

Capítulo I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

CAPÍTULO 1

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1 Introducción

Los suelos, en muchas ocasiones no presentan las mejores características para ser usados en los diferentes proyectos de ingeniería, ya que presentan una resistencia deficiente, sufren deformaciones, desgastes y al largo plazo se deterioran de manera negativa a causa de los agentes atmosféricos. De acuerdo a esto, se hace necesario realizar ciertas adecuaciones o procesos que permitan mejorar estas características para volver los suelos aptos para su uso y así, evitar transporte de material adicional que aumenta los costos de las obras y el daño ambiental producto de la explotación de este. Estos procesos constan de cierta manipulación o tratamiento que permiten sacar el máximo provecho de las cualidades del suelo de interés, obteniendo superficies más estables, firmes y capaces de soportar las condiciones más críticas ya sea de tránsito o climáticas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo de investigación está encaminado a analizar el comportamiento de los suelos coluviales existentes en nuestro medio alterando su composición natural con otro material en este caso en particular con asfalto en condición de espuma, mediante la aplicación del concepto de la estabilización de suelos, que se define como todo aquel proceso que mejora sustancialmente propiedades tales como estabilidad, durabilidad, resistencia y plasticidad. Cabe resaltar que existen varios tipos de estabilización, como lo son de tipo física donde se mezcla y compactan suelos de granulometría variada para generar cohesión entre partículas, y de tipo química, la cual, cambia la estructura interna de los suelos a través de la adición de materiales o sustancias mediante intercambios moleculares generando reacciones químicas; algunos materiales usados para este tipo de estabilización son productos asfálticos, cloruros, polímeros, y para la presente investigación, se utilizara el asfalto en condición de espuma en diferentes dosificaciones para obtener la que mejor características brinde al suelo en estudio.

Cabe aclarar que este proyecto quiere dar una visión general de cómo se podría estabilizar un suelo mediante toda la investigación teórica que ello implica para finalmente obtener, a través de varios ensayos, con variaciones de temperaturas y porcentajes de agua, un

porcentaje de asfalto espumado óptimo, que brinde las mejores características mecánicas al suelo en estudio.

Este trabajo corresponde al análisis de la influencia que tendrá el asfalto espumado al mezclar con un suelo coluvial tomando como referencia las propiedades mecánicas del suelo como ser la resistencia cortante del suelo en estado natural y de la mezcla suelo-asfalto espumado.

El asfalto espumado puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales que van desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y también en materiales asfáltico reciclados. Las mezclas con asfalto espumado pueden ser confeccionadas tanto en terreno como en planta.

1.2 Justificación

Los suelos de manera general tienden a ser no aptas para la construcción por lo tanto estos antes de su aplicación en las diferentes obras civiles, se deben someter a varios procesos para verificar su calidad, siendo esta de baja calidad se tendrá que usar diferentes métodos y materiales para mejora sus características y propiedades.

Lamentablemente en nuestro país y especialmente en nuestra región, hay muy poca experiencia con la técnica de estabilización de suelos. Sin embargo, este inconveniente se constituye una razón más para fomentar a la investigación y aplicación del tema, pues las condiciones están dadas en la región ya que por un lado posee el suelo de las características para estabilizar y el cemento asfáltico que se utilizaría en proporciones pequeñas. Estas condiciones prescritas, dan una percepción favorable para la aplicación exitosa de este sistema de mejoramiento de suelos en el valle central de Tarija.

Los análisis para evaluar las propiedades de los suelos estabilizados se pueden hacer mediante diferentes métodos ya sea a través del CBR, corte directo, triaxial, pero para este trabajo se empleará el método por compresión no confinada según la norma ASTM D-2166 para determinar el esfuerzo cortante del suelo, y haciendo un análisis de cómo influye el asfalto espumado en el suelo realizando diferentes mezclas con varios porcentajes de asfalto espumado para así obtener un porcentaje óptimo de estabilización.

1.2.1 Aporte académico

El ensayo de compresión inconfiada nos ayuda a obtener los parámetros de un suelo de manera aproximada y rápida, dentro de su procedimiento este consiste en ensayar moldes a compresión bajo carga y velocidad controlada, dichos moldes pueden ser muestras intactas, muestras remoldadas y muestras reconstituidas, estos moldes tienen dimensiones pequeñas, para el caso de las muestras remoldadas se utiliza el aparato de compactación mini Harvard y la particularidad de este equipo es que se puede simular la compactación real in-situ ya que la energía de compactación que se aplica es por presión y no por caída libre como es el caso del ensayo de próctor teniendo así una simulación casi real al que se compacta por ejemplo con un rodillo.

1.2.2 Aplicación técnica – práctica

El mejoramiento de los suelos es un tema que abarca grandes necesidades ya que mucho depende de la calidad de suelo la base de una edificación, dando la importancia única para someter los suelos a diferentes procesos para adquirir propiedades que favorezcan a la construcción, aplicando por ejemplo a obras de infraestructura vial en la composición de sus capas, proponiendo así como material estabilizante el asfalto espumado para generar suelos de calidad que estén dentro del rango de aceptación de materiales para su construcción, tanto en materiales para la sub-rasante o para una capa base.

1.2.3 Importancia social

La importancia de los suelos es fundamental ya que sobre este se realizan todo tipo de edificaciones, partiendo de lo mencionado anteriormente es importante tomar en cuenta que la extracción de suelos debe ser moderada para evitar futuras catástrofes naturales, por lo tanto se realizan estudio de los diferentes bancos de préstamo de materiales para evaluar la calidad de suelos y en base a los resultados someter los suelos a procesos físicos, químicos o mecánicos para obtener materiales acorde a las necesidades requeridas para el constructor y así evitar la explotación en exceso de los bancos de préstamo de materiales.

1.3 Planteamiento del problema

1.3.1 Situación problemática

El estudio de los suelos juega un papel muy importante dentro de la construcción ya que el mejoramiento del suelo significa proporcionar confianza y garantizar la base de una construcción, y esta se refiere a la calidad de los suelos in-situ, pues se debe garantizar su durabilidad, resistencia, manejabilidad y economía. De acuerdo a esto, en la mayoría de ocasiones los suelos no presentan las mejores características para su uso, por lo que se hace necesario contar con ciertos materiales y procesos que mejoren las características de estos y así obtener parámetros adecuados para ser usados.

Con el antecedente mencionado anteriormente, no cabe duda que uno de los grandes problemas para el ingeniero civil ha sido siempre el material arcilloso o cohesivo, debido a sus propiedades particulares que afectan en forma desfavorable en una obra específica. Sin embargo, para poder resolver los inconvenientes que acarean estos suelos, el presente trabajo de investigación pretende proponer e impulsar una alternativa más de solución, la misma que consiste en el uso del asfalto espumado como un agente estabilizador de los suelos cohesivos.

El interés de mejorar la calidad de los suelos dentro de la construcción parte principalmente por la seguridad de la obra, teniendo en cuenta que es la base de toda fundación, y también por la economía ya que si no se cuenta con bancos que proporcionen materiales de calidad se debería optar por adquirir materiales de otros bancos y esto implica un costo económico para la empresa que la requiera, es por tal razón que se realizan estudios para mejorar la calidad de los suelos que se encuentran a disposición del constructor.

Sabemos que existen diferentes procesos y/o materiales para la estabilización de suelos, sin embargo, el asfalto espumado como material estabilizante en base a su aplicación debe ser basados mediante normas o experiencias realizadas en otros proyectos ya que en nuestro medio aún no contamos con una norma que rijan la utilización del asfalto espumado para que esta tenga un efecto aceptable en el momento de la aplicación en este trabajo,

1.3.2 Delimitación del tiempo

Durante el proceso de estabilización de un suelo se pretende mejorar utilizando el asfalto

espumado como aditivo, añadiendo varios porcentajes para el mejoramiento de un suelo en base al concepto de estabilización, al añadir el asfalto espumado en diferentes porcentajes se analizará la variación del esfuerzo cortante.

En la actualidad los diferentes tipos de estabilización han tenido una aceptación dentro del campo de la ingeniería, para este trabajo se plantea un nuevo elemento de estabilización que consiste en el asfalto espumado la cual se espera que sea otra alternativa más para el mejoramiento de un suelo.

1.3.3 Delimitación del espacio

Área de trabajo: la caracterización de los materiales tanto de las muestras de suelo como del asfalto y la determinación del esfuerzo cortante a analizar se realizará en los laboratorios de asfaltos y suelos de la carrera de ingeniería civil.

1.3.4 Formulación del problema

¿De qué manera influirá en la resistencia cortante de un suelo de origen coluvial la implementación de asfalto espumado?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la influencia del asfalto espumado en suelos de origen coluvial mediante el ensayo de compresión inconfiada con la finalidad de determinar el contenido óptimo de asfalto espumado, que mejore la resistencia cortante del suelo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar los conceptos y procedimientos de la estabilización de un suelo con la adición del asfalto espumado.
- Caracterizar las muestras de suelo mediante ensayos de laboratorio.
- Determinar las propiedades del cemento asfáltico mediante ensayos de laboratorio.
- Determinar las propiedades del asfalto espumado (expansión y vida media), con diferentes variaciones de temperaturas y contenidos de agua.

- Obtener el contenido de agua óptimo para el asfalto espumado mediante el análisis de sus propiedades.
- Obtener el porcentaje de asfalto espumado óptimo que mejore el esfuerzo cortante del suelo.
- Analizar la consistencia de los resultados obtenidos en el proceso de estabilización a través de la compresión inconfínada con respecto al material sin estabilizar.

1.5 Alcance

El presente trabajo de investigación “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ASFALTO ESPUMADO EN LA RESISTENCIA CORTANTE MEDIANTE LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE SUELOS COLUVIALES”, se enmarca en una investigación de tipo explicativo o causal y diseño experimental.

Con este trabajo se pretende explicar lo que sucedería con el valor del esfuerzo cortante determinado mediante el ensayo de compresión inconfínada en un suelo arcilloso antes y después de ser sometido a una estabilización con asfalto espumado. Para esto primeramente se obtendrá las propiedades del asfalto espumado como tal realizando pruebas con variaciones de temperatura y porcentaje de agua para obtener resultados que garanticen la estabilización y posteriormente se procederá a mezclar con el suelo para elaborar moldes y ensayarlas en la prensa de compresión con una carga y velocidad controlada, finalmente realizar un análisis de los resultados y sacar de estas conclusiones.

De esta manera la investigación está enfocada en un diseño experimental, debido a que la variable independiente es manipulada y la variable dependiente será sometida a la medición, para la obtención de resultados.

Por tanto, el presente trabajo de investigación será de utilidad para el mejoramiento de los suelos, ya que aportará con nuevos conocimientos al plantear al asfalto espumado como material estabilizante que será una alternativa más para el mejoramiento de los suelos.

1.6 Hipótesis

La adición de asfalto espumado a diferentes porcentajes mejora la resistencia cortante de una muestra de suelo coluvial.

1.7 Conceptualización de las variables

1.7.1 Variable independiente

Esta variable será los porcentajes de asfalto espumado añadidas a la muestra y se detalla a continuación en la tabla 1:

Tabla 1. Variable independiente

Independiente	Operacionalización			
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción técnicas a usar
Porcentaje de asfalto espumado.	Son los porcentajes de asfalto espumado añadidas al suelo con respecto a su masa.	Asfalto espumado	Porcentaje (%)	Calculada respecto del peso total de la muestra seca, se tendrá por lo menos cinco porcentajes.
		Masa del suelo	Gramos (gr)	Preparación previa de la muestra según normativa.
		Mezcla de suelo - asfalto espumado	Gramos (gr)	Se tendrá al menos tres especímenes por cada porcentaje.

Fuente: Elaboración propia

1.7.2 Variable dependiente

Esta variable será la resistencia cortante del suelo coluvial y se detalla a continuación en la tabla 2:

Tabla 2. Variable dependiente

Dependiente	Operacionalización			
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción técnicas a usar
Resistencia cortante	Será la comparación de los valores obtenidos de la mezcla suelo-asfalto espumado con relación al suelo natural.	Humedad óptima	Porcentaje (%)	Valor determinado de la curva de compactación de la muestra.
		Densidad máxima	(g/cm ³)	Valor determinado de la curva de compactación de la muestra.
		Procedimiento del ensayo de compresión inconfina	Datos durante el proceso	Acciones coordinadas según la normativa.
		Rotura de moldes a compresión inconfina	(kg/cm ²)	Ensayar los moldes en la prensa de compresión inconfina con carga y velocidad controlada.
		Resultados y gráficas	Informe final	Proceso de cálculo normados.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Suelo

El suelo se define como una mezcla de varios minerales meteorizados y de materia orgánica en descomposición, se encuentra en una capa delgada que cubre la tierra y contiene grandes cantidades de agua y aire que sirven de sustento y soportes a las plantas y demás organismos.

Desde la perspectiva de la ingeniería civil, el suelo se define como un material no consolidado compuesto por partículas líquidas, sólidas y vacíos que ocupan espacio entre ellas. También, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil (figura 1) y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por esto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades de los suelos, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más. (Braja M., 1999, pág. 1)

Figura 1. Utilización del suelo en la construcción de carreteras



Fuente: <https://www.maccaferri.com/br/es/soluciones/terraplenes-sobre-suelos-blandos/>

2.1.2 Depósitos coluviales

Están formados por fragmentos de roca desordenados, desprendidos de las alturas y depositados pendiente abajo, la mayoría de las veces por acción de la gravedad, aunque en algunos casos estos desprendimientos están ayudados por la acción del agua. Se observan en regiones montañosas o pedemontanas con pendientes pronunciadas (Figura 2). Una película muy delgada de agua corriente en la superficie de las pendientes, aún pequeñas, puede desplazar fragmentos de rocas y partículas más finas. Este transporte se hace en distancias muy cortas. El desplazamiento vertical es importante en relación al horizontal. Los tipos de movimientos que se producen son: deslizamientos, derrumbes, avalanchas, flujos de barro y hundimientos, entre otros. (Sanzano, 2019, págs. 6-7)

Figura 2. Depósito coluvial en zona montañosa



Fuente: El transporte y el depósito del material

Los materiales coluviales son frecuentemente gruesos y pedregosos porque la meteorización física ha sido dominante sobre la química. Piedras, gravas y materiales finos están entremezclados (no en capas ver figura 3) y los fragmentos gruesos son más bien angulares. Los espacios creados cuando las rocas caen y se apoyan entre sí ayudan a explicar el fácil drenaje de muchos depósitos coluviales y también su tendencia a ser inestables y propensos a derrumbes y deslizamientos de tierra, especialmente si son perturbados por excavaciones. (Sanzano, 2019, pág. 7)

Figura 3. Depósito coluvial en ladera



Fuente: <https://www.blodiversidadvirtul.org>

2.1.3 Estabilización de suelos

Concepto por el cual se aplican una serie de métodos físicos y químicos para permitir el mejoramiento de una muestra de suelo y así lograr el uso adecuado de este. En el contexto de vías, la estabilización incluye aquellos métodos que permitan mejorar suelos para proporcionar o generar capas que sirvan a una estructura de pavimento, como pueden ser bases, capas de rodadura, sub bases y sub rasantes, llevándolas a condiciones óptimas de humedad y densidad que provean mejores propiedades en cuanto a durabilidad, economía y resistencia. (Gómez Parra, 2018, pág. 20)

Y como se menciona en el artículo “Soil Stabilization: materials, properties and techniques”, o “Estabilización de suelos: materiales, propiedades y técnicas”, la decisión de estabilizar la mezcla de suelo se debe tomar al tener en cuenta las siguientes ventajas y desventajas: (Gómez Parra, 2018, pág. 20)

- Acelerar el proceso de construcción ya que el espesor de pared requerido es generalmente mucho menor y se requiere menos material y mano de obra.
- Mejora significativa de la durabilidad y la resistencia, particularmente cuando el suelo disponible localmente es pobre.
- Puede reducir o eliminar la necesidad de costosos tratamientos superficiales o representación.

- Los costos de las materias primas aumentan: el suelo es gratis / de bajo costo y el cemento es relativamente caro.
- Los materiales de estabilización necesarios pueden no estar fácilmente disponibles en algunos o puede ser costoso de transportar.

2.1.3.1 Propiedades de los suelos estabilizados

Los suelos que se desean estabilizar deben tener ciertas propiedades físicas previamente establecidas para lograr un buen resultado a la hora de obtener una mejora en sus propiedades, estas son:

Resistencia: Es una propiedad que se hace necesaria aumentar para lograr mayor cohesión entre las partículas del suelo, con la adición de cementantes o la compactación de tipo mecánica, vibratoria, por carga o estabilización química (cal), para evitar asentamientos. En el caso de suelos cohesivos (arcillas), se aumenta la resistencia evitando la entrada de humedad en las partículas con la adición de cementantes que, modifiquen la película de agua entre granos o partículas. (Gómez Parra, 2018, pág. 21)

Compresibilidad: Se debe tener especial cuidado con esta propiedad pues si no es controlada genera otros daños en el suelo que hacen que no sea apto para el uso; esto quiere decir que las fuerzas entre partículas son débiles lo que provoca desplazamientos o expansiones, esta propiedad se mejora cementando los granos con material rígido para rellenar poros. (Gómez Parra, 2018, pág. 21)

Permeabilidad: La permeabilidad se define como la propiedad que tienen los suelos de permitir el paso de un fluido a través de ellos, sin alterar las propiedades existentes. Teniendo en cuenta esto, es importante que el agua circundante tenga un buen medio filtrante para evitar problemas de bombeo y en general dañar el comportamiento del suelo, para esto, se puede adicionar un material impermeable o crear estructuras conglomeradas. (Gómez Parra, 2018, pág. 22)

Retracción y expansión: Estas dos propiedades se deben tener en cuenta ya que se producen por los cambios de humedad en el suelo, por lo que es importante adicionar un

mineral arcilloso que pueda mantener la humedad, así como también cementantes que restrinjan la humedad. (Gómez Parra, 2018, pág. 23)

Durabilidad: Propiedad de los suelos que se refiere a la resistencia que tenga a procesos de erosión o absorción de cargas por tráfico. En vías, para evitar problemas de durabilidad, se deben construir las diferentes capas con sus respectivos espesores para evitar que se afecten tanto los materiales naturales como los estabilizados. (Gómez Parra, 2018, pág. 23)

2.1.4 El asfalto

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución (Figura 4). El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar el asfalto. Procesos similares producidos naturalmente han dado lugar a yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los materiales se encuentran prácticamente libre de materias extrañas, mientras que, en otros está mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias. Las rocas porosas saturadas de asfalto que se encuentran en algunos yacimientos naturales se conocen con el nombre de rocas asfálticas. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 21)

Figura 4. Muestra de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

2.1.4.1 Propiedades

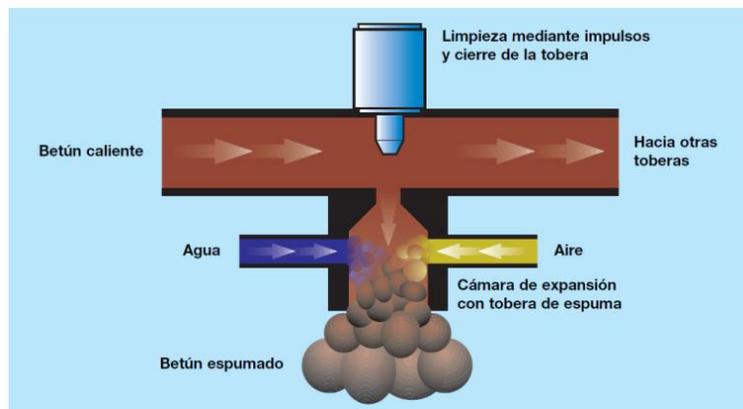
El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica

que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperatura atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 22)

2.1.5 Asfalto espumado

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160° C - 180° C), dentro de una cámara de expansión (Figura 5), generando espontáneamente espuma. El proceso de expansión se puede explicar de la siguiente manera: en el momento en que las gotas de agua fría toman contacto con el asfalto caliente, se produce un intercambio de energía entre el asfalto y las gotas de agua, lo que eleva la temperatura del agua hasta los 100°C.

Figura 5. Proceso de espumado del asfalto dentro de la cámara de expansión



Fuente: Wirgen 2012

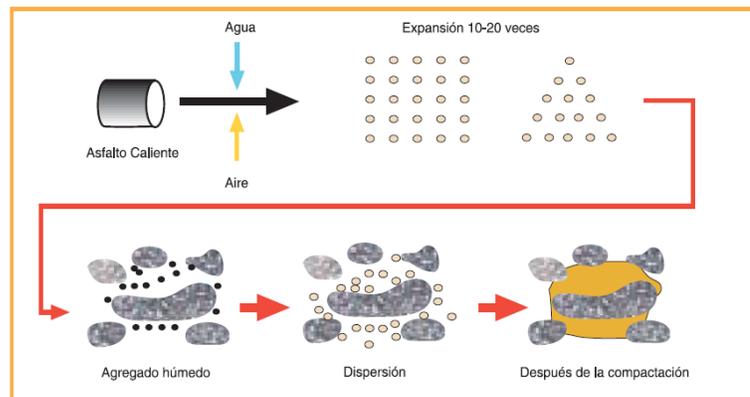
Esta transferencia energética genera, en forma instantánea, vapor y una expansión explosiva del asfalto. Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en el asfalto dentro de la cámara de expansión. El asfalto, junto con el vapor de agua encapsulado, es liberado desde la cámara a través de una válvula (dispositivo rociador) y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto contenidas por la tensión superficial de éste, hasta alcanzar un estado de equilibrio. (Jamet A. & A, 2002, pág. 26)

Debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua, las burbujas pueden mantener el equilibrio por pocos segundos (10-30 segundos).

Este proceso ocurre para una gran cantidad de burbujas. A medida que la espuma se enfría a temperatura ambiente, el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma. (Jamet A. & A, 2002, pág. 26)

La desintegración de la burbuja (o colapso de la espuma) produce miles de gotitas de asfalto, las cuales al unirse recuperan su volumen inicial sin alterar significativamente las propiedades reológicas originales del asfalto. Para la producción de mezclas con asfalto espumado, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075 mm), produciendo una mezcla de asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto (Figura 6). Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas. (Jamet A. & A, 2002, pág. 26)

Figura 6. Proceso de mezcla con los agregados



Fuente: Revista: Asfalto espumado tecnología y aplicaciones

2.1.5.1 Caracterización del asfalto espumado

El asfalto espumado se caracteriza en función de dos propiedades empíricas:

2.1.5.1.1 Razón de expansión (Ex)

Es la razón entre el volumen de asfalto espumado y el volumen de asfalto original. La razón de expansión indica la trabajabilidad de la espuma, y su capacidad de cubrimiento y mezclado con los agregados. (Jamet A. & A, 2002, pág. 27)

2.1.5.1.2 Vida media (T 1/2)

Es el tiempo, en segundos, que tarda el asfalto en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y entrega una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma. (Jamet A. & A, 2002, pág. 27)

2.1.5.2 Usos del asfalto dentro de la estabilización de suelos

Con la adición de productos bituminosos se busca disminuir la absorción de agua y sus efectos posteriores, lográndose muros durables, sin revestimiento y de mejor apariencia.

Figura 7. Proceso de estabilización y mezclado con asfalto espumado de una carretera



Fuente: Wirgen 2012

2.1.6 Materiales estabilizados con asfalto

Los materiales estabilizados con asfalto, son materiales tratados con emulsión asfáltica o asfalto espumado. Son generalmente materiales granulares, materiales tratados previamente con cemento, mezclas asfálticas recuperadas (RAP) e inclusive pavimento recuperado que incluya capas subyacentes y/o materiales tratados para formar una nueva base o sub-base (figura 7). (Calerón A., 2020, pág. 5)

La incorporación de asfalto en la mezcla aumenta la resistencia al corte y disminuye la susceptibilidad al daño por humedad, como producto de la dispersión del asfalto en las partículas más finas del agregado. Cuando se utilizan las emulsiones asfálticas, estas se dispersan preferentemente entre las partículas más finas, pero no exclusivamente, ya que algunas partículas gruesas son parcialmente recubiertas. Sin embargo, cuando se emplea

asfalto espumado, este se dispersa exclusivamente entre las partículas más finas, produciendo “puntos de soldadura” entre el mastico de las gotas de asfalto y las partículas finas de agregado (Asphalt Academy, 2009), en la Figura 8 se puede observar la diferencia en apariencia de este tipo de estabilizaciones. (Calerón A., 2020, pág. 5)

Figura 8. Material estabilizado con emulsión asfáltica (izquierda), material estabilizado con asfalto espumado (derecha)



Fuente: Daniela Martínez Ortiz. 2019.

2.1.7 Historia del asfalto espumado

Probablemente sea verdad decir que el asfalto espumado no es un invento. Cualquier asfalto caliente en contacto con el agua, formará espuma y su volumen aumentará rápidamente. Para muchos, esta situación no es deseada y en tales casos se utilizan agentes anti-espumantes (siliconas), para prevenir que esto ocurra. (Jamet A. & A, 2002, pág. 26)

No obstante, en 1956, el Dr. Ladis H. Csanyi, profesor de la Estación Experimental de Ingeniería de la Universidad del Estado de Iowa, USA, vio la posibilidad de usar el asfalto espumado (o espuma de asfalto) en la estabilización de suelos. Espumar el asfalto reduce su viscosidad considerablemente y aumenta sus propiedades adherentes haciéndolo apto para mezclar con agregados fríos y húmedos. (Jamet A. & A, 2002, pág. 26)

Ninguna reacción química está involucrada; únicamente las propiedades físicas del asfalto son temporaria mente alteradas. Cuando el agua fría entra en contacto con el asfalto caliente, se convierte en vapor, el cual es atrapado por miles de diminutas burbujas de asfalto.

Sin embargo, este no es un estado permanente: después de algunos minutos, el asfalto retoma sus propiedades originales. El asfalto espumado se caracteriza en términos de

relación de expansión de escasa vida. La relación de expansión de una espuma se define como la relación entre el máximo volumen alcanzado por la espuma contra su volumen original. El período (o intervalo de tiempo) es el lapso transcurrido desde el momento que la espuma alcanza su máximo volumen contra el tiempo en que baja a la mitad de ese volumen. (Jamet A. & A, 2002, pág. 27)

El primer informe sobre el use del asfalto espumado es de 1957 en un camino de Iowa. Varias otras aplicaciones de campo incluyeron proyectos en Arizona (1960) y en Nipawin, Canadá (1960-62). Cabe mencionar que el proyecto original consistió en inyectar vapor a alta presión, con temperatura y presión controladas, sobre un cemento asfáltico calentado. Esto requería un equipo especial en el lugar de trabajo, tal como una caldera, lo que no resultaba muy práctico. (Jamet A. & A, 2002, pág. 27)

En 1968, Mobil oil Australia modificó el procedimiento original, agregando agua fría en lugar de vapor, en una corriente de asfalto caliente con un sistema de baja presión. Esto hizo el proceso mucho más práctico y económico. La espuma se formaba dentro de una cámara de expansión luego de lo cual era dispersada a través de una serie de picos sobre el conjunto de los agregados. Sin embargo, los picos eran propensos a obstruirse y el fabricante no pudo controlar las características de la espuma. (Jamet A. & A, 2002, pág. 27)

El primer investigador en detectar la potencialidad del uso del asfalto espumado en mezclas asfálticas fue el Profesor Ladis Csanyi, en la estación experimental de ingeniería de la Universidad estatal de IOWA en 1956, donde se utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma. Los primeros reportes de aplicaciones de asfalto espumado datan del año 1957 y corresponden a aplicaciones realizadas en una carretera estatal de Iowa (USA). En años posteriores se reportan varias otras aplicaciones, entre otras: Arizona (USA) en 1960 y en Nipawin (Canadá) en 1962. (Jamet A. & A, 2002, pág. 28)

Esta tecnología fue posteriormente mejorada por la organización Mobil Oil en 1968, al adquirir los derechos de la patente de invención del Profesor Ladis Csanyi y desarrollar la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso. (Jamet A. & A, 2002, pág. 28)

2.2 Marco normativo

Para la determinación de las propiedades y características de los materiales a usar en el presente trabajo se mencionan los siguientes ensayos (ver tabla 3) en base a normas establecidas (ASTM, AASHTO, ABC) para la construcción de caminos.

Tabla 3. Tabla normativa para ensayos de caracterización de suelos

Parámetro	Norma
Análisis granulométrico método lavado	ASTM D-4222 y AASHTO T-88
Determinación del límite líquido de los suelos	ASTM D-318 y AASHTO T-89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D-4318 y AASHTO 90
Compactación Proctor modificado	ASTM D-1557 y AASHTO T-180
Compresión inconfínada	ASTM D-2166

Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Ensayos para la caracterización de la muestra de suelo

2.2.1.1 Granulometría

Dentro del análisis de los suelos, se encuentran el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución de los tamaños de partículas que conforma un suelo. Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

Para determinar la distribución granulométrica se escoge una muestra representativa por método de cuarteo.

El tamaño de dicha muestra deberá ser suficiente para efectuar el ensayo de análisis granulométrico del material retenido en el tamiz de 2 mm (No.10) y suministrar una cantidad adecuada de material que pasa el tamiz de 425 μm (No.40) para los ensayos de las constantes del suelo. (Calderón U. A., 2011, pág. 29)

Las cantidades de material para los ensayos individuales son las siguientes: -

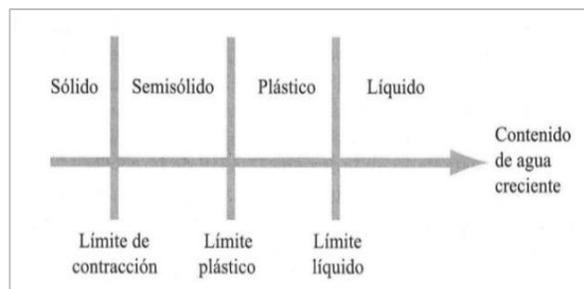
Análisis granulométrico del material retenido en el tamiz de 2.0 mm (No.10)

Suelos con gravas	4000 a 10.000 g
Suelos arenosos	1500g
Suelo limoso o arcilloso	400g

2.2.1.2 Límites de A. Atterberg

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite pastico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido (figura 9). Estos límites se conocen también como límites de Atterberg. (Braja M., 1999, pág. 27)

Figura 9. Límites de Atterberg



Fuente: Braja M. Das, 1999

Límite líquido (LL)

Es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado. (...) Por consiguiente, el límite líquido de un suelo de grano fino da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente de 25g/cm^2 ($\approx 2.5\text{ kN/m}^2$) (Braja M., 1999, pág. 28)

Límite plástico (LP)

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. (Braja M., 1999, pág. 29)

Índice de plasticidad (IP)

El índice de plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. (Braja M., 1999, pág. 30)

El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo, es decir:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

El procedimiento para la prueba del límite plástico se da en la prueba D-4318 de la ASTM. (Braja M., 1999, pág. 29)

2.2.1.3 Clasificación de la muestra de suelo

El requerimiento de parámetros de diseño correspondientes a las características del suelo, determina que la clasificación de suelos se realice por el Método AASHTO (M 145), principalmente con el fin de obtener el índice de grupo (tabla 3).

Los índices de grupo de los materiales granulares están comprendidos entre 0 y 4, los correspondientes a suelos limosos entre 8 y 12, y los correspondientes a suelos arcillosos entre 11 y 20 ó un número mayor.

El índice de grupo debe ser escrito entre paréntesis, su valor puede ser determinado mediante la fórmula siguiente:

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

Donde:

F = Porcentaje que pasa el tamiz No. 200

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

La clasificación de suelos por el método AASHTO se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de suelos método AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)						Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7
Tamizado, % que pasa										
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.
Consistencia										
Límite líquido	...	...	...	B			40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	...	B			10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas			Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno						Regular a malo			

Fuente: Guía de ensayos (U.A.J.M.S.)

2.2.1.4 Relación densidad humedad óptima

2.2.1.5 Proceso de compactación de los suelos

El suelo, como cualquier elemento natural, posee una estabilización entre los diversos factores que lo influyen. Un cambio de este equilibrio puede provocar una alteración física, química o biológica. La compactación es la principal causa de alteración del suelo. Hay dos situaciones con elevado riesgo de compactación: áreas con fuerte tránsito de vehículos y personas, y áreas cercanas a lugares en construcción. Hay suelos con una tendencia más o menos acentuada a la compactación, en función de la composición, estructura y contenido de humedad. Las constructoras a menudo trabajan con maquinarias muy pesadas, sin delimitar la zona en la que se encuentran y se plantarán árboles. Se desconoce cuál es la superficie que abarca el aparato radical, así como, se ignoran los efectos derivados de la compactación y dificultad que se encuentran para intentar resolverlo. (ASTM (American Society for testing and materials), 2003)

2.2.1.5.1 Factores que afectan la compactación

Al reducir la compresibilidad de un suelo se disminuye el volumen de vacíos, sin embargo, se entenderá que es imposible eliminarlos íntegramente por lo que la condición del suelo será de parcialmente saturado. (Fernando, 2017, pág. 13)

Los procedimientos normalizados para ensayos de Laboratorio deberán examinarse cuidadosamente para seleccionar un método que corresponda exactamente al trabajo de la maquinaria en el campo, y que además garantice que el rendimiento y eficacia sean los resultados obtenidos. (Fernando, 2017, pág. 13)

La eficiencia del trabajo de laboratorio depende de los siguientes factores:

Tipos de suelos

Cuando los suelos son finos areno-limosos el trabajo de compactación es eficaz y de rendimiento inmediato. Cuando los suelos son de tipo plástico sean limosos o arcillosos el contenido de humedad incrementa la incertidumbre del comportamiento mecánico, puesto que a menores humedades el suelo puede mantener su volumen constante (es decir en el límite de contracción), en cambio con altos contenidos de humedad las variaciones volumétricas serán en realidad muy apreciables, y pueden aparecer fenómenos de esponjamiento o expansión, totalmente perjudiciales para cualquier estructura suprayacente. (Fernando, 2017, pág. 14)

El método de compactación

El que se utilice para compactar es determinante en los resultados que se obtenga siendo así que métodos estáticos o vibratorios han dado resultados excelentes en suelos granulares, mientras que el método de amasado que en el campo es 100 % eficiente en el laboratorio se hace algo difícil de conseguir. (Fernando, 2017, pág. 14)

Contenido de humedad inicial

Este es un problema serio porque si es bien en los suelos granulares el proceso de la compactación se logra de la rama de hidratación a la de saturación lo que es lógico, en cambio en los suelos finos que son ávidos de agua el proceso se invierte, es decir toca partir de la rama de la saturación y por secado llegar a la rama de hidratación, ¿entonces el valor de la máxima densidad alcanzado y el contenido de humedad es realmente el óptimo? (Fernando, 2017, pág. 15)

La respuesta es de dudosa confirmación ya que se hace imposible reducir el contenido de humedad a una masa de suelo para que el contenido óptimo sea menor que la humedad natural.

2.2.1.5.2 Métodos de compactación

Los métodos de laboratorio consisten en compactar el suelo en tres o cinco capas dentro de un molde especificado por medio de golpes de un pisón que se deja caer desde una altura dada. (Fernando, 2017, pág. 16)

La AASHTO acogió la propuesta de Próctor y ha establecido distintos métodos para realizar los ensayos de compactación, denominados métodos estándar y métodos modificados y cada uno a su vez tiene especificaciones agrupadas en: A, B, C, y D.

Cuando se requiere menor trabajo o energía de compactación se usará el método estándar (AASHTO T-99).

Cuando se requiere mayor trabajo o energía de compactación se usará el método modificado (AASHTO T-180). Tabla 5

A continuación, se detallan los equipos y las especificaciones para cada uno de los métodos propuestos por la Asociación Americana de Vías Estatales y Transporte Oficial (AASHTO). (Fernando, 2017, pág. 16)

Tabla 5. AASHTO Modificado T – 180

AASHTO Modificado T – 180				
Martillo 10 libras		Altura de caída 18”		
Material	Pasa tamiz # 4		Pasa tamiz 3/4”	
Métodos	A	B	C	D
Molde usado	4”	6”	4”	6”
Número de capas	5	5	5	5
Número de golpes / capa	25	56	25	56
Volumen del molde sin collar (pie ³)	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
Volumen de molde sin collar (cm ³)	944	2123	944	2123
Energía de computación: lb pie / pie ³	12375	12317	12375	12375

Fuente: Carreteras, calles y aeropuertos Raúl Valle Rodas

2.2.1.6 Ensayo de compresión inconfiada

2.2.1.6.1 Alcance

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos, en condición intacta, remoldada o reconstituida, utilizando la aplicación controlada de una carga axial. El método provee un valor aproximado de la resistencia de suelos cohesivos en términos de los esfuerzos totales. Este

ensayo solamente es aplicable a materiales cohesivos tales que no habrá pérdidas de agua durante la carga. (ASTM (American Society for testing and materials), 2003, págs. 1-2)

2.2.1.6.2 Importancia y aplicación

El propósito principal de esta prueba es el obtener una medida rápida de la resistencia a la compresión para suelos que poseen una cohesión tal que permiten ser ensayados en estado inconfinado (figura 10). Muestras de suelo que posean una estructura fisurada o caras de deslizamiento, muestras de algunos tipos de loess, arcillas muy blandas, suelos secos y colapsables o muestras que contienen porciones significativas de limos o arena, o ambas (las cuales usualmente exhiben propiedades cohesivas), frecuentemente muestran resistencia al cortante cuando son ensayados con el método de prueba ASTM D 2850 (5.16). También los suelos no saturados exhiben una resistencia al corte diferente cuando son ensayados según el método de prueba ASTM D2850 (5.16). Si se realizan pruebas tanto en muestras en estado intacto como remoldado, la sensibilidad del material puede ser determinada. (ASTM (American Society for testing and materials), 2003, pág. 2)

Figura 10. Equipo de compresión inconfinado



Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Asfalto

Es un material aglomerante de color que varía de pardo oscuro a negro, de consistencia sólida, semisólida o líquida, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza como tales o se obtienen en la destilación del petróleo. El asfalto entra en proporciones variables en la constitución de la mayor parte de los crudos del petróleo.

2.2.2.1 Cemento asfáltico 85/100

El cemento asfáltico 85/100, es un material asfáltico de uso vial. Es una combinación de compuestos orgánicos e hidrocarburos de alto peso molecular (>C 25), con cierto contenido de metales como Hierro, Níquel y Vanado, así como presencia de Azufre, Oxígeno y Nitrógeno. Se obtienen a partir de un proceso de desasfaltización por Propano a partir del Destilado Pesado de Petróleo. (YPFB , 2014, págs. 1-2)

2.2.2.2 Aplicación

Se aplica por dilución al agregado para la producción de pavimentos asfálticos de uso vial, aunque su aplicación por otros métodos como emulsionado, es también viable.

Es un producto de excelentes calidades de penetración, adherencia y resistencia para climas fríos y templados. (YPFB , 2014, págs. 1-2)

2.2.2.3 Análisis

En la tabla 6 se muestran los datos de análisis típico de valores de producción, pero no constituyen una especificación. (YPFB , 2014, págs. 1-2)

Tabla 6. Datos representativos de valores de producción

Prueba	Método ASTM	Resultado	Unidad
		Asfalto 85/100	
Gravedad específica 25/25°C	ASTM D-70	1,0000 – 1,0015	-
Viscosidad a 135°C	ASTM D-2170	mínimo 170	cSt
Penetración a 25°C, 100g, 5s	ASTM D-5	85 – 100	1/10 mm
Índice de penetración (Pfeifer)	AASHTO	-2.00 - +1.00	-
Punto de inflamación	ASTM D-92	Mínimo 232	°C
Ensayo a la mancha (20% Xileno)	ASTM D-1328	Negativo	-
Solubilidad en tricloretileno	ASTM D-2042	Mínimo 99	%
Penetración retenida	ASTM D-1754	Mínimo 47	%
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min	ASTM D-113	Mínimo 75	Cm
Punto de ablandamiento	ASTM D-36	41.4 a 53.2	°C

Fuente: Ficha técnica YPFB

2.2.3 Ensayos para la determinación de las propiedades del asfalto

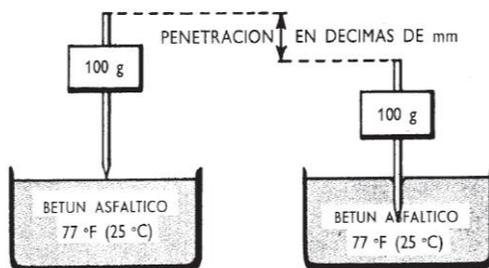
2.2.3.1 Penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100g y que la carga se aplica durante 5s (véase la figura 11). La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. La unida de penetración es la décima de milímetro. Es evidente que cuanto más blando seas el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración.

El instituto del Asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfáltico para pavimentos con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. Además, el instituto tiene especificaciones para el betún asfáltico de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industriales. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el método AASHTO T49 y en el ASTM D5. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 39)

Figura 11. Ensayo normal de penetración



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

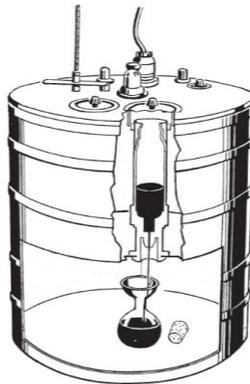
2.2.3.2 Viscosidad del asfalto

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del betún asfáltico se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol o en el ensayo de viscosidad cinemática.

En el ensayo de Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol (Figura 12). Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho con una cantidad específica del betún asfáltico. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad de los betunes asfálticos son frecuentemente superiores a los 100 °C, el baño a temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60ml del material.

Cuanto más viscoso son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. La figura 7 representa el procedimiento de ensayo. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E102. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 40)

Figura 12. Determinación de la viscosidad Saybolt-Furol.



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

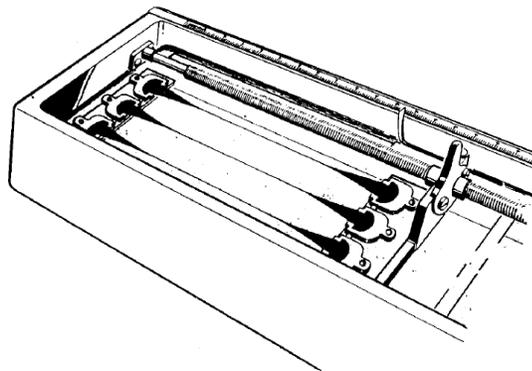
2.2.3.3 Ductilidad

La ductilidad es una característica de los betunes asfálticos importante en muchas aplicaciones. La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los betunes asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder

aglomerante, mientras que, en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

La ductilidad del betún asfáltico se mide en un ensayo de extensión del tipo representado en la figura 13. En ensayo consiste en moldear con condiciones y dimensiones normalizadas una probeta de betún asfáltico que después se somete a alargamiento con una velocidad específica hasta que el hilo que une los dos extremos rompe. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define la ductilidad. Las condiciones normalizadas para este ensayo se determinan detalladamente en los métodos AASTHO T51 y ASTM D113. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 45)

Figura 13. Ensayo de ductilidad



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

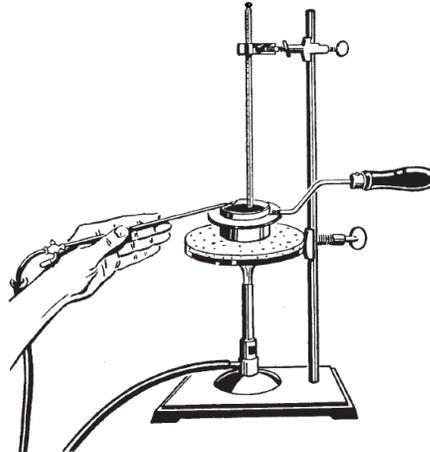
2.2.3.4 Punto de ignición

El punto de ignición o punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que se puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a la que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

El punto de ignición de un betún asfáltico se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland según condiciones normalizadas prescritas en los métodos AASTHO T48 y ASTM D92. En la figura 14 se representa esquemáticamente el ensayo. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con betún asfáltico y se calienta a una velocidad establecida. Se hace

pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llama repentina. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 47)

Figura 14. Ensayo de punto de ignición



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

2.2.3.5 Punto de ablandamiento

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos. Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos AASTHO T53 y ASTM D36. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 47)

2.3 Marco referencial

Según un trabajo de investigación realizada en la universidad autónoma Gabriel Rene Moreno de la ciudad de Santa Cruz titulada: “Comparación del ensayo de miniatura de Harvard con el ensayo Próctor T-180”, se tiene que la diferencia entre ambos métodos es mínima, es decir que si hacemos la utilización de cualquiera de estos dos métodos es viable y factible. Se menciona este artículo ya que en el presente trabajo se emplea el procedimiento del ensayo de miniatura Harvard, y que la misma no está normalizada por ninguna norma conocida en específico, ya sea la ASTM o la AASTHO, el único referencial es el nombre bajo el cual está el aparato de miniatura Harvard (Wilson 1850).

2.4 Análisis del aporte teórico

Según la bibliografía consultada, se da a conocer el origen de los suelos coluviales, su formación y en base a esos datos realizar el estudio para obtener las muestras, como también conocer los conceptos basados según la norma, como poder caracterizar el suelo y como clasificarlo para tener conocimiento del tipo de suelo con el que se trabajará.

Por otra parte, se tiene el conocimiento del uso del asfalto, sus propiedades según ensayos basados en las diferentes normas ya mencionadas, como también sus procedimientos y los diferentes parámetros de los diferentes tipos de ensayos para conocer las características del cemento asfáltico a usar en el presente trabajo. Así mismo el origen del asfalto espumado, el uso y su producción, las propiedades como ser la expansión y vida media, y el procedimiento de cómo obtener estas propiedades.

También el proceso para lo cual llegaremos a cumplir los objetivos de este trabajo, como ser la determinación de la resistencia cortante de la mezcla suelo- asfalto espumado para así conocer la influencia que tendrá este elemento como es el asfalto espumado en la mezcla.

Y en síntesis con la bibliografía consultada se podrá conocer todos los procesos de la utilización del asfalto espumado para un mejoramiento del suelo de origen coluvial basados en determinar y analizar la resistencia cortante del suelo a través del ensayo de compresión inconfiada.

Capítulo III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Criterios del diseño metodológico

3.1.1 Unidad de estudio o muestra

La unidad de estudio será el ensayo de laboratorio tanto de suelos como de asfaltos.

3.1.1.1 Población

La población de estudio en esta investigación está constituida por todos los ensayos de suelos como de asfaltos.

3.1.1.2 Muestra

Considerando que se quiere analizar la influencia del asfalto espumado en la resistencia cortante del suelo la muestra estará dada los ensayos mencionados en la tabla 7

Tabla 7. Ensayos realizados en los laboratorios

Ensayos de laboratorio de suelos	Ensayos de laboratorio de asfaltos
Análisis granulométrico	Penetración
Límites de Atterberg	Ductilidad
Compactación Próctor T-180	Punto de ignición
Compresión inconfiada	Viscosidad Saybolt Furol
Contenido de humedad	Punto de ablandamiento

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Criterios de muestreo

Para el presente proyecto, el método, para determinar el tamaño de muestra, será un método probabilístico.

3.1.2.1 Selección de la técnica de muestreo

La técnica de muestreo será mediante el muestreo simple no aleatorio que consiste en elegir elementos por conveniencia a criterio del investigador, cuando se cree que los elementos seleccionados puedan brindar mejor información a la investigación.

3.1.3 Tamaño de muestra

3.1.3.1 Número de ensayos

En la tabla 8 se detalla el número de ensayos a realizar en el presente trabajo:

Tabla 8. Número de ensayos realizados en el proyecto

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Caracterización del suelo	Granulometría	1
2		Límites	1
3		Compactación	1
4		Ensayo de compresión inconfineda	1
5	Caracterización del asfalto	Penetración	1
6		Ductilidad	1
7		Punto de ignición	1
8		Viscosidad Saybolt Furol	2
9		Punto de ablandamiento	1
10	Pruebas y resultado	Determinación de las propiedades del asfalto espumado (vida media y expansión)	20
11		Estabilización de suelo con asfalto espumado a diferentes porcentajes de asfalto espumado. (moldes para compresión inconfineda)	15
12		Ensayo de compresión inconfineda de suelo estabilizado	15
13		Contenido de humedad de rotura de los moldes	15
Total ensayos			75

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2 Cálculo del tamaño de muestra

Se hará el análisis de la influencia del asfalto espumado en la resistencia cortante en una muestra de suelo coluvial a través del ensayo de compresión inconfineda, observando la variación del esfuerzo añadiendo diferentes porcentajes de asfalto espumado en la mezcla.

Selección del nivel de confianza

En la siguiente tabla 9 se presenta los valores “Z” para cada nivel de confianza:

Tabla 9. Valores de Z para cada nivel de confianza

Nivel de confianza	Z alfa
99.70%	3
99%	2.58
98%	2.33
96%	2.05
95%	1.96
90%	1.645
80%	1.28
50%	0.674

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 10 se muestran los datos asumidos para el cálculo del tamaño de la muestra

Tabla 10. Datos para el cálculo del tamaño de la muestra

Datos para el calculo	
Nivel de confianza (NC)	95%
Margen de error (e)	5%
Distribución normal (z)	1.96
Probabilidad de ocurrencia (P)	0.5
Probabilidad de no ocurrencia (q)	0.5
Población (N)	75

Fuente: Elaboración propia

Fórmula para el cálculo del tamaño de la muestra:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q \sum_{i=1}^n Ni * Pi * qi}{\frac{N * e^2}{z^2} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n Ni * Pi * qi}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

Z_{α} = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza (NC)

e = Error de estimación máximo aceptado

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (Éxito)

q = (1-p) = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

N = Población

Por lo tanto, se tiene que el tamaño de la muestra será:

$$n = 62.7 \approx 63 \text{ ensayos}$$

Tabla 11. Planilla de muestra estratificada

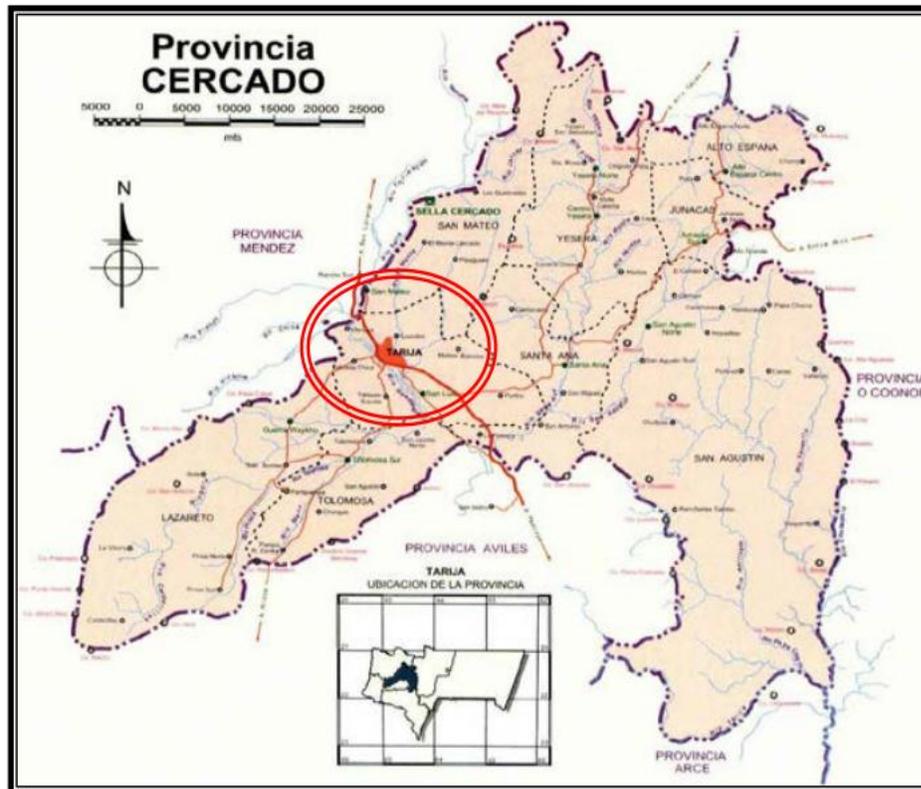
Etapa	Ensayo	Ni	Pi	qi	Ni*Pi*qi	Fi	ni	n
Caracterización del suelo	Granulometría	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
	Límites	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
	Compactación	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
	Ensayo de compresión inconfiada	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
Caracterización del asfalto	Penetración	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
	Ductilidad	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
	Punto de ignición	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
	Viscosidad Saybolt Furol	2	0.5	0.5	0.5	0.02667	1.68	2
	Punto de ablandamiento	1	0.5	0.5	0.25	0.01333	0.84	1
Pruebas y resultado	Determinación de las propiedades del asfalto espumado (vida media y expansión)	20	0.5	0.5	5	0.26667	16.8	17
	Estabilización de suelo con asfalto espumado a diferentes porcentajes de asfalto espumado. (moldes para compresión inconfiada)	15	0.5	0.5	3.75	0.20000	12.6	13
	Ensayo de compresión inconfiada de suelo estabilizado	15	0.5	0.5	3.75	0.20000	12.6	13
	Contenido de humedad de rotura de los moldes	15	0.5	0.5	3.75	0.20000	12.6	13
N =		75			18.75	1.0	63	66

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Ubicación de la zona de extracción de suelo

El presente proyecto se lo realiza con muestra extraída del departamento de Tarija (figura 15), más propiamente de la provincia Cercado, a fin de aplicar esta metodología en las diferentes obras civiles de nuestro medio según se requieran.

Figura 15. Mapa de la provincia Cercado



Fuente: <https://www.educa.com.bo/geografia/provincia-cercado-tarija-mapa>

Haciendo un sondeo para la extracción de muestras en los depósitos coluviales las muestras a analizar se extrajeron de la zona de Tablada Grande (figura 16) donde existe depósitos de suelos coluviales de donde también actualmente se extraen suelos para su posterior tratamiento y aplicación en el campo de la construcción.

Figura 16. Depósito coluvial Tarija, muestras extraídas



Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Coordenadas geográficas y UTM de la zona de extracción de la muestra.

Geográficamente las zonas de muestreo se encuentran en las siguientes coordenadas (tabla 12) y a la vez se proporciona una vista satelital de la zona (Figura 17).

Tabla 12. Coordenadas Geográficas y UTM de la zona de extracción

Coordenadas geográficas de la zona de extracción	
Latitud:	-21°33'25.53" S
Longitud:	-64°45'29.61" O
Altitud:	1943 m.s.n.m.
Coordenadas UTM de la zona de extracción	
E:	317935.42 m E
N:	7615168.91 m S
Zona:	20 K

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Imagen satelital zona Tablada Grande



Fuente: Elaboración propia

3.2 Ensayos de laboratorio para la caracterización de los suelos.

Con el fin de clasificar un suelo mediante la caracterización del mismo en el laboratorio, se debe contar con muestras o porciones del mismo. cuando los objetivos son generales y no se requiere conocer propiedades específicas, se manejarán muestras de inspección, de las cuales solo se pide que manejen masas representativas. Por el contrario, si los datos a conocer son específicos se manejarán muestras de laboratorio que deben cumplir con condiciones de tamaño, procesos de obtención, manejo en el traslado, ambiente de almacenamiento, entre otras.

3.2.1 Clasificación de suelos

3.2.1.1 Análisis granulométrico ASTM D 422-66

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Figura 18. Muestra cuarteada del suelo en estudio



Fuente: Elaboración propia

Equipo necesario

Serie de tamices (2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200).

Balanza de 0,1 y 0,01 gramos de precisión.

Bandejas.

3.2.1.1.1 Procedimiento

Este procedimiento cubre la determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75µm (N° 200) en suelo por lavado en base a la norma AASHTO T 11-99 (Para mayor información consultar norma). Partículas de arcilla y otras partículas de agregado que se dispersan por el agua de lavado, así como materiales solubles en agua, pueden ser removidas del suelo durante este ensayo

Secar la muestra de ensayo hasta alcanzar una masa constante, a una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F). Determinar la masa con una precisión del 0,1 por ciento de la masa de la muestra de ensayo.

Después de secar y determinar la masa, colocar la muestra de ensayo en la bandeja y agregar suficiente agua para cubrirla (figura 19). Agitar la muestra con suficiente vigor para que haya una separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de 75-µm (N° 200) de las partículas más gruesas, y que el material fino quede en suspensión.

El uso de una cuchara grande u otra herramienta similar para revolver y agitar el suelo en el agua de lavado tiene resultados satisfactorios. Inmediatamente vierta el agua de lavado conteniendo los sólidos suspendidos y disuelva sobre el tamiz N° 200.

Figura 19. Granulometría método de lavado



Fuente: Elaboración propia

Añada una segunda cantidad de agua a la muestra en el recipiente, agitar, y decantar como antes (figura 20). Repetir esta operación hasta que el agua de lavado salga clara.

Figura 20. Muestra lavada en el tamiz N° 200



Fuente: Elaboración propia

Regresar todo el suelo retenido en el tamiz N° 200, limpiando con un chorro de agua la muestra lavada. Secar el suelo lavado hasta obtener masa constante a una temperatura de

110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) y determinar la masa con una precisión del 0,1 por ciento de la masa original de la muestra.

Se debe tamizar los suelos por las mallas 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40 y N°200 (figura 21), registrar los respectivos pesos para generar la curva granulométrica (figura 22).

Figura 21. Proceso de tamizado del material utilizando la serie de tamices.



Fuente: Elaboración propia

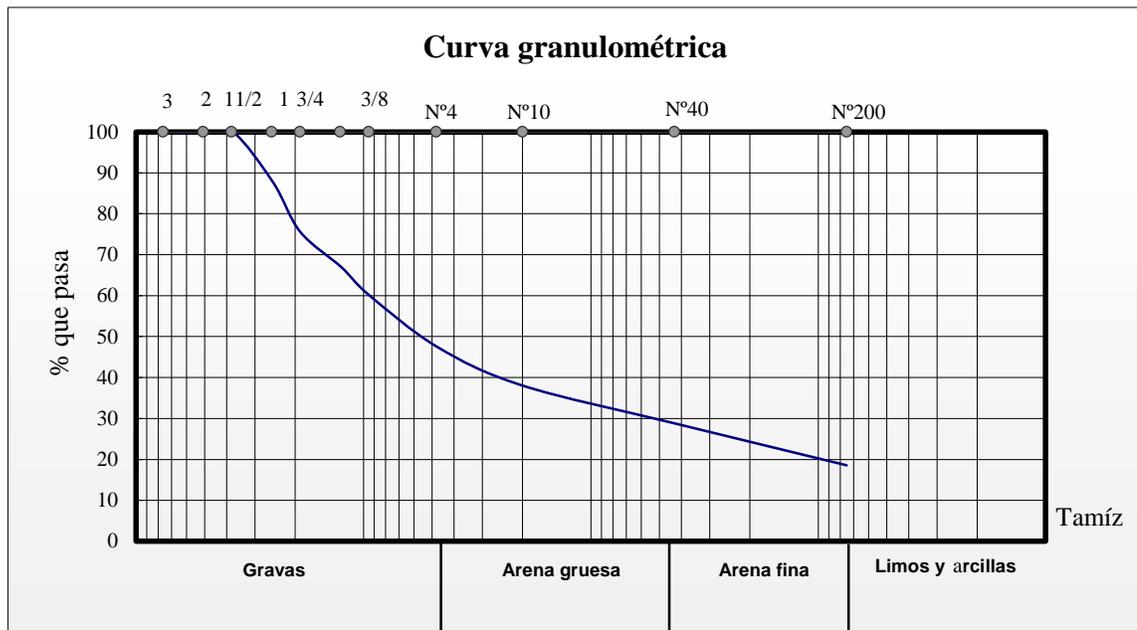
Los resultados obtenidos en la realización de este ensayo utilizando agua de chorro para, para la muestra de suelo se detalla a continuación en la tabla 13:

Tabla 13. Análisis granulométrico de la muestra de suelo

Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% Que Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)		del Total
3"	75	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	614.40	614.40	12.29	87.71
3/4"	19.00	604.60	1219.00	24.38	75.62
1/2"	12.50	434.30	1653.30	33.07	66.93
3/8"	9.50	334.40	1987.70	39.75	60.25
N°4	4.75	636.50	2624.20	52.48	47.52
N°10	2.00	473.50	3097.70	61.95	38.05
N°40	0.425	464.30	3562.00	71.24	28.76
N°200	0.075	510.20	4072.20	81.44	18.56

Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Curva granulométrica de la muestra de suelo



Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Límites de atterberg

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

Material y equipo

Aparato de límite líquido (copa de Casagrande)

Ranurador

Balanza con precisión de 0,01g

Recipiente para mezclado y almacenamiento (taras)

Espátula

Tamiz N° 40

Horno de secado

Placa de vidrio

Vidrio reloj

3.2.1.2.1 Procedimiento

Preparación de la muestra

Se obtiene una cantidad representativa de la muestra total del suelo (figura 23), la cual debe estar completamente seca para que los terrones puedan pulverizarse con facilidad y poder obtener un espécimen de suelo de 250 g después de tamizado, para luego obtener el límite líquido de la muestra, que es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, en base a la norma ASTM D 4318-00, (Para mayor información consultar norma), valor que servirá para clasificar el suelo.

Figura 23. Muestra para obtener los límites líquido y plástico



Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2.2 Límite líquido (ASTM D423-72)

El procedimiento que se lleva a cabo para realizar el ensayo será el que se describe a continuación:

Se pulverizó la muestra de suelo seco con un mortero y un pistilo, teniendo cuidado de no quebrar las partículas para hacerlas pasar por la malla N° 40.

Tamizar el material por la malla N° 40 (425µm, agitando el tamiz con la mano para asegurar la separación completa de la fracción más fina.

El material que no pasa la malla N° 40 es regresado al mortero y se repiten los procesos de pulverizado y cribado hasta que la mayoría del material fino haya sido disgregado y el material retenido consista en granos individuales para poder obtener una muestra de 250g de peso.

Una vez obtenida la cantidad requerida de material para realizar el ensayo colocamos la muestra en un plato y agregamos agua con un recipiente para poder hidratar por completo la muestra de suelo, mezclando la muestra con una espátula.

Se mezcla bien el material hidratado, inmediatamente antes de iniciar el ensayo. Tomar con la espátula una porción de suelo y colóquela en la copa de latón del dispositivo de casa grande, distribuyéndola con el menor número de golpes de espátula posibles, hasta que se obtenga un espesor de aproximadamente 10 mm como máximo y se deje nivelada la superficie en un plano horizontal.

El suelo remanente se devuelve al plato, luego se divide la masa del suelo de la copa de Casagrande (figura 24), utilizando un ranurador, trazando una línea del punto más alto al punto más bajo en el borde de la copa, cuando haga la ranura, sostenga el acanalador contra la superficie de la copa de latón haciendo un movimiento circular de adelante hacia atrás. Manteniéndolo perpendicular a la superficie de la copa de Casagrande durante todo el movimiento.

Figura 24. Equipo de Casagrande para determinar el límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Se levanta y deja caer la copa por medio de una manivela a una frecuencia de 1,9 a 2,1 caídas por segundo, hasta que las dos mitades del suelo al dar los golpes se unan en el fondo de la ranura, una distancia de 13mm (1/2 pulg.).

Para obtener el valor del límite líquido plotee la relación entre el contenido de agua (%w) y el número correspondiente de golpes de la copa en un gráfico (ver tabla 12). El contenido de agua en las ordenadas (Y), y el número de golpes en las abscisas (X). Luego dibuje la mejor línea recta para unir lo mejor posible los tres o más puntos ploteados.

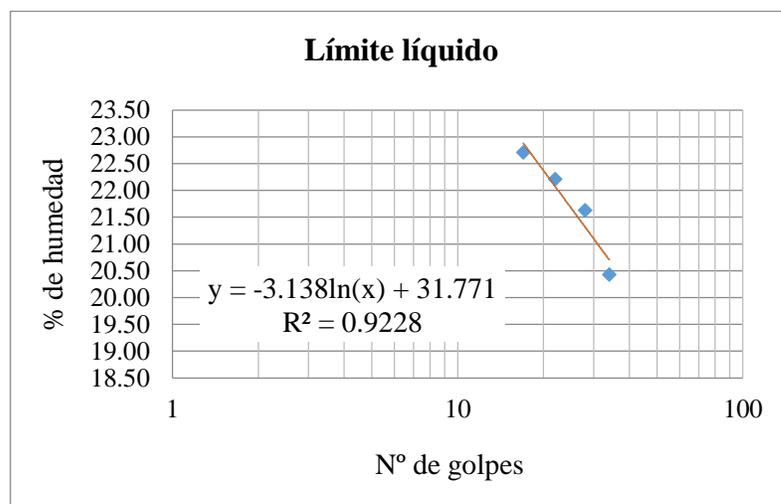
Tome el contenido de agua de la intersección de la línea de las abscisas correspondiente a 25 golpes con la línea que une la dispersión de los valores registrados que se proyecta hasta cortar con una línea horizontal a las ordenadas como el límite líquido (figura 25).

Tabla 14. Datos para determinar el límite líquido (LL)

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	17	22	28	34
Suelo húmedo + cápsula	29.12	31.25	30.97	29.68
Suelo seco + cápsula	26.05	27.85	28.02	26.73
Peso del agua	3.07	3.4	2.95	2.95
Peso de la cápsula	12.53	12.54	14.38	12.29
Peso suelo seco	13.52	15.31	13.64	14.44
Porcentaje de humedad	22.71	22.21	21.63	20.43

Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Gráfica límite líquido (LL)



Fuente: Elaboración propia

El valor del límite líquido será:

$$LL = -3.138 * \ln(25) + 31.771 = 21.67$$

3.2.1.2.3 Límite plástico (ASTM D424 – 72)

Seleccionamos 20g o más del espécimen de suelo preparado para el ensayo de límite líquido o del suelo restante de dicho ensayo. Luego reducimos el contenido de humedad del suelo hasta que posea una consistencia en la cual pueda rolar sin adherirse a las

manos cuando sea extendido o se mezcle continuamente en una superficie plana y horizontal.

Seleccionamos una porción de suelo de la muestra de 20g que se tomó anteriormente para formar una pasta elipsoidal. Luego rolar esta masa de suelo colocándola entre la palma de la mano o los dedos y una superficie horizontal lisa con suficiente presión, hasta hacer un hilo de diámetro uniforme de aproximadamente 3 mm a lo largo de su longitud en un lapso de tiempo máximo de 2 minutos (figura 26).

Figura 26. Muestras para obtener la plasticidad del material (LP)



Fuente: Elaboración propia

Cuando haya alcanzado el diámetro requerido del hilo de suelo, desmenuzamos ésta en varias porciones. Seguidamente juntamos las porciones y amasarlas de nuevo hasta darles una forma aproximadamente elipsoidal. Rolar el suelo nuevamente hasta que el hilo sea de un diámetro de 3mm y repetimos todo el proceso anterior hasta que aparezcan grietas en el o se quiebre bajo presión del amasado y ya no sea posible formarlo de nuevo. Determinar la masa del suelo con el recipiente y registrarlas en la hoja de datos correspondiente. El proceso se repite hasta que en el recipiente haya por lo menos 6g de suelo. Luego se registra la masa del recipiente con el suelo húmedo y se determina posteriormente el contenido de humedad del suelo en el recipiente, de acuerdo con el método ASTM D 2216. Ver tabla 15.

Tabla 15. Datos para determinar el límite plástico de la muestra (LP)

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + cápsula	15.81	16.00	15.38
Peso de suelo seco + cápsula	15.35	15.60	14.92
Peso de cápsula	12.47	12.92	11.79
Peso de suelo seco	2.88	2.68	3.13
Peso del agua	0.46	0.40	0.46
Contenido de humedad	15.97	14.93	14.70

Fuente: Elaboración propia

Promediamos los siguientes valores:

$$LP = \frac{14.93 + 14.70}{2} = \mathbf{14.81}$$

3.2.1.2.4 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad de un suelo es el rango en el contenido de agua, expresado como porcentaje de la masa de suelo secada en horno, dentro del cual el material se encuentra en un estado plástico; siendo la diferencia numérica entre el límite líquido y límite plástico del suelo. Por lo tanto, para el suelo objeto de estudio se obtuvo el siguiente resultado mostrado en la tabla 16.

Tabla 16. Valor del índice de plasticidad

Resultados	
Límite líquido LL =	21.67
Límite plástico LP=	14.81
Índice de plasticidad IP=	6.86

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Clasificación del suelo según AASHTO

Se describe un procedimiento para clasificar los suelos en siete grupos (ver tabla 17), basada en datos de laboratorio y determinación de la distribución del tamaño de partículas, límite líquido, e índice de plasticidad. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un "índice de grupo," que es un valor calculado a partir de una fórmula empírica.

Tabla 17. Clasificación norma AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...			B		40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	N.P.			B		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

Fuente: Norma AASHTO

Cálculo del índice de grupo IG.

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Donde:

a = %pasa N°200 – 35% (Si %N°200>75, se anota 75, si es <35. Se anota 0)

b = %pasa N°200 – 15% (Si %N°200>55, se anota 55, si es <15. Se anota 0)

c = Limite liquido – 40% (Si LL>60, se anota 30, si es <40, se anota 0)

d = Índice de plasticidad – 10% (Si IP>30, se anota 30, si es <10, se anota 0)

Por tanto, la muestra de suelo se clasifica como se detalla en la tabla 18:

Tabla 18. Clasificación de suelos según norma AASHTO

Muestra	Clasificación AASHTO	Observaciones
1	A-2-4(0)	Suelo pobremente graduado, predomina la grava con contenido de ligante moderado

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4 Ensayo Próctor modificado (ASTM D-1557 y AASHTO T-180)

Este ensayo abarca los procedimientos de compactación usados en Laboratorio, para determinar la relación entre el Contenido de Agua y Peso Unitario Seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 ó 6 pulgadas (101,6 ó 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulgadas (457,2 mm), produciendo una Energía de Compactación de 56 000 lb-pie/pie³ (2 700 kN-m/m³) Este ensayo se aplica sólo para suelos que tienen 30% ó menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 3/4" pulg (19,0 mm).

3.2.1.4.1 Material y equipo

Molde cilíndrico de compactación normalmente de acero o aluminio, con una camisa superior del mismo material. El molde descansa sobre una base metálica, la cual posee también dos tornillos que permiten la conexión entre el molde y la camisa superior. Aunque existen dos tamaños de moldes, este manual se encarga del procedimiento efectuado con el molde cuyo diámetro es de aprox. 6 "y una altura de aprox. 116,4 mm. Nota: el cálculo final del ensayo requiere el volumen del molde, por lo que éste debe tomarse con la mayor precisión posible y se recomienda que este valor este marcado en las paredes inferiores del molde.

Martillo de compactación: Martillo especial, normalmente de operación mecánica utilizado para compactar la masa de suelo con número de golpes y procedimiento específico y a una altura fija. Su diámetro es de aprox. 50.8 mm, su peso de 4536 gramos y una altura de caída de 457,2 mm.

Regla metálica: Debe ser de acero y lo suficientemente rígida y larga para realizar el enrasado sin ningún problema.

Horno de secado: Con capacidad para mantener temperaturas constantes de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Balanza de precisión: Con precisión de 0,1 g, previamente calibradas.

Tamices 3/4 y 3/8: La malla del tamiz debe estar en perfecto estado. El operario debe verificar que sus bordes no presenten desprendimiento con la pared del tamiz.

3.2.1.4.2 Preparación de la muestra de ensayo

Secamos la muestra al aire o en un horno de secado a una temperatura de 60°C, luego desmenuzamos todos los grumos existentes utilizando un mortero y pistilo (figura 27).

Figura 27. Muestra secada al horno en proceso de trituración de los trozos de arcilla



Fuente: Elaboración propia

Pesamos una muestra representativa para luego tamizar el material por los tamices 3/4 (19.05 mm) y 3/8 (9.5 mm), para determinar el método de compactación a usar descrita en la tabla 19.

Tabla 19. Especificación para la prueba Próctor modificado (basado en las 698-91 de la ASTM)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del pistón	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del pistón	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes del pistón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N° 4 (4.75mm). Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla N°4	Porción que pasa la malla de 9.5mm. Se usa si el suelo retenido en la malla N°4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9.5mm.	Porción que pasa la malla de 19mm. Se usa si más de 20% por peso de material es retenido en la malla de 9.5mm, y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19mm.

Fuente: Guía de laboratorio de suelos UAJMS

Peso muestra = 5000 gr

Peso que pasa el tamiz 3/4 = 1058.1 gr → 21.16%

Peso retenido tamiz 3/8 = 1306.4 gr → 26.13%

Como el porcentaje que pasa el tamiz 3/4 es mayor a 20% y el retenido en el tamiz 3/8 es menor a 30%; aplicamos el método C descrita en la anterior tabla para la compactación de la muestra (Figura 28).

Figura 28. Porcentajes retenidos en los tamices 3/4" y 3/8"



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la cantidad de agua inicial usamos la siguiente ecuación.

$$\Delta W = \frac{W_h}{(1 + W_n)} * (W_d - W_n)$$

Donde:

ΔW = Cantidad de agua a agregar (ml)

W_h = Peso de la muestra húmeda (gr)

W_n = Humedad actual de la muestra

W_d = Humedad deseada

3.2.1.4.3 Compactación de la muestra

Ensamble la placa en el molde y con el collarín asegurándolo correctamente, luego coloque el molde en una superficie plana y rígida, para que se realice el ensayo sin ningún tipo de error, inmediatamente ubique en el molde el suelo anteriormente preparado hasta crear una capa de espesor uniforme y que pueda ocupar la quinta parte del molde.

Posteriormente el suelo colocado en el molde, compacte utilizando un martillo apisonador dejándolo caer desde la altura de la manga, proporcionando 56 golpes (figura 29).

Figura 29. Molde de compactación mas base y collarín



Fuente: Elaboración propia

Remueva el collarín del molde y desgaste cuidadosamente el suelo compactado hasta aplanar la parte superior del molde y utilice la regla metálica (llene los agujeros y presione con los dedos para luego emparejar con la regla enrazadora), desmonte la placa base del molde, después limpie la parte externa del molde con una brocha. Posteriormente determine la masa del molde compactado (sin placa base) y registre en una balanza de 1 g de precisión (figura 30).

Figura 30. Peso del molde mas muestra



Fuente: Elaboración propia

Extraiga el espécimen compactado, luego corte en 4 porciones el espécimen y calcule una masa de 30 g por cada porción y luego coloque en taras debidamente pesadas. Luego obtenga la masa de cada porción húmeda utilizando la balanza de 0,1 g de legibilidad.

Seguidamente coloque al horno a una temperatura que no sobrepase los 60° C en un tiempo mínimo de 24 horas y por último una vez sacados del horno deje enfriar, para tomar la masa seca de cada porción de suelo.

Ejecute el paso anterior en 6 ocasiones con los contenidos de humedad dependiendo los valores de compactación que se requieran

También para determinar el contenido de humedad de cada muestra se usó el determinador de humedad DAB (figura 31), para realizar una prueba rápida para obtener la humedad.

Figura 31. Termo balanza para determinar el contenido de Humedad del suelo.



Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4.4 Procesamiento de datos obtenidos en el laboratorio

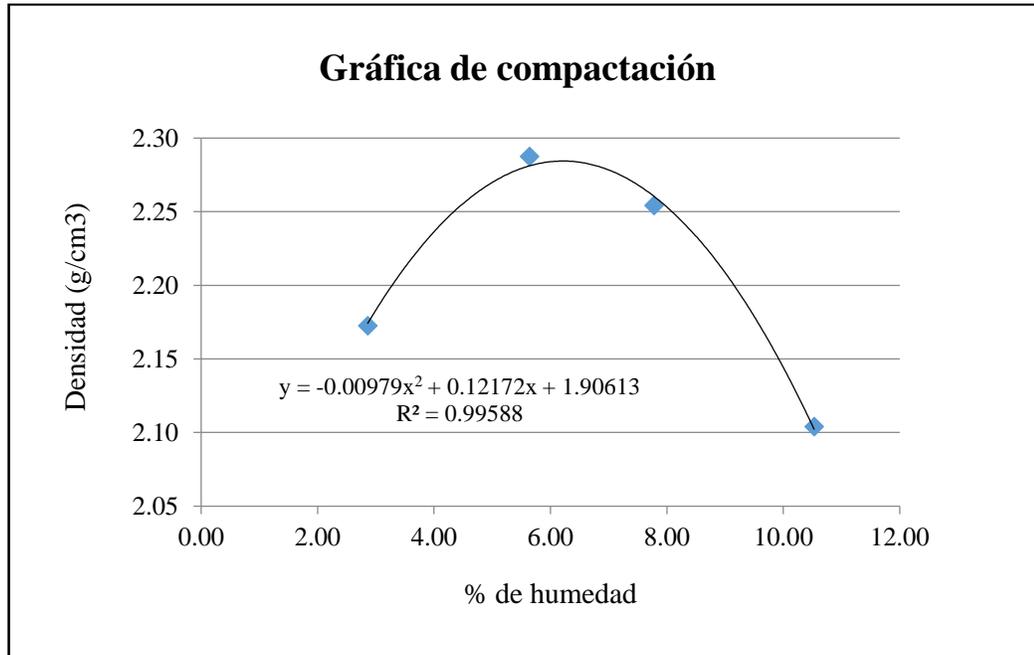
La tabla 20 muestra el procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo de compactación.

Tabla 20. Procesamiento de datos del ensayo Próctor modificado

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10971.1	11340.5	11367.2	11155.8
Peso del molde	6432.3	6432.3	6432.3	6432.3
Peso suelo húmedo	4538.8	4908.2	4934.9	4723.5
Volumen de la muestra	2031.2	2031.2	2031.2	2031.2
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2.23	2.42	2.43	2.33
Contenido de humedad (%h)	2.86	5.64	7.78	10.53
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2.17	2.29	2.25	2.10

Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Curva de compactación Próctor modificado.



Densidad máxima	=	2.28 gr/cm ³
Humedad óptima	=	6.82 %

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Determinación del esfuerzo cortante del suelo

3.2.2.1 Ensayo de compresión inconfiada

Su objetivo, indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remoldadas, aplicando carga axial, usando cualquiera de los métodos de resistencia controlada o deformación controlada.

La resistencia a la compresión no confinada, es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo, cilíndrica o prismática, falla en el ensayo de compresión simple (ver figura 33).

Figura 33. Probeta de suelo ensayada a compresión simple



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.1.1 Material y equipo

Aparato de compresión: conformado por una prensa para rotura de las probetas, de velocidad controlada.

Aparato de mini Harvard: que consta de un equipo de compactación para la elaboración de probetas en muestras remoldadas.

Extractor de muestras.

Calibrador vernier: capaz de medir las dimensiones físicas de la probeta con aproximación de 0.1mm.

Balanza: con precisión de 0.1gr.

3.2.2.1.2 Preparación de la muestra

El procedimiento para la preparación de la muestra fue el siguiente: tomando en cuenta que el suelo es proveniente de un deposito coluvial se procedió a tamizar el material por la malla N°4 de la cual se obtuvo una muestra significativa para llevar a cabo el ensayo.

Luego se separó una cantidad de suelo (150gr. de suelo por cada probeta) para elaborar tres probetas y luego ensayarlas en la prensa de compresión.

3.2.2.1.3 Procedimiento

Con la muestra ya tamizada se pesó una cantidad de 450gr aproximadamente para elaborar tres probetas, luego esa muestra se procedió a humedecer la mezcla con la humedad optima obtenida en el ensayo del Próctor, (humedad optima del ensayo de Próctor T-180 tiene una mínima diferencia al valor de humedad optima determinado en el aparato mini Harvard según estudio hecho en la U.A.G.R.M.) una vez mezclada bien el suelo con el agua se procedió a elaborar las probetas en el aparato mini Harvard usando el martillo de compactación con 5 capas de 25 golpes por cada capa (figura 34).

Figura 34. Ensayo de compresión inconfiada



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente usando el extractor de moldes se procedió a extraer los moldes para luego registrar los pesos de cada probeta y sus dimensiones tanto la altura como el diámetro realizando por lo menos tres mediciones para promediar tales valores.

Finalmente se envolvió las muestras con papel film para conservar la humedad hasta el momento de ensayarlas en la prensa de compresión.

Para el ensayo en la prensa de compresión se utilizó un equipo automatizado con una velocidad de compresión de 8%, en la cual se introdujo como datos la altura y el peso de cada molde, esta nos permitió obtener valores mucho más precisos con margen de error mínimo por tratarse de un equipo más avanzado (figura 35).

Figura 35. Prensa de compresión inconfiada



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.1.4 Procesamiento de datos

Una vez obtenidos los datos que nos proporcionó el equipo los cuales fueron la deformación (mm) y la carga (N) hasta la falla de la muestra, se procedió lo siguiente:

Se calcula la deformación unitaria:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$$

Donde:

ε = Deformación unitaria

Δh = Variación de la altura leída en el extensómetro

h = Altura inicial de la muestra

Se calcula el área corregida:

$$A' = \frac{A}{(1 - \varepsilon)}$$

Donde:

A' = Área de la muestra corregida después de aplicada la carga

A = Área inicial de la muestra

ε = Deformación unitaria

Se determina el esfuerzo en cualquier momento “ t ” del ensayo:

$$\sigma = \frac{C}{A'}$$

Donde:

σ = Esfuerzo en cualquier momento “ t ” (kg/cm^2)

A' = Área de la muestra corregida después de aplicada la carga.

C = Carga aplicada en kg.

Datos iniciales:

Diámetro	3.35 cm.
Altura inicial	7.15 cm.
Área	8.81 cm^2 ,
Volumen	62.99 cm^3 ,
Peso húmedo	119.84 gr.
Peso unitario	1.90 gr/cm^3
Altura final	7.05 cm,

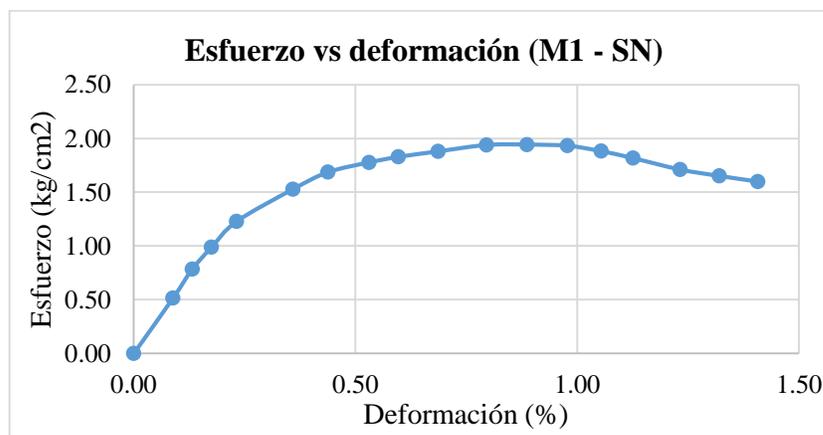
Tabla 21. Planilla de cálculo compresión inconfiada

Δh (m.m.)	ϵ	$1-\epsilon$	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.81	0	0.000	0.00	0.00
0.063	0.00088	0.99912	8.82	44.512	4.542	0.51	0.09
0.094	0.00132	0.99868	8.83	67.891	6.928	0.78	0.13
0.125	0.00175	0.99825	8.83	85.62	8.737	0.99	0.17
0.165	0.00231	0.99769	8.83	106.32	10.849	1.23	0.23
0.256	0.00358	0.99642	8.85	132.541	13.525	1.53	0.36
0.312	0.00437	0.99563	8.85	146.321	14.931	1.69	0.44
0.378	0.00529	0.99471	8.86	154.36	15.751	1.78	0.53
0.425	0.00595	0.99405	8.87	158.91	16.215	1.83	0.59
0.489	0.00684	0.99316	8.87	163.524	16.686	1.88	0.68
0.567	0.00793	0.99207	8.88	168.911	17.236	1.94	0.79
0.632	0.00884	0.99116	8.89	169.358	17.281	1.94	0.88
0.697	0.00975	0.99025	8.90	168.574	17.201	1.93	0.98
0.751	0.01051	0.98949	8.91	164.325	16.768	1.88	1.05
0.802	0.01122	0.98878	8.91	158.79	16.203	1.82	1.12
0.878	0.01229	0.98771	8.92	149.658	15.271	1.71	1.23
0.941	0.01317	0.98683	8.93	144.578	14.753	1.65	1.32
1.003	0.01403	0.98597	8.94	140.123	14.298	1.60	1.40

Fuente: Elaboración propia

Por último, se dibuja la gráfica con los resultados obtenidos de esfuerzo vs deformación (figura 36).

Figura 36. Gráfica esfuerzo vs deformación molde 1



Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento se realizó para los moldes 2 y 3. Por lo tanto, en la tabla 37 se presentan los valores de esfuerzo máximo último (q_u):

Figura 37. Resultados del ensayo de compresión inconfiada

Molde	q_u (kg/cm ²)	q_u Prom. (kg/cm ²)
1	1.94	1.88
2	1.88	
3	1.81	

Fuente: Elaboración propia

Humedad de rotura de los moldes

Para determinar la humedad con la que se realizó el ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

Luego de extraer las muestras se pesó cada molde en estado húmedo, y para conservar la humedad esta se envolvió en papel film (figura38).

Figura 38. Muestras pesadas y envueltas en papel film



Fuente: Elaboración propia

Una vez ensayadas en la prensa a compresión se introdujo en el horno a temperatura constante de 60°C durante 24 hrs (figura 39). Para luego extraer las muestras y registrar el peso seco de cada molde.

Figura 39. Muestras extraídas del horno



Fuente: Elaboración propia

Cálculo del contenido de humedad de rotura

En la tabla 22 se presenta los cálculos y resultados de la humedad de rotura.

Tabla 22. Cálculo del contenido humedad de rotura

Humedad de ensayo suelo natural			
Molde	1	2	3
Peso de molde húmedo	119.84	120.11	119.65
Peso de molde seco	114.51	112.02	111.14
Peso de cápsula	0	0	0
Peso de suelo seco	114.51	112.02	111.14
Peso del agua	5.33	8.09	8.51
Contenido de humedad	4.65	7.22	7.66
PROMEDIO	6.51		

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Ensayos de laboratorio para determinar las propiedades del cemento asfáltico

3.2.3.1 Penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97)

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante un ensayo de penetración. Durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de betún bajo una carga conocida (100g) a una temperatura fija (25°C), durante un plazo de tiempo predeterminado (5 segundos).

Material y equipo

Penetrómetro

Muestra de cemento asfáltico a ser ensayado

Termómetro (capacidad 100°C)

Taras

Envase metálico

Hornilla

Implementos de seguridad

3.2.3.1.1 Procedimiento

El procedimiento es el siguiente:

Colocar el cemento asfáltico (estado sólido) en un envase metálico, para poder calentarlo hasta llevarlo a un estado líquido, con un termómetro medir la temperatura hasta que alcance una temperatura entre 60 y 90 °C.

Vaciar el asfalto líquido a las taras (figura 40), con dimensiones establecidas y dejar reposar las taras con la muestra entre 1 y 1 1/2 horas hasta que éstas adquieran una temperatura de 25°C (ambiente) protegiendo la cápsula contra el polvo cubriéndola.

Figura 40. Muestras en reposo para el ensayo de penetración.



Fuente: Elaboración propia

Preparar el equipo (colocar la aguja en el casquete así también colocar la pesa de 150 gr en la parte superior del vástago para que ambos pesen 200gr) verificando que la aguja este limpia.

Antes de realizar las penetraciones se debe constatar que la aguja marque cero.

Posicione la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra. (ver figura 41). Presionar en un tiempo de 5 segundos haciendo que la aguja penetre debido a la acción de la carga de 200 gr.

Figura 41. Proceso del ensayo de penetración



Fuente: Elaboracion propia

Hacer un mínimo de cuatro penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la cápsula y a no menos 10 mm entre uno y otro y registrar los datos obtenidos. Por lo cual se obtuvo los siguientes datos:

Temperatura: 25°C

Peso penetración: 100 gr.

Tiempo: 5 seg.

Tabla 23. Datos de penetración en las muestras.

Altura de penetración (1/10mm)		
Tara 1	Tara 2	Tara 3
80	79	88
88	85	91
90	86	93
86	86	85

Fuente: Elaboración propia.

Promedio de los datos letrados en el penetrómetro.

Tara N° 1

$$\text{Penetración} = \frac{80+88+90+86}{4} = 86 \text{ (1/10mm)}$$

Tara N° 2

$$\text{Penetración} = \frac{79+85+86+86}{4} = 84 \text{ (1/10mm)}$$

Tara N° 3

$$\text{Penetración} = \frac{88+91+93+85}{4} = 89.25 \text{ (1/10mm)}$$

Tabla de resultados:

Tabla 24. Resultados del ensayo de penetración

Promedio (mm)	Especificaciones	
	Min.	Max.
87	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

La ductilidad es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La longitud del hilo del material en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad de la muestra (figura 42).

Material y equipo

Moldes

Ductilometro

Plato base.

Termómetro

Figura 42. Moldes y equipo para medir la ductilidad del asfalto.



Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2.1 Procedimiento

Inicialmente se escoge una muestra de material bituminoso de manera que esté limpio, se pone a calentar y se debe esperar hasta el punto en que el asfalto pueda fluir, mientras esto pasa se preparan los moldes, los cuales deben estar engrasados en sus paredes laterales, también se debe engrasar el plato base. Una vez que tengamos el asfalto listo para verter procedemos a hacer el llenado de los moldes (figura 40), pero con un chorro fino y avanzando de extremo a extremo, dejamos secar a temperatura ambiente por un tiempo de 30 a 40 minutos, y luego el mismo tiempo en un baño de agua, la temperatura de este baño no debe variar 25 ± 0.5 °C. Una vez concluido este tiempo lo llevamos al Ductilómetro y allí lo dejamos durante 85 a 95 minutos según la norma lo indica, seguido esto se quitan las paredes laterales del molde y se procede a realizar el ensayo, introduciendo las clavijas en el sistema y avanzando con una velocidad de tracción aproximadamente de ± 50 mm por minuto, allí se espera hasta que el asfalto forme un hilo pequeño y se rompa (figura 43), finalmente se mide la distancia en la que la muestra se rompió y esta corresponde a la ductilidad del material.

Figura 43. Proceso del ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Para el ensayo de ductilidad, trabajando aproximadamente a temperatura de 25 °C y a una velocidad de 50mm por minuto se obtuvo una longitud de:

Primera medición: 105cm

Segunda medición: 108cm

Tercera medición: 104cm

Tabla 25. Resultados del ensayo de ductilidad

Promedio (cm)	Especificaciones	
	Min.	Max.
106	75	-

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3 Punto de ignición. (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96)

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de "vaso abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

Material y equipo

Vaso abierto Cleveland (COC) con Placa de calentamiento de bronce

Muestra de cemento asfáltico

Termómetro (capacidad 400 °C)

Cronometro.

Implementos de seguridad (guantes, mandil)

3.2.3.3.1 Procedimiento

Ubicar el equipo en una superficie plana y firme preferentemente en una zona sin corrientes de aire.

Verificar que la copa de ensayo este limpia y libre de cualquier aceite, vestigios pegados o residuos remanentes de ensayos anteriores.

Mantener el termómetro en posición vertical (figura 44) con el bulbo a una distancia de 6.5 mm del fondo de la copa y localizada en el punto medio del trecho entre el centro y el borde de la copa.

Figura 44. Equipo para determinar el punto de Ignición



Fuente: Elaboración propia

Colocar muestra de cemento asfáltico en la copa, dejar calentar hasta que dicha muestra alcance su estado líquido.

Verificar que la parte superior del menisco este en la línea determinada de llenado.

Aplicar calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17 °C por minuto.

Disminuir el calor cuando la muestra se aproxime a los 55 °C por debajo del punto de inflación esperado, hasta que la velocidad de la temperatura para 28 °C antes del punto de inflamación, sea de 5 a 6 °C por minuto.

Pasar la llama de prueba a través del centro de la copa, en ángulo recto al diámetro que pasa a través del termómetro. El centro de llama de prueba debe moverse en un plano que diste menos de 2 mm por encima del plano del borde superior de la copa (Figura 45), pasando en una dirección primero y en próximo intervalo en la dirección opuesta.

El tiempo consumido en pasar la llama a través de la copa será cercano a 1 segundo.

Figura 45. Copa de Cleveland con cemento asfáltico a ensayar.



Fuente: Elaboracion propia

Previamente al punto de inflamación aumentar la temperatura evitando alteraciones del vapor en la copa de ensayo.

Registrar el valor de la temperatura cuando la muestra alcance su punto de inflamación.

La temperatura del cemento asfáltico al momento de inflamarse es de 286°C

Por lo tanto:

Tabla 26. Resultados de ensayo de punto de ignición

Promedio (°C)	Especificaciones	
	Min.	Max.
286	232	-

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.4 Viscosidad Saybolt Furol. (ASTM E-102, AASHTO T-72)

Es el tiempo corregido en segundos, que tardan en fluir, 60ml. de muestra a través de un orificio tipo furol calibrado (Figura 46), en condiciones específicas.

Figura 46. Proceso de vaciado del cemento asfáltico para determinar el tiempo.



Fuente: Elaboración propia

Material y equipo

Viscosímetro saybolt.

Embudo con filtro

Matraz recibidor

Termómetro

Cronometro

3.2.3.4.1 Procedimiento

Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140°C. Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento el cemento asfáltico sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100°C, de manera que una vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135 °C). el calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3 °F) por encima de la temperatura de ensayo.

Se agito la muestra y posteriormente filtro con un tamiz N° 100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.

Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad de mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.

Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboce, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.

Se agito la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo (± 0.05 °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.

Se verifico que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronometro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzo la marca de graduación de 60 ml. del frasco receptor, y finalmente se anotó el tiempo del flujo en segundos.

A continuación, en la tabla 27 se muestran los resultados del ensayo:

Tabla 27. Resultados del ensayo de Viscosidad Saybolt

N°	Viscosidad Saybolt 135 °C		Especificaciones	
	Valor (seg)	Promedio	Mínimo	Máximo
Ensayo 1	147.0	139.5	85	-
Ensayo 2	132.0			

Fuente: Elaboración propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas

3.2.3.5 Punto de ablandamiento (ASTM D 36 AASHTO T53-96)

Se utilizará el aparato de anillo y bola para determinar el punto de ablandamiento la cual es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

Material y equipo

Anillo de bronce

Bolas de acero con un diámetro de 9,5 mm, que pesen entre $3,50 \pm 0,050$

Guía para centrar la bola, construida de bronce

Vaso de vidrio de 800 ml

Soporte del Anillo

Termómetro

3.2.3.5.1 Procedimiento

Caliente con cuidado la muestra, agitándola continuamente para prevenir un sobrecalentamiento local, hasta que esté suficientemente fluida para verterla. En ningún caso la temperatura de la muestra debe exceder de 110°C por sobre del punto de ablandamiento estimado. Elimine las burbujas de aire incorporadas en la muestra mediante agitación continua.

Lleve la muestra de asfalto a la temperatura de vertido, en un tiempo no mayor que 240 min; vierta la muestra caliente dentro de los dos anillos (figura 47), precalentados aproximadamente a la temperatura de vertido. Mientras se llenan los anillos debe apoyarse sobre una placa de bronce, previamente recubierta con un agente desmoldante, para prevenir que el material bituminoso se adhiera a la placa. Enfríe por lo menos durante 30 min; en ningún caso deje transcurrir más de 4 h antes de terminar el ensaye. Las muestras que estén blandas a temperatura ambiente, se deben enfriar durante un mínimo de 30 min a una temperatura mínima de 8°C por debajo del punto de ablandamiento esperado.

Figura 47. Anillos con asfalto caliente.



Fuente: Elaboración propia

Después de enfriado, corte el exceso de material con una espátula o cuchillo ligeramente caliente. En caso de que se repita el ensaye, utilice una muestra nueva y un recipiente limpio

Ensamble el aparato con los anillos, el termómetro y la guía para centrar las bolas en posición y llene el baño con agua fresca destilada a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ a una profundidad no menor de 100 mm ni mayor de 110 mm (figura 48). Mantenga la temperatura del baño a 5°C durante 15 min, colocando el recipiente del ensaye en agua helada, si es necesario. Utilizando unas pinzas, coloque una bola previamente ajustada a la misma temperatura del baño, en cada una de las guías de centraje de las bolas.

Figura 48. Proceso de enfriamiento del asfalto en el equipo ensamblado.



Fuente: Elaboración propia

Aplique calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de 5°C por min; evite el efecto de las corrientes de aire, utilizando protectores si es necesario.

La velocidad de aumento de temperatura deberá ser uniforme y no se promediará durante el período del ensaye. La variación máxima permisible para cualquier minuto de tiempo, después de los tres minutos, será $\pm 5^\circ\text{C}$. Elimine todos los ensayes en los que la velocidad de aumento de temperatura no esté dentro de estos límites.

Figura 49. Descenso de las bolas después de someter a la temperatura de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Anote para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior (figura 49).

Luego de realizar la práctica la temperatura a la cual las bolas tocan el fondo es de 42°C.

Tabla 28. Resultado del ensayo punto de ablandamiento

Promedio (°C)	Especificaciones	
	Min.	Max.
42	41.4	53.2

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Presentación de resultados de los ensayos de caracterización de los materiales

3.2.4.1 Caracterización de suelos

En la siguiente tabla 29 se presenta un resumen de resultados de la caracterización de la muestra de suelo:

Tabla 29. Resultado ensayos de caracterización de la muestra de suelo

Ensayo		Resultado	Especificación		Norma
			Min.	Max.	
Límites de Atterberg	Límite líquido	21.67	5	10	ASTM D423-72
	Límite plástico	14.81			
	Índice de plasticidad	6.86			
Compactación Próctor T-180	Humedad óptima	6.82 %	-	-	ASTM D-1557
	Densidad máxima	2.28 gr/cm ³	-	-	
Compresión inconfina		1.88 kg/cm ²	-	-	ASTM D-2166
Humedad de rotura		6.51%	-	-	ASTM 2216-80

Fuente: Elaboración propia

Cemento asfáltico

En la siguiente tabla 30 se presenta un resumen de resultados de la caracterización del cemento asfáltico:

Tabla 30. Resultado ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Resultado	Especificación		Norma
		Min.	Max.	
Penetración	87 mm	85 mm	100 mm	ASTM D5
Ductilidad	106 cm	75 cm	-	ASTM D113
Punto de ignición	286°C	232°C	-	ASTM D1310-01
Viscosidad Saybolt Furol	139.5seg.	85seg.	-	ASTM E102
Punto de ablandamiento	42°C	41.4°C	53.2°C	ASTM D36

Fuente: Elaboración propia

3.3 Mezclas de estabilización

Las mezclas se realizan con el objetivo de determinar el contenido óptimo de estabilizador (asfalto espumado) mezclado con los agregados que permitan obtener las propiedades deseadas.

3.3.1 Mezclas de agregado con asfalto espumado

La idea de mezclar un suelo de proveniencia coluvial con asfalto espumado es de conocer el efecto que sufre este al ser mezclado con el asfalto ya que se espera que mejoren sus propiedades mecánicas para su posterior aplicación en el campo de la construcción.

3.3.2 Materiales y equipos de laboratorio

Para la realización de las mezclas con asfalto espumado se requiere el siguiente material (figura 50):

Equipo de compactación mini Harvard. (Figura 48).

Martillo (Figura 48).

Extractor (Figura 48).

Balanza de 0.1gr de precisión. (Figura 50)

Espátula

Calibrador vernier

Equipo de ensayo de compresión inconfiada (Figura 49)

Cámara de expansión para asfalto espumado (Figura 51)

Termómetro con rango de 0 a 200°C.

Cronómetro

Taras

Hornalla

Figura 50. Extractor de moldes, molde mini Harvard y martillo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Equipo de compresión inconfínada



Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Balanza de precisión 0.1gr.



Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Equipo para obtener el asfalto espumado



Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Procedimiento para la elaboración de mezclas con asfalto espumado

El procedimiento básico para el diseño de mezclas con asfalto espumado se resume en los siguientes pasos:

Optimización de las propiedades de la espuma (vida media y expansión)

Caracterización del agregado

Determinación del contenido óptimo de asfalto

Propiedades mecánicas de las mezclas de asfalto espumado

3.3.3.1 Optimización de las propiedades de la espuma

El objetivo principal es determinar la temperatura del asfalto y la cantidad de agua a inyectar que optimicen la razón de expansión y la vida media del asfalto espumado (figura 54). La mejor espuma es la que optimiza tanto la relación de expansión como la vida media del asfalto espumado.

Figura 54. Asfalto espumado con cierto porcentaje de agua inyectada.



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1.1 Relación de expansión y vida media

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, es que se siguió el siguiente procedimiento detallada a continuación:

Se estableció un volumen inicial de asfalto de 50cm³ y luego se determinó el peso de ese volumen de asfalto.

Se calculó la cantidad de agua en ml a ser inyectada a la muestra de asfalto, con variaciones de entre 1 y 3%, con incrementos de 0.5% para obtener valores óptimos en las propiedades de espumación del asfalto.

Para realizar los ensayos se asumió temperaturas de 140°C, 150°C, 160°C y 170°C.

Este procedimiento consta de calentar una muestra de asfalto (figura 55), a la temperatura más baja asumida (140°C), luego inyectar el primer porcentaje de agua en ml., registrar el máximo volumen de expansión y el tiempo de duración de la espuma de asfalto a la cual llega a la mitad de su volumen con respecto a su expansión.

Figura 55. Asfalto calentado a temperatura para su posterior ensayo.



Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento se repetirá para las 5 cantidades de agua correspondientes a las cuatro temperaturas escogidas para la realización del ensayo.

3.3.3.1.1 Ensayo Nro. 1 a temperatura de 140°C

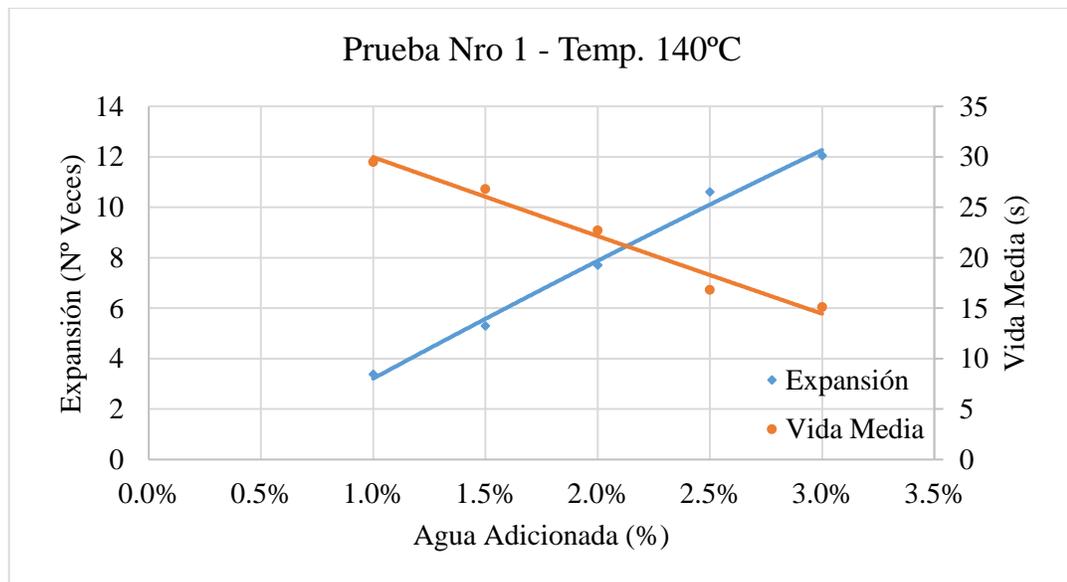
En la tabla 31 Se muestran los resultados de la primera prueba del cálculo de expansión y vida media a la temperatura de 140°C.

Tabla 31. Ensayo expansión y vida media a 140°C

Temperatura = 140°C					
Peso asfalto (gr)	50	50	50	50	50
Volumen inicial asfalto (cm3)	50	50	50	50	50
% Agua	1%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%
Volumen de agua (cm3)	0.5	0.75	1	1.25	1.5
Vida media (seg) (> 15)	29.5	26.8	22.7	16.8	15.1
Volumen final asfalto (cm3)	168.70	265.10	385.60	530.20	602.50
Expansion (Nro Veces) (12 – 20)	3	5	8	11	12

Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Gráfica prueba Nro. 1 (temperatura 140°C)



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1.1.2 Ensayo Nro. 2 a temperatura de 150°C

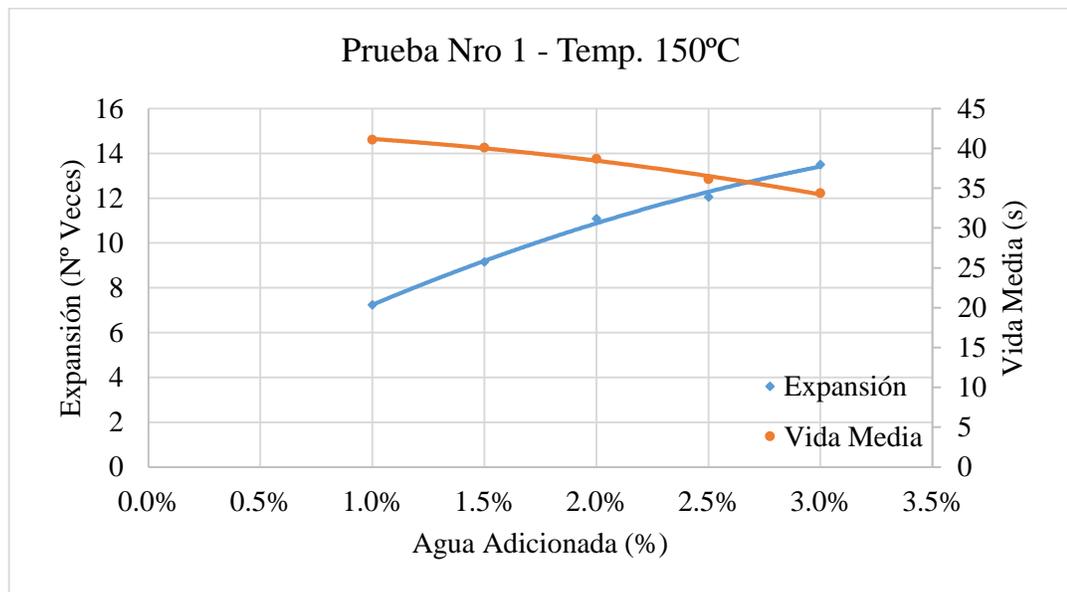
En la tabla 32 Se muestran los resultados de la primera prueba del cálculo de expansión y vida media a la temperatura de 150°C

Tabla 32. Ensayo expansión y vida media a 150°C

Temperatura = 150°C					
Peso asfalto (gr)	50	50	50	50	50
Volumen inicial asfalto (cm3)	50	50	50	50	50
% Agua	1%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%
Volumen de agua (cm3)	0.5	0.75	1	1.25	1.5
Vida media (seg) (> 15)	41.1	40.1	38.7	36.12	34.38
Volumen final asfalto (cm3)	361.50	457.90	554.30	602.50	674.80
Expansión (Nro Veces) (12 – 20)	7	9	11	12	13

Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Gráfica prueba Nro. 2 (temperatura 150°C)



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1.1.3 Ensayo Nro. 3 a temperatura de 160°C

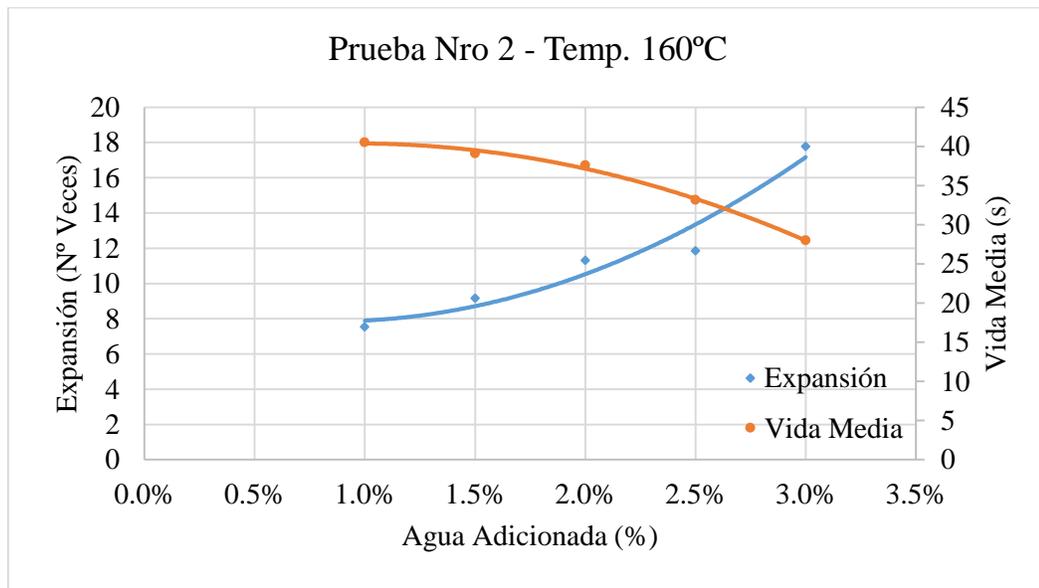
En la tabla 33 Se muestran los resultados de la primera prueba del cálculo de expansión y vida media a la temperatura de 160°C

Tabla 33. Ensayo expansión y vida media a 160°C

Temperatura = 160°C					
Peso asfalto (gr)	50	50	50	50	50
Volumen inicial asfalto (cm ³)	50	50	50	50	50
% Agua	1%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%
Volumen de agua (cm ³)	0.5	0.75	1	1.25	1.5
Vida media (seg) (> 15)	40.5	39.1	37.58	33.15	28
Volumen final asfalto (cm ³)	377.09	457.90	565.64	592.58	888.86
Expansión (Nro. Veces) (12 – 20)	8	9	11	12	18

Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Gráfica prueba Nro. 3 (temperatura 160°C)



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1.1.4 Ensayo Nro. 4 a temperatura de 170°C

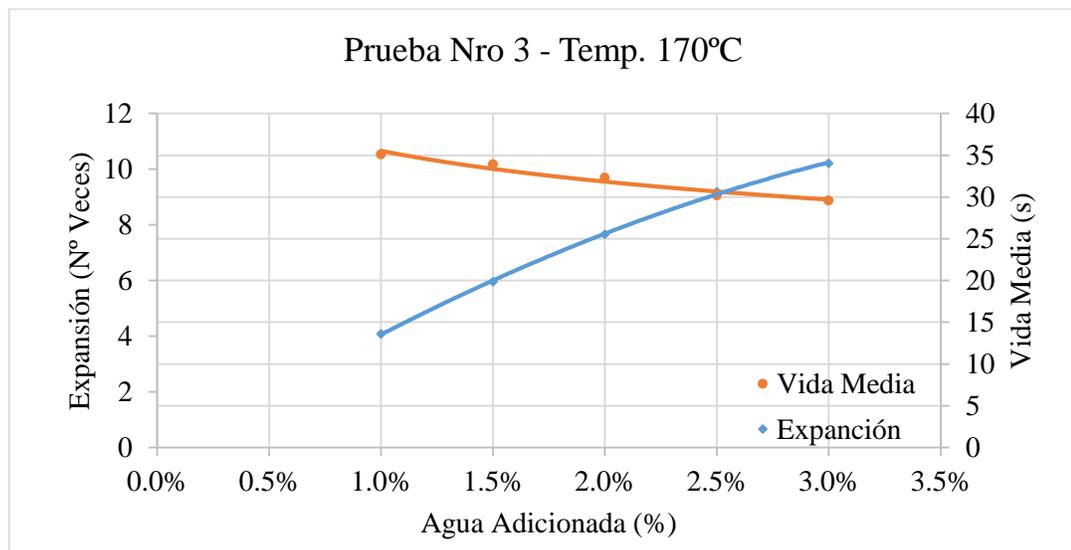
En la tabla 34 Se muestran los resultados de la primera prueba del cálculo de expansión y vida media a la temperatura de 170°C

Tabla 34. Ensayo expansión y vida media a 170°C

Temperatura = 170°C					
Peso asfalto (gr)	50	50	50	50	50
Volumen inicial asfalto (cm3)	50	50	50	50	50
% Agua	1%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%
Volumen de agua (cm3)	0.5	0.75	1	1.25	1.5
Vida media (seg) (> 15)	35.1	33.9	32.32	30.18	29.58
Volumen final asfalto (cm3)	204.28	297.73	382.76	459.32	510.35
Expansión (Nro. Veces) (12 – 20)	4	6	8	9	10

Fuente: Elaboración propia

Figura 59. Gráfica prueba Nro. 4 (temperatura 170°C)



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1.2 Análisis de resultados relación de expansión y vida media

En esta sección se realizaron un total de 20 ensayos, distribuidos en cuatro grupos, cada uno con cinco variaciones en porcentaje de agua inyectadas en la mezcla, para así determinar el porcentaje de agua y la temperatura óptima que cumpla con los parámetros de diseño (Expansión entre 12 – 20 y vida media >15), analizando la expansión y vida media a diferente temperatura.

Prueba Nro. 1.- Se tiene para la vida media donde todos los valores se encuentran dentro de los parámetros sugeridos. Por otro lado, la expansión para 2.5% y 3% este está dentro de los parámetros sugeridos, para lo cual se podría considerar estos porcentajes a esta temperatura de 140°C.

Prueba Nro. 2.- Se tiene para la vida media donde todos los valores se encuentran dentro de los parámetros sugeridos. Por otro lado, la expansión cumple en dos porcentajes de agua que están dentro de los parámetros sugeridos y estas son a 2.5% y 3% de agua, de donde también se puede considerar estos valores ensayados a la temperatura de 150°C.

Prueba Nro. 3.- Para esta temperatura se tiene que la vida media cumple con el parámetro establecido, pero la expansión esta fuera de los parámetros sugeridos por lo cual se descarta los valores ensayados a la temperatura de 160 °C.

Prueba Nro. 4.- Para esta temperatura se tiene que la vida media cumple con el parámetro establecido, pero la expansión está fuera de los parámetros sugeridos por lo cual se descarta los valores ensayados a la temperatura de 170 °C.

Por lo tanto, los valores de vida media y expansión óptimos se obtienen en base al criterio que se sugiere favorecer la vida media en desmedro de la expansión a una temperatura de 150 °C y a un 2.5% de agua. Donde tomando en cuenta la gráfica de la prueba N° 2 asumiremos un 2.7% de agua a adicionar.

3.3.3.2 Caracterización del agregado

Para determinar si la estabilización con asfalto será efectiva, se debe determinar el índice de plasticidad (IP) y en base a este valor realizar un análisis.

Índice de plasticidad. Para la estabilización con asfalto espumado el índice de plasticidad (IP) se recomienda valores menores a 10. No obstante, cuando el material posee un IP superior a 10, pero menor a 15, es posible pre tratarlo con cal hidratada para reducir el IP, antes de la estabilización con asfalto.

Por lo cual en la tabla 35 se tiene para la muestra extraída el siguiente análisis:

Tabla 35. Índice de plasticidad para análisis dentro de la estabilización con A.E.

Nro. de muestra	Índice de plasticidad (IP)	Verificación
Muestra de suelo	6.86	< 10

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, no es necesario pre tratar la muestra con cal hidratada ya que este valor es menor a 10.

3.3.3.3 Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de estabilización para la mezcla suelo - asfalto, ya que se trata de una investigación en el que se desea saber el efecto que tiene el asfalto espumado mezclado con el suelo, para esto se asumió cantidades de asfalto espumado de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, con estos contenidos de asfalto elaborar moldes para ensayarlos en el equipo de compresión; para finalmente analizar los resultados obtenidos.

3.3.3.4 Propiedades mecánicas de las mezclas de asfalto espumado

Para determinar las propiedades mecánicas de la mezcla suelo - asfalto espumado, se siguió el siguiente procedimiento:

3.3.3.4.1 Fabricación de moldes

Para la fabricación de las briquetas o moldes de ensayo, tomando en cuenta que el suelo será alterado con el asfalto espumado, el procedimiento que se realizó fue el siguiente:

Suelo:

Se tamizó el material por la malla Nro. 4 (figura 60), luego con la humedad óptima determinada en el ensayo de Próctor se humedeció el material para su posterior mezclado con el asfalto espumado y su compactación.

Figura 60. Suelo tamizado malla Nro. 4. humedad óptima



Fuente: Elaboración propia

Asfalto espumado

Para el asfalto ya con los parámetros óptimos establecidos se procedió a preparar el asfalto espumado calentando el asfalto a la temperatura de 150°C y con un porcentaje de agua de 2.7% del peso del asfalto ya que cuyos datos nos dan un espumado óptimo.

Seguidamente se introdujo el asfalto espumado a la mezcla de suelo ya humedecida (figura 61) tomando en cuenta que el mezclado debe ser rápido para tener una consistencia uniforme en la mezcla, antes que el asfalto recupere su volumen inicial y baje su temperatura.

Figura 61. Proceso de espumado del asfalto y mezclado con el suelo



Fuente: Elaboración propia

Una vez ya obtenida la mezcla suelo-asfalto espumado, usando el aparato mini Harvard se procedió a elaborar los moldes (tres moldes por cada porcentaje de asfalto) compactando 5 capas con 25 golpes por cada capa (figura 62).

Figura 62. Fabricación de moldes en aparato mini Harvard



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se extrajo los moldes se registró su peso, la altura, el diámetro y se envolvió cada muestra con papel film (figura 63) para conservar su humedad y así ser ensayado en la prensa de compresión en condición húmeda.

Figura 63. Extracción de moldes y sellado con papel film



Fuente: Elaboración propia

Este mismo procedimiento se realizó para los demás porcentajes asumidos 4%, 6%, 8% y 10% de asfalto espumado

3.3.3.4.2 Procedimiento de ensayo de compresión.

Una vez obtenidos los datos que nos proporcionó el equipo los cuales fueron la deformación (mm) y la carga (N) hasta la falla de la muestra (figura 62), se procedió lo siguiente:

Figura 64. Proceso de ensayo de compresión de los moldes



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4.2.1 Cálculo de la deformación unitaria

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$$

Donde:

ε = Deformación unitaria

Δh = Variación de la altura leída en el extensómetro (mm)

h = Altura inicial de la muestra (cm)

3.3.3.4.2.2 Cálculo del área corregida:

$$A' = \frac{A}{(1 - \varepsilon)}$$

Donde:

A' = Área de la muestra corregida después de aplicada la carga (cm²).

A = Área inicial de la muestra (cm²).

ε = Deformación unitaria

3.3.3.4.2.3 Cálculo del esfuerzo en cualquier momento “t” del ensayo

$$\sigma = \frac{C}{A'}$$

Donde:

σ = Esfuerzo en cualquier momento “t” (kg/cm²)

A' = Área de la muestra corregida después de aplicada la carga (cm²).

C = Carga aplicada en kg.

Procesamiento de datos

3.3.3.4.3 Estabilización con 2% de asfalto espumado

Datos iniciales molde 1 con 2% de asfalto espumado:

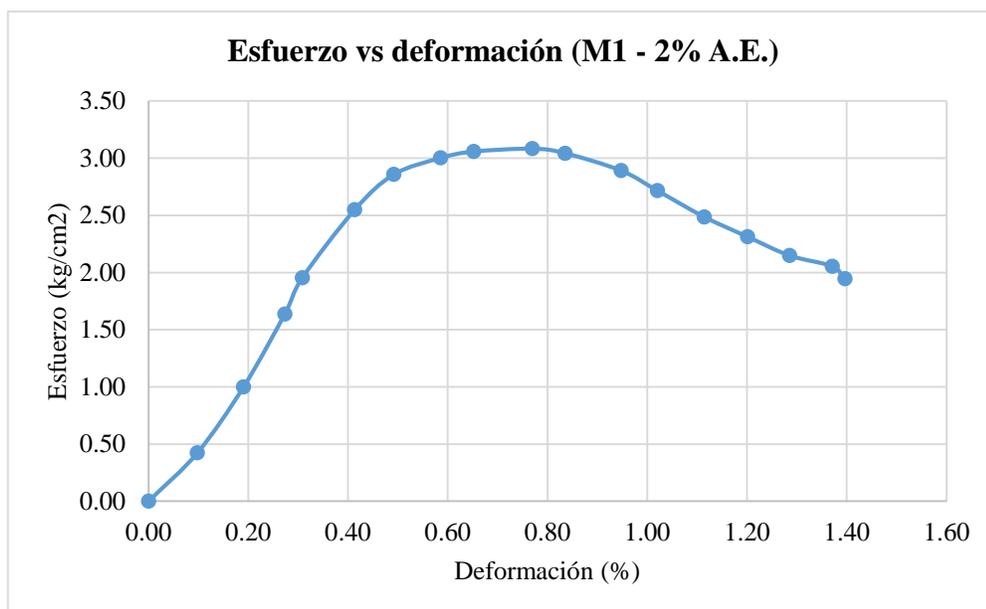
Diámetro	3.33 cm.
Altura Inicial	7.13 cm.
Área	8.73 cm ² ,
Volumen	62.25 cm ³ ,
Peso Húmedo	125.81 gr.
Peso Unitario	2.02 gr/cm ³
Altura Final	7.03 cm,

Tabla 36. Planilla de cálculo compresión inconfiada (M1 - 2% A.E.)

Δh (m.m.)	ϵ	1- ϵ	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.80	0	0.000	0.00	0.00
0.07	0.00098	0.99902	8.81	36.551	3.730	0.42	0.10
0.136	0.00191	0.99809	8.81	86.351	8.811	1.00	0.19
0.195	0.00273	0.99727	8.82	141.589	14.448	1.64	0.27
0.22	0.00308	0.99692	8.82	168.951	17.240	1.95	0.31
0.295	0.00414	0.99586	8.83	220.691	22.519	2.55	0.41
0.351	0.00492	0.99508	8.84	247.636	25.269	2.86	0.49
0.418	0.00586	0.99414	8.85	260.351	26.566	3.00	0.59
0.465	0.00652	0.99348	8.85	265.41	27.083	3.06	0.65
0.549	0.00770	0.99230	8.86	267.894	27.336	3.08	0.77
0.596	0.00836	0.99164	8.87	264.587	26.999	3.04	0.84
0.676	0.00948	0.99052	8.88	251.698	25.683	2.89	0.95
0.728	0.01021	0.98979	8.89	236.584	24.141	2.72	1.02
0.795	0.01114	0.98886	8.90	216.801	22.123	2.49	1.11
0.857	0.01201	0.98799	8.90	201.812	20.593	2.31	1.20
0.917	0.01286	0.98714	8.91	187.679	19.151	2.15	1.29
0.978	0.01371	0.98629	8.92	179.668	18.333	2.06	1.37
0.996	0.01396	0.98604	8.92	170.111	17.358	1.95	1.40

Fuente: Elaboración propia

Figura 65. Gráfica esfuerzo vs deformación molde 2 a 2% de A.E.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Resultados del ensayo compresión inconfiada

Molde	qu (kg/cm ²)	qu Prom (kg/cm ²)
1	3.08	3.06
2	3.13	
3	2.96	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4.4 Estabilización con 4% de asfalto espumado

Datos iniciales molde 1 con 4% de asfalto espumado:

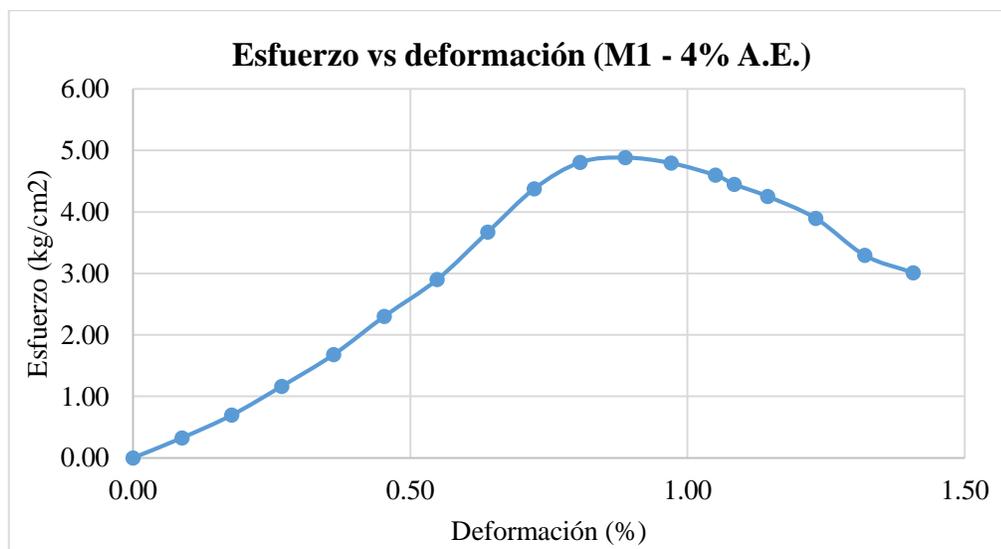
Diámetro	3.35 cm.
Altura Inicial	7.13 cm.
Área	8.81 cm ² ,
Volumen	62.84 cm ³ ,
Peso Húmedo	132.55 gr.
Peso Unitario	2.11 gr/cm ³
Altura Final	7.03 cm,

Tabla 38. Planilla de cálculo compresión inconfiada (M1 - 4% A.E.)

Δh (mm)	ϵ	$1-\epsilon$	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.81	0	0.000	0.00	0.00
0.063	0.00088	0.99912	8.82	28.205	2.878	0.33	0.09
0.127	0.00178	0.99822	8.83	60.256	6.149	0.70	0.18
0.191	0.00268	0.99732	8.84	100.855	10.291	1.16	0.27
0.258	0.00362	0.99638	8.85	145.727	14.870	1.68	0.36
0.323	0.00453	0.99547	8.85	199.679	20.375	2.30	0.45
0.391	0.00548	0.99452	8.86	251.927	25.707	2.90	0.55
0.456	0.00640	0.99360	8.87	319.165	32.568	3.67	0.64
0.516	0.00724	0.99276	8.88	380.944	38.872	4.38	0.72
0.575	0.00806	0.99194	8.89	418.631	42.717	4.81	0.81
0.633	0.00888	0.99112	8.89	425.698	43.439	4.88	0.89
0.692	0.00971	0.99029	8.90	418.235	42.677	4.79	0.97
0.749	0.01050	0.98950	8.91	401.23	40.942	4.60	1.05
0.773	0.01084	0.98916	8.91	388.621	39.655	4.45	1.08
0.816	0.01144	0.98856	8.92	371.658	37.924	4.25	1.14
0.878	0.01231	0.98769	8.92	340.691	34.764	3.90	1.23
0.941	0.01320	0.98680	8.93	288.33	29.421	3.29	1.32
1.003	0.01407	0.98593	8.94	263.919	26.931	3.01	1.41

Fuente: Elaboración propia

Figura 66. Gráfica esfuerzo vs deformación molde 2 a 2% de A.E.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Resultados del ensayo compresión inconfiada

Molde	qu (kg/cm ²)	qu Prom (kg/cm ²)
1	4.88	4.99
2	5.13	
3	4.96	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4.5 Estabilización con 6% de asfalto espumado

Datos iniciales molde 1 con 6% de asfalto espumado.

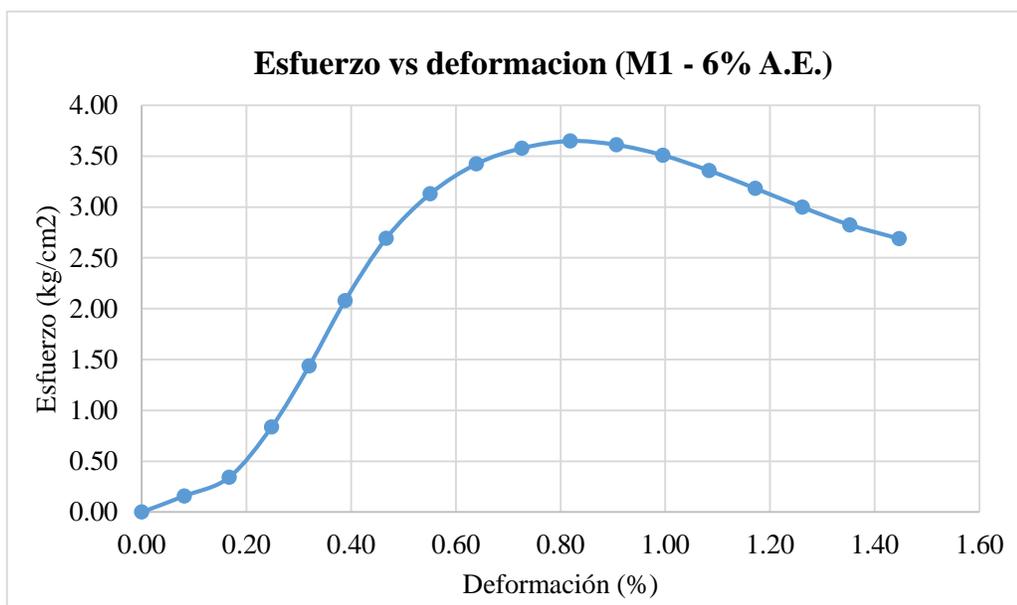
Diámetro	3.34 cm.
Altura Inicial	7.13 cm.
Área	8.78 cm ² ,
Volumen	62.62 cm ³ ,
Peso Húmedo	124.87 gr.
Peso Unitario	1.99 gr/cm ³
Altura Final	7.03 cm,

Tabla 40. Planilla de cálculo compresión inconfiada (M1 - 6% A.E.)

Δh (mm)	ϵ	1- ϵ	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.78	0	0.000	0.00	0.00
0.058	0.00081	0.99919	8.79	13.675	1.395	0.16	0.08
0.119	0.00167	0.99833	8.79	29.487	3.009	0.34	0.17
0.177	0.00248	0.99752	8.80	72.222	7.370	0.84	0.25
0.228	0.00320	0.99680	8.81	123.932	12.646	1.44	0.32
0.277	0.00388	0.99612	8.81	179.537	18.320	2.08	0.39
0.333	0.00467	0.99533	8.82	232.642	23.739	2.69	0.47
0.393	0.00551	0.99449	8.83	270.758	27.628	3.13	0.55
0.456	0.00639	0.99361	8.84	296.454	30.250	3.42	0.64
0.518	0.00726	0.99274	8.84	310.159	31.649	3.58	0.73
0.584	0.00819	0.99181	8.85	316.582	32.304	3.65	0.82
0.647	0.00907	0.99093	8.86	313.585	31.998	3.61	0.91
0.71	0.00995	0.99005	8.87	305.019	31.124	3.51	1.00
0.773	0.01084	0.98916	8.88	292.171	29.813	3.36	1.08
0.836	0.01172	0.98828	8.88	277.182	28.284	3.18	1.17
0.9	0.01262	0.98738	8.89	261.336	26.667	3.00	1.26
0.965	0.01353	0.98647	8.90	246.347	25.137	2.82	1.35
1.032	0.01447	0.98553	8.91	234.784	23.958	2.69	1.45

Fuente: Elaboración propia

Figura 67. Gráfica esfuerzo vs deformación molde 1 a 6% de A.E.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Resultados del ensayo compresión inconfiada

Molde	qu (kg/cm2)	qu Prom (kg/cm2)
1	3.65	3.54
2	3.58	
3	3.40	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4.6 Estabilización con 8% de asfalto espumado

Datos iniciales molde 1 con 8% de asfalto espumado:

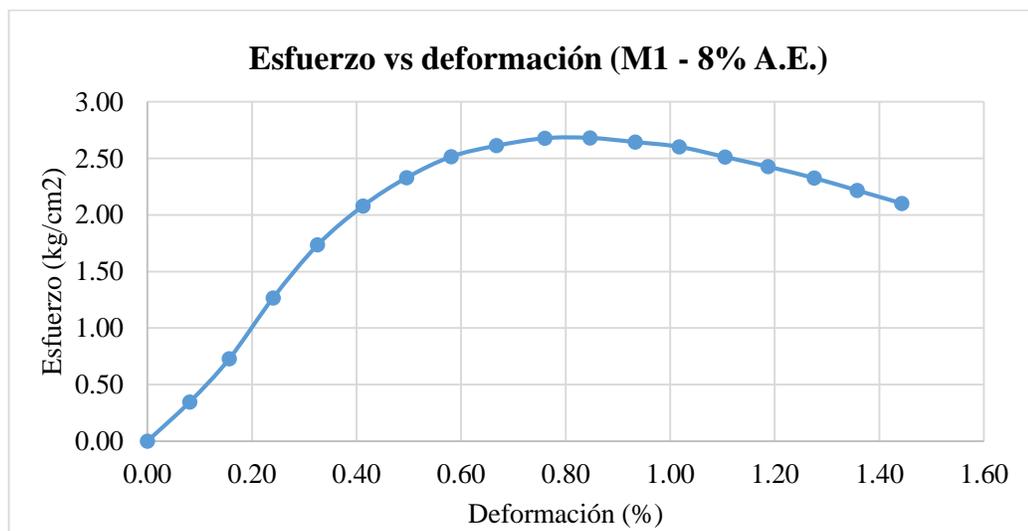
Diámetro	3.35 cm.
Altura Inicial	7.16 cm.
Área	8.80 cm ² ,
Volumen	62.98 cm ³ ,
Peso Húmedo	124.55 gr.
Peso Unitario	1.98 gr/cm ³
Altura Final	7.06 cm,

Tabla 42. Planilla de cálculo compresión inconfiada (M1 - 8% A.E.)

Δh (m.m.)	ϵ	$1-\epsilon$	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.80	0	0.000	0.00	0.00
0.058	0.00081	0.99919	8.80	29.915	3.053	0.35	0.08
0.112	0.00156	0.99844	8.81	62.821	6.410	0.73	0.16
0.172	0.00240	0.99760	8.82	109.402	11.163	1.27	0.24
0.233	0.00325	0.99675	8.83	150	15.306	1.73	0.33
0.295	0.00412	0.99588	8.83	179.974	18.365	2.08	0.41
0.355	0.00496	0.99504	8.84	201.816	20.593	2.33	0.50
0.416	0.00581	0.99419	8.85	218.09	22.254	2.52	0.58
0.478	0.00668	0.99332	8.86	226.655	23.128	2.61	0.67
0.544	0.00760	0.99240	8.86	232.651	23.740	2.68	0.76
0.606	0.00846	0.99154	8.87	233.079	23.784	2.68	0.85
0.668	0.00933	0.99067	8.88	230.081	23.478	2.64	0.93
0.728	0.01017	0.98983	8.89	226.655	23.128	2.60	1.02
0.791	0.01105	0.98895	8.89	218.946	22.341	2.51	1.10
0.85	0.01187	0.98813	8.90	211.666	21.599	2.43	1.19
0.913	0.01275	0.98725	8.91	203.1	20.724	2.33	1.28
0.972	0.01358	0.98642	8.92	193.678	19.763	2.22	1.36
1.033	0.01443	0.98557	8.93	183.828	18.758	2.10	1.44

Fuente: Elaboración propia

Figura 68. Grafica esfuerzo vs deformación molde 1 a 8% de A.E.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Resultados del ensayo compresión inconfiada

Molde	qu (kg/cm ²)	qu Prom (kg/cm ²)
1	2.68	2.52
2	2.42	
3	2.45	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4.7 Estabilización con 10% de asfalto espumado.

Datos iniciales:

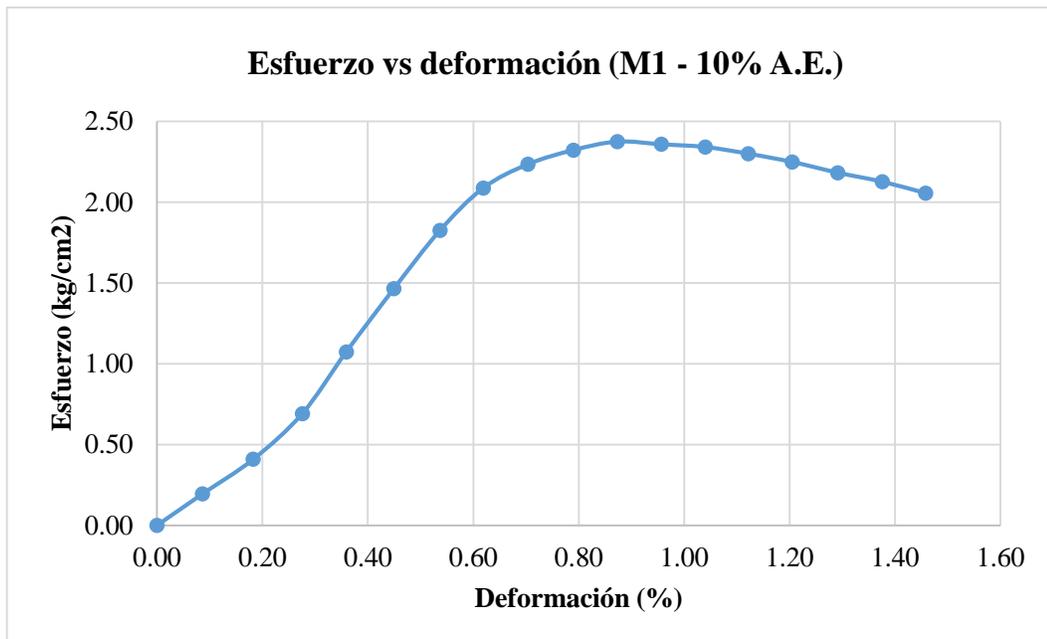
Diámetro	3.34 cm.
Altura. Inicial	7.08 cm.
Área	8.74 cm ² ,
Volumen	61.88 cm ³ ,
Peso. Húmedo	120.64 gr.
Peso. Unitario	1.95 gr/cm ³
Altura Final	6.97 cm,

Tabla 44. Planilla de cálculo compresión inconfiada (10% A.E.)

Δh (mm)	ϵ	1- ϵ	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.74	0	0.000	0.00	0.00
0.061	0.00086	0.99914	8.75	16.667	1.701	0.19	0.09
0.129	0.00182	0.99818	8.76	35.043	3.576	0.41	0.18
0.195	0.00276	0.99724	8.77	59.402	6.061	0.69	0.28
0.254	0.00359	0.99641	8.78	92.308	9.419	1.07	0.36
0.318	0.00449	0.99551	8.78	126.068	12.864	1.46	0.45
0.38	0.00537	0.99463	8.79	157.268	16.048	1.83	0.54
0.438	0.00619	0.99381	8.80	179.966	18.364	2.09	0.62
0.498	0.00704	0.99296	8.81	192.814	19.675	2.23	0.70
0.559	0.00790	0.99210	8.81	200.523	20.462	2.32	0.79
0.618	0.00873	0.99127	8.82	205.233	20.942	2.37	0.87
0.677	0.00957	0.99043	8.83	203.949	20.811	2.36	0.96
0.736	0.01040	0.98960	8.84	202.664	20.680	2.34	1.04
0.794	0.01122	0.98878	8.84	199.238	20.330	2.30	1.12
0.853	0.01205	0.98795	8.85	194.955	19.893	2.25	1.21
0.914	0.01292	0.98708	8.86	189.388	19.325	2.18	1.29
0.974	0.01376	0.98624	8.87	184.677	18.845	2.13	1.38
1.032	0.01458	0.98542	8.87	178.681	18.233	2.05	1.46

Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Grafica esfuerzo vs deformación molde 1 a 10% de A.E.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Resultados del ensayo compresión inconfiada

Molde	qu (kg/cm ²)	qu Prom (kg/cm ²)
1	2.37	2.27
2	2.19	
3	2.24	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.5 Humedad de rotura de los moldes

Para determinar la humedad con la que se realizó el ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

Luego de extraer las muestras se pesó cada molde en estado húmedo, y para conservar la humedad esta se envolvió en papel film (figura 70).

Figura 70. Muestras pesadas y envueltas en papel film



Fuente: Elaboración propia

Una vez ensayadas en la prensa a compresión se introdujo en el horno a temperatura constante de 60°C durante 24 hrs. Para luego extraer las muestras y registrar el peso seco de cada molde (figura 71).

Figura 71. Muestras extraídas del horno



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.5.1 Cálculo del contenido de humedad de rotura

En la tabla 46 se presenta los cálculos y resultados de la humedad de rotura.

Tabla 46. Cálculo del contenido humedad de rotura

Humedad de ensayo Molde 1 a 2% de A.E.			
Molde	1	2	3
Peso de molde húmedo	122.15	123.11	122.14
Peso de molde seco	113.41	115.53	114.57
Peso de cápsula	0	0	0
Peso de suelo seco	113.41	115.53	114.57
Peso del agua	8.74	6.56	7.57
Contenido de humedad	7.71	6.56	6.61
Promedio		7.79	

Fuente: Elaboración propia

Se determinó las humedades de rotura de los moldes realizando el mismo procedimiento, los resultados se presentan en la tabla 47.

Tabla 47. Humedad de rotura de las muestras de suelo con asfalto espumado

Molde	% A.E.	C.H. (%)	Promedio (%)
1	2	7.71	6.96
2		6.56	
3		6.61	
4	4	7.27	7.09
5		6.98	
6		7.02	
7	6	8.64	7.92
8		7.76	
9		7.35	
10	8	7.8	6.95
11		7.59	
12		5.46	
13	10	9.61	6.99
14		3.18	
15		8.18	

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV
PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados

Una vez procesado los datos para luego determinar los resultados finales se procede a analizar cada resultado observar la influencia que tuvo el asfalto espumado en la muestra de suelo coluvial.

La resistencia a la compresión inconfiada se emplea también para calificar la consistencia del suelo como muy blanda, blanda, mediana, firme, muy firme y dura de acuerdo con el valor obtenido en la tabla 48:

Tabla 48. Valores para calificar la consistencia del suelo

Consistencia del suelo	Resistencia a la compresión inconfiada	
	Kg/cm²	(KPa)
Muy blanda	< 0.25	<25
Blanda	0.25 – 0.50	25 – 50
Mediana	0.50 – 1.00	50 – 100
Firme	1.00 – 2.00	100 – 200
Muy firme	2.0 – 4.00	200 – 400
Dura	>4.00	>400

Fuente: compresión inconfiada en muestras de suelos I.N.V. 3-152

Para hacer un análisis comparativo se tiene que de la tabla anterior se observa que la muestra en estudio parte de una consistencia firme, y a medida que se fue añadiendo el asfalto esta fue aumentando, es decir q con 2% de asfalto espumado el suelo tuvo una

consistencia muy firme, ya aumentando la cantidad de asfalto espumado a 4% se tuvo una consistencia dura porque se tiene un valor que es mayor a 4, siendo este porcentaje el óptimo de estabilización; y posteriormente los demás porcentajes de asfalto espumado ya se tuvieron valores menores a 4 dando una consistencia nuevamente muy firme. Estos valores son debido a que en la muestra de suelo es del tipo grueso ya que para una estabilización con asfalto espumado el suelo debe tener parámetros de índice de plasticidad de entre 5 y 10.

4.1.1 Análisis de la influencia de los porcentajes de asfalto espumado

Para los datos obtenidos en el ensayo de compresión inconfiada, tomando en cuenta todos los datos de los moldes se tiene los siguientes resultados en la tabla 49:

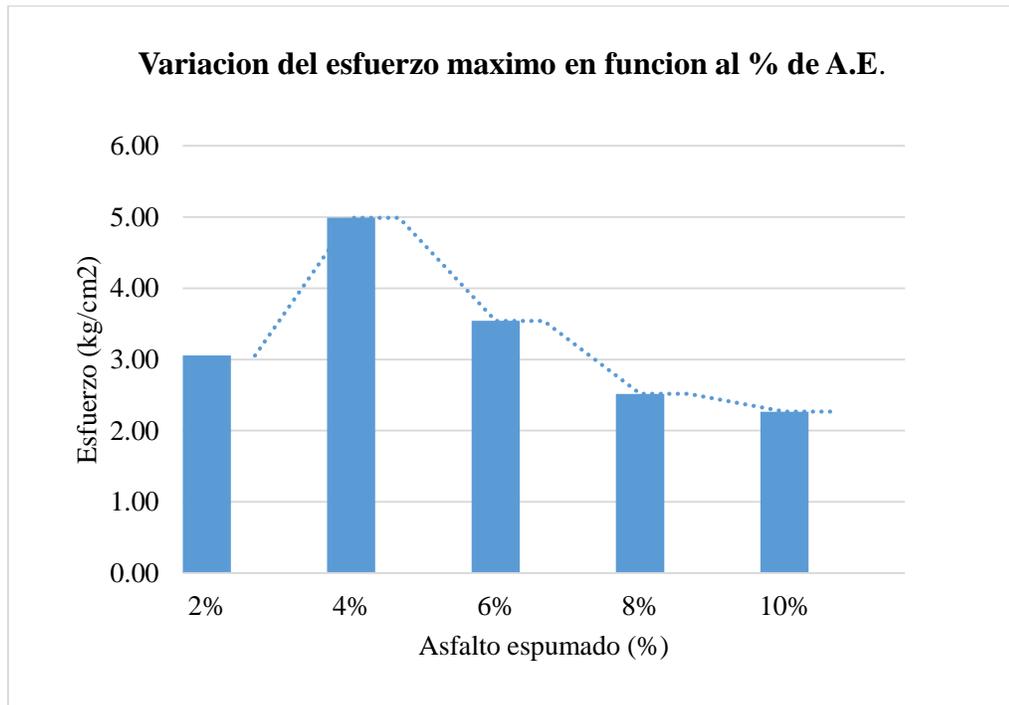
Tabla 49. Datos finales ensayo de compresión inconfiada

Nro. de molde	Porcentaje de asfalto espumado (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
1	2	3.08	3.06
2		3.13	
3		2.96	
1	4	4.88	4.99
2		5.13	
3		4.96	
1	6	3.65	3.54
2		3.58	
3		3.40	
1	8	2.68	2.52
2		2.42	
3		2.45	
1	10	2.37	2.27
2		2.19	
3		2.24	

Fuente: Elaboración propia

Según estos resultados se puede observar que con un porcentaje de 4% de asfalto espumado la estabilización es óptima (ver figura 72) siendo así este el valor buscado para la estabilización.

Figura 72. Grafica esfuerzo vs % de asfalto espumado



Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de resultados obtenidos mediante el ensayo de compresión inconfiada

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar la resistencia cortante máxima de la muestra de suelo estabilizada con asfalto espumado a través del ensayo de compresión inconfiada, en este capítulo se realizará un análisis estadístico de dichos resultados.

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes ensayos.

4.2.1 Compresión inconfiada de suelo coluvial

Datos para el molde 1

Diámetro = 3.35cm

Altura inicial = 7.15cm

Peso húmedo = 119.84gr

En la tabla 50 se presenta los resultados del ensayo de compresión inconfiada para el molde 1 de la muestra natural,

Tabla 50. Panilla de cálculo compresión inconfiada molde 1

Δh (m.m.)	ϵ	$1-\epsilon$	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.81	0	0.000	0.00	0.00
0.063	0.00088	0.99912	8.82	44.512	4.542	0.51	0.09
0.094	0.00132	0.99868	8.83	67.891	6.928	0.78	0.13
0.125	0.00175	0.99825	8.83	85.62	8.737	0.99	0.17
0.165	0.00231	0.99769	8.83	106.32	10.849	1.23	0.23
0.256	0.00358	0.99642	8.85	132.541	13.525	1.53	0.36
0.312	0.00437	0.99563	8.85	146.321	14.931	1.69	0.44
0.378	0.00529	0.99471	8.86	154.36	15.751	1.78	0.53
0.425	0.00595	0.99405	8.87	158.91	16.215	1.83	0.59
0.489	0.00684	0.99316	8.87	163.524	16.686	1.88	0.68
0.567	0.00793	0.99207	8.88	168.911	17.236	1.94	0.79
0.632	0.00884	0.99116	8.89	169.358	17.281	1.94	0.88
0.697	0.00975	0.99025	8.90	168.574	17.201	1.93	0.98
0.751	0.01051	0.98949	8.91	164.325	16.768	1.88	1.05
0.802	0.01122	0.98878	8.91	158.79	16.203	1.82	1.12
0.878	0.01229	0.98771	8.92	149.658	15.271	1.71	1.23
0.941	0.01317	0.98683	8.93	144.578	14.753	1.65	1.32
1.003	0.01403	0.98597	8.94	140.123	14.298	1.60	1.40

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 51 se presenta los resultados de la muestra de suelo natural mediante la cual se hará el análisis de los resultados.

Tabla 51. Resultado de resistencias cortantes máximas para suelo natural

Molde	q_u (kg/cm²)
1	1.94
2	1.88
3	1.81
Total datos	3

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1 Cálculo de los parámetros estadísticos.

Cálculo de la media:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n}$$

$$\bar{X} = 1.88$$

Cálculo de la desviación estándar:

$$Sx = \sqrt{\frac{(Xi - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$Sx = 0.049$$

Tabla 52. Resultados parámetros estadísticos suelo natural

Media	Mediana	Desviación estándar	Varianza	Mínimo	Máximo
1.845	1.845	0.049	0.0024	1.81	1.88

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Compresión inconfiada de suelo coluvial mezclado con asfalto espumado

Datos molde 1 con 2% de asfalto espumado

Diámetro = 3.33cm

Altura inicial = 7.13cm

Peso húmedo = 125.81gr.

En la tabla 53 se presenta los resultados del ensayo de compresión inconfiada para el molde 1 con 2% de asfalto espumado.

Tabla 53. Planilla de cálculo compresión inconfiada (2% A.E.) molde 1

Δh (m.m.)	ϵ	$1-\epsilon$	Ac (cm ²)	Carga (Nw)	Carga (kg)	σ (Kg/cm ²)	ϵ %
0	0.00000	1.00000	8.80	0	0.000	0.00	0.00
0.07	0.00098	0.99902	8.81	36.551	3.730	0.42	0.10
0.136	0.00191	0.99809	8.81	86.351	8.811	1.00	0.19
0.195	0.00273	0.99727	8.82	141.589	14.448	1.64	0.27
0.22	0.00308	0.99692	8.82	168.951	17.240	1.95	0.31
0.295	0.00414	0.99586	8.83	220.691	22.519	2.55	0.41
0.351	0.00492	0.99508	8.84	247.636	25.269	2.86	0.49
0.418	0.00586	0.99414	8.85	260.351	26.566	3.00	0.59
0.465	0.00652	0.99348	8.85	265.41	27.083	3.06	0.65
0.549	0.00770	0.99230	8.86	267.894	27.336	3.08	0.77
0.596	0.00836	0.99164	8.87	264.587	26.999	3.04	0.84
0.676	0.00948	0.99052	8.88	251.698	25.683	2.89	0.95
0.728	0.01021	0.98979	8.89	236.584	24.141	2.72	1.02
0.795	0.01114	0.98886	8.90	216.801	22.123	2.49	1.11
0.857	0.01201	0.98799	8.90	201.812	20.593	2.31	1.20
0.917	0.01286	0.98714	8.91	187.679	19.151	2.15	1.29
0.978	0.01371	0.98629	8.92	179.668	18.333	2.06	1.37
0.996	0.01396	0.98604	8.92	170.111	17.358	1.95	1.40

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 54 se presenta los resultados de la muestra de suelo coluvial ensayados con diferentes porcentajes de asfalto espumado de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% con tres moldes por cada porcentaje como se detalla a continuación:

Tabla 54. Resultado de resistencias cortantes máximas para suelo mas asfalto espumado

Nro. de molde	Porcentaje de asfalto espumado	Esfuerzo máximo
1	2%	3.08
2	2%	3.13
3	2%	2.96
4	4%	4.88
5	4%	5.13
6	4%	4.96
7	6%	3.65
8	6%	3.58
9	6%	3.40
10	8%	2.68
11	8%	2.42
12	8%	2.45
13	10%	2.37
14	10%	2.19
15	10%	2.24

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.1 Cálculo de los parámetros estadísticos

Se determinará el cálculo de la media y la desviación estándar de las resistencias cortantes de suelos estabilizados con diferentes porcentajes de asfalto espumado determinados mediante el ensayo de compresión inconfiada.

Cálculo de la media:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n}$$

$$\bar{X} = 3.29$$

Cálculo de la desviación estándar:

$$Sx = \sqrt{\frac{(Xi - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$S_x = 1.04$$

Tabla 55. Resultados parámetros estadísticos suelo + asfalto espumado

Media	Mediana	Desviación estándar	Varianza	Mínimo	Máximo
3.28	3.045	1.04	1.08	2.19	5.13

Fuente: Elaboración propia

4.3 Validación de la hipótesis

Para la validación de la hipótesis planteada en esta investigación a partir de los resultados obtenidos de la resistencia cortante del suelo estabilizado y el suelo natural, se plantea lo siguiente:

4.3.1 Hipótesis de la investigación

Partimos de la hipótesis planteada en el proyecto:

“La adición de asfalto espumado a diferentes porcentajes mejora la resistencia cortante de una muestra de suelo coluvial”

4.3.1.1 Hipótesis alternativa H_1

Se plantea la siguiente hipótesis alternativa:

“La media muestral de resistencias es mayor que su media poblacional de suelo coluvial”

$$\bar{X} > \mu$$

4.3.1.2 Hipótesis nula H_0

La hipótesis nula será lo contrario de la hipótesis alternativa, es decir:

“La media muestral de resistencias es menor que su media poblacional de suelo coluvial”

$$\bar{X} < \mu$$

Una vez definida ambas hipótesis se procede a realizar la prueba de validez de la hipótesis del proyecto.

4.3.2 Prueba de hipótesis mediante el método T-Student

Para la prueba se usará el método T-Student:

Grados de libertad

$$GL = n - 1$$

$$GL = 14$$

En la tabla 56 se tienen los datos para la prueba T-Student:

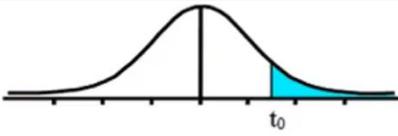
Tabla 56. Datos para la prueba T-Student

Media de la población $\mu =$	1.88
Numero de datos n =	15
Nivel de confianza NC =	95%
Nivel de significancia NS =	5%
Media de la muestra $X_m =$	3.29
Desviación estándar	1.04
Grados de libertad GL =	14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57. Tabla t-Student

Tabla t-Student

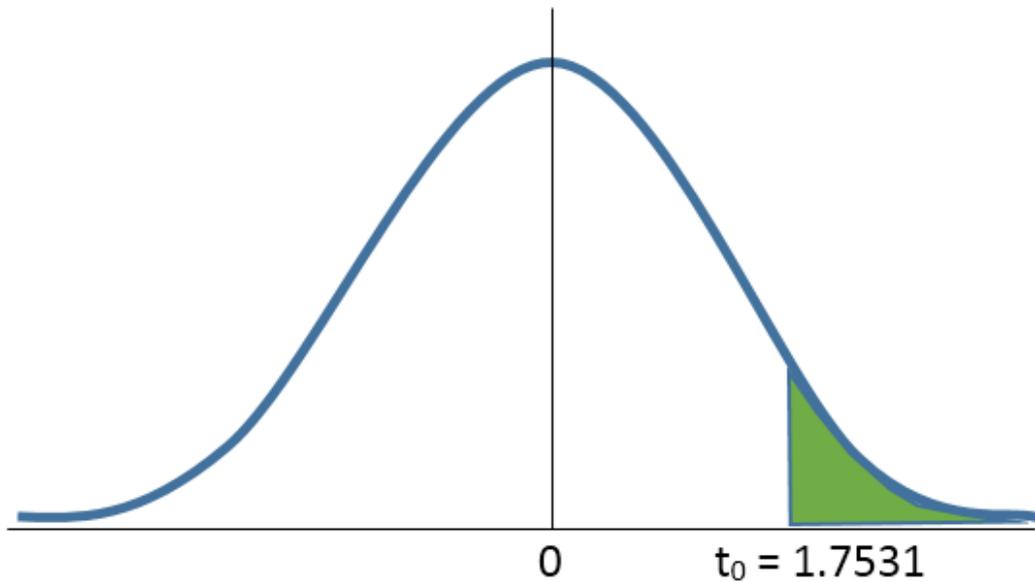


Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467

Fuente: <https://www.slideshare.net/davinsonbmx/tabla-distribucion-t-de-student>

De la tabla para el grado de libertad y para un nivel de significancia se tiene:

$$t_0 = 1.7531$$



Cálculo del valor de t

$$t = \frac{\bar{X} - m}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

\bar{X} = Media muestral

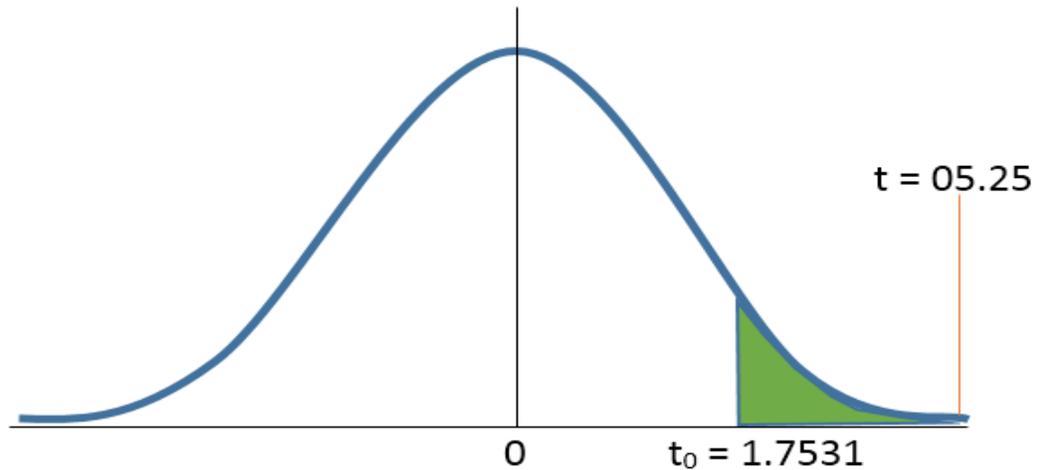
m = Media poblacional

S = Desviación estándar muestral

n = Número de datos

$$t = \frac{3.29 - 1.88}{\frac{1.04}{\sqrt{15}}} = 5.25$$

Gráfica de distribución T-Student.



Conclusión:

El valor cae en la zona de rechazo, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula H_0 , significa que el valor estudiado ha influido significativamente en los resultados y se acepta la hipótesis alternativa $H_1: X_m > \mu$

Al realizar la prueba de la hipótesis planteada para este proyecto “*Análisis de la influencia del asfalto espumado en la resistencia cortante mediante la compresión inconfiada de suelos coluviales*”, se concluye que es válida la hipótesis.

4.4 Análisis de precios unitarios sobre estabilización de suelos con asfalto espumado.

Para tener una idea de cuánto costara aplicar esta metodología en obra se presenta el análisis de precios unitarios.

En la tabla 58 se presenta el análisis de precios unitarios del siguiente ítem: extracción del suelo coluvial y transporte con un rango entre 10 y 20 km de distancia.

Tabla 58. Formulario B-2 - Análisis de precios unitarios

Formulario B-2					
Análisis de precios unitarios					
Proyecto: Mejoramiento de suelos coluviales con asfalto espumado					
Actividad: Extracción de suelo coluvial y transporte (10 – 20 km)					
Unidad :		[m3]	Moneda.		Bs
Descripción	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total	
1 Materiales					
Total Materiales					0.000
2 Mano de Obra					
1	Operador de equipo pesado	hr	0.06	20.30	1.22
2	Chofer	hr	0.08	20.30	1.62
3	Ayudante	hr	0.10	15.00	1.50
Cargas Sociales 55% del sub total M. O.					2.39
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)					1.01
Total Mano de Obra					7.74
3 Equipo, Maquinaria y Herramientas					
1	Excavadora	hr	0.06	212.90	12.74
2	Volqueta 12 cubos	hr	0.08	160.00	12.80
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra					0.39
Total Eq, Maq. y Herr.					25.92
4 Gastos Generales y Administrativos					
Gastos Generales 10% (1+2+3)					3.37
5 Utilidad					
Utilidad 5% (1+2+3+4)					1.85
6 Impuestos					
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)					1.20
Total Ítem Precio Unitario					40.08

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 59 se presenta el análisis de precios unitarios del siguiente ítem: estabilización de suelo coluvial con asfalto espumado y compactado.

Tabla 59. Formulario B-2 - Análisis de precios unitarios

Formulario B-2					
Análisis de precios unitarios					
Proyecto: Mejoramiento de suelos coluviales con asfalto espumado					
Actividad: Estabilización de suelo coluvial con asfalto espumado y compactado					
Unidad :		[m3]	Moneda. Bs		
Descripción	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total	
1 Materiales					
Total Materiales					0.00
2 Mano de Obra					
1	Especialista	hr	0.04	33.70	1.35
2	Operador de equipo de asfalto espumado WR200 Wirtgen	hr	0.08	25.00	2.00
3	Operador de equipo pesado	hr	0.11	19.80	2.18
4	Chofer	hr	0.10	20.30	2.03
5	Ayudante	hr	0.12	15.00	1.34
Cargas Sociales 55% del sub total M. O.					4.90
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)					2.06
Total Mano de Obra					15.86
3 Equipo, Maquinaria y Herramientas					
1	Compactadora rodillo liso	hr	0.05	343.80	17.19
2	Motoniveladora	hr	0.06	325.80	19.55
3	Equipo de producción de asfalto espumado WR200 Wirtgen	hr	0.08	680.00	54.40
4	Camión cisterna de agua	hr	0.05	171.00	8.55
5	Camión cisterna de asfalto	hr	0.05	169.90	8.50
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra					0.79
Total Eq, Maq. y Herr.					108.98
4 Gastos Generales y Administrativos					
Gastos Generales 10% (1+2+3)					12.48
5 Utilidad					
Utilidad 5% (1+2+3+4)					6.87
6 Impuestos					
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)					4.46
Total Ítem Precio Unitario					148.64

Fuente: Elaboración propia

4.5 Especificación técnica

Ítem: Mejoramiento de suelo coluvial con asfalto espumado

Descripción

Este trabajo consistirá en el mejoramiento de un suelo coluvial mezclado con asfalto espumado, dicho suelo mejorado tendrá su aplicación en base a sus propiedades según requiera el proyecto.

La explotación de este material deberá realizarse de canteras debidamente autorizadas por la Dirección de Medio Ambiente del Municipio de donde se hará la explotación y aprobadas por Fiscalización.

Materiales herramientas y equipo

El material bituminoso estará constituido por asfalto de penetración 85/100 siendo este utilizado en las pruebas de laboratorio para el fin esperado.

El agregado será un suelo cuya plasticidad sea menor a 10 y mayor a 5 ya que si se tiene agregado con plasticidad mayor a 10 pero menor a 15 se debe reducir la plasticidad ya sea con un tratamiento con cal. Y si la plasticidad es mayor a 15 sustituir el material.

El agua requerida para el humedecimiento previo de los agregados pétreos estará libre de materia orgánica y de elementos químicos que dificulten el proceso de mezclado y el curado de la mezcla. Su pH, medido según norma ASTM D-1293, deberá estar entre cinco y medio y ocho (5.5 - 8.0)

El tipo de equipo requerido para la extracción, traslado del material a la planta y colocado del material estabilizado es el siguiente:

Excavadora, cargador frontal, volqueta de 12 cubos, equipo compacto de laboratorio para asfalto espumado de Wirtgen, rodillo liso, motoniveladora y camión cisterna.

Forma de ejecución

Comprende operación de extracción, transporte, distribución, mezcla y humedecimiento o desecación, compactación y acabado realizada sobre el terreno natural debidamente preparada.

Para obtener la mezcla del suelo con el asfalto espumado de manera óptima se debe seguir el procedimiento detallado a continuación:

Asfalto espumado: La temperatura del asfalto debe estar a 150°C cuyo valor es el que proporciona un espumado óptimo, este se lo debe realizar en el equipo compacto de laboratorio para asfalto espumado de Wirtgen con una presión de aire mayor a 3 bar.

Agua: El porcentaje óptimo de agua a añadir debe ser de 2.7% respecto del peso del asfalto, valor que proporciona una vida media óptima para mezclado con el agregado.

Suelo coluvial: Para la preparación del suelo se debe evaluar la plasticidad cuyo valor debe estar entre 5 y 10, posteriormente humedecer el suelo con la humedad obtenida en el ensayo de Próctor cuyo valor es de 6.82% de humedad.

Suelo estabilizado: Para el mejoramiento del suelo coluvial se añadirá un 4% del peso de suelo de asfalto espumado, mezclando estos materiales en una mezcladora tipo “pugmill” (Wirtgen, 2012) obteniendo una mezcla homogénea. Una vez obtenida la mezcla se procederá a trasladar a la obra para luego ser compactada con el rodillo pata de cabra.

Medida.

Las cantidades a pagarse, serán los metros cúbicos de material estabilizado con asfalto espumado efectivamente colocado en la obra.

Forma de pago

El pago se hará por metro cúbico de material estabilizado con asfalto espumado.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

Una vez concluido el trabajo y obtenido los resultados tanto en el laboratorio como en gabinete se llega a las siguientes conclusiones:

- El proceso de investigación cumplió satisfactoriamente con los objetivos trazados en el proyecto tanto en la elaboración de los ensayos de laboratorio como en el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos
- La hipótesis planteada en el proyecto fue calificada como verdadera ya que la resistencia cortante del suelo aumenta significativamente en función a la resistencia cortante del suelo sin estabilizar, siendo que desde el primer porcentaje (2%) de asfalto espumado añadido al suelo este ya tenía un aumento de resistencia considerable.
- Esta metodología del asfalto espumado es nueva en nuestro medio ya que no se cuenta con normas regidas para el procedimiento de construcción y su aplicación por esta razón la aplicación se basó en base a metodologías de otros países para su estudio y aplicación en nuestro medio.
- El cemento asfáltico de penetración 85-100 utilizado en la práctica es eficiente para aplicar como asfalto espumado dentro de la estabilización de suelos como en este caso en particular no descartando los otros tipos de asfalto ya que en el campo de la estabilización no se requieren asfaltos con características especiales para usarlos, y esto hace que esta metodología sea viable para aplicar dentro del campo de la construcción por ser esta económica, la desventaja de esta metodología es que el o los equipos para producir asfalto espumado tienen costos elevados.
- El cemento asfáltico usado en la práctica a mayor temperatura da un espumado pobre ya que calentar a elevadas temperaturas (mayores a 170°C temperatura de espumado óptimo), el cemento asfáltico no es adecuado para producir asfalto espumado por lo que da una expansión menor.
- Otra de las conclusiones a las cuales se llegó es que la muestra obtenida proveniente de un depósito coluvial, al analizar el índice de plasticidad este no debe ser mayor a 10 para obtener resultados óptimos ya que el asfalto espumado con presencia de suelos

finos elevados dentro de la mezcla, esta quita la rigidez a la misma dando como resultado un material flexible, ya que si en caso de haber obtenido un IP mayor a 10 ésta por lo menos debería ser menor a 15 y antes de mezclar con el asfalto espumado se debería pre tratar con cal para reducir la plasticidad.

- Dentro del análisis de los resultados finales se pudo observar que estabilizar un suelo con asfalto espumado esta aumenta su resistencia cortante, ya que el asfalto espumado da rigidez al suelo al momento de mezclar y esto hace que sea más resistente.
- La utilización de esta tecnología es de beneficio para nuestro medio por el aprovechamiento de los materiales estudiados que coadyuva a evitar la explotación de nuevos bancos de materiales y de esta manera reducir el impacto ambiental.

5.2 Recomendaciones

Luego de la conclusión de los ensayos y el procesamiento de datos se tiene las siguientes recomendaciones:

- Una vez ya teniendo los resultados finales del proyecto sobre cómo influye el asfalto espumado en la resistencia cortante del suelo coluvial, para su aplicación se debe tener muy en cuenta que el suelo no debe tener alta plasticidad ni tampoco una carencia de finos (IP: entre 5 y 10) para tener los resultados esperados.
- Se recomienda usar el mismo tipo de asfalto que se usó en el presente trabajo, para evitar variaciones en los resultados, y en cuanto a la temperatura para el espumado óptimo se puede tener variaciones pequeñas de 1 a 3 grados por encima y por debajo de la temperatura óptima.
- Al momento de obtener las lecturas de expansión tener en cuenta el volumen del recipiente que contiene el asfalto a cierta temperatura debe ser bien calibrado.
- También tener en cuenta el tiempo en la cual se da la vida media realizando las medidas con mucha precaución usando equipos sofisticados para esta lectura.
- Para la caracterización de los materiales, enfatizando en el cemento asfáltico se recomienda tener cuidado al momento de manipular el material (asfalto) ya que para determinar sus propiedades normalmente se trabaja a temperaturas elevadas y esto hace que el trabajo sea peligroso por lo que se podría dar accidentes por quemaduras con el asfalto.

- Dentro de la determinación de las propiedades del asfalto espumado (expansión y vida media), ya que se trabaja con cantidades elevadas de temperatura se debe tomar en cuenta los insumos de seguridad como ser: los guantes para manipular los recipientes que contienen el cemento asfáltico, usar lentes de protección para el momento de introducir agua al cemento asfáltico caliente ya que este proceso genera una reacción explosiva donde el operador debe observar el y medir el tiempo y el aumento de volumen de espumado del asfalto; se recomienda también el uso de ropa adecuada preferentemente un overol para evitar quemaduras causadas por el asfalto en todo el cuerpo.
- En el momento de realizar la mezcla de suelo-asfalto espumado, se recomienda que el mezclado debe ser rápido para evitar variaciones de temperatura en función a la temperatura óptima de espumado obtenido.
- No es recomendable trabajar con porcentajes elevados de asfalto espumado como lo asumido en el presente trabajo de 10%, ya que este porcentaje satura la mezcla y por lo tanto en vez de mejorar las propiedades del suelo esta las reduce como se expresa en los resultados