,669	85,383	82,373	88,486

Capacidad de soporte suelo natural 2 - muestra 3

N° de golpes	56	25	10
masa molde	4545	4978	4569
cap volumen	2112	2100	2116
m molde + suelo	9231	9417	8796
masa suelo comp	4686	4439	4227
densidad humeda	2,22	2,11	2,00

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	203,18	242,51	175,46	222,77	224,25	240,05
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	188,31	225,65	161,21	205,22	206,59	220,44
MASA RECIPIENTE (g)	33,74	50,68	29,99	43,28	42,76	33,94
MASA SUELO SECO (g)	154,57	174,97	131,22	161,94	163,83	186,5
MASA AGUA (g)	14,87	16,86	14,25	17,55	17,66	19,61
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,620237	9,635938	10,85963	10,83735	10,77947	10,51475
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,628		10,848		10,647	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M19			M13			M16		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	157,78	198,23	131,18	137,75	243,09	152,64	270,32	340,69	238,49
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	144,42	182,03	121,15	124,97	220,36	137,95	242,24	304,4	211,04
MASA RECIPIENTE (g)	28,61	27,13	32,3	25,8	30,31	30,08	50,69	47,49	30,84
MASA SUELO SECO (g)	115,81	154,9	88,85	99,17	190,05	107,87	191,55	256,91	180,2
MASA AGUA (g)	13,36	16,2	10,03	12,78	22,73	14,69	28,08	36,29	27,45
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11,53614	10,45836	11,28869	12,88696	11,96001	13,61824	14,65936	14,12557	15,23307
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,094			12,822			14,673		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	11	8	7
Expansión en mm	0,2794	0,2032	0,1778
% de expansión	0,24%	0,17%	0,15%

N° de golpes	CS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,02
56 Golpes	2,02	59,29	95% DMCS (grs/cm3)	1,92
25 Golpes	1,91	30,38	CBR (%)	32,0
10 Golpes	1,81	15,35		

56 Golpes		25 Golpes				10 Golpes			
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	ón pulgadas	lectura	Tensión Mpa	ón pulgadas	lectura	Tensión Mpa	
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	
0,25	40	1,0	0,25	24	0,7	0,25	10	0,5	
0,50	89	1,7	0,50	56	1,2	0,50	22	0,7	
0,75	148	2,6	0,75	85	1,7	0,75	35	0,9	
1,00	201	3,4	1,00	112	2,1	1,00	45	1,1	
1,25	253	4,2	1,25	133	2,4	1,25	55	1,2	
1,50	300	4,9	1,50	150	2,6	1,50	63	1,3	
1,75	345	5,5	1,75	170	2,9	1,75	72	1,5	
2,00	384	6,1	2,00	184	3,1	2,00	80	1,6	
2,25	424	6,7	2,25	198,5	3,3	2,25	87	1,7	
2,50	458	7,2	2,50	211,5	3,5	2,50	93	1,8	
2,75	491	7,7	2,75	225	3,7	2,75	98	1,8	
3,00	515	8,1	3,00	239	3,9	3,00	105	2,0	
3,25	540	8,4	3,25	253	4,2	3,25	110	2,0	
3,50	568	8,8	3,50	270	4,4	3,50	117	2,1	
3,75	600	9,3	3,75	281	4,6	3,75	125	2,2	
4,00	622	9,6	4,00	295	4,8	4,00	128	2,3	

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	90,939	82,443	88,988	81,999	76,101	86,652	78,540	75,680	81,614

Proctor modificado + 5% de metacaolin muestra 1 (suelo 2).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	230,01	187,06	195,97	216,68	200,16	184,67	214,51	218,7	178,23	220,14
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	215,57	175,74	179,85	201,42	181,58	168,68	191,64	195,68	156,91	194,1
MASA RECIPIENTE (g)	50,63	46,1	24,3	52,5	32,48	42,32	31,11	31,32	30,29	40,91
MASA SUELO SECO (g)	164,94	129,64	155,55	148,92	149,1	126,36	160,53	164,36	126,62	153,19
MASA AGUA (g)	14,44	11,32	16,12	15,26	18,58	15,99	22,87	23,02	21,32	26,04
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,754699	8,731873	10,36323	10,24711	12,46144	12,65432	14,24656	14,00584	16,83778	16,9985
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,743		10,305		12,558		14,126		16,918	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3654	3707	3715	3695	3689					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	2029	2082	2090	2070	2064					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,135789	2,191579	2,2	2,178947	2,172632					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,964066	1,986832	1,95455	1,909244	1,85825					

Proctor modificado + 5% de metacaolin muestra 2 (suelo 2).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	218,18	183,45	213,88	188,48	182,25	198,61	187,69	206,16	195,84	209,14
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	204,53	171,56	197,72	173,36	165,49	180,86	168,04	185,51	172,97	184,66
MASA RECIPIENTE (g)	39,97	30,33	48,7	33,86	31,36	32,42	32,81	38,2	30,75	33,36
MASA SUELO SECO (g)	164,56	141,23	149,02	139,5	134,13	148,44	135,23	147,31	142,22	151,3
MASA AGUA (g)	13,65	11,89	16,16	15,12	16,76	17,75	19,65	20,65	22,87	24,48
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8,294847	8,418891	10,84418	10,83871	12,49534	11,95769	14,5308	14,01806	16,08072	16,17978
HUMEDAD PROMEDIO (%)	8,357		10,841		12,227		14,274		16,130	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3646	3711	3725	3672	3646					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	2021	2086	2100	2047	2021					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,127368	2,195789	2,210526	2,154737	2,127368					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,963298	1,981018	1,969701	1,885581	1,831881					

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 5% de metacaolin (suelo 2).

Nº de golpes	56	25	10
masa molde	4549	5289	4544
cap volumen	2132	2106	2126
m molde + suelo	9171	9682	8777
masa suelo comp	4622	4393	4233
densidad humeda	2,17	2,09	1,99

H. antes de inmersión							
Nº Golpes							
		56		25		10	
MUESTRA Nº							
		A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)		166,49	178,31	196,92	177,8	152,32	149,97
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)		156,17	168,28	185,15	168,2	142,6	141,6
MASA RECIPIENTE (g)		33,34	40,89	46,11	50,63	24,28	39,97
MASA SUELO SECO (g)		122,83	127,39	139,04	117,57	118,32	101,63
MASA AGUA (g)		10,32	10,03	11,77	9,6	9,72	8,37
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		8,4018562	7,873459	8,46519	8,1653483	8,2150101	8,235757
HUMEDAD PROMEDIO (%)		8,138		8,315		8,225	

H. Despues de inmersión											
Nº Golpes											
			M5			M22			M3		
			56			25			10		
MUESTRA Nº											
			Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)			179,23	247,22	173,84	178,41	246,83	188,1	196,44	195,33	158,98
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)			164,15	229,86	159,34	160,23	224,2	170,57	174,4	175,91	141,84
MASA RECIPIENTE (g)			45,55	50,64	33,77	33,94	37,91	40,75	31,36	29,6	28,9
MASA SUELO SECO (g)			118,6	179,22	125,57	126,29	186,29	129,82	143,04	146,31	112,94
MASA AGUA (g)			15,08	17,36	14,5	18,18	22,63	17,53	22,04	19,42	17,14
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)			12,715008	9,686419	11,54734	14,395439	12,147727	13,50331	15,40828	13,27319	15,1762
HUMEDAD PROMEDIO (%)			11,316			13,349			14,619		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	5	4	2,5
Expansión en mm	0,127	0,1016	0,0635
% de expansión	0,11%	0,09%	0,05%

Nº de golpes	DCS (g/cm ³)	CBR (%)	DMCS (grs/cm ³)	2,00
56 Golpes	2,00	65,21	95% DMCS (grs/cm ³)	1,90
25 Golpes	1,93	32,84	CBR (%)	27,5
10 Golpes	1,84	18,82		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	55	1,2	0,25	31	0,9	0,25	17	0,6
0,50	130	2,3	0,50	60	1,3	0,50	32,5	0,9
0,75	194	3,3	0,75	90	1,7	0,75	46,5	1,1
1,00	249	4,1	1,00	117,5	2,1	1,00	60	1,3
1,25	298	4,8	1,25	141	2,5	1,25	73	1,5
1,50	346	5,5	1,50	162	2,8	1,50	84	1,6
1,75	387	6,1	1,75	183	3,1	1,75	93	1,8
2,00	425	6,7	2,00	201	3,4	2,00	104	1,9
2,25	460	7,2	2,25	218	3,6	2,25	114	2,1
2,50	495	7,8	2,50	237	3,9	2,50	124	2,2
2,75	527	8,2	2,75	256	4,2	2,75	131,5	2,3
3,00	550	8,6	3,00	272	4,4	3,00	141,5	2,5
3,25	573	8,9	3,25	289	4,7	3,25	151	2,6
3,50	595	9,2	3,50	303	4,9	3,50	160	2,8
3,75	616	9,6	3,75	319	5,1	3,75	169,5	2,9
4,00	629,5	9,8	4,00	332	5,3	4,00	177	3,0

Nº Golpes											
MUESTRA Nº											
			56			25			10		
			Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %			100,070	76,234	90,880	97,586	82,349	91,538	89,683	77,256	88,332

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 5% de metacaolin (suelo 2).

Nº de golpes	56	25	10
masa molde	5289	4674	5061
cap volumen	2106	2120	2100
m molde + suelo	9963	9178	9314
masa suelo comp	4674	4504	4253
densidad humeda	2,22	2,12	2,03

H. antes de inmersión						
Nº Golpes	56		25		10	
MUESTRA Nº	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
ASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	170,71	197	211,31	181,75	167,65	180,65
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	158,05	183,39	194,08	169,28	155,17	167,57
MASA RECIPIENTE (g)	33,85	52,47	32,46	46,76	31,09	42,3
MASA SUELO SECO (g)	124,2	130,92	161,62	122,52	124,08	125,27
MASA AGUA (g)	12,66	13,61	17,23	12,47	12,48	13,08
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	10,193237	10,39566	10,66081	10,1779301	10,0580271	10,44145
HUMEDAD PROMEDIO (%)	10,294		10,419		10,250	

H. Despues de inmersión									
Nº Golpes	M22			M6			M26		
MUESTRA Nº	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
ASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	151,87	169,28	139,38	148,93	158,97	160,79	171,35	173,09	168,48
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	138,89	156,11	127,41	134,84	145,8	145,32	152,79	155,93	149,78
MASA RECIPIENTE (g)	28,52	26,15	25,78	28,66	27,45	28,91	31,08	29,56	29,72
MASA SUELO SECO (g)	110,37	129,96	101,63	106,18	118,35	116,41	121,71	126,37	120,06
MASA AGUA (g)	12,98	13,17	11,97	14,09	13,17	15,47	18,56	17,16	18,7
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11,760442	10,13389	11,77802	13,269919	11,1280101	13,28924	15,24936	13,57917	15,57555
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,224			12,562			14,801		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	6	5	2
Expansión en mm	0,1524	0,127	0,0508
% de expansión	0,13%	0,11%	0,04%

Nº de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	2,01
56 Golpes	2,01	62,61	95% DMCS (grs/cm3)	1,91
25 Golpes	1,92	37,46	CBR (%)	32,5
10 Golpes	1,84	18,10		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	48	1,1	0,25	30	0,8	0,25	13	0,6
0,50	105	2,0	0,50	62	1,3	0,50	27,5	0,8
0,75	160	2,8	0,75	95	1,8	0,75	41	1,0
1,00	211	3,5	1,00	129	2,3	1,00	55	1,2
1,25	266	4,3	1,25	157	2,7	1,25	68	1,4
1,50	319	5,1	1,50	185	3,1	1,50	77,5	1,5
1,75	364	5,8	1,75	208	3,5	1,75	88	1,7
2,00	407	6,4	2,00	233	3,9	2,00	99	1,9
2,25	451	7,1	2,25	255,5	4,2	2,25	108	2,0
2,50	490	7,7	2,50	278,5	4,5	2,50	115,5	2,1
2,75	522	8,2	2,75	298	4,8	2,75	123,5	2,2
3,00	556	8,7	3,00	315,5	5,1	3,00	132	2,4
3,25	587	9,1	3,25	333	5,3	3,25	140	2,5
3,50	621	9,6	3,50	354	5,7	3,50	149	2,6
3,75	651,5	10,1	3,75	375	6,0	3,75	157	2,7
4,00	681	10,5	4,00	394	6,3	4,00	163,5	2,8

Nº Golpes	56			25			10		
MUESTRA Nº	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	93,922	80,932	94,062	89,668	75,195	89,799	88,335	78,660	90,224

Proctor modificado + 10% de metacaolin muestra 1 (suelo 2).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	182,35	200,13	169,17	180,17	207,51	207,3	226,22	242,95	255,32	183,85
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	173,62	190,98	158,69	169,82	191,23	191,57	205,05	221,33	228,38	165,6
MASA RECIPIENTE (g)	34,52	45,03	31,6	43,93	42,9	42,85	33,97	42,76	43,28	29,97
MASA SUELO SECO (g)	139,1	145,95	127,09	125,89	148,33	148,72	171,08	178,57	185,1	135,63
MASA AGUA (g)	8,73	9,15	10,48	10,35	16,28	15,73	21,17	21,62	26,94	18,25
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,27606	6,26927	8,246125	8,221463	10,97553	10,57692	12,37433	12,1073	14,55429	13,45573
HUMEDAD PROMEDIO (%)	6,273		8,234		10,776		12,241		14,005	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3570	3633	3719	3724	3678					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1945	2008	2094	2099	2053					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,047368	2,113684	2,204211	2,209474	2,161053					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,926524	1,952887	1,989787	1,968512	1,895577					

Proctor modificado + 10% de metacaolin muestra 2 (suelo 2).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE+SUELO HUMEDO (g)	196,21	207,03	190,4	186,14	231,43	194,52	194,05	205,53	276,29	223,27
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	186,15	196,5	177,93	173,42	214,23	180	175,99	186,78	249,08	201,09
MASA RECIPIENTE (g)	31,35	31,3	32,4	24,28	48,7	39,97	30,33	33,73	50,67	30,28
MASA SUELO SECO (g)	154,8	165,2	145,53	149,14	165,53	140,03	145,66	153,05	198,41	170,81
MASA AGUA (g)	10,06	10,53	12,47	12,72	17,2	14,52	18,06	18,75	27,21	22,18
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,498708	6,374092	8,56868	8,528899	10,39087	10,36921	12,39874	12,2509	13,71403	12,98519
HUMEDAD PROMEDIO (%)	6,436		8,549		10,380		12,325		13,350	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3581	3642	3704	3726	3697					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1956	2017	2079	2101	2072					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm³)	2,058947	2,123158	2,188421	2,211579	2,181053					
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,934439	1,955948	1,982624	1,968914	1,924182					

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 10% de metacaolin (suelo 2).

N° de golpes	56	25	10
masa molde	4687	4545	4516
cap volumen	2120	2112	2120
m molde + suelo	9287	8987	8798
masa suelo comp	4600	4442	4282
densidad humeda	2,17	2,10	2,02

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	171,01	184,56	176,26	149,13	131,77	164,23
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	159,16	172,72	163,75	139,2	123,1	153,81
MASA RECIPIENTE (g)	30,68	44,43	33,73	31,3	30,33	42,85
MASA SUELO SECO (g)	128,48	128,29	130,02	107,9	92,77	110,96
MASA AGUA (g)	11,85	11,84	12,51	9,93	8,67	10,42
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,2232254	9,22909	9,621597	9,20296571	9,3456937	9,390771
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,226		9,412		9,368	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M10			M19			M1		
N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	176,73	172,63	160,97	169,75	174,05	164,55	172,79	173,73	172,56
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	161,18	159,52	146,93	152,76	158,7	148,82	152,88	155,47	153,26
MASA RECIPIENTE (g)	28,9	32,3	30,12	32,33	29,57	30,08	28,55	28,59	18,39
MASA SUELO SECO (g)	132,28	127,22	116,81	120,43	129,13	118,74	124,33	126,88	134,87
MASA AGUA (g)	15,55	13,11	14,04	16,99	15,35	15,73	19,91	18,26	19,3
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11,7553674	10,30498	12,01952	14,1077805	11,887245	13,24743	16,01383	14,39155	14,31008
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,360			13,081			14,905		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	5	3,5	3,5
Expansión en mm	0,127	0,0889	0,0889
% de expansión	0,11%	0,08%	0,08%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,99
56 Golpes	1,99	96,29	95% DMCS (grs/cm3)	1,89
25 Golpes	1,92	42,16	CBR (%)	30,0
10 Golpes	1,85	18,97		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	74	1,5	0,25	40	1,0	0,25	14	0,6
0,50	153	2,7	0,50	86	1,7	0,50	30	0,8
0,75	243	4,0	0,75	125	2,2	0,75	45	1,1
1,00	334	5,4	1,00	156	2,7	1,00	60	1,3
1,25	428	6,8	1,25	187	3,2	1,25	73,5	1,5
1,50	510	8,0	1,50	215	3,6	1,50	84	1,6
1,75	580	9,0	1,75	240	4,0	1,75	96	1,8
2,00	640	9,9	2,00	265,5	4,3	2,00	105	2,0
2,25	696	10,7	2,25	290	4,7	2,25	115	2,1
2,50	741	11,4	2,50	311	5,0	2,50	125	2,2
2,75	791	12,2	2,75	331	5,3	2,75	134	2,4
3,00	822,5	12,6	3,00	349	5,6	3,00	140	2,5
3,25	850	13,0	3,25	370	5,9	3,25	147	2,6
3,50	885	13,6	3,50	389	6,2	3,50	153	2,7
3,75		0,4	3,75	405	6,4	3,75	162	2,8
4,00		0,4	4,00	422	6,7	4,00	170,5	2,9

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	89,297	78,280	91,304	95,024	80,067	89,229	94,349	84,791	84,311

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 10% de metacaolin (suelo 2).

N° de golpes	56	25	10
masa molde	4678	4544	5218
cap volumen	2116	2126	2122
m molde + suelo	9263	8992	9447
masa suelo comp	4585	4448	4229
densidad humeda	2,17	2,09	1,99

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
ASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	176,28	163,73	166,28	144,08	190,92	173,96
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	164,59	152,18	154,53	134,73	177,82	161,9
MASA RECIPIENTE (g)	39,96	24,28	31,34	32,42	37,16	31,8
MASA SUELO SECO (g)	124,63	127,9	123,19	102,31	140,66	130,1
MASA AGUA (g)	11,69	11,55	11,75	9,35	13,1	12,06
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,3797641	9,030493	9,538112	9,1388916	9,31323759	9,269792
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,205		9,339		9,292	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M7 56			M3 25			M23 10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
ASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	210,25	243,72	227,4	206,68	203,34	220,78	260,03	220,11	242,2
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	189,89	224,65	208,5	184,86	184,96	199,88	228,93	197,05	216,9
MASA RECIPIENTE (g)	33,85	46,75	52,49	32,48	31,1	42,3	31,32	31,78	44,44
MASA SUELO SECO (g)	156,04	177,9	156,01	152,38	153,86	157,58	197,61	165,27	172,46
MASA AGUA (g)	20,36	19,07	18,9	21,82	18,38	20,9	31,1	23,06	25,3
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,047936	10,71951	12,11461	14,3194645	11,9459249	13,2631	15,73807	13,95293	14,67007
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,961			13,176			14,787		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	5,5	5	5,5
Expansión en mm	0,1397	0,127	0,1397
% de expansión	0,12%	0,11%	0,12%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,98
56 Golpes	1,98	80,39	95% DMCS (grs/cm3)	1,88
25 Golpes	1,91	43,25	CBR (%)	34,0
10 Golpes	1,82	20,84		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	72	1,5	0,25	35	0,9	0,25	19	0,7
0,50	145	2,5	0,50	77	1,5	0,50	36	0,9
0,75	227	3,8	0,75	117	2,1	0,75	53	1,2
1,00	302	4,9	1,00	155	2,7	1,00	69	1,4
1,25	371	5,9	1,25	187,5	3,2	1,25	82	1,6
1,50	430	6,8	1,50	220	3,7	1,50	97	1,8
1,75	482	7,6	1,75	247,5	4,1	1,75	107	2,0
2,00	530	8,3	2,00	273	4,5	2,00	118	2,1
2,25	576,5	9,0	2,25	296	4,8	2,25	129	2,3
2,50	617	9,6	2,50	320	5,2	2,50	139	2,5
2,75	657	10,2	2,75	341	5,5	2,75	146	2,6
3,00	682	10,5	3,00	361	5,8	3,00	156	2,7
3,25	710	11,0	3,25	385	6,1	3,25	165	2,8
3,50	725	11,2	3,50	403	6,4	3,50	172	2,9
3,75	746,5	11,5	3,75	422	6,7	3,75	180	3,1
4,00	763	11,7	4,00	440	6,9	4,00	189	3,2

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	98,669	81,061	91,611	94,922	79,188	87,919	89,093	78,987	83,047

Proctor modificado + 15% de metacaolin muestra 1 (suelo 2).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	160,37	179,58	176,72	142,24	183,88	175,88	224,26	207,12	219,48	210,43
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	151,93	170,61	165,96	133,12	168,47	161,98	204,27	189,18	197,03	188,88
MASA RECIPIENTE (g)	30,33	42,87	39,97	24,3	31,35	32,41	48,69	43,29	40,26	32,75
MASA SUELO SECO (g)	121,6	127,74	125,99	108,82	137,12	129,57	155,58	145,89	156,77	156,13
MASA AGUA (g)	8,44	8,97	10,76	9,12	15,41	13,9	19,99	17,94	22,45	21,55
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,940789	7,022076	8,54036	8,380812	11,23833	10,72779	12,8487	12,29694	14,32034	13,8026
HUMEDAD PROMEDIO (%)	6,981		8,461		10,983		12,573		14,061	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3587	3626	3720	3698	3661					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1962	2001	2095	2073	2036					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	2,065263	2,106316	2,205263	2,182105	2,143158					
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,930487	1,94201	1,987027	1,938394	1,87895					

Proctor modificado + 15% de metacaolin muestra 2 (suelo 2).

CAPAS	5		N° de golpes		25					
PESO DEL PISÓN	4,5 Kg		Altura de caída		460 mm					
DETERMINACION DE LA HUMEDAD										
MUESTRA N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	203,67	184,32	183,45	210,79	221,56	167,98	202,18	220,19	241,47	224,21
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	193,39	174,74	171,41	197,49	205,23	154,78	185,23	201,34	215,19	198,79
MASA RECIPIENTE (g)	42,78	32,83	34,52	45,58	50,7	30,3	46,13	50,66	47,48	30,86
MASA SUELO SECO (g)	150,61	141,91	136,89	151,91	154,53	124,48	139,1	150,68	167,71	167,93
MASA AGUA (g)	10,28	9,58	12,04	13,3	16,33	13,2	16,95	18,85	26,28	25,42
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,825576	6,750758	8,795383	8,755184	10,56753	10,60411	12,18548	12,50995	15,66991	15,13726
HUMEDAD PROMEDIO (%)	6,788		8,775		10,586		12,348		15,404	
DETERMINACION DE LA DENSIDAD										
MUESTRA N°	1	2	3	4	5					
MASA MOLDE + MASA SUELO HUMEDO (g)	3576	3630	3700	3708	3676					
MASA MOLDE (g)	1625	1625	1625	1625	1625					
MASA SUELO HUMEDO (g)	1951	2005	2075	2083	2051					
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	950	950	950	950	950					
DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	2,053684	2,110526	2,184211	2,192632	2,158947					
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1,923138	1,940263	1,975127	1,951648	1,87078					

Capacidad de soporte suelo natural muestra 1 + 15% de metacolin (suelo 2).

N° de golpes	56	25	10
masa molde	4569	4516	4545
cap volumen	2116	2120	2112
m molde + suelo	9161	9011	8758
masa suelo comp	4592	4495	4213
densidad humeda	2,17	2,12	1,99

H. antes de inmersión						
N° Golpes	56		25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	169,98	189,32	162,25	184,79	192,43	210,29
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	157,85	176,25	151,01	172,9	180	196,15
MASA RECIPIENTE (g)	31,36	37,91	31,49	43,28	50,68	45,95
MASA SUELO SECO (g)	126,49	138,34	119,52	129,62	129,32	150,2
MASA AGUA (g)	12,13	13,07	11,24	11,89	12,43	14,14
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,58969088	9,447737	9,404284	9,17296713	9,6118157	9,414115
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,519		9,289		9,513	

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M16			M1			M19		
MUESTRA N°	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	147,78	161,88	128,47	128,49	164,82	148,16	145,94	163,85	152,5
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	134,41	149,41	118,07	116,02	150,11	133,88	130,01	147,69	136,09
MASA RECIPIENTE (g)	26,15	28,59	28,89	25,8	28,6	31,1	29,73	28,54	28,64
MASA SUELO SECO (g)	108,26	120,82	89,18	90,22	121,51	102,78	100,28	119,15	107,45
MASA AGUA (g)	13,37	12,47	10,4	12,47	14,71	14,28	15,93	16,16	16,41
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	12,3498984	10,32114	11,66181	13,821769	12,106	13,89375	15,88552	13,56274	15,27222
HUMEDAD PROMEDIO (%)	11,444			13,274			14,907		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	2	7	6,5
Expansión en mm	0,0508	0,1778	0,1651
% de expansión	0,04%	0,15%	0,14%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,98
56 Golpes	1,98	103,22	95% DMCS (grs/cm3)	1,88
25 Golpes	1,94	45,56	CBR (%)	30,0
10 Golpes	1,82	19,83		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	95	1,8	0,25	38	1,0	0,25	19	0,7
0,50	200	3,4	0,50	78	1,6	0,50	36	0,9
0,75	308	5,0	0,75	123	2,2	0,75	51	1,1
1,00	403	6,4	1,00	165	2,8	1,00	65	1,4
1,25	488	7,7	1,25	200	3,4	1,25	78	1,6
1,50	560	8,7	1,50	234	3,9	1,50	89,5	1,7
1,75	630	9,8	1,75	264	4,3	1,75	100	1,9
2,00	688	10,6	2,00	289	4,7	2,00	111	2,0
2,25	743	11,4	2,25	312	5,0	2,25	121	2,2
2,50	792	12,2	2,50	332,5	5,3	2,50	131	2,3
2,75	841	12,9	2,75	356	5,7	2,75	139,5	2,5
3,00	877	13,4	3,00	379	6,0	3,00	148	2,6
3,25	913	14,0	3,25	398	6,3	3,25	155,5	2,7
3,50	913	14,0	3,50	419	6,6	3,50	164,5	2,8
3,75	913	14,0	3,75	438	6,9	3,75	172	2,9
4,00	913	14,0	4,00	455	7,2	4,00	181	3,1

N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	94,903	79,313	89,615	98,088	85,912	98,599	91,054	77,740	87,539

Capacidad de soporte suelo natural muestra 2 + 15% de metacaolin (suelo 2).

N° de golpes	56	25	10
masa molde	4978	4678	4687
cap volumen	2100	2116	2099
m molde + suelo	9524	9150	8868
masa suelo comp	4546	4472	4181
densidad humeda	2,16	2,11	1,99

H. antes de inmersión							
N° Golpes	56			25		10	
MUESTRA N°	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	A. comp	D. comp	
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	148,36	160,09	159,66	161,16	205,28	204,66	
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	138,9	150,88	148,98	150,87	191,55	189,81	
MASA RECIPIENTE (g)	37,52	47,45	33,93	40,74	40,25	30,76	
MASA SUELO SECO (g)	101,38	103,43	115,05	110,13	151,3	159,05	
MASA AGUA (g)	9,46	9,21	10,68	10,29	13,73	14,85	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9,331229	8,904573	9,28292	9,34350313	9,07468605	9,336687	
HUMEDAD PROMEDIO (%)	9,118		9,313		9,206		

H. Despues de inmersión									
N° Golpes	M13			M7			M10		
N° Golpes	56			25			10		
MUESTRA N°	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
MASA RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	150,14	174,97	174,75	160,52	161,99	156,85	168,53	145,79	166,6
MASA RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	135,56	161,02	158,95	143,8	147,68	141,09	149,56	130,97	147,84
MASA RECIPIENTE (g)	27,14	32,3	32,31	30,11	28,37	27,98	30,07	27,45	27,13
MASA SUELO SECO (g)	108,42	128,72	126,64	113,69	119,31	113,11	119,49	103,52	120,71
MASA AGUA (g)	14,58	13,95	15,8	16,72	14,31	15,76	18,97	14,82	18,76
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13,447703	10,83748	12,47631	14,7066585	11,9939653	13,93334	15,87581	14,31607	15,54138
HUMEDAD PROMEDIO (%)	12,254			13,545			15,244		

Expansión del suelo	56 G.	25 G.	10 G
Lectura inicial del dial	0,00	0,00	0,00
Lectura final del dial	2	7	6,5
Expansión en mm	0,0508	0,1778	0,1651
% de expansión	0,04%	0,15%	0,14%

N° de golpes	DCS (g/cm3)	CBR (%)	DMCS (grs/cm3)	1,98
56 Golpes	1,98	84,58	95% DMCS (grs/cm3)	1,88
25 Golpes	1,93	42,81	CBR (%)	30,0
10 Golpes	1,82	19,98		

56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa	Deformación pulgadas	lectura	Tensión Mpa
0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0
0,25	71,5	1,5	0,25	38	1,0	0,25	12	0,6
0,50	145	2,5	0,50	78	1,6	0,50	28	0,8
0,75	228	3,8	0,75	117	2,1	0,75	45	1,1
1,00	318	5,1	1,00	152	2,7	1,00	60	1,3
1,25	390	6,2	1,25	188	3,2	1,25	75,5	1,5
1,50	453	7,1	1,50	214	3,6	1,50	89	1,7
1,75	506,5	7,9	1,75	244	4,0	1,75	99,5	1,9
2,00	559	8,7	2,00	270	4,4	2,00	112	2,1
2,25	610	9,5	2,25	292	4,7	2,25	122	2,2
2,50	659	10,2	2,50	315	5,1	2,50	130,5	2,3
2,75	700	10,8	2,75	337,5	5,4	2,75	141	2,5
3,00	749	11,5	3,00	356	5,7	3,00	149	2,6
3,25	777	12,0	3,25	377	6,0	3,25	158	2,7
3,50	804	12,4	3,50	391	6,2	3,50	168	2,9
3,75	827	12,7	3,75	407	6,4	3,75	177	3,0
4,00	856,5	13,1	4,00	420	6,6	4,00	186	3,2

N° Golpes									
MUESTRA N°	56			25			10		
	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf	Sup	Med	Inf
GRADO DE SATURACION (S) %	103,817	83,666	96,318	103,059	84,049	97,640	91,389	82,410	89,464

Granulometría suelo natural 1 (arena arcillosa) muestra 1

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	2,96	0,59	99,41
2	n°10	14,39	2,88	96,53
0,5	n°40	132,46	26,49	70,04
0,08	n°200	131,31	26,26	43,78
	Residuo	5,38		

Granulometría suelo natural 1 (arena arcillosa) muestra 2

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	2,11	0,42	99,58
2	n°10	19,59	3,92	95,66
0,5	n°40	139,16	27,83	67,83
0,08	n°200	153,38	30,68	37,15
	Residuo	5,76		

Granulometría suelo natural 1 (arena arcillosa) muestra 3

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	2,64	0,53	99,47
2	n°10	20,91	4,18	95,29
0,5	n°40	148,26	29,65	65,64
0,08	n°200	138,16	27,63	38,01
	Residuo	2,75		

Granulometría suelo natural 2 (arena limosa) muestra 1

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM (pulg)	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	15,91	3,18	96,82
2	n°10	111,16	22,23	74,59
0,5	n°40	237,87	47,57	27,01
0,08	n°200	109,43	21,89	5,13
	Residuo	7,8		

Granulometría suelo natural 2 (arena limosa) muestra 2

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM (pulg)	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	17,71	3,54	96,46
2	n°10	124,98	25,00	71,46
0,5	n°40	240,39	48,08	23,38
0,08	n°200	93,27	18,65	4,73
	Residuo	4,23		

Granulometría suelo natural 2 (arena limosa) muestra 3

TAMICES				
Nch (mm)	ASTM (pulg)	Masa (grs)	% Retenido	% Que pasa
5	n°4	17,85	3,57	96,43
2	n°10	118,12	23,62	72,81
0,5	n°40	234,15	46,83	25,98
0,08	n°200	104,83	20,97	5,01
	Residuo	6,14		

Límites de consistencia suelo natural 1 (arena arcillosa)

Muestra	Límite Líquido 0%	Límite Plástico 0%
1	27,50	14,81
2	28,20	14,85
3	28,40	14,84

Promedio LL	28,03
Promedio LP	14,83
Promedio IP	13,20

Límites de consistencia suelo natural 1 (arena arcillosa) – 5%Metacaolin

Muestra	Límite Líquido 5%	Límite Plástico 5%
1	26,70	15,70
2	27,27	15,39

Promedio LL	26,99
Promedio LP	15,55
Promedio IP	11,44

Límites de consistencia suelo natural 1 (arena arcillosa) – 10%Metacaolin

Muestra	Límite Líquido 10%	Límite Plástico 10%
1	29,50	16,67
2	29,90	16,99

Promedio LL	29,70
Promedio LP	16,83
Promedio IP	12,87

Límites de consistencia suelo natural 1 (arena arcillosa) – 15%Metacaolin

Muestra	Límite Líquido 15%	Límite Plástico 15%
1	30,20	17,43
2	31,75	17,29

Promedio LL	30,98
Promedio LP	17,36
Promedio IP	13,61

Límites de consistencia suelo natural 1 (arena arcillosa) – 30%Metacaolin

Muestra	Límite Líquido 30%	Límite Plástico 30%
1	31,40	19,24
2	30,00	19,36

Promedio LL	30,70
Promedio LP	19,30
Promedio IP	11,40