



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

MANUAL DE PRUEBAS DE LABORATORIO: Bases estabilizadas con asfalto espumado

Horacio Delgado Alamilla
Mayra Flores Flores

Publicación Técnica No.623
Sanfandila, Qro, 2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte por el Dr. Horacio Delgado Alamilla y la M en C Mayra Flores Flores.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna IE-15/19 Procedimiento de diseño y control de calidad de una base estabilizada con asfalto espumado.

Contenido

Índice de tablas	v
Índice de figuras	v
Sinopsis	ix
Abstract	xi
Resumen ejecutivo	xiii
Introducción	1
1 AE-I Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba	3
2 AE-II. Método de prueba para determinar por lavado la cantidad de material más fino que la malla de 0.075 mm (No.200)	11
3 AE-III. Método de prueba para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos	15
4 AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos ...	23
5 AE-V Método de prueba para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	27
6 AE-VI Método de prueba para determinar las características de compactación de un suelo usando energía modificada (56 000 ft-lbf/ft ³ (2700 kN-m/m ³)).....	37
7 AE-VII Método de prueba para preparar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado.....	53
8 AE-VIII Método de prueba para compactar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado en el compactador giratorio.....	61
9 AE IX Método de prueba para la compactación de especímenes de material granular y estabilizado por medio del martillo vibratorio	67
10 AE-X Método de prueba para determinarla Resistencia a la Tensión Indirecta (RTI) de material estabilizado con asfalto espumado (BSM)	75

11 AE XI Método de prueba para determinar las propiedades al corte de material estabilizado con asfalto espumado (BSM)	83
Bibliografía	93
Anexos	95

Índice de figuras

Figura 1.1	Separador mecánico.....	4
Figura 1.2	Uso del separador mecánico	6
Figura 1.3	Método de cuarteo.....	7
Figura 3.1	Ejemplo de curvas granulométricas.....	19
Figura 5.1	Dispositivo de límite líquido operado manualmente.....	28
Figura 5.2	Verificación de la altura de caída.....	28
Figura 5.3	Ranurador.....	28
Figura 5.4	Altura de caída.....	29
Figura 5.5	Manera de hacer la ranura para determinar el límite líquido.	31
Figura 5.6	Dispositivo de límite líquido antes de que la ranura haya cerrado.....	31
Figura 5.7	Dispositivo de límite líquido después que la ranura ha cerrado.....	31
Figura 5.8	Manera de formar el rollito de suelo para determinar su límite plástico	33
Figura 6.1	Molde cilíndrico de 101.60 mm (4").	38
Figura 6.2	Molde cilíndrico de 152.460 mm (6").	38
Figura 6.3	Patrón de compactación con pisón para molde de 4 in (101.6 mm) ..	45
Figura 6.4	Patrón de compactación con pisón para molde de 6 in (152.4 mm) ..	45
Figura 6.5	Ejemplo de curva de compactación.	49
Figura 7.1	Cálculo de la expansión y vida media del asfalto espumado.....	55
Figura 6.2	Determinación del contenido de agua óptimo para espumar.....	56
Figura 10.1	Diagrama de mordaza para tension indirecta.....	76

Índice de tablas

Tabla 2.3	Registro de resultados de material más fino que la malla No. 200	14
Tabla 2.2	Criterio r&R para el ensayo de material más fino que la malla No.200..	14
Tabla 3.1	Tamaño de muestra del agregado grueso.....	17
Tabla 3.2	Cantidad máxima permitida de material retenido en una malla, kg ...	18
Tabla 3.3	Registro de resultados de granulometría.....	20
Tabla 3.4	Criterio r&R para el ensayo de granulometría	21
Tabla 4.1	Masa mínima del espécimen de ensayo y resolución de la balanza .	24
Tabla 4.2	Registro de resultados de la prueba de contenido de agua.....	26
Tabla 4.3	r&R para la prueba de contenido de agua en suelos.....	26
Tabla 5.1	Factores para la obtención del límite líquido	34
Tabla 5.2	Registro de resultados de la prueba de límites de consistencia	35
Tabla 5.3	r&R para la prueba de límite líquido, límite plástico e índice plástico	36
Tabla 6.1	Masa mínima de la muestra de prueba	41
Tabla 6.2	Características de las variantes de la prueba de compactación	41
Tabla 6.3	Tiempos requeridos de curado (humedecimiento) de muestras	43
Tabla 6.4	Registro de resultados de la prueba de compactación Proctor modificada.....	50
Tabla 6.5	r&R para la prueba de compactación Proctor modificada.....	51
Tabla 7.1	Caudal de agua en el equipo WLB S 10.....	54
Tabla 7.2	Requerimientos de la relación de expansión y vida media del asfalto espumado.....	56
Tabla 7.3	Registro de resultados de la influencia del contenido de agua en la relación de expansión y la vida media.....	59
Tabla 7.4	Registro de resultados de la influencia de la temperatura en la relación de expansión y la vida media	60
Tabla 8.1	Recomendación de masas para especímenes.....	63
Tabla 8.2	Altura por cada espécimen	64
Tabla 8.3	Registro de resultados de prueba de compactación de especímenes de base estabilizada con asfalto en el compactador giratorio	66

Tabla 9.1	Masas recomendadas para especímenes	70
Tabla 9.2	Registro de resultados de compactación de especímenes con el compactador giratorio.....	73
Tabla 10.1	Registro de resultados de la prueba de resistencia a la tensión indirecta (RTI)	81
Tabla 11.1	Registro de resultados de la prueba Triaxial monotónica para material estabilizado con asfalto espumado (BSM)	90

Sinopsis

El presente documento presenta la recopilación de los métodos de prueba de laboratorio utilizados para diseñar bases estabilizadas con asfalto espumado, los cuales están basados en normas de la ASTM y el manual de laboratorio Wirtgen^{MR}.

Los métodos de prueba presentados se utilizan para caracterizar el agregado, determinar las propiedades de espumado del asfalto, determinar el contenido de agua y asfalto óptimo de la mezcla de asfalto espumado, así como evaluar su desempeño.

Asimismo, se presentan anexos los cuales tienen como objetivo explicar algunos de los requisitos de los métodos de prueba y ejemplificar procedimientos de cálculo de algunos métodos de prueba.

Abstract

This document presents the compilation of laboratory test methods used to design stabilized foamed asphalt bases, which are based on ASTM standards and the Wirtgen™ laboratory manual.

The specified test methods are used to characterize the aggregate, determine the foam properties of the asphalt, determine the optimum asphalt and water content of the foamed asphalt mix, and evaluate its performance.

Likewise, annexes are presented which aim to explain some of the requirements of the test methods and exemplify the calculation procedures of some test methods.

Resumen ejecutivo

El presente documento es un manual de pruebas, para diseñar bases estabilizadas con asfalto espumado, el cual es una recopilación y adecuación de métodos de prueba de normas ASTM y el manual de laboratorio Wirtgen^{MR}.

El manual describe los métodos de prueba para caracterizar el agregado, determinar las propiedades de espumado del asfalto, determinar el contenido de agua y asfalto óptimo de la mezcla de asfalto espumado, así como evaluar su desempeño. Se mencionan a continuación:

- AE-I Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba.
- AE-II Método de prueba para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.
- AE-III Método de prueba para determinar por lavado la cantidad de material más fino que la malla de 0.075 mm (No. 200)
- AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos.
- AE-V Método de prueba para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.
- AE-VI Método de prueba para determinar las características de compactación de un suelo usando energía modificada (56 000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)).
- AE-VII Método de prueba para preparar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado.
- AE-VIII Método de prueba para compactar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado en el compactador giratorio.
- AE-IX Método de prueba para la compactación de especímenes de material granular y estabilizado por medio del martillo vibratorio.
- AE-X Método de prueba para determinar la Resistencia a la Tensión Indirecta (RTI) de material estabilizado con asfalto espumado (BSM).
- AE-XI Método de prueba para determinar las propiedades al corte de un material estabilizado con asfalto espumado (BSM).

Al final del documento se presentan anexos los cuales tienen como objetivo los cuales tienen como objetivo explicar algunos de los requisitos de los métodos de prueba y ejemplificar procedimientos de cálculo de algunos métodos de prueba.

Introducción

El asfalto espumado es una técnica de reciclado en frío de pavimentos in situ que se ha utilizado con éxito en distintos países para la fabricación de capas de rodadura y estabilización de bases granulares. Esta técnica tiene varias ventajas, algunas de ellas son: aumenta la resistencia al corte y reduce la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados, da mayor rigidez a la capa de base haciéndola flexible y resistente a la fatiga, es amigable con el medio ambiente pues no se genera evaporación de volátiles en todo el proceso desde el mezclado hasta el curado.

El asfalto espumado se produce mediante un proceso en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 a 2 % con respecto al peso del asfalto) al asfalto caliente (160 a 180°C) dentro de una cámara de expansión, lo que genera instantáneamente el efecto de espuma en el asfalto (Jiménez A. Mónica, 2011).

Como en el caso de las mezclas asfálticas en caliente la mezcla de asfalto espumado también es diseñada en el laboratorio. El diseño de la mezcla de asfalto espumado comprende la caracterización del agregado (granulometría y plasticidad del polvo o filler), la determinación del contenido de agua y asfalto óptimo de la mezcla, y la evaluación de su desempeño.

El diseño de la mezcla de asfalto espumado requiere de la ejecución de pruebas de laboratorio. Para caracterizar el agregado se realizan las pruebas de granulometría y límites de consistencia, las propiedades de espumado del asfalto son caracterizadas por la vida media ($T_{1/2}$) y la relación de expansión (RE), el contenido de agua óptimo se determina con la prueba Proctor modificada y el contenido de asfalto óptimo con la prueba de resistencia a la tensión indirecta (RTI) mientras que el desempeño de la mezcla de asfalto espumado es evaluado con la prueba triaxial monótonica.

El presente manual contiene los métodos de prueba para el diseño de base estabilizada con asfalto espumado y tiene por objetivo servir como apoyo en la ejecución de las pruebas de laboratorio.

1. AE-I Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba.

1.1 Objetivo

Este procedimiento comprende tres métodos para la reducción de muestras grandes de agregado al tamaño apropiado para ensayos, empleando técnicas destinadas a minimizar las variaciones en las características medidas entre las muestras de ensayo seleccionadas y la muestra general.

1.2 Equipo y herramientas

- **Separador mecánico (Método A):** con un número par de canaletas (aberturas) de anchura igual, pero no menos de un total de ocho para el agregado grueso, o doce para el agregado fino, que se descargan alternativamente a cada lado del divisor. Para el agregado grueso o mixto, la anchura mínima de las canaletas individuales deberá ser aproximadamente un 50% mayor que la partícula más grande de la muestra. Para el agregado fino seco, en los que la muestra entera pasará por la malla de 9.5 mm (3/8"), se utilizará un separador mecánico con canaletas de 12.5 - 20 mm de ancho. El separador estará equipado con un mínimo de dos recipientes o receptáculos para alojar las dos mitades de la muestra después de la separación; así como una tolva para la alimentación de material. El separador y accesorios deberán estar diseñados de modo que la muestra fluya suavemente sin restricciones ni pérdida de material (figura 1.1 y figura 1.2).
- **Balanza** con resolución de 0.1 g y capacidad suficiente para determinar la masa de los receptáculos y la muestra que se va reduciendo.
- **Misceláneos** Método B (superficie regular): pala, brocha, y escoba; Método B (superficie irregular): lona, brocha, escoba, pala o tubo; Método C: charola, cucharón y testigo muestreador.

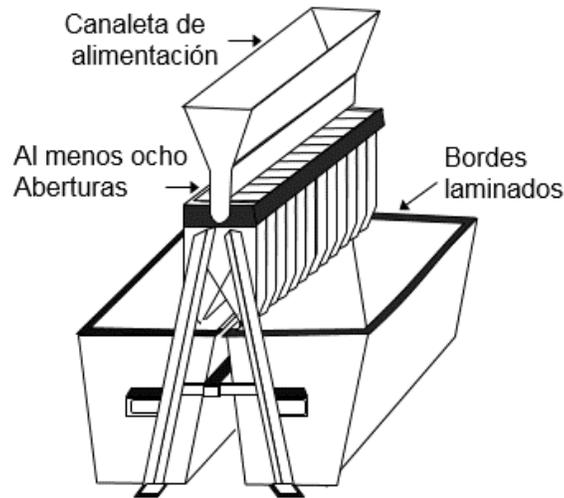


Figura 1.1 Separador mecánico

1.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos (1000, 3000, 5000, 6000, 10000 g) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

1.4 Método de prueba

1.4.1 Selección del método

Este método de prueba contempla tres métodos para realizar la reducción de material al tamaño de prueba, los cuales se deberán elegir en función del material que se desea reducir.

- 1.4.1.1 Para reducir las muestras de agregado fino que se encuentran en una condición más seca que la condición saturada superficialmente seca, utilizar el separador mecánico de acuerdo con el Método A.

Nota 1.1. El método para determinar la condición saturada superficialmente seca se describe en el Método de prueba para determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino (AG-III). Si el agregado fino conserva su forma cuando se moldea en la mano, se puede considerar que se encuentra más húmedo que la condición saturada superficialmente seca.

- 1.4.1.2 Para reducir el tamaño de muestras que contienen humedad libre en la superficie de las partículas, realizar el procedimiento de cuarteo, de acuerdo con el Método B o tratándolas como una muestra en miniatura de acuerdo con el Método C.

- 1.4.1.3 Si se desea utilizar el Método B o C, y la muestra no tiene humedad libre sobre la superficie de las partículas, humedecer la muestra para obtener

humedad libre en la superficie de las partículas, mezclar bien, y posteriormente proceder a reducir la muestra.

- 1.4.1.4 Si se desea utilizar el Método A y la muestra contiene humedad libre en la superficie de las partículas, secar toda la muestra hasta, por lo menos, la condición de superficie saturada, utilizando temperaturas que no excedan las especificadas para cualquiera de los ensayos contemplados; posteriormente, reducir al tamaño de la muestra. Alternativamente, si la muestra húmeda es muy grande, realizar una división preliminar utilizando un separador mecánico que tenga aberturas de **38 mm (1 ½")** o mayores, para reducir la muestra a no menos de **5 kg (10 lb)**. Secar la porción obtenida y reducirla al tamaño de la muestra de ensayo utilizando el Método A.

Agregados gruesos y mezclas de agregados gruesos y finos

- 1.4.1.5 Reducir la muestra utilizando un separador mecánico de acuerdo con el Método A (método preferido) o por cuarteo de acuerdo con el Método B. El Método C sobre cuarteo en miniatura no está permitido para agregados gruesos o mezclas de agregados gruesos y finos.

1.4.2 Preparación de la muestra

- 1.4.2.1 Obtener la muestra de agregado en campo de acuerdo con la *Práctica estándar para el muestreo de los agregados* (ASTM D75) o según lo requieran los métodos de prueba individuales.
- 1.4.2.2 Cuando sólo se contemplan ensayos para el análisis granulométrico, el tamaño de la muestra de campo establecida en la *Práctica estándar para el muestreo de los agregados* (ASTM D75), suele ser adecuado. Cuando se lleven a cabo ensayos adicionales, el usuario deberá asegurarse que el tamaño inicial de la muestra de campo es adecuado para realizar todas las pruebas previstas.

1.4.3 Ejecución de la prueba

Método A- Separador mecánico

- 1.4.3.1 Colocar la muestra total en la tolva y distribuirla uniformemente de un borde a otro, de manera que cuando pase por las canaletas, fluyan cantidades aproximadamente iguales por las mismas (figura 1.2).
- 1.4.3.2 Introducir la muestra a una velocidad tal que permita que fluya libremente a través de las canaletas y hacia los receptáculos inferiores. Con lo anterior, se obtendrá la primera división de la muestra.

- 1.4.3.3 Retirar el material de uno de los receptáculos y reservar. Esta porción de material se puede utilizar posteriormente para realizar reducciones para otros ensayos, cuando sea necesario.
- 1.4.3.4 Reintroducir el material del otro receptáculo nuevamente en la tolva (repetir puntos 1.4.3.1 a 1.4.3.2). Con lo anterior, se obtendrá una segunda división de la muestra.
- 1.4.3.5 Repetir el procedimiento (puntos 1.4.3.1 a 1.4.3.4) cuantas veces sea necesario, hasta obtener el tamaño de muestra requerido por el ensayo en uno de los receptáculos.

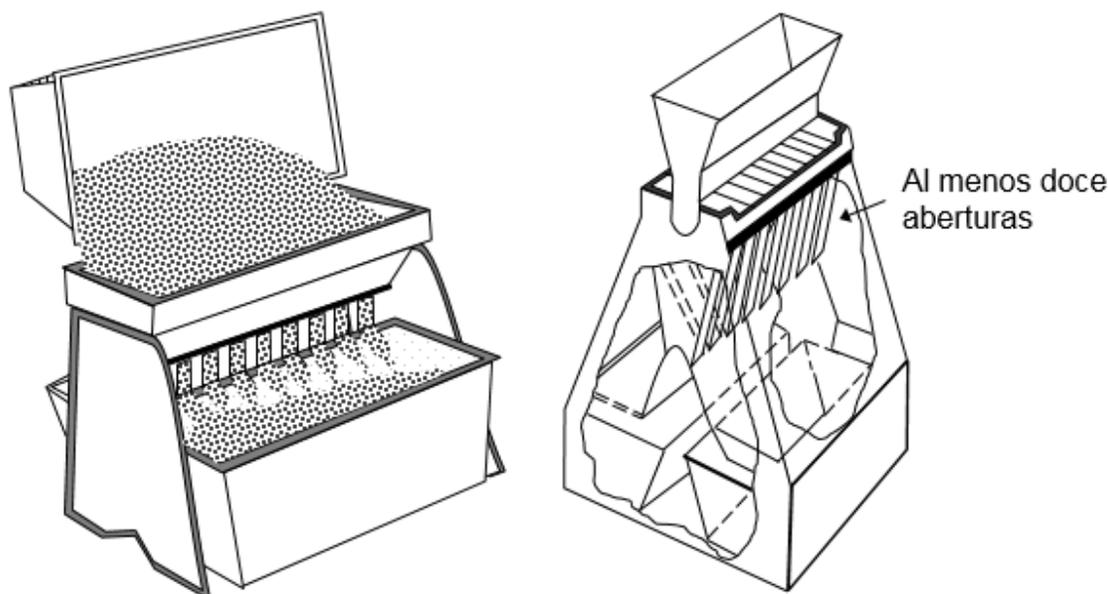


Figura 1.2 Uso del separador mecánico

Método B – Cuarteo

Procedimiento 1: superficie plana y nivelada

- 1.4.3.6 Colocar la muestra total sobre una superficie plana, rígida, limpia y nivelada, donde no exista el riesgo de pérdida de material o contaminación con otros materiales.
- 1.4.3.7 Mezclar bien todo el material mediante el traspaleo de la muestra tres veces. En el tercer traspaleo, se deberá formar una pila cónica, depositando el material de cada paleada encima de la precedente.
- 1.4.3.8 Aplanar cuidadosamente la pila cónica con un grosor y un diámetro uniformes presionando hacia abajo la punta de la pila utilizando la pala, de modo que cada cuarto (sector) de la pila aplanada resultante contenga el material original en ella.

1.4.3.9 El diámetro deberá ser de aproximadamente **4 a 8** veces el espesor de la pila aplanada.

1.4.3.10 Dividir la muestra aplanada en cuatro cuarteos iguales, haciendo uso de la pala, y teniendo cuidado de incluir en cada cuarto todo el material fino que le corresponde a dicho sector. Se deberá hacer uso de una brocha o escoba para separar completamente el material fino de cada cuarto.

Nota 1.2. Se recomienda dejar una separación entre cuarteos de aproximadamente 30 cm para evitar que el material se pueda volver a mezclar y cuidar que cada cuarto contenga el material que le corresponde.

1.4.3.11 Remover y apartar dos cuarteos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino, y cepillar los espacios despejados limpios. Esta porción de material se puede utilizar posteriormente para realizar reducciones para otros ensayos, cuando sea necesario.

1.4.3.12 Mezclar los dos cuarteos restantes y volver a formar la pila cónica. Repetir el procedimiento (puntos 1.4.3.7a 1.4.3.11) hasta que se obtenga de los dos cuarteos restantes, el tamaño de muestra requerido por el ensayo.

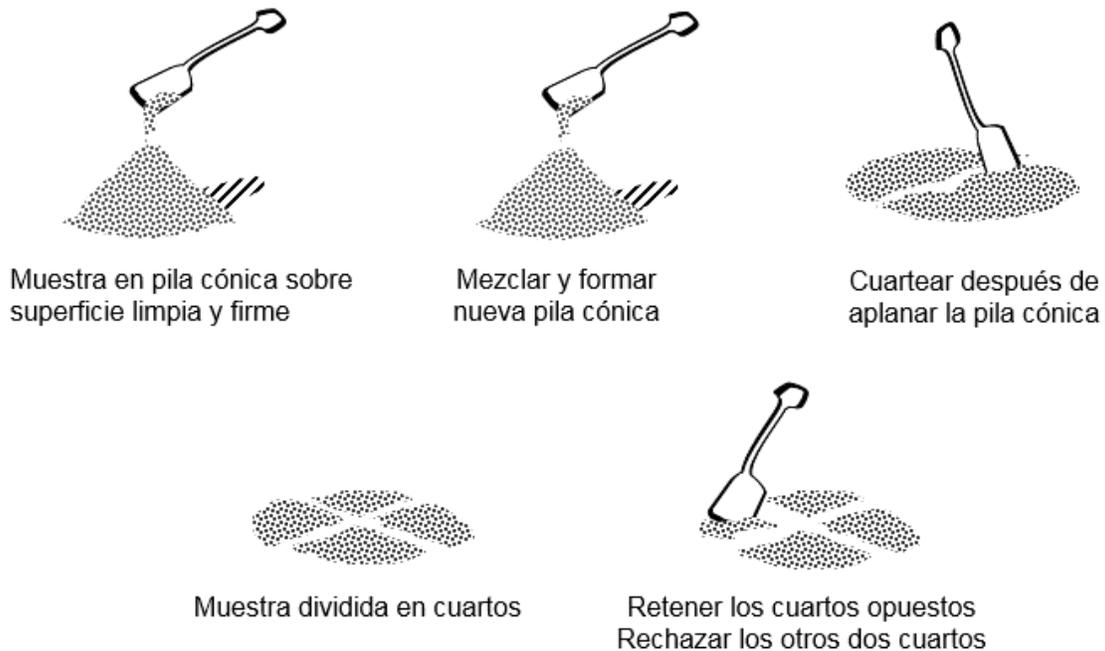


Figura 1.3 Método de cuarteo

Procedimiento 2: superficie irregular

1.4.3.13 Cuando la superficie de piso sea irregular, colocar la muestra total sobre una lona.

- 1.4.3.14 Mezclar bien todo el material mediante el traspaleo de la muestra tres veces. En el tercer traspaleo, se deberá formar una pila cónica, depositando el material de cada paleada encima de la precedente. Alternativamente, se puede mezclar el material levantando cada esquina de la lona y jalándola sobre la muestra en la dirección diagonalmente opuesta, promoviendo así el movimiento del material y la formación de la pila cónica.
- 1.4.3.15 Aplanar cuidadosamente la pila cónica con un grosor y un diámetro uniformes presionando hacia abajo la punta de la pila utilizando la pala, de modo que cada cuarto (sector) de la pila aplanada resultante contenga el material original en ella.
- 1.4.3.16 El diámetro deberá ser de aproximadamente **4 a 8** veces el espesor de la pila aplanada.
- 1.4.3.17 Dividir la muestra aplanada en cuatro cuarteos iguales haciendo uso de la pala; o alternativamente — si la superficie es muy irregular— insertar un tubo o tablón debajo de la lona y al centro de la pila, posteriormente levantar los dos extremos del tablón, dividiendo la muestra en dos partes iguales. Remover el tablón dejando un doblez en la lona entre las partes de muestra dividida. Insertar el tablón nuevamente debajo de la lona, pero a **90°** de la posición inicial. Levantar los dos extremos del tablón, dividiendo ahora la muestra en cuatro partes iguales.
- 1.4.3.18 Remover y apartar dos cuarteos diagonalmente opuestos, cuidando remover todo el material fino de la lona. Esta porción de material se puede utilizar posteriormente para realizar reducciones para otros ensayos, cuando sea necesario.
- 1.4.3.19 Mezclar los dos cuarteos restantes de acuerdo con el punto 1.4.3.14, y volver a formar la pila cónica. Repetir el procedimiento (puntos 1.4.3.15 a 1.4.3.18) hasta que se obtenga de los dos cuarteos restantes, el tamaño de muestra requerido por el ensayo.

Método C: Pila Cónica (solo agregado fino húmedo)

- 1.4.3.20 Colocar la muestra total de agregado fino húmedo sobre una charola o superficie limpia y nivelada donde no habrá pérdida de material ni contaminación con otros materiales.
- 1.4.3.21 Mezclar bien todo el material mediante el traspaleo de la muestra tres veces, haciendo uso de un cucharón. En el tercer traspaleo, se deberá formar una pila cónica, depositando el material de cada toma de material encima de la precedente.
- 1.4.3.22 Si se desea, aplanar cuidadosamente la pila cónica con un grosor y un diámetro uniformes presionando hacia abajo la punta de la pila, de modo

que cada cuarto (sector) de la pila aplanada resultante contenga el material originalmente en ella.

- 1.4.3.23 Obtener una muestra para cada ensayo mediante la selección de al menos 5 incrementos de material en ubicaciones aleatorias de la pila en miniatura haciendo uso del testigo muestreador.

2. AE-II. Método de prueba para determinar por lavado la cantidad de material más fino que la malla de 0.075 mm (No.200).

2.1 Objetivo

Determinar por lavado la cantidad de material más fino que la malla de 0.075 mm (No. 200). Con este método el material más fino puede ser separado completamente de las partículas más gruesas de manera más eficiente. Este método se utiliza antes del análisis granulométrico en la muestra previamente al cribado en seco (Método de prueba AE III).

2.2 Equipo y herramientas

- **Mallas**, de 0.075 mm (No. 200) y de 1.18 mm (No. 16). Deberán cumplir con las especificaciones de la norma *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y mallas* (ASTM E11).
- **Balanza**, con una capacidad de 5 000 g y una resolución de 0.1 g (ver Anexo A.4).
- **Horno**, capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.
- **Recipiente**, un vaso de aluminio de tamaño adecuado para contener la muestra cubierta con agua y que permita una agitación vigorosa sin que se pierda nada de la muestra ni del agua.
- **Agitador de varilla metálica**, de 6.3 mm de diámetro y 20 cm de longitud.

2.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza**. Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g se recomienda que la calibración sea en, al menos, 6 puntos (50, 100, 150, 200, 250 y 300 g) considerando el rango de trabajo y por lo menos, una vez cada 12 meses.
- **Mallas**. Calibrar o verificar con un instrumento de medición lineal (Vernier) calibrado, de acuerdo con las especificaciones de la norma *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y tamices* (ASTM E11) (ver Anexo A.1) y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

- **Horno.** Calibrar o verificar con una resolución de 1 °C o mayor en, al menos, 3 puntos (100, 110 y 120 °C) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

2.4 Método de prueba

2.4.1 Preparación del equipo

- 2.4.1.1 Verificar que las mallas estén limpias y libres de cualquier otro material.
- 2.4.1.2 Colocar la malla de 1.18 mm (No.16) sobre la malla de 0.075 mm (No. 200).

2.4.2 Preparación de la muestra

- 2.4.2.1 Muestrear el agregado de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para el muestreo de los agregados* (ASTM D75).
- 2.4.2.2 Mezclar completamente la muestra de agregado, homogeneizar y reducir el material de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de la prueba* (AG-I), hasta obtener la cantidad de muestra requerida.
- 2.4.2.3 La masa mínima de la muestra está en función del tamaño máximo nominal del agregado según la siguiente tabla.

Tamaño máximo nominal		Masa mínima g
mm	in	
4.75	No. 4	300
9.5	3/8"	1000
19.0	3/4"	2500
37.5	1 1/2"	5000

2.4.3 Ejecución de la prueba

- 2.4.3.1 Secar la muestra hasta masa constante a una temperatura de **110 ± 5 °C**.
- 2.4.3.2 Registrar la masa inicial de la muestra (**B**) con una aproximación de **0.1 g** (1 decimal).
- 2.4.3.2 Colocar la muestra en el recipiente y agregar suficiente agua hasta cubrirla.

- 2.4.3.3 Con ayuda de la varilla agitar vigorosamente, en forma de ochos, la muestra durante 15 s para formar una suspensión.
- 2.4.3.4 Dejar reposar la suspensión durante 30 s, para permitir que el material fino se suspenda, e inmediatamente después vaciarla sobre las mallas sobrepuestas. Debe tenerse cuidado al vaciarla para evitar la decantación de partículas gruesas.
- 2.4.3.5 Agregar nuevamente agua a la muestra en el recipiente y repetir 2.4.3.3 y 2.4.3.4, hasta que el agua de lavado salga clara (limpia).
- 2.4.3.6 Regresar todo el material retenido en las mallas sobrepuestas, lavando bajo el chorro de agua a baja presión, a la muestra lavada.
- 2.4.3.7 Secar el material lavado hasta masa constante a una temperatura de **110 ± 5°C**.
- 2.4.3.8 Registrar la masa de la muestra (**C**) con una aproximación de **0.1 g** (1 decimal).

2.5 Cálculos

Calcular la cantidad de material más fino que la malla de 0.075 mm (No. 200) como sigue:

$$A = \frac{B-C}{B} * 100$$

donde

- A= Porcentaje de material más fino que la malla de 0.075 mm (No.200), por lavado, %
- B= Masa seca de la muestra original, g
- C= Masa seca de la muestra después del ensayo, g

Nota 2.1. El resultado de este método de prueba se incluye en los cálculos del análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, y la cantidad total de material por lavado más la obtenida por cribado en seco de la misma muestra, se reportan con los resultados obtenidos con el método de prueba AE III análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

2.6 Registro de resultados

Tabla 2.1 Registro de resultados de material más fino que la malla No. 200

Proyecto/servicio:			
Realizó:		Fecha:	
DATOS DE LA MUESTRA			
Descripción:		ID:	
No. ensayo	1	2	3
Recipiente No.			
Masa seca muestra original (B), g			
Masa seca después del lavado (C), g			
Material más fino que la malla No. 200, $[A=(B-C)/B*100]$, %			
% material más fino que la malla No. 200 =			

2.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 2.2 Criterio r&R para el ensayo de material más fino que la malla No.200

Parámetro	Un operador		multilaboratorio	
	1S (CV)	D2S (CV)	1S (CV)	D2S (CV)
Material más fino que la malla No.200 por lavado,				
Agregado grueso ^A	0.10	0.28	0.22	0.62
Agregado fino ^B	0.15	0.43	0.29	0.82

^ALa estimación de precisión se basa en agregados que tienen un tamaño máximo nominal de 19 mm con menos del 1.5% de fino que la malla de 0.075 mm.

^BLa estimación de precisión se basan en agregados finos que tienen de 1 a 3% de material más fino que la malla de 0.075 mm.

3. AE-III. Método de prueba para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.

3.1 Objetivo

Determinar la distribución de tamaños de las partículas de agregados finos y gruesos por medio de mallas. La distribución de tamaños se utiliza para determinar el cumplimiento de las partículas de agregado con los requerimientos de alguna especificación, así como, proveer datos necesarios para el control de la producción de la mezcla.

3.2 Equipo y herramientas

- **Mallas**, montadas sobre un marco, denominadas tamices, de tal manera que se prevenga la pérdida de material durante el proceso de cribado. Deberán cumplir con las especificaciones de la norma *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y mallas* (ASTM E11).
- **Balanza**, con una capacidad de 15 000 g con una resolución de 0.1 g (ver Anexo A.4).
- **Horno**, capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.
- **Vibrador mecánico** (opcional), que promueva movimiento en las mallas, de tal forma, que cause el rebote y giro de las partículas.

3.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza para finos**. Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor. Para finos, se recomienda que la calibración sea en, al menos, 3 puntos (300, 500, 1000 g) considerando el rango de trabajo; para gruesos se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos (1000, 2000, 5000, 10000, 15000 g) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.
- **Mallas**. Calibrar o verificar con un instrumento de medición lineal (Vernier) calibrado, de acuerdo con las especificaciones de la norma *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y tamices* (ASTM E11) (ver Anexo A.1) y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

- **Horno.** Calibrar o verificar con una resolución de 1 °C o mayor en, al menos, 3 puntos (100, 110 y 120 °C) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

3.4 Método de prueba

3.4.1 Preparación del equipo

- 3.4.1.1 Seleccionar las mallas a utilizar de acuerdo con la especificación requerida en el diseño.
- 3.4.1.2 Verificar que las mallas estén limpias y libres de cualquier otro material.
- 3.4.1.3 Apilar las mallas en orden decreciente de arriba hacia abajo

3.4.2 Preparación de la muestra

- 3.4.2.1 Muestrear el agregado de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para el muestreo de los agregados* (ASTM D75). La cantidad por muestrear deberá ser la especificada en la norma ASTM D75 o cuatro veces la cantidad requerida en los puntos 3.4.2.4 y 3.4.2.5.
- 3.4.2.2 Homogeneizar y reducir el material de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de la prueba* (AE-I), hasta obtener la cantidad de muestra requerida.
- 3.4.2.3 Secar la muestra hasta masa constante a una temperatura de **110 ± 5 °C**.

Nota 3.1. Para propósitos de control de calidad, particularmente cuando se requieren resultados rápidos, generalmente no es necesario secar el agregado grueso. Los resultados son poco afectados por el contenido de humedad, excepto cuando: (1) el tamaño nominal sea inferior que 12.5 mm; (2) el agregado grueso contenga material apreciable más fino que 4.75 mm; o (3) el agregado grueso sea altamente absorbente (un agregado ligero, por ejemplo).

Agregado fino

- 3.4.2.4 El tamaño de la muestra, después de secado, deberá ser de **300 g** mínimo.

Agregado grueso y mezcla de agregado con fino

- 3.4.2.5 El tamaño de la muestra dependerá del tamaño nominal del agregado. Después de secado deberá contener al menos la cantidad indicada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Tamaño de muestra del agregado grueso

Tamaño nominal mm (in)	Tamaño mínimo de la muestra g
9.5(³ / ₈)	1 000
12.5(¹ / ₂)	2 000
19.0(³ / ₄)	5 000
25.0 (1)	10 000
37.5(1 ¹ / ₂)	15 000

3.4.3 Ejecución de la prueba

- 3.4.3.1 Registrar la masa inicial de la muestra (**A**) con una aproximación de **0.1 g** (1 decimal).
- 3.4.3.2 Colocar la muestra de material en la malla superior.
- 3.4.3.3 Agitar las mallas manualmente o con el vibrador mecánico.

Procedimiento agitación manual

- 3.4.3.3.1 Seleccionar la malla individualmente provista de una charola y una tapa, y posicionar ligeramente inclinado en una mano.
- 3.4.3.3.2 Golpear el lado de la malla y con un movimiento hacia arriba a una velocidad de aproximadamente **150 veces** por minuto.
- 3.4.3.3.3 Girar la malla aproximadamente $\frac{1}{6}$ de su circunferencia a intervalos de aproximadamente **25 golpes**.
- 3.4.3.3.4 Cribar lo necesario hasta que, por un periodo continuo de **1 minuto** de cribado, no pase más del **1%** del material respecto a la masa retenida en cada malla.

Procedimiento agitación mecánica

- 3.4.3.3.5 Colocar las mallas a utilizar en orden decreciente, así como en la primer malla colocar una tapa y en el último una charola.

Nota 3.2. Utilizar el vibrador mecánico un tiempo excesivo (aproximadamente más de 10 minutos) puede resultar en la degradación de la muestra.

- 3.4.3.4 Se deberá limitar la cantidad del material sobre cada malla, de tal forma que todas las partículas tengan oportunidad de pasar en las aberturas de la malla durante el cribado.

Para mallas con aberturas menores a **4.75mm (No. 4)**, la cantidad retenida no deberá exceder de **7 kg/m²** del área de cribado; lo anterior

corresponde a **200 g** para mallas con **8"** de diámetro. Para mallas con abertura de **4.75 mm (No. 4)** o mayores, la cantidad retenida en kg no deberá exceder **2.5 veces** la abertura de la malla (mm) por el área de cribado efectivo (m²), ver Tabla 3.2. En ningún caso la cantidad retenida deberá ser tal que cause deformación permanente en la malla.

Tabla 3.2 Cantidad máxima permitida de material retenido en una malla, kg

Abertura de malla, mm (in)	Dimensión nominal de la malla		
	Diámetro 8 (in)	Diámetro 10 (in)	Diámetro 12 (in)
	Área de cribado efectivo, m ²		
	0.0285	0.0457	0.067
37.5 (1 ½)	2.70	4.30	6.30
25.0 (1)	1.80	2.90	4.20
19.0 (¾)	1.40	2.20	3.20
12.5 (½)	0.89	1.40	2.10
9.5 (¾)	0.67	1.10	1.60
4.75 (No. 4)	0.33	0.54	0.80

3.4.3.5 Registrar la masa retenida en cada malla con aproximación de **0.1 g**.

3.4.3.6 Registrar la masa total retenida como la suma de la masa retenida en cada malla, con aproximación de **0.1 g (B)**.

3.5 Cálculos

3.5.1 Cálculo de masas

3.5.1.1 Calcular la masa retenida parcial por malla respecto a la masa total antes del cribado con aproximación de 0.1 % (1 decimal).

$$\text{Retenido parcial}[\%] = \frac{\text{Masa retenida en cada malla}}{A} * 100$$

3.5.1.2 Calcular el porcentaje de material que pasa por cada malla con aproximación de 0.1 % (1 decimal).

$$\text{Material que pasa} [\%] = \% \text{ que pasa la malla superior} - \% \text{ masa retenida parcial}$$

3.5.1.3 Calcularla diferencia de masas de la muestra de agregado final (después del cribado), respecto a la masa inicial de la muestra; con aproximación de 0.1 %. Si la diferencia de masas es mayor al 0.3 % o negativa, el ensayo deberá ser descartado.

$$\text{Diferencia de masas [\%]} = \frac{(A - B)}{A} * 100$$

3.5.2 Curva granulométrica

3.5.2.1 Graficar la curva granulométrica en función de la abertura delamalla. El eje de las abscisas será la abertura^{0.45} (abertura elevada a la 0.45) de cada malla (mm) y el eje de las ordenadas será el porcentaje (%) que pasa en cada malla.

Nota 3.3. La figura 3.1 es un ejemplo de la representación gráfica de las curvas granulométricas. La representación de cada tipo de material puede variar en función de los tamaños disponibles.

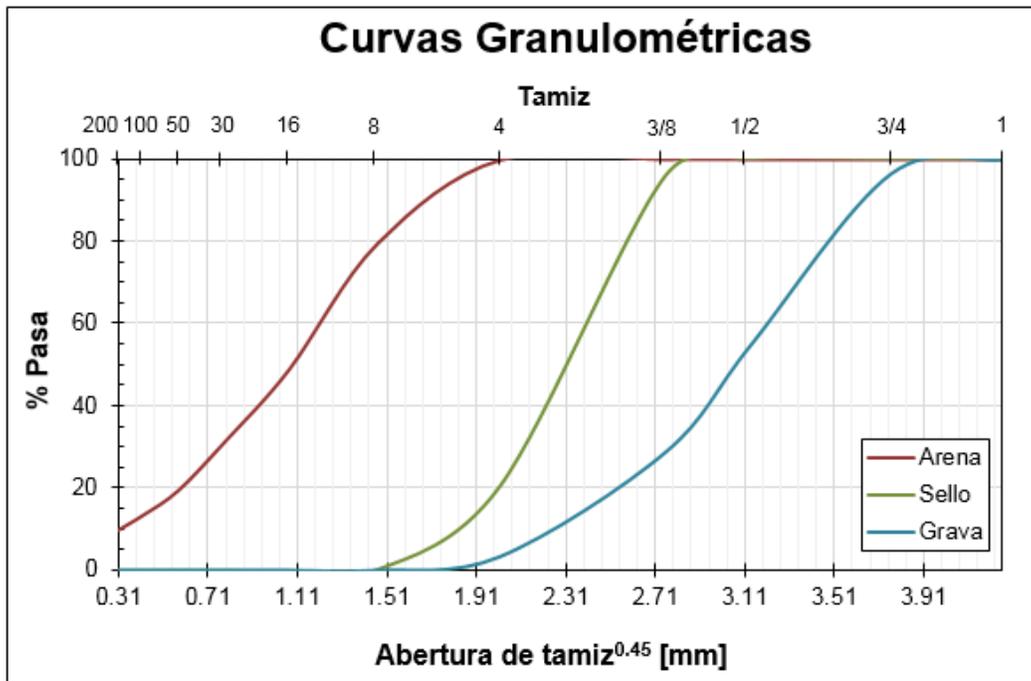


Figura 3.1 Ejemplo de curvas granulométricas

3.6 Registro de resultados

Tabla 3.3 Registro de resultados de granulometría

Granulometría ASTM C136		Identificación de la muestra:							
		Fecha de ensayo:							
Resultados			Réplica #1			Réplica #2			Promedio
Masa inicial de la muestra, g									
No. Malla	Abertura mm	(Abertura) ^{0.45} mm	Masa retenida g	Retenido parcial %	Pasa %	Masa retenida g	Retenido parcial %	Pasa %	Pasa %
2 in	50	5.9							
1 1/2 in	37.5	5							
1 in	25	4.3							
3/4 in	19	3.8							
1/2 in	12.5	3.1							
3/8 in	9.5	2.8							
No. 4	4.75	2							
No.8	2.36	1.5							
No.16	1.18	1.1							
No. 30	0.6	0.8							
No. 50	0.3	0.6							
No. 100	0.15	0.4							
No. 200	0.075	0.3							
Pasa No. 200	---	---							
Masa total retenida, g									
Diferencia de masas, g									

3.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 3.4 Criterio r&R para el ensayo de granulometría

Parámetro		1 Operador		Multilaboratorio		
		1S	D2S	1S	D2S	
Agregado Grueso	< 100	≥ 95	0.32	0.9	0.35	1
	< 95	≥ 85	0.81	2.3	1.37	3.9
	< 85	≥ 80	1.34	3.8	1.92	5.4
	< 80	≥ 60	2.25	6.4	2.82	8
	< 60	≥ 20	1.32	3.7	1.97	5.6
	< 20	≥ 15	0.96	2.7	1.6	4.5
	< 15	≥ 10	1	2.8	1.48	4.2
	< 10	≥ 5	0.75	2.1	1.22	3.4
	< 5	≥ 2	0.53	1.5	1.04	3
	< 2	> 0	0.27	0.8	0.45	1.3
Agregado fino	< 100	≥ 95	0.26	0.7	0.23	0.6
	< 95	≥ 60	0.55	1.6	0.77	2.2
	< 60	≥ 20	0.83	2.4	1.41	4
	< 20	≥ 15	0.54	1.5	1.1	3.1
	< 15	≥ 10	0.36	1	0.73	2.1
	< 10	≥ 2	0.37	1.1	0.65	1.8
	< 2	> 0	0.14	0.4	0.31	0.9

Ver Anexo A.3.

4. AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos.

4.1 Objetivo

Determinar el contenido de agua que contiene el suelo respecto a su masa seca.

4.2 Equipo y herramientas

- **Horno**, de ventilación forzada y controlado termostáticamente capaz de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ en toda la cámara de secado.
- **Balanzas**, para muestras de prueba con una masa igual o menor a 200 g una balanza con una resolución de 0.01g y para muestras de prueba mayores a 200 g una balanza con una resolución de 0.1 g.
- **Contenedores**, de dimensiones suficientes para contener las muestras de prueba, hechos de material resistente a la corrosión y a cambios en su masa debido al calentamiento y enfriamiento repetido. Para muestras de prueba con una masa menor o igual a 200 g utilizar contenedores con tapa mientras que para muestras mayores a 200 g pueden usarse contenedores sin tapa.
- **Desecador (opcional)**, de medidas adecuadas con gel sílica o sulfato de calcio anhidro. Se recomienda utilizar un desecador que contenga material absorbente que cambie de color para saber si éste necesita ser sustituido.

Nota 4.1. El sulfato de calcio anhidro se vende con el nombre comercial de drierita

- **Misceláneos**, cuchillos, espátulas, palas, cuarteadores, guantes resistentes al calor.

4.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza**, calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g y 0.01 g, dependiendo la balanza a calibrar. Se recomienda que la calibración sea en, al menos 5 puntos (300, 500, 1000, 2000 y 3000 g para la balanza de 0.1 g y 20, 50, 100 y 250 g para la balanza de 0.01 g de resolución), dentro del rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Horno**, calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento. Se recomienda que la verificación sea en, al menos, tres puntos (100, 110 y 120°C) dentro del rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

4.4 Método de prueba

4.4.1 Preparación de la muestra

4.4.1.1 Las muestras que se reciban en el laboratorio deben almacenarse a una temperatura entre **3°C y 30°C** y en áreas donde la muestra no esté en contacto directo con los rayos del sol.

4.4.1.2 La determinación del contenido de agua se debe hacer tan rápido como sea posible después de recibir las muestras, especialmente si se utilizan recipientes potencialmente corrosibles o bolsas de plástico.

4.4.2 Espécimen de ensayo

4.4.2.1 Homogeneizar y reducir el material, de acuerdo con la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de la prueba (AEI)*, hasta obtener la cantidad de muestra requerida. La cantidad mínima de material húmedo, según el tamaño máximo de la partícula y la resolución de la balanza, será de acuerdo a lo indicado en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Masa mínima del espécimen de ensayo y resolución de la balanza

Tamaño máximo de partícula (100% del material pasa la malla)		Método A Contenido de agua con aproximación $\pm 1\%$		Método B Contenido de agua con aproximación $\pm 0.1\%$	
Abertura		Masa del espécimen g	Resolución g	Masa del espécimen g	Resolución g
in	mm				
3	75	5000	10.0	50 000	10.0
1 ½	37.5	1000	10.0	10 000	10.0
¾	19.0	250	1.0	2500	1.0
3/8	9.5	50	0.1	500	0.1
No. 4	4.75	20	0.1	100	0.1
No. 10	2.0	20	0.1	20	0.01

Nota 4.2 La diferencia entre los dos métodos es el uso de cifras significativas, de acuerdo al tamaño del espécimen, para reportar el contenido de agua. En el método A el contenido de agua respecto a la masa seca se reporta con una aproximación a 1% y en el método B el contenido de agua con respecto a la masa seca se reporta con una aproximación al 0.1%.

4.4.3 Ejecución de la prueba

4.4.2.1 Determinar la masa del contenedor limpio y seco (y su tapa si se usa) y registrarlo como (M_c).

4.4.2.2 Colocar el espécimen de ensayo en la capsula (con su respectiva tapa si se usa). Determinar la masa del contenedor y el espécimen húmedo y registrarlo como (M_{c+mh}).

4.4.2.3 Quitar la tapa al contenedor, si se usa, y colocar el contenedor con la muestra en el horno de secado. Secar el espécimen a una temperatura de **110 ± 5°C** hasta masa constante, lo cual ocurre aproximadamente después de **16 horas**.

Nota 4.3 Los especímenes secos deben retirarse antes de introducir especímenes húmedos al horno, a menos que ambos permanezcan en el horno de secado.

4.4.2.4 Una vez seco el espécimen sacar el contenedor del horno y colocar la tapa, si se utilizó. Permitir que el contenedor y el espécimen se enfríen a temperatura ambiente. Determinar la masa del contenedor y el espécimen seco, en la misma balanza que se utilizó para determinar la masa húmeda, y registrarla como (M_{c+ms}).

Nota 4.4. Se puede utilizar un desecador para enfriar los contenedores en lugar de utilizar tapas

4.5 Cálculos

4.5.1 Cálculo del contenido de agua del material.

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

donde

- ω = contenido de agua, %
- M_{c+mh} = Masa del contenedor más suelo húmedo, g
- M_{c+ms} = Masa del contenedor más suelo seco, g
- M_c = Masa del contenedor, g

4.6 Registro de resultados

Tabla 4.2 Registro de resultados de la prueba de contenido de agua

Proyecto:			
Realizó:			Fecha:
Datos de la muestra			
ID :	Profundidad :	Sondeo No.:	Ensaye No:
Descripción :			
Procedencia:			
Datos de secado			
Fecha:		Hora inicial:	Temperatura de secado
Fecha:		Hora final:	
Método usado:		A	B
Contenido de agua			
Capsula No			
Masa Capsula (M_c) , g			
Masa cap + material humedo (M_{c+mh}) , g			
Masa capsula + material seco (M_{c+ms}) , g			
Contenido de agua (ω) , %			
$\omega_{prom} (\%) =$			

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

4.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 4.3 r&R para la prueba de contenido de agua en suelos

Parámetro	Un operador		multilaboratorio	
	1S	D2S	1S	D2S
	(CV)	(CV)	(CV)	(CV)
Contenido de agua, %	2.7	7.8	5.0	14.0

5. AE-V Método de prueba para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

5.1 Objetivo

Determinar las características de plasticidad de la porción de los materiales que pasan la malla No. 40 (0.425 mm), para identificar y clasificar el suelo.

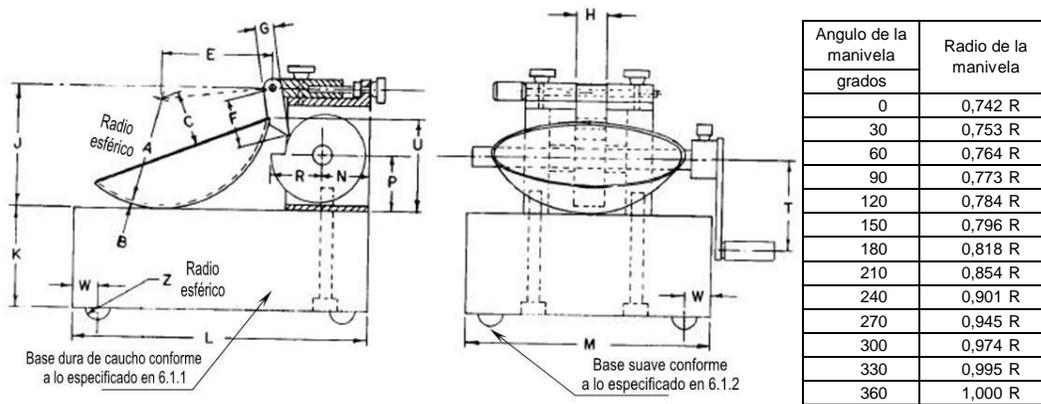
5.2 Equipo y herramientas

Límite líquido

- **Malla No. 40 (0.425 mm)**, que cumpla con las especificaciones de la norma *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y mallas (ASTM E11)*.
- **Equipo de límite líquido (copa de Casagrande)**, se compone de base de hule endurecido, copa y manivela/ motor (opcional). La figura 5.1 muestra las características y dimensiones del equipo. El equipo puede ser operado manualmente o por un motor eléctrico.
 - ✓ Copa: de latón y con una masa de 185 a 215 g.
 - ✓ Soporte de la copa, que permita ajustar la altura de caída de la copa a 10 mm figura 5.2.
 - ✓ Motor (opcional), para girar la manivela a razón de 2 ± 0.1 revoluciones por segundo, y debe estar aislado del resto del dispositivo por material de caucho o de alguna otra manera que prevenga que la vibración del motor de éste se transmita al resto del dispositivo.
- **Ranurador plano**, de plástico o metal no corrosivo, con dimensiones como las mostradas en la figura 5.3.

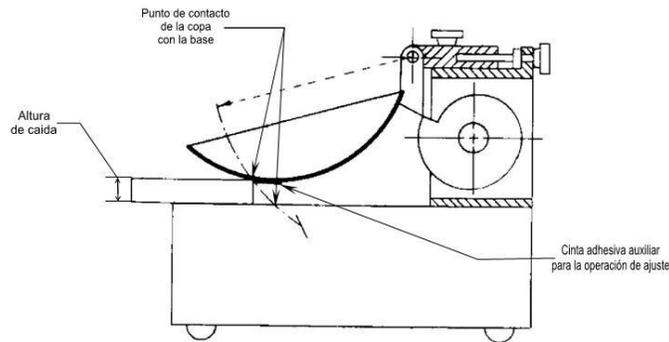
Letra	A ^Δ	B ^Δ	C ^Δ	E ^Δ	F	G	H	J ^Δ	K ^Δ	L ^Δ
mm	54 ± 0,5	2 ± 0,1	27 ± 0,5	56 ± 2,0	32	10	16	60 ± 1,0	50 ± 2,0	150 ± 2,0

Letra	M ^Δ	N	P	R	U ^Δ	V	T	W	Z
mm	125 ± 2,0	24	28	24	47 ± 1,0	3,8	45	13	6,5



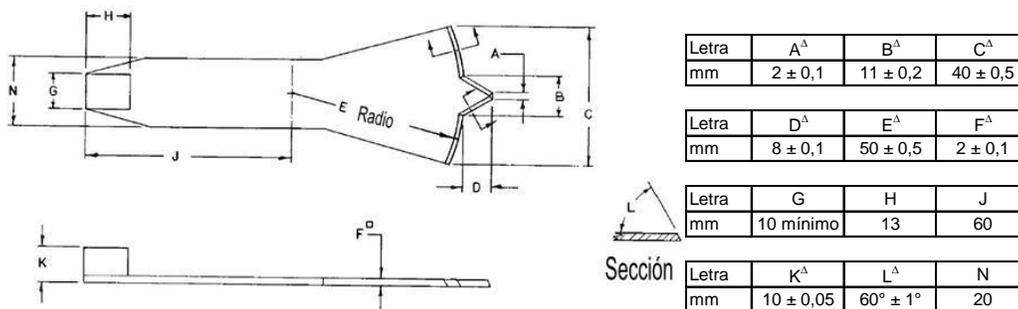
Fuente: ASTM D 4318

Figura 5.1 Dispositivo de límite líquido operado manualmente.



Fuente: ASTM D 4318

Figura 5.2 Verificación de la altura de caída.



Nota 5.1. Δ dimensiones nominales. La medida se realiza al menos a 15 mm detrás de la punta, debe medir de 1.9 a 2.0 y la dimensión D debe ser de 8.0 a 8.1 para un ranurador nuevo y para uno con vida de servicio adecuada.

Fuente: ASTM D 4318

Figura 5.3 Ranurador

- **Calibrador**, es un bloque de metal de 10.00 ± 0.05 mm de espesor y de 50 mm de largo, aproximadamente, y sirve para ajustar la altura de caída de la copa. Las dimensiones se muestran en la figura 5.4.

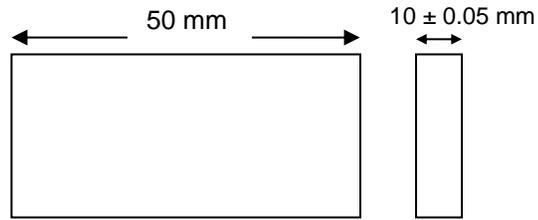


Figura 5.4 Altura de caída.

- **Cápsulas de aluminio o acero inoxidable**, de 2.5 cm de altura y 5 cm de diámetro con tapa hermética para determinar el contenido de agua de los especímenes.
- **Balanza**, de 2000 g de capacidad y una resolución de 0.01 g.
- **Cápsulas de porcelana**, de 12 cm de diámetro para mezclar y almacenar el material preparado.
- **Paño**, de material absorbente de 60x60 cm.
- **Vaso o recipiente**, de 0.5 l de capacidad.
- **Espátula**, de acero inoxidable de 2 cm de ancho y de 10 a 13 cm de longitud, con punta redonda.
- **Atomizador o piseta**, para adicionar y controlar la cantidad de agua al suelo y limpiar finos de las partículas gruesas.

Límite plástico

- **Placa de vidrio**, con dimensiones mínimas de 30 cm x 30 cm de lado y 1 cm de espesor para hacer los rollitos en el límite plástico.
- **Horno**, controlado termostáticamente y capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ en toda la cámara.
- **Alambre de acero**, de 3 mm de diámetro y 10 cm de longitud.

5.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza**, calibrar o verificar con una resolución de 0.01 g. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos (10, 20, 30, 50 y 250 g) dentro del rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Horno**, calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 3 puntos (100, 110 y 120 $^{\circ}\text{C}$), considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Equipo de límite líquido (Copa de Casagrande)**. Verificar la altura de caída de la copa antes de cada ensayo de acuerdo con el procedimiento de verificación descrito en el anexo A5.
- **Ranurador**. Verificar de acuerdo al uso del ranurador.

5.4 Método de prueba

5.4.1 Preparación del equipo

5.4.1.1 Verificar que la altura de caída de la copa de Casagrande sea de 1 cm. Si la altura de caída es diferente, corregir el aparato de acuerdo al procedimiento descrito en el anexo A5.

5.4.2 Preparación de la muestra

Limite líquido

5.4.2.1 Obtener una muestra representativa de **250 g** de material que pase la malla **N° 40** (0.425 mm). La muestra debe ser reducida siguiendo la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba (AE-I)*. Registrar la masa del material con una aproximación de **0.01 g**.

5.4.2.2 Colocar la muestra en un recipiente apropiado, agregar el agua destilada necesaria para saturar el material y dejarlo en reposo durante **24 h** aproximadamente, en un lugar fresco, cubrir el recipiente con un paño húmedo a fin de reducir al mínimo la pérdida de agua por evaporación.

5.4.3 Ejecución de la prueba.

Los dos métodos que se proporcionan para determinar el límite líquido son el Método A (ensayo multipunto) y Método B (ensayo a un punto). El método que se deberá usar es el especificado por el solicitante. En caso contrario, usar el Método A.

Método A. Límite líquido multipunto

5.4.3.1 Del material preparado tomar **150 g** aproximadamente, colocarlo en la capsula de porcelana y homogeneizarlo (mezclarlo) usando una espátula.

5.4.3.2 Colocar una cantidad de suelo suficiente en la copa de Casagrande, previamente calibrada como se indica en el anexo A.5, comprimirlo hacia abajo y extenderlo del centro hacia los lados sin aplicar una presión excesiva y con el mínimo de pasadas de la espátula, teniendo cuidado de evitar la inclusión de burbujas de aire dentro de la masa. Nivelar el suelo con la espátula hasta que alcance un espesor de **8 a 10mm** en la parte central de la copa y enrasarlo. Regresar el exceso de suelo a la cápsula de porcelana. Cubrir la pasta de suelo con un paño húmedo para retener la humedad en el suelo.

5.4.3.3 Hacer la abertura en la parte central del material colocado en la copa mediante una pasada firme del ranurador. Mantener el ranurador siempre vertical a la superficie interior de la copa, como se indica en la figura 5.5.



Figura 5.5 Manera de hacer la ranura para determinar el límite líquido.

5.4.3.4 Comenzar a girar la manivela a razón de **2 golpes por segundo** hasta que las dos mitades de la pasta de suelo hagan contacto en el fondo de la ranura en una longitud de **13 mm**, figuras 5.6 y 5.7.



Figura 5.6 Dispositivo de límite líquido antes de que la ranura haya cerrado.



Figura 5.7 Dispositivo de límite líquido después que la ranura ha cerrado.

- 5.4.3.5 Algunos suelos tienden a deslizarse sobre la superficie de la copa en lugar de fluir. Cuando esto ocurre, debe agregarse más agua a la muestra y homogeneizarse de nuevo, hacer la ranura y repetir el punto anterior; si el suelo sigue deslizándose sobre la copa a un número de golpes inferior a 25, no es aplicable este ensayo y debe indicarse que el límite líquido no se puede determinar.
- 5.4.3.6 Registrar el número de golpes, **N**, requerido para cerrar la ranura.
- 5.4.3.7 Tomar con la espátula aproximadamente **10 g** de material de la porción cerrada de la ranura, colocarlo en un recipiente de masa conocida y tapanlo. Determinar el contenido de agua (ω) de acuerdo con *método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos (AE-IV)*.
- 5.4.3.8 Regresar el suelo restante de la copa a la cápsula de porcelana. Limpiar, secar la copa y el ranurador, y preparar el material para el siguiente ensayo.
- 5.4.3.9 Con la piseta agregar agua destilada al material de la capsula de porcelana, para incrementar el contenido de agua del suelo y disminuir el número de golpes requerido para cerrar la ranura, y homogeneizar (mezclar) el suelo con la espátula. Repetir los pasos de 5.4.3.1 a 5.4.3.8 para cuatro ensayos adicionales. Uno de los ensayos deberá estar comprendido entre **10 y 35 golpes**, dos ensayos deberán estar **por arriba** y dos **por debajo** de los **25 golpes**.

Método B. Límite líquido por el método de un punto

- 5.4.3.10 Proceder como es descrito en 5.4.3.1 a 5.4.3.8 con la diferencia que el contenido de agua de la muestra se debe tomar cuando el número de golpes requerido para cerrar la ranura este comprendido entre **20 y 30 golpes**. Si se obtienen menos de 20 o más de 30 golpes ajustar el contenido de agua del suelo y repetir el procedimiento.

Nota 5.2. El secado excesivo o mezclado inadecuado causará que el número de golpes varíe.

Nota 5.3. El método multipunto es generalmente más preciso que el método a un punto. En el caso de que los resultados pudiesen estar sujetos a controversias o que se requiera de mayor precisión es recomendable utilizar el método multipunto.

Nota 5.4. Debido a que el método a un punto requiere que el operador sepa cuando el material está en el límite líquido, no se recomienda que un operador inexperto realice dicho método.

Límite plástico

- 5.4.3.11 Del material preparado para la prueba de limite líquido, ya sea antes del ensayo o del material restante después de ejecutar el ensayo, tomar una porción de aproximadamente **15 a 20 g** y formar una esfera de aproximadamente **12 mm** de diámetro, moldearla con los dedos para que pierda agua y manipularla sobre la palma de la mano para formar un rollito.
- 5.4.3.12 Girar el rollito con los dedos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que sea aproximadamente de **3 mm** en toda su longitud,

como se muestra en la figura 5.9. La velocidad de girado está comprendida entre **60 y 80 ciclos por minuto**, entendiéndose por ciclo un movimiento de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición inicial.



Figura 5.8 Manera de formar el rollito de suelo para determinar su límite plástico

- 5.4.3.13 Si al alcanzar un diámetro de **3mm** el rollito no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al límite plástico (**LP**). En este caso juntar nuevamente todo el material y repetir los pasos 5.2.3.13 y 5.4.3.14, hasta que el rollito se rompa en tres segmentos en el momento de alcanzar dicho diámetro, el cual se verifica comparándolo con el alambre de referencia.
- 5.4.3.14 Inmediatamente colocar los fragmentos del rollito en las capsulas de aluminio, de masa conocida, y determinar el contenido de agua (ω) del material de acuerdo con *el método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos (AE-IV)*. Realizar la prueba por triplicado.

5.5 Cálculos

5.5.1 Cálculo del límite líquido (LL) multipuntos.

- 5.5.1.1 Graficar los puntos correspondientes a cada determinación, representando en **el eje de las abscisas** en escala logarítmica, el **número de golpes(N)** y en el **eje de las ordenadas**, los respectivos **contenidos de agua (ω)**. Trazar la **curva de fluidez**, que es la línea recta que pasa lo más cercano posible a través de los puntos graficados.
- 5.5.1.2 Tomar el contenido de agua (ω) correspondiente a la intersección de la línea (curva de fluidez) con la abscisa en **25 golpes** como el límite líquido (**LL**) del suelo y redondear el valor al número entero.

5.5.2 Cálculo del límite líquido con un solo punto.

- 5.5.2.1 Calcular el límite líquido para cada contenido de agua usando una de las siguientes expresiones:

$$LL = \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = K(\omega)$$

donde

- LL= límite líquido en un punto para un determinado ensayo, %
- N= número de golpes aplicados para cerrar la ranura en un contenido de agua determinado
- ω = contenido de agua, para N golpes
- K = factor dado en la tabla 5.1.

5.5.2.2 El límite líquido, **LL**, es el promedio de los valores de dos ensayos.

5.5.2.3 Si la diferencia entre los dos ensayos de límite líquido es mayor de uno, repetir el ensayo.

Tabla 5.1 Factores para la obtención del límite líquido

N (número de golpes)	K (factor para límite líquido)
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

5.5.3 Cálculo del límite plástico (LP).

5.5.4.1 Calcular el límite plástico como sigue:

$$LP = \frac{\sum \omega_i}{3}$$

donde

- LP= Límite plástico de la muestra, con aproximación a la unidad
- ω = Contenido de agua para cada una de los tres ensayos, %

5.5.4 Cálculo del índice de plasticidad (Ip).

5.5.4.1 Calcular el índice de plasticidad como sigue:

$$Ip = LL - LP$$

donde

- LL= límite líquido, con aproximación a la unidad

5.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 5.3 r&R para la prueba de límite líquido, límite plástico e índice plástico

TIPO DE SUELO	Parámetro	Un operador		multilaboratorio	
		1s	D2s	1s	D2s
CH	LL	0.7	2	1.3	4
	LP	0.5	1	2.0	6
	IP	0.8	1	2.5	7
CL	LL	0.3	1	1.0	3
	LP	0.4	1	1.2	3
	IP	0.5	1	1.7	5
ML	LL	0.5	2	1.3	4
	LP	0.3	1	0.9	3
	IP	0.6	2	1.9	5

Nota. Criterios de r&R para pruebas realizadas por triplicado

6. AE-VI Método de prueba para determinar las características de compactación de un suelo usando energía modificada (56 000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)).

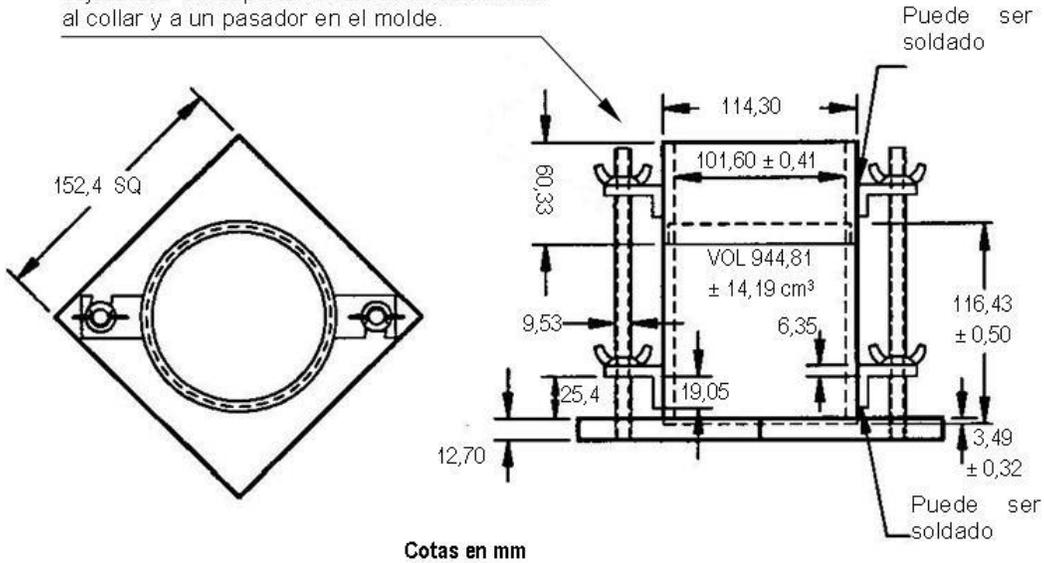
6.1 Objetivo

Determinar la relación entre el contenido de agua y peso volumétrico 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 mm), produciendo una energía de compactación de 56 000 lb-ft/ft³ (2 700 kN-m/m³).

6.2 Equipo y herramientas

- **Moldes**, cilíndricos de metal rígido y con las dimensiones y capacidad indicadas en las figuras 6.1 y 6.2. Las paredes del molde deben ser sólidas o partidas en dos secciones. El molde partido debe tener dos medias secciones circulares, o una sección de tubo dividido a lo largo del elemento que se pueda cerrar en forma segura formando un cilindro que reúna los requisitos de esta sección.
- **Collar de extensión**, cada molde debe tener una base y un collar de extensión, ambos de metal rígido. El collar de extensión debe tener una altura de al menos 51 mm y debe alinearse con el interior del molde. La base inferior en la que entra el molde debe ser plana con variación de ± 0.1 mm.
 - ✓ **Molde de 4"**, con diámetro interior de 101.6 ± 0.4 mm, una altura de 116.4 ± 0.5 mm y un volumen 943.0 ± 14.0 cm³. El molde debe de cumplir con lo especificado en la figura 6.1.
 - ✓ **Molde de 6"**, con diámetro interior de 152.4 ± 0.7 mm, una altura 116.4 ± 0.5 mm, y un volumen de 2124 ± 25 cm³. El molde debe cumplir con lo especificado en la figura 6.1.

Como una opción para la longitud de llenado puede ser usado un tornillo de 2 a 1/2 in x 3/8 in. Como alternativa, el collar puede ser sujeto con un soporte ranurado ensamblado al collar y a un pasador en el molde.



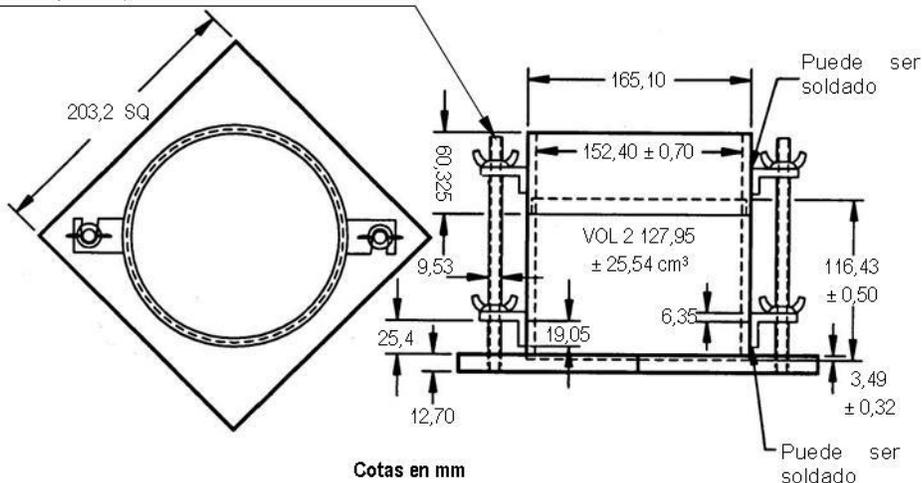
Planta

Corte Transversal

Fuente: ASTM D 1557

Figura 6.1 Molde cilíndrico de 101.60 mm (4”).

Como una opción para la longitud de llenado puede ser usado un tornillo de 2 a 1/2 in x 3/8 in. Como alternativa, el collar puede ser sujeto con un soporte ranurado ensamblado al collar y a un pasador en el molde.



Planta

Corte Transversal

Fuente: ASTM D 1557

Figura 6.2 Molde cilíndrico de 152.460 mm (6”).

- **Pisón manual o mecánico**, operado manualmente o mecánicamente. El pisón debe tener una distancia de caída de 457.2 ± 13 mm con respecto a la superficie del espécimen. El pisón debe tener una masa de 5364 ± 0.009 kg, el peso del pisón mecánico puede ajustarse como se describe en el método de prueba ASTM D2168. La superficie que golpea debe ser plana y circular con un diámetro cuando esta nuevo de 50.80 ± 0.13 mm. El pisón debe remplazarse si la superficie está gastada o dañada de tal forma que el diámetro excede 50.80 ± 0.25 mm.
 - ✓ **Pisón manual**, debe estar equipado con una guía con suficiente espacio libre de tal forma que no se restrinja la caída libre del pisón. La guía debe tener al menos cuatro orificios en cada extremo (8 orificios en total) localizados a 19 ± 2 mm con respecto a cada extremo y espaciados 90° . El diámetro mínimo de los orificios debe ser de 9.5 mm. Pueden incorporarse orificios adicionales.
 - ✓ **Pisón mecánico de superficie circular**, debe cubrir toda la superficie del espécimen y permitir un espacio libre de 2.5 ± 0.8 mm entre el pisón y la superficie del molde, cumplir los requisitos de calibración de los métodos de prueba ASTM D2168 y estar equipado con medios mecánicos para soportar el pisón cuando no esté en operación.
- **Extractor de muestras (opcional)**, un gato hidráulico con un marco u otro dispositivo para extraer la muestra del molde.
- **Base cubica**, de concreto o de otro material de rigidez similar de 40 cm de lado.
- **Balanza**, con capacidad de 15 000 g y una resolución de 0.1 g.
- **Horno**, controlado termostáticamente y capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ en toda la cámara.
- **Enrasador**, de metal rígido de longitud conveniente pero no menor a 250 mm. La longitud total del enrasador debe ajustarse directamente a una tolerancia ± 0.1 mm. El borde que enrasa debe ser biselado, si es mayor a 3 mm.
- **Mallas de $\frac{3}{4}$ " (19.0 mm), $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm) y No. 4 (4.75 mm)**, que cumplan con las especificaciones de la norma *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y tamices (ASTM E11)*.
- **Capsulas**, metálicas con tapa.
- **Aceite**, para lubricar las paredes de los moldes
- **Herramientas de mezclado**, como charola, cucharón, espátula, aspersor o piseta (para agregar agua de forma uniforme) y de preferencia, pero opcional, un dispositivo mecánico para mezclar el material con el agua.

6.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza**, calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea, en al menos 6 puntos (500, 1000, 2000, 5000, 10 000 y 15 000 g), dentro del rango de trabajo. Calibrar la balanza al menos cada 12 meses.
- **Horno**. Calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento. Se recomienda que la verificación sea en al menos tres puntos (100, 110 y 120 °C). considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Molde**, verificar el volumen del molde como se describe en el anexo A6.
- **Pisón manual**, verificar la altura de caída, peso del pisón y la superficie de acuerdo con los requisitos descritos en el punto anterior.
- **Pisón Mecánico**, verificar y ajustar el pisón si es necesario de acuerdo con el método ASTM D2168. Además, verificar la distancia entre el pisón y la superficie interior del molde.

6.4 Método de prueba

6.4.1 Preparación de equipo

- 6.4.1.1 Seleccionar el molde de compactación apropiado, collar de extensión y base de acuerdo con el método (**A, B o C**) a ser usado.
- 6.4.1.2 Determinar el volumen del molde (V_m) de acuerdo al procedimiento descrito en el anexo A.6 y registrarlo.
- 6.4.1.3 Determinar y registrar la masa del molde (M_d) con aproximación al gramo.
- 6.4.1.4 Ensamblar el molde, placa base y el collar de extensión.
- 6.4.1.5 Verificar el alineamiento de la pared interior del molde y collar de extensión del molde.
- 6.4.1.6 Verificar que el pisón está en buenas condiciones de trabajo y que sus componentes no estén flojos o desgastados. Ajustar si es necesario. Si se hacen ajustes o reparaciones, el pisón debe verificarse nuevamente.
- 6.4.1.7 Seleccionar la variante de la prueba de compactación indicada en la especificación para el material a ser ensayado. Si no se especifica, elegir dependiendo de la granulometría del material de acuerdo con la tabla 6.2.

6.4.2 Preparación de la muestra

- 6.4.2.1 Homogeneizar y reducir el material de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de la prueba* (AE-I). La masa mínima de la muestra de prueba se indica en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Masa mínima de la muestra de prueba

Variante	Masa mínima de la muestra seca	Masa mínima de la muestra de campo
	kg	kg
A	16	23
B	16	23
C	23	45

5.4.2.2 Determinar el porcentaje de material retenido en la malla N° 4 (4.75mm), 3/8" (9.5mm) ó 3/4" (19.0mm), para escoger el Método A, B ó C, en una muestra representativa de la muestra de prueba y determinar los porcentajes que pasan las mallas de interés de acuerdo con el método de prueba *AE-III Método de prueba para el análisis granulométrico de agregado finos y gruesos*. Sólo es necesario calcular los porcentajes para una malla o mallas de las cuales la información es deseada.

Tabla 6.2 Características de las variantes de la prueba de compactación

Requisito	Variantes de compactación		
	A	B	C
Molde	4" (101.6 mm)	4" (101.6 mm)	6" (152.4 mm)
Material	Se utiliza el que pasa la malla No. 4 (4.75 mm)	Se utiliza el que pasa la malla 3/8" (9.5 mm)	Se utiliza el que pasa la malla 3/4" (19.0 mm)
Tamaño de la muestra de cada espécimen de compactación	2.3 (kg)	2.3 (kg)	5.9 (kg)
Capas	5	5	5
Golpes por capa	25	25	56
Uso	Cuando el 25% ó menos del peso del material es retenido en la malla N° 4 (4.75 mm)	Cuando el 25% o menos del peso del material es retenido en la malla de 3/8" (9.5 mm).	Cuando el 30% o menos del peso del material se retiene en la malla de 3/4".
Otros usos	Si no se cumplen los requisitos de granulométrica puede utilizarse el método B o C.	Si no se cumplen los requisitos de granulometría entonces se podría utilizar el método C	

Nota 6.1 Estas variantes de compactación se aplican sólo a suelos que tienen 30% ó menos en peso de sus partículas retenidas en la malla de 3/4" (19.0 mm) y que no han sido previamente compactados en laboratorio (no reusar suelos compactados).

Nota 6.2 El molde de 6" (152.4 mm) no se usará en el método A o B.

6.4.2.3 Si la muestra de prueba contiene más de 5% en peso de sobretamaños (fracción gruesa) y el material no será incluido en la prueba se deben hacer correcciones al peso volumétrico y contenido de agua de la muestra de ensayo ó la densidad de campo usando el método de ensayo ASTM D-4718.

Nota 6.3. La fracción de sobretamaños es aquella que se retiene en la malla de 3/4" (19 mm.)

Nota 6.4 No reutilizar el suelo que ha sido compactado previamente en Laboratorio.

Nota 6.5 Se recomienda utilizar el método de preparación húmedo

Método de preparación húmeda (recomendado)

6.4.2.4 Sin secar previamente el espécimen, cribarlo por la malla **No.4 (4.75 mm)**, **3/8" (9.5 mm)** o **3/4" (19.0 mm)** dependiendo del método (**A, B o C**) seleccionado.

6.4.2.5 Determinar y registrar la masa de las porciones que pasan (**M_{hf}**) y que se retienen (muestra de prueba y porción de sobretamaños, respectivamente) con aproximación de **0.1g**. Secar en el horno la porción de sobretamaños, determinar y registrar su masa (**M_{sg}**) con aproximación de **0.1g**.

6.4.2.6 Determinar y registrar el contenido de agua (ω) de la muestra de prueba. Usando el contenido de agua, determinar y registrar la masa seca de la muestra de prueba (**M_{sf}**) con aproximación de **0.1 g**. Con base en estas masas secas, se determina el porcentaje de sobretamaños (**P_G**) y el porcentaje de la muestra de prueba (**P_F**), como es descrito en la sección de cálculos, a menos que el análisis de granulometría ya se haya realizado.

6.4.2.7 De la muestra de prueba (**M_{sf}**), preparar mínimo **cuatro** (de preferencia cinco) **especímenes** que tengan contenidos de agua lo más cercano al óptimo estimado. Primero preparar un espécimen que tenga un contenido de agua cercano al óptimo adicionando o quitando agua y mezclando (ver nota 5.6). Seleccionar los contenidos de agua de moldeo para el resto de los especímenes de tal forma que se obtengan al menos **2 especímenes en el lado seco y 2 en el húmedo**, con una variación alrededor del **2%**, para definir la curva de compactación. Algunos suelos con un contenido de agua óptimo muy alto ó una curva de compactación relativamente plana requieren grandes incrementos de contenido de agua para obtener un peso volumétrico seco máximo bien definido. Los incrementos de contenido de agua **no deben exceder de 4%**.

Nota 6.6 Con la práctica es posible juzgar visualmente un punto cercano al contenido de agua óptimo. Generalmente, el suelo en el contenido de agua óptimo puede ser comprimido y quedar así cuando la presión manual cesa, pero se quebrará en dos secciones cuando es doblada. En contenidos de agua del lado seco del óptimo, los suelos tienden a desintegrarse; del lado húmedo del óptimo, se mantienen unidos en una masa cohesiva pegajosa. El contenido de agua óptimo frecuentemente es ligeramente menor que el límite plástico.

6.4.2.8 Homogeneizar la muestra de prueba, luego obtener una muestra representativa para cada espécimen (punto de compactación), de acuerdo con la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de la prueba (AE-I)*, de aproximadamente **2.3 kg** de material para compactar un espécimen utilizando el **método A o B**, ó **5.9 kg** cuando se utilice el **método C**. Para obtener los contenidos de agua de moldeo, adicionar o remover las cantidades de agua requeridos de la siguiente

manera: añadir poco a poco el agua al suelo durante el mezclado; para remover agua, dejar que el suelo se seque al aire a temperatura ambiente o en un aparato de secado pero que la temperatura no exceda de **60°C**. Mezclar el suelo continuamente durante el secado para mantener una distribución uniforme del contenido de agua. Mezclar completamente cada muestra para facilitar una distribución uniforme de agua y después colocarla en un contenedor cerrado o bolsa de plástico para su curado, dejarlo humedecer el tiempo indicado en la tabla 6.3 antes de compactarlo. Para seleccionar el tiempo de curado (humedecimiento), el suelo puede clasificarse usando la norma ASTM D2487; D4888 o tomando en cuenta los datos de otras muestras del mismo material.

Tabla 6.3 Tiempos requeridos de curado (humedecimiento) de muestras

Clasificación	Tiempo mínimo requerido (h)
GW, GP, SW, SP	No requiere
GM, SM	3
Otros suelos	16

Método de preparación seca

6.4.2.9 Si la muestra está muy húmeda, reducir el contenido de agua secando al aire hasta que el material sea deleznable. El secado puede ser al aire o en un horno pero que la temperatura no exceda **60 °C**. Disgregar por completo los grumos de tal forma que se evite romper las partículas individuales. Cribar el material en la malla apropiada: **No. 4 (4.75 mm), 3/8" (9.5 mm) ó 3/4"(19.0 mm)**. Cuando se prepara el material que pasa la malla de 3/4" para compactarlo en el molde de 6", disgregarlo lo suficiente para que el material pase la malla 3/8" para facilitar la distribución del agua en el suelo durante el mezclado. Determinar y registrar el contenido de agua de la muestra de prueba y todas las masas mencionados en el método de preparación húmeda; lo que aplique para determinar la fracción de sobretamaños (**P_G**) y la muestra de prueba (**P_F**).

6.4.2.10 De la muestra de prueba, seleccionar y preparar por lo menos **cuatro** (preferiblemente cinco) **especímenes** que tengan contenidos de agua lo más cercano al óptimo estimado.

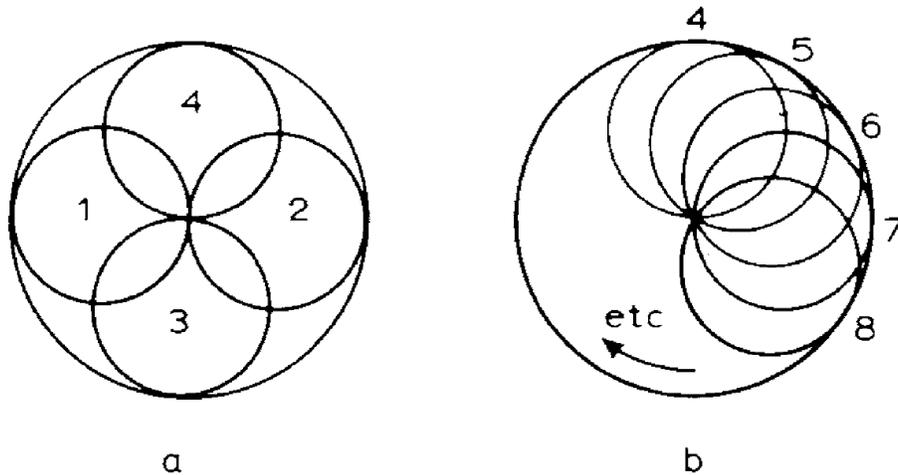
6.4.2.11 Usar aproximadamente **2.3 kg** del material cribado para cada espécimen a ser compactado cuando se utilice el **Método A, B ó 5.9 kg** cuando se utilice el **Método C**. Agregar las cantidades requeridas de agua para obtener un espécimen con un contenido de agua cercano al óptimo y al menos **2 especímenes en el lado seco y 2 en el lado húmedo** con una variación alrededor del **2%**. Los incrementos de contenido de agua **no** deben **exceder** de **4%**. Agregar poco a poco el agua al suelo, mezclar completamente cada muestra para facilitar una distribución uniforme de agua y después colocarla en un contenedor cerrado o bolsa de plástico

para su curado, dejarlo humedecer el tiempo indicado en la tabla 6.3 antes de compactarlo. Para seleccionar el tiempo de curado (humedecimiento), el suelo puede clasificarse usando la norma ASTM D2487; D4888 o tomando en cuenta los datos de otras muestras del mismo material.

6.4.3 Ejecución de la prueba.

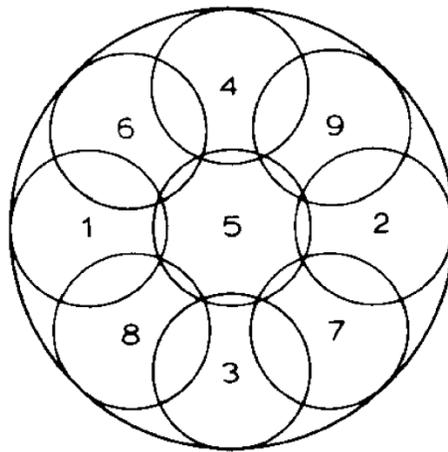
- 6.4.3.1 Después del tiempo de curado (si se requiere) compactar cada espécimen (punto de compactación) como sigue:
- 6.4.3.2 Colocar el molde sobre el cubo de concreto. El molde debe descansar sin balancearse.
- 6.4.3.3 Asegurar el molde de compactación al cubo de concreto. El método de sujeción al cubo debe ser de tal forma que sea fácil retirar el molde después de terminar la compactación.
- 6.4.3.4 Dividir en cinco fracciones aproximadamente iguales el material preparado y curado, colocar una fracción del suelo suelto en el molde y extenderlo en una capa de espesor uniforme. Compactar el suelo ligeramente hasta que no esté suelto, usando el pisón manual de compactación o un cilindro de **50 mm** de diámetro.
- 6.4.3.6 Compactar con el pisón cada capa, aplicando **25 golpes** para el molde de **4" (101.6 mm)** o **56 golpes** para el molde de **6" (152.4 mm)**.
- 6.4.3.7 Al operar el pisón manual, tener cuidado de no levantar la guía del pisón mientras el pisón sube. Mantener la guía firmemente con un ángulo de **5°** con respecto a la vertical. Aplicar los golpes a una velocidad uniforme de aproximadamente **25 golpes/minuto** y de tal manera que se distribuyan en forma uniforme en la superficie. Cuando se usa el molde de 4" (101.6 mm) y pisón manual, seguir el modelo dado en la figura 6.3 (a) y figura 6.3(b); para el pisón mecánico, seguir el modelo de la figura 6.3 (b). Cuando se use el molde de 6" (152.4 mm) y pisón manual, seguir el modelo de la figura 6.4 hasta el noveno golpe, posteriormente y sistemáticamente alrededor del molde y en el centro seguir el modelo de la figura 6.3 (b); mientras que para un pisón mecánico usar un sector y el modelo con la lógica dada en la figura 6.3(b). Si la superficie del suelo compactado no es uniforme (ver nota 6.7) entonces ajuste el modelo para seguir la lógica dada en la figura 6.3(a) o figura 6.4. Esto probablemente evite el uso del pisón mecánico para compactar tales puntos.

Nota 6.7. Cuando los especímenes de compactación se humedecen más allá del contenido de agua óptimo, pueden producirse superficies compactadas irregulares y se requerirá del juicio del operador para la altura promedio del espécimen.



Fuente: ASTM D 1557

Figura 6.3 Patrón de compactación con pisón para molde de 4 in (101.6 mm)



Fuente: ASTM D 1557

Figura 6.4 Patrón de compactación con pisón para molde de 6 in (152.4 mm)

- 6.4.3.8 Después de compactar cada capa escarificar ligeramente la superficie de la capa compactada, utilizar un cuchillo u otra herramienta apropiada, y repetir el procedimiento para las capas subsecuentes. La última capa debe sobresalir ligeramente del borde del molde.
- 6.4.3.9 Después de compactar la última capa, retirar el collar de extensión del molde y verificar que el material no esté por debajo del borde del molde o no sobresalga más de 6 mm del borde del molde. Si ocurre alguna de las dos condiciones anteriores descartar el punto compactado y repetir la prueba utilizando más o menos material según sea el caso.
- 6.4.3.9 Enseguida enrasar cuidadosamente el espécimen compactado con un enrasador para obtener una superficie plana. Para empezar a enrasar se utiliza un cuchillo lo que previene que se extraiga suelo por debajo del molde. Rellenar cualquier orificio de la superficie con suelo del que se corto o suelo no utilizado, presione con los dedos y nuevamente enrase. Si se

tienen partículas de grava, enrasar alrededor de ellas o retirarlas lo que sea más fácil para evitar la alteración del suelo compactado. El volumen estimado de partículas que sobresalen de la superficie y el de los orificios será igual. Rellenar los orificios como se mencionó. Repetir lo anterior para la parte inferior del espécimen cuando el volumen del molde se determina sin la placa base. Para suelos muy húmedos y secos, se puede perder suelo o agua si se quita la placa base. Para estas situaciones, dejar la placa en el molde. En este caso, el volumen del molde debe determinarse con la base y no con una placa de vidrio o plástico como se menciona en el anexo A6.

- 6.4.3.10 Verificar que cada capa tenga aproximadamente el mismo espesor.
- 6.4.3.10 Determinar y registrar la masa del espécimen y molde (M_t) con aproximación de **0.1 g**. Cuando se deja la placa base, determinar y registrar la masa del espécimen, molde y placa con aproximación a **0.1g**.
- 6.4.3.11 Extraer el espécimen del molde y obtener una muestra de material para determinar el contenido de agua (ω), se puede tomar el espécimen completo (recomendado) o una porción representativa. Cuando se toma todo el espécimen, disgregarlo para facilitar el secado. Otra alternativa es obtener una porción representativa de las cinco capas, cortando axialmente por el centro del espécimen compactado y tomando al menos **500 g** del material de los lados cortados. Determinar el contenido de agua de acuerdo con el *AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos*.
- 6.4.3.12 Después de compactar el último espécimen, comparar los pesos volumétricos húmedos para verificar que se obtendrá el patrón deseado en la curva de compactación. Graficar el peso volumétrico húmedo y el contenido de agua de cada espécimen compactado puede ayudar a verificar lo anterior. Si no se tiene el patrón deseado, se requerirá compactar otros especímenes.

6.5 Cálculos

6.5.1 Cálculo de la muestra de prueba y el porcentaje de sobretamaños.

6.5.1.1 Masa seca de la muestra de prueba.

$$M_{sf} = \frac{M_{hf}}{1 + \frac{\omega}{100}}$$

donde:

- M_{sf} = Masa seca de la muestra de prueba con aproximación a 0.1 g
 M_{hf} = Masa húmeda de la muestra de prueba con aproximación a 0.1 g
 ω = Contenido de agua de la muestra de prueba con aproximación al 0.1 %

6.5.1.2 Porcentaje de la fracción de sobretamaños.

$$P_G = \frac{M_{sg}}{M_{sg} + M_{sf}}$$

donde

P_G = Porcentaje de sobretamaños, al entero más cercano.
 M_{sg} = Masa seca de la fracción de sobretamaños con aproximación de 0.1 g.

6.5.1.3 Porcentaje de la muestra de prueba.

$$PF = 100 - PG$$

donde

P_F = Porcentaje de la muestra de prueba (fina) al entero más cercano

6.5.2 Cálculo del peso volumétrico húmedo y peso volumétrico seco.

Calcular el peso volumétrico húmedo y el peso volumétrico seco de cada espécimen compactado como se indica a continuación.

6.5.2.1 Peso volumétrico húmedo

$$\gamma_m = \frac{M_t - M_d}{V} * 1000$$

donde

γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen compactado, kg/m³

M_t = masa del suelo húmedo+molde, g

M_d = masa del molde, g

V = volumen del molde, cm³

6.5.2.2 Peso volumétrico seco.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega}$$

donde

γ_d = peso volumétrico seco del espécimen, kg/m³

γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen compactado, kg/m³

ω = contenido de agua del espécimen, con aproximación al 0.1 %

Nota 6.8 Registrar el peso volumétrico húmedo y seco con cuatro cifras significativas

6.5.3 Curva de compactación.

Graficar los valores del peso volumétrico seco y de contenido de agua de cada espécimen en una gráfica en la que en el **eje de la abscisas** se indica el contenido de agua (ω) y en el **eje de las ordenas** el peso volumétrico seco (γ_d) y, dibujar una curva suavizada a través de los puntos denominada **Curva de compactación**, figura 6.5. De la curva de compactación determinar el peso volumétrico seco máximo y el contenido de agua óptimo. La ordenada en el punto más alto de dicha curva representa el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la abscisa de ese punto, el contenido de agua óptimo (ω_o) Si más del 5% en masa del material de sobretamaños (retenido en la malla de $\frac{3}{4}$ "") se retiró de la muestra, calcular el contenido de agua corregido y el peso volumétrico seco del material total usando la norma ASTM D4718(Método de ensayo para la corrección del peso volumétrico y contenido de agua en suelos que contienen partículas sobredimensionadas). Esta corrección debe hacerse en el espécimen de campo y no al espécimen de ensayo de laboratorio.

6.5.4 Curva de saturación.

Graficar la curva de **100%de saturación**, figura 6.5. Calcular los valores correspondientes de contenido de agua para la condición de 100% de saturación como sigue:

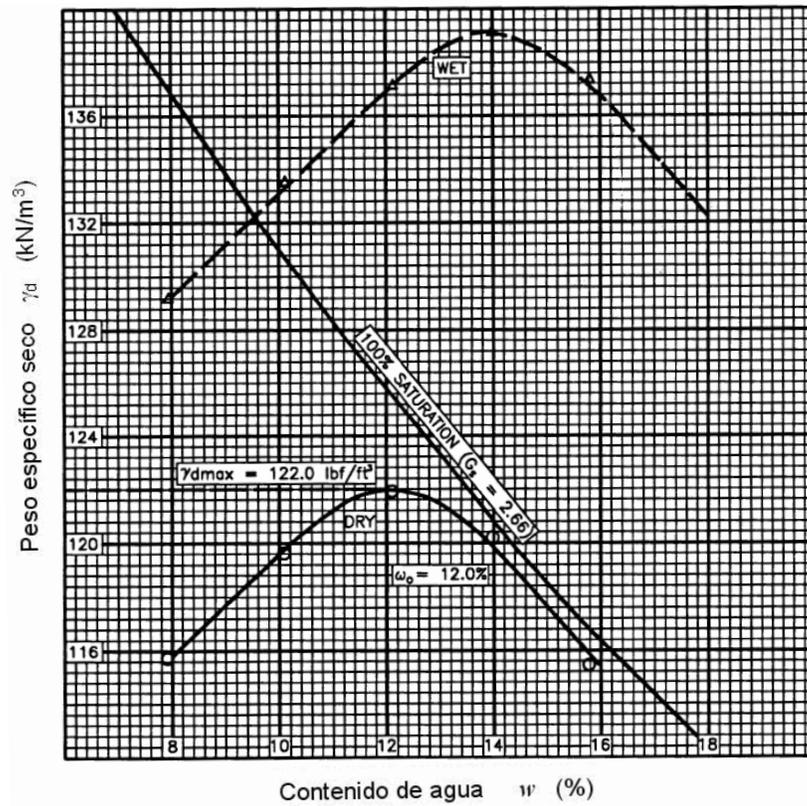
$$\omega_{sat} = \frac{\gamma_w * S_s - \gamma_d}{\gamma_d * S_s} * 100$$

donde

- ω_{sat} = contenido de agua para saturación total, con aproximación a 0.1 %
- γ_w = densidad del agua a 20°C, 998.29 kg/m³
- γ_d = Peso volumétrico seco del suelo con cuatro cifras significativas, kg/m³
- S_s = densidad relativa de sólidos del material, con cuatro cifras significativas

Nota 6.9 La densidad relativa de sólidos del material debe ser determinada con el método de prueba C127 ó D854, según corresponda al tamaño de sus partículas.

Nota 6.10 La curva de 100% de saturación ayuda a dibujar la curva de compactación. Para suelos que contienen más de 10% de finos y contenidos de agua mayores al óptimo, las dos curvas son paralelas con el lado húmedo de la curva de compactación entre 92% a 95% de saturación. Teóricamente, la curva de compactación no puede dibujarse a la derecha de la curva de 100% saturación. Si esto pasa, existe un error en la gravedad específica del suelo (G_s), en las mediciones, en el cálculo, en el ensayo o al graficar. La curva de 100% de saturación, algunas veces es referida como la curva de cero relación de vacíos o la curva de saturación total.



Fuente: ASTM D 1557

Figura 6.5 Ejemplo de curva de compactación.

6.6 Registro de resultados

Tabla 6.4 Registro de resultados de la prueba de compactación Proctor modificada

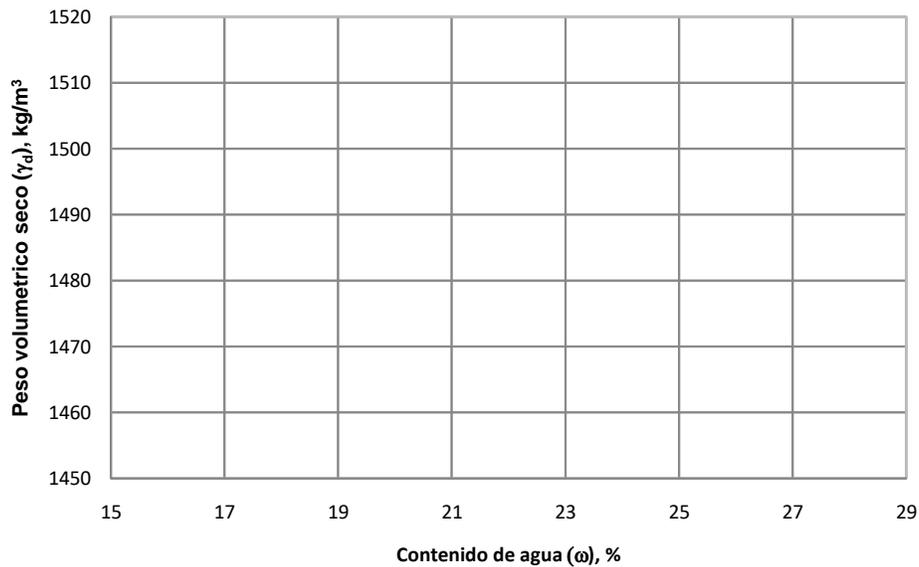
Datos de la muestra					
Descripción :					Fecha:
Procedencia:					ID:
sobretamaños (P _G): %		muestra de prueba (P _F): %		TMA:	
método de preparación:					Gs=
Datos del pisón		Datos de la variante de compactacion			
ID:		No. de golpes:		No. de capas:	
Altura de caída:	mm	25	56	5	A B C
Masa :	g				
Tratamiento (estabilización)					
Proccencia del asfalto:					
Tipo de emulsión/asfalto:			Tipo de filler activo:		
Cantidades aplicadas					
asfalto=		%		Filler activo= %	
PESO VOLUMETRICO SECO					
Especimen No	1	2	3	4	5
Masa del molde+suelo, (M _t) g					
Masa del molde (M _d), g					
Masa del suelo húmedo (M _m),g					
Volumen del molde (V _m), cm ³					
γ_m , kg/m ³					
γ_d , kg/m ³					
CONTENIDO DE AGUA					
Ensayo 1	Capsula No.				
	masa capsula (M _c), g				
	Cap+material húmedo (M _{c+mh}), g				
	Cap+material seco (M _{c+ms}), g				
	ω , %				
Ensayo 2	Capsula No.				
	masa capsula (M _c), g				
	Cap+material húmedo (M _{c+mh}), g				
	Cap+material seco (M _{c+ms}), g				
	ω , %				
$\omega_{promedio}$, %					

$$\gamma_m = \frac{M_t - M_d}{V_m} * 1000$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} * 100$$

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

CURVA DE COMPACTACION



$\gamma_{d\max} =$ kg/m^3 $\omega_o =$ %

6.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 6.5 r&R para la prueba de compactación Proctor modificada

Parámetro	Un operador		multilaboratorio	
	1s	D2s	1s	D2s
Peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{d\max}$)	0.6	1.8	1.6	4.4
Contenido de agua óptimo, %	0.4	1.0	0.7	2.1

7. AE-VII Método de prueba para preparar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado.

7.1 Objetivo

Verificar las propiedades espumantes del asfalto, así como la fabricación y curado de la base granular estabilizada con asfalto espumado.

7.2 Equipo y herramientas

- **Unidad de asfalto espumado (WLB 10 S)** capaz de generar una presión de aire de 10 Bar, calentar el asfalto en un rango de 140°C a 200°C y una capacidad de almacenamiento de asfalto de 10 l y agregar de 0 a 5% de agua durante el proceso de expansión.
- **Unidad de mezclado de materiales (WLM 30)** tipo pugmill debe contar con 4 paletas de mezclado, y girar a una velocidad de 0 a 50 rpm.
- **Balanza** con resolución de 0.1 g y capacidad de 15000 g.
- **Termómetro infrarrojo**, con un rango de medición de 0 a 200 °C y con una resolución de 1 °C.
- **Horno**, capaz de mantener una temperatura de 120 ± 1°C.
- **Cronometro**, digital con una resolución de 0.2 s.

7.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza.** Calibrar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea en al menos 5 puntos (1000, 2000, 5000, 10000 y 15000 g) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Termómetro infrarrojo.** Calibrar con una resolución de 1 °C. Se recomienda que la verificación sea en al menos 3 puntos (160, 170 y 180°C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Horno.** Calibrar o verificar con una resolución 1°C. Se recomienda que la verificación sea en al menos tres puntos (100, 110 y 120°C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

7.4 Método de prueba

7.4.1 Preparación de equipo

- 7.4.1.1 Precalentar el asfalto a espumar (aproximadamente 15 litros) en un horno apropiado a una temperatura de al menos **120°C**.
- 7.4.1.2 Llenar el tanque de agua del WLB 10 S con suficiente agua. Inicialmente es adecuado llenar el tanque de agua hasta la mitad.
- 7.4.1.3 Colocar la boquilla de asfalto correcta. Se recomienda utilizar la boquilla de **100g/s**
- 7.4.1.4 Configurar la temperatura de WLB S 10, a la temperatura de fabricación del asfalto espumado.

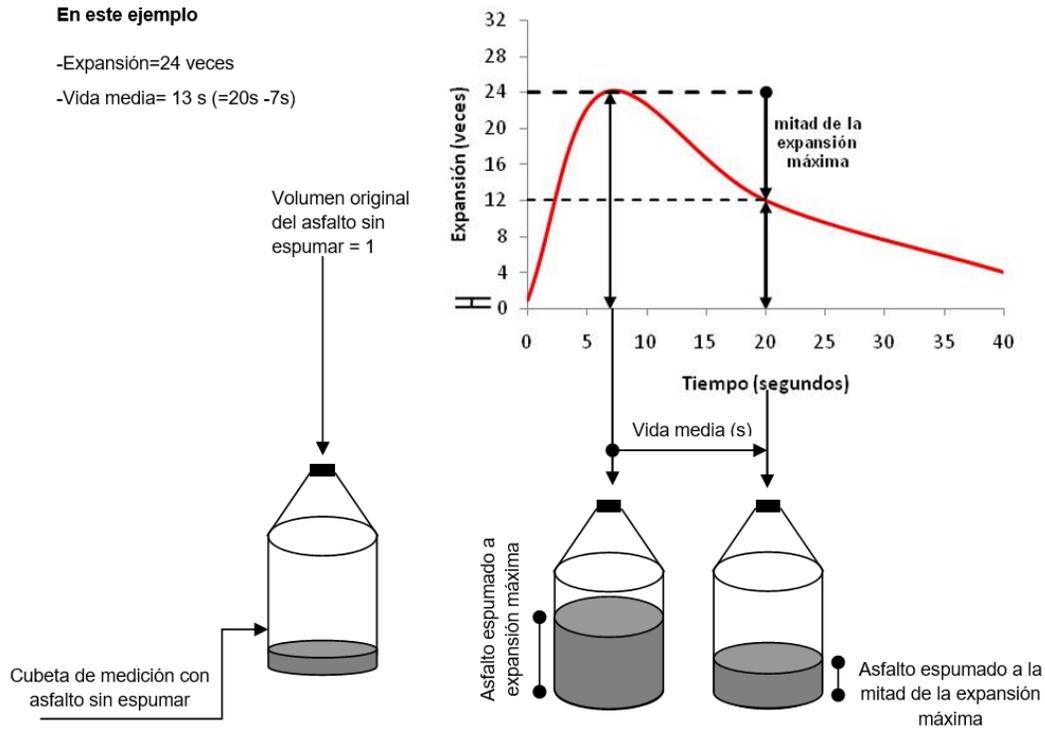
7.4.2 Verificación de las propiedades espumantes del asfalto

- 7.4.2.1 Agregar el asfalto precalentado al tanque del equipo WLB S 10.
- 7.4.2.2 Activar el sistema de recirculación del asfalto cuando este alcance una temperatura superior a los **120°C**. Dejar el asfalto recirculándose y calentándose hasta que alcance la temperatura de ensayo establecida.
- 7.4.2.3 Ajustar la presión de aire y agua del equipo WLB S 10. La presión del aire deberá estar en **5 bar (73 psi)** y la presión de agua en **6 bar (87 psi)**.
- 7.4.2.4 Colocar la cubeta de calibración vacía (20 l) debajo de la boquilla del asfalto y establecer la cantidad de asfalto a utilizar en la calibración. Se recomienda utilizar **500 g** para realizar la calibración.
- 7.4.2.5 Regular el caudal de agua utilizando el medidor de flujo con tornillo de ajuste. La escala alineada en el medidor de flujo muestra el caudal en litros por hora. Para ajustar la cantidad de agua en porcentaje con respecto al flujo se utiliza la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Caudal de agua en el equipo WLB S 10

Flujo-flujo continuo de asfalto	Cantidad de agua agregada (%)								
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Ajuste del caudal de agua (l/h)									
100g/s	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8	12.6	14.4	16.2	18
50g/s	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1	9

7.4.2.6 Utilizando la varilla de medición, la cubeta de calibración y un cronómetro realizar la verificación de las propiedades espumantes del asfalto. Iniciar el proceso de espumado y medir la expansión (**Ex**) y la vida media ($t_{1/2}$). La prueba de espumado se realiza durante **5 s (500g – 100g/s)**. La figura 7.1 presenta un ejemplo del cálculo de los dos parámetros.



Fuente: BSM Cold Recycling Laboratory Handbook, Wirtgen 2017

Figura 7.1 Cálculo de la expansión y vida media del asfalto espumado.

La vida media se define como el tiempo requerido por el asfalto espumado para disminuir desde su volumen máximo (expansión máxima) hasta la mitad.

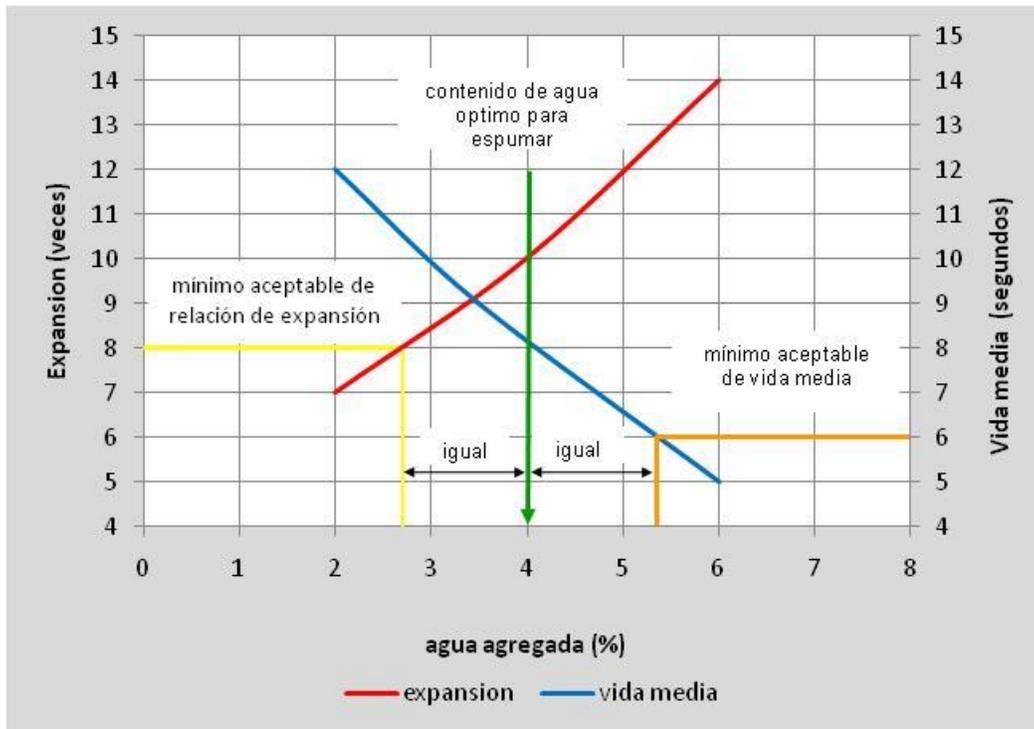
Nota 7.1 La cubeta debe vaciarse completamente y repetidamente para ensayos posteriores. Una vez que el asfalto ha sido espumado, éste no debe usarse en ensayos posteriores.

7.4.2.7 Realizar el proceso al menos para **tres contenidos de aguay tres temperaturas**. El contenido de agua óptimo para espumar se determina para una relación de expansión y una vida media, los requerimientos se presentan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Requerimientos de la relación de expansión y vida media del asfalto espumado

Temperatura del material	10°C a 15°C	>15°C
Relación de expansión, RE (veces)	10	8
Vida media, $t_{1/2}$ (segundos)	8	6

La figura 7.2 presenta un ejemplo del cálculo del contenido de agua óptimo para espumar.



Nota 7.2 No todos los asfaltos o tipos de asfalto son apropiados o recomendados para espumarse. Los distintos asfaltos o tipos de asfaltos deben ensayarse.

Fuente: BSM Cold Recycling Laboratory Handbook, Wirtgen 2017

Figura 7.2 Determinación del contenido de agua óptimo para espumar.

7.4.3 Fabricación de base estabilizada con asfalto espumado

7.4.3.1 Para fabricar la base estabilizada con asfalto espumado utilizar la mezcladora WLM 30 para mezclar los agregados con asfalto espumado, cemento o emulsión asfáltica.

7.4.3.2 La mezcladora se conecta directamente al equipo WLB 10 S y el asfalto espumado es bombeado a la mezcladora a través de una boquilla.

Nota 7.3 Verificar que la abertura de la espuma está en la dirección longitudinal con respecto a la mezcladora.

7.4.3.3 Separar las muestras preparadas en las siguientes cuatro fracciones:

- Material retenido en la malla de **19.0 mm**
- Material que pasa la malla de **19.0 mm** y retenido en la malla de **13.2 mm**
- Material que pasa la malla de **13.2 mm** y retenido en la malla de **4.75 mm**
- Material que pasa la malla de **4.75 mm**.

Preparar suficiente material granular y reemplazar la fracción retenida en la malla de **19.0 mm** con material que pasa la malla de 19.0 mm y se retiene en la de **12.5mm**.

El siguiente ejemplo explica este proceso:

Cantidad de material en la muestra grupal (10 kg)			
Pasa malla de 4.75 mm	Pasa malla 12.5 y retiene en 4.75 mm	Pasa malla 19.0 mm y retiene en 13.2 mm	Retenido en la malla de 19.0 mm
5360 g	1 870 g	1 820 g	950* g

*Reemplazar 950 g

Cantidad de material en la composición nueva (10kg)		
Pasa malla de 4.75 mm	Pasa malla 13.2 y retiene en 4.75 mm	Pasa malla 19.0 mm y retiene en 13.2 mm
5360 g	1870 g	(1 820 g + 950 g) = 2 770 g

Nota 7.4 Si no hay suficiente material disponible para reemplazar, triturar ligeramente una cantidad pequeña de material que fue retenido en la malla de 19.0 mm. Verificar que la temperatura del material está entre 20°C y 25°C cuando se coloca en el WLM 30.

7.4.3.4 Llenar la mezcladora con la muestra preparada, **25 kg** aproximadamente.

7.4.3.5 Pesar el agua y cemento/cal así como aditivos adicionales (si se requieren).

$$M_C = \frac{C_{ADD}}{100} * M_s$$

donde

M_C = Masa de cemento o cal, g

C_{ADD} = % de cemento (o cal) requerido, kg/m³

M_s = Masa seca de la muestra, g

7.4.3.6 Agregar el cemento o cal al material granular inicial.

7.4.3.7 Colocar la tapa a la mezcladora, cerrarla y encenderla. La velocidad de rotación de las paletas de la mezcladora puede ajustarse con el potenciómetro. El premezclado se realizará por **30 s**, se recomienda utilizar **1/3** de la **velocidad máxima**.

7.4.3.8 Agregar el agua requerida (**75%** de ω_o), mientras la mezcladora está en funcionamiento, a través de la abertura pequeña de la tapa de la mezcladora.

$$W_{agregar} = 0.75\omega_o - w_{seca} - aire$$

donde

- $W_{agregar}$ = Agua a agregar a la muestra, % respecto a la masa
 ω_o = Contenido de agua óptimo, % respecto a la masa
 $W_{seca-aire}$ = Contenido de agua de la muestra secada al aire, % respecto a la masa

$$M_{agua} = \frac{W_{agregar}}{100} * (M_{muestra} + M_{cemento})$$

donde

- M_{agua} = Masa del agua a ser agregada, g
 $W_{agregar}$ = Agua a agregar a la muestra, % respecto a la masa
 $M_{muestra}$ = Masa seca de la muestra, g
 $M_{cemento}$ = Masa de cal o cemento a agregar, g

7.4.3.9 Colocar la mezcladora debajo de la boquilla del equipo WLB 10 Spara que el asfalto sea lanzado directamente en la abertura de la mezcladora e incorporado.

7.4.3.10 Incrementar la velocidad de la mezcladora hasta aproximadamente **2/3** de la **velocidad máxima** y agregar la cantidad requerida de asfalto espumado.

$$M_{asfalto} = \frac{CA_e}{100} * (M_{muestra} + M_{cemento})$$

donde

- $M_{asfalto}$ = Masa de asfalto a agregar, g
 CA_e = Contenido de asfalto espumado, % respecto a la masa
 $M_{muestra}$ = Masa seca de la muestra, g
 $M_{cemento}$ = Masa de cemento o cal agregado, g

7.4.3.11 Llevar la muestra al contenido de agua óptimo (ω_o), después homogeneizar la muestra mezclando durante **30 s**.

$$M_{adicional} = \frac{M_{agua}}{3}$$

donde

- $M_{adicional}$ = Masa de agua a agregar, g
 M_{agua} = Masa de agua previamente agregada, g

7.4.3.12 Retirar la muestra y almacenarla en un recipiente hermético o bolsa de plástico para posteriormente fabricar los especímenes de prueba.

Nota 7.5 En productos mezclados con asfalto espumado con un máximo de 1% de cemento, el material puede permanecer en recipientes herméticos cerrados hasta que los especímenes de prueba sean fabricados, pero deben fabricarse dentro de las cuatro horas posteriores al mezclado.

7.5 Registro de resultados

Tabla 7.3 Registro de resultados de la influencia del contenido de agua en la relación de expansión y la vida media

Laboratorista: _____		Fecha: _____		Tiempo de inyección (s)	
ASFALTO		AGUA		AIRE	
Tipo: _____					
Presión: _____ bar		Presión: _____ (bar)		Presión: _____ (bar)	
Temperatura: _____ °C					
Flujo: _____ g/s					

Contenido de agua %	Flujo l/h	Mediciones						Promedio	
		Primera		Segunda		Tercera		Ex	t _{1/2}
		Ex	t _{1/2}	Ex	t _{1/2}	Ex	t _{1/2}		

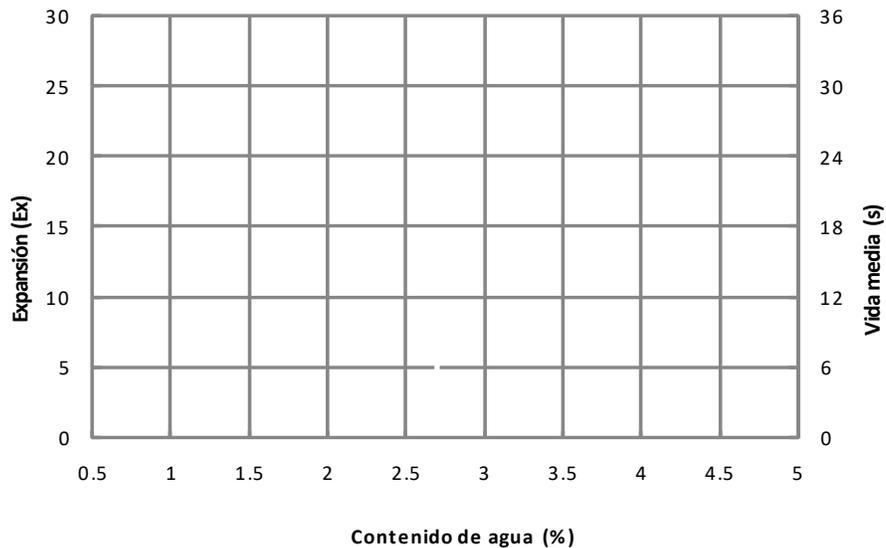
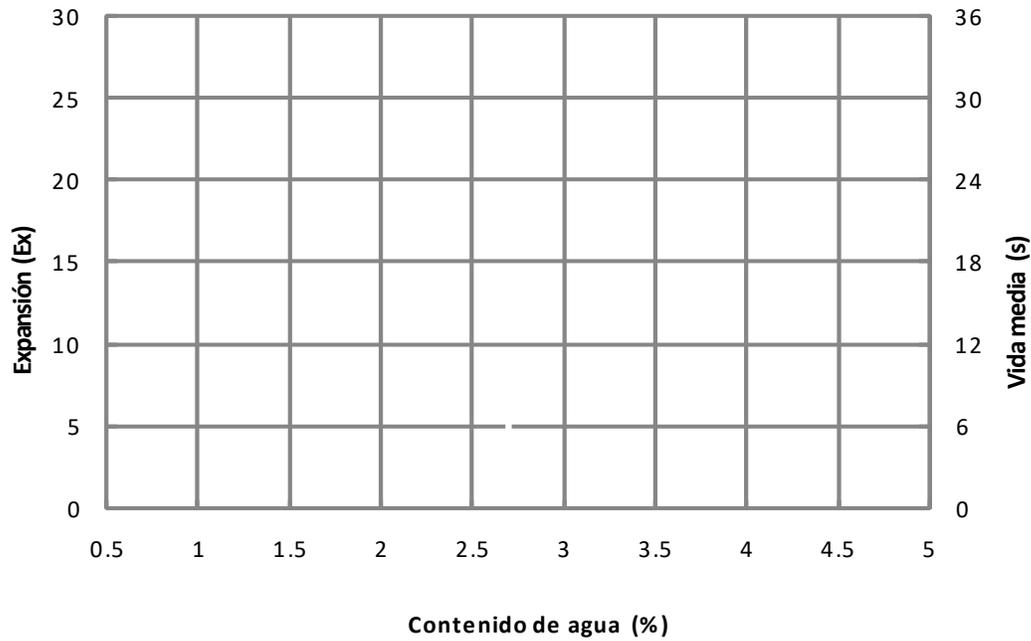


Tabla 7.4 Registro de resultados de la influencia de la temperatura en la relación de expansión y la vida media

Laboratorista:		Fecha:		Tiempo de inyección (s)	
ASFALTO		AGUA		AIRE	
Tipo: _____		Presión= _____ (bar)		Presión= _____ (bar)	
Presión= _____ bar		ω = _____ (%)			
Flujo= _____ g/s		Flujo= _____ (g/s)			

Contenido de agua %	Flujo l/h	Mediciones						Promedio	
		Primera		Segunda		Tercera		Ex	$t_{1/2}$
		Ex	$t_{1/2}$	Ex	$t_{1/2}$	Ex	$t_{1/2}$		



8. AE-VIII Método de prueba para compactar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado en el compactador giratorio.

8.1 Objetivo

Este método de prueba cubre la compactación de especímenes cilíndricos de material granular y material granular estabilizado con asfalto espumado utilizando el compactador giratorio.

8.2 Equipo y herramientas

- **Compactador Giratorio** electromecánico, electrohidráulico o electroneumático capaz de girar a 30 ± 0.5 rpm y producir un ángulo de giro interno constante de $1.16 \pm 0.02^\circ$ durante el proceso de compactación. El equipo deberá ser capaz de darle al espécimen hasta 250 giros, así como de aplicar una presión de 600 ± 60 kPa durante los primeros 5 giros y de 600 ± 18 kPa durante el proceso restante.
- **Moldes** de acero con un espesor mínimo de 7.5 mm, un diámetro interior de 149 a 150 mm y al menos 250 mm de altura. Deberá incluir sus accesorios: base para molde y al menos 2 platos circulares.
- **Balanza**, con capacidad de 15000 g y una resolución de 0.1 g.
- **Horno**, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- **Flexometro**, con un rango de medición de al menos 1000 mm y una resolución de 1 mm.
- **Misceláneos**: discos de papel de 150 mm de diámetro, cucharón, bolsas de plástico (para 20 kg de material), espátula, cuchillo.

8.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Compactador giratorio**. Verificar el ángulo de giro interno y fuerza de aplicación de la carga. Se recomienda al menos una vez cada 12 meses.

- **Balanza.** Calibrar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea en al menos 5 puntos (1000, 2000, 5000, 10 000 y 15000 g) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Horno,** calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento. Se recomienda que la verificación sea en, al menos, tres puntos (100, 110 y 120 °C) dentro del rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

8.4 Método de prueba

8.4.1 Pruebas preliminares

8.4.1.1 Previo al inicio de la compactación de los especímenes determinar el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\max}$) y el contenido de agua óptimo (ω_o) del material de acuerdo con el método de prueba *AE-VI Método de prueba para determinar las características de compactación de un suelo usando energía modificada (56 000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)).*

8.4.2 Preparación de la muestra

8.4.2.1 Preparar el material para compactarlo al contenido de agua óptimo (ω_o), de acuerdo con el procedimiento *-VII método de prueba para preparar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado* y colocar el material en un contenedor hermético o bolsa de plástico para prevenir la pérdida de humedad.

8.4.2.2 Determinar la cantidad mínima de material a ser preparado por espécimen utilizando la siguiente fórmula:

$$M_s = \left[\frac{\pi * d^2}{4} * h * \left[\gamma_{dm\max} * \left(1 + \frac{\omega_o}{100} \right) \right] \right] * 10^{-9}$$

donde

M_s = Masa del espécimen en el contenido de agua óptimo (ω_o), kg

d = diámetro del espécimen, mm

h = altura del espécimen, mm

$\gamma_{dm\max}$ = peso volumétrico seco máximo, kg/m³

ω_o = contenido de agua óptimo del material, %

Nota 8.1 Todos los especímenes son preparados y compactados a una temperatura entre 20°C y 25 °C (temperatura del aire y del material).

8.4.2.3 El número de especímenes a compactar depende de la prueba a ejecutar. La tabla 8.1 muestra la masa y el número de especímenes requerido para cada prueba, así como el número de capas que se compactan secuencialmente para obtener la altura requerida del espécimen. Las masas recomendadas para los especímenes se muestran en la tabla 8.1.

Tabla 8.1 Recomendación de masas para especímenes

PRUEBA	Dimensiones de espécimen mm	No. de capas	No. de especímenes	Rango de masas recomendadas por espécimen g
TSR 4"	100 x 63.5 ± 2.5 mm (diámetro x altura)	1 capa de 63.5mm de espesor	6	1,000 – 1,200
TSR 6"	150 x 95 ± 5 mm (diámetro x altura)	2 capas de 47.5mm de espesor	6	3,500 – 3,800
Triaxial	150 x 300 mm (diámetro x altura)	4 capas de 75 mm de espesor	10	6,700 – 7,000

Nota 8.2 Generalmente se prepara material para compactar más de un espécimen, para determinar la cantidad de material total requerido se multiplica la masa del espécimen por el número de especímenes a compactar, se recomienda agregar al menos 5 kg más de material.

8.4.2.4 Determinar la masa de material requerido para cada una de las capas como sigue:

$$M_L = \frac{M_s}{n}$$

donde

M_L = Masa del material en cada capa, kg

M_s = Masa de cada espécimen en el contenido de agua óptimo, kg

n = Número de capas de igual espesor a ser compactadas

8.4.3 Ejecución de la prueba

8.4.3.1 Colocar el disco de papel en el plato inferior del molde para evitar que el material quede adherido al mismo.

8.4.3.2 Pesar la masa de material húmedo requerido para la primer capa, con aproximación de **0.1 g**, y vaciarlo cuidadosamente dentro del molde sin derramar. Usar una espátula para esparcir el material uniformemente en el molde para evitar la segregación. Dejar el resto de la muestra en el contenedor hermético o bolsa de plástico para evitar la pérdida de humedad.

8.4.3.3 Introducir los datos necesarios en el compactador giratorio de acuerdo con las especificaciones del fabricante y ajustar la presión para lograr **600 ± 60 kPa** durante los primeros **5 giros** y de **600 ± 18 kPa** durante el proceso restante. La compactación es por altura, la cual depende del tipo de espécimen a fabricar, de acuerdo con la tabla 8.2

Tabla 8.2 Altura por cada espécimen

Espécimen	Altura por capa
TSR 4"	--
TSR 6"	47.5 mm
Triaxial	50± 1 mm

8.4.3.4 Iniciar la compactación del material.

8.4.3.5 Al finalizar la compactación extraer el molde del compactador y preparar la superficie de la capa compactada dentro del molde, para ello utilizar un cuchillo y ranurar la capa, para que la siguiente capa a compactar quede unida a la capa compactada. Cuando la superficie este lo suficientemente ranurada compactar inmediatamente la siguiente capa. Después de compactar, cada capa debe tener aproximadamente el mismo espesor.

8.4.3.6 Compactar la segunda capa y las subsecuentes siguiendo el procedimiento descrito arriba para la primera capa.

Nota 8.3 Todas las capas se deben compactar secuencialmente como una operación continua.

8.4.3.7 En la última capa por compactar colocar un segundo disco de papel en la parte superior del material

8.4.3.8 Del material estabilizado colocar **1500 g** en una charola y determinar el contenido de agua (ω) del material de acuerdo con *AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos*.

8.4.3.9 Al finalizar la compactación, extraer el molde del compactador.

8.4.3.10 Extraer la muestra compactada del molde, retirar los discos de papel y dejarla reposar en una charola por al menos cuatro horas

8.4.3.11 Determinar y registrar la masa del espécimen (M_s) con aproximación de **0.1 g**

8.4.3.12 Medir el diámetro del espécimen y la altura en cuatro ubicaciones espaciadas uniformemente alrededor de la circunferencia. Calcular la altura promedio del espécimen. Registrar el diámetro (d) y la altura promedio (h_{prom}) del espécimen.

8.4.3.13 Determinar el peso volumétrico húmedo (γ_m) y seco del espécimen (γ_d) y registrarlo.

8.4.3.14 Después, acondicionar (curar) los especímenes como es descrito en el procedimiento de prueba que corresponda (TSR o triaxial)

8.5 Cálculos

8.5.1 Cálculo del peso volumétrico húmedo del espécimen compactado

$$\gamma_m = \frac{M_s}{V} = \frac{4 * M_s}{\pi * d^2 * h} * 10^6$$

donde

- γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³
- M_s = masa del espécimen, g
- d = diámetro del espécimen, mm
- h = altura promedio del espécimen, mm

8.5.2 Cálculo del peso volumétrico seco del espécimen compactado

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} * 100$$

donde

- γ_d = peso volumétrico seco del espécimen, kg/m³
- ω = contenido de agua del espécimen, %

8.5.3 Cálculo del contenido de agua del espécimen compactado

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

donde

- ω = Contenido de agua, %
- M_{c+mh} = Masa cápsula+material húmedo, g
- M_{c+ms} = Masa cápsula+material seco, g
- M_c = Masa cápsula, g

8.6 Registro de resultados

Tabla 8.3 Registro de resultados de prueba de compactación de especímenes de base estabilizada con asfalto en el compactador giratorio

Datos de la muestra						
Proyecto:				Fecha:		
Descripción del material:				ID:		
$\gamma_{dmax} =$		kg/m^3		$\omega_o =$ %		
Tratamiento (estabilización)						
Procedencia del asfalto:						
Tipo de emulsión/asfalto:			Tipo de filler activo:			
Cantidades aplicadas (% respecto al γ_{dmax})						
asfalto =		%		Filler activo = %		
Método de compactación						
Martillo vibratorio		Compactador giratorio				
PESOS VOLUMETRICOS						
Especimen No		1	2	3	4	5
diámetro del especimen (d), mm						
altura del especimen mm	#1					
	#2					
	#3					
	#4					
	promedio					
Masa del especimen (Ms), g						
γ_m , kg/m^3						
γ_d , kg/m^3						
CONTENIDOS DE AGUA						
Ensayo 1	Capsula No.					
	masa capsula (M_c), g					
	Cap+material húmedo (M_{c+mh}), g					
	Cap+material seco (M_{c+ms}), g					
	ω , %					
Ensayo 2	Capsula No.					
	masa capsula (M_c), g					
	Cap+material húmedo (M_{c+mh}), g					
	Cap+material seco (M_{c+ms}), g					
	ω , %					
$\omega_{promedio}$, %						

$$\gamma_m = \frac{4 \cdot M_s}{\pi \cdot d^2 \cdot h} \cdot 10^6$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} \cdot 100$$

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} \cdot 100$$

8.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados.

No hay criterios de repetibilidad y reproducibilidad de este método de prueba

9. AE IX Método de prueba para la compactación de especímenes de material granular y estabilizado por medio del martillo vibratorio.

9.1 Objetivo

Este método de prueba cubre la compactación de especímenes cilíndricos de material granular y estabilizado utilizando el martillo vibratorio.

9.2 Equipo y herramientas

- **Compactador vibratorio** electromecánico, electrohidráulico o electroneumático con pisón de compactación de 148 mm (± 1 mm) de diámetro y una masa de 3,0 kg. El equipo deberá tener una potencia nominal de entrada de 1700W, una velocidad de impacto de 900 a 1700 mín y una energía de impacto de 23J por golpe (± 1 J).

Un marco de montaje, completo con cabeza de montaje para el pisón vibratorio, el cual permite que el pisón vibratorio sea suspendido y centrado sobre el molde. El marco debe garantizar la libertad de movimiento hacia abajo del martillo cuando compacta el material en el molde.

El marco debe también estar equipado con un sistema (conectado a la parte superior del marco) para levantar y bajar el pisón vibratorio. La base del marco debe ser atornillada a un bloque de concreto de 1m x 1 m y 300 mm de espesor, reforzado con dos capas de malla de acero, una colocada a 50 mm de la parte superior del bloque y la otra a 50 mm de la parte inferior.

Nota 9.1 La superficie del bloque debe estar completamente horizontal.

- **Moldes**, que constan de segmentos, con un diámetro de 152 mm (± 0.5 mm) de diámetro. La altura de los moldes es definida por la prueba que será ejecutada con el espécimen. Para la prueba de resistencia a la tensión indirecta se requiere un molde de 120 mm de altura, para la prueba de compresión no confinada un molde de 150 mm y para las pruebas triaxiales un molde de 320 mm (340 mm máximo).
- **Una placa base** de compactación, atornillada a la base del marco o al bloque de concreto, de al menos 300 mm de espesor. La superficie de la placa base debe estar completamente horizontal.

- **Dispositivo ranurador**, (IRD) con dientes sobresalientes para ranurar la parte superior de la capa compactada.
- **Balanza**, con capacidad de 15000 g y una resolución de 0.1 g.
- **Horno**, controlado termostáticamente y capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- **Flexometro**, con un rango de medición de al menos 1000 mm y una resolución de 1 mm.
- **Recipientes**, de aluminio de aproximadamente 2000 g de capacidad
- **Misceláneos**: cucharón, bolsas de plástico (para 20 kg de material), espátula, cuchillo.

9.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Compactador vibratorio**. Se recomienda al menos una vez cada 12 meses.
- **Balanza**. Calibrar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea en, al menos 5 puntos,(1000, 2000, 5000, 10 000 y 15000 g) considerando el rango de trabajo. Calibrar al menos una vez cada 12 meses.
- **Horno**. Calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento. Se recomienda que la calibración o verificación sea en al menos tres puntos (100,110 y 120 °C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

9.4 Método de prueba

9.4.1 Preparación de equipo

- 9.4.1.1 Asegurarse de que el marco WLV 1 esté bien sujeto al bloque de soporte de concreto. Levantar y bajar el pisón usando el sistema de elevación para garantizar que no haya resistencia al deslizamiento.
- 9.4.1.2 Configurar el pisón del martillo vibratorio en la posición “cero” y “superior”. Seguir cuidadosamente la configuración y el procedimiento de funcionamiento especificados en el manual de operación del equipo.
- 9.4.1.3 Limpiar el molde y la placa base. Engrasar la parte interior del molde con una aplicación ligera de aceite lubricante o spray antiadherente.
- 9.4.1.4 Fijar el molde a la placa base del marco WLV 1. Verificar el alineamiento del molde y del martillo vibratorio bajando el pisón dentro del molde. Verificar que el sistema de elevación proporciona suficiente espacio al pisón para descansar sobre la placa base.

9.4.2 Pruebas preliminares

9.4.2.1 Previo al inicio de la compactación de los especímenes determinar el peso volumétrico seco máximo (γ_{dmax}) y el contenido de agua óptimo (ω_o) del material de acuerdo con el método de prueba *AE-VI Método de prueba para determinar las características de compactación de un suelo usando energía modificada (56 000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³))*.

9.4.3 Preparación de la muestra

9.4.3.1 Preparar el material para compactarlo al contenido de agua óptimo (ω_o), de acuerdo con el procedimiento *AE-VII Método de prueba para preparar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado*, y colocar el material en un contenedor hermético o bolsa de plástico para prevenir la pérdida de humedad.

9.4.3.2 Determinar la cantidad mínima de material a ser preparado por espécimen utilizando la siguiente fórmula:

$$M_s = \left[\frac{\pi * d^2}{4} * h * \left[\gamma_{dmax} * \left(1 + \frac{\omega_o}{100} \right) \right] \right] * 10^{-9}$$

donde

- M_s = masa del espécimen en el contenido de agua óptimo (ω_o), kg
- d = diámetro del espécimen, mm
- h = altura del espécimen, mm
- γ_{dmax} = peso volumétrico seco máximo, kg/m³
- ω_o = contenido de agua óptimo del material compactado, %

Nota 9.2. Todos los especímenes son preparados y compactados a una temperatura entre 20°C y 25 °C (temperatura del aire y del material).

9.4.3.3 El número de especímenes a compactar depende de la prueba a ejecutar. La tabla 9.1 muestra la masa y el número de especímenes requerido para cada prueba, así como el número de capas que se compactan secuencialmente para obtener la altura requerida del espécimen.

Tabla 9.1 Masas recomendadas para especímenes

PRUEBA	Dimensiones de espécimen mm	No. de capas	No. de especímenes	Rango de masas recomendadas
TSR 6"	150 x 95 ± 5 mm (diámetro x altura)	2 capas ⁽¹⁾ de 47.5mm de espesor ⁽²⁾	6	3500 – 3800
Triaxial	150 x 300 mm (diámetro x altura)	6 capas ⁽³⁾ de 50 mm de espesor	10	6 700 – 7000

(1) Puede ser incrementado hasta 3 capas en circunstancias excepcionales donde se presente la desunión entre dos capas.

(2) Este es el número calculado y puede ser redondeado al mm más próximo.

(3) Si el peso volumétrico requerido no se puede alcanzar en ninguna capa después de la compactación durante 120 segundos con el martillo vibratorio, el procedimiento de fabricación debe ser finalizado e incrementar el número de capas.

Nota 9.3 Generalmente se prepara material para compactar más de un espécimen, para determinar la cantidad de material total requerido se multiplica la masa del espécimen por el número de especímenes a compactar, se recomienda agregar al menos 5 kg más de material.

9.4.3.4 Determinar la masa de material requerido para cada una de las capas como sigue:

$$M_L = \frac{M_s}{n}$$

donde

M_L = Masa del material en cada capa, kg

M_s = Masa de cada espécimen al contenido de agua óptimo, kg

n = Número de capas de igual espesor a ser compactadas

9.4.4 Ejecución de la prueba

9.4.4.1 Pesar la masa de material húmedo requerido para la primera capa, con aproximación de **0.1 g**, y vaciarlo cuidadosamente dentro del molde sin derramar. Usar una espátula para esparcir el material uniformemente en el molde para evitar la segregación. Dejar el resto de la muestra en el contenedor hermético o bolsa de plástico para evitar la pérdida de humedad.

9.4.4.2 Bajar el martillo vibratorio hasta que el pisón toque el material. Asegurarse de que el sistema de elevación este flojo, para permitir que el martillo se deslice hacia abajo cuando compacte el material.

9.4.4.3 Encender el martillo vibratorio. El martillo vibratorio automáticamente se detendrá cuando la altura de capa preestablecida o el límite preestablecido sea alcanzado y se levanta automáticamente si esta función esta preestablecida.

9.4.4.4 Preparar la superficie de la capa compactada dentro del molde usando el aparato ranurador colocando el dispositivo en la parte superior de la capa compactada y aplicar suficiente presión tal que los dientes penetren

completamente dentro del material. Mantener la presión aplicada, girar el aparato ranurador 90° y luego de nuevo al menos cuatro veces para aflojar el material de la parte superior de la capa.

- 9.4.4.5 Retirar el aparato ranurador del molde y verificar que la superficie este ranurada. Si el material no está lo suficientemente suelto, repetir el procedimiento descrito arriba tantas veces como sea necesario. Cuando la superficie este lo suficientemente ranurada, proceder inmediatamente con la siguiente capa.
- 9.4.4.6 Compactar la segunda capa y las subsecuentes siguiendo el procedimiento descrito en los puntos 9.4.4.1 al 9.4.3.3, los puntos 9.4.3.4 al 9.4.4.5 solo se realizarán si hay capas subsecuentes.
- 9.4.4.7 Después de que el material de la segunda capa se ha transferido al molde, colocar **±1500 g** del material tratado en un contenedor apropiado para determinar el contenido de agua (ω) de acuerdo con el *Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos (AE-IV)*.
- 9.4.4.8 Después de que terminó la compactación, retirar el molde de la placa base, colocarlo cuidadosamente sobre una charola y dejarlo reposar por al menos cuatro horas. Luego retirar cuidadosamente el molde y dejar el espécimen en la charola.
- 9.4.4.9 Determinar y registrar la masa del espécimen (M_s) con una aproximación de **0.1 g**
- 9.4.4.10 Medir el diámetro del espécimen y la altura en cuatro ubicaciones espaciadas uniformemente alrededor de la circunferencia. Calcular la altura promedio del espécimen. Registrar el diámetro (d) y la altura promedio (h_{prom}) del espécimen.
- 9.4.4.11 Determinar el peso volumétrico húmedo del espécimen (γ_m) y registrarlo.
- 9.4.4.12 Después curar los especímenes como es descrito en el procedimiento de prueba que corresponda (TSR o triaxial).

9.5 Cálculos

9.5.1 Cálculo del peso volumétrico húmedo del espécimen compactado.

$$\gamma_m = \frac{M_s}{V} = \frac{4 * M_s}{\pi * d^2 * h} * 10^6$$

donde

- γ_m = Peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³
- M_s = Masa del espécimen, g
- d = Diámetro del espécimen, mm
- h = Altura promedio del espécimen, mm

9.5.2 Cálculo del peso volumétrico seco del espécimen compactado

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} * 100$$

donde

- γ_d = peso volumétrico seco del espécimen compactado, kg/m³
- ω = contenido de agua del espécimen compactado, %

9.5.3 Cálculo del contenido de agua del espécimen compactado

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

donde

- ω = Contenido de agua, %
- M_{c+mh} = Masa cápsula+material húmedo, g
- M_{c+ms} = Masa cápsula+material seco, g
- M_c = Masa cápsula, g

9.6 Registro de resultados

Tabla 9.2 Registro de resultados de compactación de especímenes con el compactador giratorio

Datos de la muestra						
Proyecto:				Fecha:		
Descripción del material:				ID:		
$\gamma_{dmax} =$		kg/m^3		$\omega_o =$ %		
Tratamiento (estabilización)						
Procedencia del asfalto:						
Tipo de emulsión/asfalto:			Tipo de filler activo:			
Cantidades aplicadas (% respecto al γ_{dmax})						
asfalto =		%		Filler activo = %		
Método de compactación						
Martillo vibratorio		Compactador giratorio				
PESOS VOLUMETRICOS						
Especimen No		1	2	3	4	5
diámetro del especimen (d), mm						
altura del especimen mm	#1					
	#2					
	#3					
	#4					
	promedio					
Masa del especimen (Ms), g						
γ_m , kg/m^3						
γ_d , kg/m^3						
CONTENIDOS DE AGUA						
Ensayo 1	Capsula No.					
	masa capsula (M_c), g					
	Cap+material húmedo (M_{c+mh}), g					
	Cap+material seco (M_{c+ms}), g					
	ω , %					
Ensayo 2	Capsula No.					
	masa capsula (M_c), g					
	Cap+material húmedo (M_{c+mh}), g					
	Cap+material seco (M_{c+ms}), g					
	ω , %					
$\omega_{promedio}$, %						

$$\gamma_m = \frac{4 \cdot M_s}{\pi \cdot d^2 \cdot h} \cdot 10^6$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} \cdot 100$$

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} \cdot 100$$

9.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados.

No hay criterios para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de este método de prueba.

10. AE-X Método de prueba para determinar la Resistencia a la Tensión Indirecta (RTI) de material estabilizado con asfalto espumado (BSM).

10.1 Objetivo

Determinar la resistencia a la tensión indirecta del material estabilizado con asfalto espumado, midiendo la resistencia a la falla de un espécimen cilíndrico de 152 mm de diámetro y 95 mm de altura aplicando una carga a través del diámetro del espécimen

10.2 Equipo y herramientas

- **Prensa de ensaye con anillo dinamómetro o mecánica o servo-hidráulica** capaz de mantener una velocidad constante de deformación de 50.8 mm/min
- **Celda o anillo de carga** capaz de aplicar una carga de compresión a una velocidad de deformación controlada con una resolución de 50 N.
- **Mordaza tipo Lottman**, barras de acero con una superficie cóncava de radio de curvatura igual al radio del espécimen por ensayar. Para especímenes con diámetro de 100 mm (4") el ancho de las barras deberá ser de 12.7 ± 0.3 mm. Para especímenes con diámetro de 150 mm (6") el ancho de las barras deberá ser de 19.05 ± 0.3 mm. La longitud de las barras debe ser mayor que la altura de los especímenes. Las esquinas de las barras deberán estar ligeramente biseladas. Las barras de carga formarán parte de un dispositivo similar al que se muestra en la figura 10.1, en el que la barra de carga inferior está montada sobre una base que tiene dos postes de guía perpendiculares que se extienden hacia arriba. La barra de carga superior deberá estar limpia y deberá poder deslizarse libremente sobre los postes.
- **Balanza**, con capacidad de 10 000 g y una resolución de 0.1 g.
- **Un baño de agua**, con el fondo perforado, de al menos 150 mm de profundidad, controlado termostáticamente para mantener una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- **Horno**, de ventilación forzada, controlado termostáticamente y capaz de mantener la temperatura de prueba en $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (de al menos 240 litros de capacidad).

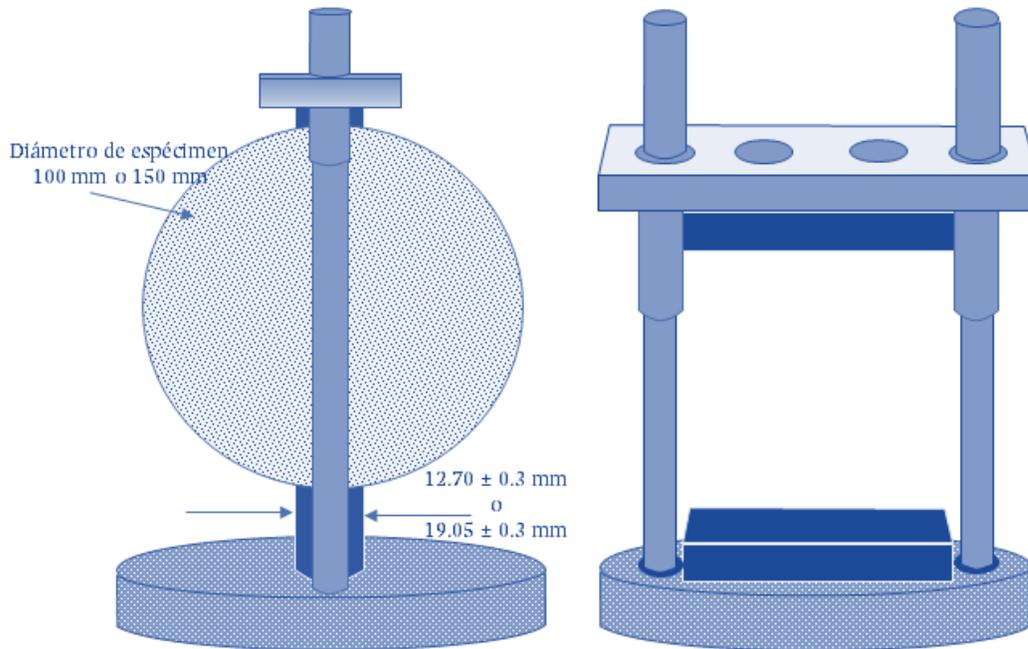


Figura 10.1 Diagrama de mordaza para tensión indirecta.

- **Termómetro infrarrojo**, con un rango de medición de 0 a 100°C y una resolución de 1°C.
- **Vernier**, con un rango de medición de 200 mm y una resolución de 0.1mm.

10.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Prensa.** Verificar la velocidad de deformación de 50.8 mm/min.
- **Celda o anillo de carga.** Calibrar con una resolución de 1 N. Se recomienda que la calibración sea en al menos 6 puntos (3000, 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 N) considerando el rango de trabajo y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Horno.** Calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento, en al menos 3 puntos (35, 40 y 45°C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Balanza.** Calibrar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea, en al menos, 4 puntos (1000, 2000, 3000 y 4000g), considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Termómetro infrarrojo.** Calibrar con una resolución de 1 °C. Se recomienda que la calibración sea en al menos 4 puntos (15, 25, 45 y 60°C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Vernier.** Calibrar o verificar con una resolución 0.1 mm. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos considerando el rango de trabajo (50, 80, 100, 150 y 200 mm) y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

10.4 Método de prueba

10.4.1 Preparación de los especímenes para ensayo (curado).

- 10.4.1.1 Fabricar seis especímenes de 152 mm de diámetro y 95 mm de altura para cada una de las pruebas, de acuerdo con el *Método de prueba para compactar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado en el compactador giratorio (AE-VIII)* o el *Método de prueba para la compactación de especímenes de material granular y estabilizado por medio del martillo vibratorio (AE-IX)*
- 10.4.1.2 Extraer los especímenes del molde e identificarlos. Colocarlos en un horno de ventilación forzada a una temperatura de **40°C (±1°C)** por un periodo mínimo de **72 horas(3 días)**.
- 10.4.1.3 Después de transcurridas las 72 horas, retirar los especímenes del horno, pesar cada uno y registrar su masa.
- 10.4.1.4 Regresar todos los especímenes al horno (a **40°C**) durante **4 horas** más y volver a pesarlos. Si la masa de algún espécimen disminuye más de **10 g**, regrese todos los especímenes al horno durante **24 horas** más. Este procedimiento es repetido las veces que sean necesarias hasta que los especímenes alcancen masa constante.
- Nota 10.1 El aumento de la temperatura de curado para acelerar el proceso de curado podría provocar el calentamiento de las partículas de asfalto espumado dispersas por encima de su punto de reblandecimiento y esto podría afectar el desempeño y características del material estabilizado con asfalto espumado. Por lo tanto, nunca exceder la temperatura de curado de 40°C
- 10.4.1.5 Una vez que los especímenes alcanzaron masa constante dejarlos enfriar a una temperatura constante de **25°C (±2°C)**.
- 10.4.1.6 Cuando los especímenes estén fríos determinar su masa (**Masa después del curado**) y registrarla.
- 10.4.1.7 Medir el diámetro (**d**) de cada espécimen y registrarlo.
- 10.4.1.8 Medir la altura de cada espécimen en cuatro ubicaciones espaciadas uniformemente alrededor de la circunferencia. Calcular la altura promedio (**h_{prom}**) y registrarla.
- 10.4.1.9 Calcular el peso volumétrico húmedo (γ_m) de cada uno de los especímenes como es indicado en la sección de cálculos.
- 10.4.1.10 Calcular el promedio ($\overline{X_n}$) y la desviación estándar (**S_n**) del peso volumétrico de los seis especímenes.
- 10.4.1.11 Determinar si alguno de los especímenes tiene valores atípicos (**T₀**). Eliminar cualquier espécimen cuyo peso volumétrico húmedo (γ_m) difiera del peso volumétrico húmedo promedio de las seis muestras por más de **2.5%**.

10.4.1.12 Colocar la mitad de las muestras en el baño con agua durante **24 horas** a **25°C (\pm 2°C)**. Después de 24 horas, sacar los especímenes del agua, secarlos superficialmente y ensayarlos inmediatamente.

10.4.2 Ejecución de la prueba

10.4.2.1 Verificar que la temperatura de los especímenes sea de **25°C (\pm 2°C)**.

10.4.2.2 Colocar el espécimen en la mordaza Lottman en la barra de carga inferior y posicionarlo de tal manera que se encuentre centrado entre las barras de carga.

10.4.2.3 Centrar la mordaza con el espécimen debajo del pistón de carga del equipo de compresión.

10.4.2.4 Aplicar una carga de contacto de **0.1 kN** y verificar que el espécimen este centrado.

10.4.2.5 Aplicar carga al espécimen, sin golpear, a una velocidad constante de **50.8 mm por minuto** hasta alcanzar la carga máxima. Registrar la carga máxima (**P**) con una aproximación de **10 kN** y la deformación (δ) a la falla con una aproximación de **0.1 mm**.

10.4.2.6 Retirar el espécimen de la prensa, romperlo por la mitad y registrar la temperatura del centro (**temperatura a la falla**).

10.4.2.7 Tomar una muestra de aproximadamente **500 g** de material de la parte central del espécimen y colocarla inmediatamente en un recipiente cerrado.

10.4.2.8 Determinar el contenido de agua (ω) de cada espécimen, siguiendo el *AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos, y registrarlo*.

10.4.2.8 Calcular el valor **RTI** para cada uno de los especímenes (con una resolución de **1kPa**).

10.4.2.9 Determinar el valor de **RTI_{seca}** calculando el promedio de la RTI de los especímenes sin acondicionar.

10.4.2.10 Determinar el valor de **RTI_{acond}** calculando el promedio de la RTI de los especímenes acondicionados.

10.4.2.12 Calcular el peso volumétrico seco (γ_d) de cada uno de los especímenes (usar el contenido de agua determinado para los especímenes sin acondicionar).

10.5 Cálculos

10.5.1 Cálculo del peso volumétrico húmedo del espécimen.

$$\gamma_m = \frac{4 * M_s}{\pi * d^2 * h} * 10^6$$

donde

γ_m = peso volumétrico del espécimen, kg/m³

M_s = masa del espécimen, g

h = altura promedio del espécimen, mm

d = diámetro del espécimen, mm

10.5.2 Cálculo de valores atípicos de los especímenes

Identificar valores atípicos del peso volumétrico de los 6 especímenes.

$$T_0 = \frac{X_0 - X_n}{S_n}$$

donde

T_0 = valor de prueba t

X_0 = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³

X_n = peso volumétrico húmedo promedio, kg/m³

S_n = desviación estándar de γ_m , kg/m³

n = 6, número de especímenes

Si el valor absoluto de $T_0 > 1.82$ entonces el espécimen es atípico

Nota 10.2 Los valores atípicos pueden identificarse estableciendo la probabilidad (relacionada con el número de desviaciones estándar de la media de la muestra de datos) de caer fuera de la banda que se extiende a ambos lados de la media. $T_{critica}$ es un valor que se usa para definir los límites de la banda. $T_{critica}$ se determina multiplicando el número de datos por la probabilidad. En el caso de compactación, $T_{critica} = 1.82$ para $n = 6$. Si $T_0 > T_{critica}$, entonces X_0 es un valor atípico.

10.5.3 Cálculo del contenido de agua.

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

donde

ω = Contenido de agua, %

M_{c+mh} = Masa cápsula + material húmedo, g

M_{c+ms} = Masa cápsula + material seco, g

M_c = Masa cápsula, g

10.5.4 Cálculo del peso volumétrico seco.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} * 100$$

donde

- γ_d = peso volumétrico seco del espécimen, kg/m³
- γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³
- ω = contenido de agua del espécimen, %

Nota 10.3 Usar el contenido de agua determinado para los especímenes sin acondicionar

10.5.5 Cálculo de la resistencia a la tensión indirecta (RTI).

$$RTI = \frac{2 * P}{\pi * h * d} * 10^6$$

donde

- RTI= Resistencia a la tensión indirecta, kPa
- P= Carga máxima aplicada, kN
- h= altura promedio del espécimen, mm
- d= diámetro del espécimen, mm

En el anexo A7 se presenta un ejemplo de cálculo de la resistencia a la tensión indirecta de un material estabilizado con asfalto espumado.

10.6 Registro de resultados

Tabla 10.1 Registro de resultados de la prueba de resistencia a la tensión indirecta (RTI)

Proyecto:								
No. De muestra:		Fecha de reporte:						
Descripción del material:								
RELACIÓN CONTENIDO DE AGUA/PESO VOLUMÉTRICO (MATERIAL TRATADO/SIN TRATAR)								
$\gamma_{dm\acute{a}x} =$		kg/m^3		$\omega_o =$		%		
TRATAMIENTO (ESTABILIZACION)								
Tipo de asfalto/emulsion:		Procedencia:						
Tipo de filler activo:								
PORCENTAJE DE APLICACIÓN (% con respecto al $\gamma_{dm\acute{a}x}$)								
Asfalto:		Filler activo:						
DATOS DEL ESPECIMEN								
Fecha de fabricación								
Fecha de colocacion en el horno								
Fecha en que se retiro del horno								
Fecha de ensayo								
Diámetro		mm						
ID Especimen								
mediciones de altura mm	#1							
	#2							
	#3							
	#4							
$h_{prom} =$								
Masa después del curado,		g						
Peso volumétrico húmedo (γ_m),		kg/m^3						
Promedio y desviación estándar		$X_n =$		$S_n =$				
Valor T_0								
Atípicos ($T_0 > 1.82$)								
Contenido de agua (ω),		%						
Peso volumétrico seco (γ_d),		kg/m^3						
RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA								
Condicion		Sin acondicionar			Acondicionados			
Contenido de agua (ω),		%						
Deformación (δ),		mm						
Temperatura a la falla		°C						
Carga máxima (P),		kN						
RTI		kPa						
RTI promedio		kPa						

10.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados.

No hay criterios para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de este método de prueba.

11. AE XI Método de prueba para determinar las propiedades al corte de material estabilizado con asfalto espumado (BSM).

11.1 Objetivo

Determinar las propiedades al corte (Cohesión, C , y ángulo de fricción interna, ϕ), de especímenes grandes (152 mm de diámetro y 300 mm de altura) de material estabilizado con asfalto espumado, por medio de la prueba triaxial monotónica.

11.2 Equipo y herramientas

- **Celda triaxial (cilindro de confinamiento)**, capaz de soportar de forma segura las presiones de confinamiento que son aplicadas al espécimen. Las dimensiones internas de la celda deben ser apropiadas para acomodar el espécimen encapsulado en una membrana de caucho inflable.
- **Membrana para aplicar presión de confinamiento**, de caucho de 160 mm (± 5 mm) de diámetro y 300 mm de altura.
- **Compresor de aire**, con manómetro y regulador de presión capaz de inflar la membrana y mantener una presión constante de hasta 200 kPa.
- **Baño de agua**, con el fondo perforado, de al menos 350 mm de profundidad, controlado termostáticamente para mantener una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- **Horno**, de ventilación forzada controlado termostáticamente y capaz de mantener la temperatura de ensayo dentro de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- **Máquina de compresión**, apropiada con espacio suficiente para acomodar el molde de confinamiento ensamblado. La máquina debe poder aplicar la carga requerida a una velocidad de deformación de 3 mm/min y aplicar una carga máxima de 200 kN. La máquina debe medir y registrar la carga aplicada con una resolución de 0.05 kN y la deformación vertical con una resolución de 0.05 mm, en intervalos de 1 segundo.

La configuración recomendada de la máquina de prueba es un actuador móvil/carga situado arriba de la celda triaxial con la base de reacción fija debajo de la celda triaxial.

- **Balanza**, con una capacidad de 20 000 g y con una resolución de 1 g.
- **Termómetro infrarrojo**, con un rango de medición de 0°C a 100°C y una resolución de 1°C .

- **Bolsas de plástico**, para almacenar aproximadamente 10 kilos de material.

11.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Máquina de compresión.** Verificar que la velocidad de deformación sea de 3 mm/min.
- **Celda de carga.** Calibrar con una resolución de 50 N. Se recomienda que la calibración sea en al menos 6 puntos (10 000, 20 000, 30 000, 40 000, 50 000 y 60 000 N) considerando el rango de trabajo y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Horno.** Calibrar o verificar con la misma resolución del instrumento. Se recomienda calibrar, en al menos 3 puntos (35, 40 y 45 °C), considerando el rango de trabajo y al menos una vez cada 12 meses.
- **Balanza.** Calibrar con una resolución 1 g. Se recomienda que la calibración sea, en al menos, 5 puntos (3000, 6000, 9000, 12 000 y 15 000 g), considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Termómetro infrarrojo.** Calibrar con una resolución de 1 °C. Se recomienda que la calibración sea en al menos 4 puntos (15, 25, 45 y 60°C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

11.4 Método de prueba

11.4.1 Preparación de los especímenes para ensayo (curado)

11.4.1.1 Fabricar diez especímenes de 152 mm de diámetro y 300 mm de altura para cada una de las pruebas, de acuerdo con el *Método de prueba para compactar especímenes de base estabilizada con asfalto espumado en el compactador giratorio (AE-VIII) o el Método de prueba para la compactación de especímenes de material granular y estabilizado por medio del martillo vibratorio (AE-IX)*

Nota 10.1 Fabricar los especímenes con el contenido de agua óptimo (w_o)

11.4.1.2 Dejar los diez especímenes en sus respectivos moldes cubiertos toda la noche con un trapo húmedo. A la mañana siguiente, retirar los especímenes de sus respectivos moldes e identificarlos apropiadamente.

11.4.1.3 Determinar la masa de cada espécimen y registrarla (**masa antes del curado**)

11.4.1.4 Medir el diámetro (**d**) de cada espécimen y registrarlo.

11.4.1.5 Medir la altura de cada espécimen en cuatro ubicaciones espaciadas uniformemente alrededor de la circunferencia. Calcular la altura promedio (h_{prom}) y registrarla.

- 11.4.1.6 Calcular el peso volumétrico húmedo (γ_m antes del curado) de cada uno de los especímenes.
- 11.4.1.7 Calcular el promedio (\bar{X}_n) y la desviación estándar (S_n) del peso volumétrico de los diez especímenes.
- 11.4.1.8 Determinar si alguno de los especímenes tiene valores atípicos (T_0).
- Nota 10.2 Si se eliminan más de dos especímenes, no debe realizarse el ensayo.
- 11.4.1.9 Colocar los especímenes en el horno a una temperatura de **40°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)** durante **8 horas**. Transcurridas las 8 horas, retirar todos los especímenes del horno, colocar cada uno en una bolsa de plástico, sellar la bolsa y regresar los especímenes al horno a **40°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)** durante otras **48 horas**.
- 11.4.1.10 Transcurridas las 48 horas sacar los especímenes del horno. Sacar **dos** de los **especímenes** de su bolsa de plástico y sumergirlos en el baño con agua durante **24 horas** (cerciorarse de que el nivel superior del agua este por lo menos **25.4 mm** por encima del espécimen).
- 11.4.1.11 Colocar los especímenes restantes en bolsas de plástico (secas), sellarlas y permitir que se enfríen a **25°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)** (por un periodo mínimo de **12 horas**). Luego sacar los especímenes de las bolsas de plástico y pesarlos inmediatamente antes del ensayo.
- 11.4.1.12 Transcurridas las **24 horas** de acondicionamiento en el agua retirar los especímenes, secarlos superficialmente y pesarlos antes del ensayo. Registrar la masa (**Masa después del curado**).
- 11.4.1.13 Calcular el peso volumétrico húmedo (γ_m antes del ensayo), después del curado, de cada uno de los especímenes.

11.5 Ejecución del ensayo

- 11.5.1.1 Colocar la muestra cuidadosamente dentro del molde de confinamiento. Colocar el molde con el espécimen sobre la placa base cuidando de no dañar los bordes del espécimen. Sujetar el molde a la placa base. Colocar con cuidado la placa superior sobre el espécimen. Asegurarse de que hay espacio suficiente entre el actuador (pistón de carga) y la placa base de la máquina de prueba. Colocar el molde sobre la placa base y alinearlos correctamente.
- 11.5.1.2 Bajar el pistón de carga hasta que haga contacto con la placa superior. Monitorear la lectura de la celda de carga para evitar cargar el espécimen durante este proceso.
- 11.5.1.3 Conectar el suministro de aire a la válvula de inflado del molde de confinamiento. Ajustar el regulador de presión para inflar la membrana a la presión requerida.

Nota 11.1 La prueba triaxial monótonica se realiza a cuatro presiones de confinamiento: 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa (cuando haya suficientes especímenes, ensayar dos para cada una de las presiones de confinamiento).

11.5.1.4 Operar la máquina de prueba en modo de desplazamiento controlado a **3 mm/min** y ensayar **dos** de los **especímenes sin acondicionar** sin presión de confinamiento (**0 kPa**). Verificar que la magnitud de la carga y la deformación están siendo medidos y registrados cada segundo.

11.5.1.5 Parar la prueba y el registro de datos cuando la deformación total sea mayor a **18 mm (6% de deformación)** o cuando la carga aplicada comience a disminuir.

11.5.1.6 Después de parar la prueba, descargar el espécimen regresando el actuador a su posición inicial.

11.5.1.7 Liberar la presión de confinamiento si se está aplicando. Retirar la placa superior y retirar el molde del marco de carga.

11.5.1.8 Sacar cuidadosamente el espécimen del molde. Inmediatamente romperlo y registrar la temperatura del centro del espécimen.

11.5.1.9 Tomar una muestra de aproximadamente **1 000 g** de material de la parte central del espécimen y colocarla inmediatamente en un recipiente cerrado. Determinar el contenido de agua (w después del ensayo) siguiendo el *AE-IV Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelos*.

11.5.1.10 Calcular el peso volumétrico seco (γ_d) del espécimen.

11.5.1.11 Repetir este procedimiento para los especímenes sin acondicionar para todas las presiones de confinamiento. Cuando haya suficientes especímenes, ensayar **dos** para cada una de las siguientes presiones de confinamiento: **50 kPa, 100 kPa y 200 kPa**.

Nota 11.2 Cuando el número total de especímenes disponibles para el ensayo disminuyó debido a la dispersión del peso volumétrico húmedo:

- Si uno de los especímenes fue eliminado, ensayar únicamente un espécimen sin acondicionar a 50 kPa de presión de confinamiento.
- Si dos especímenes fueron eliminados, ensayar un espécimen sin acondicionar a 50 kPa y a 100 kPa de presión de confinamiento.

11.5.1.11 Repetir este procedimiento para los **dos especímenes acondicionados** a una presión de confinamiento de **100 kPa**.

11.6 Cálculos

11.6.1 Cálculo del peso volumétrico húmedo del espécimen.

$$\gamma_m = \frac{4 * M_s}{\pi * d^2 * h} * 10^6$$

donde

γ_m = masa volumétrica del espécimen, kg/m³

M_s = masa del espécimen, g

h = altura promedio del espécimen, mm

d = diámetro del espécimen, mm

11.6.2 Cálculo de valores atípicos de los especímenes

Identificar valores atípicos del peso volumétrico de los 10 especímenes.

$$T_0 = \frac{X_0 - X_n}{S_n}$$

donde

T_0 = valor de prueba t

X_0 = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³

X_n = peso volumétrico húmedo promedio, kg/m³

S_n = desviación estándar de γ_m , kg/m³

n = 10, número de especímenes

Si el valor absoluto de $T_0 > 2.18$ entonces el espécimen es un valor atípico.

Nota 11.3 Los valores atípicos pueden identificarse estableciendo la probabilidad (relacionada con el número de desviaciones estándar del promedio de la muestra de datos) de caer fuera de la banda que se extiende a ambos lados de la media. $T_{crítica}$ es un valor que se usa para definir los límites de la banda. $T_{crítica}$ se determina multiplicando el número de datos por la probabilidad. En el caso de compactación, $T_{crítica} = 2.18$ para $n = 10$. Si $T_0 > T_{crítica}$, entonces X_0 es un valor atípico.

11.6.3 Cálculo del esfuerzo a la falla

$$\sigma_{a,f} = \frac{4 * P_{a,f}}{\pi * d^2} * 10^6$$

donde

$\sigma_{a,f}$ = esfuerzo aplicado a la falla, kPa

$P_{a,f}$ = carga aplicada a la falla, kN

d = diámetro inicial del espécimen, mm

11.6.4 Cálculo del esfuerzo total a la falla

$$\sigma_{1,f} = \sigma_{a,f} + \sigma_{DW}$$

donde

$\sigma_{1,f}$ =esfuerzo total aplicado a la falla, kPa

σ_{DW} = esfuerzo debido al peso muerto de la placa superior y el pistón de carga

$$\sigma_{DW} = \frac{4 * (M_{TP} + M_{LR}) * g * 10^{-3}}{\pi * d^2}$$

donde

M_{TP} =masa de la placa superior, kg

M_{LR} =masa del pistón de carga, kg

g = aceleración debido a la gravedad (9.81), m/s²

d =diámetro del espécimen al inicio del ensayo, mm

11.6.5 Cálculo de la relación entre $\sigma_{1,f}$ y el esfuerzo de confinamiento (σ_3).

$$\sigma_{1,f} = A * \sigma_3 + B$$

La relación entre $\sigma_{1,f}$ y el esfuerzo de confinamiento (σ_3) es lineal. Realizar un análisis de regresión lineal con las combinaciones de $\sigma_{1,f}$ y σ_3 obtenidas de cada uno de los especímenes sin acondicionar que fueron ensayados con el propósito de determinar los valores de A (pendiente) y B (intersección).

Por ejemplo, graficar los resultados de $\sigma_{1,f}$ y σ_3 de los ensayos de los especímenes sin acondicionar ($\sigma_{1,f}$ en el eje de las ordenadas y σ_3 en el eje de las abscisas). Seleccionar la línea de mejor ajuste que pase a través de los puntos y determinar la línea (A) y la intersección con el eje de las ordenadas (B)

11.6.6 Cálculo de las propiedades de corte (cohesión “C” y ángulo de fricción “ ϕ ”)

La relación entre A (pendiente), B (intersección) y las propiedades de corte son:

$$A = \frac{1 + \text{seno } \phi}{1 - \text{seno } \phi} \quad B = \frac{2 * C * \text{Cos } \phi}{1 - \text{seno } \phi} \quad \text{Teoría de Mohr-Coulomb}$$

donde

C=Cohesión, kPa

ϕ =ángulo de fricción interna, en grados

Usar los valores de A y B determinados del análisis de regresión para obtener:

$$\text{ángulo de fricción interna } (\varphi) = \text{seno}^{-1} \left[\frac{A - 1}{A + 1} \right]$$

y

$$\text{Cohesión (C)} = \frac{B * (1 - \text{seno} \varphi)}{2 * \text{Cos } \varphi}$$

11.6.7 Cálculo de cohesión residual

$$C_{\text{res}} = \frac{(\sigma_{1,100,S} - 100)}{(\sigma_{1,100,U/S} - 100)} * 100$$

donde

- C_{res} = Cohesión residual, %
- $\sigma_{1,100,S}$ = Esfuerzo promedio a la falla de los especímenes acondicionados a una presión de confinamiento de 100 kPa.
- $\sigma_{1,100,U/S}$ = Esfuerzo promedio a la falla de los especímenes sin acondicionar a una presión de confinamiento de 100 kPa.

En el anexo A8 se presenta un ejemplo de cálculo de las propiedades al corte de un material estabilizado con asfalto espumado.

11.7 Registro de resultados

Tabla 11.1 Registro de resultados de la prueba Triaxial monotónica para material estabilizado con asfalto espumado (BSM)

Proyecto: _____		Fecha: _____																																																																								
ID muestra: _____																																																																										
Descripción del material:																																																																										
RELACIÓN ω/γ_d (tratado/sin tratar)																																																																										
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ =		kg/m ³				ω_o =		%																																																																		
TRATAMIENTO (ESTABILIZACION)																																																																										
Tipo de asfalto		Fuente				cantidad agregada (% $\gamma_{dm\acute{a}x}$)		%																																																																		
Tipo de filler activo		Fuente				cantidad agregada(% $\gamma_{dm\acute{a}x}$)		%																																																																		
DETALLES DEL ESPECIMEN																																																																										
Fecha de fabricación																																																																										
Diámetro mm																																																																										
ID especimen																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 5%;">1</td> <td style="width: 5%;">2</td> <td style="width: 5%;">3</td> <td style="width: 5%;">4</td> <td style="width: 5%;">5</td> <td style="width: 5%;">6</td> <td style="width: 5%;">7</td> <td style="width: 5%;">8</td> <td style="width: 5%;">9</td> <td style="width: 5%;">10</td> </tr> <tr> <td rowspan="4" style="text-align: center;">Mediciones de altura mm</td> <td>#1</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>#2</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>#3</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>#4</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>h_{prom} =</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>													1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mediciones de altura mm	#1										#2										#3										#4											h_{prom} =									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																
Mediciones de altura mm	#1																																																																									
	#2																																																																									
	#3																																																																									
	#4																																																																									
	h_{prom} =																																																																									
masa antes del curado,		kg																																																																								
γ_m antes del curado,		kg/m ³																																																																								
Promedio y desviación estándar		X_n =					S_n =																																																																			
Valor de prueba T_0																																																																										
Atípicos? ($T_0 > 2.18$)																																																																										
Fecha de colocación en el horno sin sellar																																																																										
Hora de colocacion en el horno sin sellar																																																																										
Fecha colocación en el horno bolsa sellada																																																																										
Hora colocación en el horno bolsa sellada																																																																										
Fecha y hora en que se retiro del horno																																																																										
Fecha y hora de ensayo																																																																										
Masa después del curado ,		kg																																																																								
γ_m antes del ensayo,		kg/m ³																																																																								
ω después del ensayo,		%																																																																								
γ_d (kg/m ³)																																																																										
ENSAYO TRIAXIAL																																																																										
Presión de confinamiento (kPa) σ_3		0		50		100		200		100 (acondic)																																																																
ID muestra																																																																										
carga máxima aplicada (P),		Kn																																																																								
deformación maxima (δ),		mm																																																																								
Temperatura en el centro,		°C																																																																								
masa de la carga muerta		kg																																																																								
ESFUERZO TOTAL APLICADO $\sigma_{1,f}$, kPa																																																																										

Valores de regresión

Pendiente (A)=

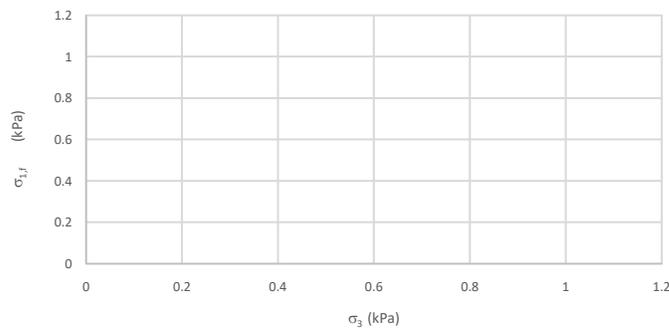
Intersección(B)= kPa

PROPIEDADES CORTANTES

C= kPa

ϕ = °

C_{res} = %



11.8 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados.

No hay criterios para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de este método de prueba.

Bibliografía

1. ASTM C 117 (2013). Standard Test Method for material finer than 75 mm (No.200) sieve in mineral aggregates by washing. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/C117.htm>
2. ASTM C 702 (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/C702.htm>
3. ASTM C 136 (2011). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/C136.htm>
4. ASTM D2216 (2010). Standard test Method for Laboratory Determination of Water Content (moisture) of Soil and Rock by mass. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D2216.htm>
5. ASTM D4318 (2010). Standard test Methods for Liquid limit, Plastic limit, and Plasticity index of Soils. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm>
6. ASTM D1557 (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m^{3https://www.astm.org/Standards/D1557.htm}
7. JIMENEZ ACUÑA MONICA (2011). ¿Qué es el asfalto espumado, se puede utilizar en Costa Rica?. Boletín técnico Vol. 2 No. 13, Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). Costa Rica.
8. WIRTGEN GMBH (2017). BSM Cold Recycling Laboratory Handbook. Germany

Anexos

A.1. Verificación de tamices

Toda abertura de tamiz deberá tener la misma probabilidad de ser inspeccionada de acuerdo con la *Especificación estándar para la malla de alambre metálico y tamices* (ASTM E11). Se recomienda el siguiente procedimiento:

- A.1.1 Inspeccionar visualmente la malla, observando la uniformidad de la malla contra un fondo iluminado y uniforme. Si se detectan irregularidades (arrugas, ondulaciones, defectos, etc.) el tamiz es inaceptable para ser utilizado en ensayos.
- A.1.2 Determinar el número mínimo de aberturas (n) a evaluar de la malla conforme a la tabla A.1.2. En la columna [9] se indican los valores para inspección o verificación, mientras que en la columna [11] se indican los valores para calibración.

Para mallas de más de 8 pulgadas de diámetro, se deberán ajustar los valores de la tabla A.1.2 proporcionalmente en función del área de tamizado. Para tamices de más de 8" de diámetro con designaciones de la malla de 25 mm o mayores, se evaluará un máximo de 25 aberturas para tamices de inspección y 50 aberturas para mallas de calibración. Para mallas con 15 aberturas o menos, se deberán inspeccionar todas las aberturas completas (figura A.1.1).

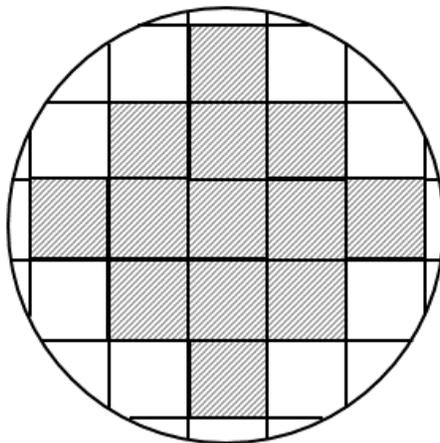


Figura A.1.1 Ejemplo de verificación completa

- A.1.3 Determinar el valor del tamaño de abertura media realizando mediciones en las aberturas de la malla en dirección vertical y horizontal (Figuras A.1.2 y A.1.3).

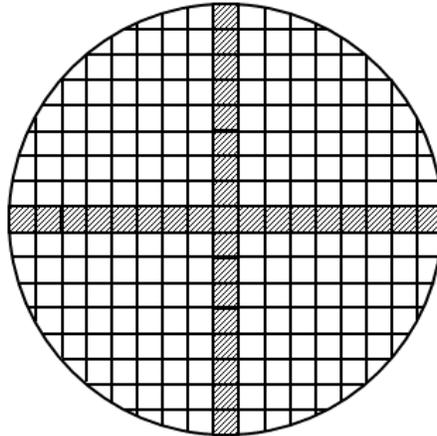


Figura A.1.2 Ejemplo de medición cruzada

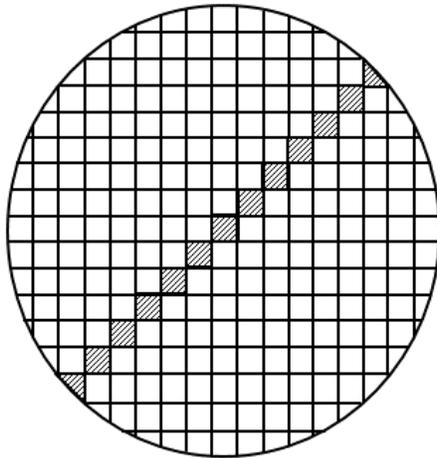


Figura A.1.3 Ejemplo de medición diagonal

- A.1.4 Determinar el tamaño de cada abertura a inspeccionar (w_i) y el diámetro del alambre (d_i) en los puntos medios, como se ilustra en la figura A.1.4. Dichas dimensiones se deberán determinar en milímetros, excepto para mallas con aberturas menores a 1 mm, se deberán determinar en micrómetros. La determinación de las aberturas a inspeccionar deberá realizarse aleatoriamente, siendo que todas las aberturas deberán tener la misma oportunidad de ser elegidas.

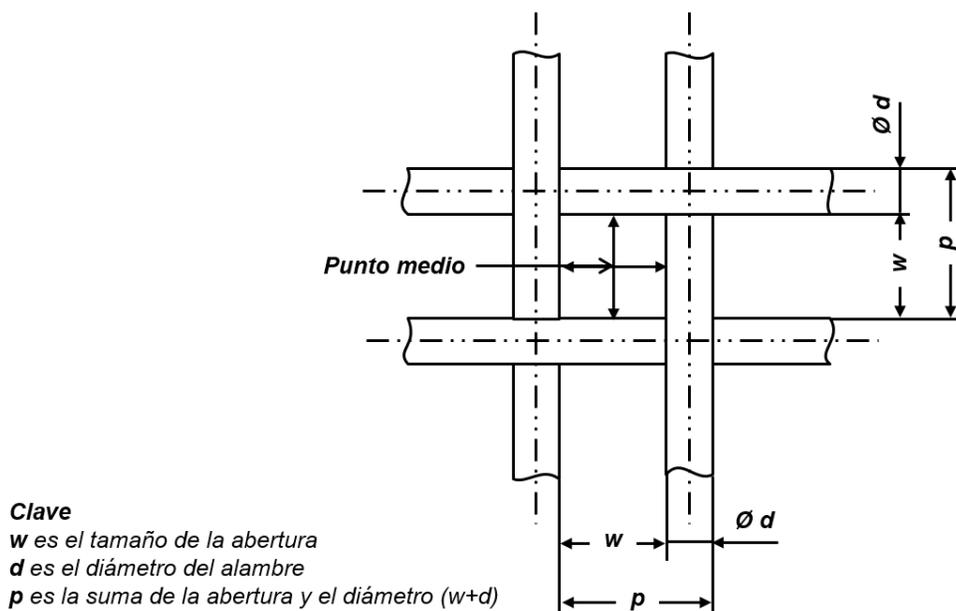


Figura A.1.4 Tamaño de la abertura

A.1.5 Inspeccionar las aberturas para detectar algún sobredimensionamiento de las mismas. Se recomienda utilizar una lupa, especialmente en mallas finas.

A.1.6 Evaluar las cuatro tolerancias establecidas: variación de la abertura media (Y), variación máxima de la abertura (X), variación máxima de la desviación estándar y variación permitida en el diámetro medio del alambre, y comparar con las dimensiones de la malla.

- Variación de la abertura media permitida ($\pm Y$):

Verificar que el tamaño de abertura media (punto 4.1.3) de la malla se encuentre dentro del rango indicado en la Tabla A.1.2, columna [4].

- Variación máxima permitida de la abertura (X):

Verificar que el tamaño de cada abertura inspeccionada (punto 4.1.4) sea menor a la variación máxima permitida en la Tabla A.1.2, columna [5].

- Variación máxima permitida de la desviación estándar de la muestra (s):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}$$

Dónde:

s : Desviación estándar de la muestra, expresada en mm o μm

n : Número de aberturas inspeccionadas

w_i : Tamaño de la abertura inspeccionada, expresada en mm o μm

\bar{w} : Tamaño promedio de las aberturas inspeccionadas, expresada en mm o μm

Calcular la desviación estándar de las aberturas inspeccionadas, y verificar que dicho valor sea menor al permitido en la tabla A.1.2, columna [12].

Nota: Si el número de aberturas a inspeccionar es menor a 15, el valor de la desviación estándar no será evaluado.

- Variación permitida en el diámetro del alambre

Verificar que el diámetro del alambre de cada abertura inspeccionada (punto 4.1.4) se encuentre dentro de los límites establecidos en la tabla A.1.2, columnas [14 y 15].

A.1.7 Medir el marco de la malla y verificar que cumpla con las tolerancias de dimensiones de acuerdo con la tabla A.1.1.

Tabla A.1.1 Dimensiones estándar de marcos

Diámetro nominal [pulg]	Tolerancia del Diámetro pulg [mm]	Marco Típico ^A
	Sección interna de la parte superior ^B	Altura Nominal pulg [mm]
3	3.00 + 0.030 / - 0.000 [76.2+ 0.76 / - 0.00]	1 1/4 [31.8] FH ^C
		5/8 [15.9] HH
6	6.00 + 0.030 / - 0.000 [152.4+ 0.76 / - 0.00]	1 3/4 [44.5] FH
		1 [25.4] HH
8	8.00 + 0.030 / - 0.000 [203.2+ 0.76 / - 0.00]	2 [50.8] FH
		1 [25.4] HH
10	10.00 + 0.030 / - 0.000 [254+ 0.76 / - 0.00]	3 [76.2] FH
		1 1/2 [38.1] HH
12	12.00 + 0.030 / - 0.000 [304.8+ 0.76 / - 0.00]	3 1/4 [82.6] FH
		2 [50.8] IH
		1 5/8 [41.3] HH

^A Altura del marco medida desde la parte superior del marco hasta la parte superior de la malla.

^B Medido 0.2 pulg (5 mm) por debajo de la parte superior del marco.

^C FH = altura total; HH = media altura; IH = altura intermedia.

Tabla A.1.2 Dimensiones nominales y variaciones permitidas para la tela de la malla y mallas de prueba de cumplimiento, inspección y calibración

[1]	[2a]	[3] ^A	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9] ^{B, C}	[10]	[11] ^{B, C}	[12]	[13]	[14]	[15]
Designación de la malla		Abertura nominal de la malla	± Y Variación de la apertura media	± X Variación máxima de la apertura	Abertura individual máxima resultante	Cumplimiento de tamices		Inspección de mallas		Calibración de tamices		Diámetro típico del alambre	Diámetro del alambre promedio permisible	
Abertura Estándar (w)	Alternativa EE. UU					Muestreo de aberturas por cada 100 ft ²	Desviación estándar máxima	Muestreo de aberturas por malla	Desviación estándar máxima	Muestreo de aberturas por malla	Desviación estándar máxima		Mín.	Máx.
[mm]	[pulg]	[pulg]	[mm]	[mm]	[mm]							[mm]		
63.0	2 1/2"	2.5	1.69	2.44	65.44	20	-	todas	-	todas	-	5.6	4.8	6.4
50.0	2 "	2	1.34	2.06	52.06	20	-	todas	-	todas	-	5	4.3	5.8
37.5	1 1/2"	1.5	1.01	1.67	39.17	20	1.103	todas	-	todas	-	4.5	3.8	5.2
31.5	1 1/4"	1.25	0.855	1.47	32.97	20	0.907	todas	-	todas	-	4	3.4	4.6
25.0	1 "	1	0.682	1.24	26.24	20	0.715	todas	-	todas	-	3.55	3	4.1
19.0	3/4"	0.75	0.522	1.01	20.01	150	0.548	15	0.368	30	0.393	3.15	2.7	3.6
16.0	5/8"	0.625	0.441	0.89	16.89	150	0.467	15	0.314	30	0.335	3.15	2.7	3.6
12.5	1/2"	0.5	0.346	0.75	13.25	150	0.374	15	0.251	30	0.268	2.5	2.1	2.9
9.50	3/8"	0.375	0.265	0.61	10.11	150	0.294	15	0.198	30	0.211	2.24	1.9	2.6
6.30	1/4"	0.25	0.178	0.46	6.76	150	0.208	15	0.14	30	0.149	1.8	1.5	2.1
4.75	No. 4	0.187	0.135	0.37	5.12	150	0.165	15	0.111	30	0.118	1.6	1.3	1.9
2.36	No. 8	0.0937	0.069	0.23	2.59	200	0.095	20	0.067	40	0.071	1	0.85	1.15
1.70	No. 12	0.0661	0.05	0.18	1.88	250	0.074	25	0.054	50	0.057	0.8	0.68	0.92
1.18	No. 16	0.0469	0.036	0.14	1.32	400	0.056	40	0.043	80	0.045	0.63	0.54	0.72
[µm]		[pulg]	[µm]	[µm]	[µm]							[mm]		
600	No. 30	0.0234	19.0	91.0	691	500	34.04	50	27.0	100	28.06	0.4	0.34	0.46
300	No. 50	0.0117	10.4	58.0	358	800	21.2	80	17.59	160	18.15	0.2	0.17	0.23
150	No. 100	0.0059	6.0	38.0	188	1000	13.65	100	11.53	200	11.86	0.1	0.085	0.115
75	No. 200	0.0029	3.7	26.0	101	1000	9.12	100	7.7	250	8.04	0.05	0.043	0.058

^A Columna 3 - Estos números son sólo aproximados, pero se utilizan como referencia; el tamiz se identificará por la designación normalizada en milímetros o micrómetros.

^B Columnas 9 y 11 - Ver anexo A1, en el que se especifica que se inspeccionarán todas las aberturas para las mallas de ensayo que tengan 15 aberturas o menos.

^C Columnas 9 y 11 - Este número de aberturas de muestra se basan en una malla de prueba de 8 pulgadas de diámetro.

Nota A.1: La Tabla ha sido ajustada a las mallas utilizadas en el presente manual. Para verificación de otros tamaños, referirse a la norma ASTM E11

A.2. Ejemplo de muestreo, Equivalente de Arena - Método A

A.2.1 Como lo indica el método de prueba, la masa requerida para evaluar una muestra (1 probeta) se obtiene como el promedio de cuatro muestreos con el medidor cilíndrico. En el caso del ejemplo en la figura A.2.1, la masa requerida sería de 164 g.

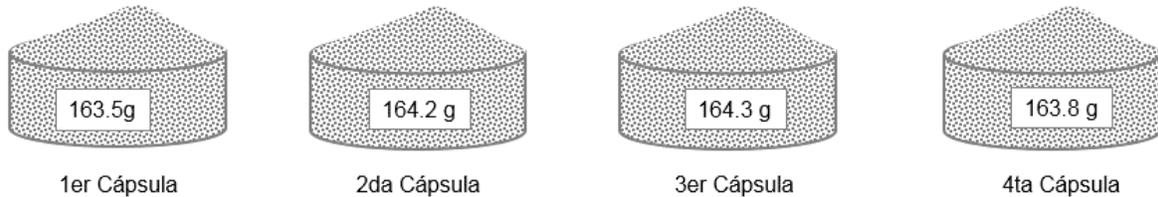


Figura A.2.1 Ejemplo de cálculo de masa para muestra

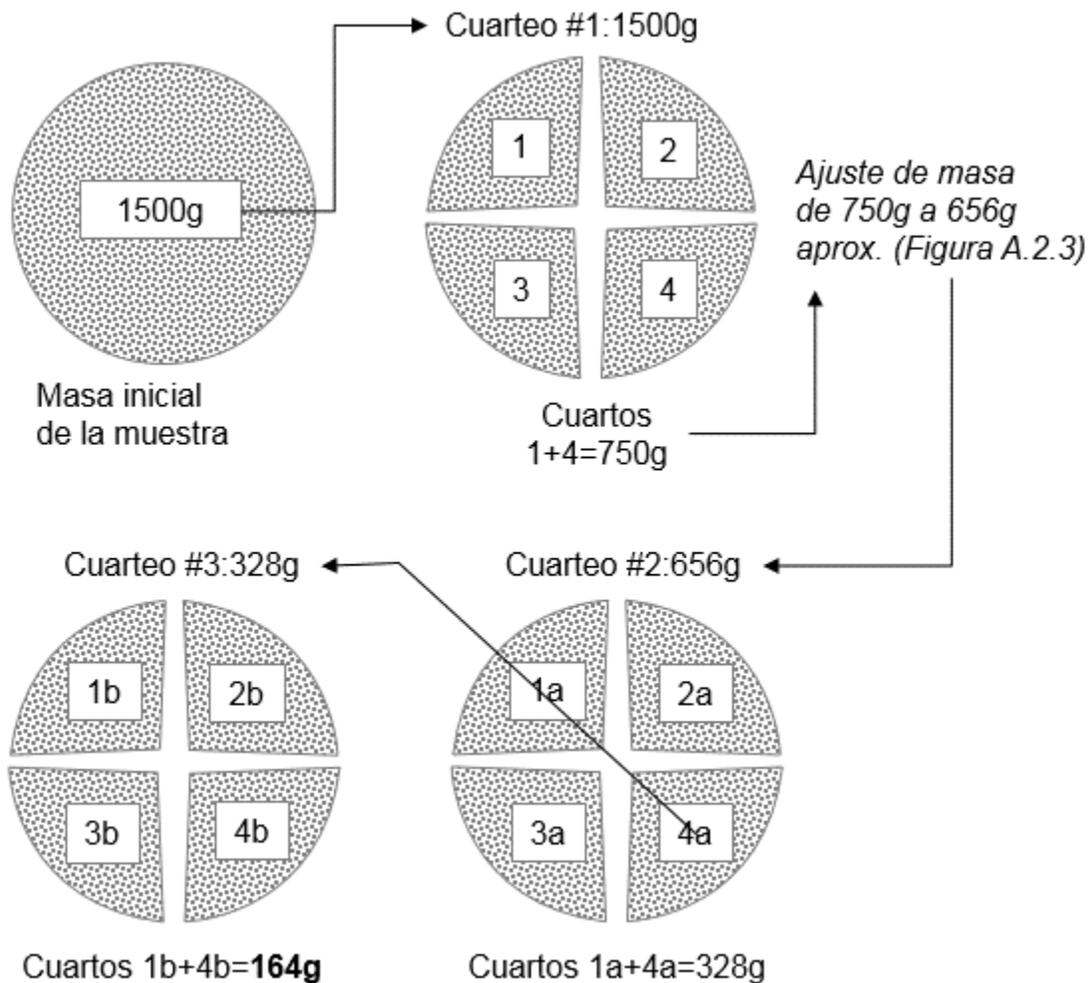


Figura A.2.2 Ejemplo de cuarteo (reducción)

El método A indica que la muestra se debe obtener después de 2 cuarteos sucesivos sin ajuste. En la figura A.2.2 se puede observar un ejemplo de cuarteo donde se obtiene la masa de 164 g (aproximadamente) después de dos cuarteos sucesivos.

El ajuste de masa requerido para continuar al Cuarteo #2 se puede realizar como se ejemplifica en la figura A.2.3. En el caso que se vaya a evaluar más de 1 probeta por ensayo, las muestras adicionales de 164 g se pueden obtener de los cuarteos $2b+3b$ y un cuarteo sucesivo del material $2a+3a$.

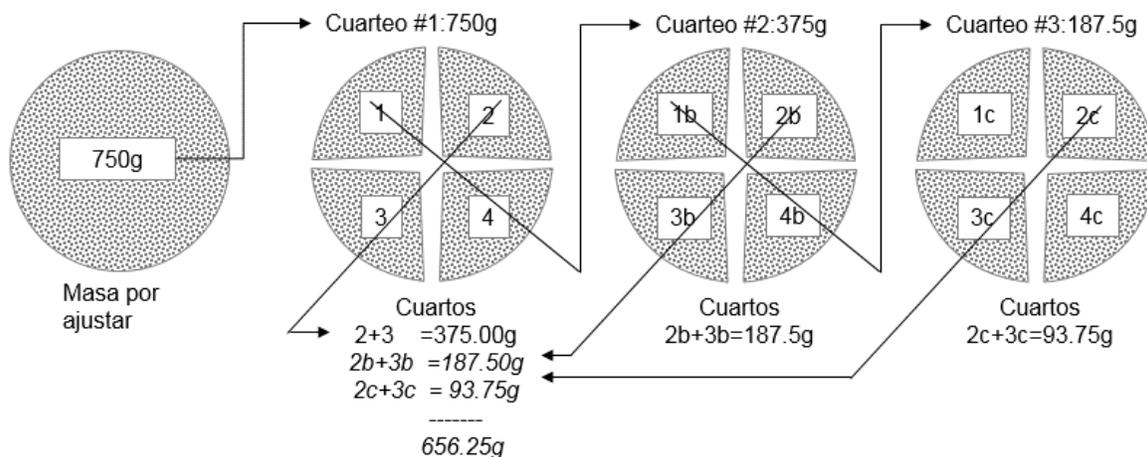


Figura A.2.3 Ejemplo de ajuste de masa

Es importante destacar que los cuarteos no son exactos, por lo que las figuras presentadas son únicamente un indicativo de cómo debe realizarse el proceso.

A.3. Repetibilidad y Reproducibilidad (r&R)

La mayoría de los métodos de ensayo presentan un apartado sobre precisión, en el cual se identifica la desviación estándar del ensayo realizado por un operador y la desviación estándar multilaboratorio.

La desviación estándar (1S) de un operador se refiere a la desviación del método de prueba cuando es realizado por el mismo operador, en el mismo equipo y bajo condiciones similares. La desviación estándar multilaboratorio es la desviación del método de prueba cuando alguno de los factores ha cambiado, pudiendo ser cambio de operador, equipo, lugar, etc. La repetibilidad hace referencia a la desviación estándar de un operador, mientras que la reproducibilidad hace referencia a la desviación estándar multilaboratorio.

Existe otro parámetro conocido como la diferencia entre dos resultados (D2S) el cual se obtiene de la siguiente manera: $D2S = 1S(1.96\sqrt{2}) \approx 1S * 2.8$. En algunos casos cuando el ensayo no indica directamente el valor D2S, este se puede obtener como se indicó anteriormente, siendo un parámetro rápido para determinar si un ensayo cumple con la repetibilidad o reproducibilidad del mismo.

En algunos métodos de prueba, la desviación estándar de los resultados varía dependiendo del resultado. Esto da lugar a que se indique la desviación estándar en términos del coeficiente de variación (1S%). Cuando se observe dicho caso, se deberá calcular el valor de la desviación estándar o diferencia entre dos resultados como el producto del coeficiente de variación por la media de los resultados a evaluar ($1S = 1S\% * \bar{x}$), ($D2S = D2S\% * \bar{x}$). En los criterios r&R de cada método de prueba del presente documento, se indica cuando los valores están dados en términos del coeficiente de variación (CV).

Ejemplo: Verificación de la repetibilidad de la degradación en la Máquina de Los Angeles

$$\text{Resultado 1} = 18.3 \% \quad \text{Resultado 2} = 20.4 \%$$

$$\text{Diferencia entre dos resultados del ensayo} = |18.3 \% - 20.4 \%| = 2.1 \%$$

$$\text{Media de los dos resultados del ensayo} = \frac{18.3 \% + 20.4 \%}{2} = 19.35 \%$$

$$\text{Diferencia permitida entre dos resultados: } D2S = (0.057 * 19.35\%) = 1.103\%$$

Verificación: 2.1 % > 1.103 %, por lo tanto, los resultados no cumplen con el criterio de repetibilidad.

A.4. Balanzas recomendadas

Los ensayos para bases estabilizadas con asfalto espumado implican el uso de balanzas con distintas resoluciones y capacidades. Por lo anterior, realizando una compilación de la resolución mínima especificada por cada método de prueba, así como el rango de masas requerido, se recomienda que un laboratorio adquiera por lo menos dos balanzas para utilizar en los ensayos contenidos en este manual.

A.4.1 Balanza con capacidad de 16 000 g y resolución de 0.1 g.

Esta balanza se utiliza en los ensayos de: granulometría de finos y gruesos, contenido de agua, compactación usando energía modificada, preparación de especímenes de base estabilizada con asfalto espumado, compactación de especímenes en el compactador giratorio, compactación de especímenes por medio del martillo vibratorio, resistencia a la tensión indirecta y triaxial. Se recomienda entonces, la calibración de la balanza en los puntos y/o puntos cercanos a las masas que se utilizarán en los ensayos. Siendo estos los siguientes: 300, 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 6000, 10 000, 12 000 y 15 000 g.

Es importante destacar que una balanza con estas características cumple con los requerimientos para realizar también los ensayos recomendados en el Protocolo de Diseño AMAAC PA-MA-01/2013 mezclas asfálticas hasta nivel II.

A.4.2 Balanza con capacidad de 2000 g y resolución de 0.01 g.

Esta balanza se utiliza en las pruebas de contenido de agua y límites de consistencia. Se recomienda entonces, la calibración de la balanza en los puntos y/o puntos cercanos a las masas que se utilizarán en los ensayos. Siendo estos los siguientes: 10,20, 30, 50, 100 y 250 g.

A.5. Verificación de la copa de Casagrande.

A.5.1 Inspeccionar que la copa de Casagrande se encuentre en buenas condiciones de trabajo. Verificar lo siguiente:

- *Desgaste de la base:* La marca en la base donde la copa hace contacto no debe ser mayor a 10 mm de diámetro. Si la marca es mayor, la base puede ser maquinada para remover lo gastado previendo que el pulido no haga que la base sea más delgada que lo especificado en el punto 3.2 y las otras relaciones dimensionales se mantengan.
- *Desgaste de la copa:* La copa debe ser cambiada cuando el ranurador haya formado una depresión de 0,1 mm de profundidad o cuando el espesor de la copa ha sido reducido a la mitad de su espesor original. Verificar que la copa esté firme al soporte del dispositivo.
- *Gancho de la copa:* Verificar que el soporte de la copa este fijo y que no presente juego lateral mayor a 3 mm.
- *Desgaste de la manivela:* No debe estar gastada a tal grado que la copa golpee antes el gancho de la copa perdiendo contacto con la manivela.
- *Patatas de caucho:* Las patas deben evitar el rebote o deslizamiento de la superficie de trabajo. Reemplazarlas cuando se vuelvan duras, frágiles o agrietadas por el tiempo.

A.5.2 *Ranurador:* Inspeccionar el ancho de la punta del ranurador con una lupa de bolsillo provista con una escala en mm. Inspeccionar la profundidad de la punta con un calibrador vernier.

A.5.3 *Ajuste de la altura de caída de la copa de Casagrande:* Para ajustar la altura de caída de la copa de Casagrande a una altura de 10 ± 0.2 mm, colocar un pedazo de cinta adhesiva, que cruce la parte inferior de la copa, paralela con el eje del pivote de la manija. La cinta debe bisectar el punto de la copa que hace contacto con la base. Para copas nuevas, colocar un pedazo de papel carbón en la base y permitir que la copa caiga varias veces para marcar el punto de contacto. Ensamblar la copa a la base y levantarla hasta que la copa llegue a su máxima altura. Deslizar el calibrador bajo la copa por el frente y observar si hay contacto de la copa con la cinta (ver figura 3.2). Si la copa y la cinta están en contacto, la altura de caída es aproximadamente correcta. Si no, ajuste la copa hasta que se tenga contacto. Realizar el ajuste dando vuelta a dos revoluciones por segundo mientras se tiene el calibrador en posición contra la cinta y copa. Si se escucha un sonido sin la copa, el ajuste es correcto. Si no se escucha sonido o si la copa alcanza al calibrador,

reajuste la altura de caída. Si la copa pega sobre el calibrador durante la verificación, el perno está extremadamente usado y las partes gastadas deben de ser reemplazadas. Quitar la cinta después de verificar.

A6. Verificación del volumen del molde de compactación

El volumen se determina con dos métodos, uno es el método de llenado con agua y el otro con mediciones lineales.

A6.1. Equipo

- Vernier con un rango de medición de 0 a 150 mm y con resolución de 0.02 mm.
- Placas de plástico o vidrio, dos placas de plástico o vidrio de 200 mm x 200 mm x 6 mm de espesor.
- Termómetro, con una resolución de 0.1°C y un error máximo permisible de 0.5 °C.
- Grasa o sello similar.
- Equipo misceláneo, toallas de papel.

A6.2 Procedimiento.

A6.2.1. Llevar a cabo este procedimiento en un área aislada. No realizar la prueba donde se tenga fluctuaciones importantes de temperatura.

Método de llenado con agua:

- A6.2.2 Colocar grasa en la parte inferior del molde de compactación y colocarlo en una de las placas de plástico o vidrio (colocar grasa en la parte superior del molde (ligeramente). Tenga cuidado de no engrasar el interior del molde. Si es necesario usar la placa base, colocar la grasa en la placa base y asegurarla.
- A6.2.3 Determinar la masa del molde engrasado y de ambas placas de vidrio o plástico con aproximación al gramo y registrarla como M_{m+p} .
- A6.2.4 Colocar el molde y la placa base en una superficie firme y nivelada y llenar el molde con agua hasta tener el agua ligeramente por encima del borde.
- A6.2.5 Deslizar la segunda placa sobre la superficie del molde de tal forma que el molde permanezca completamente lleno con agua y no queden burbujas de aire atrapadas. Adicionar o retirar agua con la jeringuilla de bulbo tanto como sea necesario.
- A6.2.6 Secar completamente el exceso de agua del exterior del molde y de las placas.
- A6.2.7 Determinar la masa del molde, placas y agua y registrarla como M_{m+p+w} con aproximación al gramo.

A6.2.8 Determinar la temperatura del agua en el molde con aproximación de 0.1°C y registrarla. Determinar y registrar la densidad del agua de la tabla dada en el método ASTM D 854 como sigue:

$$\gamma_{w,c} = 1.00034038 - (7.77 * 10^{-6}) * T - (4.95 * 10^{-6}) * T^2$$

donde:

$\gamma_{w,c}$ = densidad del agua, con aproximación a 0.00001 g/cm³

T = Temperatura de prueba, con aproximación a 0.1 °C.

A6.2.9 Calcular la masa del agua en el molde restando la masa determinada en A6.2.3 a la masa determinada en A6.2.7.

A6.2.10 Calcular el volumen del agua dividiendo la masa del agua entre la densidad del agua. Registrar el volumen con aproximación a 0.1 cm³ para el molde de 4" (101.6 mm) o a 1 cm³ para el molde de 6". (152.4 mm). Para determinar el volumen del molde en m³, multiplicar el volumen en cm³ por 1x10⁻⁶. Registrar este volumen.

A6.2.11 Si se usa el método de llenado con agua y se verifica con medidas lineales, repetir esta determinación de volumen (A6.2.4 – A6.2.10) y determinar y registrar el valor promedio, **V_w**.

Método de mediciones lineales:

A6.2.12 Usando el vernier, medir el diámetro interno del molde seis veces en la parte inferior y seis veces en la superior espaciando igualmente las mediciones alrededor de la circunferencia del molde. Registrar los valores con aproximación 0.02 mm. Determinar y registrar el diámetro interior promedio. Verificar que el diámetro interior está dentro de la tolerancia especificada, 4.000 ± 0.016" (101.6 in. ± 0.4 mm.); si no es así, no utilizar el molde.

A6.2.13 Usando el vernier o el micrómetro de profundidad (preferiblemente), medir la altura interna del molde hasta la placa base. Realizar tres o más mediciones igualmente espaciadas alrededor de la circunferencia interior del molde, y preferiblemente una en el centro del molde (usar una regla para facilitar estas mediciones y corregir las mediciones por el espesor de la regla). Registrar estos valores con aproximación a 0.02 mm.). Verificar que la altura promedio está dentro de las tolerancias especificadas, 4.584± 0.018". (116.4±0.5 mm); si no es así no utilizar el molde.

A6.2.14 Calcular el volumen del molde con cuatro dígitos significativos (en cm³) como sigue:

$$V_m = \frac{\pi * h_{prom} * (d_{prom})^2}{4} * 10^{-3}$$

donde

- V_m = volumen del molde en mediciones lineales, con cuatro cifras significativas, cm^3 .
 H_{prom} = altura promedio, mm
 d_{prom} = diámetro promedio de los superiores e inferiores, mm

A6.3 Comparación de los resultados y volumen nominal del molde.

- A6.3.1 El volumen obtenido por cualquiera de los dos métodos debe cumplir con las tolerancias indicadas en el punto de equipo y herramienta.
- A6.3.2 La diferencia entre los dos métodos no debe exceder 0.5% del volumen nominal del molde, cm^3 . Repetir la determinación del volumen del que se tenga más incertidumbre, si no se cumple con este criterio.
- A6.3.3 Si no concuerdan los dos métodos aún después de varios intentos, es un indicador de la deformación del molde y por tanto, debe reemplazarse.
- A6.3.4 Usar el volumen del molde determinado con el método de llenado con agua o con mediciones lineales o el promedio de ambos como el volumen nominal para calcular el peso volumétrico húmedo. Registrar el volumen nominal del molde con cuatro cifras significativas.

A7. Ejemplo de cálculo de la resistencia a la tensión indirecta de la base estabilizada con asfalto espumado.

A7.1 Determinar peso volumétrico húmedo del espécimen

$$\gamma_m = \frac{4 * M_s}{\pi * d^2 * h} * 10^6$$

donde

- γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m^3
 M_s = masa del espécimen, g
 h = altura promedio del espécimen, mm
 d = diámetro del espécimen, mm

DATOS	
γ_m	A calcular
M_s	3 836 g
h	94.2 mm
d	152 mm

CÁLCULOS	
γ_m =	$[(4 * 3\ 836) / (\pi * (152)^2 * 94.2)] * 10^6$
	2 243 kg/m^3

A7.2 Identificar valores atípicos de la masa volumétrica de los 6 especímenes.

$$T_0 = \frac{X_0 - X_n}{S_n}$$

donde

T_0 =prueba t, kg/m^3

X_0 =peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m^3

X_n =peso volumétrico húmedo promedio, kg/m^3

S_n =desviación estándar del peso volumétrico húmedo, kg/m^3

$n=6$, número de especímenes

DATOS			
Especímen	X_0	T_0	Atípico?
1	3 822	0.493	No
2	3 813	0.290	No
3	3 849	1.103	No
4	3796	0.094	No
5	3718	1.856	Si
6	3803	0.064	No
\bar{X}_n	3 800.17		
S_n	44.28		

Si el valor absoluto de $T_0 > 1.82$ entonces el espécimen es atípico

A7.3 Determinar la resistencia a la tensión indirecta (RTI)

$$RTI = \frac{2 * P}{\pi * h * d} * 10^6$$

donde

RTI =Resistencia a la tensión indirecta, kPa

P =Carga máxima aplicada, kN

h =altura promedio del espécimen, mm

d =diámetro del espécimen, mm

DATOS	
RTI	A calcular
P	5.2 kN
h	94.2 mm
d	152 mm

CÁLCULOS	
RTI =	$\frac{2 * 5.2}{\pi * 94.2 * 152} * 10^6$
	231 kPa

A7.4 Calcular el contenido de agua del material.

$$\omega = \frac{M_{c+mh} - M_{c+ms}}{M_{c+ms} - M_c} * 100$$

donde

- ω = Contenido de agua,%
- M_{c+mh} = Masa cápsula+material húmedo, g
- M_{c+ms} = Masa cápsula+material seco, g
- M_c = Masa cápsula, g

DATOS	
ω	A calcular
M_{c+mh}	1 264 g
M_{c+ms}	1 216 g
M_c	345 g

CÁLCULOS	
ω =	$\frac{1264 - 1216}{1216 - 345} * 100$
	5.5%

A7.5 Determinar peso volumétrico seco del espécimen

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} * 100$$

donde

- γ_d = peso volumétrico seco del espécimen, kg/m³
- γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³
- ω = contenido de agua del espécimen, %

DATOS	
γ_d =	A calcular
γ_m =	2 243 kg/m ³
ω =	5.5%

CÁLCULOS	
$\gamma_d =$	$\frac{2243}{100 + 5.5} * 100$
	2 126 kg/m ³

A8. Ejemplo de cálculo de las propiedades al corte de la base estabilizada con asfalto espumado

A8.1 Determinar el peso volumétrico húmedo de cada espécimen

$$\gamma_m = \frac{4 * M_s}{\pi * d^2 * h} * 10^6$$

donde

γ_m = peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³

M_s = masa del espécimen, g

h = altura promedio del espécimen, mm

d = diámetro del espécimen, mm

DATOS	
γ_m	A calcular
M_s	12 926 g
h	302 mm
d	152 mm

CALCULOS	
γ_m (kg / m ³)	$[(4 * 12926) / (\pi * 152^2 * 302)] * 10^6$
	= 2421 kg / m ³

A8.2 Identificar los valores atípicos del peso volumétrico húmedo de los 10 especímenes

$$T_0 = \frac{X_0 - X_n}{S_n}$$

donde

T_0 =prueba t, kg/m³

X_0 =peso volumétrico húmedo del espécimen, kg/m³

X_n =peso volumétrico húmedo promedio, kg/m³

S_n =desviación estándar del peso volumétrico húmedo, kg/m³

n =10, número de especímenes

Si el valor absoluto de $T_0 > 2.18$ entonces el espécimen es un valor atípico.

DATOS			
Espécimen	X_0	T_0	Atípico?
1	2 407	0.67	No
2	2449	2.21	Si
3	2 419	0.15	No
4	2 434	1.18	No
5	2404	0.88	No
6	2418	0.08	No
7	2412	0.33	No
8	2 407	0.67	No
9	2 403	0.95	No
10	2 415	0.12	No
\bar{X}_n	2417		
S_n	14.57		

A8.3 Calcular el esfuerzo aplicado

Si el software del equipo con el que se realiza el ensayo no calcula el esfuerzo aplicado, calcularlo como sigue:

$$\sigma_{a,f} = \frac{4 * P_{a,f}}{\pi * d^2} * 10^6$$

donde

$\sigma_{a,f}$ = esfuerzo aplicada a la falla, kPa

$P_{a,f}$ = carga aplicada a la falla, kN

d = diámetro del espécimen , mm

DATOS	
$\sigma_{a,f}$	A calcular
P_{af}	49.7 kN
d	152 mm

CÁLCULOS	
$\sigma_{a,f}$ (kPa)	$(4*49.7) / [\pi *(152)^2]$
	= 2 740 kPa

A8.4 Determinar el esfuerzo total aplicado a la falla

$$\sigma_{1,f} = \sigma_{a,f} + \sigma_{DW} = \sigma_{a,f} + \left[\frac{4 * (M_{DW}) * g * 10^{-3}}{\pi * d^2} \right]$$

donde

$\sigma_{1,f}$ = esfuerzo total aplicado a la falla, kPa

$\sigma_{a,f}$ = esfuerzo aplicada a la falla , kN

$P_{a,f}$ = carga aplicada a la falla, kN

$$\sigma_{DW} = \frac{4 * (M_{DW}) * g * 10^{-3}}{\pi * d^2}, \quad \text{kPa}$$

donde

σ_{DW} = presión debida al peso muerto de la placa superior y el pistón de carga

M_{DW} = masa de la placa superior+ pistón de carga, kg

g = aceleración debido a la gravedad (9.81), m/s²

d = diámetro del espécimen al inicio del ensayo, mm

DATOS	
$\sigma_{1,f}$	A calcular
$\sigma_{a,f}$	2740 kPa
M_{DW}	5.1 kg
d	152 mm

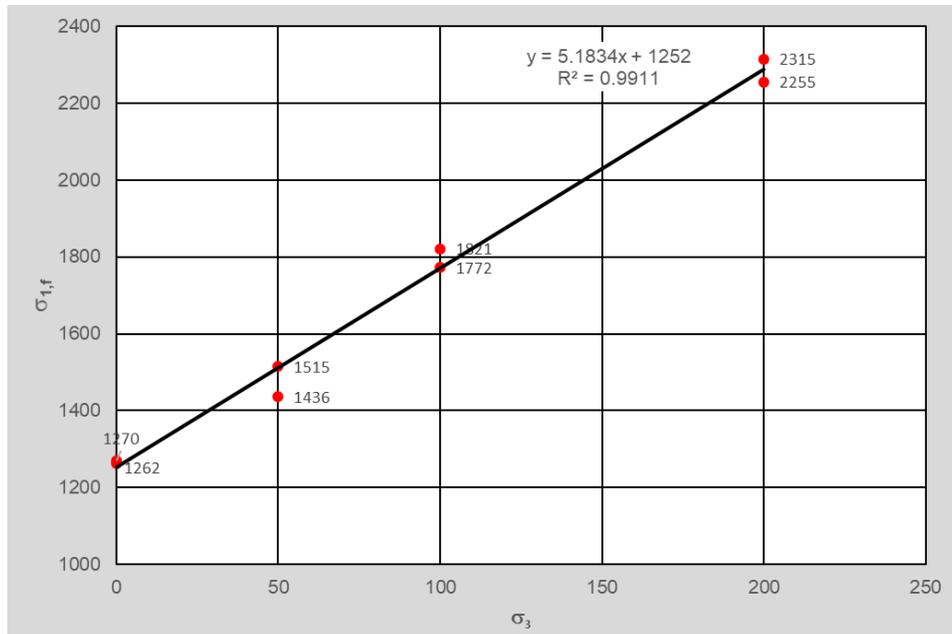
CÁLCULOS	
$\sigma_{1,f}$ (kPa)	$2740 + \left[\frac{4 * 5.1 * 0.00981}{\pi * (152)^2} \right]$
	2740 kPa

A8.5 Determinar la relación entre $\sigma_{1,f}$ y la presión de confinamiento (σ_3)

De los ensayos de pruebas triaxiales monotónicas, con diferentes presiones de confinamiento, se obtienen los siguientes datos:

DATOS		
σ_3	$\sigma_{1,f}$ espécimen 1	$\sigma_{1,f}$ espécimen 2
0	1270 kPa	1 262 kPa
50	1436 kPa	1 515 kPa
100	1 821 kPa	1 772 kPa
200	2 255 kPa	2 315 kPa

Graficar la combinación de $\sigma_{1,f}$ y σ_3 para todos los especímenes sin acondicionar. Realizar un análisis de regresión lineal (línea de mejor ajuste) para determinar los valores de A (pendiente) y B (intersección).



De la grafica se obtiene: A (pendiente)=5.18, B(intersección)= 1 252

A8.6 Calcular las propiedades de resistencia al corte ϕ and C

La relación entre $\sigma_{1,f}$ y el esfuerzo de confinamiento (σ_3) es:

$$\sigma_{1,f} = A * \sigma_3 + B$$

$$A = \frac{1 + \text{seno } \phi}{1 - \text{seno } \phi} \quad \text{y} \quad B = \frac{2 * C * \text{coseno } \phi}{1 - \text{seno } \phi}$$

donde

- A= Pendiente (del análisis de regresión)
- B= Intersección (del análisis de regresión)
- ϕ = Ángulo de fricción interna, °

Calcular C y ϕ con los datos obtenidos (pendiente e intersección) del análisis de regresión:

$$C = \frac{B * (1 - \text{seno } \phi)}{2 * \text{Cos } \phi}, \quad \text{kPa}$$

$$\phi = \text{seno}^{-1} \left[\frac{A - 1}{A + 1} \right]$$

DATOS	
C=	A calcular
ϕ =	A calcular
A=	5.18
B=	1252

CÁLCULOS	
ϕ =	$\text{seno}^{-1} \left[\frac{5.18 - 1}{5.18 + 1} \right]$
	42.6°
C=	$\frac{1252 * [1 - \text{seno}(42.6)]}{2 * \cos(42.6)}$
	275 kPa

A8.7 Calcular la cohesión residual

Con los datos obtenidos de las pruebas triaxiales monotónicas a una presión de confinamiento de 100 kPa, en especímenes acondicionados y sin acondicionar, calcular la cohesión residual como sigue:

$$C_{res} = \frac{(\sigma_{1,100,S} - 100)}{(\sigma_{1,100,U/S} - 100)} * 100, \quad \%$$

donde

$\sigma_{1,100,S}$ = Esfuerzo promedio a la falla de los especímenes acondicionados a una presión de confinamiento de 100 kPa

$\sigma_{1,100,U/S}$ = Esfuerzo promedio a la falla de los especímenes sin acondicionar a una presión de confinamiento de 100 kPa

Datos	
$\sigma_{1,100,S}$ (kPa)	1387
$\sigma_{1,100,U/S}$ (kPa)	1797

ÁLCULOS	
C_{res} =	$C_{res} = \frac{(1387 - 100)}{(1797 - 100)} * 100$
	75.8%



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>