

1. ANTECEDENTES

1.1. El problema.-

1.1.1 Antecedentes.- El suelo-cemento es un material económico para la construcción. Con este material se puede elaborar cimentaciones, contrapisos, paredes monolíticas, adobes, baldosas y bloques pero, este material tiene la desventaja de que sus características físicas y mecánicas son relativamente bajas en comparación con otros materiales de construcción convencionales, así como por ejemplo elementos fabricados con hormigón o ladrillos cerámicos y baldosas.

Como consecuencia de esta desventaja, los elementos fabricados con suelo-cemento no pueden competir en calidad cuando se construyen obras de gran magnitud e importancia.

1.1.2 Planteamiento.- El suelo-cemento está compuesto por un 90% de tierra y un 10% de cemento, lo que lo vuelve un material muy económico pero, a la vez se convierte en un material de características físicas y mecánicas muy limitadas.

La principal causa de que las características físico-mecánicas del suelo-cemento sean tan limitadas se debe a:

➤ La presencia de altos porcentajes de arcillas y limos en la tierra componente del suelo-cemento.

De no prever la situación actual, se producirán fisuras en las estructuras fabricadas con suelo-cemento debido a la retracción durante el secado, y cuando los elementos ya se encuentren totalmente macizos, tendrán una alta absorción de humedad debido a su porosidad y se tendrá una resistencia a la compresión relativamente baja en comparación con el hormigón. Con el fin de cambiar la situación actual se plantea la siguiente alternativa de solución:

➤ Mejoramiento de las características del suelo-cemento mediante tratamientos especiales que contempla:

- Reducción de las fisuras provocadas por la retracción mediante la adición de fibras de pelo de chivo.
- Estabilización contra el agua (impermeabilización) mediante la incorporación de aceite de linaza doblemente cocido.
- Incremento de la cohesión mediante la incorporación de aceite de linaza doblemente cocido.
- Incremento de la resistencia a compresión mediante la aplicación de fuerzas dinámicas externas.

1.1.3. Formulación.- Mediante la incorporación de aditivos naturales y aplicación de fuerzas dinámicas externas se soluciona el problema y se sigue manteniendo los porcentajes de arcillas y limo en la tierra componente de la mezcla de suelo-cemento.

1.1.4. Sistematización.- La incorporación de aditivos naturales a la mezcla de suelo-cemento mejora sus características físicas. Además la aplicación de fuerzas dinámicas aumenta las características mecánicas (resistencia a la compresión) del suelo-cemento.

1.2.- Objetivos.- Para el desarrollo de la presente propuesta se plantean los siguientes objetivos

1.2.1. Objetivo General.-

Verificar que la incorporación de fibras de pelo de chivo, aceite de linaza doblemente cocido y la aplicación de cargas dinámicas aumenta las características físico-mecánicas de elementos fabricados con suelo-cemento.

1.2.2. Objetivos específicos.-

- Acopiar información que se encuentre relacionada con elementos fabricados con suelo-cemento.
- Realizar ensayos de laboratorio colocando mezcla de suelo-cemento junto con fibras de pelo de chivo en moldes prismáticos en donde sea apreciable y medible

la retracción lineal en el suelo-cemento y cuantificar en qué magnitud se mejora dicha característica física.

- Realizar ensayos de laboratorio elaborando probetas cilíndricas de suelo-cemento mezcladas con aceite de linaza doblemente cocido, en donde se pueda cuantificar cuánto reduce la permeabilidad en la mezcla de suelo-cemento.
- Realizar ensayos visuales y comparativos en donde se aplastará con la mano la masa plástica de suelo-cemento que contendrá aceite de linaza doblemente cocido y con una buena apreciación observar si aumenta la cohesión de dicha masa.
- Realizar ensayos de rotura de probetas luego de aplicar fuerzas dinámicas a la masa plástica de suelo-cemento y observar cuánto es el incremento de la resistencia mecánica a compresión del suelo-cemento.

1.3.- Justificación.- La elaboración del presente proyecto de ingeniería civil, fue realizado por las siguientes razones:

- a. **Justificación Teórica.-** Realizar la verificación de que la incorporación de fibras naturales y aceite de linaza doblemente cocido mejoren las características físicas del suelo-cemento. Así también verificar que la aplicación de fuerzas dinámicas sobre la mezcla de suelo-cemento mejoren las características mecánicas de dicho material.
- b. **Justificación Metodológica.-** Aplicar los conocimientos adquiridos en la realización de ensayos de laboratorio en tecnología del hormigón, e incluir nuevos ensayos de laboratorio que ayuden a determinar distintos parámetros de las características del suelo-cemento.
- c. **Justificación Práctica.-** Determinar si es conveniente o no incorporar fibras de pelo de chivo y aceite de linaza doblemente cocido, fuerzas dinámicas en la mezcla de suelo-cemento y de esta manera colaborar con nueva información a los que fabrican elementos construidos con suelo-cemento.

1.4. Alcance del estudio.-

1.4.1. Consideraciones generales del estudio.-

Con el presente estudio se pretende mejorar las características físicas y mecánicas de los elementos fabricados con suelo-cemento, mediante la incorporación de aditivos naturales y la aplicación de fuerzas dinámicas:

- La incorporación de aditivos naturales es añadir a la mezcla de suelo-cemento, una cierta cantidad de fibras de pelo de chivo, aceite de linaza doblemente cocido, y mediante distintos ensayos en laboratorio determinar si las características físicas del suelo-cemento mejoran y así mismo determinar en qué magnitud incrementan.
- La aplicación de fuerzas dinámicas se refiere a dejar caer un pisón (previamente elaborado) sobre la mezcla plástica de suelo-cemento, para posteriormente mediante ensayos de rotura de probetas determinar en qué magnitud ha incrementado la resistencia a compresión del suelo-cemento.

1.4.2. Hipótesis del estudio.-

- El aditamento de fibras de pelo de chivo reduce en más de un 70% la retracción del suelo-cemento que se origina por la presencia de los altos porcentajes de arcillas contenidas en la tierra del suelo-cemento.
- La incorporación de aceite de linaza doblemente cocido a la pasta de suelo-cemento se disminuye la permeabilidad de los elementos fabricados con suelo-cemento en más del 5%.
- La aplicación de fuerzas dinámicas externas a la masa de suelo-cemento (cuando éste se encuentre en estado plástico), incrementa la resistencia a compresión de los elementos fabricados con suelo-cemento en más del 30%.

1.5. Referencia espacial.-

El desarrollo de la propuesta de investigación se realiza en un domicilio particular ubicado en el barrio San Antonio y en el Laboratorio de Suelos y Hormigón que se encuentra ubicado en el Campus de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” del departamento de Tarija.

2. MARCO TEÓRICO.-

2.1. La tierra como material de construcción.-

La tierra es el material de construcción más importante y abundante en el mundo en la mayoría de las regiones del mundo. Éste se obtiene frecuentemente directamente en el sitio cuando se excavan los cimientos. En los países industrializados la desmedida explotación de los recursos y los sistemas de producción centralizados no sólo generan desperdicios sino que contaminan el medio ambiente. En esos países la tierra ha surgido como material de construcción.

Crecientemente las personas que construyen sus viviendas demandan edificaciones eficientes económicas y energéticamente, dan mayor valor a la salud y al clima interior balanceado.

Se ha comprendido que la tierra como material de construcción natural tiene mejores cualidades que los materiales industriales como el hormigón, ladrillos y los silicocalcáreos.

2.2. Ventajas y desventajas de elementos fabricados con tierra.

A continuación se mencionarán las ventajas de elementos fabricados con tierra en comparación con materiales industrializados:

- *Regulan la humedad ambiental*, la tierra tiene la capacidad de absorber y desorber humedad más rápido y en mayor cantidad que los demás materiales de construcción, por eso regula el clima interior. Experimentos llevados a cabo en el laboratorio de Construcciones Experimentales de la Universidad de Kassel, Alemania, demostraron que cuando la humedad relativa en un ambiente interior aumenta de 50% a 80%, los bloques fabricados con tierra pueden absorber 30 veces más humedad que los ladrillos cocidos en un lapso de dos días.
- *Almacenan el calor*, al igual que otros densos, los elementos construidos con tierra almacenan calor. En zonas climáticas donde las diferencias de temperatura son

amplias, o donde son necesarias las ganancias térmicas por vías pasivas, los elementos contruidos con tierra pueden balancear el clima interior.

- *Ahorran energía y disminuyen la contaminación ambiental*, los elementos contruidos con tierra prácticamente no producen contaminación ambiental en relación a otros materiales de uso frecuente, para preparar, transportar y trabajar los elementos fabricados con tierras en el sitio se necesita sólo 1% de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración de hormigón armado o ladrillos cocidos.
- *Economiza materiales de construcción y costo de transporte*, generalmente los elementos contruidos con tierra que se encuentran en las mayorías de las obras productos de la excavación de cimientos pueden ser utilizados para la construcción. Si éste no contiene suficiente arcilla, ésta será añadida y si contiene mucha arcilla deberá mezclarse con arena lo que significa modificar la composición de los elementos fabricados con tierra.

A continuación se mencionarán las desventajas de elementos fabricados con tierra en comparación con materiales industrializados:

- *No son elementos de construcción estandarizado*, su composición depende del lugar de donde se extrae puede contener diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo arena y agregados. Por eso sus características pueden variar de lugar a lugar y la preparación de la mezcla correcta para una aplicación específica puede variar también. Resulta necesario saber la composición específica de los elementos fabricados con tierra para poder juzgar sus características y modificarlas con aditivos si fuera necesario.
- *Se contraen al secarse*, a través de la evaporación del agua de amasado (necesaria para activar la capacidad aglomerante de la arcilla y para poder ser manipulado) pueden aparecer fisuras. La retracción lineal durante el secado oscila entre 3 - 12% en técnicas de tierra húmeda. La retracción se puede disminuir reduciendo la cantidad de agua y arcilla, optimizando la composición granulométrica o mediante el empleo de aditivos.
- *No son impermeables*, los elementos fabricados con barro deben ser protegidos contra la lluvia y las heladas especialmente en estado húmedo.

2.3. El suelo-cemento.-

Suelo-cemento es una mezcla en seco de suelo o tierra con determinadas características granulométricas y cemento Portland. A la mezcla se le adiciona una cierta cantidad de agua para su fraguado.

Regularmente, el porcentaje de cemento portland puede variar entre el 7 al 12% dependiendo del tipo de suelo.

Al producto ya curado o fraguado se le exigen unas determinadas condiciones de impermeabilidad, resistencia, durabilidad y apariencia.

En la elección del suelo a ser usado se debe ver cuáles son los suelos ideales para la mezcla con cemento y éstos son los que poseen un tenor de arena un poco superior al 50 %, debiéndose evitar suelos con contenido de materia orgánica.

2.4. Características de la mezcla.-

El Suelo-cemento es una mezcla de tierra tamizada (malla de 0.5 cm aproximadamente), y cemento Portland.

Las cantidades de cemento se calculan como porcentaje en peso del material seco.

La combinación ideal del suelo es:

- 70-80% de arena.
- 20 a 30% de limo.
- 5 a 10% de arcilla.

Si los suelos son muy arenosos, van a requerir la incorporación de más cemento y a los arcillosos hay que agregarles más arena. Los suelos limosos con un 50 % de arena se estabilizan con un 10% de cemento.

La humedad debe ser similar a la que tenía el suelo antes de ser excavado, entre el 8 y 16%. La forma práctica para ver si ya posee la consistencia adecuada consiste en tomar una porción de material en la mano y apretarla. Debe cohesionarse sin ensuciar la

palma de la mano y se puede partir en dos. A este método se le conoce como "Medición de la Humedad Óptima en Campo"

2.5. Propiedades del material suelo-cemento.-

La determinación de las aptitudes de un material para ser empleado en la construcción de edificios, sólo es posible a partir del conocimiento de sus propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas. Por ello, el suelo-cemento fue sometido al protocolo de ensayos que establecen las normas, a fin de definir su uso más adecuado. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el Criatic permiten concluir que a diferencia de otros materiales denominados "tradicionales", utilizados en la resolución constructiva de la envolvente, el suelo cemento puede ser diseñado y fabricado en función de las necesidades y/o requerimientos arquitectónico, estructural, ambiental y tecnológico definido para cada situación particular. Se trata de un formáceo, ejecutado insitu que adopta la forma del molde donde es vaciado.

Por lo tanto, sus propiedades físicas serán función de la forma, de la textura y de las dimensiones asignadas al molde; la compacidad, la porosidad y el peso unitario dependerán de la tasa de compresión efectuada sobre el material. La respuesta a la acción de las fuerzas exteriores será función del sistema de compactación y de las dosificaciones (suelo/cemento) más adecuadas definidas previamente en el laboratorio para máxima economía, en función del estado de sollicitaciones generadas por el diseño arquitectónico-estructural adoptado y el emplazamiento de la obra. Por tratarse de un material conformado con tierra, las exigencias de acondicionamiento ambiental son fácilmente satisfechas por su reducida transmisión térmica posibilitando elementos constructivos de menor espesor que los realizados con otros materiales. La posibilidad de controlar las propiedades requeridas permite la fabricación de componentes y de elementos constructivos que se constituyen en cerramientos verticales (muros) y horizontales (pisos techos) ejecutados con diversas tecnologías.

2.6. Ventajas del suelo-cemento en la edificación.-

- El suelo-cemento es fácil de obtener localmente, prácticamente cualquier tipo de tierra es útil para construir, o bien se puede escoger una técnica u otra en función de la tierra disponible.
- La construcción con suelo-cemento es sencilla y con poco gasto energético, no requiere un gran transporte de materiales o una cocción a alta temperatura. Es por ello que se considera un material de muy baja energía incorporada.
- Excelentes propiedades térmicas. El suelo-cemento tiene una gran capacidad de almacenar el calor y cederlo posteriormente (calidad conocida como inercia térmica) Así, permite atenuar los cambios de temperatura externos, creando un ambiente interior agradable.
- Aislamiento acústico. Los muros de suelo-cemento transmiten mal las vibraciones sonoras, de modo que se convierten en una eficaz barrera contra los ruidos indeseados.

2.7. Desventajas del suelo-cemento en la edificación.-

- El suelo-cemento se contrae al secarse a través de la evaporación del agua de amasado pueden aparecer fisuras. La retracción lineal durante el secado oscila entre 3-12%.
- El suelo-cemento no es un material impermeable, por lo que debe ser protegido contra la lluvia especialmente en zonas muy húmedas y lluviosas.
- El suelo-cemento no es un material de construcción estandarizado por lo cual su composición depende del lugar de donde se extrae la tierra, que puede contener diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo y arena. Por eso sus características pueden variar de lugar a lugar y la preparación de la mezcla correcta para una aplicación específica puede variar también.

2.8. Definición y descripción de las variables de estudio.-

En el desarrollo de la presente investigación se tiene como variables dependientes las características físicas y mecánicas del suelo-cemento, que vendrían a ser la retracción, la permeabilidad y la resistencia a compresión del suelo-cemento. Dentro de las variables independientes se encuentran la fibra de pelo de chivo, el aceite de linaza doblemente cocido y las fuerzas dinámicas externas.

2.8.1. Retracción del suelo-cemento

La retracción de los elementos fabricados con suelo-cemento ocurre durante el secado de los mismos o sea durante su periodo de fraguado, depende del contenido de agua, del tipo y cantidad de minerales arcillosos. Estos últimos se expanden al absorber el agua y durante el secado de la mezcla, se contraen en tal magnitud que provocan fisuras en la masa sólida de los elementos fabricados con suelo-cemento. Además en el desarrollo de este proyecto de investigación se añade fibras de pelo de chivo, que tienen gran influencia en la retracción, y como las únicas cantidades que varían en la mezcla son las fibras de pelo de chivo entonces la retracción del suelo-cemento sólo llega a depender de la cantidad de fibra de chivo que se añade a la mezcla.

2.8.2. Permeabilidad del suelo-cemento.-

La permeabilidad en el suelo-cemento es la capacidad que tiene para permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. La permeabilidad del suelo-cemento depende básicamente de su porosidad, en esta investigación existen dos variables de las que depende dicha porosidad, una de ellas es el aceite de linaza doblemente cocido, el cual tiene la capacidad de obturar los poros de tal manera de que reduce la permeabilidad del suelo-cemento, la otra variable es la compactación del suelo-cemento, procedimiento que vuelve a la masa de suelo-cemento más densa de tal manera que llega a eliminar los poros, volviéndolo un material menos permeable.

Teóricamente una pintura resistente a las inclemencias del tiempo es una protección suficiente pero en la práctica generalmente aparecen fisuras en la superficie o se crean por una acción mecánica. Adicionalmente, existe el peligro de que el agua de lluvia penetre en el suelo-cemento provocando una expansión y luego erosión. Por lo que se debe incorporar estabilizadores que cubran a los minerales de arcilla que previenen que el agua los alcance y provoque expansión.

2.8.3. Resistencia a compresión del suelo-cemento.-

La variable resistencia a compresión es una característica mecánica que presenta el suelo-cemento, que representa la carga a compresión que el suelo-cemento puede soportar antes de que se produzca su rotura. Esta variable depende de la cantidad de cemento y tierra que se utilice en la mezcla, pero al mantener estas dos últimas constantes, será dependiente de las nuevas variables que se incorporan, que son las fuerzas dinámicas externas, el pelo de chivo y el aceite de linaza doblemente cocido.

2.8.4. Fibra de pelo de chivo.-

Para el desarrollo del ensayo de retracción del suelo-cemento se requiere de fibras de pelo animal, estas fibras son capaces de resistir las fuerzas de retracción internas que existen en los elementos fabricados con suelo-cemento, estas fibras pueden ser de cualquier animal, como por ejemplo los pelos de un cerdo, en nuestro caso particular se utiliza fibras de pelo de chivo, por ser fácil de conseguir y de manera económica, ya que la gente del campo que trabaja con estos animales sólo requieren su cuero y no así el pelaje, otorgándolo gratuitamente o en un precio muy económico.

2.8.5. Aceite de linaza doblemente cocido.-

El aceite de lino doblemente cocido tiene la función de obturar los poros existentes en los elementos fabricados con suelo-cemento, de tal manera que aumenta su impermeabilidad, en nuestro medio este material tiene un costo de bs 20 por cada litro, por lo que se busca que de buenos resultados, haciendo uso de la menor cantidad posible.

2.8.6. Fuerzas dinámicas externas.-

Compactar el suelo-cemento con fuerzas dinámicas es mucho más efectivo que cuando se aplica fuerzas estáticas (las cuales se utilizan generalmente), estas fuerzas dinámicas llegan a impactar la masa del suelo-cemento de tal manera que genera una vibración interna que acomoda las partículas de dicha masa.

2.9. Fraguado del suelo-cemento.-

El fraguado es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del suelo-cemento, producido por la desecación y recristalización del clínker que compone el cemento, procedentes de la reacción química del agua de amasado. En el proceso general de endurecimiento del suelo-cemento se presenta un estado de fraguado inicial en que la mezcla pierde su plasticidad, se denomina fraguado final al estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable. El tiempo comprendido entre estos dos estados se llama tiempo de fraguado de la mezcla que se estima en unas diez horas, aunque varía dependiendo de la humedad relativa y temperatura ambiente.

2.10. Curado del suelo-cemento.-

El curado se realiza durante el proceso de fraguado del suelo-cemento para asegurar su adecuada humedad. A las 24 horas el suelo-cemento tiene una resistencia adecuada para poder quitarle el molde en el que se vació, el periodo de curado debe ser mínimamente por 7 días para no tener problemas en la resistencia proyectada del. El método de fraguado que se utiliza es el de rociar agua sobre el suelo-cemento para ayudar a la hidratación de su pasta, y mantenerlo en un lugar protegido de la lluvia y el sol.

3. DESARROLLO DEL ESTUDIO

3.1. Materiales.

Primeramente se buscó un banco de tierra para extraer dicho material, éste es uno de los materiales base y fundamentales en el desarrollo del proyecto en cuestión, ya que se lo utiliza para la realización de los distintos ensayos planteados.

La ubicación del banco de tierra se encuentra en las inmediaciones del barrio “El Paraíso”, a lado del colegio Fe y Alegría.



Banco de tierra ubicada en la zona de Tomatitas. [Imagen. 1]



Banco de tierra ubicada en la zona de Tomatitas. [Imagen. 2]

Luego de ubicar el banco de tierra se decide realizar un análisis rápido de las partículas que lo conforman, por lo que se toma muestras de tierra para determinar la cantidad de arcilla, limo y arena.

El análisis consiste en colocar la tierra en un envase, llenándolo en un 40% de su capacidad total, para posteriormente llenarlo completamente con agua, hecho esto se cierra el envase para poder agitarlo durante cinco minutos. Se lo deja reposando durante un par de horas, para que se produzca la decantación de sus partículas, de tal manera que las partículas de mayor tamaño, pertenecientes a la arena, se ubicarán por debajo ya que tienen mayor peso que la arcilla y limos. Tal así que se puede distinguir capas que delimitan una división de las partículas, con esto se debe marcar el envase de tal manera que se determine el porcentaje de arena, arcilla y limos.



Análisis porcentual por decantación de la tierra. [Imagen. 3]

Dicho análisis presenta los siguientes resultados:

Cantidad de Arena: 80 %

Cantidad de Arcilla y limo: 20 %

Este parámetro de porcentajes obtenido, nos da la idea de que el material encontrado en este banco se encuentra dentro del rango de combinación de suelo apropiada. Con esto se puede proceder a realizar un análisis de mayor precisión para determinar las

cantidades de arena, arcilla y limo, para esto nos apoyaremos en un análisis granulométrico en una muestra de suelo del lugar.

Un análisis de granulometría se realiza para obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma un suelo. Para esto se hace uso de un juego de tamices que tienen un tamaño graduado establecido por las normas de la AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

El procedimiento a seguir es el siguiente: Se debe tomar una muestra de suelo para obtener su respectivo peso, como se trata de un suelo sin presencia de piedras la cantidad puede estar entre 300 a 500 gramos.

La muestra del material con el que se trabaja está completamente seca, si no lo está se la deberá colocar unas 24 horas antes dentro de un horno.

Los tamices con que se trabaja son los correspondientes para suelos compuestos por arenas y limos, los cuales son: N° 10, N° 40 y N° 200.



Juego de tamices. [Imagen. 4]

Se realiza el agitado de los tamices durante unos 15 minutos para hacer pasar el material por las aberturas de dichos tamices, finalmente se debe realizar el pesaje del material retenido en cada malla y lo que pasa el tamiz N° 200.

Datos del ensayo.

Peso de la muestra (P_T) = 500 gr.

Tabla 1. Datos para el ensayo de granulometría.

Tamiz	Peso del papel (gr.)	Peso retenido + papel (gr.)
N° 10	4,60	0,00
N° 40	4,60	92,20
N°200	4,50	321,40
Pasa	4,50	95,30

Ref. Elaboración propia.

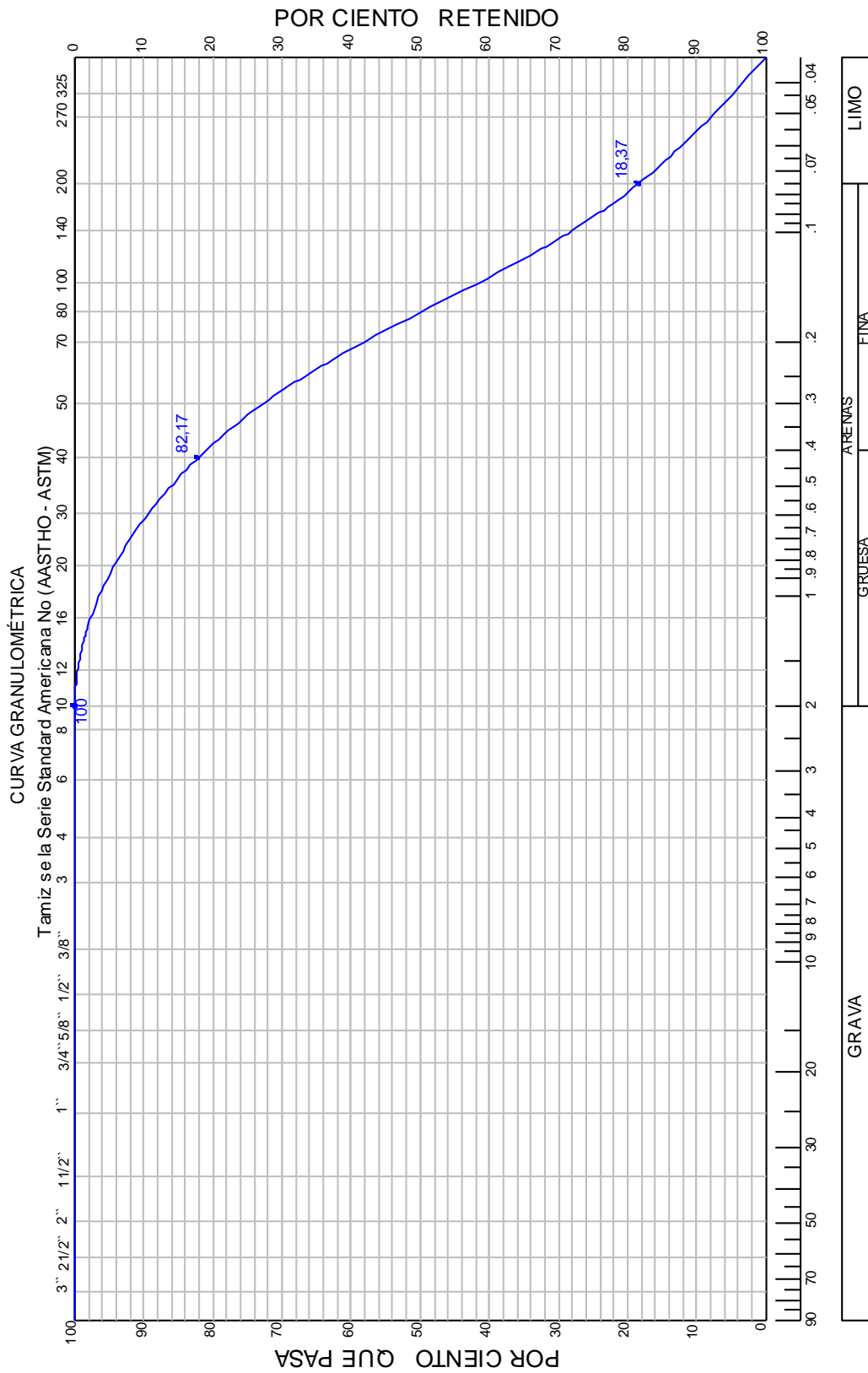
Cálculos.

Tabla 2. Cálculos para el ensayo de granulometría.

Tamiz	Peso retenido (gr.)	Peso acumulado retenido (gr)	% acumulado retenido	% acumulado que pasa
N° 10	0,00	0	0	100,00
N° 40	89,10	89,10	17,83	82,17
N°200	318,90	408,00	81,63	18,37
Pasa	91,80	499,80	100,00	0,00
Total	499,80			

Ref. Elaboración propia.

Con estos resultados se traza la curva granulométrica de esta muestra de suelo, la cual se muestra en la imagen 4.1-5, y de esta manera determina las cantidades de arena, arcilla y limos.



Curva granulométrica del suelo con el que se trabajará en este proyecto

Ref. Elaboración propia.

De la curva granulométrica realizada se obtienen los siguientes resultados:

Cantidad de Arena: 81,63 %

Cantidad de Arcilla y limo: 18,37 %

Por lo cual se confirma los resultados obtenidos en el análisis rápido de decantación de las partículas. Con esto se puede decir que la tierra del banco con la que se trabaja se encuentra dentro del rango recomendable para la preparación de elementos de suelo-cemento.

Como el tamiz número 10 corresponde a una abertura de malla de 2 mm. Se decidió tamizar toda la tierra acopiada a través de una malla también de 2 mm para poder separar las partículas de mayor tamaño que no pertenecen al grupo de las arenas.

Esta malla de 2 mm se la puede conseguir en cualquier ferretería, y para facilitar su uso y manejo se la tesó en un bastidor de madera cuyas dimensiones son de 0,5 [m] x 1 [m]



Mallas y bastidor para realizar el tamizado. [Imagen. 5]

El tamizado consiste en hacer pasar el suelo a través de la malla con el objetivo de separar las partículas de diámetros que no pertenecen al grupo de las arenas. Para esto se hizo de la ayuda de una pala con la que se deposita la arena en el tamiz, posterior a esto se procede a agitar el tamiz para que pase la mayor cantidad de partículas.



Tamizado de la tierra componente del suelo-cemento. [Imagen. 6]

Ensayo de retracción.-

Para el ensayo de retracción se consiguió cueros de chivo para poder obtener el pelo animal necesario para el desarrollo del ensayo. La obtención del pelo de chivo en una situación real no presenta ningún tipo de problema, ya que existen personas que trabajan con el cuero del animal pero no le dan ningún uso al pelo que se encuentra en él, así que se podría negociar fácilmente por su obtención a un bajo costo y en el mejor de los casos de manera gratuita.



Fibras de pelo de chivo. [Imagen. 7]

Ensayo de cohesión.-

Para el desarrollo del ensayo de cohesión y de permeabilidad del suelo-cemento se consiguió aceite de linaza doblemente cocido, éste se lo puede encontrar en algunas ferreterías, cuyo valor por litro oscila por los bs. 20, éste es un precio muy considerable por lo que se espera de buenos resultados en los ensayos en los que se utiliza este material, de manera que sea conveniente su empleo en la elaboración de elementos fabricados con suelo-cemento.



Aceite de linaza doblemente cocido. [Imagen. 8]

3.2. Planeamiento de ensayos.

Como punto de partida, el estudio iniciará con una inspección del banco de tierra, haciendo un análisis corto y rápido que nos dará un diagnóstico aproximado del tipo de tierra con el que se trabajará en el desarrollo de la presente investigación.

Una vez que sea aprobada la calidad de la tierra del banco elegido, se procede con la obtención, construcción y compra de los materiales e instrumentos que se necesitan para poder desarrollar sin problema alguno los diferentes ensayos ya planteados con anterioridad.

En la presente investigación se plantean cuatro ensayos de laboratorio para poder estudiar algunas de las características físico-mecánicas del suelo-cemento, dichos ensayos se mencionan a continuación.

- Ensayo de cohesión del suelo-cemento.
- Ensayo de retracción del suelo-cemento.
- Ensayo de permeabilidad del suelo-cemento.
- Ensayo de resistencia a la compresión del suelo-cemento.

La secuencia en el desarrollo de los distintos ensayos seguirá el orden en el que se los ha mencionado, pudiéndose alterar el desarrollo de los tres últimos, pero siendo totalmente necesario que el ensayo de cohesión del suelo-cemento se lo realice primero, debido a que de este ensayo se obtendrán resultados con el que recién se podrán desarrollar los otros ensayos.

Para el desarrollo del ensayo de cohesión se requiere del material base, que consiste en la tierra obtenida del banco ya escogido y cemento, además de agua y aceite de linaza doblemente cocido y otros materiales básicos de un laboratorio como fuentes y balanza. Con la finalización de este ensayo se obtendrán resultados tales como la relación óptima de agua/cemento y la relación de agua/cemento/aceite de linaza, datos necesarios para que se dé inicio a los demás ensayos.

Posteriormente se tiene planeado el desarrollo del ensayo de retracción del suelo-cemento, el cual requiere un armado previo de unos moldes metálicos que tienen una forma lineal. El material con el que se debe contar antes de comenzar con su desarrollo es el material base, cemento y tierra del banco, además de pelo de chivo que se obtendrá del cuero de dicho animal.

El siguiente ensayo es el de permeabilidad, que requiere de un molde especial que represente al que se utiliza en el ensayo de permeabilidad de carga variable, que se muestra en el libro de Braja M. Das. Una vez armado el equipo el material requerido para comenzar el desarrollo del ensayo es la tierra del banco, cemento, aceite de linaza e instrumentos de medición.

Finalmente se concluirá con el desarrollo del ensayo de compactación del suelo-cemento, para esto se requiere de moldes que tengan las dimensiones del proctor T99 y otros materiales como ser un pisón que genere la energía necesaria para llegar a una densidad máxima además de tierra del banco, cemento y de una prensa de CBR para poder realizar la rotura de las probetas y así de esa manera determinar su resistencia a compresión.

Una vez realizados los ensayos, se hará una recopilación de todos los datos y resultados obtenidos para poderlos procesarlos en un trabajo de gabinete. El cual presentará los resultados en gráficas de correlación, porcentajes y ecuaciones, de tal manera que sea fácil y sencilla su interpretación.

3.3. Descripción metodológica.

a) Ensayo de retracción del suelo-cemento.-

Este ensayo tiene como referencia la metodología de determinación del acortamiento elástico del suelo-cemento, explicada en el manual de Construcción de Viviendas Económicas con Suelo-Cemento, la cual se encuentra en la página virtual del ICPA (Instituto del Cemento Portland Argentino).

La retracción del suelo-cemento se puede apreciar de una mejor manera en elementos unidimensionales (en los que predomina una dimensión sobre las otras dos), por lo que se plantea desarrollar este ensayo en unos moldes metálicos de medidas 4 x 4 x 60 cm, aquí se puede observar que la longitud del molde es 15 veces mayor a su altura y su ancho, lo que le convierte en un molde para formar elementos unidimensionales, en el que se puede apreciar y medir fácilmente la retracción del suelo-cemento, facilitándonos así el desarrollo del presente ensayo.

b) Ensayo de permeabilidad del suelo-cemento.-

El ensayo de permeabilidad tiene como base fundamental el tema de permeabilidad por carga variable del libro de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica de Braja M. Das, del cual se elaboró un equipo que permite determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo-cemento, el cual depende de variables como ser el espesor de la muestra de

suelo-cemento, altura inicial y final de la columna de agua que se encuentra por encima de la muestra y el tiempo que tarda en moverse el agua del primer punto hasta el segundo, con estos datos se puede introducir a una ecuación ya deducida, y así finalmente se puede determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo-cemento.

c) Ensayo de resistencia a compresión del suelo-cemento.-

Este ensayo tiene como fundamento el ensayo de compactación de suelos del libro de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica de Braja M. Das, del cual se sigue la metodología del proctor T99 que consiste en compactar el material en un molde cilíndrico en 3 capas y por la caída de un pistón desde una altura de 30 cm., además de que se aplica una ecuación planteada en el mismo ensayo para determinar la energía específica que se otorga a la masa del mismo material. Por otro lado el molde utilizado en este ensayo tiene como referencia al recomendado por la norma I.N.V. E-809 “Resistencia a Compresión de Cilindros Preparados con Suelo-Cemento”, que indica que la relación de la altura al diámetro tiene que ser de 1.15, para obtener una resistencia a compresión lo más similar posible en comparación a una situación real de su uso aplicado en la construcción de bloques de suelo-cemento, que son los que más se fabrican con este material.

3.4. Ensayo de cohesión del suelo-cemento.-

a) Objetivo del Ensayo.-

El ensayo de cohesión tiene por objetivo determinar la relación de agua-cemento (A/C) y la relación de agua-cemento-aceite de linaza doblemente cocido (A/C/AL), en la preparación de una mezcla tradicional de suelo-cemento, que se utilizará en la realización de los posteriores ensayos.

b) Fundamento teórico.-

La cohesión es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de un elemento. Es la acción o la propiedad de las moléculas, de cómo se pegan entre sí, siendo fuerzas de carácter atractivo. Ésta es una propiedad intrínseca de una sustancia que es causada por la forma y la estructura de sus moléculas que hace que

la distribución de los electrones en órbita irregular cuando las moléculas se acercan la una a la otra, creando atracción eléctrica que pueden mantener una estructura macroscópica tal como una gota de agua.

El ensayo de cohesión se lo realiza para obtener un control de la humedad en la mezcla de suelo-cemento, así de esta manera poder determinar la cantidad correcta de agua que se debe utilizar en la dosificación de suelo-cemento. En este caso particular, a la mezcla de suelo-cemento se le añadirá aceite de linaza doblemente cocido para disminuir la cantidad de agua y mejorar la cohesión de la mezcla de suelo-cemento.

c) Materiales utilizados.-

- Cemento Portland.
- Tierra tamizada por una malla de abertura de 2 mm.
- Aceite de linaza doblemente cocido.
- Probeta graduada de precisión de 1 ml.
- Fuentes.
- Balanza de precisión de 0,1 gr.

d) Procedimiento del ensayo.-

Se comienza por preparar una mezcla patrón de suelo cemento de dosificación 1:10. Pesando 50 gramos de cemento portland.



Pesaje del cemento en la balanza con precisión de 0,1 gr. [Imagen. 9]

Y 500 gramos de tierra.



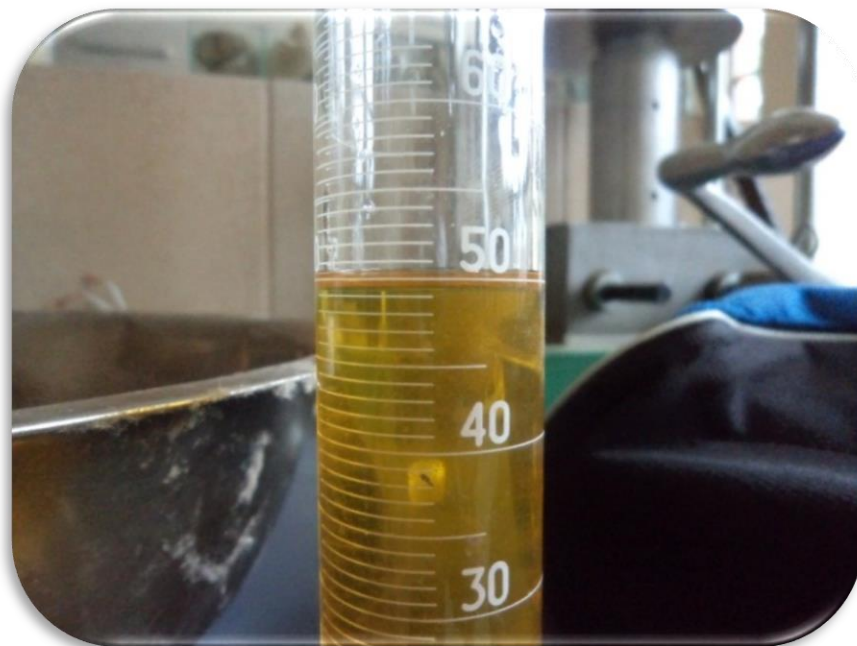
Pesaje de la tierra en la balanza con precisión de 0,1 gr. [Imagen. 10]

Luego se añade agua en distintas cantidades, comenzando por una relación agua-cemento A/C de 0.20 (50 gr de cemento y 10 ml de agua), aumentando la cantidad de agua hasta una relación de agua-cemento A/C de 2 (50 gr de cemento y 100 ml de agua), variando en intervalos de 0,2 (10 ml de agua), hasta encontrar una humedad ideal para la mezcla patrón de suelo-cemento.



Medición de la cantidad de agua en la probeta graduada de precisión de 1 ml. [Imagen. 11]

Luego se prepara otras mezclas de suelo-cemento de dosificación de 1:10 a las cuales se les añade aceite de linaza doblemente cocido en cantidades variadas combinándolas con agua, hasta encontrar la humedad ideal del suelo-cemento.



Medición de la cantidad de aceite de linaza en la probeta graduada de precisión de 1 ml. [Imagen. 12]

El procedimiento para encontrar la humedad ideal del suelo-cemento es el siguiente:

Al suelo-cemento de dosificación 1:10 se le agrega agua y aceite de linaza doblemente cocido en cantidades que van variando de forma ascendente, revolviendo la mezcla para evitar la formación de terrones, hasta llegar a una humedad que aparente ser una pasta suave y moldeable.



Realización del mezclado del cemento con la tierra. [Imagen. 13]

Se toma un puñado de mezcla y apretarla entre los dedos y la palma de la mano



Realización del apretado de la mezcla de suelo-cemento. [Imagen. 14]

Al abrir la mano, el bolo debe tener la marca dejada por los dedos



Observación de la marca dejada por los dedos en la mezcla de suelo-cemento. [Imagen. 15]

Si esto no ocurre es porque la mezcla está muy seca. En este caso adicionar agua y aceite de linaza doblemente cocido hasta que la marca dejada por los dedos sea perfecta.

Enseguida dejar caer el bolo de una altura de más o menos 1 m, sobre una superficie dura.



Caída del bolo de suelo-cemento desde una altura de 1 m. [Imagen. 16]

El bolo debe pulverizarse al chocar con la superficie. Si esto no ocurre, la mezcla está muy húmeda. En este caso esperar a que seque la mezcla y adicionar más suelo-cemento en las mismas proporciones y repetir los test hasta conseguir la humedad ideal.



Pulverización del bolo de suelo-cemento cuando cae desde una altura de 1 m. [Imagen. 17]

e) Datos del ensayo de Cohesión.-

Dosificación del suelo cemento 1:10
Peso del cemento en la muestra 50 gr
Peso de la tierra en la muestra 500 gr

Tabla 3. Datos y observaciones del ensayo de cohesión del suelo-cemento.

N° de ensayo	Agua [ml]	Aceite de linaza [ml]	Observación
1	10	-	Mezcla seca, se deshace al apretar con la mano
2	20	-	Mezcla seca, se deshace al apretar con la mano
3	30	-	Mezcla húmeda, se deshace al apretar con la mano, aparece la marca de los dedos
4	40	-	Mezcla húmeda, se deshace al apretar con la mano, aparece la marca de los dedos
5	54	-	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, y se pulveriza a al caer
6	60	-	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
7	70	-	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
8	80	-	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
9	90	-	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
10	100	-	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
11	10	10	Mezcla seca, se deshace al apretar con la mano
12	20	10	Mezcla húmeda, se deshace al apretar con la mano, aparece la marca de los dedos
13	38	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, y se pulveriza a al caer
14	40	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
15	50	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
16	60	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
17	70	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
18	80	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
19	90	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
20	100	10	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
21	10	20	Mezcla húmeda, se deshace al apretar con la mano, aparece la marca de los dedos
22	26	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, y se pulveriza a al caer
23	30	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
24	40	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
25	50	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
26	60	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
27	70	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
28	80	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
29	90	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
30	100	20	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
31	10	30	Mezcla húmeda, se deshace al apretar con la mano, aparece la marca de los dedos
32	17	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, y se pulveriza a al caer
33	20	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
34	30	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
35	40	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
36	50	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
37	60	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
38	70	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
39	80	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer
40	90	30	Mezcla húmeda, marca perfecta de los dedos, no pulveriza a al caer

Ref. Elaboración propia.

En resumen se tiene los siguientes datos en los que se ha llegado a una a una humedad óptima en el suelo-cemento.

Tabla 4. Resultados en el que el suelo-cemento ha llegado a una humedad ideal.

Cemento [gr]	Agua [ml]	Aceite de linaza [ml]
50	54	0
50	38	10
50	26	20
50	17	30

Ref. Elaboración propia.

f) Resultados del ensayo de Cohesión.-

Observando los datos de la anterior tabla, se utilizarán el primero por ser parte de la muestra patrón, y el tercero ya que es la máxima cantidad de aceite de linaza sin sobrepasar la cantidad de agua utilizada.

Por lo tanto la relación agua-cemento (A/C) para la muestra patrón es de:

$$\begin{array}{l} A/C = 54/50 \\ \boxed{A/C = 1.08} \end{array}$$

Este resultado indica que para obtener una humedad óptima en la muestra patrón de suelo-cemento se debe verter a la mezcla 108 mililitros de agua por cada 100 gramos de cemento que se utilicen en dicha mezcla.

Y la relación máxima de aceite de linaza-agua (AL/A) obtenida es de:

$$\begin{array}{l} AL/A = 20/26 \\ \boxed{AL/A = 0.77} \end{array}$$

Donde se obtiene que su respectiva relación de agua-cemento es de:

$$\begin{array}{l} A/C = 26/50 \\ \boxed{A/C = 0.52} \end{array}$$

Estos dos últimos resultados indican que para obtener la humedad óptima en una muestra de suelo-cemento que contiene aceite de linaza se debe verter a la mezcla 52 mililitros de agua y 40 mililitros de aceite de linaza por cada 100 gramos de cemento que se utilicen en la mezcla.

3.5. Ensayo de retracción del suelo-cemento.-

a) Objetivo del Ensayo.-

El ensayo de retracción tiene por objetivo el poder determinar la magnitud de la retracción en un elemento de forma lineal de suelo-cemento, cuando a éste se lo elabora con una mezcla tradicional (dosificación de suelo-cemento de 1:10) y cuando se le añade fibras de pelo de chivo, para de esta manera establecer una curva que relacione la retracción del suelo-cemento en función de la cantidad de pelo de chivo añadido a la mezcla y analizar si es que luego de añadido el pelo de chivo todavía existen fisuras en el elemento de suelo-cemento.

Al mismo tiempo determinar la retracción de un elemento de suelo-cemento cuando a éste se le añade aceite de linaza doblemente cocido, para ver si no existen efectos colaterales de los demás aditivos utilizados en los otros ensayos.

b) Fundamento teórico.-

La aparición de fisuras por retracción en elementos fabricados con suelo-cemento se puede dar en cualquier dirección del elemento, pero para una mejor apreciación de esta situación el ensayo de retracción se realizará en elementos de lineales.

Los elementos lineales o unidimensionales o prismas mecánicos, están sometidos a un estado de tensión plana con esfuerzos tensiones grandes en la dirección de línea baricéntrica (que puede ser recto o curvo). Geométricamente son alargados siendo la dimensión según dicha línea (altura, luz, o longitud de arco), mucho mayor que las dimensiones según la sección transversal, perpendicular en cada punto a la línea baricéntrica.

c) Materiales utilizados.-

- Tierra tamizada por una malla de abertura de 2 mm.
- Cemento Portland.
- Fibra de pelo de chivo.
- Balanza con precisión de 0.1 gr.

- 6 Moldes metálicos de dimensiones interiores de 4 cm x 4 cm x 60 cm.
- Regla metálica de precisión de 0,5 mm.
- Jarra milimetrada y aceite de linaza doblemente cocido
- Aceite de camión para engrasar.

d) Procedimiento del ensayo.-

El primer paso que se realiza en este ensayo es tamizar tierra a través de una malla de abertura de 2 mm (1000 gramos por cada molde que se prepare).



Tamizado de la tierra a través de una malla de abertura de 2mm. [Imagen 18]

Seguido a esto se debe preparar una muestra patrón de suelo-cemento de dosificación de 1:10.

Dosificación utilizada:



Dosificación de suelo-cemento 1:10 [Imagen 19]

Luego se arma el molde de medidas interiores de 4x4x60 [cm] el cual debe estar correctamente engrasado para evitar la adherencia entre el suelo-cemento y el molde, en estos moldes se vacía la muestra patrón de suelo-cemento, sin dejar ningún vacío y llenando bien las esquinas hasta llenar el borde alisando la superficie con una cuchara de albañil.



Moldes del ensayo de retracción llenados con mezcla de suelo-cemento de dosificación 1:10.
[Imagen 20]

Se lo deja reposar durante siete días en un ambiente protegido de la lluvia y el sol.



Fraguado y curado de la mezcla de suelo-cemento en los moldes del ensayo de retracción. [Imagen 21]

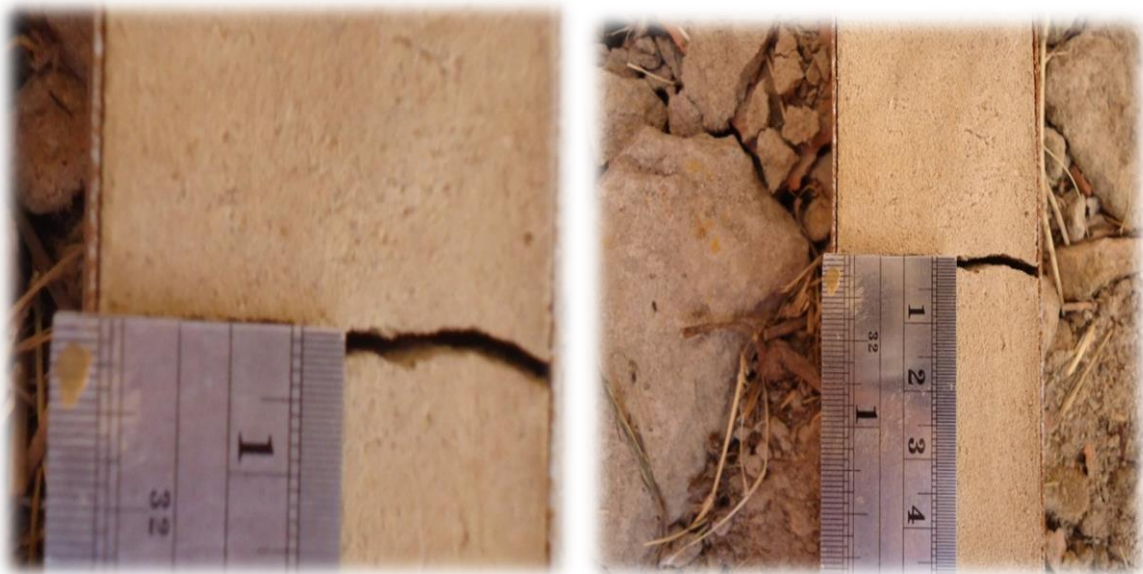
Finalmente se mide la retracción en los extremos de los moldes, y se observa si es que existen fisuras en las piezas de suelo-cemento, si es que existiesen se debe realizar su respectiva medición para anotar en una planilla de datos y así obtener la retracción total de la pieza de suelo-cemento de dosificación 1:10.



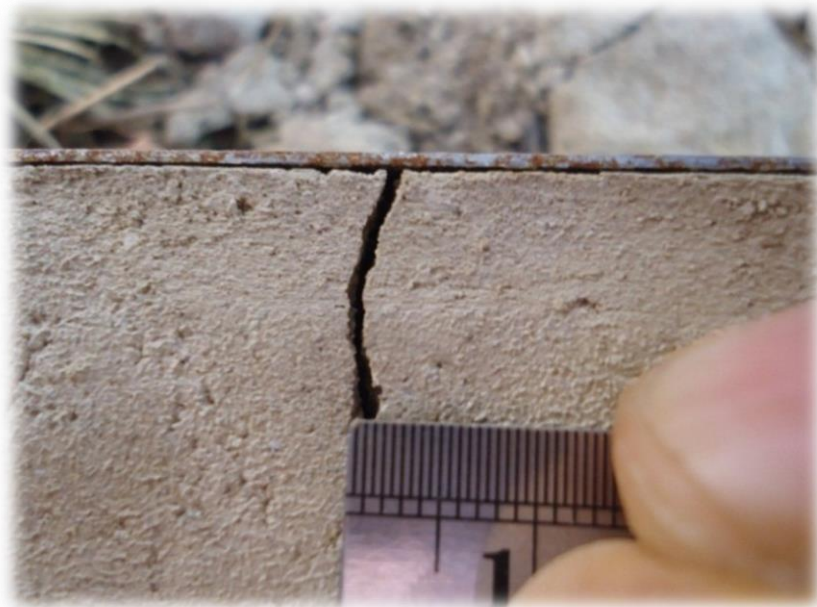
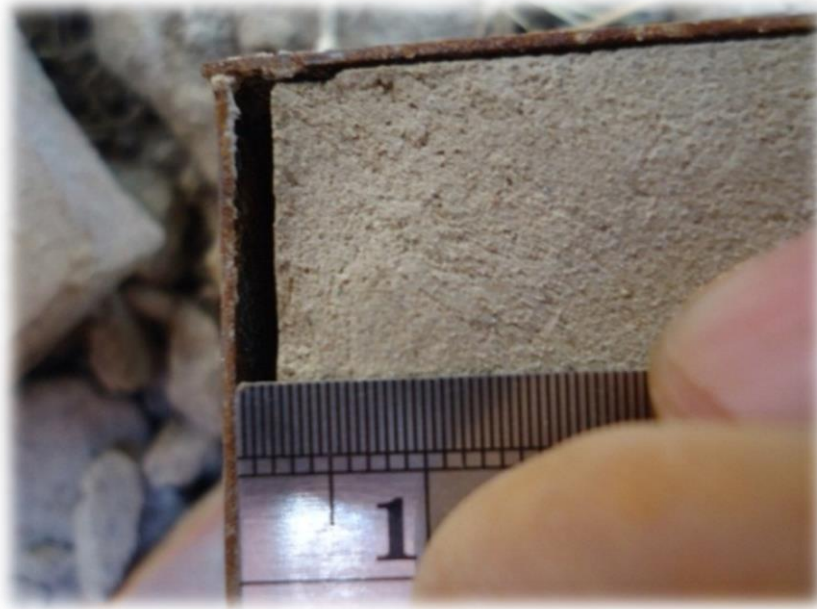
Retracción y fisuras del suelo-cemento para la muestra patrón. [Imagen 22]



Retracción y fisuras del suelo-cemento para la muestra patrón. [Imagen 23]



Medición en la retracción y fisuras del suelo-cemento sin pelo de chivo. [Imagen 24]



Medición en la retracción y fisuras del suelo-cemento sin pelo de chivo. [Imagen 25]

Seguido a esto se preparan otras mezclas de suelo-cemento con una dosificación 1:10 a las cuales se les añade fibras de pelo de chivo en distintas cantidades, comenzando con unos 10 gramos que es equivalente a aproximadamente un puñado de pelo de chivo, este puñado debe ser esparcido de forma uniforme sobre la tierra y el cemento mientras se los está mezclando (antes de añadir agua para una mejor distribución de las fibras).



Incorporación de las fibras de pelo de chivo a la mezcla de suelo-cemento. [Imagen 26]



Incorporación de las fibras de pelo de chivo a la mezcla de suelo-cemento. [Imagen 27]

Luego de preparar la mezcla de suelo-cemento con pelo de chivo, se los debe colocar en los moldes ya fabricados, y a partir de este punto se sigue el procedimiento ya explicado en el ensayo de retracción para la muestra patrón.



Vaciado y enrasado de la mezcla de suelo-cemento con pelo de chivo en los moldes de retracción. [Imagen 28]



Visualización de pequeñas fisuras en el suelo-cemento que contiene fibras de pelo de chivo. [Imagen 29]



Visualización de pequeñas fisuras en el suelo-cemento que contiene fibras de pelo de chivo. [Imagen 30]



Medición de las fisuras en el suelo-cemento que contiene fibras de pelo de chivo. [Imagen 31]

Corte en la sección transversal para ver la distribución de las fibras.-



Visualización de la distribución del pelo de chivo en la masa de suelo-cemento. [Imagen 32]



Visualización de la distribución del pelo de chivo en la masa de suelo-cemento. [Imagen 33]

e) Datos del ensayo de retracción.-

Tabla 5. Datos y resultados del ensayo de retracción

Dosificación del suelo cemento	1:10
Peso del cemento en la muestra	100 gr
Peso de la tierra en la muestra	1000 gr
Cantidad de agua	108 ml

Ref. Elaboración propia.

Tabla 6. Retracción del suelo-cemento cuando a la muestra se le añade pelo de chivo.

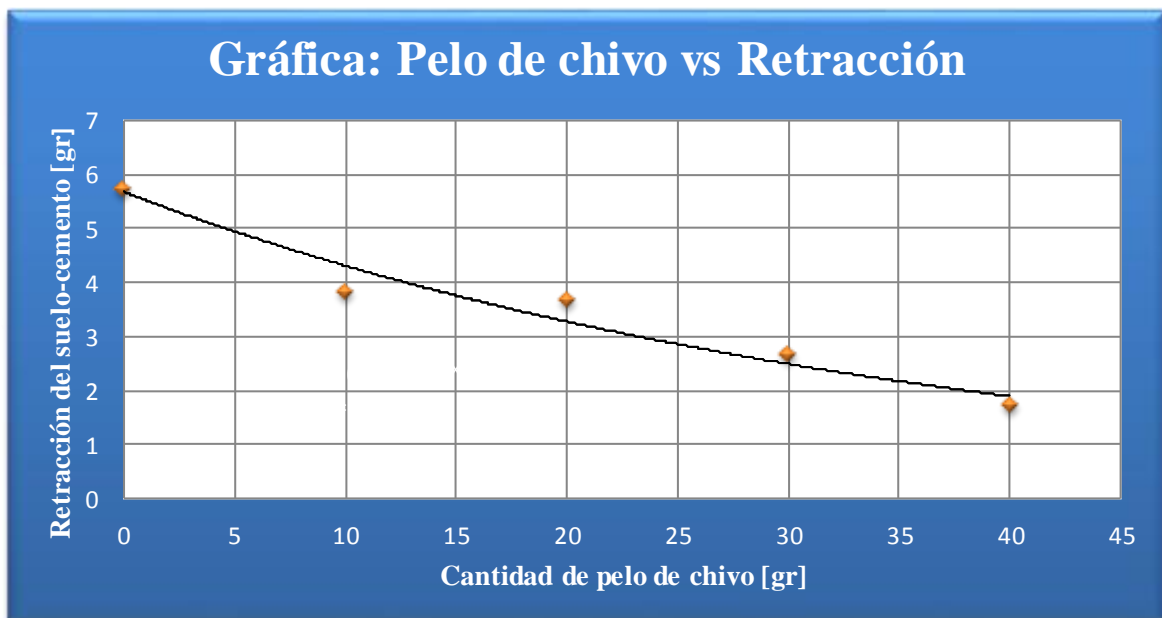
Pelo de Chivo (gr)	Retracción del Suelo-cemento (mm)
-	6,00
-	6,00
-	5,00
-	6,00
-	5,50
-	6,00
10	4,00
10	3,50
10	3,50
10	4,00
10	3,50
10	4,50
20	3,50
20	3,50
20	4,00
20	3,50
20	4,00
20	3,50
30	2,50
30	2,50
30	3,00
30	2,50
30	3,00
30	2,50
40	1,50
40	2,00
40	1,50
40	1,50
40	2,00
40	2,00

Ref. Elaboración propia.

f) Datos del ensayo de retracción.-

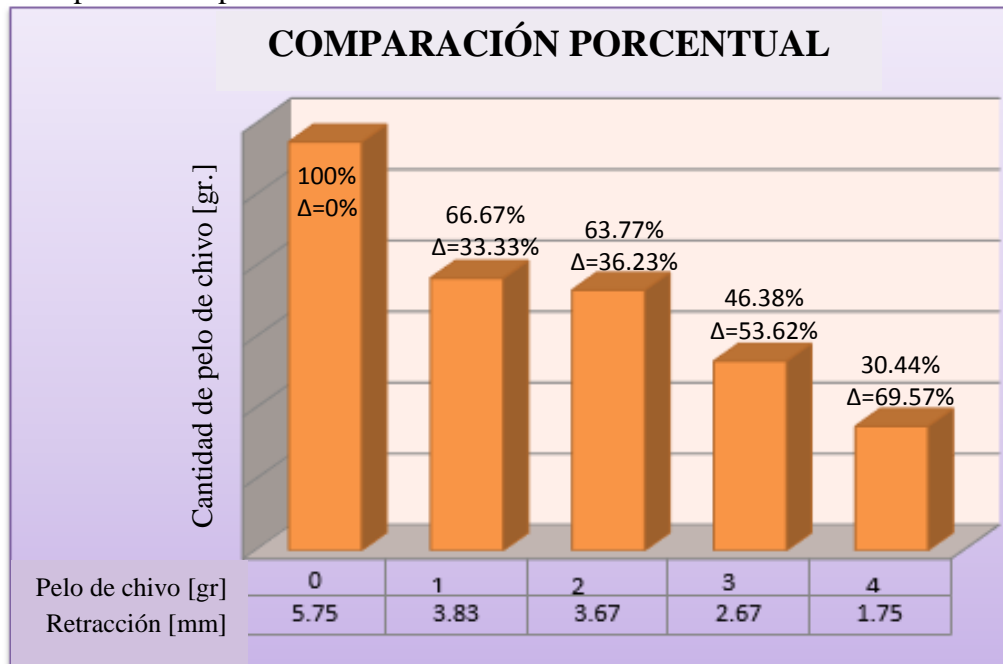
Tabla 7. Resumen de datos del ensayo de retracción del suelo-cemento.

Pelo de chivo [gr]	retracción del suelo-cemento [mm]
0	5.75
10	3.83
20	3.67
30	2.67
40	1.75



Gráfica de la curva de comportamiento de la retracción del suelo-cemento en función del pelo de chivo.

Para una mejor interpretación de los resultados se presenta la siguiente gráfica con comparaciones porcentuales:



Gráfica de comparación porcentual de la retracción del suelo-cemento de los diferentes ensayos.
Ref. Elaboración

Ensayo de retracción cuando se añade aceite de linaza doblemente cocido:

Dosificación del suelo cemento	_ 1:10
Peso del cemento en la muestra	100 gr
Peso de la tierra en la muestra	1000 gr
Cantidad de Agua	52 ml
Cantidad de aceite de linaza	40 ml

Tabla 8. Mínima retracción del suelo-cemento luego de añadir pelo de chivo.

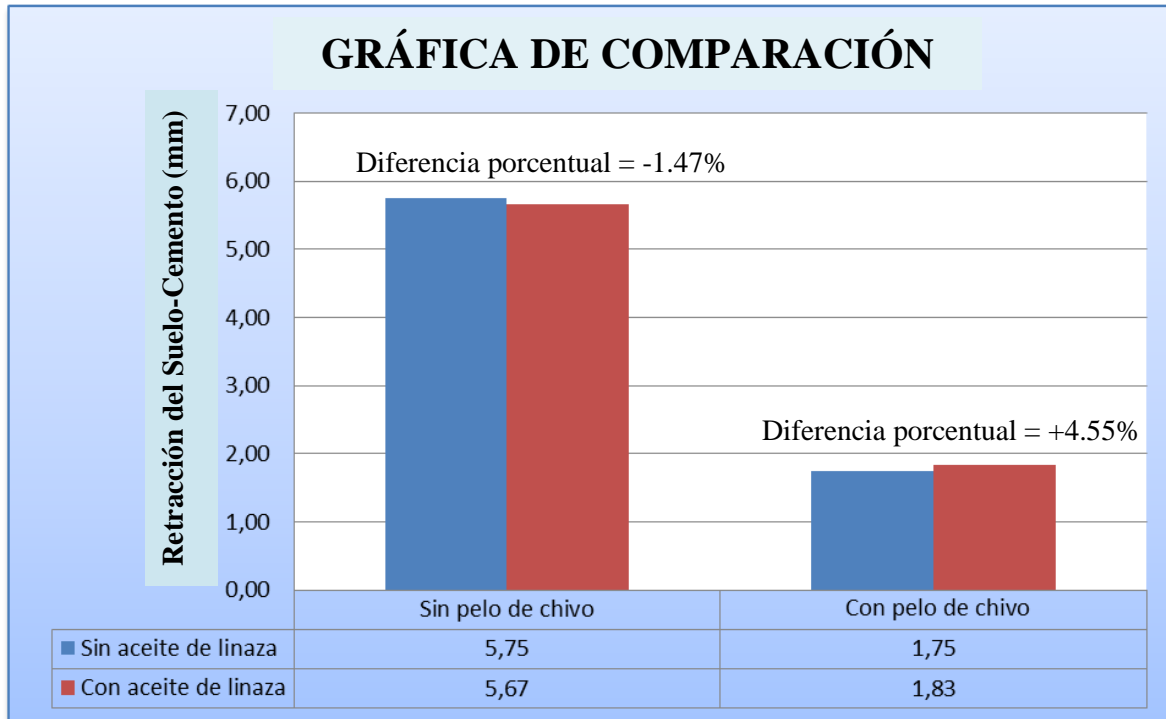
Pelo de chivo [gr]	retracción del suelo-cemento [mm]	Promedio [mm]
-	5.50	5.67
-	5.50	
-	6.00	
-	6.00	
-	5.00	
-	6.00	
40	2.00	1.83
40	2.00	
40	2.00	
40	1.50	
40	2.00	
40	1.50	

Ref. Elaboración propia

Tabla 9. Retracción del suelo-cemento cuando a la muestra se le añaden pelo de chivo y aceite de linaza.

Pelo de chivo [gr]	-	40	
retracción del suelo-cemento [mm]	5.75	1.75	Sin aceite de linaza
	5.67	1.83	Con aceite de linaza

Ref. Elaboración propia.



Gráfica de comparación de la retracción del suelo cemento cuando se añade pelo de chivo y aceite de linaza.

Ref. Elaboración Propia.

3.6. Ensayo de permeabilidad del suelo-cemento.-

a) Objetivo del Ensayo.-

El ensayo de permeabilidad tiene el objetivo determinar el coeficiente de permeabilidad (k) de una muestra patrón de suelo-cemento de dosificación 1:10, así mismo la determinación del coeficiente de permeabilidad de una muestra de suelo-cemento cuando se le añade aceite de linaza doblemente cocido para realizar una respectiva comparación.

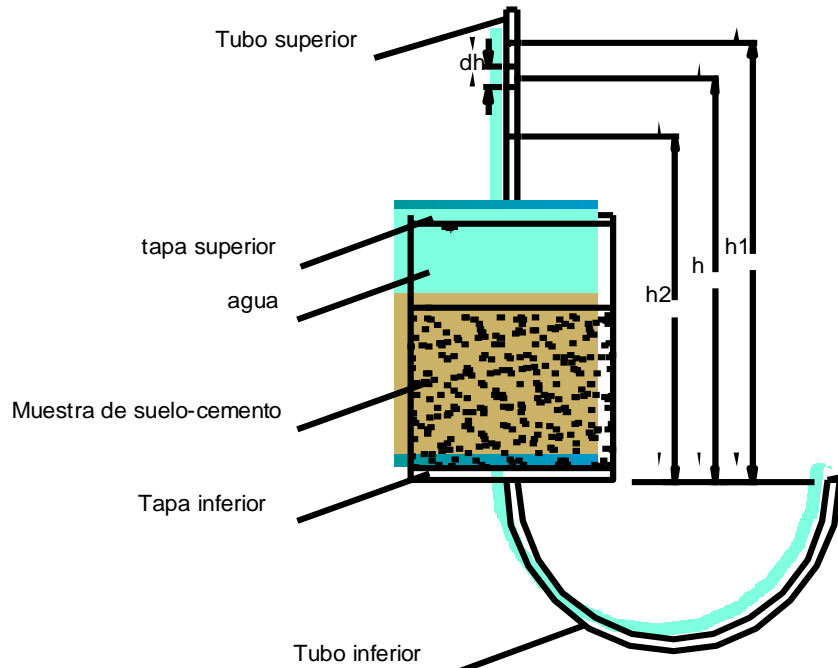
Además se determinará el coeficiente de permeabilidad de la muestra de suelo-cemento cuando a ésta se le aplican fuerzas dinámicas, para determinar si el ensayo de compactación tiene efectos sobre el presente ensayo.

b) Fundamento teórico.-

El suelo-cemento es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exteriormente, se produce escurrimiento a través de su masa. Esto se debe a que los materiales que lo componen son porosos o sea que tienen vacíos interconectados a través de los cuales el agua puede fluir con facilidad de puntos de alta energía a puntos de baja energía.

La cuantificación de la permeabilidad de los materiales se determina calculando su coeficiente de permeabilidad, que es una característica particular de los mismos, específicamente está ligado a la ley de Darcy que se refiere al flujo de fluidos a través de su masa. El coeficiente de permeabilidad, generalmente es representado por la letra k .

Al tratarse de una muestra de partículas finas, se recomienda la prueba de carga variable para determinar el valor del coeficiente de permeabilidad, la cual presenta el siguiente arreglo típico



Esquema del equipo que se utiliza en el ensayo de permeabilidad.

En este se podrá observar como el agua del tubo superior fluye a través de la muestra de suelo-cemento. La diferencia inicial de carga h_1 en el tiempo $t = 0$ es registrada y se permite que el agua fluya a través de muestra de suelo-cemento de manera que la diferencia final de carga en el tiempo $t = t_2$ sea h_2 .

La tasa de flujo q del agua, a través de la muestra en cualquier tiempo t se expresa por:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt} \quad \dots (4.3. a)$$

Donde:

a = área de la sección transversal del tubo superior.

A = área de la sección transversal de la muestra de suelo cemento.

Reordenando la ecuación resulta:

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left(\frac{-dh}{h} \right) \quad \dots (4.3. b)$$

Al integrar el lado izquierdo de la ecuación (4.3. b) con límites de tiempo entre 0 y t y el lado derecho con límites de diferencia de carga entre h1 y h2, se obtiene:

$$t = \frac{aL}{Ak} \log_e \frac{h_1}{h_2}$$

Ó

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \dots (4.3. c)$$

Donde:

k : Coeficiente de permeabilidad

a: Área de la bureta

L: Longitud del espécimen

A: Área de la sección transversal de la muestra

t: Tiempo transcurrido hasta llegar a la altura h₂

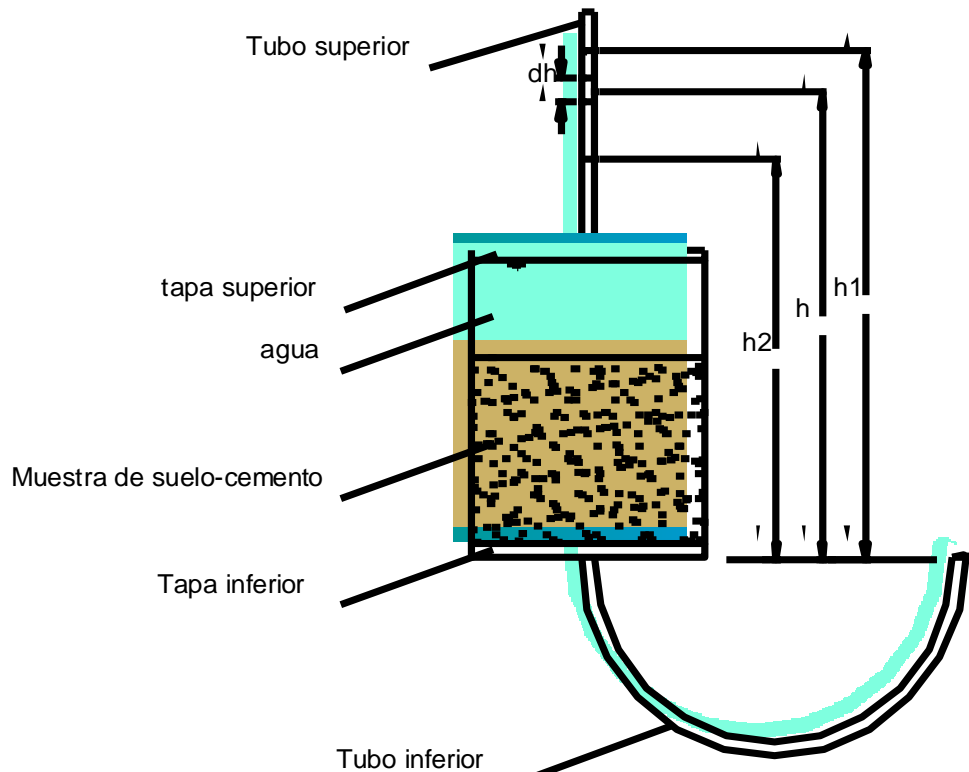
h₁: Altura inicial en la bureta

h₂: Altura final en la bureta

c) Materiales utilizados.-

- Tierra tamizada por una malla de abertura de 2 mm.
- Cemento Portland.
- Aceite de linaza doblemente cocido.
- Jarra graduada.
- Balanza de buena precisión.
- Regla metálica de precisión de 0,5 mm.

- Equipo fabricado para el ensayo de permeabilidad



Esquema del equipo que se utiliza en el ensayo de permeabilidad.

d) Procedimiento del ensayo.-

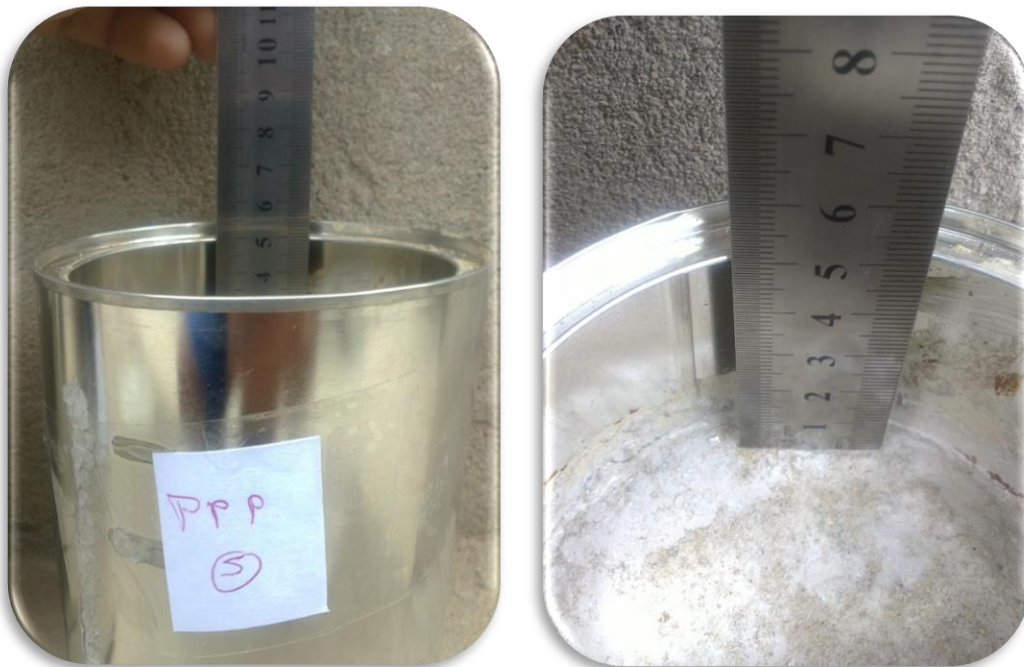
Este ensayo tiene como referencia el ensayo de permeabilidad de carga variable, para esto se elabora un pequeño equipo que consiste en un envase cilíndrico con tapas arriba y abajo del mismo. En la tapa superior se instala un tubo transparente en el cual se puede realizar las lecturas, y en la tapa inferior una manguera para mantener el nivel de agua de abajo constante.

Antes de colocar las tapas en el envase cilíndrico, se prepararán las muestras de suelo-cemento pertenecientes a la muestra patrón de dosificación 1:10, para ser vaciadas dentro de los envases, dejando el espacio suficiente para el llenado con agua.



Fraguado y curado del suelo-cemento en los moldes del ensayo de permeabilidad. [Imagen 34].

Una vez hecho esto se deja que la mezcla fragüe y endurezca durante siete días, momento en el cual se tomarán las medidas correspondientes para determinar el espesor que tiene el espécimen.



Medición del espesor de la muestra de suelo-cemento en el molde de permeabilidad. [Imagen 35].

Se vacía agua en el espacio restante del molde y se espera a que se filtre a través de toda la masa del suelo-cemento.



Visualización de la filtración del agua a través del suelo-cemento. [Imagen 36].

Hecho esto se procede a colocar las tapas de arriba y abajo sellándolas muy bien de manera que no existan filtraciones del agua por los bordes. Y se empieza a llenar con agua, de manera que ésta sea visible en el tubo de parte superior.



Llenado con agua de los equipos del ensayo de permeabilidad. [Imagen 37].

Se realiza la primera medición de la altura de la columna de agua, la cual es en un tiempo $t = 0$, y en las próximas 72 horas se debe realizar distintas mediciones de la columna de agua, anotando el tiempo que ha transcurrido desde la primera medición, para poder realizar los cálculos correspondientes.



Medición de la altura de la columna de agua en el equipo de permeabilidad. [Imagen 38].

Se sigue el mismo procedimiento para el ensayo de permeabilidad en muestras de suelo-cemento a las que se añade aceite de linaza y a las que se les aplica fuerzas dinámicas externas. Lo único que cambia es la preparación de las mismas muestras, al primer caso mencionado la dosificación de suelo-cemento es de 1:10 y se le añade aceite de linaza doblemente cocido, cuya cantidad es la que se obtuvo del ensayo de cohesión. Mientras que en el segundo caso, en el ensayo de permeabilidad para cuando se aplica fuerzas dinámicas externas a la masa de suelo-cemento, la dosificación de la mezcla de suelo-cemento es de 1:10, y se vacía en el molde en tres capas, donde se deja caer un pisón de 2.5 kg desde una altura 30 cm, y el número de golpes será de 25 por capa, para obtener la energía que se utiliza en el proctor t99 del ensayo de compactación de suelos.

e) Datos del ensayo de permeabilidad.-

Para la muestra patrón:

$$\begin{aligned} a &= 0,785 \text{ cm}^2 \\ A &= 78,540 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Tabla 10. Datos para el ensayo de permeabilidad.

Dosificación del suelo cemento 1:10
Peso del cemento en la muestra 300 gr
Peso de la tierra en la muestra 3000 gr
Relación agua-cemento (A/C) 1,08

Ref. Elaboración propia.

Tabla 11. Datos del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra patrón.

No de ensayo	L [cm]	t [min]	h [cm]
1	7.49	0	9.60
		260	9.25
		695	8.65
		1055	8.25
		1400	7.75
		1695	7.05
		2650	6.55
2	6.40	0	10.60
		260	10.20
		695	9.85
		1055	9.45
		1400	8.95
		1695	8.65
		2650	7.45
3	8.70	0	8.90
		260	8.35
		695	8.05
		1055	7.80
		1400	7.45
		1695	7.05
		2650	6.85
4	6.75	0	10.15
		260	9.75
		695	9.10
		1055	9.05
		1400	8.80
		1695	8.00
		2650	7.70
5	6.95	0	10.05
		260	9.45
		695	9.00
		1055	8.60
		1400	8.05
		1695	7.05
		2650	6.50

Ref. Elaboración propia.

Para la muestra con aceite de linaza doblemente cocido:

$$a = 0,785 \text{ cm}^2$$

$$A = 78,540 \text{ cm}^2$$

Dosificación del suelo cemento 1:10

Peso del cemento en la muestra 300 gr

Peso de la tierra en la muestra 3000 gr

Relación agua-cemento (A/C) 0,52

Relación aceite de linaza-agua (AL/A) 0,77

Tabla 12. Datos del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra a la que añadió aceite de linaza.

N° de ensayo	L [cm]	t [min]	h [cm]
1	6,80	0	8,85
		415	8,25
		915	7,85
		1230	7,30
		1725	6,90
		2010	6,20
		3920	5,35
2	7,05	0	9,20
		415	8,75
		915	8,35
		1230	7,80
		1725	7,15
		2010	6,85
		3920	5,65
3	7,55	0	9,50
		415	9,05
		915	8,45
		1230	7,90
		1725	7,55
		2010	7,30
		3920	5,90
4	8,10	0	9,45
		415	9,00
		915	8,65
		1230	8,15
		1725	7,80
		2010	6,70
		3920	6,05
5	6,70	0	10,55
		415	9,80
		915	9,15
		1230	8,45
		1725	7,90
		2010	7,20
		3920	6,15

Ref. Elaboración propia.

Para la muestra a la que se ha aplicado fuerzas dinámicas:

$$a = 0,785 \text{ cm}^2$$

$$A = 78,540 \text{ cm}^2$$

Dosificación del suelo cemento 1:10
 Peso del cemento en la muestra 300 gr
 Peso de la tierra en la muestra 3000 gr
 Relación agua-cemento (A/C) 1,08
 Energía específica aplicada $6,03 \text{ Kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$

Tabla 13. Datos del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra a la que se aplicó fuerzas dinámicas.

N° de ensayo	L [cm]	t [min]	h [cm]
1	7,40	0	9,25
		380	8,85
		950	8,20
		1365	7,75
		1640	7,40
		2030	7,05
		2995	6,35
2	6,85	0	8,75
		380	8,30
		950	7,75
		1365	7,40
		1640	7,00
		2030	6,55
		2995	6,05
3	8,35	0	8,45
		380	8,05
		950	7,65
		1365	7,20
		1640	6,90
		2030	6,65
		2995	6,15
4	7,80	0	9,10
		380	8,75
		950	8,15
		1365	7,65
		1640	7,20
		2030	6,90
		2995	6,55
5	7,45	0	8,85
		380	8,40
		950	7,95
		1365	7,45
		1640	7,05
		2030	6,95
		2995	6,15

Ref. Elaboración propia.

f) Cálculos del ensayo.-

Aplicando la ecuación (4.3. c):

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

Para la muestra patrón:

Tabla 14. Resultados del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra patrón.

N° de ensayo	L [cm]	t [min]	h [cm]	k [cm/min]	k [cm/min]
1	7,49	0	9,60	-	0,00001143
		260	9,25	0,00001070	
		695	8,65	0,00001123	
		1055	8,25	0,00001076	
		1400	7,75	0,00001145	
		1695	7,05	0,00001365	
		2650	6,55	0,00001081	
2	6,40	0	10,60	-	0,00000785
		260	10,20	0,00000947	
		695	9,85	0,00000676	
		1055	9,45	0,00000697	
		1400	8,95	0,00000774	
		1695	8,65	0,00000768	
		2650	7,45	0,00000852	
3	8,70	0	8,90	-	0,00001274
		260	8,35	0,00002135	
		695	8,05	0,00001257	
		1055	7,80	0,00001088	
		1400	7,45	0,00001105	
		1695	7,05	0,00001196	
		2650	6,85	0,00000860	
4	6,75	0	10,15	-	0,00000863
		260	9,75	0,00001044	
		695	9,10	0,00001061	
		1055	9,05	0,00000734	
		1400	8,80	0,00000688	
		1695	8,00	0,00000948	
		2650	7,70	0,00000704	
5	6,95	0	10,05	-	0,00001246
		260	9,45	0,00001646	
		695	9,00	0,00001104	
		1055	8,60	0,00001027	
		1400	8,05	0,00001102	
		1695	7,05	0,00001454	
		2650	6,50	0,00001143	

Ref. Elaboración propia.

Para la muestra con aceite de linaza doblemente cocido:

Tabla 15. Resultados del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra a la que añadió aceite de linaza.

N° de ensayo	L [cm]	t [min]	h [cm]	k [cm/min]	k [cm/min]
1	6,80	0	8,85	-	0,00001028
		415	8,25	0,00001151	
		915	7,85	0,00000891	
		1230	7,30	0,00001065	
		1725	6,90	0,00000981	
		2010	6,20	0,00001204	
		3920	5,35	0,00000873	
2	7,05	0	9,20	-	0,00000915
		415	8,75	0,00000852	
		915	8,35	0,00000747	
		1230	7,80	0,00000946	
		1725	7,15	0,00001030	
		2010	6,85	0,00001035	
		3920	5,65	0,00000877	
3	7,55	0	9,50	-	0,00000982
		415	9,05	0,00000883	
		915	8,45	0,00000967	
		1230	7,90	0,00001132	
		1725	7,55	0,00001006	
		2010	7,30	0,00000990	
		3920	5,90	0,00000918	
4	8,10	0	9,45	-	0,00001109
		415	9,00	0,00000952	
		915	8,65	0,00001180	
		1230	8,15	0,00001205	
		1725	7,80	0,00001031	
		2010	6,70	0,00001395	
		3920	6,05	0,00000891	
5	6,70	0	10,55	-	0,00000980
		415	9,80	0,00001191	
		915	9,15	0,00000713	
		1230	8,45	0,00000980	
		1725	7,90	0,00000970	
		2010	7,20	0,00001153	
		3920	6,15	0,00000871	

Ref. Elaboración propia.

Para la muestra a la que se ha aplicado fuerzas dinámicas:

Tabla 16. Resultados del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra a la que se aplicó fuerzas dinámicas.

N° de ensayo	L [cm]	t [min]	h [cm]	k [cm/min]	k [cm/min]
1	7,40	0	9,25	-	0,00000948
		380	8,85	0,00000861	
		950	8,20	0,00000939	
		1365	7,75	0,00000959	
		1640	7,40	0,00001007	
		2030	7,05	0,00000990	
		2995	6,35	0,00000930	
2	6,85	0	8,75	-	0,00000904
		380	8,30	0,00000952	
		950	7,75	0,00000875	
		1365	7,40	0,00000841	
		1640	7,00	0,00000932	
		2030	6,55	0,00000977	
		2995	6,05	0,00000844	
3	8,35	0	8,45	-	0,00000971
		380	8,05	0,00001066	
		950	7,65	0,00000874	
		1365	7,20	0,00000979	
		1640	6,90	0,00001032	
		2030	6,65	0,00000986	
		2995	6,15	0,00000886	
4	7,80	0	9,10	-	0,00000956
		380	8,75	0,00000805	
		950	8,15	0,00000905	
		1365	7,65	0,00000992	
		1640	7,20	0,00001114	
		2030	6,90	0,00001064	
		2995	6,55	0,00000856	
5	7,45	0	8,85	-	0,00000938
		380	8,40	0,00001023	
		950	7,95	0,00000841	
		1365	7,45	0,00000940	
		1640	7,05	0,00001033	
		2030	6,95	0,00000887	
		2995	6,15	0,00000906	

Ref. Elaboración propia.

g) Resumen de los resultados del ensayo de permeabilidad.-

Para la muestra patrón:

Tabla 17. Resumen de resultados del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento para la muestra patrón.

N° Ensayo	k [cm/min]	k [cm/min]
1	0,00001143	0,00001062
2	0,00000785	
3	0,00001274	
4	0,00000863	
5	0,00001246	

Ref. Elaboración propia.

Para la muestra con aceite de linaza doblemente cocido:

Tabla 18. Resumen de resultados del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento en la muestra a la que se añadió aceite de linaza.

N° Ensayo	k [cm/min]	k [cm/min]
1	0,00001028	0,00001003
2	0,00000915	
3	0,00000982	
4	0,00001109	
5	0,00000980	

Ref. Elaboración propia.

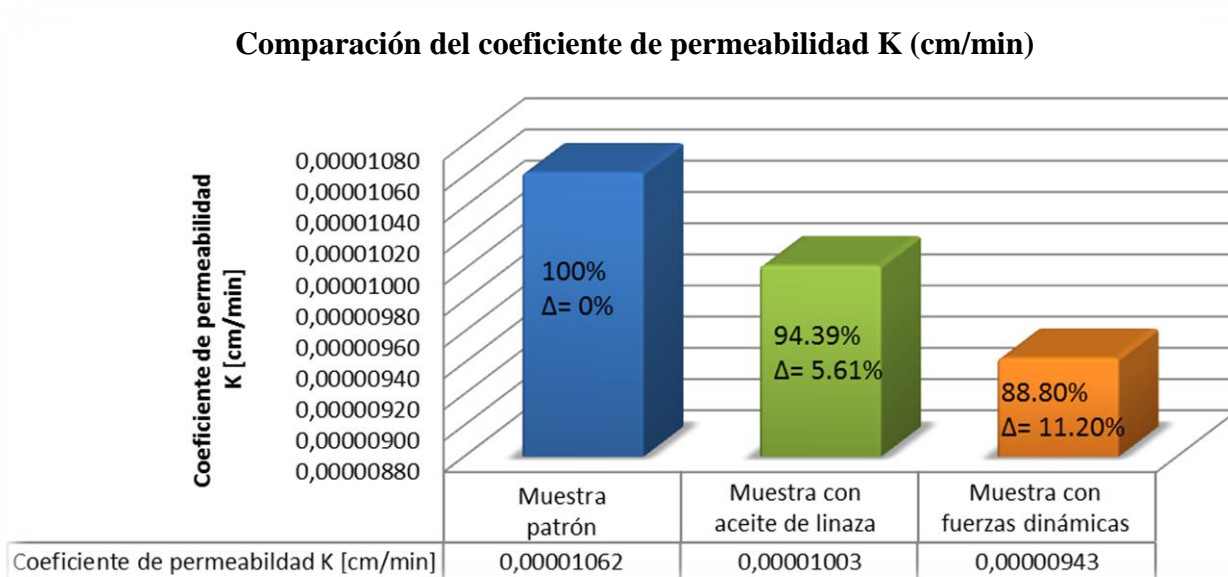
Para la muestra a la que se ha aplicado fuerzas dinámicas:

Tabla 19. Resumen de resultados del ensayo de permeabilidad del suelo-cemento en la muestra a la que se aplicó fuerzas dinámicas.

N° Ensayo	k [cm/min]	k [cm/min]
1	0,00000948	0,00000943
2	0,00000904	
3	0,00000971	
4	0,00000956	
5	0,00000938	

Ref. Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de los resultados, a continuación se muestra la una gráfica comparativa.



Gráfica de comparación del coeficiente de permeabilidad del suelo-cemento en los distintos ensayos.

Ref. Elaboración propia.

3.7. Ensayo de incremento de resistencia a compresión mediante la aplicación de fuerzas dinámicas.-

a) Objetivo del Ensayo.-

Este ensayo tiene por objetivo la determinación de la resistencia a compresión de una muestra patrón de suelo-cemento, de dosificación 1:10, y de otras muestras también de suelo-cemento, a las que se les ha aplicado fuerzas dinámicas, para observar si existe un aumento en la resistencia a compresión.

Así mismo se determinará la resistencia a compresión que tienen las muestras de suelo-cemento cuando se les añade aceite de linaza y cuando se les incorpora pelo de chivo, para de esta manera observar si es que los aditivos utilizados en los otros ensayos alteran la resistencia a compresión estudiada en el presente ensayo.

b) Fundamento teórico.-

Compactar la mezcla de suelo-cemento con fuerza estática para incrementar su resistencia a compresión es por lo general menos eficiente que compactar la mezcla

aplicando fuerzas dinámicas. Cuando un objeto pesado cae sobre el suelo-cemento, ocasiona ondas que provocan vibraciones en sus partículas. Esto a su vez, crea movimientos que permiten a las partículas entrar en un patrón más denso. Asimismo, si hay suficiente agua, los minerales de arcilla tienen la capacidad de formar una estructura interlaminar paralela, que es más ordenada y que conduce a una mayor cohesión y resistencia a compresión.

Los moldes que se utilizan para el ensayo de compresión del suelo-cemento recomendados por la I.N.V. E-807, son de forma cilíndrica, con un diámetro de 10 cm. y una altura de 11.5 cm, para obtener una relación entre la altura y el diámetro de 1.15, para obtener una resistencia a compresión lo más similar posible en comparación a una situación real de su uso aplicado en la construcción de bloques de suelo-cemento, que son los que más se fabrican con este material.

Las fuerzas dinámicas aplicadas a la masa de suelo-cemento, pueden ser cuantificadas mediante la determinación de la energía utilizada en su compactación, para esto se hará uso de la ecuación de la energía específica (E_e) que se utiliza en el ensayo de compactación de suelos:

$$E_e = n * N * W * h / V \quad \dots(4.4.a)$$

Donde:

E_e : Energía específica.

n: Número de golpes.

N: Número capas.

W: Peso del pisón.

h: Altura del molde.

V: Volumen del molde.

De acuerdo al volumen del molde utilizado se recomienda utilizar un equipo similar al proctor T99, el cual se refiere a compactar el suelo-cemento en un molde de 0.00094 m³ de capacidad, en tres capas. Se deja caer un pisón de 2.5 Kg de peso,

con una superficie de impacto de 2000 mm², desde una altura de 300mm, 25 veces sobres cada una de las tres capas, de igual espesor, con que se va llenando el recipiente.

El esfuerzo a compresión que resisten las probetas de suelo-cemento, serán medidas en el equipo de CBR, donde se podrá anotar la lectura del dial de cargas del extensómetro. Para convertir en carga esta lectura dial se deberá multiplicarla por la constante del equipo que es:

$$Carga(kg) = 13.569 * lectura\ del\ extensómetro + 0.9293 \quad \dots (4.4.b)$$

Y para transformarla en esfuerzo, tan solo se debe dividir la carga entre el área de contacto que es de 19.4 cm².

c) Materiales utilizados.-

- Tierra tamizada por una malla de abertura de 2 mm.
- Cemento Portland.
- Moldes de compactación.
- Pisón de 2.5 Kg.
- Fibra de pelo de chivo.
- Balanza de buena precisión.
- Jarra graduada y aceite de linaza doblemente cocido
- Equipo de CBR.
- Aceite de camión para engrasar.

d) Procedimiento del ensayo.-

Primeramente se prepara la mezcla patrón de suelo-cemento, de dosificación 1:10, que se vacía en los moldes previamente engrasados, para evitar la adherencia entre la mezcla y el molde.



Moldes plásticos para el ensayo de compactación. [Imagen 39]



Engrasado de los moldes plásticos para el ensayo de compactación. [Imagen 40]

El vaciado se realiza en tres capas, pero sólo se aplican fuerzas estáticas y de vibración para el acomodo de la mezcla en los moldes.

Una vez llenado los moldes, se realiza su respectivo engrasado, para luego colocarlos en un lugar seco y protegido del sol, para que fragüen sin ningún inconveniente. Al día siguiente se los puede sacar de sus moldes, para su respectivo curado durante su primera semana.



Vaciado de las probetas de suelo-cemento para la muestra patrón. [Imagen 41]



Fraguado de las probetas de suelo-cemento para la muestra patrón. [Imagen 42]

Siguiendo el mismo procedimiento se elaboran las demás probetas, a estas otras se les aplica fuerzas dinámicas en su masa, que generará energía específica, que es controlada con el número de golpes del pisón que cae sobre la masa de suelo-cemento. Se comienza con 8 golpes por capa, con la que se obtiene una energía de $2.01 \text{ Kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$, luego se aumenta los golpes en 16 con lo que se tiene $4.02 \text{ Kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$, el siguiente punto se hace con 24 golpes, obteniendo $6.03 \text{ Kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$, (ésta perteneciente a la energía específica utilizada en el proctor t99), y se finaliza con 32 golpes que es

perteneciente a una energía de $8.04 \text{ Kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$. Una vez elaboradas las probetas, deben ser colocadas en un lugar seco y protegido del sol, para que fragüen sin ningún inconveniente.



Engrasado de los moldes del ensayo de compactación. [Imagen 43]



Vaciado del suelo-cemento al cual se le ha aplicado fuerzas externas. [Imagen 44]

Al día siguiente se los puede sacar de sus moldes, para su respectivo curado durante su primera semana. La rotura de las probetas se hará a los 28 días de edad, en el equipo de CBR.



Fraguado y curado de las probetas de suelo-cemento. [Imagen 45]



Fraguado y curado de las probetas de suelo-cemento. [Imagen 46]

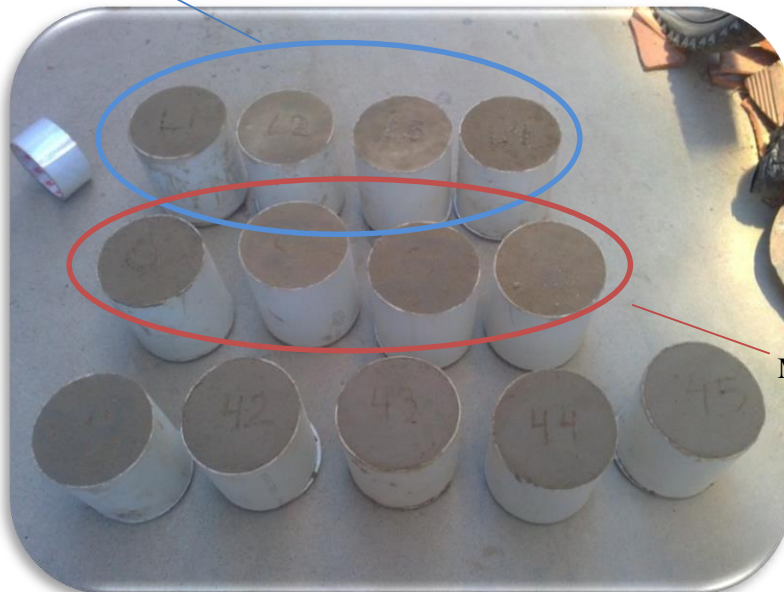
Al mismo tiempo se preparan muestras de suelo-cemento que contengan aceite de linaza doblemente cocido ($A/C=0.52$; $AL/A=0.77$), y pelo de chivo (40% del peso del

cemento), realizando el mismo procedimiento para el vaciado en los moldes (aplicando una energía de $6.03 \text{ Kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{cm}^3$ la cual es la que se utiliza en el proctor T99).



Elaboración de las probetas de suelo-cemento que contienen aceite de linaza y pelo de chivo. [Imagen 47]

Muestras con aceite de linaza



Muestras con pelo de chivo

Probetas de suelo-cemento con pelo de chivo y aceite de linaza. [Imagen 48]

Una vez que las probetas tengan una edad de 28 días, se las lleva al laboratorio para su respectiva rotura, y así de esa manera poder determinar su resistencia.



Probetas de suelo-cemento para la realización del ensayo. [Imagen 49]

Para la realización de la rotura de probetas se hace uso del equipo de CBR, para ello se coloca las probetas sobre la plataforma de prensa del C.B.R. La muestra debe estar alineada con el pistón, hecho esto se debe encender el dispositivo que hará subir la plataforma.



Rotura de probetas en la prensa CBR. [Imagen 50]



Rotura de probetas en la prensa CBR. [Imagen 51]

Cuando la probeta entre en contacto con el pistón, la aguja del extensómetro comenzará a moverse hasta el punto en que la probeta llegue a su límite de resistencia a compresión, una vez ocurrido esto se anota lo que marca el extensómetro.



Lectura del extensómetro durante la rotura de probetas. [Imagen 52]



Aparición de las fisuras en el momento de la rotura de la probeta. [Imagen 53]



Visualización de las fisuras en las probetas luego de la realización del ensayo. [Imagen 54]

e) Datos del ensayo de compresión.-

Dosificación del suelo cemento	1:10
Peso del cemento en la muestra	1000 gr
Peso de la tierra en la muestra	10000 gr
Relación agua-cemento (A/C)	1,08

$$N = 3$$

$$W = 2,52 \text{ Kg-f}$$

$$h = 30 \text{ cm}$$

$$V = 903,21 \text{ cm}^3$$

Además se ha nombrado a las muestras con los siguientes nombres para distinguirlas:

PPi: Probeta Patrón número i, (Energía de compactación = 0).

P1i: Probeta del ensayo 1 número i, (Energía de compactación = $2.01 \text{ Kg}^*\text{cm}/\text{cm}^3$).

P2i: Probeta del ensayo 2 número i, (Energía de compactación = $4.02 \text{ Kg}^*\text{cm}/\text{cm}^3$).

P3i: Probeta del ensayo 3 número i, (Energía de compactación = $6.03 \text{ Kg}^*\text{cm}/\text{cm}^3$).

P4i: Probeta del ensayo 4 número i, (Energía de compactación = $8.04 \text{ Kg}^*\text{cm}/\text{cm}^3$).

Li: Probeta a la que se ha añadido aceite de linaza número i (A/C=0.52 y AL/A=0.77).

Ci: Probeta a la que se ha añadido pelo de chivo número i (Pelo de chivo=400gr).

Tabla 20. Resultados de la resistencia a compresión del suelo-cemento.

Muestra	N° de golpes	Energía específica Kg*cm/cm ³	Lectura Extensómetro [mm]	Carga [Kg]	Resistencia a la compresión [Kg/cm ²]
PP1	0	0,00	83	1127,156	58,101
PP2	0	0,00	82	1113,587	57,401
PP3	0	0,00	75	1018,604	52,505
PP4	0	0,00	79	1072,880	55,303
PP5	0	0,00	81	1100,018	56,702
P11	8	2,01	86	1167,863	60,199
P12	8	2,01	78	1059,311	54,604
P13	8	2,01	85	1154,294	59,500
P14	8	2,01	82	1113,587	57,401
P15	8	2,01	75	1018,604	52,505
P21	16	4,02	93	1262,846	65,095
P22	16	4,02	86	1167,863	60,199
P23	16	4,02	85	1154,294	59,500
P24	16	4,02	89	1208,570	62,297
P25	16	4,02	82	1113,587	57,401
P31	24	6,03	99	1344,260	69,292
P32	24	6,03	87	1181,432	60,899
P33	24	6,03	94	1276,415	65,795
P34	24	6,03	98	1330,691	68,592
P35	24	6,03	102	1384,967	71,390
P41	32	8,04	108	1466,381	75,587
P42	32	8,04	105	1425,674	73,488
P43	32	8,04	97	1317,122	67,893
P44	32	8,04	113	1534,226	79,084
P45	32	8,04	102	1384,967	71,390
L1	24	6,03	72	977,897	50,407
L2	24	6,03	78	1059,311	54,604
L3	24	6,03	80	1086,449	56,003
L4	24	6,03	75	1018,604	52,505
C1	24	6,03	91	1235,708	63,696
C2	24	6,03	95	1289,984	66,494
C3	24	6,03	88	1195,001	61,598
C4	24	6,03	79	1072,880	55,303

Ref. Elaboración propia.

Resumen de los resultados del ensayo:

Tabla 21. Resumen de resultados de la resistencia a compresión del suelo-cemento.

Ensayo	N° de golpes	Energía específica Kg*cm/cm ³	Resistencia a la compresión Kg/cm ²
PP	0	0,00	56,00
P1	8	2,01	56,84
P2	16	4,02	60,90
P3	24	6,03	67,19
P4	32	8,04	73,49

Ref. Elaboración propia.

PP: Probeta Patrón, (Energía de compactación = 0).

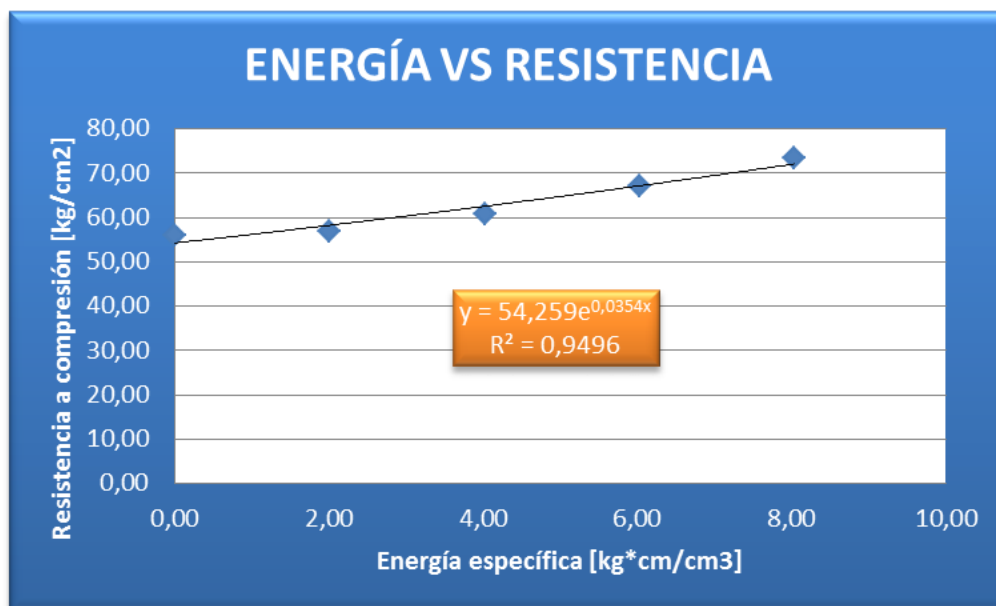
P1: Probeta del ensayo 1, (Energía de compactación = 2.01 Kg*cm/cm³).

P2: Probeta del ensayo 2, (Energía de compactación = 4.02 Kg*cm/cm³).

P3: Probeta del ensayo 3, (Energía de compactación = 6.03 Kg*cm/cm³).

P4: Probeta del ensayo 4, (Energía de compactación = 8.04 Kg*cm/cm³).

Para una mejor interpretación de los resultados anteriores, se presenta la siguiente gráfica de la resistencia a compresión en función a la energía específica aplicada a la muestra:

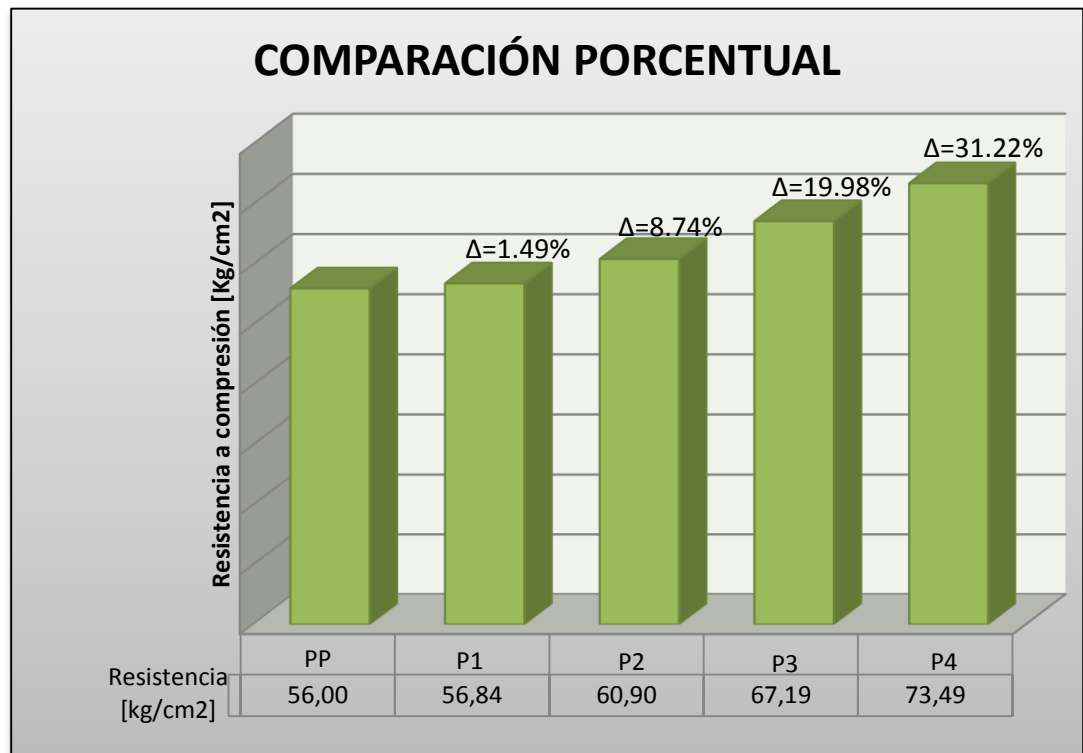


Gráfica de la línea de tendencia de la resistencia a compresión del suelo-cemento en función a la energía que se le aplica a su masa.

Ref. Elaboración propia.

Esta gráfica fue calculada mediante la aplicación de los mínimos cuadrados, es del tipo exponencial con una pendiente positiva, lo que indica que mediante se va aumentando la energía específica aplicada a la masa de suelo-cemento, su resistencia también sufre un incremento.

Para una mejor visualización del comportamiento de este incremento se ha preparado una gráfica comparativa, mostrando los porcentajes de incremento en la resistencia a compresión del suelo-cemento:



Gráfica de comparación porcentual del incremento de la resistencia a compresión del suelo-cemento en los distintos ensayos.

Ref. Elaboración propia.

Donde:

PP: Probeta Patrón, (Energía de compactación = 0).

P1: Probeta del ensayo 1 (Energía de compactación = 2.01 Kg*cm/cm³).

P2: Probeta del ensayo 2 (Energía de compactación = 4.02 Kg*cm/cm³).

P3: Probeta del ensayo 3 (Energía de compactación = 6.03 Kg*cm/cm³).

P4: Probeta del ensayo 4 (Energía de compactación = 8.04 Kg*cm/cm³).

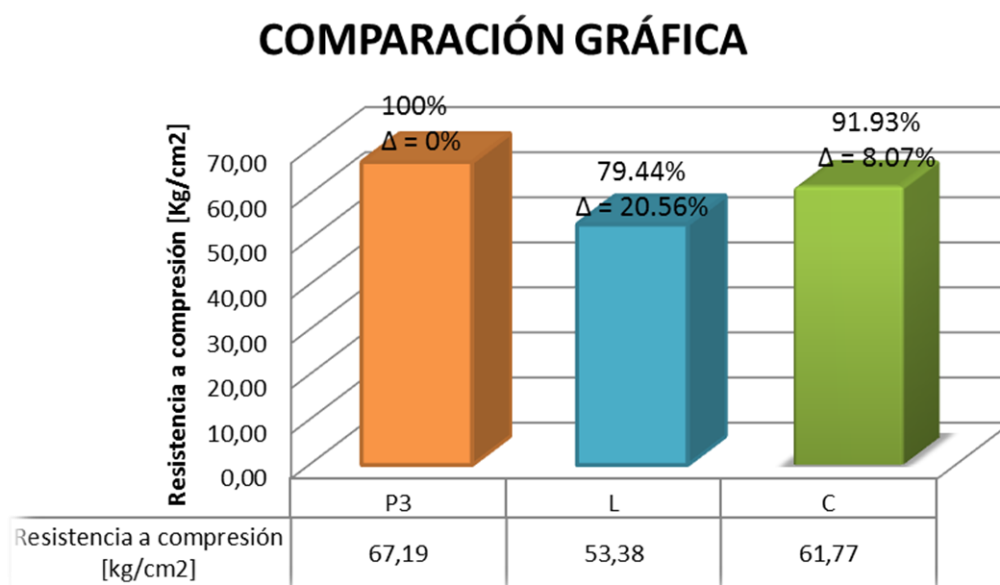
También se tiene el resumen de los resultados de la resistencia a compresión de las muestras de suelo-cemento que tienen añadidos aceite de linaza y pelo de chivo, que serán comparadas con la resistencia a compresión obtenida cuando se aplica una energía específica de 6.03 Kg*cm/cm³ (la que se utiliza en el proctor T99).

Tabla 22. Resultados del ensayo de compactación con aceite de linaza y pelo de chivo.

Ensayo	N° de golpes	Energía específica Kg*cm/cm ³	Resistencia a la compresión Kg/cm ²
P3	24	6,03	67,19
L	24	6,03	53,38
C	24	6,03	61,77

Ref. Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de estos resultados se muestra la siguiente gráfica comparativa:



Gráfica de comparación porcentual de la resistencia a compresión del suelo-cemento, cuando a éste se incorpora aceite de linaza y pelo de chivo.

Ref. Elaboración propia.

Donde:

P3: Probeta del ensayo 3 (Energía de compactación = 6.03 Kg*cm/cm³).

L: Probeta a la que se ha añadido aceite de linaza (A/C=0.52 y AL/A=0.77).

C: Probeta a la que se ha añadido pelo de chivo (Pelo de chivo=400gr).

3.7. Discusión y análisis de resultados.-

3.7.1. Ensayo de cohesión del suelo-cemento.-

En la realización del ensayo de cohesión para la muestra patrón se busca conocer la cantidad de agua que se debe incluir en la mezcla de suelo-cemento de tal manera que esta llegue a su humedad ideal, al concluir los ensayos de cohesión puestos en práctica se obtuvo que la relación de agua-cemento para la muestra patrón de dosificación 1:10 es de:

$$\text{Relación agua/cemento (A/C)} = 1.08$$

Resultado que indica que por cada kilogramo de cemento utilizado en la preparación de la mezcla patrón se debe verter 1080 mililitros de agua para obtener una mezcla con la cantidad adecuada de agua, de tal manera que la mezcla patrón no esté seca (con falta de humedad), ni muy fluida (con exceso de humedad).

La inclusión del aceite de linaza doblemente cocido a la mezcla de suelo-cemento es para observar si existe una disminución en la permeabilidad del suelo-cemento, pero para esto, previo se debe conocer la relación de aceite de linaza-agua, que se obtiene en el ensayo de cohesión, que una vez realizado se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 23. Resultados del ensayo de cohesión del suelo-cemento.

Cemento [gr]	Agua [ml]	Aceite de linaza [ml]	
50	38	10	→ AL/A =0.26
50	26	20	→ AL/A =0.77
50	17	30	→ AL/A =1.76

Ref. Elaboración propia.

Dónde:

A: Agua.

AL: Aceite de linaza doblemente cocido.

En esta parte del ensayo lo que se busca es obtener la mayor relación de aceite de linaza-agua, así que se analizará los dos resultados mayores que son de 0.77 y 1.76,

de estos dos se descartará la relación de 1.76 debido a que no se busca remplazar más del 50% de la cantidad de agua ya que el aceite de linaza significa un costo adicional. Por lo tanto la relación de aceite de linaza-agua con la que se trabajó en los ensayos fue de 0.77, resultado que indica que por cada 100 mililitros de agua utilizados en la mezcla se deben verter 77 mililitros de aceite de linaza doblemente cocido. Además a este resultado le acompaña su relación de agua-cemento que es de 0.52, por lo tanto se puede concluir que por cada kilogramo de cemento que se utiliza en la mezcla de suelo-cemento (para aquellas muestras en las que se utiliza aceite de linaza), se debe incluir 520 mililitros de agua y 400 mililitros de aceite de linaza doblemente cocido, para que dicha mezcla llegue a su humedad ideal.

3.7.2. Ensayo de retracción del suelo-cemento.-

Al finalizar los ensayos de retracción se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 24. Resultados del ensayo de retracción del suelo-cemento.

Pelo de chivo [gr]	retracción del suelo-cemento [mm]
0	5,75
10	3,83
20	3,67
30	2,67
40	1,75

Ref. Elaboración propia.

Efectivamente estos resultados indican que con el aumento de la cantidad de pelo de chivo se produce una reducción en la retracción de los elementos de suelo-cemento. Además con estos puntos se pudo calibrar una ecuación que relaciona la retracción del suelo-cemento en función a la cantidad de pelo de chivo que se incluye a la mezcla:

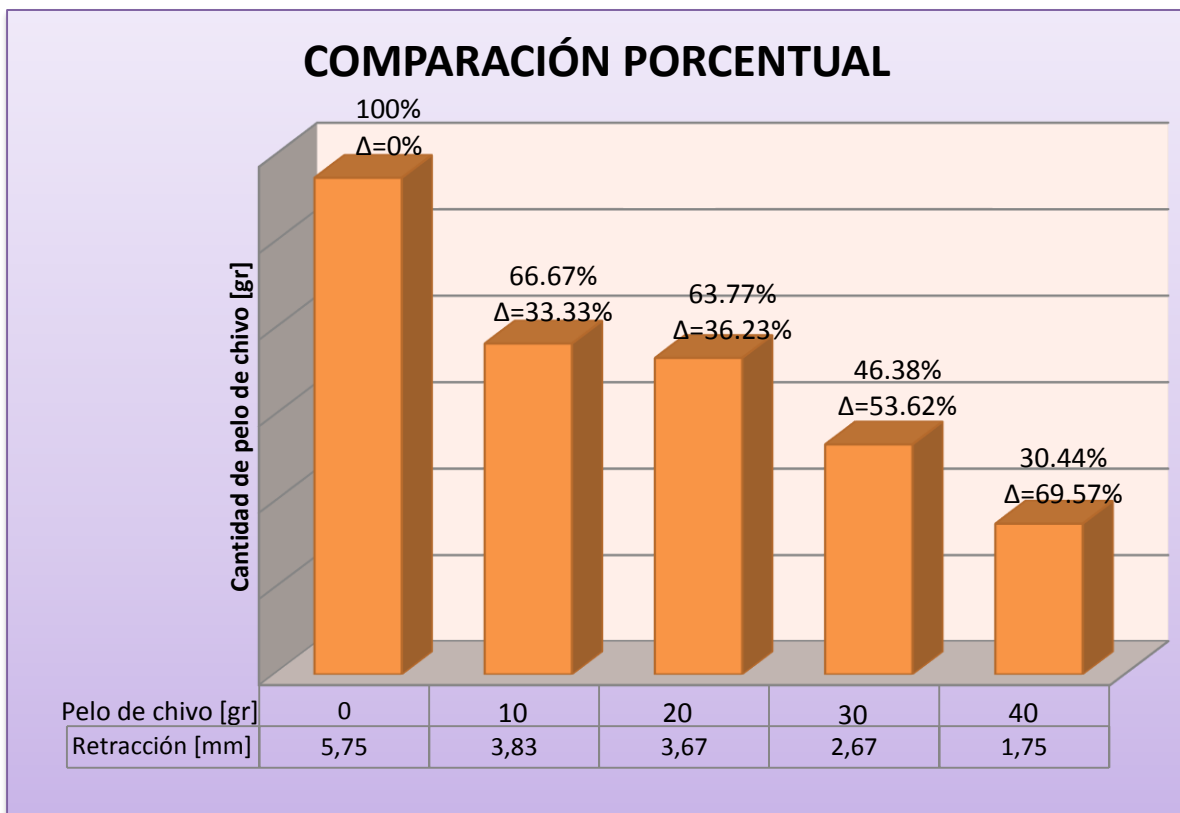
$$y = 5.6686e^{-0.027x}$$

$$R^2 = 0.9525$$

Siendo “x” la cantidad de pelo de chivo [gr.] y siendo “y” la retracción del suelo cemento [mm].

La ecuación fue calibrada usando mínimos cuadrados, donde se obtuvo una ecuación de forma exponencial con pendiente negativa, lo que indica claramente que con el aumento de la cantidad de fibras de pelo de chivo existe una disminución en la retracción de los elementos de suelo-cemento. Sin embargo, no se pudo determinar si es que existe alguna determinada cantidad de pelo de chivo que logre eliminar por completo la aparición de fisuras en los elementos fabricados con suelo-cemento.

Para un mejor entendimiento de en qué porcentaje se producen las reducciones de las fisuras se presentó un gráfico de porcentajes que se muestra a continuación:

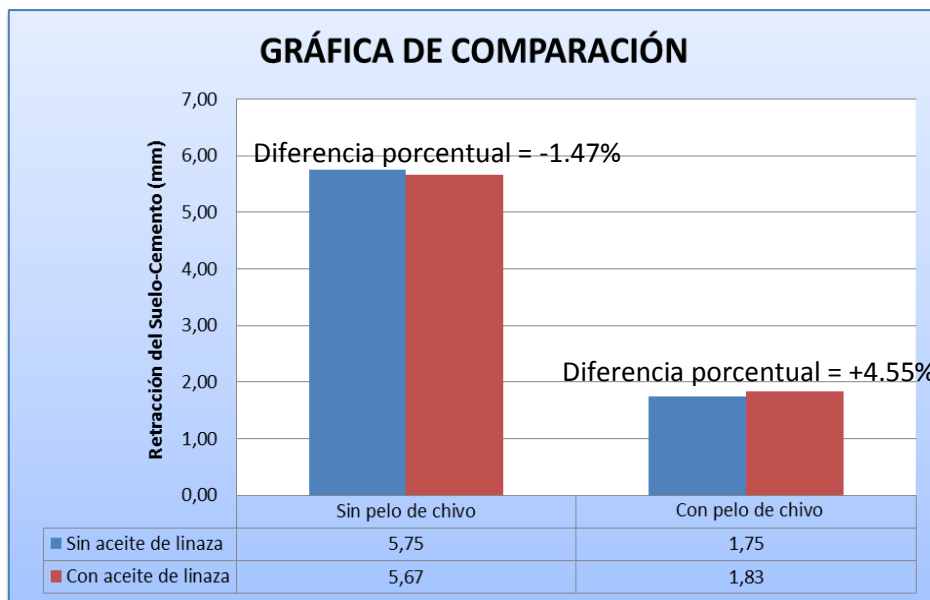


Gráfica de comparación porcentual de la retracción del suelo-cemento.

Ref. Elaboración propia.

En esta gráfica se debe indicar que la primera columna es la perteneciente a la muestra patrón suelo-cemento de dosificación 1:10 que no contiene fibras de pelo de chivo y que se la tomó como referencia de comparación otorgándole un 100% de la retracción total en el elemento de suelo-cemento. La siguiente columna pertenece a una muestra de suelo-cemento a la que se le ha agregado 10 gramos de fibra de pelo de chivo presentando una

reducción en su retracción de 33.33% en comparación con la muestra patrón. La tercera columna pertenece a una muestra de suelo-cemento a la que se le ha agregado 20 gramos de fibra de pelo de chivo presentando una reducción en su retracción de 36.23% en comparación con la muestra patrón, este punto en particular no es muy confiable, ya que es el único que se dispara fuera de la línea de tendencia de la ecuación calculada. La cuarta columna pertenece a una muestra de suelo-cemento a la que se le ha agregado 30 gramos de fibra de pelo de chivo presentando una reducción en su retracción de 53.62% en comparación con la muestra patrón. Y la última columna pertenece a una muestra de suelo-cemento a la que se le ha agregado 40 gramos de fibra de pelo de chivo presentando una reducción en su retracción de 69.57% en comparación con la muestra patrón, ésta es la máxima reducción que se pudo determinar en la realización de los ensayos de retracción del suelo-cemento, por lo tanto ésta es la referencia que se utiliza en los demás ensayos en los que es necesario el empleo de las fibras de pelo de chivo como medida de comparación. Además se analizó si es que la incorporación de aceite de linaza doblemente cocido a la mezcla de suelo-cemento tiene efecto alguno en su retracción, los ensayos realizados para este caso particular se muestran a continuación en la siguiente gráfica:



Gráfica de comparación porcentual de la retracción del suelo-cemento con muestras a las que se añadió aceite de linaza y pelo de chivo.

Ref. Elaboración propia.

En esta gráfica se presenta la comparación de la retracción en el suelo-cemento en la muestra patrón, y en una muestra a la que se le ha añadido 40 gramos de fibra de pelo de chivo. En el primer caso se obtuvo una reducción de la retracción del suelo cemento de 1.47% donde se utilizó una relación de aceite de linaza –agua de 0.80, en el segundo caso se tuvo un aumento del 4.55% también cuando se utiliza una relación de aceite de linaza-agua de 0.80, tomando estos resultados se puede concluir que la inclusión de aceite de linaza doblemente cocido es indiferente en los resultados finales de la retracción de los elementos de suelo-cemento.

3.8.3. Ensayo de permeabilidad del suelo-cemento.-

Una vez finalizado el ensayo se obtuvo los siguientes ensayos:

Para la muestra patrón:

Tabla 25. Resultados del ensayo de permeabilidad para la muestra patrón.

Nº Ensayo	k [cm/min]	k [cm/min]
1	0,00001143	0,00001062
2	0,00000785	
3	0,00001274	
4	0,00000863	
5	0,00001246	

Ref. Elaboración propia.

Para la muestra con aceite de linaza doblemente cocido:

Tabla 26. Resultados del ensayo de permeabilidad para la muestra a la que se añadió aceite de linaza.

Nº Ensayo	k [cm/min]	k [cm/min]
1	0,00001028	0,00001003
2	0,00000915	
3	0,00000982	
4	0,00001109	
5	0,00000980	

Ref. Elaboración propia.

En estos resultados se puede observar que existe una leve reducción del coeficiente de permeabilidad cuando se añade aceite de linaza en comparación con la muestra patrón, dando como conclusión que efectivamente el aceite de linaza produce una disminución en el coeficiente de permeabilidad, pero esta disminución es

relativamente muy baja como para considerarla en un futuro, ya que se está hablando de un 5.61% de reducción.

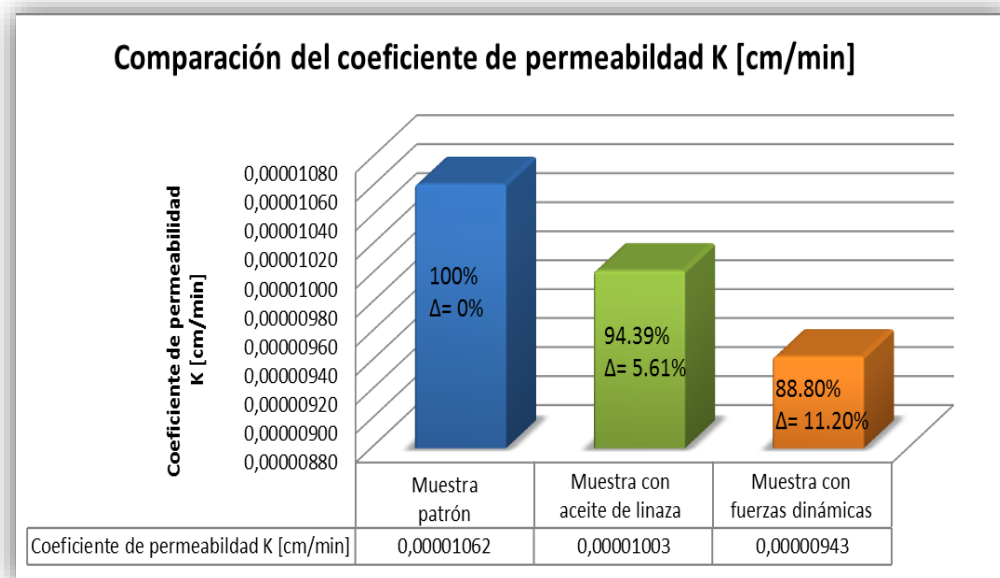
Por otra parte también se realizó ensayos de permeabilidad cuando a una muestra de suelo-cemento se le aplica fuerzas dinámicas externas, para ello se aplicó una energía específica de 6.03 Kg*cm/cm^3 tal como se realiza en el ensayo de proctor T99, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 27. Resultados del ensayo de permeabilidad para la muestra a la que se le aplicó fuerzas externas.

Nº Ensayo	k [cm/min]	k [cm/min]
1	0,00000948	0,00000943
2	0,00000904	
3	0,00000971	
4	0,00000956	
5	0,00000938	

Ref. Elaboración propia.

En este resultado se puede observar que el coeficiente de permeabilidad tiene una importante reducción, por ello es necesario realizar una comparación porcentual entre este último resultado y los resultados mencionados anteriormente, para ello nos apoyamos en la siguiente gráfica:



Gráfica de comparación porcentual entre los ensayos de permeabilidad realizados.
Ref. Elaboración propia.

La primera columna pertenece a la muestra patrón de dosificación 1:10 a la cual se le ha asignado el 100% como base de referencia, la siguiente columna pertenece a una muestra de suelo-cemento a la que se ha añadido aceite de linaza doblemente cocido, presentando una reducción del coeficiente de permeabilidad en un 5.61% en comparación con la muestra patrón. La tercera columna perteneciente a una muestra de suelo cemento a la que se ha aplicado fuerzas dinámicas externas, presenta una reducción en el coeficiente de permeabilidad en un 11.20% en comparación con la muestra patrón.

Como conclusión final se puede decir que la aplicación de fuerzas externas es mucho más eficaz para poder reducir la permeabilidad en el suelo-cemento que cuando se utiliza aceite de linaza doblemente cocido.

3.9.4. Ensayo de incremento de resistencia a compresión mediante la aplicación de Fuerzas dinámicas.-

Una vez concluido el ensayo se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 28. Resultados del ensayo de compresión.

Ensayo	N° de golpes	Energía específica Kg*cm/cm ³	Resistencia a la compresión Kg/cm ²
PP	0	0,00	56,00
P1	8	2,01	56,84
P2	16	4,02	60,90
P3	24	6,03	67,19
P4	32	8,04	73,49

Ref. Elaboración propia.

Donde:

PP: Probeta Patrón, (Energía de compactación = 0).

P1: Probeta del ensayo 1, (Energía de compactación = 2.01 Kg*cm/cm³).

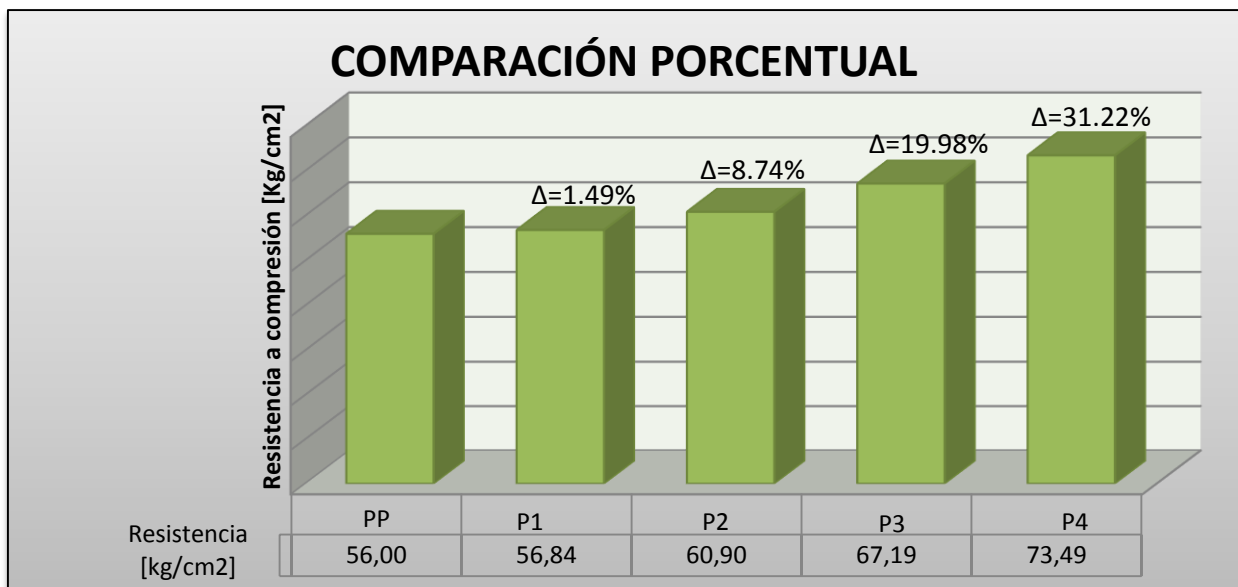
P2: Probeta del ensayo 2, (Energía de compactación = 4.02 Kg*cm/cm³).

P3: Probeta del ensayo 3, (Energía de compactación = 6.03 Kg*cm/cm³).

P4: Probeta del ensayo 4, (Energía de compactación = 8.04 Kg*cm/cm³).

Con estos resultados se puede decir que efectivamente se cumple la hipótesis planteada, sobre el incremento de la resistencia a compresión cuando se aplican fuerzas dinámicas son externas, ya que se puede ver claramente en la primera fila de los resultados, (PP) ensayo que corresponde a la muestra patrón, que es tomada como referencia y base de comparación, esta muestra sólo tiene aplicada fuerza estática que se utilizó para el acomodo de sus partículas en el momento de su vaciado, al finalizar el ensayo se obtuvo que esta probeta patrón llegó a una resistencia a la compresión promedio de 56 Kg/cm². Posteriormente los siguientes ensayos (P1, P2, P3 y P4) son ensayos a los que se les ha aplicado energía específica, donde sus resultados referentes a la resistencia a compresión efectivamente son mayores a los 56 Kg/cm² que resiste la muestra patrón, incluso se puede apreciar que conforme se va aumentando la energía específica aplicada la resistencia a compresión del suelo-cemento también presenta un incremento en cada ensayo.

Para poder apreciar mejor el incremento mencionado en la resistencia a compresión del suelo-cemento se preparó una gráfica en la que se puede apreciar claramente los porcentajes en los que la resistencia compresión incrementa con respecto a la resistencia a compresión obtenida en la muestra patrón:



Gráfica de comparación porcentual del incremento de la resistencia a compresión.
Ref. Elaboración propia.

Donde:

PP: Probeta Patrón, (Energía de compactación = 0).

P1: Probeta del ensayo 1 (Energía de compactación = 2.01 Kg*cm/cm³).

P2: Probeta del ensayo 2 (Energía de compactación = 4.02 Kg*cm/cm³).

P3: Probeta del ensayo 3 (Energía de compactación = 6.03 Kg*cm/cm³).

P4: Probeta del ensayo 4 (Energía de compactación = 8.04 Kg*cm/cm³).

La primera columna, perteneciente a la muestra patrón, es tomada como base y referencia de comparación con respecto a los posteriores ensayos realizados de compactación en los que se ha aplicado energía específica. La segunda columna pertenece a una mezcla de suelo-cemento de dosificación 1:10 a la que se ha dejado caer un pisón en una cantidad de 8 veces produciendo una energía de compactación de 2.01 Kg*cm/cm³, donde se obtuvo un incremento de en la resistencia a compresión de 1.49%, este incremento no es muy significativo, incluso sus resultados se encuentran dentro del rango de la resistencia que ofrece la muestra patrón. La tercera columna pertenece a una mezcla de suelo-cemento de dosificación 1:10 a la que se ha dejado caer un pisón en una cantidad de 16 veces produciendo una energía de compactación de 4.02 Kg*cm/cm³, donde se obtuvo un incremento de en la resistencia a compresión de 8.74%, este incremento es mucho más significativo que el anterior, pero aun así sigue siendo un resultado bajo como para aplicarlo en la elaboración de elementos de suelo-cemento que requieran mayor resistencia. La cuarta columna pertenece a una mezcla de suelo-cemento de dosificación 1:10 a la que se ha dejado caer un pisón en una cantidad de 24 veces produciendo una energía de compactación de 6.03 Kg*cm/cm³, ésta es la energía que se utiliza en la realización del ensayo de compactación según el proctor T99, en este punto del ensayo se obtuvo un incremento de en la resistencia a compresión de 19.98%, este incremento es realmente significativo, tanto así que este resultado puede ser aplicado en la elaboración de elementos de suelo-cemento que requieran mayor resistencia, como por ejemplo cimientos para casas económicas de dos pisos. La última columna pertenece a una mezcla de suelo-cemento de dosificación 1:10 a

la que se ha dejado caer un pisón en una cantidad de 32 veces produciendo una energía de compactación de 8.04 Kg*cm/cm^3 , en éste último punto del ensayo se obtuvo un gran incremento de en la resistencia a compresión, tal así que se pudo llegar a un incremento del 31.22%, este es el incremento esperado, ya que se pudo verificar la hipótesis planteada sobre el incremento de la resistencia a compresión mediante la aplicación de fuerzas dinámicas externas.

Por otra parte se realizó algunos ensayos en los que se incorporó los aditivos utilizados en los otros ensayos (fibras de pelo de chivo y aceite de linaza doblemente cocido), para poder realizar un análisis y observar si es que estos aditivos influyen en la resistencia a compresión de la muestra de suelo-cemento que tiene aplicada la energía específica utilizada en el proctor T99. Dicho esto se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 29. Resultados del ensayo de compresión cuando a la mezcla de suelo-cemento se le añade Aceite de linaza y pelo de chivo.

Ensayo	N° de golpes	Energía específica Kg*cm/cm^3	Resistencia a la compresión Kg/cm^2
P3	24	6,03	67,19
L	24	6,03	53,38
C	24	6,03	61,77

Ref. Elaboración propia.

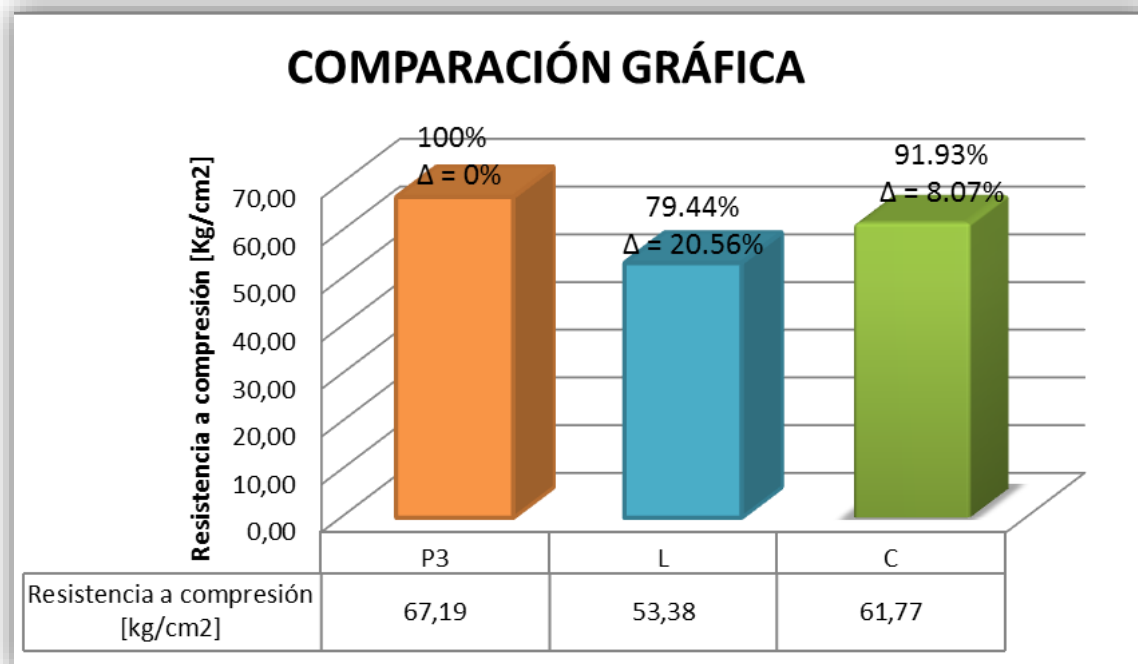
Donde:

P3: Probeta del ensayo 3 (Energía de compactación = 6.03 Kg*cm/cm^3).

L: Probeta a la que se ha añadido aceite de linaza ($A/C=0.52$ y $AL/A=0.77$).

C: Probeta a la que se ha añadido pelo de chivo (Pelo de chivo=400gr).

Se puede observar que la resistencia a compresión del suelo-cemento disminuye cuando se le incorpora algún aditivo extra a su composición básica, aunque la mayor diferencia se da cuando se añade aceite de linaza a la mezcla de suelo-cemento. Para una mejor interpretación de estos resultados se presenta la siguiente gráfica porcentual:



Gráfica de comparación porcentual de la resistencia a compresión del suelo-cemento cuando se le añaden aditivos extras a su mezcla tradicional.

Ref. Elaboración propia.

Donde:

P3: Probeta del ensayo 3 (Energía de compactación = $6.03 \text{ Kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$).

L: Probeta a la que se ha añadido aceite de linaza ($A/C=0.52$ y $AL/A=0.77$).

C: Probeta a la que se ha añadido pelo de chivo (Pelo de chivo=400gr).

Esta gráfica presenta tres columnas, que representan distintos ensayos de compactación, pero todas ellas han sido realizadas utilizando una energía de específica de $6.03 \text{ Kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$ ya que ésta es la energía que se utiliza en el proctor T99 y con esta similitud se puede realizar una comparación de los resultados. La primera columna representa la resistencia a compresión de una muestra de suelo-cemento de dosificación 1:10, ya que no tiene ningún aditivo extra en su masa se la tomará como la base y referencia de comparación. La segunda columna pertenece a la resistencia a compresión que se obtuvo de una mezcla de suelo-cemento de dosificación 1:10 a la que se ha añadido aceite de linaza doblemente cocido, en este resultado se puede apreciar que existe una disminución en la resistencia a

compresión en el suelo-cemento, por lo tanto la conclusión que se tiene para este caso es que es contraproducente el empleo de aceite de linaza doblemente cocido, ya que éste causa un efecto colateral en la resistencia del suelo-cemento produciendo la disminución de la resistencia de compresión, que es totalmente lo contrario a lo que se busca con la realización de estos ensayos. La tercera y última a columna representa la resistencia a compresión del suelo-cemento cuando a éste se le ha añadido fibras de pelo de chivo, el resultado que se puede apreciar en la gráfica es una leve disminución de la resistencia a compresión, esta disminución no es tan grave como la anterior, pero aun así se la debe tomar en cuenta ya que representa un 8.07% menos de la resistencia cuando se trabaja sin el uso de ningún aditivo, por lo que se llega a la conclusión de que el uso de aditivos extras a la mezcla de suelo-cemento causan efectos negativos a la resistencia a compresión del mismo, por lo que se debe tener sumo cuidado en su empleo ya que alteran de manera radical las características del suelo-cemento.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.-

4.1. Conclusiones.

Con la finalización de los ensayos realizados en laboratorio, se pudo evidenciar que las hipótesis planteadas anteriormente se cumplen a cabalidad, pero corresponde mencionar que en algunos ensayos no se pudo alcanzar las expectativas deseadas en un principio. A continuación se mencionan las conclusiones a las que se ha llegado luego de haber analizado los resultados de cada ensayo realizado.

Ensayo de cohesión.- Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de cohesión fueron de gran utilidad para el desarrollo de los ensayos de retracción, permeabilidad y resistencia a compresión del suelo-cemento, ya que con este ensayo se pudo determinar que la relación de agua/cemento para una muestra patrón es de 1.08 y que la relación aceite de linaza doblemente cocido/agua es de 0.77, que se utilizó en los ensayos de permeabilidad y resistencia a compresión del suelo-cemento con su respectiva relación de agua/cemento de 0.52, de tal manera que con esto se tiene el conocimiento de que cantidad de agua y aceite de linaza se debe incorporar a la mezcla para obtener una humedad óptima en la realización de cada ensayo.

Ensayo de retracción.- En el ensayo de retracción se tiene el objetivo de reducir la retracción de elementos de suelo-cemento y eliminar las fisuras provocadas por la misma retracción, con la incorporación de fibras de pelo de chivo se logra reducir hasta un 70% la retracción del suelo-cemento cuando se incorpora 40 gramos de dichas fibras en una mezcla con 100 gramos de cemento y 1000 gramos de tierra, pero también se puede observar que siguen existiendo algunas fisuras en los elementos de suelo-cemento, esto se debe a que todavía siguen existiendo pequeñas fuerzas tensionales internas provocadas por el 30% de retracción aún existente en el suelo-cemento.

Con estos resultados obtenidos del ensayo de retracción, se recomienda la incorporación de fibras de pelo de chivo en la fabricación de elementos de suelo-cemento, ya que este aditivo natural soporta un alto porcentaje de las fuerzas de tracción internas generadas por la retracción, disminuyendo las fisuras y la misma retracción del suelo-cemento.

Ensayo de permeabilidad.- En el ensayo de permeabilidad se pudo observar que la incorporación de aceite doblemente cocido a la mezcla de suelo-cemento, produce un aumento de la impermeabilidad de los elementos fabricados con suelo-cemento, donde el coeficiente de permeabilidad de la mezcla de suelo-cemento que contiene aceite de linaza reduce en un 5.61% en comparación al coeficiente de permeabilidad del suelo cemento de una muestra patrón. Pero esta disminución queda opacada con la reducción del coeficiente de permeabilidad del suelo-cemento cuando a la mezcla se aplica fuerzas dinámicas externas, ya que la compactación hizo que las partículas del suelo-cemento se acomoden de tal modo que redujeron su porosidad obteniendo así una reducción del coeficiente de permeabilidad en un 11.20%. Además se observa que la adición de aceite de linaza doblemente cocido genera una reducción de la resistencia a compresión del suelo cemento en un 20.56%. Por lo que se llega a la conclusión de que no es conveniente incluir aceite de linaza doblemente cocido a la mezcla de suelo-cemento, porque el incremento de la impermeabilidad es menor en comparación al incremento obtenido por la compactación de la mezcla, y además llega a reducir la resistencia a compresión del suelo-cemento.

Ensayo de incremento de resistencia a compresión mediante la aplicación de fuerzas dinámicas.- Este ensayo sí cumplió con todas las expectativas esperadas, ya que se obtuvo un incremento significativo en la resistencia a compresión en las probetas de suelo-cemento, llegando a un incremento de hasta 31.22% cuando se aplica una energía específica de 8.04 Kg*cm/cm^3 a la masa plástica de suelo-cemento. Así que se pudo verificar la hipótesis planteada sobre el incremento de la resistencia a compresión. Teniendo a su favor que al mismo tiempo disminuye la permeabilidad del suelo-cemento, se recomienda la aplicación de fuerzas dinámicas externas a la masa de suelo-cemento para poder mejorar sus características físicas y mecánicas.

En el mismo ensayo de compactación también se hizo ensayos de resistencia de compresión del suelo-cemento cuando a la mezcla se añade fibras de pelo de chivo, donde se puede observar que existe una disminución de la resistencia a compresión en un 8.07%, por lo que el incremento final de esta resistencia en el suelo-cemento es de un 23.15% cuando se aplica fuerzas dinámicas externas y fibras de pelo de chivo.

Al finalizar el desarrollo de los distintos ensayos se hizo un análisis económico, el cual se encuentra estructurado dentro de los anexos de la presente investigación, en él se observa que el incremento del costo de los materiales para la elaboración del suelo-cemento cuando se añade fibras de pelo de chivo es de un casi 5 por ciento, mientras que cuando se añade aceite de linaza doblemente cocido el costo prácticamente se duplica, en el caso de cuando se aplican fuerzas dinámicas a la masa del suelo-cemento no se tiene un incremento en costos de materiales sino más bien en el costo de la mano de obra. Con estos resultados queda totalmente descartada la idea de incorporar aceite de linaza para mejorar algunas características de los elementos fabricados con suelo-cemento, mientras que sí se puede dar el visto bueno de la incorporación de pelo de chivo para mejorar algunas características físicas de los elementos fabricados con suelo-cemento ya que el incremento de costo es muy bajo.

Con los resultados de esta investigación se tiene mayor información que llega a beneficiar a aquellas empresas que trabajan fabricando distintos elementos con suelo-cemento, ya que esta investigación busca el mejoramiento de las características físico-mecánicas de elementos fabricados con suelo-cemento, ahora se tiene la información de que al añadir fibras de pelo de chivo y aplicar fuerzas dinámicas externas al suelo-cemento, se llega a mejorar su características físico-mecánicas, con un incremento en el costo relativamente bajo. Además se tiene la información de que la adhesión de aceite de linaza doblemente cocido, reduce la permeabilidad del suelo-cemento en un bajo porcentaje requiriendo altas cantidades de este líquido que elevan considerablemente el costo de la fabricación, por lo que su adhesión es totalmente inviable.

4.2. Recomendaciones.

Se debe tener sumo cuidado en el momento de realizar la dosificación del suelo-cemento, ya que si utiliza dosificaciones que varíen de un ensayo a otro se obtendrán resultados que se disparan fuera de una línea de tendencia, por lo que se tendrá que eliminarlos, y al eliminarlos se tendrá menor cantidad de datos por lo que los resultados finales no serán tan confiables.

Se debe engrasar cada molde de cada ensayo (con excepción del ensayo de permeabilidad), con la finalidad de poder retirar con facilidad el suelo-cemento endurecido de dichos moldes sin tener que arruinar los mismos y proceder de una manera rápida al inicio de un siguiente ensayo.

En la realización del ensayo de permeabilidad se debe sellar correctamente el equipo de trabajo ya que si existen filtraciones de agua a través de pequeñas aberturas, los resultados del coeficiente de permeabilidad serán afectados de manera brusca de tal manera que llevará al fracaso de la realización del ensayo.

En el momento de romper las probetas se debe procurar de hacerlo en el equipo de CBR, y no así en la prensa hidráulica, ya que ésta posee una gran carga que no permite apreciar el momento de la rotura de las probetas, mientras que en el equipo de CBR la rotura ocurre de manera lenta de tal manera que se puede observar el momento justo de la rotura de la probeta.

Se debe realizar una buena programación del cronograma para la realización de cada ensayo ya que es primordial una buena administración del tiempo para la culminación a tiempo del proyecto.