

SECCIÓN 600 – ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

- I.N.V. E – 601 ESTIMACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE CAL NECESARIA PARA ESTABILIZAR UN SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DEL pH
- I.N.V. E – 602 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CAL UTIL VIAL EN UNA CAL COMERCIAL
- I.N.V. E – 603 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE SUELO-CAL EMPLEANDO UNA MEZCLADORA MECÁNICA EN EL LABORATORIO
- I.N.V. E – 604 ADICIÓN DE CAL PARA REDUCIR EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE UN SUELO
- I.N.V. E – 605 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CAL
- I.N.V. E – 606 CONTENIDO DE CAL EN MEZCLAS DE SUELO-CAL NO CURADAS
- I.N.V. E – 607 EXPANSIÓN UNIDIMENSIONAL, CONTRACCIÓN Y PRESIÓN DE EXPANSIÓN DE MEZCLAS DE SUELO-CAL
- I.N.V. E – 608 MUESTREO DE LA CAL HIDRATADA
- I.N.V. E – 611 RELACIONES HUMEDAD-DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO
- I.N.V. E – 612 HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO
- I.N.V. E – 613 PREPARACIÓN Y CURADO DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN EL LABORATORIO
- I.N.V. E – 614 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO
- I.N.V. E – 615 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SUELO-CEMENTO EMPLEANDO PORCIONES DE VIGAS ROTAS POR FLEXIÓN (MÉTODO DEL CUBO MODIFICADO)

- I.N.V. E – 616 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL SUELO–CEMENTO USANDO UNA VIGA SIMPLEMENTE APOYADA Y CARGADA EN LOS TERCIOS DE LA LUZ LIBRE
- I.N.V. E – 617 CONTENIDO DE CEMENTO EN MEZCLAS FRESCAS DE SUELO–CEMENTO
- I.N.V. E – 618 CONTENIDO DE CEMENTO EN MEZCLAS ENDURECIDAS DE SUELO–CEMENTO
- I.N.V. E – 621 DISEÑO DE MEZCLAS ABIERTAS EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA
- I.N.V. E – 622 DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS, RECICLADOS O SIN RECICLAR, CON EMULSIÓN ASFÁLTICA, MEDIANTE EL MÉTODO DE INMERSIÓN – COMPRESIÓN

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

ESTIMACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE CAL NECESARIA PARA ESTABILIZAR UN SUELO A PARTIR DE LA MEDIDA DEL pH

INV E – 601 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Este método de ensayo permite estimar la proporción de cal requerida para estabilizar un suelo, determinando el menor porcentaje de cal que da lugar a un pH de 12.4 en la mezcla de suelo-cal. El ensayo se realiza empleando la fracción del suelo que pasa el tamiz de abertura 425 μm (No. 40).

Nota 1: El contenido óptimo de cal para la estabilización del suelo se deberá determinar mediante ensayos específicos de caracterización del suelo estabilizado, tales como la resistencia a la compresión confinada o el índice de plasticidad.

Nota 2: Algunos subproductos industriales altamente alcalinos (pólvo de residuo de los hornos de cal y de cemento, por ejemplo) han sido utilizados con éxito en la estabilización de suelos. Esta norma no se refiere a estos materiales y cualquiera de ellos deberá ser ensayado para determinar sus características específicas, como se indica en la Nota 1.

Nota 3: La cal no es un agente estabilizante efectivo para todos los suelos. Algunos componentes de los suelos, como los sulfatos, los fosfatos y la materia orgánica afectan adversamente las reacciones de la cal y dan lugar a resultados erróneos al emplear este método.

2 DEFINICIONES

- 2.1** Las siguientes definiciones son aplicables a esta norma:

2.1.1 *Cal* – Producto resultante de la descomposición de las rocas calizas por la acción del calor que, para los fines de esta norma, incluye la cal hidratada y la cal viva.

2.1.2 *Cal hidratada* – Cal compuesta predominantemente por hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ o una mezcla de hidróxido de calcio y óxido de magnesio (MgO) o hidróxido de magnesio $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$.

2.1.3 *Cal libre* – Cal dentro de una mezcla suelo-cal que no se ha disociado en iones de calcio e hidroxilo.

2.1.4 *Cal viva* – Cal que está constituida predominantemente por óxido de calcio (CaO) u óxido de calcio junto con óxido de magnesio (MgO).

- 2.1.5** *Estabilización* – Proceso para mejorar las propiedades de ingeniería de los suelos.
- 2.1.6** *Estabilización con cal* – Adición de cal a un suelo en cantidad suficiente para promover reacciones puzolánicas duraderas que se traduzcan en aumentos de resistencia y en un mejoramiento permanente de la estabilidad.
- 2.1.7** *Modificación con cal* - Modificación de la textura del suelo, que se traduce en una reducción de la plasticidad, la cual se logra por la adición de cantidades de cal inferiores a las requeridas para la estabilización y que puede ser solamente transitoria.
- 2.1.8** *pH* – Logaritmo negativo de base 10 de la concentración efectiva del ión hidrógeno o de la actividad del ión hidrógeno, en equivalentes gramo por litro. La escala de pH oscila entre 0 y 14 en solución acuosa siendo ácidas las soluciones con pH inferiores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayor de 7. El pH = 7 indica la neutralidad.
- 2.1.9** *Solución buffer o amortiguadora* – Una solución con un valor de pH específico, empleada para calibrar el aparato medidor de pH.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** Se prepara una serie de mezclas de suelo con diferentes contenidos de cal. Las medidas de pH se realizan sobre lechadas de las muestras para determinar el contenido mínimo de cal que hace que la mezcla de suelo-cal alcance un pH igual o superior a 12.4.
- 3.2** El valor de pH igual o mayor de 12.4 alcanzado en este ensayo es producto de la cal libre que permanece en la mezcla de suelo-cal. Normalmente, el pH de la cal específica que se use para la estabilización del suelo deberá ser determinado y usado como indicador de pH.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** El ensayo de pH sobre el suelo-cal se ejecuta como prueba indicativa de la proporción de cal necesaria para mantener el pH elevado que se requiere para sostener la reacción necesaria para estabilizar un suelo.

Nota 4: Este método de ensayo fue propuesto por Eades, J.L. y Grim, R.E.: "A quick test to determine lime requirements for lime Stabilization", Highway Research Record No. 139, National Academy of Sciences, National Research Council, Highway Research Board, Washington, DC, 1966.

- 4.2** Se requieren ensayos de comportamiento en el laboratorio, para ajustar los resultados obtenidos mediante este método de ensayo.
- 4.3** Este método no brinda información confiable en relación con la reactividad potencial de un determinado suelo, ni da cuenta en relación con la magnitud del incremento de resistencia que se obtendrá al tratar el suelo con el porcentaje de cal obtenido en la prueba.
- 4.4** El método permite estimar el porcentaje de cal, como cal hidratada o como cal viva, necesario para estabilizar el suelo.

Nota 5: La cal agrícola (polvo de caliza) no es apta para estabilizar suelos.

5 APARATOS

- 5.1** *Balanza* – Con una capacidad mínima de 600 g y una legibilidad de 0.01 g, para determinar las masas de suelo y cal.
- 5.2** *Tamiz* – Con aberturas de 425 μm (No. 40).
- 5.3** *Botellas plásticas* – Seis botellas de 150 ml o de mayor capacidad, con tapa de rosca.
- 5.4** *Medidor de pH* – Equipado con un electrodo de referencia y un electrodo de cristal de bajo error de sodio sensible a los iones de hidrógeno (o un electrodo de combinación), y con un medidor con resolución de 0.01 unidades de pH y precisión de ± 0.2 pH, en un rango de 0 a 14.
- 5.5** *Horno* – Capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- 5.6** *Equipo misceláneo* – Un recipiente hermético a prueba de humedad, para conservar el contenido de agua del suelo; herramientas de mezclado y cucharones para la preparación de las muestras de ensayo.

6 REACTIVOS Y MATERIALES

- 6.1 Agua** – Al hacer referencia al agua, se dará por entendido que presenta las características del tipo II de la especificación ASTM D 1193, cuyas características relevantes se muestran en la Tabla 601 - 1:

Tabla 601 - 1. Características del agua tipo II

FACTOR	LÍMITE
Conductividad eléctrica, máximo, $\mu\text{s/cm}$ a 25° C	1.0
Resistividad eléctrica, mínimo, $\text{M}\Omega\text{-cm}$ a 25° C	1.0
Carbono orgánico total, máximo, $\mu\text{g/L}$	50
Sodio, máximo, $\mu\text{g/L}$	5
Cloruros, máximo, $\mu\text{g/L}$	5
Sílice total, máximo, $\mu\text{g/L}$	3

El agua se debe almacenar en un recipiente con tapa a presión y hervir y enfriar inmediatamente antes de cada uso.

Nota 6: Si el pH del agua en el sitio es altamente ácido (< 6) o altamente alcalino (>9), los resultados del ensayo se deben verificar contra una muestra hecha con agua del lugar y no con agua del tipo II.

- 6.2 Solución buffer o amortiguadora** – Con un pH igual a 12.
- 6.3 Cal hidratada o cal viva** – Sólo se puede usar cal fresca, que cumpla los requisitos indicados en la Tabla 601 - 2.

Tabla 601 - 2. Requisitos de la cal

COMPOSICIÓN QUÍMICA	PROPIEDADES FÍSICAS	
CAL HIDRATADA Y CAL VIVA	CAL HIDRATADA	CAL VIVA
Óxidos de calcio y magnesio: 90 % mínimo	No deberá tener un retenido mayor de 3% en el tamiz de 600 μm (No. 30), ni mayor de 25 % en el tamiz de 75 μm (No. 200)	Deberá pasar, en su totalidad, el tamiz de 25 mm (1")
Dióxido de carbono (medido en la fábrica): 5.0 % máximo		
Humedad libre (medida en la fábrica): 2.0 % máximo		

Nota 7: La cal hidratada y la cal viva son altamente cáusticas y pueden causar irritaciones severas a la piel, a los ojos y a las membranas mucosas. Al manejar la cal, se debe usar un equipo de seguridad apropiado que incluya guantes de caucho resistente, protector para los ojos y un delantal plástico. Así mismo, se debe asegurar la adecuada ventilación del lugar o suministrar un respirador al operario.

Nota 8: La cal absorbe agua y dióxido de carbono del aire con facilidad; por lo tanto, se debe almacenar en recipientes herméticos.

Nota 9: La mezcla suelo-cal-agua es alcalina y reacciona tanto con el metal como con el vidrio; por lo tanto, se deben usar botellas y vasos de precipitados de plástico.

7 MUESTRAS

- 7.1** Se prepara una muestra representativa de suelo secado al aire de acuerdo con la norma INV E-106. Alternativamente, el suelo puede ser secado en el horno a una temperatura no mayor de 60° C.
- 7.2** Se pasan 350 g de material a través del tamiz de 425 µm (No. 40), los cuales se mezclan en seguida de manera homogénea.
- 7.3** Se determina el contenido de agua, de acuerdo con la norma de ensayo INV E-122, empleando una muestra representativa del material obtenido en el numeral 7.2. El material sobrante se deberá colocar en un recipiente hermético, con el fin conservar su humedad de acuerdo con la norma de ensayo INV E-122, hasta que se realice el procedimiento descrito en la Sección 9.

8 CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR DE pH

- 8.1** Se calibra el medidor de pH de acuerdo con las instrucciones del fabricante, empleando una solución buffer de pH = 12 a 25 ± 1°C.

9 PROCEDIMIENTO

9.1 Preparación de la muestra:

- 9.1.1** De la muestra de suelo representativa que se encuentra en el recipiente hermético, se toman 5 muestras para ensayo, cada una de ellas equivalente a 25.0 g de suelo secado al horno. Se puede usar cuarteo u otro medio apropiado para obtener cada una de las 5 muestras de ensayo.

- 9.1.2** Se determina la masa de cada muestra secada al aire que es equivalente a 25.0 g de suelo seco al horno, con la siguiente expresión:

$$M_a = 25 \times \left(1.0 + \frac{W}{100} \right) \quad [601.1]$$

Donde: M_a : Masa de la muestra seca al aire, g;

W : Humedad de la muestra seca al aire según se determinó en el numeral 7.3, %.

- 9.1.3** Se coloca cada muestra de ensayo en una botella plástica, la cual se cierra firmemente.

- 9.1.4** Se toman seis muestras representativas de una cal que cumpla los requisitos químicos y físicos indicados en el numeral 6.3. Cinco de ellas se usarán para preparar mezclas con las muestras de suelo, en proporciones de 2, 3, 4, 5 y 6 % respecto de la masa del suelo seco. La sexta muestra de cal se usará para preparar una solución saturada de cal. Dicha muestra, de 2.0 g, se guarda dentro de una botella plástica que se tapa firmemente.

Nota 10: El rango de porcentajes de cal para las mezclas suelo-cal puede ser ajustado para cumplir los requisitos de la Sección 10.

Nota 11: Si se usa cal viva, se deberá triturar rápida y cuidadosamente, de manera que pase en su totalidad el tamiz de 3.35 mm (No. 6).

- 9.1.5** Se añade una de las cinco primeras muestras de cal a una de las muestras de suelo colocadas en las botellas plásticas. Se cierra inmediatamente la botella, se marca sobre ella el porcentaje de cal añadido y se mezcla completamente su contenido mediante agitado. Se repite este procedimiento para las cuatro muestras restantes de cal y de suelo.

- 9.1.6** Se abren las botellas y se añaden 100 ml de agua a cada una de las mezclas de suelo-cal, así como a la botella que contiene los 2.0 g de cal (Figura 601 - 1).



Figura 601 - 1. Botellas de plástico con las muestras

- 9.1.7** Se tapan las botellas y se sacuden las mezclas suelo-cal-agua y cal-agua por un mínimo de 30 segundos o hasta que se considere que las muestras estén completamente mezcladas. La agitación de las mezclas se repite durante 30 segundos, cada 10 minutos, en un lapso de 1 hora.
- 9.2** De ser necesario, las muestras embotelladas se calientan o enfrían para llevar su temperatura a $25 \pm 1^\circ \text{C}$.
- 9.3** Dentro de los 15 minutos siguientes al período de una hora de agitación, se determina el pH de cada mezcla de suelo-cal-agua y de la mezcla cal-agua, con aproximación a 0.01. Durante la determinación del pH, la temperatura de cada mezcla se debe mantener a $25 \pm 1^\circ \text{C}$.
- 9.4** Se anota el valor de pH de cada mezcla suelo-cal-agua y de la mezcla cal-agua.
- 9.5** Se elabora un gráfico que muestre la relación entre el pH de las mezclas y el porcentaje de cal añadido (Figura 601 - 2).

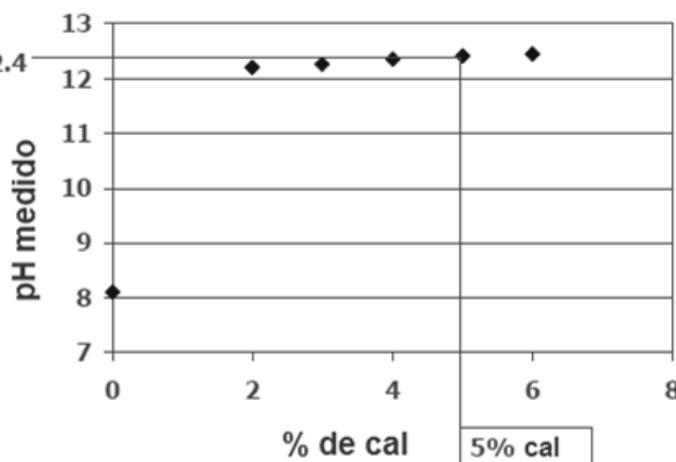


Figura 601 - 2. Variación del pH con el porcentaje de cal

10 RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN DEL SUELO-CAL Y EL pH

10.1 Se considera que el menor porcentaje de cal que da lugar a un pH de 12.4 en las mezclas suelo-cal-agua, es el porcentaje aproximado de cal para estabilizar el suelo. Puede haber algunos suelos en los cuales el pH es mayor de 12.4. Cuando ello ocurre, se debe escoger el menor porcentaje de cal que no produzca incrementos en el valor de pH al ensayar 2 mezclas con incrementos sucesivos en el porcentaje de cal.

10.2 Si el mayor valor de pH medido es 12.3 o menos, se deberán preparar y ensayar mezclas adicionales empleando mayores porcentajes de cal.

Nota 12: Existen suelos donde el pH de su mezcla con cal no supera el valor de 12.3. Se considera que este fenómeno ocurre con arcillas que contienen iones univalentes, tales como sodio intercambiable. A medida que estos iones se intercambian con iones de calcio de la cal, el electrodo de pH se hace tan sensible a los iones de sodio como a los iones de hidrógeno.

10.3 Si el pH más alto medido es 12.3, y al menos dos mezclas sucesivas con porcentajes incrementados de cal mantienen el valor de 12.3, se deberá tomar como porcentaje aproximado de cal para estabilizar el suelo, el menor porcentaje de cal que dé lugar a un pH de 12.3.

10.4 Si el pH más alto medido es inferior a 12.3, el ensayo resulta inválido, bien por causa del equipo o de los materiales, o bien porque se ha añadido una cantidad insuficiente de cal. En este caso, se debe verificar el electrodo de pH en la solución buffer de pH 12 y en la solución de cal-agua, para detectar posibles errores en el equipo o se repite el ensayo utilizando porcentajes de cal mayores, o se hacen ambas cosas.

11 CÁLCULOS

11.1 Se convierte el porcentaje de cal usada como cal hidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, a porcentaje de cal como cal viva (CaO) con la expresión:

$$L_Q = L_H \times \frac{56}{74} \quad [601.2]$$

Donde: L_Q : Porcentaje de cal viva, %;

L_H : Porcentaje de cal hidratada, %;

56: Peso molecular del CaO;

74: Peso molecular del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

11.2 Se convierte el porcentaje de cal usada como cal viva (CaO) a porcentaje de cal como cal hidratada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], con la expresión:

$$L_H = L_Q \times \frac{74}{56} \quad [601.3]$$

12 INFORME

12.1 Se debe informar lo siguiente:

12.1.1 El porcentaje estimado de cal requerido para la estabilización, redondeado al 1 % más cercano, y el porcentaje de cal y el pH medido en cada una de las mezclas de suelo-cal ensayadas.

12.1.2 El tipo de cal empleada para estimar el contenido de cal para la estabilización del suelo.

13 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

ASTM D 6276 – 99a (2006)e1

NATIONAL LIME ASSOCIATION, "Mixture design procedures for lime stabilized soils",
ODOT GCW – 5/13/09

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CAL ÚTIL VIAL EN UNA CAL COMERCIAL

INV E – 602 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma de ensayo suministra un método para estimar la proporción de una cal comercial que es capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo, produciendo cambios en su naturaleza y propiedades, provocando cementación al formarse productos cementantes hidráulicos.

2 DEFINICIONES

- 2.1** Las siguientes definiciones son aplicables a esta norma:

- 2.1.1** *Cal* – Producto resultante de la descomposición de las rocas calizas por la acción del calor que, para los fines de esta norma, incluye la cal hidratada y la cal viva.
- 2.1.2** *Cal hidratada* – Cal que está compuesta predominantemente por hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ o una mezcla de hidróxido de calcio y óxido de magnesio (MgO) o hidróxido de magnesio $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$.
- 2.1.3** *Cal viva* – Cal que está constituida predominantemente por óxido de calcio (CaO) u óxido de calcio junto con óxido de magnesio (MgO).
- 2.1.4** *Cal útil vial* – Cal de origen o liberada que es capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo, produciendo cambios en su naturaleza y propiedades, provocando cementación al formarse productos cementantes hidráulicos.
- 2.1.5** *pH* – Logaritmo negativo de base 10 de la concentración efectiva del ión hidrógeno o de la actividad del ión hidrógeno, en equivalentes gramo por litro. La escala de pH oscila entre 0 y 14 en disolución acuosa siendo ácidas las disoluciones con pH inferiores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayor de 7. El pH = 7 indica la neutralidad.
- 2.1.6** *Solución buffer* – Una solución con un valor de pH específico, empleada para calibrar el medidor de pH.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** El método consiste en titular una determinada cantidad de cal suspendida en agua destilada o desmineralizada, mediante la incorporación progresiva de una solución normalizada de ácido clorhídrico, determinando la variación correspondiente del pH y anotando los consumos de ácido hasta pH = 7 y pH = 2. El exceso de ácido se titula por retorno hasta pH = 7 con una solución normalizada de hidróxido de sodio, cuya cantidad es también anotada.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** Debido a la gran variedad que presenta la composición de las cales comerciales, es necesario disponer de un criterio uniforme para juzgar su calidad relativa, de manera que al dosificar una mezcla de suelo con cal, la variedad en la composición de las cales no se refleje en las características del suelo-cal obtenido.
- 4.2** Este método de ensayo permite determinar la proporción de compuestos básicos contenidos en una cal comercial, capaces de producir cambios en la naturaleza y propiedades de un suelo, provocando cementación al formarse productos cementantes hidráulicos. La cal en forma de carbonatos, sulfatos u otros compuestos inactivos no es útil para estabilizar suelos en la construcción vial.
- 4.3** La dosificación de una mezcla de suelo-cal a partir del concepto de "cal útil vial", permite conocer la cantidad real por añadir de cualquier cal comercial que se pretenda utilizar para el mejoramiento o la estabilización de un suelo.

5 EQUIPO

- 5.1** *Balanza* – Con una capacidad mínima de 600 g y una aproximación de 0.01 g, para determinar las masas de suelo y cal.
- 5.2** *Medidor de pH* – Equipado con un electrodo de referencia y un electrodo de cristal de bajo error de sodio sensible a los iones de hidrógeno (o un electrodo de combinación), y con un medidor con resolución de 0.01 unidades de pH y precisión de ± 0.2 pH, en un rango de 0 a 14.
- 5.3** *Equipo misceláneo* – Agitador magnético o varillas de vidrio, probetas de 100 ml, vaso de precipitados de 500 ml, recipientes plásticos herméticos, etc.

6 REACTIVOS Y MATERIALES

- 6.1** *Agua* – Destilada o desmineralizada, la cual se debe almacenar en un recipiente con tapa a presión. El agua se debe hervir y enfriar inmediatamente antes de cada uso.

Nota 1: Si el pH del agua a ser usada es altamente ácido (< 6) o altamente alcalino (>9), los resultados del ensayo deben ser verificados con un agua de pH igual a 7

- 6.2** *Solución buffer* – Con un pH igual a 12.
- 6.3** *Soluciones HCl y Na(OH)1.0 N (aproximadamente 1 Normal).*

7 MUESTRA

- 7.1** Se requiere, aproximadamente, 1 kg de la parte central de la bolsa de cal a ensayar.

8 PROCEDIMIENTO

- 8.1** Se coloca la muestra dentro de un recipiente hermético y se mezcla y homogeniza perfectamente dentro de él, mediante agitación durante 2 minutos. La cantidad que se extraerá del recipiente se obtendrá abriéndolo y cerrándolo rápidamente, para minimizar la contaminación de la muestra.
- 8.2** Se toma una porción de cal del recipiente y se pesan 3 g de ella.
- 8.3** El material pesado se trasfiere al vaso de precipitados y se le agregan lentamente 150 ml de agua destilada o desmineralizada, simultáneamente con agitación mecánica o preferiblemente magnética, si se dispone de este instrumental.
- 8.4** Se comienza la titulación con la solución HCl 1.0 N, midiendo el pH hasta alcanzar un valor igual a 9. El ácido se agrega inicialmente por goteo rápido (aproximadamente 12 ml por minuto) y luego moderadamente. Al llegar a pH igual 9, se espera durante 1 minuto.
- 8.5** Se continúa la titulación agregando más solución de HCl a un ritmo aproximado de 0.1 ml, esperando medio minuto y registrando el respectivo

valor de pH, hasta alcanzar un valor de 7, el cual se debe mantener durante unos 60 segundos.

- 8.6** Se anota el consumo total de ácido hasta pH igual a 7.
- 8.7** Se agrega por goteo rápido más solución de HCl 1.0 N hasta alcanzar un pH igual a 2 y se anota el consumo total acumulado de solución. Se considera que, en ese instante, la muestra que está en el vaso de precipitados contiene un "exceso de ácido".
- 8.8** Se titula la mezcla más el "exceso de ácido" con una solución de NaOH 1.0 N, hasta un retorno a pH igual a 7 y se anota el consumo de ésta.

9 CÁLCULOS

- 9.1** Se determina la "cal útil vial" como hidróxido de calcio, con la expresión:

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times n \times N_1}{3} \times 100 \quad [602.1]$$

Donde: n: Cantidad de solución de HCl consumida hasta pH igual 7, ml;

N_1 : Normalidad de la solución ácida.

- 9.2** La materia inerte contenida en la cal, expresada como carbonatos, se calcula con la fórmula:

$$\text{CaCO}_3\% = \frac{0.050((m - n)N_1 - N_2 \times l)}{3} \times 100 \quad [602.2]$$

Donde: n: Cantidad de solución de HCl consumida hasta pH igual a 7, ml;

m: Cantidad total acumulada de solución de HCl consumida hasta alcanzar el pH igual a 2, ml;

l: Cantidad de solución de Na(OH) consumida para el retorno a pH igual a 7, ml;

N_1 : Normalidad de la solución ácida;

N₂: Normalidad de la solución alcalina.

10 INFORME

10.1 Se debe informar lo siguiente:

10.1.1 El contenido de cal útil vial, en %, expresado como hidróxido de calcio.

10.1.2 El contenido de materia inerte, en %, expresado como carbonato de calcio.

11 DOCUMENTO DE REFERENCIA

FELIX JUAN LILLI, "Criterio de calidad y bases para la adquisición de cales destinadas a la corrección y estabilización de suelos", Publicación No. 48, Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, La Plata, Argentina, Enero de 1965

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE SUELO-CAL EMPLEANDO UNA MEZCLADORA MECÁNICA EN EL LABORATORIO

INV E – 603 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Este método se refiere a la preparación de mezclas de suelo-cal en el laboratorio para emplearlas en la determinación de los efectos de la cal sobre las propiedades del suelo (plasticidad, resistencia, relaciones de humedad, peso unitario, etc.), y para el diseño de mezclas para construcción de capas estabilizadas.
- 1.2** Esta norma reemplaza la norma INVE-805-07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** Este método normaliza la preparación de mezclas de suelo-cal para los ensayos de laboratorio necesarios para la determinación de las propiedades del suelo cuando se estabiliza con cal. Se hace mención en este método al período de maduración, pero no se dan recomendaciones específicas en cuanto al mismo, por cuanto el período de maduración por aplicar en el ensayo depende de cada uso específico.

3 EQUIPO

- 3.1** *Mezcladora mecánica* – Que pueda producir mezclas uniformes y homogéneas de suelo, cal y agua.
- 3.2** *Espátulas, palustres, cucharas, etc.* – Apropriados para transferir el suelo y la cal a la mezcladora, y para raspar y limpiar el tazón y otras partes de la mezcladora.
- 3.3** *Balanza* – Una balanza o báscula que pueda pesar al menos 1000 g con aproximación de 1 g, para pesar el suelo, la cal y el agua.

4 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

- 4.1** El suelo para la elaboración de la mezcla se deberá secar al aire o al horno, a menos que haya razón para creer que ello afecta adversamente los resultados (nota 1). En este caso, el suelo se deberá curar con o cerca del contenido final de humedad durante un período predeterminado. El tamaño de la muestra y su preparación, dependerán de los requerimientos del ensayo para el cual se prepara la muestra.

Nota 1: Es típico un período de 24 horas para el secado del suelo al aire.

- 4.2** Se determina la humedad higroscópica del suelo secado al aire de acuerdo con la norma INV E-122. Se pesa una cantidad suficiente de suelo para proporcionar la masa de suelo secado al horno, requerida para preparar el número deseado de especímenes de ensayo. Se coloca el suelo en el tazón de la mezcladora mecánica. Se determina también la masa de cal, con base en la masa requerida de suelo seco para el porcentaje deseado en la mezcla final, y se coloca en el tazón.
- 4.3** Se pone en marcha la mezcladora y se mezclan en seco el suelo y la cal durante 1 minuto, o hasta que la mezcla presente un color uniforme.
- 4.4** Se pesa o se mide con un recipiente apropiado la cantidad de agua necesaria para proporcionar la humedad deseada (nota 2) y se adiciona a la mezcla en forma de chorro fino o de rocío, mientras la mezcladora está en movimiento. Después de agregada el agua, se continúa la mezcla durante otros 5 minutos. Al completar aproximadamente la mitad de este período, se detiene la mezcladora por unos pocos segundos y se raspan todas sus partes para devolver cualquier mezcla en terrones al tazón de la mezcladora. Se continúa el mezclado durante el resto del período de 5 minutos.

Nota 2: Adicionalmente al agua de mezcla se deberá suministrar un exceso de alrededor del 1 % del contenido final de humedad deseado, para compensar la evaporación que ocurre durante el mezclado. La cantidad de agua extra requerida dependerá de las condiciones del laboratorio y se deberá determinar experimentalmente.

- 4.5** Cumplidos los cinco (5) minutos, se detiene la mezcladora y se raspan todas sus partes para retornar cualquier porción de terrones de la mezcla al tazón de la mezcladora. Se remueve el tazón, se mezcla brevemente con un palustre o espátula y se forma un montículo ligeramente compactado en el fondo del tazón. Se cubre inmediatamente el tazón para minimizar la evaporación de humedad.

- 4.6** Si se permite la maduración de la mezcla, ésta se deberá colocar en un recipiente más pequeño y cerrado, para reducir la cantidad de evaporación. Las operaciones se deberán programar de manera que la mezcla sea utilizada inmediatamente después de la operación de mezclado o después del período de maduración, si este último está previsto.

Nota 3: Es usual un período de maduración mínimo de 1 hora, aunque se han empleado períodos hasta de 48 horas.

5 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 3551 – 08

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

ADICIÓN DE CAL PARA REDUCIR EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE UN SUELO

INV E – 604 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma presenta un procedimiento para determinar el efecto que produce la adición de cal sobre la plasticidad de los suelos y de los materiales empleados para la construcción de las capas inferiores de un pavimento.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1** Se prepara una serie de mezclas de suelo con diferentes contenidos de cal. Se determinan sus límites líquidos y plásticos y, a partir de ellos, se calculan los respectivos índices de plasticidad.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** La adición de cal a un suelo arcilloso produce un intercambio de iones por medio del cual los cationes Ca^{++} de la cal reemplazan los iones metálicos univalentes presentes en la superficie de las partículas del suelo. La sucesiva liberación de cal produce la saturación de la capacidad de intercambio, lo que determina modificaciones en el potencial electro-cinético y, por lo tanto, las partículas de suelo se atraen entre sí, causando floculación o agregación. Debido a ello, el suelo se vuelve inmediatamente más friable y trabajable, reduciéndose su plasticidad y su potencial de cambio volumétrico.

4 EQUIPO Y MATERIALES

- 4.1** *Cuarteador de muestras.*
- 4.2** *Tamices* – De aberturas 4.75 mm (No. 4), 2.0 mm (No. 10), 425 μm (No. 40) y 75 μm (No. 200).
- 4.3** *Balanza* – Con posibilidad de lectura de 0.01 g.

- 4.4 *Horno* – Capaz de mantener la temperatura a 60° C (140° F).
- 4.5 *Mortero metálico con maja forrada en caucho* – Para disgregar las partículas de suelo.
- 4.6 *Mezcladora mecánica* – Que pueda producir mezclas uniformes y homogéneas de suelo, cal y agua.
- 4.7 *Elementos para la determinación del límite líquido (norma INV E-125) y el límite plástico (norma INV E-126).*
- 4.8 *Equipo misceláneo* – Un recipiente hermético a prueba de humedad para conservar el contenido de agua del suelo, bolsas plásticas, herramientas de mezclado y cucharones para la preparación de las muestras de ensayo, etc.
- 4.9 *Cal hidratada* – De las características indicadas en el numeral 6.3 de la norma INV E-601.

5 MUESTRA

- 5.1 De una muestra suficientemente grande, que represente el suelo o material de la capa inferior de pavimento por mejorar con cal, se toma una muestra para ensayo que pase el tamiz de 425 μm (No. 40), de tamaño suficiente para realizar con ella 5 pruebas de límite líquido y límite plástico. La muestra para ensayo se deberá preparar de acuerdo con lo indicado en las normas INV E-106 e INV E-107.

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1 Se determina el contenido de agua, W (%), empleando una fracción representativa de la muestra para ensayo, siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E-122. El material sobrante se deberá colocar en un recipiente hermético, con el fin de conservar su humedad.
- 6.2 Se toma del recipiente una porción de la muestra para ensayo, de unos 150 g, y se determinan su límite líquido y su índice de plasticidad, siguiendo los procedimientos descritos en las normas INV E-125 e INV E-126, respectivamente.

- 6.3** De la muestra de suelo para ensayo que se encuentra en el recipiente hermético, se toman 4 porciones, cada una de ellas equivalente a 150.0 g de suelo secado al horno.
- 6.4** Se determina la masa de cada porción de suelo con la humedad determinada en el numeral 6.1, que es equivalente a 150.0 g de suelo seco al horno, con la expresión:

$$M_a = 150 \times (1.0 + W/100) \quad [604.1]$$

Donde: M_a : Masa de la porción de suelo con la humedad determinada en el numeral 6.1, g;

W : Humedad de la muestra de suelo según se determinó en el numeral 6.1, %.

- 6.5** Se calcula la cantidad de cal a ser añadida a cada una de las 4 porciones de suelo, aplicándole a 150.0 g el respectivo porcentaje de cal previsto. Por lo general, se recomienda elaborar mezclas con 2, 4, 6 y 8 % de cal, respecto de la masa seca de la porción de suelo.
- 6.6** Empleando el procedimiento descrito en la norma INV E-603, se elaboran 4 mezclas de suelo-cal-agua con las dosificaciones indicadas en el numeral anterior, añadiéndole a cada una el agua suficiente para alcanzar una consistencia similar a la correspondiente al límite plástico.
- 6.7** Cada mezcla se guarda en una bolsa plástica cerrada, la cual se conserva durante 24 horas en un recipiente hermético para prevenir pérdidas de humedad y la carbonatación de la cal.
- 6.8** Al término del período de curado, se determinan el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de cada mezcla de suelo-cal, aplicando las normas INV E-125 e INV E-126.

7 INFORME

- 7.1** Se debe informar lo siguiente:

7.1.1 Tipo de cal utilizada y contenido de cal útil vial de ella, si se conoce.

- 7.1.2** Contenidos de cal utilizados y valores obtenidos de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.
- 7.1.3** Representación gráfica de los resultados, mostrando la variación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad con el contenido de cal (porcentajes de cal en las abscisas y humedad en las ordenadas).

8 NORMAS DE REFERENCIA

TxDOT Designation: Tex-112-E

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CAL

INV E – 605 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Este método se refiere a la preparación, curado y determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de mezclas de suelo estabilizado o tratado con cal.
- 1.2** Esta norma reemplaza la norma INV E-801-07.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1** Probetas de suelo-cal, elaboradas con el contenido de cal determinado a partir del ensayo descrito en la norma INV E-601, a un peso unitario y una humedad de compactación previamente definidos, se someten a compresión inconfiada luego de un período de curado. La resistencia a compresión de las probetas se calcula a partir de la carga máxima o de la carga correspondiente a una deformación axial de 5 %.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** La resistencia a la compresión inconfiada de mezclas curadas de suelo-cal-agua permite establecer su idoneidad para el mejoramiento de subrasantes o la estabilización de las capas inferiores de un pavimento.

4 EQUIPO

- 4.1** *Moldes de compactación con collar removible y placa de base* – Deberán ser cilíndricos, metálicos, y con las dimensiones y capacidades indicadas en la norma INV E-141. Deberán tener collares ajustables de, aproximadamente, 60 mm (2-3/8") de altura, que permitan la preparación de muestras compactadas de suelo con cal y agua con la altura y volumen deseados. El molde y el collar deberán estar contruidos de manera que se puedan ajustar firmemente a una placa del mismo material.

Nota 1: La norma INV E-141 prevé tres procedimientos alternativos para la ejecución del ensayo de compactación. En las especificaciones se deberá indicar el método por usar para el material a ensayar. Si no se especifica ninguno, regirá el método A.

- 4.2 Martillo de compactación** – Un martillo metálico, con una masa de 2.495 ± 0.009 kg (5.5 ± 0.02 lb), que tenga una cara plana circular de diámetro 50.80 ± 0.25 mm (2.00 ± 0.01 "). El martillo deberá estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de 305.2 ± 2 mm (12.00 ± 0.06 ") por encima de la mezcla suelo-cal. La guía debe tener al menos 4 agujeros de ventilación, de diámetro no menor de 9.5 mm ($3/8$ "), espaciados aproximadamente a 90° (1.57 rad.) y a 19 mm ($3/4$ ") de cada extremo, y deberá tener suficiente luz libre, para que ni la caída del martillo ni la cabeza tengan restricciones.

Nota 2: Se permite el uso de un martillo de operación mecánica que aplique la misma energía que el de operación manual.

- 4.3 Extractor de muestras** – Prensa para extraer las probetas compactadas de los moldes.
- 4.4 Balanzas** – Una balanza de 11.5 kg (40 lb) de capacidad, legible a 0.005 kg (0.01 lb) y otra de 1 kg (2.2 lb) de capacidad, con posibilidad de lectura de 1 g.
- 4.5 Horno** – Termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C ($230 \pm 9^\circ$ F).
- 4.6 Regla metálica** – De acero endurecido, de borde recto, al menos de 250 mm (10") de longitud. Deberá tener un borde biselado y, al menos, una cara plana en sentido longitudinal.
- 4.7 Tamices** – Con aberturas cuadradas de 19.0 mm, 4.75 mm, $425 \mu\text{m}$ y $75 \mu\text{m}$ ($3/4$ ", No. 4, No. 40 y No. 200).
- 4.8 Mezcladora mecánica** – Que pueda producir mezclas uniformes y homogéneas de suelo, cal y agua.
- 4.9 Dispositivo para medir las dimensiones de las probetas compactadas** – Para medir la altura y el diámetro, con una precisión de 0.1 %.
- 4.10 Recipientes plásticos** – Impermeables y de cierre hermético, para el almacenamiento de las muestras después de la compactación. El plástico deberá ser rígido, para proteger las muestras durante su manejo.

4.11 *Bandejas y recipientes metálicos* – Bandejas anchas y poco profundas, para mezclar y secar materiales. Recipientes rectangulares de acero inoxidable, de aproximadamente 230 × 405 × 57 mm (9 × 16 × 2 ¼"), para la saturación de las probetas por capilaridad. Recipientes para determinar la humedad de las muestras.

Nota 3: La cal puede reaccionar con metales como el aluminio y el zinc. Por lo tanto, no se podrán utilizar recipientes que contengan dichos metales para el almacenamiento de la cal, ni para el curado de las probetas compactadas.

4.12 *Cabina termostática* – Donde se pueda mantener la temperatura a 40.0 ± 1.0° C (104.0 ± 1.8° F), para el curado de las muestras compactadas. Se puede usar un cuarto húmedo, pero no es indispensable.

4.13 *Cronómetro* – Con marcas cada segundo, para controlar el tiempo, con el fin de establecer la rata de aplicación de carga.

4.14 *Piedras porosas circulares* – Con diámetros ligeramente menores de 101.6 mm (4") y de 152.4 mm (6"), con una altura de 50.8 mm (2").

4.15 *Prensa y dispositivo indicador de carga* – Prensa con suficiente capacidad y control para suministrar una rata de deformación axial de 0.5 a 2.0 % por minuto. El dispositivo debe estar equipado de manera que se aplique la carga a la muestra sin excentricidad. Para especímenes de suelo-cal cuya resistencia a la compresión sea menor de 100 kPa (15 lbf/pg²), el indicador de carga deberá tener una sensibilidad tal, que el esfuerzo aplicado se pueda calcular con una exactitud de ± 0.7 kPa (0.1 lbf/pg²). Para especímenes cuya resistencia a la compresión sea de 100 kPa (15 lbf/pg²) o mayor, el indicador de carga deberá tener una sensibilidad tal, que el esfuerzo aplicado pueda ser calculado con una exactitud de ± 5 kPa (0.7 lbf/pg²).

4.16 *Indicador de deformación* – Graduado a 0.02 mm (0.001") o menos, que tenga un rango de medida suficiente para medir el 5 % de la longitud de la muestra de ensayo. Se puede usar un dispositivo de medición electrónica que cumpla estos requisitos.

4.17 *Equipo misceláneo* – Una provisión de pequeñas herramientas y accesorios, como un mortero metálico, pisón metálico forrado con caucho, espátulas, cucharas, palustres, papeles de filtro, etc.

5 MATERIALES

- 5.1** *Cal* – Se empleará la cal prevista para la ejecución de las obras. Sólo se podrá emplear cal fresca, y las condiciones de su almacenamiento deberán impedir su combinación con el CO₂ del aire.

Nota 4: La cal reacciona químicamente con el agua, despidiendo calor. Por lo tanto, siempre que se vaya a manejar, se deberán utilizar elementos adecuados para la seguridad personal, tales como guantes, lentes de protección, respirador y delantal plástico.

- 5.2** *Agua* – Potable, libre de ácidos, álcalis y aceites.

- 5.3** *Bolsas plásticas.*

- 5.4** *Geotextil absorbente.*

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1** *Evaluación inicial del suelo:*

6.1.1 Se determina la cantidad de suelo que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200), mediante la norma INV E-123.

6.1.2 Se determina la plasticidad del suelo, empleando las normas INV E-125 e INV E-126.

6.1.3 Generalmente, un suelo con un pasante mayor de 25 % por el tamiz de 75 µm (No. 200) y con un índice de plasticidad de 10 o mayor, es un buen candidato para la estabilización con cal. Suelos con plasticidad menor se pueden estabilizar con éxito, si cumplen el requisito indicado en el numeral 6.2.1 y, además, permiten alcanzar la resistencia a compresión exigida por las especificaciones.

- 6.2** *Muestras de ensayo:*

6.2.1 *Estimación de la cantidad de cal para la elaboración de las muestras de ensayo:*

6.2.1.1 Mediante la medición del pH se estima el porcentaje de cal requerido para estabilizar el suelo, empleando el procedimiento descrito en la norma INV E-601. Con este

porcentaje se deben preparar las mezclas mencionadas en el numeral 6.2.2.

6.2.2 *Determinación de la humedad óptima de la mezcla suelo-cal:*

6.2.2.1 Los valores de densidad máxima y humedad óptima se deberán determinar de acuerdo con la norma INV E-141. Por lo tanto, se debe elegir el molde apropiado de acuerdo con el procedimiento de compactación por utilizar (ver nota 1). Se calculan las cantidades de suelo, cal y agua, necesarias para elaborar una muestra de ensayo, así como las totales para preparar el número de muestras que requiere un ensayo completo de compactación. Se deberá preparar 10 % más del material calculado, para tener en cuenta posibles pérdidas y desperdicios.

6.2.2.2 Las mezclas suelo-cal-agua se deben elaborar de acuerdo con la norma INV E-603, con contenidos crecientes de agua y, en seguida, se almacenan a temperatura ambiente en recipientes plásticos cerrados herméticamente e impermeables, durante 1 hora. Si la mezcla se ha elaborado con cal viva, se almacenará durante 24 horas para asegurar la hidratación de la cal.

6.2.2.3 Se compactan las mezclas en los moldes apropiados, según lo establecido en la norma INV E-141. La superficie de cada capa compactada se deberá escarificar antes de adicionar el material para la siguiente.

Nota 5: Cada mezcla se deberá extraer del recipiente cerrado solamente en el instante en que se va a proceder a su compactación.

6.2.2.4 Terminada la compactación y el enrase de cada probeta, se la remueve cuidadosamente del molde y se determinan su masa, su longitud y su diámetro promedio a la mitad de su altura.

6.2.2.5 Siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E-141, se calculan las densidades de las probetas y las humedades con las cuales fueron compactadas, se elabora la curva de compactación y se determinan la densidad seca máxima y la humedad óptima de la mezcla.

6.3 *Fabricación de probetas para el ensayo de compresión inconfinaada:*

- 6.3.1** Se elabora una mezcla suelo-cal-agua con el porcentaje de cal indicado en el numeral 6.2.1.1 y con la humedad óptima definida en el numeral 6.2.2.5 ± 1 %, en la cantidad necesaria para fabricar dos probetas compactadas, en el molde previamente escogido. La mezcla se deberá mantener durante 24 horas a temperatura ambiente en un recipiente plástico cerrado herméticamente e impermeable, antes de fabricar los especímenes de prueba.
- 6.3.2** Cumplido el plazo de almacenamiento, se compactan las dos probetas con una energía tal, que dé lugar a la densidad seca mínima exigida por la especificación de construcción. Así, por ejemplo, si el nivel de compactación exigido por la especificación es 100 %, al elaborar las probetas se aplicará a cada capa el número de golpes indicado en la norma INV E-141, pero si la exigencia es de 98 %, se deberá ajustar el número de golpes por capa, con el fin de que la densidad de la probeta se acomode a este requisito.
- 6.4** *Curado de las probetas:*
- 6.4.1** Inmediatamente después de su fabricación, las probetas de prueba se extraen de los moldes, se envuelven en bolsas de plástico y se colocan en un recipiente cerrado, sellado e impermeable, a una temperatura de $40.0 \pm 1.0^\circ \text{C}$ ($104.0 \pm 1.8^\circ \text{F}$), durante 7 días.
- 6.4.2** Cumplido este plazo, las probetas se retiran del recipiente, se les remueven las bolsas plásticas, se envuelven con un geotextil húmedo absorbente, se colocan sobre sendas piedras porosas y se someten a temperatura ambiente a un proceso de saturación por capilaridad por 24 horas, durante las cuales el nivel de agua debe alcanzar la superficie superior de cada piedra porosa y estar en contacto con el geotextil, pero no entrar en contacto directo con la probeta (Figura 605 - 1).



Figura 605 - 1. Saturación de las probetas por capilaridad

6.5 Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada:

6.5.1 Terminado el período de curado, se coloca cada probeta en la prensa de ensayo, de manera que quede centrada sobre la platina de base. Se ajusta el dispositivo de carga hasta que la platina superior hace contacto con la probeta y se coloca en cero el indicador de deformación.

6.5.2 Se aplica carga de manera continua y sin aceleración brusca, de manera que produzca una velocidad de deformación axial de, aproximadamente, 0.5 a 2.0 % por minuto. Se debe elegir la rata de deformación de manera que el tiempo para alcanzar la falla no exceda de 15 min.

Nota 6: Muestras blandas que exhiban una deformación muy elevada a la falla, se deberán ensayar con una velocidad de deformación mayor. Por el contrario, especímenes muy rígidos o frágiles cuya deformación a la falla sea reducida, se deben ensayar con una velocidad de deformación menor.

6.5.3 Se anotan la carga, la deformación y el tiempo, a intervalos suficientes para definir la curva esfuerzo-deformación (generalmente son suficientes de 10 a 15 puntos). Se registra la carga máxima aplicada a la probeta.

6.5.4 Se continúa cargando la probeta hasta que los valores de carga comienzan a disminuir al aumentar la deformación, o hasta que se alcance una deformación de 5 %.

6.5.5 Se dibuja un esquema o se toma una fotografía de la probeta luego de finalizado el ensayo, donde se aprecie el modo de falla.

6.5.6 Se mide y se anota el diámetro de la probeta fallada en tres direcciones en la mitad de su altura, aproximado a 0.2 mm (0.01").

7 CÁLCULOS

7.1 Para cada carga aplicada, se calcula la deformación unitaria axial al 0.1 % más cercano, con la expresión:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad [605.1]$$

- Donde: ϵ : Deformación axial para una carga dada, %;
- ΔL : Cambio de longitud de la probeta según las lecturas del indicador de deformación, mm (pg.);
- L_0 : Longitud inicial de la probeta, mm (pg.).

7.2 Se calcula la sección transversal promedio para cada carga registrada (Figura 605 - 2), como se indica a continuación:

7.2.1 Si la mayor medida del diámetro de la probeta durante el ensayo indica que éste no cambia durante la prueba, se usará la sección transversal original.

7.2.2 Si se produce deformación radial durante el ensayo, pero la probeta mantiene su forma cilíndrica (asumiendo que el volumen de la probeta no cambie), su sección transversal promedio corregida se deberá calcular con la expresión:

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\epsilon}{100}\right)} \quad [605.2]$$

Donde: A: Sección transversal corregida de la probeta, mm² (pg²);

A_0 : Sección transversal inicial de la probeta, mm² (pg²);

ϵ : Deformación unitaria axial para una carga dada, %.

7.2.3 Si la deformación radial se incrementa durante el ensayo y la probeta adquiere forma de barril, la sección transversal promedio corregida se deberá calcular con la expresión:

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - 0.6\epsilon/100\right)} \quad [605.3]$$

Donde: A: Sección transversal corregida de la probeta, mm² (pg²);

A_0 : Sección transversal inicial de la probeta, mm² (pg²);

ϵ : Deformación unitaria axial para una carga dada, %.

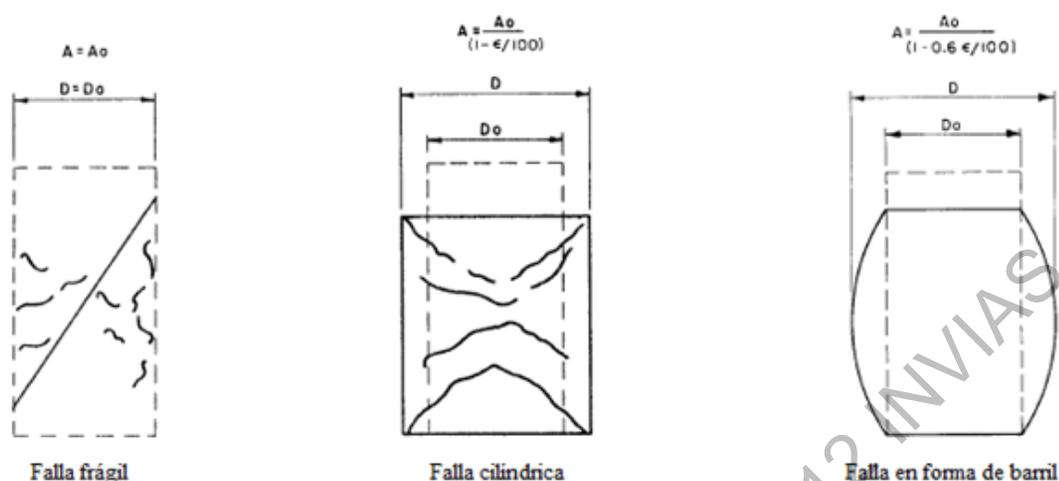


Figura 605 - 2. Determinación del área corregida

- 7.3** Se calcula el esfuerzo de compresión para una determinada carga aplicada, con la fórmula:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [605.4]$$

Donde: σ : Esfuerzo de compresión, kPa (lbf/pg²);

P: Carga axial aplicada a la probeta, kN (lbf);

A: Sección transversal promedio correspondiente, mm² × 10⁻⁶ (pg²).

- 7.4** Se elige el máximo valor de esfuerzo de compresión o el esfuerzo de compresión al 5 % de deformación, el que ocurra primero, valor que se registra como resistencia a la compresión inconfiada de la probeta (q_u). Si se considera necesario para una mejor interpretación, se elabora un gráfico esfuerzo-deformación.

- 7.5** Se promedian las resistencias a la compresión inconfiada de las dos probetas, promedio que constituye el resultado del ensayo.

Nota 7: Si el valor de q_u obtenido es inferior al mínimo exigido por las especificaciones, se deberán elaborar probetas adicionales con mayores contenidos de cal, repitiendo el procedimiento.

8 INFORME

- 8.1** El informe del ensayo debe contener, como mínimo, la siguiente información:
- 8.1.1** Identificación de la mezcla (características del suelo, tipo de cal usada, % de cal).
 - 8.1.2** Altura y diámetro promedio de las probetas al comienzo del ensayo.
 - 8.1.3** Relación altura/diámetro de las probetas.
 - 8.1.4** Sección transversal promedio de las probetas, mm^2 (pg^2).
 - 8.1.5** Velocidad de deformación usada en el ensayo, % por minuto.
 - 8.1.6** Carga máxima para cada probeta, kN (lbf).
 - 8.1.7** Deformación a la falla de cada probeta, %.
 - 8.1.8** Período y detalles del curado de las probetas.
 - 8.1.9** Gráficos esfuerzo–deformación (si se considera necesario).
 - 8.1.10** Esquemas o fotografías de las fallas.
 - 8.1.11** Resistencia a la compresión inconfiada de cada probeta y promedio, kPa (lbf/pg^2).

9 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NATIONAL LIME ASSOCIATION, "Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil", Lime Technical Brief, October 2006

ASTM D 5102 – 09

CONTENIDO DE CAL EN MEZCLAS NO CURADAS DE SUELO- CAL

INV E – 606 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Este método cubre la determinación del contenido de cal de mezclas de suelo – cal muestreadas en el terreno o en la mezcladora, durante la construcción de un proyecto vial
- 1.2 En suelos con contenidos muy variables de CaCO_3 (como el caliche) se puede dificultar la obtención de una muestra representativa.
- 1.3 Esta norma reemplaza la norma INV E-803-07.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1 Una vez realizada la mezcla de suelo con cal en la obra, se obtiene una muestra representativa y se tamiza por el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- 2.2 Se toman 300 g del material pasante del tamiz de 4.75 mm (No. 4), junto con 600 ml de solución de cloruro de amonio y se realiza una mezcla vigorosa de ellos.
- 2.3 Se mezcla una alícuota de 10 ml de la solución mencionada en el numeral 2.2 con 100 ml de agua, y se añade hidróxido de sodio hasta obtener un pH entre 13.0 y 13.5.
- 2.4 Se adicionan a la solución un polvo indicador y trietanolamina y se usa EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) para titular a un punto final de azul oscuro.
- 2.5 Los mililitros de EDTA usados se comparan con la curva de calibración, para determinar el porcentaje de cal con respecto al total de la masa seca del espécimen.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** Este método de ensayo sirve para determinar el contenido de cal de mezclas suelo – cal sin curar.
- 3.2** Se requiere conocer el contenido de cal de las mezclas de suelo – cal tanto para efectos de pago a los constructores, como para verificar el cumplimiento de las especificaciones y la eficiencia del control de calidad aplicado.
- 3.3** También, sirve para que los productores de las mezclas de suelo – cal determinen el contenido de cal de sus mezclas, con el propósito de controlar la producción.

4 EQUIPO

- 4.1** *Balanza* – Con una capacidad de 1000 g o más y una legibilidad de 0.01 g.
- 4.2** *Elementos de cristal* – Un cilindro graduado de 25 ml, un cilindro graduado de 1000 ml, frasco de 2 litros, buretas de 25 ml, pipetas volumétricas de 10 ml, un matraz Erlenmeyer de 250 ml y goteros medicinales.
- 4.3** *Elementos plásticos* – Recipientes de polietileno de 1.9 litros (2 cuartos de galón) con tapa a presión; un embudo plástico de 300 mm (12") de diámetro; botellones de 19 litros (5 galones) de polietileno para el cloruro de amonio y para el agua.
- 4.4** *Soporte para bureta* – Para sostener buretas de 25 ml.
- 4.5** *Agitador* – Puede ser magnético o cualquier otro aparato equivalente.
- 4.6** *Varilla agitadora* – De acero inoxidable, con una longitud aproximada de 300 mm (12").
- 4.7** *Medidor de pH* – Equipado con un electrodo de referencia y un electrodo de cristal de bajo error de sodio sensible a los iones de hidrógeno (o un electrodo de combinación), y con un medidor con resolución de 0.01 unidades de pH y precisión de ± 0.2 pH, en un rango de 0 a 14.
- 4.8** *Tamiz* – De 4.75 mm (No. 4).

5 REACTIVOS

- 5.1** *Pureza del agua* – Salvo que los documentos del proyecto indiquen otra cosa, cuando se mencione el agua en esta norma se debe entender que el agua es de grado reactivo del tipo II de la especificación ASTM D 1193, cuyas características relevantes se muestran en la Tabla 606 - 1:

Tabla 606 - 1. Características del agua tipo II

FACTOR	LÍMITE
Conductividad eléctrica, máximo, $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 25° C	1.0
Resistividad eléctrica, mínimo, $\text{M}\Omega\text{-cm}$ a 25° C	1.0
Carbono orgánico total, máximo, $\mu\text{g}/\text{L}$	50
Sodio, máximo, $\mu\text{g}/\text{L}$	5
Cloruros, máximo, $\mu\text{g}/\text{L}$	5
Sílice total, máximo, $\mu\text{g}/\text{L}$	3

- 5.2** *Pureza de los reactivos químicos* – Se deben usar reactivos de grado químico en todos los ensayos. A menos que se indique lo contrario, los reactivos a utilizar deben estar de conformidad con las especificaciones del “Comité de Análisis de Reactivos de la Sociedad Química Americana”. Se permite el empleo de otros grados de reactivos, si antes se constata que presentan la suficiente pureza para que su uso no reduzca la precisión establecida.

5.2.1 *Solución de cloruro de amonio, 100 g/litro* – Se depositan 1893 g de cloruro de amonio granular USP (NH_4Cl) en un botellón plástico de 18.9 litros (5 galones) y se disuelven en 7.5 a 11.4 litros (2 a 3 galones) de agua. A continuación, se diluye la solución hasta 18.9 litros (5 galones) y se mezcla bien.

5.2.2 *Solución EDTA (0.1 M)* – Se disuelven 74.45 g de polvo de tetra acetato dihidratado disódico (dinitrilo de etileno) de grado reactivo ($\text{Na}_2\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en cerca de 1 litro de agua tibia en un vaso de precipitados. Se enfría a la temperatura ambiente, se transfiere a un frasco volumétrico de 2 litros, y se diluye con agua hasta 2 litros. Se almacena en una botella de polietileno.

5.2.3 *Solución de hidróxido de sodio, 250 g/litro* – Con agitación permanente, se añaden cuidadosamente 500 g de gránulos de hidróxido de sodio reactivo (NaOH), a 300 ml de agua, hasta su disolución y se deja enfriar a temperatura ambiente. Se diluye hasta un litro con agua. Se almacena en una botella de polietileno.

5.2.4 *Solución de trietanolamina, 200 g/litro* – Se disuelven 100 ml de trietanolamina de grado reactivo $(\text{HOCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$ en 200 a 300 ml de agua en un vaso de precipitados, se diluye hasta 500 ml en un cilindro graduado, se mezcla bien y se almacena en una botella de polietileno.

5.2.5 *Polvo indicador azul de hidroxinaftol* – Es un indicador para la determinación del calcio por titulación con EDTA.

6 PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

6.1 Del suelo y de la cal utilizados en la construcción, se preparan tres series de muestras duplicadas a la humedad de diseño, que contengan las siguientes cantidades de cal:

6.1.1 *Serie 1:* dos muestras con el 75 % del contenido de cal de diseño.

6.1.2 *Serie 2:* dos muestras con el 100 % del contenido de cal de diseño.

6.1.3 *Serie 3:* dos muestras con el 125 % del contenido de cal de diseño.

6.2 Para cada muestra, se calculan las cantidades de suelo, cal y agua como sigue:

$$M_s = \frac{S}{\left(1 + \frac{W}{100}\right)} \times \left(1 + \frac{L}{100}\right) \quad [606.1]$$

$$M_r = \left(\frac{R}{100}\right) \times M_s \quad [606.2]$$

$$M_f = M_s - M_r \quad [606.3]$$

$$M_L = \left(\frac{L}{100}\right) \times M_s \quad [606.4]$$

$$V_w = \left(\frac{W}{100}\right) (M_s - M_L) \quad [606.5]$$

- Donde: M_s : Masa total del suelo seco, g;
- M_r : Masa del material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), g;
- M_f : Masa del material que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), g;
- M_L : Masa de la cal, g;
- V_w : Volumen de agua, mL;
- W : Humedad de diseño, % de la masa seca del suelo;
- L : Contenido de cal, % en relación con la masa seca del suelo;
- R : % de suelo retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4);
- S : Tamaño de la muestra: 300 g cuando el 100 % del suelo pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4); 700 g cuando parte del suelo es retenido en dicho tamiz.

- 6.3** Se mezclan completamente el suelo y la cal, hasta obtener un color uniforme. Se añade el agua y se mezcla hasta uniformizar la humedad.
- 6.4** Para suelos con 100 % pasante por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se titula cada muestra de 300 g, como se describe en la Sección 8. Después de tituladas las seis muestras, se dibuja un gráfico que muestre los mL de solución EDTA contra el porcentaje de cal en masa, usando los datos promedio de las series 1, 2 y 3.
- 6.5** Para suelos con material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se pesa una muestra de 700 g. Se tamiza la muestra sobre dicho tamiz, hasta que el material retenido esté libre de partículas más pequeñas adheridas. Se mezcla el material pasante y se pesa una porción de 300 g, la cual se titula como se describe en la Sección 8. Después de titular las seis muestras, se dibuja un gráfico que muestre los mL de solución EDTA, usando los datos promedio de las series 1, 2 y 3, contra los gramos de cal, M_{L300} , en una muestra de 300 g calculada así:

$$M_{L300} = \left[\frac{300}{700 - M_r} \right] \times M_L \quad [606.6]$$

7 ESPÉCIMEN DE ENSAYO

7.1 Durante la construcción, se toman muestras representativas de la mezcla de suelo – cal al finalizar el proceso de mezclado y se ensayan inmediatamente. Si las mezclas no se pueden ensayar de inmediato, se colocan en recipientes plásticos con tapa y se ensayan dentro de las 8 horas posteriores a la terminación de la mezcla. En este caso, la curva de calibración (Sección 6) se debe establecer usando las mezclas de suelo – cal maduras por un tiempo similar a 1 hora de ensayo de las muestras de campo.

7.1.1 Para suelos que pasan completamente por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se pesan porciones de 300 g y se titulan como se describe en la Sección 8.

7.1.2 Para suelos con material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se pesan porciones de 700 g. Se tamizan sobre el tamiz de 4.75 mm (No. 4), hasta que todo el material retenido esté libre de pequeñas partículas adheridas. Se determina la masa del material pasante y se registra como M_{fiw} . Se mezcla todo el material que pasó el tamiz y se pesa un espécimen de 300 g y se titula como se describe en la Sección 8.

Nota 1: Si se va a realizar una corrección por variaciones en el contenido de humedad, se determina el contenido de agua W , de una porción separada del material pasante del tamiz de 4.75 mm (No. 4). La corrección se calcula como se indica en la Nota 4.

8 TITULACIÓN

8.1 Se coloca cada espécimen de 300 g en un recipiente de polietileno de 1.9 litros y se añaden 600 ml de solución de NH_4Cl . Se coloca la tapa y se agita el recipiente durante 2 min (± 2 s). Se deja que la mezcla se sedimente por 4 min ± 2 s. Con una pipeta, se extrae una alícuota de 10 ml de la solución de la parte superior, se deposita en un matraz de 250 ml, y se diluye con 100 ml de agua. Mientras se mezcla completamente con un agitador magnético, se añaden gotas de solución de NaOH, hasta obtener un pH entre 13.0 y 13.5, medido con el medidor de pH aprobado. Se añaden 4 gotas de solución de trietanolamina y se añaden luego alrededor de 0.2 g de polvo indicador azul de hidroxinaftol. Mientras se está agitando la solución con el agitador magnético, se titula con solución EDTA hasta un punto final de azul puro, y se anota la cantidad en mililitros.

Nota 2: A veces se puede obtener un punto final más definido adicionando previamente la mitad de la cantidad anticipada de solución de EDTA antes de la adición de la solución de NaOH.

Nota 3: Todo el equipo se debe limpiar escrupulosamente, enjuagándolo con agua. Todos los reactivos se deben guardar en recipientes de polietileno.

9 CÁLCULOS

- 9.1** Si el 100 % del suelo pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se lee el contenido de cal en masa seca directamente de la curva de calibración correspondiente a los resultados de la titulación, en mL de solución EDTA para la muestra de ensayo.
- 9.2** Si el suelo contiene material retenido sobre el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se leen los gramos de cal de la curva de calibración correspondiente a los resultados de la titulación en mL de solución EDTA para la muestra del ensayo. Se calculan los valores A y B como sigue:

$$A = \left(\frac{M_{flw}}{300} \right) \times M_{L300} \quad [606.7]$$

$$B = \frac{700}{1 + \frac{W}{100}} \quad [606.8]$$

Donde: A: Masa de cal en la muestra de 700 g, g;

B: Masa de suelo y cal en la muestra de 700 g, g;

M_{flw} : Masa de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm como se describe en el numeral 7.1.2, g;

M_{L300} : Masa de cal leída en la curva de calibración, g;

W: Humedad de diseño, en %..

- 9.2.1** Entonces se calcula, L, porcentaje de cal por masa seca de la muestra total, así

$$L = \frac{A}{B - A} \times 100 \quad [606.9]$$

Nota 4: Las variaciones de la humedad tendrán un ligero efecto sobre la exactitud del ensayo. Las correcciones por variaciones de la humedad, se pueden calcular de la siguiente forma:

$$L' = \frac{1 + \left(\frac{W'}{100}\right)}{1 + \left[\frac{V_w}{(M_f + M_L)}\right]} \quad [606.10]$$

Donde:	L' :	Porcentaje de cal corregido por variación de la humedad;
	L :	Porcentaje de cal determinado del ensayo de la muestra;
	W' :	Humedad de la muestra de ensayo determinada como se indica en la Sección 7, %;
	V_w , M_f y M_L :	Cantidades calculadas de acuerdo con la Sección 6, para la Serie 2.

10 PRECISIÓN Y SESGO

10.1 Precisión – De un estudio entre laboratorios, basados en 60 resultados de ensayos obtenidos sobre 3 tipos de suelos y 4 diferentes contenidos de cal en 5 laboratorios, se establecieron las siguientes declaraciones sobre precisión:

10.1.1 Precisión para un solo operador – Debido a que solamente se desarrolló un ensayo con un solo tipo de suelo con un contenido dado de cal en un solo laboratorio, no es posible declarar la precisión para un solo operador.

10.1.2 Precisión entre laboratorios – La desviación estándar entre laboratorios se estableció en 0.23 % para el contenido de cal y de 0.34 ml de solución EDTA.

10.2 Sesgo – Cuando se han comparado los resultados experimentales con valores conocidos a partir de especímenes elaborados con exactitud, se encontró que, con 95 % de confiabilidad, el sesgo se encuentra entre – 0.02 y 0.73 % del verdadero contenido de cal.

11 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 3155 – 11

EXPANSIÓN UNIDIMENSIONAL, CONTRACCIÓN Y PRESIÓN DE EXPANSIÓN DE MEZCLAS DE SUELO-CAL

INV E – 607 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Los métodos de ensayo descritos en esta norma suministran procedimientos para realizar ensayos de expansión, contracción y presión de expansión sobre muestras de suelo-cal, y se pueden utilizar para determinar el contenido de cal requerido para lograr el control deseado de cambios volumétricos causados por aumentos o disminuciones de humedad.
- 1.2** Estos ensayos se pueden usar para determinar: 1) las magnitudes de los cambios de volumen bajo condiciones de carga variable, 2) la velocidad del cambio volumétrico, y 3) la magnitud del cambio de presión al cambiar el contenido de humedad de las mezclas de suelo-cal. Si se desea, también se puede determinar la permeabilidad de las mezclas de suelo-cal para diferentes condiciones de carga.

Nota 1: Los cambios en las condiciones de campo pueden tener efectos importantes sobre las características de expansión y contracción de los suelos. Por lo tanto, se deben tratar de duplicar lo mejor posible las condiciones de campo iniciales y las previsibles en el futuro, particularmente en relación con la humedad y la densidad.

- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INV E-804-07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** A partir de los resultados de estos ensayos se puede calcular el potencial relativo de expansión de las mezclas de suelo-cal que contienen diferentes cantidades de cal. A partir de tal evaluación, se puede determinar la cantidad de cal necesaria para reducir la expansión a un nivel aceptable. Los datos se pueden utilizar, entonces, para el diseño y el establecimiento de requisitos de especificaciones para rellenos estructurales y subrasantes donde se encuentren suelos expansivos y se desee brindar cierto grado de control sobre la expansión y la contracción en las fundaciones de estructuras y en los suelos de subrasante de carreteras. Los resultados de los ensayos también permiten establecer si los suelos son susceptibles o no de estabilizar con cal.

3 EQUIPO

- 3.1** El aparato debe cumplir los requerimientos de la norma INV E-151, "Consolidación unidimensional de los suelos", exceptuando que el espesor mínimo del espécimen será de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "). El aparato debe tener los medios para ejercer una presión sobre el espécimen de, al menos, 200 % de la máxima carga esperada de diseño y, al menos, la máxima presión de expansión.
- 3.2** *Medidor micrométrico* – Montado sobre el aparato como muestra la Figura 607 - 1, o con otra disposición igualmente funcional. La sensibilidad del medidor será de ± 0.0025 mm (± 0.0001 ").
- 3.3** *Anillo de carga* – Maquinado a la misma altura del anillo del espécimen, con una exactitud de ± 0.02 mm (± 0.001 ") y que se pueda fijar al consolidómetro.

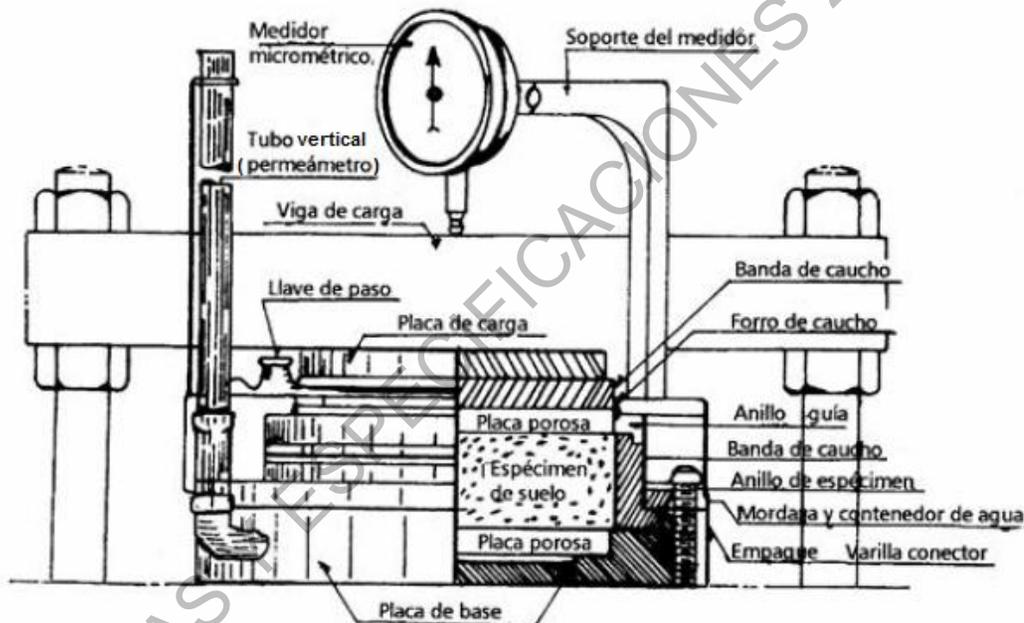


Figura 607 - 1. Consolidómetro de anillo fijo

- 3.4** *Consolidómetro* – Equipado con una llave de paso inferior para el drenaje y un tubo vertical (permeámetro) para remover cualquier aire atrapado bajo el espécimen y para añadir agua al espécimen, respectivamente, como se muestra en la Figura 607 - 1.
- 3.5** *Collar de extensión* – Para compactar especímenes, aproximadamente de 100 mm (4") de altura y del mismo diámetro del anillo del espécimen.

Nota 2: Los especímenes se pueden compactar en un molde más grande que el anillo del espécimen y ser recortados luego para encajarlos en el anillo del espécimen.

3.6 *Martillo compactador* – Del tipo requerido para la norma INV E-141.

3.7 *Placas de vidrio* – Dos, para cubrir cada anillo del consolidómetro.

4 MUESTREO

4.1 Las muestras de suelo natural para estos ensayos se deben obtener de acuerdo con cualquier método aprobado de muestreo de suelos. Las muestras no se deberán secar en el horno antes de preparar los especímenes de ensayo.

5 PROCEDIMIENTO

5.1 Se ensamblan en el recipiente del espécimen desocupado la base del consolidómetro, el anillo del espécimen, las piedras porosas y la placa de carga con el anillo de carga, con la misma disposición que será usada para ensayar el espécimen.

5.2 Se coloca el montaje sobre el aparato de carga en la misma posición que ocupará durante el ensayo.

5.3 Se aplica sobre la placa de carga una carga que produzca una presión unitaria de 2.4 kPa (50 lbf/pie²).

5.4 Se anota la lectura inicial del medidor micrométrico, r_1 . Se marcan las partes del aparato, para poderlo reensamblar en la misma posición durante el ensayo del espécimen de suelo-cal.

5.5 Se prepara un mínimo de 1000 g (2 lb aproximadamente) de mezcla de suelo-cal con los contenidos deseados de cal y de agua, de acuerdo con la norma INV E-603. La mezcla no deberá tener partículas mayores de 4.75 mm (tamiz No. 4).

5.6 Se determina la masa del anillo del consolidómetro.

5.7 Con el collar de extensión en su sitio sobre el anillo del consolidómetro ensamblado, se compacta el espécimen en dicho anillo hasta obtener la masa unitaria húmeda deseada, con el martillo de compactación apropiado. El espécimen deberá tener un espesor cerca de 6 mm ($\frac{1}{4}$ ") mayor que la altura del anillo de carga.

- 5.8** Se retira el collar de extensión y se recorta el exceso de material de la parte superior del espécimen con una regla metálica u otra herramienta.
- 5.9** Se toma una muestra de los recortes y se coloca en un recipiente hermético, para determinar posteriormente el contenido de agua, según la norma INV E-122.
- 5.10** Inmediatamente después de recortar el espécimen compactado, se pesan el espécimen y el anillo y se cubren las superficies expuestas del espécimen con placas de vidrio sostenidas con abrazaderas, hasta que éste sea colocado en el aparato de carga.
- 5.11** Se calcula la densidad inicial húmeda del espécimen que llena a ras el anillo del consolidómetro, usando el volumen calculado del anillo del consolidómetro y la masa neta del espécimen. La densidad húmeda calculada se debe encontrar dentro de 16.02 kg/m^3 (1 lb/pe^3), y la humedad dentro del $\pm 1 \%$ de los valores requeridos.
- 5.12** Si no se logra la densidad esperada, se descarta ese espécimen. Se repite el proceso de compactación, ajustando el esfuerzo de compactación hasta obtener la masa unitaria deseada.
- 5.13** Cualquier curado de los especímenes de suelo-cal se deberá hacer en este momento. El curado se debe realizar en recipientes sellados para prevenir la evaporación del agua o la carbonatación de la cal.
- 5.14** Al final del período de curado se coloca en el aparato de carga el espécimen con su anillo de consolidómetro confinante, de acuerdo con la norma INV E-151, de manera que las partes queden ensambladas en las mismas posiciones que se usaron para la calibración inicial (Ver numeral 5.4).
- 5.15** Se aplica una carga de asentamiento que produzca una presión de 2.4 kPa (50 lbf/pe^2).
- 5.16** Se registra la lectura del medidor micrométrico, r_2 . Utilizando la diferencia entre r_1 y r_2 , se determina la altura exacta del espécimen.

6 ENSAYOS DE EXPANSIÓN

- 6.1** Las características expansivas de los suelos expansivos tratados y no tratados con cal, varían según los patrones de esfuerzo aplicados.

- 6.2** Se necesitan al menos dos especímenes duplicados para un ensayo completo.
- 6.3** Utilizando los procedimientos descritos en esta norma y en la norma INV E-151, se determinan los datos para dos series de ensayos: 1) *Cargado y expandido*, por el que el espécimen no saturado se somete a saturación con agua y luego se somete a carga para prevenir la elevación del espécimen (curva A de la Figura 607 - 2), y 2) *Expandido y cargado*, por el que el espécimen es saturado previamente (curva B de la Figura 607 - 2). Cualquier otro procedimiento de carga es intermedio entre los descritos y queda representado por puntos a lo largo de una trayectoria como la que representa la curva C en la Figura 607 - 2.
- 6.4** *Cargado y expandido* – Después de aplicar la carga inicial de asentamiento y de tomar la lectura inicial del medidor, se satura el espécimen No.1 de la siguiente manera:
- 6.4.1** Se llena el tubo vertical (permeámetro) con agua destilada (nota 3), cuidando de remover cualquier burbuja de aire que pueda estar atrapada en el sistema, humedeciendo lentamente la piedra porosa inferior y drenando a través de la llave de paso inferior. (La cabeza de agua en el tubo vertical debe ser suficientemente baja para que el espécimen no se levante).
- Nota 3: A menos que se especifique lo contrario, se debe utilizar siempre agua destilada. A menudo, resulta deseable usar un agua que tenga los mismos constituyentes químicos del agua subterránea o transportada que se encuentra en el campo, debido a los efectos del intercambio de bases.*
- 6.4.2** Cuando el espécimen se comience a expandir, se incrementa la carga lo necesario para mantenerlo con su altura original.
- 6.4.3** Después de alcanzar la carga máxima, que es una medida indirecta de la máxima presión de expansión, se mantiene constante por un mínimo de 48 horas, y luego se reduce la carga hasta $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{8}$ de la máxima y, finalmente, hasta la carga de asentamiento de 2.4 kPa (50 lbf/pie²). Se mide la altura del espécimen para cada valor de carga. Se debe utilizar un mayor número de cargas si se requiere un mayor detalle en la curva de ensayo.
- 6.4.4** Se mantienen todas las cargas durante 24 horas o más, de ser necesario, hasta obtener valores de altura constantes.
- 6.4.5** Se extrae el espécimen del recipiente anular y se determina su masa inmediatamente, así como después de secarlo en horno a 105° C (221° F).

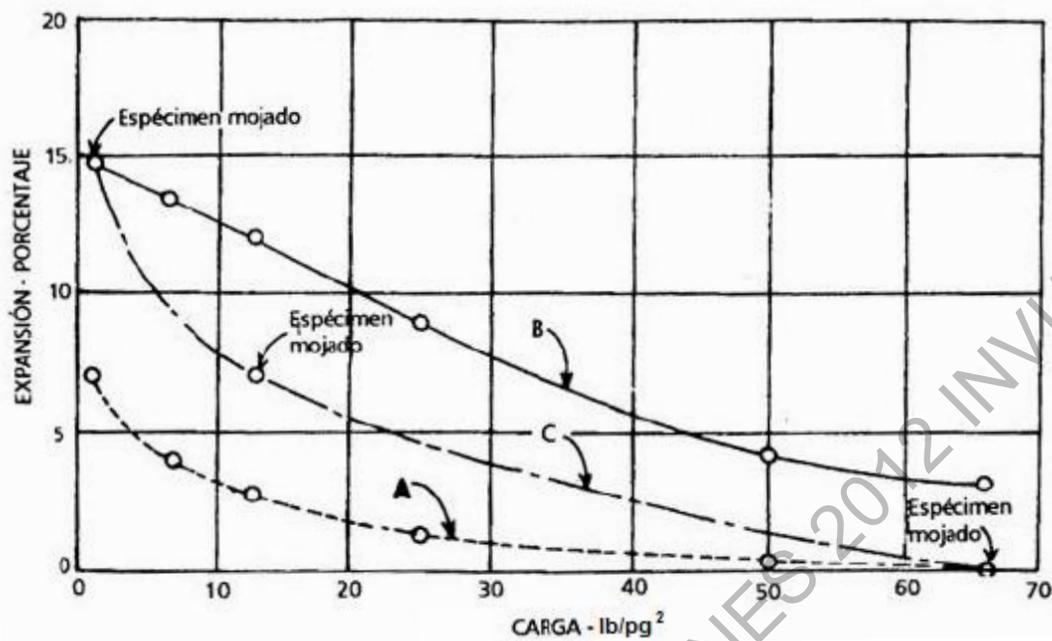


Figura 607 - 2. Ejemplo de curvas carga-expansión para especímenes húmedos

- 6.4.6** Se determina el contenido de agua del espécimen completo, de acuerdo con la norma INV E-122.
- 6.4.7** Se toma una muestra del espécimen secado al horno para determinar la gravedad específica de acuerdo con la norma INV E-128.
- 6.4.8** Se calculan el grado de saturación (a partir del contenido de agua), la densidad bulk seca y la gravedad específica del espécimen.
- 6.5** *Expandido y cargado* – Después de aplicar la carga inicial de asentamiento y de tomar la lectura inicial del medidor micrométrico, se satura el espécimen No. 2 de acuerdo con lo descrito en el numeral 6.4.
- 6.5.1** Se permite que el espécimen se expanda bajo la carga de asentamiento durante un mínimo de 48 horas o hasta que se complete la expansión.
- 6.5.2** Se carga el espécimen sucesivamente a $1/8$, $1/4$, $1/2$ y 1 veces el valor de la carga máxima que se aplicó al espécimen No.1, para determinar las características de preconsolidación del espécimen. Se debe utilizar un mayor número de cargas si se requiere un mayor detalle en la curva de ensayo.
- 6.5.3** Se sigue el procedimiento especificado en la norma INV E-151 para realizar las medidas y las determinaciones.

6.6 *Expansión bajo carga individual* – Cuando se desee realizar ensayos individuales de expansión para otras condiciones de carga, se utiliza el siguiente procedimiento:

6.6.1 Después de aplicar las cargas iniciales de asentamiento y de tomar las lecturas iniciales del medidor micrométrico, se carga cada espécimen con el valor de carga deseado y se satura de acuerdo con el numeral 6.4.1.

6.6.2 Se deja expandir el espécimen bajo la carga aplicada durante 48 horas o hasta que se complete la expansión. Se mide la altura del espécimen expandido.

6.6.3 Se reduce la carga hasta el valor de la carga de asentamiento. Se deja que la altura llegue a ser constante y se mide; entonces, se retira el espécimen del anillo y se hacen las determinaciones de contenido de agua, densidad bulk seca, gravedad específica y grado de saturación, de acuerdo con el numeral 6.4.1. Un ejemplo de ensayo sobre un espécimen intermedio se muestra en la curva C de la Figura 607 - 2.

Nota 4: Como ejemplo, la curva C está dibujada a través del punto de expansión cero y del punto de máxima presión de expansión de la curva A, los datos del ensayo del espécimen intermedio y el punto de máxima expansión de la curva B.

7 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

7.1 Después de completar la saturación de cualquiera de los especímenes descritos en los numerales 6.4, 6.5 y 6.6, se pueden tomar lecturas de permeabilidad en cualquier instante durante los ensayos, llenando el tubo permeámetro vertical.

7.2 Se registra la cabeza inicial, H_i , y se permite que el agua percole a través del espécimen.

7.3 Se mide la cabeza en el tubo, H_f , y el tiempo transcurrido en minutos para la caída de la cabeza.

7.4 Los ensayos de permeabilidad para cualquier condición particular de carga se deben llevar a cabo, por lo menos, durante 24 horas.

8 ENSAYOS DE CONTRACCIÓN

8.1 Cuando se necesiten medidas de contracción durante el secado, se prepara un espécimen adicional de acuerdo con los numerales 5.5 y 5.6. Se moldea este espécimen en el recipiente anular, bajo las mismas condiciones de densidad bulk y de contenido de agua usadas para los especímenes No. 1 y No. 2 de expansión.

8.1.1 Se miden la altura inicial, el volumen, el contenido de agua, y la densidad, como se describe en los numerales 5.6 a 5.16.

8.2 *Determinación de las alturas de contracción* – Si se desea la altura del espécimen secado al aire, se seca, como mínimo, al contenido de agua correspondiente al límite de contracción, dejando el espécimen al aire, determinado como se indica en la norma INV E-127.

8.2.1 Se colocan el espécimen seco y el recipiente anular en la máquina de carga.

8.2.2 Se aplica la carga de asentamiento de 2.4 kPa (50 lbf/pie²) y se lee el medidor.

8.3 *Determinación del volumen de contracción* – Para medir el volumen de contracción, se deja secar al aire el espécimen en el anillo, por lo menos hasta el contenido de agua correspondiente al límite de contracción.

8.3.1 Después de que el espécimen se haya secado al aire, se remueve del recipiente anular y se determina su volumen por el método de la parafina, que es el mismo utilizado en la determinación del límite de contracción de la norma INV E-129, excepto que el contenido inicial de agua y el volumen del espécimen se determinan al comienzo de este método de ensayo.

8.3.2 Si el espécimen de contracción se rompe en piezas separadas, se mide el volumen de cada pieza y se suman para obtener el volumen total.

9 CÁLCULOS

9.1 *Datos del ensayo de expansión* – Se calcula la relación de vacíos como sigue:

$$e = \frac{h - h_0}{h_0} \quad [607.1]$$

- Donde: e: Relación de vacíos (volumen de vacíos/volumen de sólidos);
 h: Altura del espécimen;
 h₀: Altura del material sólido para el contenido de vacíos cero.

9.1.1 Se calcula la expansión como porcentaje de la altura original, de la siguiente manera:

$$\Delta, \% = \frac{h_2 - h_i}{h_i} \quad [607.2]$$

- Donde: Δ: Expansión, como porcentaje del volumen inicial;
 h_i: Altura inicial del espécimen;
 h₂: Altura del espécimen bajo una condición de carga específica.

9.2 *Datos del ensayo de permeabilidad* – Se calcula la rata de permeabilidad, por medio de la siguiente fórmula básica para el permeámetro de cabeza variable:

$$k = \left[\frac{A_p \times L_s}{A_s \times 12} \right] \left[\frac{1}{t} \right] \ln \left(\frac{H_i}{H_f} \right) \quad [607.3]$$

- Donde: k: Rata de permeabilidad, pies/año;
 A_p: Área del tubo vertical que suministra la cabeza de percolación, pg²;
 A_s: Área del espécimen, pg²;
 L_s: Longitud del espécimen, pg;
 H_i: Carga (cabeza) de agua inicial, pg;
 H_f: Carga (cabeza) de agua final, pg;
 t: Tiempo transcurrido, años.

9.3 *Datos del ensayo de contracción* – Se calcula la contracción volumétrica como un porcentaje del volumen inicial, como sigue:

$$\Delta_s, \% = \frac{v_i - v_d}{v_i} \times 100 \quad [607.4]$$

Donde: Δ_s : Contracción volumétrica, como porcentaje del volumen inicial;

v_i : Volumen inicial del espécimen (altura del espécimen por el área del recipiente anular);

v_d : Volumen del espécimen secado al aire, resultante del método del desplazamiento con parafina.

9.3.1 Se calcula la contracción lineal por altura, como sigue:

$$\Delta h_s, \% = \frac{h_i - h_d}{h_i} \times 100 \quad [607.5]$$

Donde: Δh_s : Altura contraída como porcentaje de la altura inicial;

h_i : Altura inicial del espécimen;

h_d : Altura del espécimen secado al aire.

9.3.2 Para calcular el porcentaje total del cambio volumétrico desde la condición seca al aire hasta la condición saturada, se añade el porcentaje de contracción volumétrica por secado al aire Δ_s , al porcentaje de expansión volumétrica por saturación, Δ , calculado en el numeral 9.1. Este valor se usa como un indicador del potencial total de expansión, basado en las condiciones iniciales de densidad y de contenido de agua. Puesto que los datos de expansión volumétrica se determinan para varias condiciones de carga, el cambio volumétrico total también se puede determinar para varias condiciones de carga.

9.3.3 Para calcular el porcentaje total de cambio en altura al pasar de la condición saturada a la condición seca al aire, se añade el porcentaje de contracción lineal en altura, Δh_s , al porcentaje de expansión, Δ , cuando el espécimen es saturado bajo condiciones de carga cero u otros valores de carga, según se desee.

10 GRÁFICOS DE LOS DATOS DE ENSAYO

10.1 Con los datos obtenidos de los ensayos de expansión, se hacen gráficos como el de la Figura 607 - 2.

11 INFORME

11.1 *Ensayo de expansión* – En el informe se debe incluir la siguiente información:

11.1.1 Identificación de la muestra (número de perforación, profundidad, localización, etc.).

11.1.2 Descripción del suelo ensayado y tamaño de la fracción ensayada.

11.1.3 Porcentaje de cal mezclado con el suelo.

11.1.4 Condiciones iniciales de masa unitaria y humedad y grado de saturación. Dar el porcentaje de densidad máxima y la humedad óptima para las mezclas compactadas de suelo-cal, con base en los métodos de ensayo INV E-141 o INV E-142, indicando cuál de ellos se usó para la comparación.

11.1.5 Tipo de consolidómetro (de anillo fijo o flotante, tamaño del espécimen) y tipo de aparato de carga.

11.1.6 Un gráfico con curvas de carga versus cambio volumétrico, como se muestra en la Figura 607 - 2 (si se desea, se puede incluir una curva de relación de vacíos-logaritmo de presión).

11.1.7 Una curva de logaritmo de tiempo versus deformación, si se desea.

11.1.8 Suministro de los datos de carga y tiempo versus cambios volumétricos en otras formas, si se requiere específicamente.

11.1.9 Valores finales de contenido de agua, densidad bulk seca, y grado de saturación.

11.2 *Ensayo de permeabilidad* – Se informan los datos de permeabilidad y cualquier otro dato solicitado específicamente.

11.3 Ensayo de contracción:

- 11.3.1** Se deben incluir datos sobre la disminución de volumen desde la condición inicial seca al aire y, si se desea, otros datos como el cambio volumétrico total y el cambio total de altura.
- 11.3.2** Se deben reportar las condiciones de carga bajo las cuales se obtuvieron las medidas del cambio volumétrico.
- 11.3.3** Se debe incluir la misma información mencionada en los numerales 11.1.1 a 11.1.4 y 11.1.9.

12 PRECISIÓN Y SESGO

- 12.1** *Precisión* – La precisión de este método de ensayo aún no se ha establecido.
- 12.2** *Sesgo* – El procedimiento descrito en este método para medir la expansión unidimensional, la contracción y la presión de expansión de las mezclas de suelo-cal no presenta sesgo, debido a que los valores del límite de contracción y de expansión sólo se pueden definir en términos de este método de ensayo.

13 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 3877 – 08

MUESTREO DE LA CAL HIDRATADA

INV E – 608 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Este método se refiere al muestreo de cal hidratada en bandas transportadoras, puntos de despacho y diferentes estados de almacenamiento.

2 EQUIPO

- 2.1 Brocha de pintura de 50 mm (2") de ancho.
- 2.2 Recipientes de 4 litros con tapas de fricción de doble sello (u otro medio de sellado).
- 2.3 Tubos de muestreo de diferentes dimensiones como, por ejemplo, de 25 mm (1") de diámetro y 2.5 m (8 pies) de longitud, y 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") de diámetro y 1 m (3 pies) de longitud, con un corte diagonal en un extremo.

3 PROCEDIMIENTO PARA EL MUESTREO DE CAL EN POLVO A GRANEL

- 3.1 *En proceso de carga o recién cargada en camiones cisterna, vagones tolva o vagones cerrados* – Se toma una porción representativa de 2 litros ($\frac{1}{2}$ galón) de la cal y se coloca en el recipiente de 4 litros. Se cierra el recipiente y se tapa a presión. Se limpia la cal de la ranura del recipiente antes de colocar la tapa, pasando la brocha de 50 mm (2").

Nota 1: Los recipientes se deben llenar sólo hasta la mitad con la muestra, de manera que el mezclado subsecuente tenga lugar dentro del mismo recipiente. El llenado sólo hasta la mitad deja espacio para permitir una agitación suficiente para una adecuada agitación durante las operaciones posteriores de mezclado. El recipiente debe estar seco y limpio, para prevenir la contaminación de la muestra.

- 3.1.1 Si las condiciones lo permiten, los camiones cisternas o los vagones de ferrocarril que están siendo cargados se muestrean durante la operación de carga insertando el recipiente dentro del flujo de material. El muestreo debe ser cuidadoso, para que la muestra tomada sea representativa del material. Si la cal se está cargando de una o más tolvas o silos o de un silo y una planta de producción u otras

combinaciones, se debe tomar una muestra compuesta que sea representativa del material combinado. En la medida en que pueda existir la posibilidad de un mezclado deficiente, el operador puede tomar, a su discreción, muestras separadas de porciones individuales del material que se está cargando. Esto es particularmente deseable cuando el material que se está cargando proviene de más de una planta de suministro y se desea muestrear una carga completa.

Nota 2: Si las bandas están siendo cargadas bajo lluvia, se debe hacer el mayor esfuerzo para que el material contenido en el recipiente sea representativo de la carga. En caso de que se prevean dificultades a causa de la humedad, es aconsejable insertar en la carga de cal los tubos de muestreo largos.

- 3.1.2** En el caso de los camiones, los tubos de muestreo se deberán insertar en tres lugares separados (en el centro y en cada extremo) desde la parte superior, a partir de las aberturas de su tanque. El tubo se debe insertar vertical o diagonalmente, de manera de obtener una muestra compuesta de 2 litros ($\frac{1}{2}$ galón), que sea lo más representativa posible.
- 3.1.3** Si la carga se ha completado recientemente y las condiciones lo permiten, se pueden tomar muestras insertando el tubo muestreador como si fuera una pala o cucharón en la parte superior del material cargado y, dependiendo de la planta de suministro del material, el operador considerará si la muestra es representativa. Si la carga está compuesta por una o más porciones provenientes de más de una planta de suministro, se puede tomar una muestra superficial de cada porción durante la operación de carga de la misma manera que se acaba de describir, y las muestras se podrán remitir para análisis de manera individual o combinada.
- 3.1.4** Cuando el muestreo se realice en vagones tolva, se requieren precauciones adicionales. El operador deberá solicitar asistencia al personal de la planta para el muestreo en los vagones. Desde el punto de vista de la seguridad, es deseable que dos personas levanten las pesadas puertas de acero tantas veces cuantas sean necesarias, para obtener una muestra representativa. El nivel del material dentro del vagón debe ser suficientemente bajo para obtener una muestra operando el tubo muestreador como si fuera una pala o cucharón y, luego, el material debe ser penetrado con el tubo muestreador tantas veces como el operador lo considere necesario. Opcionalmente, la muestra se puede tomar del chorro que alimenta el vagón, con asistencia del personal de la planta. La inserción del tubo en toda la carga de la manera indicada es el método preferible, pero el operador

tiene la opción de escoger el que considere más adecuado y seguro. Con las excepciones anotadas, los detalles y principios sugeridos para el muestreo en camiones cisterna mientras están siendo cargados (o recientemente cargados), aplican para el caso de los vagones tolva bajo las mismas condiciones.

- 3.2** *En el sitio de almacenamiento previo al despacho* – Este procedimiento aplica al material cargado en un camión que se ha dejado en espera para su despacho, en una condición que se puede considerar como una modificación del almacenamiento en una tolva. Estas cargas se debe muestrear insertando el tubo muestreador de mayor longitud [2.5 m (8 pies) de longitud]. Si la carga es reciente, el operador podrá tomar la muestra de la parte superficial insertando el tubo como si la estuviera recogiendo con una pala, pero si lleva algún tiempo, deberá insertar el tubo a través de la masa de la cal para obtener una muestra representativa. Analizando las diferentes alternativas de muestreo, el operador deberá elegir aquella que considere que le producirá una muestra realmente representativa del material que se va a despachar.
- 3.3** *En el sitio de la obra* – Se debe tomar una porción representativa del material, de 2 litros (½ galón), insertando el muestreador largo en el camión o vagón antes de la descarga, en un mínimo de tres lugares (centro y extremos).

Nota 3: El material se debe muestrear antes de la descarga, para prevenir la posibilidad de contaminación y la posibilidad de tomar una muestra que no sea representativa. Debido a la variedad de condiciones de almacenamiento y a la posibilidad de que el material se contamine a causa de la exposición al aire, la humedad, etc., no se recomienda la toma de muestras superficiales.

- 3.4** *En los conductos de alimentación provenientes de la planta de producción, de la tolva de almacenamiento o en los conductos de salida hacia la empacadora de bolsas desde la planta de producción o desde la tolva de almacenamiento* – Se debe asegurar que esté circulando una cantidad suficiente de material por el conducto, para minimizar la posibilidad de contaminación del material. Es preferible tomar la muestra de 2 litros de las bolsas cargadas que del conducto de salida hacia la empacadora, dada la posibilidad de que en éste la muestra no resulte representativa debido a la presencia de material que no esté fresco o que esté contaminado por la falta de una limpieza adecuada del conducto.

Nota 4: El operador debe tener en cuenta que la planta no es operada por el personal encargado del muestreo. El personal de la planta tiene como responsabilidad solamente operar el equipo y facilitarle la operación de muestreo al encargado de hacerla. El productor deberá disponer instalaciones para que el muestreo sea razonable y seguro, de manera que las muestras sean realmente representativas del material que se va a despachar.

- 3.5** *En los silos cargados o en tolvas almacenamiento* – Generalmente, hay una considerable falta de mezclado en el material que contienen las tolvas de

almacenamiento. En los silos, tienden a ocurrir estratificación y patrones de flujo y la experiencia que existe al intentar correlacionar las muestras de silos con las obtenidas en camiones cargados con cal proveniente de ellos indica que la correlación es muy pobre. Siempre que sea posible, se debe evitar la toma de muestras en los silos o tolvas. Es preferible concentrar el muestreo en cargas o envíos individuales que tomar muestras compuestas de almacenamientos de gran tamaño, debido a la pobreza del mezclado y a otras condiciones que prevalecen en éstos que pueden hacer que porciones de material inadecuado aparezcan como apropiadas al formar parte de una muestra compuesta.

Nota 5: Los alimentadores de tornillo de las plantas o las tolvas son sitios peligrosos para la toma de muestras y, por lo tanto, no se debe realizar ningún intento de muestrear en ellos.

Nota 6: Las muestras acumuladas obtenidas por la inmersión del tubo muestreador deben ser mezcladas completamente luego de que el recipiente donde se han colocado se encuentre perfectamente cerrado, invirtiéndolo y agitándolo repetidamente.

4 PROCEDIMIENTO PARA EL MUESTREO DE CAL HIDRATADA EN BOLSAS

- 4.1** *De la bodega donde se encuentran consignadas para su despacho – Se debe tener cuidado de no muestrear bolsas que se encuentren apiladas a una altura que pueda resultar peligrosa para el operador. Sin embargo, si el operador considera necesario muestrear alguna de dichas bolsas, deberá solicitar al personal de la bodega que se la haga accesible. La elección de las bolsas se debe hacer sobre la base de obtener una muestra representativa del lote que conforma el envío. Si el lote consignado para enviar en un camión o grupo de camiones proviene de lotes de procedencia diferente, el operador deberá usar su criterio para tomar muestras de los diferentes lotes que componen el total. El operador deberá emplear el tubo muestreador corto, efectuando suficientes inserciones diagonales a través de la válvula de carga de la bolsa para asegurar una porción representativa, pero no tanta como para disminuir sustancialmente el contenido neto de la misma. Por este motivo y por la necesidad obvia de disponer de una muestra completamente representativa, se sugiere tomar porciones de cuatro a seis bolsas del lote que se está muestreando, para conformar con ellas una muestra compuesta. En general, se considera que se debe muestrear un mínimo de seis bolsas para obtener una muestra de 2 litros que represente el envío que lleva un camión desde una bodega de consignación.*

- 4.2** *De bolsas cargadas en camiones* – Si el camión está cargado parcialmente, el operador puede escoger bolsas a su discreción para obtener una muestra representativa, pero también puede tomar parte del material que está depositado en el piso pendiente de ser cargado al camión, para conformar entre ambos la muestra representativa. Las bolsas escogidas para el muestreo se deben seleccionar de diferentes puntos de la carga. Al muestrear bolsas de camiones o de vagones, se debe emplear el tubo muestreador corto, con el fin de obtener una muestra de 2 litros ($\frac{1}{2}$ galón) tomando porciones de al menos seis bolsas. El muestreador se debe insertar diagonalmente a través de la válvula de carga, con el cuidado suficiente para no perforar el fondo o los lados de la bolsa.

5 PRECISIÓN Y SESGO

- 5.1** Puesto que este método de muestreo no produce valores numéricos, no aplica una determinación sobre la precisión y el sesgo.

6 NORMAS DE REFERENCIA

AASHTO T 218 – 86 (2004)

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

RELACIONES HUMEDAD–DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO

INV E – 611 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Estos métodos se refieren a la determinación de la relación entre la humedad y la densidad de mezclas de suelo–cimento cuando se compactan del modo que se prescribe en esta norma y antes de que ocurra la hidratación del cemento.
- 1.2** Para la compactación se emplean un molde de 944 cm^3 ($1/30 \text{ pie}^3$) y un martillo de 2.49 kg (5.5 lb) que cae desde una altura de 305 mm (12"), y se utilizan dos métodos de acuerdo con la granulometría del material:
- 1.2.1** *Método A*, para muestras de suelo que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Se deberá emplear cuando el 100 % de la muestra del suelo pasa este tamiz (Ver Sección 5).
- 1.2.2** *Método B*, para muestras de suelo que pasan el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ "). Se deberá emplear cuando parte del suelo quede retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver Sección 6), pero no más de 30 % quede retenido en el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ").
- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INV E–806–07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** Mediante estos ensayos se determinan la humedad óptima y la densidad máxima (o el peso unitario máximo) que se deben emplear para moldear especímenes de suelo–cimento para el ensayo descrito en la norma INV E–612.

Nota 1: Puesto que estos ensayos se emplean en conjunto con el ensayo descrito en la norma INV E–612, la prueba difiere en tres aspectos de la descrita en la norma INV E–141. En primer lugar, esta norma permite el empleo de partículas con tamaño máximo de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") en el molde de 944 cm^3 ($1/30 \text{ pie}^3$), mientras la norma INV E–141 solo permite usar partículas con tamaño máximo de 9.5 mm ($3/8$ ") en este molde. En segundo lugar, en esta norma se permite que el material sobrante luego de obtener el contenido de agua de un espécimen sea mezclado con el resto de la muestra y sea reusado en la siguiente determinación. Por último, esta norma permite que el material pasante por el tamiz de 75 mm (3") y retenido en el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") sea descartado y reemplazado por una masa igual de material que

pase el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y quede retenido en el de 4.75 mm (No.4), procedimiento que no está permitido en la norma INV E-141.

3 EQUIPO

3.1 Molde – Deberá ser cilíndrico de paredes sólidas, fabricado con metal y con las dimensiones y capacidad mostradas en la Figura 611 - 1. Deberá tener un collar ajustable de aproximadamente 63.5 mm ($2\frac{1}{2}$ ") de altura, que permita la preparación de especímenes compactados de mezclas de suelo cemento de la altura y el volumen deseados. El conjunto del molde y del collar deberá estar construido de manera que se pueda ajustar firmemente a una placa desmontable hecha del mismo material. El molde deberá tener una capacidad de $944 \pm 11 \text{ cm}^3$ ($1/30 \pm 0.0004 \text{ pie}^3$) con un diámetro interno de $101.60 \pm 0.41 \text{ mm}$ (4.000 ± 0.016 ") y una altura de $116.43 \pm 0.13 \text{ mm}$ (4.584 ± 0.005 "). El molde puede ser, también, de tipo dividido, consistente en dos secciones semicirculares que se puedan ajustar con seguridad para formar un cilindro con las dimensiones recién descritas.

3.2 Martillo – Puede ser de operación manual o mecánica. Debe tener una caída libre de $305 \pm 1 \text{ mm}$ (12.00 ± 0.05 ") por encima de la elevación del suelo. Su masa debe ser $2.495 \pm 0.009 \text{ kg}$ ($5.5 \pm 0.02 \text{ lb}$) y la cara que golpea el suelo debe ser plana y circular con un diámetro de $50.80 \pm 0.13 \text{ mm}$ (2.000 ± 0.005 ") cuando el martillo es nuevo. El martillo deberá ser reemplazado si la cara de impacto se desgasta o se amplía al punto de que el diámetro excede de $50.80 \pm 0.25 \text{ mm}$ (2.000 ± 0.01 ").

3.2.1 Martillo de operación manual – El martillo deberá estar equipado con una manga guía con espacio para que la caída libre del eje y de la cabeza de martillo no se vea restringida. La manga guía deberá tener al menos cuatro agujeros para ventilación en cada extremo (ocho en total), con diámetro no menor de 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ ") espaciados aproximadamente 90 grados (1.57 radianes) y cuyos centros se encuentren localizados a $19 \pm 2 \text{ mm}$ ($\frac{3}{4} \pm 1/16$ ") de cada extremo de la manga.

3.2.2 Martillo con cara circular, de operación mecánica – Debe operar de manera que proporcione a la muestra un cubrimiento uniforme y completo. Deberá quedar una luz libre de $2.5 \pm 0.8 \text{ mm}$ (0.10 ± 0.03 ") entre el martillo y la superficie interior del molde. El martillo deberá disponer de algún medio mecánico que lo soporte mientras no está en operación.

Nota 2: El martillo de operación mecánica con cara de sector circular no se debe usar para compactar los especímenes de ensayo de la norma INV E-611, a menos que se demuestre que los resultados de la prueba de humedecimiento y secado obtenidos sobre muestras compactadas con este martillo son similares a los obtenidos con los especímenes compactados con martillos de cara circular.

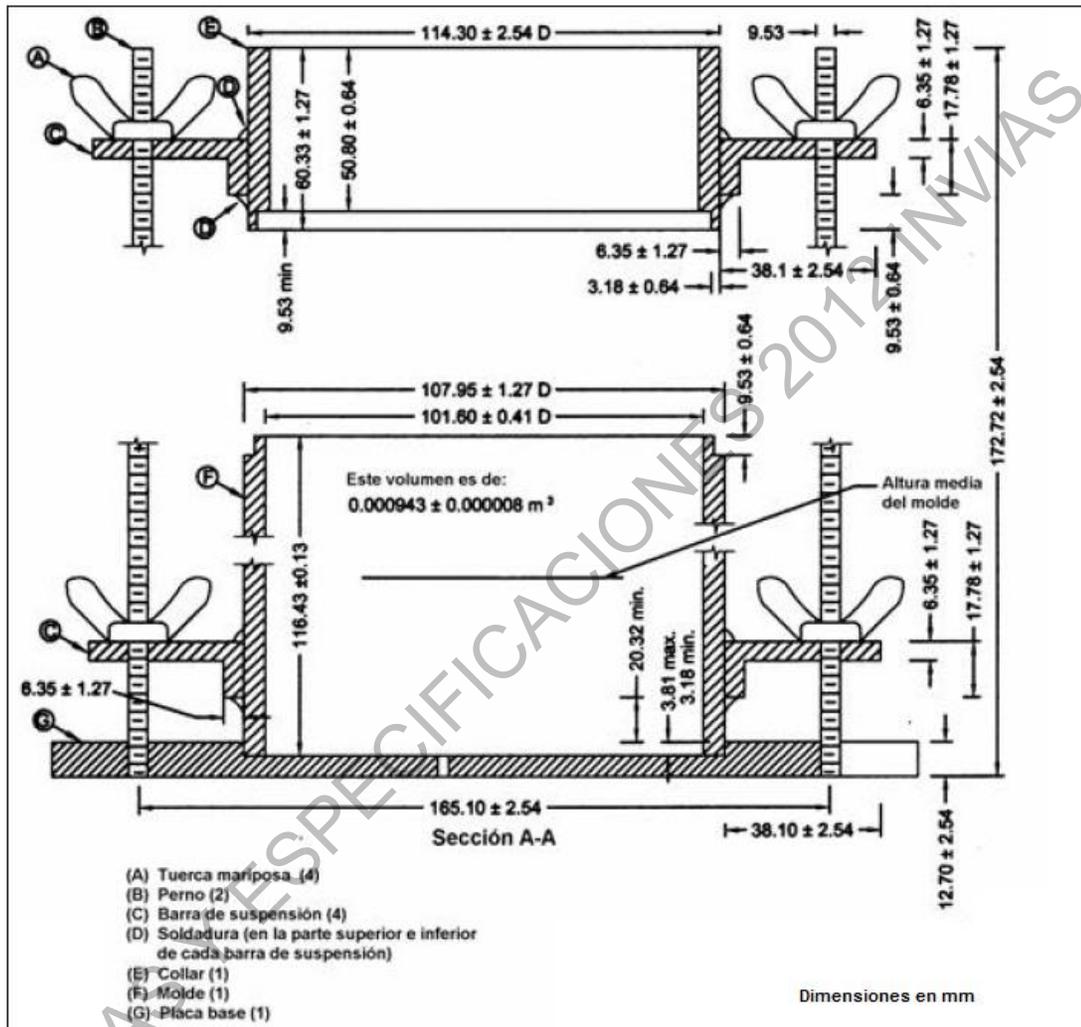


Figura 611 - 1. Molde cilíndrico

3.3 *Extractor de muestras* – Un gato, extractor, u otro dispositivo adecuado para sacar del molde las muestras compactadas. No se necesita si se utilizan moldes de tipo partido.

3.4 *Balanzas y básculas* – Una balanza de capacidad no menor de 11.3 kg (25 lb), con lectura a 5 g (0.01 lb); y una balanza de al menos 1000 g de capacidad, con legibilidad de 0.1 g.

- 3.5** *Horno* – Un horno termostáticamente controlado, preferiblemente de ventilación forzada, que pueda mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- 3.6** *Regla metálica* – Una regla de acero endurecido, al menos de 254 mm (10") de largo. La longitud total deberá ser recta, con una tolerancia de $\pm 0.1 \text{ mm}$ (± 0.005 "). El borde utilizado para enrasar deberá ser biselado si su espesor es mayor de 3 mm (1/8").
- 3.7** *Tamices* – De 75, 19.0 y 4.75 mm (3", 3/4", y No. 4).
- 3.8** *Herramientas para mezcla* – Herramientas varias como bandejas, cucharas, palustres y espátulas, o un dispositivo mecánico para mezclar las muestras de suelo con diferentes cantidades de agua.
- 3.9** *Recipiente* – Un recipiente plano y redondo para la absorción de agua por las mezclas de suelo-cemento, de alrededor de 300 mm (12") de diámetro y 50 mm (2") de profundidad.
- 3.10** *Recipientes para humedad* – Recipientes de un material resistente a la corrosión y al cambio de masa debido al calentamiento repetido, al enfriamiento, a la limpieza y a la exposición a materiales de pH variado. Si no se emplea un desecador, se deberán usar recipientes con tapa para ensayar especímenes con una masa hasta de unos 200 g; mientras que si la masa de los especímenes es mayor, se puede obviar el uso de la tapa.
- 3.11** *Cuchillo de carnicero* – De aproximadamente 250 mm (10") de longitud, para recortar la parte superior de los especímenes.

4 CALIBRACIÓN

- 4.1** Se deben realizar calibraciones antes del uso inicial, luego de reparaciones u otros eventos que puedan afectar los resultados de los ensayos, a intervalos no mayores de 1000 especímenes de ensayo, o anualmente, lo que ocurra primero, para los siguientes aparatos:
- 4.1.1** *Balanza* – Se deberá evaluar de acuerdo con la especificación ASTM D 3740.
- 4.1.2** *Moldes* – El volumen se debe determinar de conformidad con el Anexo A de la norma INV E-141.

- 4.1.3** *Martillo manual* – La distancia de caída libre y la masa del martillo se deben verificar de acuerdo con el numeral 3.2. Se deberán verificar los requisitos de la manga guía, indicados en el numeral 3.2.1.
- 4.1.4** *Martillo mecánico* – Se deberá calibrar y ajustar de acuerdo con la norma ASTM D 2168.

5 MÉTODO A: EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ DE 4.75 mm (No. 4)

5.1 *Muestra:*

- 5.1.1** La muestra para ensayo se prepara disgregando los terrones del suelo para que pase el tamiz de 4.75 mm (No. 4), pero de manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Cuando sea necesario, la muestra se seca primero hasta que sea friable bajo la acción de un palustre. El secado se puede hacer al aire o mediante el empleo de algún aparato secador, siempre y cuando la temperatura de la muestra no exceda de 60° C (140° F).
- 5.1.2** Se escoge una muestra representativa del suelo preparado como se describe en el numeral 5.1.1, con una masa mínima de 2.7 kg (6 lb).

5.2 *Procedimiento:*

- 5.2.1** Se agrega al suelo la cantidad requerida de cemento. Se mezcla completamente hasta lograr un color uniforme.
- 5.2.2** Cuando sea necesario, se agrega suficiente agua potable para humedecer la mezcla hasta aproximadamente cuatro o seis puntos porcentuales por debajo de la humedad óptima y se mezcla completamente. Con este contenido de agua, un suelo plástico, exprimido en la palma de la mano, formará una pasta que se fracturará con una ligera presión aplicada por el pulgar y las yemas de los demás dedos; mientras un suelo no plástico se hinchará sensiblemente.
- 5.2.3** Si el suelo es arcilloso, la mezcla de suelo, cemento y agua se deberá compactar dentro del recipiente plano (numeral 3.9) hasta tener un espesor más o menos de 50 mm (2"), empleando el martillo manual descrito en el numeral 3.2 o uno similar. La mezcla se cubre y se deja reposar por un período de 5 a 10 minutos para que haya dispersión de

la humedad y permitir una absorción más completa por parte del suelo-cemento.

- 5.2.4** Cumplido el período de absorción, se disgrega completamente la mezcla, sin reducir el tamaño natural de las partículas, hasta que pase totalmente por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se vuelve a mezclar.
- 5.2.5** Se forma un espécimen compactando en el molde, con el collar ajustado, la mezcla preparada de suelo-cemento, en tres capas iguales, de manera de obtener un espesor total compacto de alrededor de 130 mm (5"). Cada capa se compacta mediante 25 golpes del martillo, uniformemente distribuidos con una caída libre de 305 mm (12") por encima de la elevación del suelo-cemento si se usa un martillo con manga guía, o de 305 mm (12") por encima de la elevación aproximada de cada capa finalmente compactada si se emplea un martillo del tipo de instalación fija. Los golpes se deberán distribuir uniformemente sobre la superficie de la capa que se está compactando. Durante la compactación, el molde se deberá apoyar firmemente sobre un soporte uniforme, rígido y estable, como el que puede proporcionar un cilindro o un cubo de concreto con una masa no menor de 90 kg (200 lb).
- 5.2.6** Después de la compactación, se remueve el collar de extensión, se enrasa cuidadosamente la parte superior de la probeta con ayuda del cuchillo y la regla metálica, y se determina la masa del molde con la muestra de suelo-cemento compactada, con cuatro cifras significativas.
- 5.2.7** Se extrae la probeta del molde y se corta verticalmente a lo largo de su eje. Se toma una muestra representativa de la altura completa de una de las caras cortadas, cuya masa no sea menor de 100 g (0.2 lb). Inmediatamente se determina y anota la masa del material húmedo más el recipiente que lo contiene, con cuatro cifras significativas. Se seca en el horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) por un mínimo de 12 horas o hasta masa constante. Se determina y anota la masa del material seco más el recipiente, con cuatro cifras significativas. Se calcula la humedad y se anota el resultado como la humedad de la probeta de suelo-cemento.
- 5.2.8** Se disgrega completamente la parte remanente del espécimen moldeado hasta que, a simple vista, se considere que el material pasa en su totalidad por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se integra con el

material sobrante luego de obtener la muestra para determinar la humedad.

- 5.2.9** Se agrega agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad de la mezcla de suelo-cemento en uno o dos puntos porcentuales, se mezcla y se repite el procedimiento mencionado en los numerales 5.2.5 a 5.2.8 para cada incremento de agua.
- 5.2.10** Se continúa esta serie de determinaciones hasta que se produzca una disminución o no haya cambio en la masa del suelo-cemento compactado más el molde.

Nota 3: En la mayoría de los casos, este procedimiento ha resultado satisfactorio. Sin embargo, en casos en los cuales el material es de carácter frágil y el tamaño de las partículas se reduce significativamente debido a la compactación repetida, se deberán emplear muestras nuevas para cada determinación de humedad y densidad (peso unitario).

Nota 4: Para minimizar el efecto de la hidratación del cemento, el ensayo se debe realizar de manera rápida y continua hasta su finalización.

6 MÉTODO B: EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA TAMIZ DE 19.0 mm (¾")

6.1 Muestra:

- 6.1.1** La muestra para el ensayo se prepara separando el agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y disgregando los terrones del suelo para que pase el tamiz de 4.75 mm (No. 4), pero de manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Cuando sea necesario, la muestra se seca primero hasta que sea friable bajo la acción de un palustre. El secado se puede hacer al aire o mediante el empleo de algún aparato secador, siempre y cuando la temperatura de la muestra no exceda de 60° C (140° F).
- 6.1.2** Se pasa el suelo preparado por los tamices de 75 mm (3"), 19.0 mm (¾"), y 4.75 mm (No. 4) y se descarta el material retenido en el tamiz de 75 mm (3"). Se determina el porcentaje de material, por masa seca al horno, retenido en los tamices de 19.0 mm (¾") y de 4.75 mm (No. 4).
- 6.1.3** Se satura el agregado que pasa por el tamiz de 19.0 mm (¾") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), empapándolo en agua potable; luego se seca superficialmente para el ensayo posterior.

Nota 5: La mayoría de especificaciones de construcción de suelo-cemento que incluyen la granulometría del suelo, limitan el tamaño máximo del material a 75 mm (3"), o menos.

6.1.4 Se escogen y se mantienen separadamente, muestras representativas del suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y del agregado saturado con superficie seca que pasa el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), de manera que la muestra total tenga una masa aproximada de 5 kg (11 lb) o más. El porcentaje, en masa secada al horno, del agregado que pasa tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), deberá ser igual al porcentaje que pasa tamiz de 75 mm (3") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4) de la muestra original.

6.2 Procedimiento:

6.2.1 Se agrega a la porción de la muestra de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la cantidad requerida de cemento para la mezcla total especificada en el numeral 6.1.4. Se mezcla completamente hasta obtener un color uniforme.

6.2.2 Cuando sea necesario, se agrega agua a esta mezcla de suelo-cemento y se facilita la dispersión de la humedad como se describe para el Método A en los numerales 5.2.2 a 5.2.4. Después de esta preparación, se adiciona el agregado saturado con superficie seca a la mezcla de suelo-cemento que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se mezcla completamente.

6.2.3 Se forma un espécimen, compactando la mezcla preparada de suelo-cemento dentro del molde con el collar colocado; se enrasa y se determina la masa del espécimen compactado como se describe en los numerales 5.2.5 y 5.2.6 para el Método A. Durante la operación de recorte y enrase se deben remover todas las partículas que sobresalgan por encima del nivel superior del molde. Se corrigen todas las irregularidades en la superficie, apisonando a mano material fino dentro de dichas irregularidades y nivelando nuevamente el espécimen con la regla metálica. Se determina la masa del molde con la muestra, con cuatro cifras significativas.

6.2.4 Se remueve el material del molde y se toma una muestra para determinar la humedad, como se describe en el numeral 5.2.7 para el Método A, excepto que la muestra no deberá tener una masa menor de 500 g (1.1 lb). Se anota el resultado como la humedad, w , de la mezcla de suelo-cemento compactado.

- 6.2.5** Se desmenuza completamente el resto del material como antes, hasta que a simple vista se considere que pasa el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que por lo menos el 90% de las partículas menores de 4.75 mm (No. 4) pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4), y se agrega todo el material sobrante después de obtener la humedad de la muestra.
- 6.2.6** Se adiciona el agua necesaria para aumentar la humedad de la mezcla de suelo–cemento en uno o dos puntos porcentuales, se mezcla y se repite el procedimiento descrito en los numerales 6.2.3 a 6.2.5 para cada incremento de agua. Se continúa esta serie de determinaciones hasta que se produzca una disminución o no haya cambio en la masa del suelo–cemento compactado más el molde (notas 4 y 5).

7 CÁLCULOS

- 7.1** Se calcula el volumen de cada molde usado para compactar la mezcla de suelo–cemento, con cuatro cifras significativas, de acuerdo con el procedimiento descrito en el Anexo A de la norma INV E–141.
- 7.2** Se calcula la humedad de las mezclas de suelo–cemento empleadas en todos los tanteos, w , redondeada a 0.1 %, empleando el procedimiento de la norma INV E–122.
- 7.3** Se calcula la densidad húmeda, redondeada a 1 kg/m^3 (0.1 lb/pie^3), de cada uno de los especímenes compactados de suelo–cemento, de la siguiente forma:

$$\rho_m = \frac{M_m - M_{md}}{V} \quad [611.1]$$

Donde: ρ_m : Densidad húmeda del espécimen de suelo–cemento compactado, kg/m^3 (lb/pie^3);

M_m : Masa del molde con el espécimen húmedo compactado, kg (lb);

M_{md} : Masa del molde de compactación, kg (lb);

V : Volumen del molde de compactación, m^3 (pie^3);

- 7.4 Se calcula la densidad seca, redondeada a 1 kg/m³ (0.1 lb/pie³), de cada uno de los especímenes compactados de suelo-cemento, de la siguiente forma:

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{\left[1 + \frac{w}{100}\right]} \quad [611.2]$$

- Donde: ρ_d : Densidad seca del espécimen de suelo-cemento compactado, kg/m³ (lb/pie³);
- ρ_m : Densidad húmeda del espécimen de suelo-cemento compactado, kg/m³ (lb/pie³);
- w: Humedad del espécimen de suelo-cemento compactado, %.

- 7.5 Se calcula el peso unitario seco, redondeado a 1 kgf/m³ (0.1 lbf/pie³), de cada uno de los especímenes compactados de suelo-cemento, de la siguiente forma:

$$\gamma_d = \frac{\rho_d \times g}{g_c} \quad (\text{Sistema Inglés}) \quad [611.3]$$

O

$$\gamma_d = \rho_d \times g \quad (\text{Sistema Internacional}) \quad [611.4]$$

- Donde: γ_d : Peso unitario seco del espécimen de suelo-cemento compactado, kgf/m³ (lbf/pie³);
- g: Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s² (32.2 pie/s²);
- g_c : Constante gravitacional, 32.2 pie-lb/lbf-s².

8 RELACIONES DE HUMEDAD- DENSIDAD (PESO UNITARIO)

- 8.1 Los valores de humedad y de peso unitario seco calculados en la Sección 7 para cada uno de los especímenes compactados de suelo-cemento se representan gráficamente en un gráfico aritmético. El peso unitario se representa con aproximación a 1 kgf/m³ (0.1 lbf/pie³) en las ordenadas, y las

humedades correspondientes en las abscisas, aproximadas a 0.1 %. Se dibuja una curva de compactación suave a través de los puntos.

Nota 6: La experiencia demuestra que es muy importante usar escalas consistentes para dibujar estas curvas. Una aproximación satisfactoria consiste en usar en las ordenadas una escala de 1" = 5 lbf/pie³ de peso unitario y en las abscisas 1" = 2 % de humedad

- 8.2** *Humedad óptima, w_o* – La humedad correspondiente al pico de la curva dibujada como se indica en el numeral 8.1 se denomina "humedad óptima" de la mezcla de suelo-cemento, bajo la compactación prescrita en estos métodos.
- 8.3** *Peso unitario seco máximo, $\gamma_{dm\acute{a}x}$* – El peso unitario seco, en kgf/m³ (lbf/pie³) de la mezcla de suelo-cemento, correspondiente al contenido óptimo de humedad, se llamará peso unitario seco máximo, bajo la compactación prescrita en este método.

9 INFORME

- 9.1** El informe debe incluir lo siguiente:
- 9.1.1** Identificación de la muestra.
 - 9.1.2** Procedimiento usado (Método A o B).
 - 9.1.3** La curva de compactación.
 - 9.1.4** El contenido óptimo de humedad.
 - 9.1.5** El máximo peso unitario seco.

10 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 558 – 11

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO–CEMENTO

INV E – 612 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma de ensayo cubre procedimientos para determinar las pérdidas, los cambios de humedad y los cambios de volumen (expansión y contracción) producidos por el humedecimiento y secado repetido de especímenes endurecidos de suelo–cimento. Los especímenes se compactan en un molde, antes de la hidratación del cemento, hasta la densidad máxima con el contenido óptimo de humedad, empleando los procedimientos de compactación descritos en la norma INV E–611.
- 1.2** Para la preparación del material para moldear los especímenes, se contemplan dos métodos según la granulometría del suelo, aplicando los mismos criterios de los métodos A y B de la norma INV E–611.
- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INV E–807–07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** Estos métodos de ensayo se emplean para determinar la resistencia que presentan unos especímenes compactados de suelo–cimento a ciclos de humedecimiento y secado. Sus resultados se suelen emplear en conjunto con los obtenidos con la aplicación de la norma INV E–614, para determinar el contenido mínimo de cemento requerido para obtener una mezcla de suelo–cimento de fuerza adecuada para soportar el intemperismo en servicio.

3 EQUIPO

- 3.1** Para el ensayo descrito en esta norma se emplea el mismo equipo requerido para preparar y compactar las mezclas de suelo–cimento, según se describe en la norma INV E–611. Adicionalmente, se necesitan los siguientes elementos:

- 3.2** *Horno* – Termostáticamente controlado que pueda mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) para la determinación de la humedad de los especímenes, y una temperatura de $71 \pm 3^\circ \text{C}$ ($160 \pm 5^\circ \text{F}$) para secar los especímenes compactados de suelo-cemento.
- 3.3** *Cámara húmeda* – Una cámara húmeda o un recipiente cubierto que pueda mantener una temperatura de $21 \pm 1.7^\circ \text{C}$ ($70 \pm 3^\circ \text{F}$) con una humedad relativa del 100 % para 7 días de almacenamiento de los especímenes compactados.
- 3.4** *Baño de agua* – De tamaño adecuado para sumergir los especímenes compactados en el agua a la temperatura ambiente.
- 3.5** *Cepillo de cerdas de alambre* – Un cepillo de cerdas de alambre calibre 26 de $50.8 \times 1.6 \text{ mm}$ ($2'' \times 1/16''$) compuesto por 50 grupos de 10 cerdas cada uno, montados de manera que formen 5 filas longitudinales y 10 filas transversales de cerdas sobre un bloque de madera dura de $190 \times 63.5 \text{ mm}$ ($7\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2}''$).
- 3.6** *Escarificador* – Un punzón de 6 dientes para romper hielo o un aparato similar, para remover el plano de compactación de la primera y segunda capa del espécimen.
- 3.7** *Dispositivo de medida* – Un dispositivo adecuado para la medida precisa de las alturas y diámetros de los especímenes de ensayo con aproximación de 0.20 mm ($0.01''$).
- 3.8** *Bandejas y soportes* – Adecuados para el manejo de materiales.
- 3.9** *Una probeta de vidrio* – Con 250 ml de capacidad para medir agua.

4 CALIBRACIÓN

- 4.1** Aplica lo que se describe en la Sección 4 de la norma INV E – 611.

5 MÉTODO A: EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ DE 4.75 mm (No. 4)

- 5.1** *Preparación del material para el moldeo de especímenes:*

5.1.1 La muestra de suelo se debe preparar de acuerdo con el procedimiento descrito para el Método A en la Sección 5 de la norma de ensayo INV E – 611.

5.1.2 Se escoge una cantidad suficiente del suelo preparado según el numeral 5.1.1, para obtener dos especímenes compactados (nota 1) y las muestras requeridas para determinar la humedad.

Nota 1 (Opcional): Usualmente, sólo se necesita un espécimen (identificado con el No. 2) para ensayos de rutina. El otro espécimen (identificado con el No. 1) se emplea para investigaciones y ensayos auxiliares.

5.1.3 Se agrega al suelo la cantidad requerida de cemento y se mezclan completamente hasta que se obtenga un color uniforme.

5.1.4 Se agrega suficiente agua potable para llevar la mezcla a su contenido óptimo de humedad en el momento de la compactación, y se mezcla completamente. Cuando el suelo que se emplea sea de textura arcillosa pesada (grasa), la mezcla de suelo, cemento y agua se compacta en el recipiente plano hasta tener un espesor de alrededor de 50 mm (2"), empleando el martillo descrito en el numeral 3.2 de la norma INV E-611 o un martillo similar de manejo manual; se cubre y deja en reposo entre 5 y 10 minutos para que haya dispersión de la humedad y permitir una absorción más completa por parte del suelo-cemento.

5.1.5 Después del período de absorción, se disgrega la mezcla completamente, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales hasta cuando, a simple vista, se considere que pasa por el tamiz 4.75 mm (No. 4), y se vuelve a mezclar.

5.2 Moldeo de especímenes:

5.2.1 Se forma un espécimen, compactando inmediatamente la mezcla de suelo-cemento en el molde (con el collar ajustado) y enrasando la superficie del espécimen de acuerdo con el Método A de la norma INV E-611; adicionalmente, se escarifica la parte superior de la primera y de la segunda capa para romper planos lisos de compactación, antes de colocar y compactar las capas subsiguientes. Esta escarificación deberá formar ranuras en ángulos rectos, de aproximadamente 3.2 mm (1/8") de ancho, 3.2 mm (1/8") de profundidad y a separaciones de 6.4 mm (1/4").

- 5.2.2** Durante la compactación, se toma una muestra representativa de la mezcla de suelo-cemento, que tenga una masa mínima de 100 g. Se determina y anota esta masa. Inmediatamente se seca esta muestra en el horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) por lo menos durante 12 horas, o hasta masa constante. Se determina y anota su masa luego del secado, con cuatro cifras significativas. El contenido de agua se calcula como se indica en la norma INV E-122, y se compara con la humedad óptima de diseño (nota 6).
- 5.2.3** Se determina y anota la masa del espécimen compactado y el molde con cuatro cifras significativas. A continuación, se extrae el espécimen del molde y se calcula su peso unitario seco en kgf/m^3 (lbf/pe^3) como se describe en la norma INV E-611, y se compara con el peso unitario máximo de diseño (nota 6).
- 5.2.3.1** Si el peso unitario seco obtenido se encuentra dentro de las tolerancias especificadas en el diseño, se identifica el espécimen con un membrete metálico (u otro dispositivo adecuado) como No. 1, juntamente con otras marcas de identificación necesarias, y se empleará para obtener datos sobre cambios de humedad y de volumen durante el ensayo.
- 5.2.3.2** Si el peso unitario seco obtenido no se encuentra dentro de las tolerancias especificadas en el diseño, se deberá compactar otro espécimen.
- 5.2.4** Se forma un segundo espécimen tan rápidamente como sea posible, y se determinan el porcentaje de humedad y el peso unitario seco como se describió en los numerales 5.2.1 a 5.2.3. Se identifica este espécimen como el No. 2, junto con otras marcas de identificación necesarias y se emplea para obtener datos sobre las pérdidas del suelo-cemento durante el ensayo.
- 5.2.5** Se determinan el diámetro y la altura promedio del espécimen No. 1 y se calcula su volumen.
- 5.2.6** Se colocan los especímenes en dispositivos adecuados en la cámara húmeda y se protegen del agua libre durante un período de 7 días.
- 5.2.7** Se determina la masa y se mide el espécimen No. 1 al final del almacenamiento de 7 días, para obtener datos para el cálculo de su contenido de humedad y de su volumen.

Nota 2: Es importante que todas las medidas de altura y diámetro se hagan con exactitud de 0.2 mm (0.01") y que se tomen en los mismos puntos sobre el espécimen todas las veces.

5.3 Procedimiento:

- 5.3.1** Al final del período de almacenamiento en la cámara húmeda, se sumergen los especímenes en agua potable a temperatura ambiente durante 5 horas. Se retiran del baño de agua y se determinan y anotan la masa y las medidas del espécimen No. 1 (cambio de volumen y humedad del espécimen).
- 5.3.2** Se colocan ambos especímenes en un horno a $71 \pm 3^\circ \text{C}$ ($160 \pm 5^\circ \text{F}$) durante 42 horas y luego se sacan de él. Se determinan y anotan la masa y las medidas del espécimen No. 1.
- 5.3.3** Se dan dos pasadas firmes al espécimen No.2 (especímen para la pérdida de suelo-cemento) sobre toda su área, empleando el cepillo de cerdas de alambre. El cepillo se deberá mantener con su eje longitudinal paralelo al eje longitudinal del espécimen o paralelo a los bordes, como sea necesario, para cubrir toda su superficie (Figura 612 - 1). Se aplican esas pasadas a la altura y ancho totales del espécimen con un golpe firme que corresponda aproximadamente a 13.3 N (3 lbf) (nota 3). Se requieren de 18 a 20 pasadas verticales con el cepillo para cubrir dos veces los lados del espécimen y cuatro pasadas sobre cada extremo.

Nota 3: Esta presión se mide de la siguiente forma: Se coloca el espécimen en la posición vertical sobre el borde de una balanza de plataforma y se pone la escala en cero. Se aplican los golpes de cepillado verticales al espécimen y se establece la fuerza necesaria para que la escala registre aproximadamente 13.3 N (3 lbf).



Figura 612 - 1. Cepillado del espécimen

- 5.3.4** Los procedimientos descritos en los numerales 5.3.1 a 5.3.3 constituyen un ciclo (48 horas) de humedecimiento y secado. Se sumerge de nuevo el espécimen en agua y se continúa el procedimiento hasta completar 12 ciclos.

Nota 4: Cuando se efectúan investigaciones o estudios especiales, las determinaciones de la masa del espécimen No. 2 antes y después del cepillado se hace generalmente al final de cada ciclo.

- 5.3.5** El espécimen No.1 se podrá discontinuar antes de los 12 ciclos, si las medidas se llegan a hacer imprecisas debido a las pérdidas de suelo-cemento del espécimen.

Nota 5: Si no es posible correr ciclos continuamente a causa de domingos, feriados o por cualquier otra razón, se mantiene el espécimen en el horno durante el tiempo de receso, si es posible.

- 5.3.6** Cumplidos los 12 ciclos de ensayo, se secan los especímenes hasta masa constante a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) y se pesan para hallar su masa secada al horno.

- 5.3.7** Los datos obtenidos permitirán calcular los cambios de volumen y de humedad del espécimen No. 1, así como las pérdidas de suelo-cemento del espécimen No. 2 después de los 12 ciclos de ensayo.

6 MÉTODO B: EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ DE 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ")

6.1 Preparación del material para el moldeo de especímenes:

- 6.1.1** Se prepara la muestra de suelo, de acuerdo con el Método B de la norma INV E-611.

- 6.1.2** Se escogen y mantienen separadamente muestras representativas del suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y del agregado saturado con superficie seca que pasa el tamiz de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") y queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), de manera que la muestra total sea suficiente para proporcionar dos especímenes compactados (nota 1) más las muestras requeridas para la determinación de la humedad. El porcentaje, en masa seca al horno, del agregado que pasa el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), deberá ser igual al porcentaje que pasa el tamiz de 75 mm (3") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4) en la muestra original.

- 6.1.3** Se agrega a la porción de muestra que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la cantidad de cemento requerida, para la muestra total especificada en el numeral 6.1.2. Se mezclan completamente el cemento y el suelo hasta obtener un color uniforme.
- 6.1.4** Se agrega a la porción de muestra que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), agua suficiente para llevar la mezcla total de suelo-cemento hasta su contenido óptimo de humedad en el momento de la compactación y facilitar la dispersión de la humedad como se describe para el Método A, en los numerales 5.1.4 y 5.1.5.
- 6.1.5** Después de preparada la mezcla como se describe en los numerales 6.1.1 a 6.1.4, se agrega a la mezcla el agregado grueso saturado con superficie seca, y se mezcla completamente.
- 6.2** *Moldeo de especímenes:*
- 6.2.1** Se forma un espécimen, compactando inmediatamente la mezcla de suelo-cemento en el molde (con el collar ajustado) y enrasando la superficie del espécimen de acuerdo con el Método B de la norma INV E-611; adicionalmente, a medida que se coloca cada capa en el molde se remueve el material empleando un cuchillo de carnicero antes de compactarlo, con el fin de obtener una distribución uniforme del material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y, también, para escarificar la parte superior de la primera y de la segunda capa como se describe en el numeral 5.2.1 para el Método A.
- 6.2.2** Durante la compactación, se toma de la mezcla una muestra representativa de suelo-cemento con una masa no menor de 500 g. Se determina la masa inmediatamente, y se seca en un horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) por un mínimo de 12 horas o hasta masa constante, para determinar la humedad de ensayo y compararla con la humedad de diseño.
- 6.2.3** Tan rápidamente como sea posible, se elabora un segundo espécimen de la misma manera que el primero.
- 6.2.4** Se determina y anota la masa de cada espécimen compactado para compararla con la densidad de diseño. Se identifica y mide el espécimen No. 1 (nota 1), se colocan en la cámara húmeda y se protegen del agua libre durante un período de 7 días.

6.2.5 Se determina la masa y se mide el espécimen No. 1 al final del almacenamiento de 7 días, para obtener datos para el cálculo de su contenido de humedad y su volumen (nota 2).

6.3 *Procedimiento:*

6.3.1 Se procede como se indica en el numeral 5.3 para el Método A.

7 CÁLCULOS

7.1 Se calculan los cambios de volumen y humedad y las pérdidas de los especímenes de suelo-cemento, en la siguiente forma:

7.1.1 Se calcula la diferencia entre el volumen del espécimen No. 1 en el momento del moldeo y los volúmenes subsiguientes, como un porcentaje del volumen original.

7.1.2 Se calcula el contenido de humedad del espécimen No. 1 en el momento del moldeo y los subsiguientes contenidos de humedad, como un porcentaje de la masa seca al horno del espécimen original.

7.1.3 Se corrige la masa seca al horno del espécimen No. 2, obtenida en el numeral 5.3.6, debido al agua que ha reaccionado con el cemento y el suelo durante el ensayo y que es retenida en el espécimen a 110° C (230° F), así:

$$\text{Masa seca al horno final corregida} = \frac{A}{100 + B} \times 100 \quad [612.1]$$

Donde: A: Masa seca al horno luego del secado final a 110° C (230° F), g;

B: Porcentaje de agua retenida en el espécimen, %.

7.1.3.1 El porcentaje de agua retenida en el espécimen No. 2 después del secado a 110° C para emplear en la fórmula del numeral 7.1.3 se puede suponer igual al agua retenida en el espécimen No. 1. Cuando no se moldean los especímenes No. 1, no se dispone de este dato y se emplearán los valores promedios prescritos en la Tabla 612 - 1.

Tabla 612 - 1. Valores promedio de agua retenida

CLASIFICACIÓN AASHTO DEL SUELO QUE SE ESTÁ ESTABILIZANDO	PROMEDIO DE AGUA RETENIDA DESPUÉS DE SECADO A 110° C, %
A -1, A-3	1.5
A-2	2.5
A-4, A-5	3.0
A -6, A -7	3.5

7.1.4 Se calcula la pérdida de suelo-cemento del espécimen No. 2, como un porcentaje de la masa original seca al horno del espécimen, así:

$$\text{Pérdidas, \%} = \frac{X}{Y} \times 100 \quad [612.2]$$

Donde: X: Masa original seca al horno calculada, menos masa seca al horno final corregida, g;

Y: Masa original seca al horno calculada, g.

8 INFORME

8.1 El informe debe incluir:

8.1.1 Identificación de la muestra ensayada.

8.1.2 Procedimiento de ensayo empleado (Método A o Método B).

8.1.3 Humedad óptima y densidad máxima de diseño.

8.1.4 Humedad y densidad logradas en los especímenes moldeados.

Nota 6: A menos que se especifique algo diferente, la práctica normal de laboratorio permite siguiente la tolerancia entre los factores de diseño y los obtenidos en especímenes moldeados:

Humedad: ± 1 %

Peso unitario seco: ± 48 kgf/m³ (3 lbf/pie³)

8.1.5 El contenido de cemento de diseño, en porcentaje, de los especímenes moldeados.

8.1.6 El máximo cambio de volumen, en porcentaje, y el contenido máximo de humedad durante el ensayo, del espécimen No. 1.

8.1.7 La pérdida del suelo-cemento, en porcentaje, del espécimen No. 2.

9 PRECISIÓN Y SESGO

9.1 *Precisión* – La información existente para juzgar la variabilidad de los resultados de estos métodos de ensayo es limitada. Los datos se presentan en la Tabla 612 - 2.

9.1.1 La experiencia indica que las variaciones en los resultados del ensayo son mayores cuando se producen mayores pérdidas de masa. El grado de variación de mayor interés es el relacionado con el criterio de pérdida de masa admisible. Información sobre el tema se encuentra en el *“Soil-cement laboratory handbook”*, de la *Portland Cement Association*.

Tabla 612 - 2. Pérdidas de masa de especímenes duplicados en el ensayo de humedecimiento y secado

SUELO No.	CLASIFICACIÓN AASHTO	CONTENIDO DE CEMENTO, %	PÉRDIDAS DE LOS ESPECÍMENES DUPLICADOS
8939	A-1-b (0)	2	17, 19
		3	6, 0
		5	5, 1
8295	A-4 (5)	3	9, 11
		5	6, 2
		7	0, 0
		10	0, 2
8942	A-6 (10)	3	20, 25
		5	6, 7
		7	1, 1
		10	0, 0
9069	A-4 (8)	4	12, 12
		6	7, 6
		8	3, 3
		10	2, 2

- 9.2** *Sesgo* – Debido a que no existe un material de referencia aceptado, que resulte adecuado para determinar el sesgo para el procedimiento de la determinación de las pérdidas de masa de las mezclas de suelo-cemento, no se hace ninguna declaración en relación con el sesgo.

10 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 559 – 03 (retirada por la ASTM en 2012)

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

PREPARACIÓN Y CURADO DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN EL LABORATORIO

INV E – 613 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma cubre el procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo-cemento, utilizadas en pruebas de compresión y flexión, bajo un control exacto de las cantidades de materiales y de las condiciones de ensayo.
- 1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E-808-07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1 Esta norma aplica para la preparación de probetas de suelo-cemento para ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión que se realizan de acuerdo con el Método B de la norma INV E-614 y con las normas INV E-615 e INV E-616.
- 2.2 Esta norma de ensayo no aplica para probetas de suelo-cemento preparadas en los moldes de compactación usuales de 101.6 mm (4") de diámetro y 116.4 mm (4.584") de altura. Para la preparación de las probetas de este tamaño, requeridas para las pruebas de compresión con el Método A de la norma INV E-614, se deberá aplicar la norma INV E-612.

3 EQUIPO

- 3.1 *Moldes para probetas de prueba de compresión (Figura 613 - 1)* – El molde para preparación de la probeta de suelo-cemento debe tener un diámetro interior de 71 ± 0.25 mm (2.8 ± 0.01 ") y una altura de 229 mm (9"), para moldear especímenes de 71 mm (2.8") de diámetro y 142 mm (5.6") de altura. Los accesorios del molde son los siguientes: dos pistones (superior e inferior), de acero maquinado, de diámetro menor en 0.13 mm (0.005") que el del molde; una extensión del molde de 152 mm (6") de longitud; un anillo espaciador y, al menos, dos discos separadores de aluminio, de 1.54 mm (1/16") de espesor y 70.6 (2.78") de diámetro.

Nota 1: Resultan satisfactorios los moldes hechos mediante templado en frío, de tubería de acero sin costura con una dureza de Rockwell de aproximadamente 85 HRB o de tubería de acero torneada en el interior. Las probetas de 71 × 142 mm (2.8 × 5.6") ajustan bien con muchas máquinas para compresión triaxial en servicio y, por lo tanto, se pueden usar tanto para el triaxial como para pruebas de compresión simple.

- 3.2** *Moldes para probetas de prueba de flexión (Figuras 613 - 2 y 613 - 3) – Las dimensiones interiores de los moldes deben ser 76.2 × 76.2 × 285.8 mm (3 × 3 × 11¼") para moldear probetas del mismo tamaño. Los moldes deben estar diseñados para que la probeta sea moldeada con su eje longitudinal en una posición horizontal. Las partes de los moldes deberán estar encajadas, ajustadas y sostenidas adecuadamente. Los lados de los moldes deberán ser suficientemente rígidos para prevenir alabeo y ampliaciones. Las caras interiores de los moldes deberán ser superficies planas con una variación permisible de 0.051 mm (0.002"), por cada 76.2 mm (3") de cualquier línea sobre una superficie para moldes nuevos, y de 0.076 mm (0.003") para moldes usados. La distancia entre los lados opuestos deberá ser 76.20 ± 0.25 mm (3 ± 0.01") para moldes nuevos, y 76.20 ± 0.38 mm (3 ± 0.015") para moldes en el uso. La altura de los moldes deberá ser 76.20 mm (3"), con variaciones permisibles de – 0.25 mm (– 0.01") y + 0.13 mm (+0.005") tanto para moldes nuevos como usados. Se debe contar con cuatro barras espaciadoras de 9.52 mm (3/8") y placas superior y de base, de acero maquinado. Las placas deben encajar en el molde con un espacio libre de 0.13 mm (0.005") por todos los lados.*

Nota 2: Los moldes deben ser hechos de metal con una dureza no menor de 85 HRB.

- 3.3** *Tamices – Se requieren tamices de: 50 mm (2"), 19.0 mm (¾"), 4.75 mm (No. 4) y 1.18 mm (No. 16).*
- 3.4** *Balanzas – Una balanza de 12 kg (25 lb) de capacidad, con una sensibilidad de 0.0045 kg (0.01 lb) y una balanza de 1000 g de capacidad con posibilidad de lectura de 0.1 g.*
- 3.5** *Horno – De control termostático, capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5° C (230 ± 9° F), para secar la humedad de las muestras.*
- 3.6** *Aparato para ensayo de compresión o marco de compresión – Una máquina de compresión o un marco de compresión con capacidad suficiente para aplicar 270 kN (60 000 lbf) para compactar las probetas para la prueba de flexión, y de uso opcional en la compactación de la probetas para el ensayo de compresión.*
- 3.7** *Máquina de compactación por impacto – Un dispositivo de impacto controlado, de 6.8 kg (15 lb), para golpear el pistón superior, de uso opcional*

en la compactación de las probetas para el ensayo de compresión. (Figuras 613 - 4 y 613 - 5). Cuando se utilice este equipo, el pistón superior mencionado en el numeral 3.1 hace las veces de pata del dispositivo compactador.

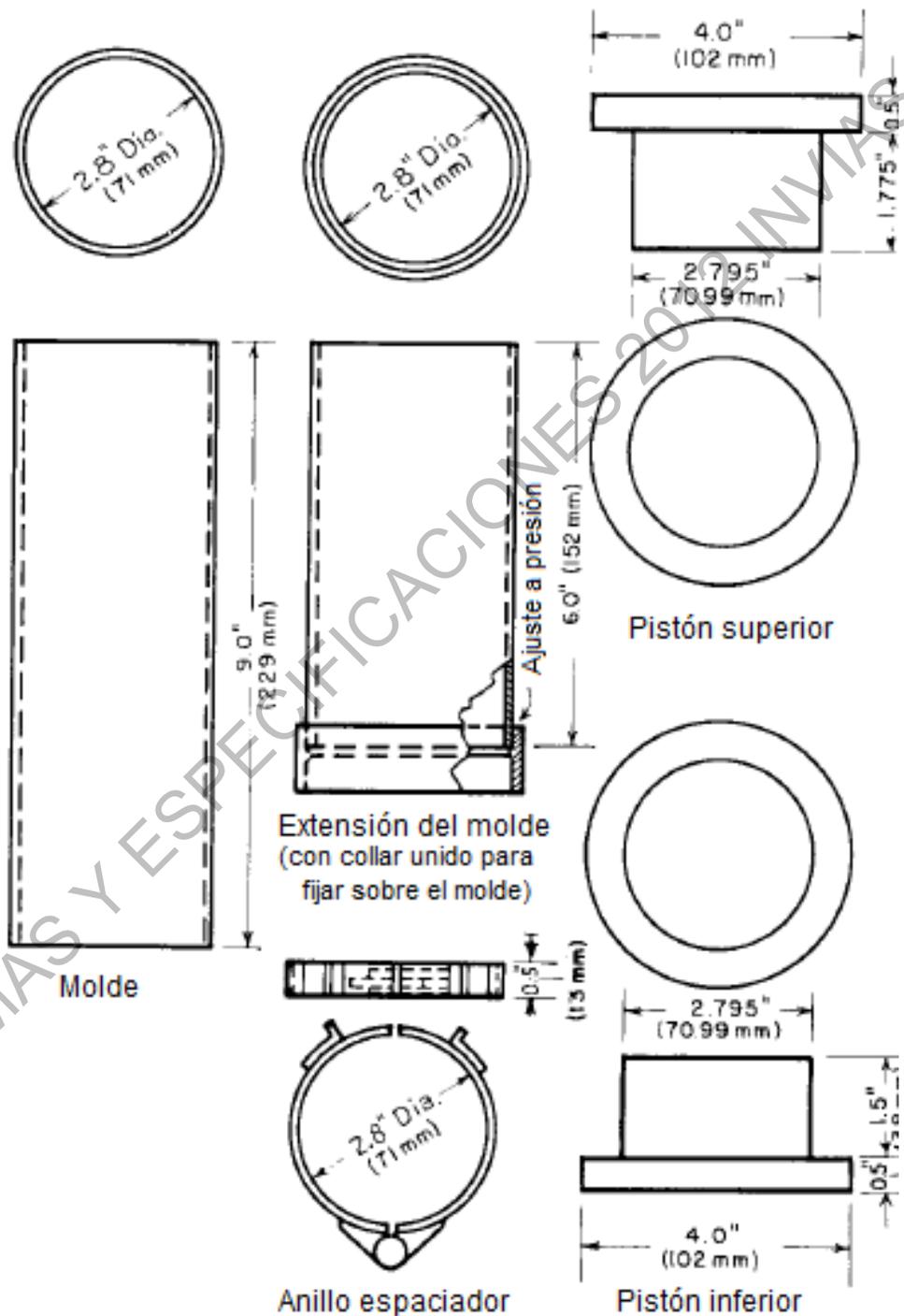


Figura 613 - 1. Molde para probetas cilíndricas de suelo - cemento

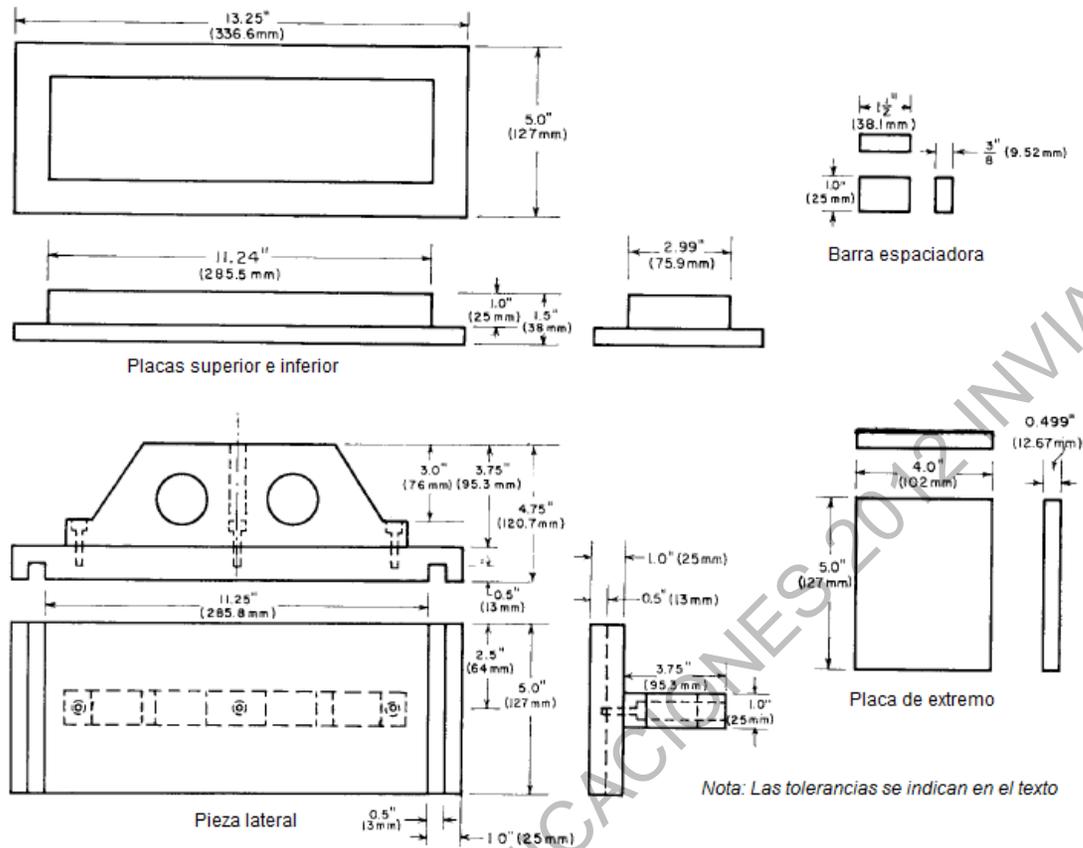


Figura 613 - 2. Moldes para vigas de suelo-cemento para el ensayo de flexión

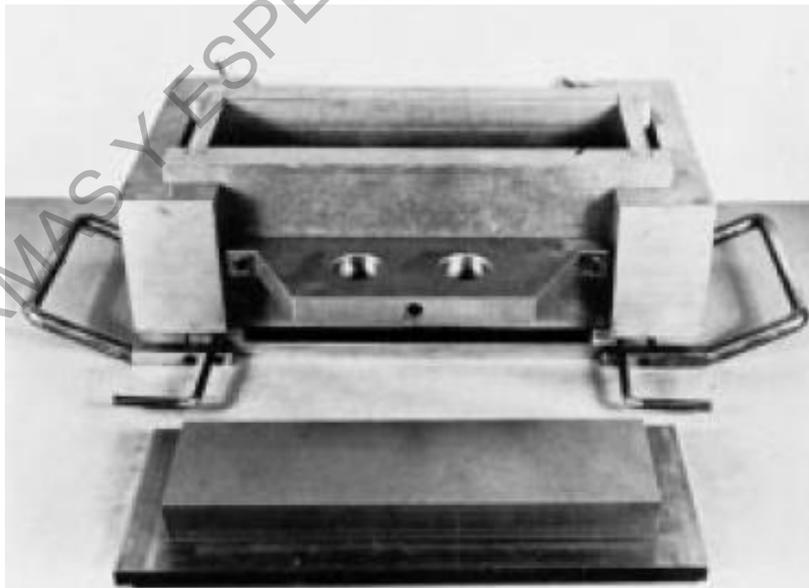


Figura 613 - 3. Molde y placa superior de acero para elaborar vigas de 76.2 × 76.2 × 285.8 mm (3 × 3 × 11¼") para el ensayo de flexión

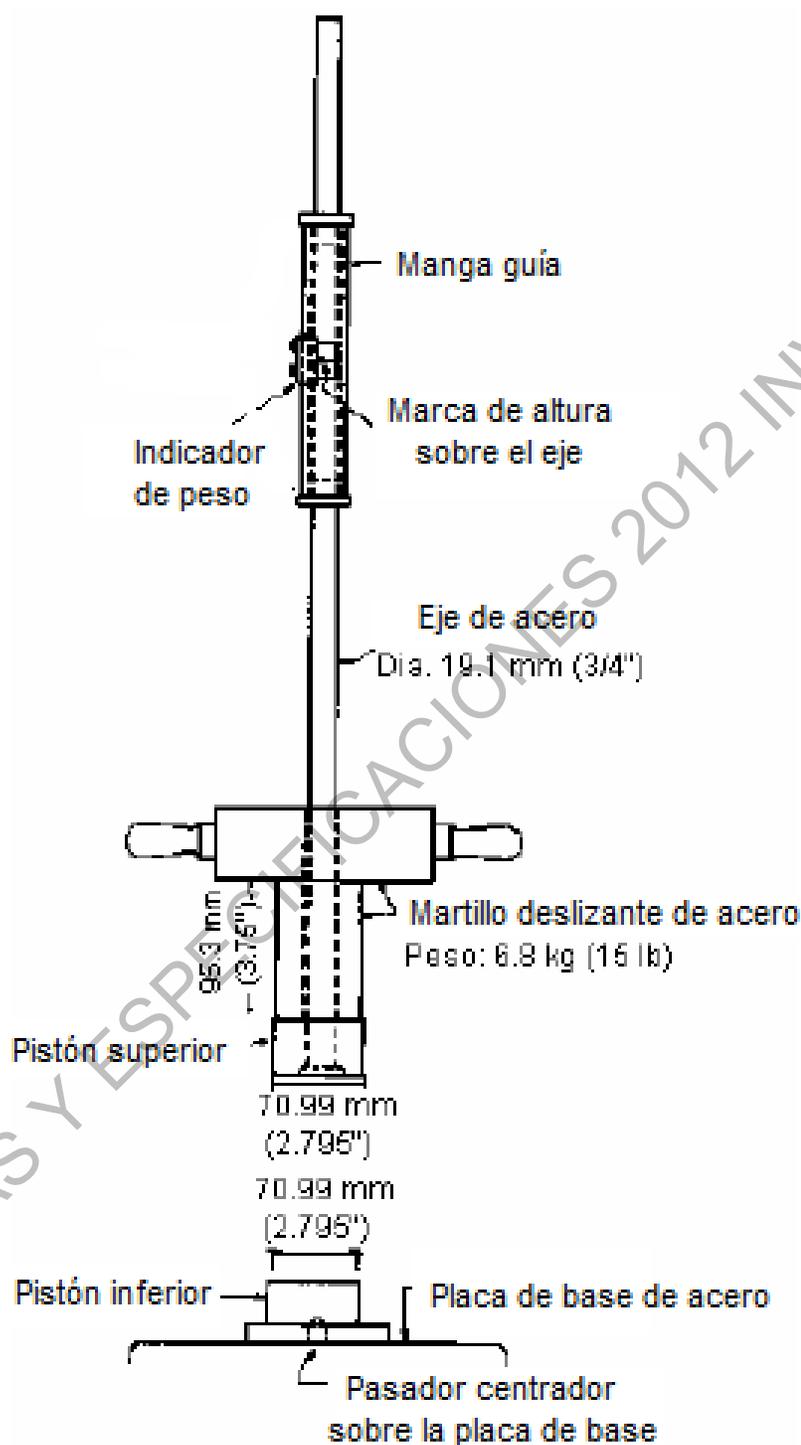


Figura 613 - 4. Esquema de un compactador adecuado por impactos

- 3.8** *Extractor de la probeta compactada* – Compuesto por pistón, prensa y armazón, necesarios para extraer la muestra compactada por extrusión.

- 3.9** *Elementos varios* – Palustre, espátula, recipiente para mezcla o una mezcladora mecánica para mezclar el suelo–cemento con agua, recipiente graduado para medir el agua, latas para la determinación de la humedad, etc.
- 3.10** *Varilla apisonadora* – Varilla de acero, lisa, de 12.7 mm (½") de diámetro y 510 mm (20") de longitud, con extremos de corte recto.
- 3.11** *Cuarto húmedo* – Un cuarto o una cabina para el curado húmedo de las probetas, capaz de mantener una temperatura de $23.0 \pm 1.7^\circ \text{C}$ ($73.4 \pm 3^\circ \text{F}$) y una humedad relativa no menor de 96 %.



Figura 613 - 5. Compactador por impactos para elaborar especímenes cilíndricos de 71 × 142 mm (2.8 × 5.6") destinados al ensayo de compresión

4 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

- 4.1** Los materiales se colocan a la temperatura ambiente, preferiblemente entre 18 y 24° C (65 a 75° F), antes de comenzar los ensayos.

- 4.2** Se almacena el cemento en un lugar seco, en recipientes a prueba de humedad, preferiblemente metálicos. Se mezcla cuidadosamente el cemento, con el fin de obtener una muestra homogénea. Se pasa el cemento a través del tamiz No. 16 (1.18 mm) y se descarta el material retenido (terrones, grumos).
- 4.3** El agua de mezcla debe estar libre de ácidos, álcalis, aceites y, en general, ser apropiada para el consumo humano.
- 4.4** Se seca la muestra de suelo, si estaba húmeda al llegar de la obra, hasta que se note friable al introducir en ella un palustre. El secado debe ser al aire o con un aparato secador, siempre y cuando la temperatura no exceda de 60° C (140° F). Se disgregan cuidadosamente los grumos de suelo, respetando el tamaño natural de las partículas individuales.
- 4.5** Se tamiza una cantidad adecuada y representativa del suelo pulverizado, empleando los tamices de 50 mm (2"), 19.0 mm (¾") y 4.75 mm (No. 4). Se debe descartar cualquier agregado retenido en el tamiz de 50 mm (2"). Se remueve el material que pasa el tamiz de 50 mm (2") y queda retenido en el tamiz de 19.0 mm (¾"), para reemplazarlo por una masa igual de material que pasa el tamiz de 19.0 mm (¾") y es retenido en el de 4.75 mm (No. 4). Este material de reemplazo se debe obtener de la muestra original.
- Nota 3: Esta norma de ensayo se utiliza, principalmente, para elaborar especímenes de suelo-cemento para pruebas de compresión y flexión, con suelos que no tengan más de 35 % de agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y no más de 85 % retenido en el tamiz de 425 µm (No. 40).*
- 4.6** Se coloca en inmersión en agua, durante 24 horas, el material que pasa el tamiz de 19.0 mm (¾") y queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4) y luego se seca superficialmente. Se determinan sus propiedades de absorción de acuerdo con la norma INV E-223.
- 4.7** Se toma una muestra de 100 g del suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se seca en el horno hasta obtener masa constante. Se determina el contenido de humedad de la muestra, dato que permitirá calcular la cantidad de agua que se deberá agregar a la mezcla de suelo-cemento para que tenga la humedad apropiada para el moldeo de los especímenes.
- 4.8** Se prepara una muestra de tamaño suficiente para elaborar tres probetas de suelo-cemento para la prueba de compresión o una para el ensayo de flexión, a partir de una porción representativa del material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), y también de la fracción que pasa el tamiz de 19.0 mm (¾") y queda retenida en el de 4.75 mm (No. 4), preparadas como se describe en los numerales 4.4, 4.5 y 4.6.

5 DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE LOS MATERIALES

- 5.1** Se determina, con aproximación a 5 g (0.01 lb), la masa de las cantidades de diseño de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y de agregado comprendido entre los tamices de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y de 4.75 mm (No. 4). Se determina, con aproximación a 1 g, la masa de la cantidad de diseño de cemento y se mide la cantidad de agua de diseño, con aproximación a 1 ml.

Nota 4: Las cantidades de diseño de suelo, agregado, cemento y agua se basan usualmente en resultados obtenidos en otros ensayos. El contenido óptimo de agua de la mezcla y la densidad a la cual se debe compactar la probeta, se determinan mediante la norma INV E-611; la cantidad de cemento es, usualmente, la necesaria para producir un suelo-cemento de calidad adecuada para construcción de bases de pavimentos. Esta cantidad de cemento es indicada por el criterio establecido para interpretar los resultados obtenidos de la norma INV E-612.

6 MEZCLA DE LOS MATERIALES

- 6.1** *Generalidades* – La mezcla de suelo-cemento, hecha a mano o con una mezcladora de laboratorio, debe proporcionar amasadas, cada una con un 10 % en exceso de la necesaria para el moldeo de las probetas. Este material se debe proteger contra la pérdida de humedad y se determina la masa de una porción representativa. Se seca en el horno hasta masa constante y se determina la humedad real de la mezcla de suelo-cemento. Si la mezcla de suelo-cemento contiene agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la porción para determinar la humedad debe tener una masa mínima de 500 g, y se debe determinar con una precisión de 1 g; y si no tiene agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la masa debe ser al menos de 100 g, y se debe determinar con una precisión de 0.1 g.
- 6.2** *Mezcla a mano* – Se mezcla la amasada en un recipiente metálico, limpio y no absorbente, o sobre una plancha de acero, con ayuda de un palustre, de la siguiente manera:
- 6.2.1** Se mezclan el cemento y el suelo de tamaño menor de 4.75 mm, hasta lograr una distribución uniforme.
- 6.2.2** Se agrega el agua y se mezcla hasta obtener una mezcla completa y uniforme.
- 6.2.3** Se añade el material grueso saturado y superficialmente seco y se mezcla el conjunto hasta que el agregado grueso se distribuya uniformemente dentro de la amasada.

- 6.3 Mezcla mecánica** – Se debe seguir la secuencia especificada para mezcla a mano. Para evitar la segregación, la cantidad mezclada se debe depositar en un recipiente metálico, limpio y no absorbente, y se vuelve a mezclar manualmente con el palustre.

Nota 5: La operación de mezcla y compactación de las probetas debe ser continua, y el tiempo transcurrido entre la adición del agua y la compactación final no debe exceder de 30 minutos.

ESPECÍMENES PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

7 TAMAÑO DE LAS PROBETAS

- 7.1** La probeta para los ensayos de compresión debe tener forma cilíndrica, con una altura igual al doble del diámetro. El método descrito en esta norma requiere probetas de 71 mm (2.8") de diámetro por 142 mm (5.6") de altura, aunque se puede usar el mismo procedimiento para moldear probetas más grandes o más pequeñas.

8 MOLDEO DE LAS PROBETAS

- 8.1** Se aplica una capa delgada de aceite comercial en las paredes interiores del molde y en los dos discos separadores de aluminio. Se sostiene el molde en posición vertical, con el anillo espaciador sobre el pistón inferior, de forma que éste se introduzca en el molde aproximadamente 25 mm (1").
- 8.2** Se coloca un disco separador sobre la parte inferior del pistón inferior y se ajusta la extensión sobre la parte superior del molde. Se coloca en el molde una masa predeterminada de la mezcla uniforme del suelo-cemento que dé lugar a un espécimen con el peso unitario de diseño, de una altura de 142 mm (5.6"). Si el suelo-cemento contiene agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la mezcla se debe distribuir uniformemente dentro del molde con ayuda de una espátula delgada. Luego, se compacta el suelo-cemento con la varilla apisonadora, introduciendo su extremo recto dentro de la mezcla, en forma firme y con poco impacto hasta alcanzar el rechazo y distribuyendo los golpes de manera uniforme en la sección transversal del molde. Esta operación se debe hacer cuidadosamente, para no dejar vacíos en las mezclas arcillosas de suelo-cemento. El proceso se debe repetir hasta que la mezcla se halle compactada a una altura aproximada de 150 mm (6").

- 8.3** Se remueve la extensión del molde y se coloca el otro disco separador sobre la mezcla de suelo–cemento. Se retira el espaciador que soporta el molde sobre el pistón inferior. Se coloca el pistón superior en posición y se aplica una carga, bien estacionaria mediante una máquina de compresión o bien dinámica mediante una máquina de impacto, hasta obtener un espécimen de una altura de 142 mm (5.6")
- 8.4** Se remueven los pistones y los discos separadores, pero se deja el espécimen de suelo–cemento dentro del molde.

9 CURADO DE LOS ESPECÍMENES

- 9.1** Los especímenes se deben curar dentro de los moldes en la cámara húmeda por 12 horas, o más si es necesario, para permitir su remoción posterior con ayuda del extractor. Después de extraídos, los especímenes se retornan a la cámara húmeda, protegiéndolos de goteo de agua durante el tiempo especificado de curado húmedo. Generalmente, los especímenes se deben ensayar en condición húmeda inmediatamente después de ser removidos de la cámara.

Nota 6: Otros procedimientos de acondicionamiento, como la saturación en agua, el secado al aire o al horno, procesos alternados de humedecimiento y secado o de congelamiento y deshielo, pueden ser especificados después del curado húmedo inicial de la mezcla. Los procedimientos de curado y acondicionamiento deben quedar indicados con detalle en el informe del ensayo.

10 REFRENTADO

- 10.1** Antes del ensayo a compresión, se deben refrentar los extremos de las probetas que no sean planos dentro de una tolerancia de 0.05 mm (0.002"). Las superficies refrentadas deben cumplir esta misma tolerancia y deben ser perpendiculares al eje del espécimen.
- 10.2** El refrentado se debe hacer con una capa de yeso. La capa de refrentado debe ser lo más delgada posible, y se debe aplicar con suficiente anticipación para que endurezca y no se fracture cuando el espécimen se someta a compresión (se sugiere un término de 3 horas a 23° C (73° F)). Durante este período, los especímenes se deben mantener con una humedad constante.

ESPECÍMENES PARA EL ENSAYO DE FLEXIÓN

11 TAMAÑO DE LOS ESPECÍMENES

11.1 Los especímenes para las pruebas de flexión serán vigas rectangulares con una longitud medida, al menos 51 mm (2") mayor que el triple de su altura. En esta norma se requiere la elaboración de vigas de 76.2 × 76.2 × 285.8 mm (3 × 3 × 11 ¼"), pero el mismo procedimiento se puede usar para moldear probetas de mayor o menor tamaño.

12 MOLDEO DE LOS ESPECÍMENES

12.1 Los especímenes de ensayo se deben fabricar con el eje longitudinal horizontal. Se engrasan ligeramente las partes del molde y se ensambla éste con los lados y extremos separados de la placa de base con las barras espaciadoras de 9.53 mm (3/8"), colocada una en cada esquina del molde.

12.2 Se divide en tres porciones iguales una masa predeterminada de suelo-cemento uniformemente mezclada, para elaborar una viga con la densidad de diseño. Se coloca una de las porciones en el molde y se nivela manualmente. Si el suelo cemento contiene material retenido el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se distribuye cuidadosamente la mezcla alrededor de las paredes del molde con ayuda de una espátula delgada. El suelo-cemento se compacta inicialmente desde el fondo hacia arriba con golpes firmes, pero de poco impacto, de la varilla de acero lisa mencionada en el numeral 3.10, hasta el punto de rechazo. Para ello, se requieren aproximadamente 90 golpes de la varilla, distribuidos de manera uniforme sobre la sección transversal del molde, con el cuidado necesario para no formar huecos en los suelos cementos arcillosos. Se nivela manualmente la capa y se repite de la misma forma el proceso de colocación y compactación de las otras dos capas. En ese momento, la viga deberá tener aproximadamente 95 mm (3 ¾") de altura.

12.3 Se coloca la placa superior del molde en posición y se quitan las barras espaciadoras. La compactación final se proporciona aplicando una carga estática con la máquina de compresión o con el marco de compresión hasta alcanzar la altura de diseño de 76 mm (3").

- 12.4** Inmediatamente después de la compactación, se desmonta cuidadosamente el molde y se remueve la probeta hacia una plataforma lisa y rígida de madera o de lámina metálica.

Nota 7: Un método sugerido para remover el espécimen del molde consiste en quitar primero la tapa y luego los lados y las placas de los extremos del molde. Entonces, el espécimen estará descansando sobre la placa de fondo del molde. Se pone la cara plana de una plataforma de transporte contra un lado del espécimen y, entonces, la placa de fondo del molde, el espécimen, y la plataforma se giran 90°, de manera que el espécimen descansa con su lado sobre la plataforma. Entonces, se retira cuidadosamente la placa de fondo del molde.

13 CURADO DE LAS VIGAS

- 13.1** Las vigas se curan durante el período especificado sobre las plataformas en el cuarto húmedo, protegidas de la acción del agua libre. Generalmente, las vigas se ensayan en condición húmeda, inmediatamente después de ser removidas de la cámara (ver nota 6).

14 REFRENTADO

- 14.1** Antes del ensayo, se deberán refrentar las áreas de los lados opuestos del espécimen tal como fue moldeado, que entrarán en contacto con el bloque para la aplicación de la carga y con los apoyos, si no son planas dentro de una tolerancia de 0.05 mm (0.002"). Las superficies refrentadas deberán cumplir esta misma tolerancia y ser paralelas al eje horizontal del espécimen.

Nota 8: Los especímenes se prueban sobre sus lados, con sus superficies originales superior e inferior, tal como fueron moldeadas, colocadas perpendicularmente a la placa de base de la máquina de ensayo. Las vigas elaboradas en moldes que reúnen las especificaciones dadas en el numeral 3.2, no suelen requerir refrentado.

- 14.2** Si el refrentado es necesario, se puede hacer con una pasta de yeso. La capa de refrentado debe ser lo más delgada posible, y se debe aplicar con suficiente anticipación para que endurezca y no se fracture cuando el espécimen sea ensayado a compresión (se sugiere un término de 3 horas a 23° C (73° F)). Durante este período, los especímenes se deben mantener con una humedad constante.

15 INFORME

15.1 El informe debe incluir los siguientes datos acerca de la mezcla de suelo-cemento:

15.1.1 Gradación del suelo tal como fue recibido y usado en la elaboración de los especímenes.

15.1.2 Números de identificación de los especímenes.

15.1.3 Humedad de diseño.

15.1.4 Peso unitario seco (al horno) de diseño.

15.1.5 Contenido de cemento de diseño.

15.1.6 Humedad real.

15.1.7 Peso unitario seco (al horno) real.

15.1.8 Contenido de cemento real.

15.1.9 Detalles de los procedimientos de curado y de acondicionamiento de los especímenes.

16 PRECISIÓN Y SESGO

16.1 Esta práctica describe los procedimientos para fabricar y curar probetas de ensayo. Puesto que en esta norma no se determinan valores de prueba, no resulta aplicable ninguna declaración sobre precisión y sesgo.

17 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 1632 – 07

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO

INV E – 614 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión del suelo-cemento, empleando cilindros moldeados como especímenes de ensayo.
- 1.2** Se proporcionan dos procedimientos alternativos:
- 1.2.1** *Método A* – Este procedimiento emplea un cilindro de ensayo de 101.6 mm (4.0") de diámetro y de 116.4 mm (4.584") de altura. La relación altura/diámetro es de 1.15. Este método se debe emplear únicamente sobre materiales con 30 % o menos retenido en el tamiz de 19 mm (¾") (nota 2).
- 1.2.2** *Método B* – Este procedimiento emplea un cilindro de ensayo de 71.1 mm (2.8") de diámetro y de 142.2 mm (5.6") de altura. La relación altura/diámetro es de 2.0. Este método de ensayo es aplicable a aquellos materiales que pasan en su totalidad el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INVE-809-07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** El Método A hace uso del mismo equipo de compactación y de los moldes comúnmente disponibles en los laboratorios de suelos, y empleados para otros ensayos sobre el suelo-cemento. Se considera que este método da una medida relativa de la resistencia, más que una determinación rigurosa de la resistencia a la compresión. Debido a la menor relación altura/diámetro (1.15) de los cilindros, la resistencia a la compresión determinada mediante el Método A será normalmente mayor que la obtenida con el Método B.
- 2.2** Debido a la mayor relación altura/diámetro (2.00), el Método B da una mejor medida de la resistencia a la compresión desde un punto de vista técnico, ya

que reduce las condiciones complejas de esfuerzos que se pueden presentar durante el corte de los especímenes del Método A.

- 2.3** En la práctica, el Método A ha sido empleado con mucha más frecuencia que el Método B. Como consecuencia de ello, ha sido costumbre evaluar o especificar valores de resistencia a la compresión según el Método A. En la nota 4 de esta norma se presenta un factor para convertir valores de resistencia a la compresión, con base en la relación altura/diámetro.

3 EQUIPO

- 3.1** *Máquina para el ensayo de compresión* – Puede ser de cualquier tipo que tenga capacidad suficiente y un adecuado control para proporcionar la velocidad de carga prescrita en el numeral 5.2, y deberá cumplir con las exigencias de la Sección 15 de la Práctica E 4 de la ASTM. La máquina de ensayo deberá estar provista de dos bloques de carga de acero templado (nota 1), uno de los cuales es un bloque cabezal con un apoyo esférico, el cual reposa normalmente sobre la superficie superior del espécimen, y el otro es un bloque rígido plano sobre el cual descansará el espécimen. Las superficies de carga deberán tener un tamaño igual o preferiblemente un poco mayor que la superficie del espécimen sobre la cual se aplica la carga. Cuando nuevas, las superficies de carga no se deben apartar de un plano en más de 0.013 mm (0.0005") en ningún punto, y se deberán mantener dentro de un límite de variación permisible de 0.02 mm (0.001"). En el bloque con asiento esférico, el diámetro de la esfera no deberá exceder al del espécimen y el centro de la esfera deberá coincidir con el centro de la superficie de soporte. La parte móvil de este bloque se deberá mantener estrechamente ajustada en el asentamiento esférico, pero el diseño deberá ser tal, que la superficie de soporte se pueda rotar libremente e inclinarse en ángulos pequeños en cualquier dirección.

Nota 1: Es deseable que las superficies de soporte de los bloques empleados para el ensayo de compresión del suelo cemento tengan una dureza no menor de 60 HRC.

- 3.2** *Moldes y equipo de compactación* – De acuerdo con la norma INV E-612 para el Método A, y con la norma INV E-613 para el Método B.

4 ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 4.1** Los especímenes de ensayo se moldean de la siguiente manera:

4.1.1 *Método A* – Los especímenes de 101.6 mm (4") de diámetro y de 116.4 mm (4.584") de altura se moldean de acuerdo con la norma INV E-612.

4.1.2 *Método B* – Los especímenes de 71.1 mm (2.8") de diámetro y de 142.2 mm (5.6") de altura se moldean de acuerdo con la norma INV E-613.

Nota 2: Estos métodos se pueden emplear para ensayar especímenes de otros tamaños. Si la muestra del suelo incluye material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se recomienda emplear el Método A. Especímenes más grandes, de 101.6 mm (4") de diámetro y 203.2 mm (8") de altura, se moldean de una manera similar a la del Método B.

4.2 Los especímenes se curan en húmedo de acuerdo con la norma INV E-613.

4.3 Al final del período de curado húmedo, los especímenes se sumergen en agua por 4 horas.

4.4 Se remueven los especímenes del agua y se efectúan los ensayos de compresión tan pronto como sea posible. Los especímenes se deben mantener húmedos con una arpillera húmeda u otra cobertura hasta el instante del ensayo.

Nota 3: Otros procedimientos de acondicionamiento, como el secado al aire o en el horno, el humedecimiento y secado alterno o los ciclos de congelamiento y deshielo, se pueden especificar después de un período inicial de curado. Los procedimientos de curado y acondicionamiento se deberán indicar detalladamente en el informe.

4.5 Se comprueba la lisura de las caras del espécimen con una regla. Si resulta necesario, se refrentan las bases para que cumplan con las exigencias del numeral sobre refrentado de especímenes de la norma INV E-613.

5 PROCEDIMIENTO

5.1 Se coloca el bloque inferior de apoyo sobre la plataforma de la máquina de ensayo, directamente debajo del bloque de apoyo superior con asiento esférico. Se coloca el espécimen sobre el bloque inferior, asegurándose de que el eje vertical del espécimen esté alineado con el centro de empuje del bloque superior. A medida que el cabezal esférico se conduce para apoyarlo sobre la placa superior, se rota suavemente su parte móvil con la mano, con el fin de obtener un asentamiento uniforme.

5.2 Se aplica la carga continuamente y sin impactos. Se puede usar una máquina de ensayo operada por tornillo, que opere a una velocidad aproximada de 1 mm (0.05") por minuto cuando trabaje en vacío. Con máquinas hidráulicas, la

carga se debe ajustar a una velocidad constante dentro de los límites de 140 ± 70 kPa/s (20 ± 10 lbf/pg²/s), dependiendo de la resistencia del espécimen. Se registra la carga total a la falla del espécimen de ensayo, con una precisión de 40 N (10 lbf).

6 CÁLCULOS

- 6.1** Se calcula la resistencia unitaria a la compresión del espécimen, dividiendo la carga máxima por el área de la sección transversal.

Nota 4: Si se desea, se establecen tolerancias para la relación de altura/diámetro (h/d), multiplicando la resistencia a la compresión de los especímenes del Método B por 1.10. Esto convierte la resistencia para una relación h/d de 2.00 a la de una relación de h/d de 1.15, empleada comúnmente en los ensayos rutinarios de resistencia sobre el suelo-cemento (ver la Sección 2). Esta conversión se basa en la indicada en la norma INV E-418, la cual ha sido encontrada aplicable para el suelo-cemento.

7 INFORME

- 7.1** El informe deberá incluir:
- 7.1.1** Número de identificación del espécimen.
 - 7.1.2** Diámetro y altura, mm (pg.).
 - 7.1.3** Área de la sección transversal, mm² (pg²).
 - 7.1.4** Carga máxima, aproximada a 40 N (10 lbf) más cercanos.
 - 7.1.5** Factor de conversión para la relación altura/diámetro (en caso de que se haya usado) (ver nota 4).
 - 7.1.6** Resistencia a la compresión, calculada con aproximación a 35 kPa (5 lbf/pg²) más cercanos.
 - 7.1.7** Edad del espécimen.
 - 7.1.8** Detalles de los períodos de curado y acondicionamiento, y contenido de agua en el momento del ensayo, determinado según la norma INV E-122.

8 PRECISIÓN Y SESGO

8.1 La precisión y el sesgo de este método de ensayo no han sido establecidos mediante un programa de investigación de varios laboratorios. Sin embargo, con base en los datos de ensayo disponibles, la siguiente información puede servir como guía para la estimar la variabilidad de los resultados de los ensayos de compresión.

8.1.1 Se efectuaron ensayos en un solo laboratorio sobre 122 grupos de especímenes duplicados, moldeados a partir de 21 materiales diferentes. La diferencia promedio en la resistencia de los especímenes duplicados fue de 8.1 % y la diferencia en la mediana fue de 6.2 %. Estos valores se expresan como el porcentaje de la resistencia promedio de los dos especímenes, en la siguiente forma:

$$\text{Diferencia, \%} = \frac{\text{Valor alto} - \text{Valor bajo}}{(\text{Valor alto} + \text{Valor bajo})/2} \times 100 \quad [614.1]$$

En la Figura 614 - 1 se muestra la distribución de la variación. Los datos cubren un amplio rango de contenidos de cemento y de resistencia a la compresión.

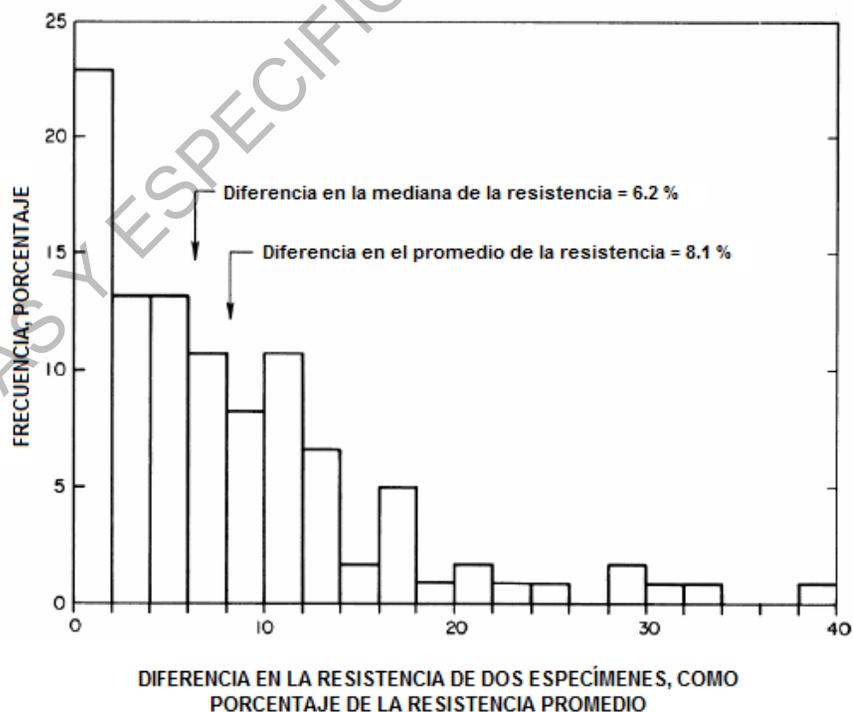


Figura 614 - 1. Distribución de la variación de los resultados de 122 grupos de especímenes duplicados

9 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 1633 – 00 (reaprobada en 2007)

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SUELO–CEMENTO EMPLEANDO PORCIONES DE VIGAS ROTAS POR FLEXIÓN (MÉTODO DEL CUBO MODIFICADO)

INV E – 615 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión del suelo–cimento, empleando como especímenes de ensayo porciones de vigas rotas por flexión de acuerdo con la norma INV E–616.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1 Este método de ensayo está proyectado para uso en el laboratorio y como herramienta de investigación para determinar valores de resistencia a la compresión de diferentes mezclas de suelo–cimento.
- 2.2 El método no está concebido como una alternativa a la norma INV E–614, y los valores obtenidos mediante estos dos métodos de ensayo no son intercambiables ni necesariamente comparables.

3 EQUIPO

- 3.1 *Máquina para el ensayo de compresión* – Puede ser de cualquier tipo que tenga capacidad suficiente y un adecuado control para proporcionar la velocidad de carga prescrita en el numeral 5.2, y deberá cumplir con las exigencias de la Sección 15 de la Práctica E 4 de la ASTM. La máquina de ensayo deberá estar provista de dos bloques de carga de acero templado (nota 1), uno de los cuales es un bloque cabezal con un apoyo esférico, cuya superficie de carga debe tener entre el 75 y el 100 % del ancho del espécimen. La parte móvil de este bloque se deberá mantener estrechamente ajustada en el asentamiento esférico, pero el diseño deberá ser tal, que la superficie de soporte se pueda rotar libremente e inclinarse en ángulos pequeños en cualquier dirección.
- 3.2 *Bloques de carga* – Deben ser de acero templado, de forma cuadrada, de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") de espesor y con lados de 76.2 ± 0.13 mm (3 ± 0.005 ") (para la viga

estándar). Las superficies de carga, cuando nuevas, no se deben apartar de un plano en más de 0.013 mm (0.0005") en ningún punto, y se deberán mantener dentro de un límite de variación permisible de 0.02 mm (0.001").

Nota 1: Es deseable que las superficies de soporte de los bloques empleados para el ensayo de compresión del suelo cemento tengan una dureza no menor de 60 HRC.

4 ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 4.1** Las vigas normalizadas de las cuales se toman porciones rotas para el ensayo de compresión, deben ser de 76.2 × 76.2 × 285.8 mm (3 × 3 × 11¼"), aunque se puede usar un método similar de ensayo para probar especímenes obtenidos de vigas de otros tamaños. Los especímenes tomados de los extremos de las vigas deben tener una longitud al menos 25 mm (1") mayor que su espesor y deberán estar libres de grietas, superficies astilladas u otros defectos obvios. Los especímenes se deben ensayar sobre sus lados con respecto a su posición de moldeo.
- 4.2** Durante el intervalo entre el ensayo de los especímenes como vigas y el posterior ensayo de las porciones rotas como cubos, los especímenes se deben mantener con una humedad constante, mediante una protección adecuada.
- 4.3** Se determina el ancho (altura original) del espécimen normalizado en el punto donde se hará el ensayo, aproximado a los 0.25 mm (0.01") más cercanos si éste es menor de 76.2 mm (3"); de otra manera, el ancho deberá ser igual a 76.2 mm (3"). La longitud del espécimen deberá ser igual a 76.2 mm (3"). Se calcula el área de la sección transversal.
- 4.4** Empleando una regla, se verifica la lisura de las caras del espécimen. De ser necesario, se refrentan las superficies para cumplir los requerimientos de la Sección 10 de la norma INV E-613. Las tapas de refrentado deben cubrir todo el ancho del espécimen y su longitud debe permitir el ajuste de las placas de carga para el ensayo, de manera que la placa superior quede directamente sobre la inferior.

5 PROCEDIMIENTO

- 5.1** Se coloca el espécimen sobre su costado, entre las placas metálicas de carga y directamente bajo el cabezal esférico de la placa superior de la máquina de carga, verificando que su eje vertical esté perfectamente alineado con el

centro de empuje del cabezal. Se debe utilizar algún dispositivo de guía, para asegurar que la placa superior se encuentra directamente sobre la inferior. A medida que el cabezal esférico se conduce para apoyarlo sobre la placa superior, se rota suavemente su parte móvil con la mano, con el fin de obtener un asentamiento uniforme.

- 5.2** Se aplica la carga continuamente y sin impactos. Se puede usar una máquina de ensayo operada por tornillo, que opere a una velocidad aproximada de 1 mm (0.05") por minuto cuando trabaje en vacío. Con máquinas hidráulicas, la carga se debe ajustar a una velocidad constante dentro de los límites de 140 ± 70 kPa/s (20 ± 10 lbf/pg²/s), dependiendo de la resistencia del espécimen. Se registra la carga total a la falla del espécimen de ensayo, aproximado a los 40 N (10 lbf) más cercanos.

6 CÁLCULOS

- 6.1** Se calcula la resistencia unitaria a la compresión del espécimen, dividiendo la carga máxima por el área de la sección transversal, calculada como se indica en el numeral 4.3.

7 INFORME

- 7.1** El informe deberá incluir:
- 7.1.1** Número de identificación del espécimen.
 - 7.1.2** Ancho y longitud del área de ensayo, mm (pg.).
 - 7.1.3** Área de la sección transversal, mm² (pg²).
 - 7.1.4** Carga máxima, aproximada a 40 N (10 lbf).
 - 7.1.5** Resistencia a la compresión, aproximada a los 35 kPa (5 lbf/pg²) más cercanos.
 - 7.1.6** Edad del espécimen.
 - 7.1.7** Detalles de los períodos de curado y acondicionamiento, y contenido de agua en el momento del ensayo, determinado según la norma INV E-122.

8 PRECISIÓN Y SESGO

8.1 *Precisión* – La precisión de este método de ensayo no ha sido establecida mediante un programa de investigación de varios laboratorios. Sin embargo, con base en los datos de ensayo disponibles, la siguiente información puede servir como guía para la estimar la variabilidad de los resultados de los ensayos de compresión por el método del cubo modificado.

8.1.1 Se efectuaron ensayos en un solo laboratorio sobre un loam limoso con un pasante por el tamiz de 75 μm (No. 200) = 92 %, límite líquido = 26 e índice plástico = 7. Se ensayaron 24 muestras, 12 con 6 % de cemento y 12 con 14 % de cemento. Los especímenes se curaron en una cámara húmeda a 23° C (73° F) durante 28 días. Los resultados obtenidos al ensayar cubos modificados de 76 × 76 mm (3 × 3") se muestran en la Tabla 615 - 1.

Tabla 615 - 1. Precisión

TIPO DE MUESTRA	RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN, lbf/pg ²	DESVIACIÓN ESTÁNDAR, lbf/pg ²	COEFICIENTE DE VARIACIÓN, %
Especímenes con 6 % de cemento	473	35	7.4
Especímenes con 14 % de cemento	887	47	5.3

8.2 *Sesgo* – El sesgo no se puede determinar, por cuanto no hay un valor de referencia aceptado para este método de ensayo.

9 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 1634 – 00 (2006)

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL SUELO–CEMENTO USANDO UNA VIGA SIMPLEMENTE APOYADA Y CARGADA EN LOS TERCIOS DE LA LUZ LIBRE

INV E – 616 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la flexión del suelo–cimento, empleando una viga simplemente soportada, cargada en los tercios de la luz libre.

Nota 1: Los métodos para el moldeo de especímenes de suelo–cimento se presentan en la norma INV E-613.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** Este método de ensayo se usa para determinar la resistencia a la flexión de especímenes de suelo–cimento. La resistencia a la flexión es un dato significativo para el diseño estructural y para el análisis del comportamiento de un pavimento que incluya una o más capas de este material.

3 EQUIPO

- 3.1** *Máquina de ensayo* – Puede ser de cualquier tipo que tenga capacidad suficiente y un adecuado control para proporcionar la velocidad de carga prescrita en el numeral 5.2, y deberá cumplir con las exigencias de la Sección 15 de la Práctica E 4 de la ASTM. La máquina de ensayo deberá estar provista de un bloque cabezal con un apoyo esférico, cuya superficie de carga debe tener entre el 75 y el 100 % del ancho de la viga de ensayo. La parte móvil de este bloque se deberá mantener estrechamente ajustada en el asentamiento esférico, pero el diseño deberá ser tal, que la superficie de soporte se pueda rotar libremente e inclinarse en ángulos pequeños en cualquier dirección.
- 3.2** Se debe utilizar el método de carga en los tercios al realizar ensayos de flexión a los especímenes de suelo–cimento, empleando bloques de aplicación de carga que aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean solamente verticales y sin excentricidad. En la Figura 616 - 1 se muestra un diagrama de un aparato que cumple este propósito, el cual debe estar diseñado para operar bajo los siguientes principios:

- 3.2.1** La distancia entre los apoyos y los puntos de aplicación de carga debe permanecer constante en el aparato.
- 3.2.2** La dirección de las reacciones debe ser paralela a la carga aplicada durante todo el ensayo.
- 3.2.3** La carga se debe aplicar a velocidad uniforme y de manera que no se produzcan impactos.
- 3.2.4** Las direcciones de las cargas y de las reacciones se pueden mantener paralelas mediante el uso de acoples, cojinetes y placas de flexión. La excentricidad de la carga se puede evitar empleando soportes esféricos.

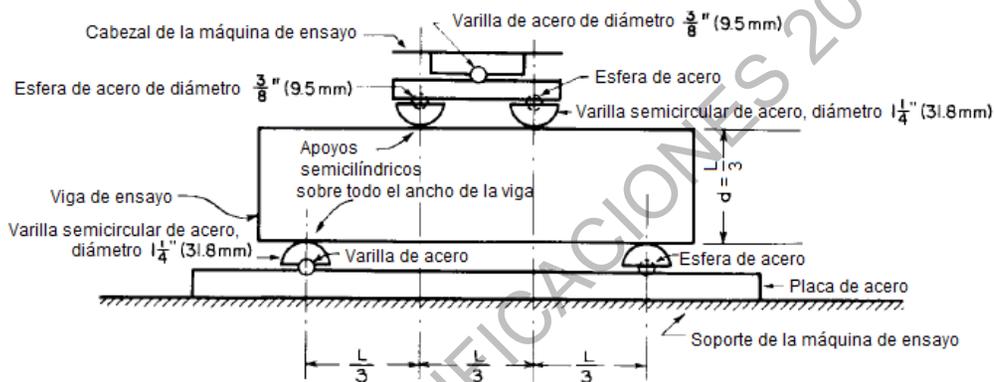


Figura 616 - 1. Diagrama de un equipo para el ensayo de flexión del suelo-cemento usando una viga simplemente apoyada, cargada en los tercios de la luz

4 ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 4.1** Los especímenes normalizados de ensayo deben ser vigas de $76.2 \times 76.2 \times 285.8$ mm ($3 \times 3 \times 11\frac{1}{4}$ "), aunque se permite emplear un método de ensayo similar utilizando especímenes de otras dimensiones. Los especímenes se deben ensayar sobre sus lados con respecto a la posición en que han sido moldeados.
- 4.2** Los ensayos de flexión se deben realizar sobre los especímenes curados en húmedo, tan rápido como resulte posible luego de extraerlos de la cámara húmeda. Los especímenes se deben mantener húmedos con una arpillera húmeda u otra cobertura hasta el instante del ensayo.

Nota 2: Otros procedimientos de acondicionamiento, como el secado al aire o en el horno, el humedecimiento y secado alterno o los ciclos de congelamiento y deshielo, se pueden especificar después de un período inicial de curado. Los procedimientos de curado y acondicionamiento se deberán indicar detalladamente en el informe.

- 4.3** Empleando una regla, se comprueba la lisura de las caras de la viga en los puntos donde se van a aplicar las cargas. Si resulta necesario, se refrentan las bases para que cumplan con las exigencias del numeral sobre refrentado de especímenes de la norma INV E-613.

5 PROCEDIMIENTO

- 5.1** Se gira la viga sobre uno de sus lados con respecto a su posición de moldeo y se centra sobre los soportes inferiores semicirculares (Figura 616 - 1), los cuales se encuentran separados a una distancia igual al triple de la altura de la viga. Se coloca el ensamble de aplicación de carga en contacto con la superficie superior de la viga, en los puntos tercios entre los soportes. Se alinea de manera cuidadosa el centro de la viga con el centro de empuje del apoyo esférico del bloque superior de carga de la máquina. A medida que el cabezal esférico es conducido para apoyarlo sobre la placa superior, se rota suavemente su parte móvil con la mano, con el fin de obtener un asentamiento uniforme.
- 5.2** Se aplica la carga continuamente y sin impactos. Se puede usar una máquina de ensayo operada por tornillo, que opere a una velocidad aproximada de 0.02 mm/s (0.05"/min) por minuto cuando trabaje en vacío. Con máquinas hidráulicas, la carga se debe ajustar a una velocidad constante que haga que el esfuerzo en la fibra extrema de la viga se mantenga en 690 ± 39 kPa/min (100 ± 5 lbf/pg²/min), dependiendo de la resistencia del espécimen. Se registra la carga total a la falla del espécimen de ensayo, aproximado a los 40 N (10 lbf) más cercanos.



Figura 616 - 2. Ensayo de flexión sobre una viga de suelo-cemento

6 MEDIDAS DEL ESPÉCIMEN LUEGO DEL ENSAYO

- 6.1 Se miden el ancho y la altura promedio de la viga en la sección fallada, aproximados a los 0.25 mm (0.01") más cercanos.

7 CÁLCULOS

- 7.1 Si la fractura se inicia en la zona de tensión, dentro del tercio medio de la luz libre, el módulo de rotura se calcula con la ecuación:

$$R = \frac{P L}{b d^2} \quad [616.1]$$

- Donde: R: Módulo de rotura, kPa (lbf/pg²);
- P: Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N (lbf);
- L: Luz libre entre apoyos, mm (pg.);
- b: Ancho promedio del espécimen en el sitio de la fractura, mm (pg.);
- d: Altura promedio de la muestra en el sitio de la fractura mm (pg.).

- 7.2 Si la fractura ocurre en la zona de tensión, fuera del tercio medio de la luz libre, pero a una distancia no mayor de 5 % de la luz libre, el módulo de rotura se calcula con la ecuación:

$$R = \frac{3 P a}{b d^2} \quad [616.2]$$

- Donde: a: Distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano, medida sobre la línea central de la superficie de tensión de la viga, mm (pg.)

- 7.3 Si la fractura ocurre en la superficie de tensión y fuera del tercio medio de la luz libre en más del 5 % de la longitud de ésta, los resultados del ensayo se deberán descartar.

8 INFORME

8.1 El informe de resultados debe incluir lo siguiente:

8.1.1 Número de identificación del espécimen.

8.1.2 Ancho promedio, redondeado a 1.0 mm (0.05").

8.1.3 Altura promedio, redondeada a 1.0 mm (0.05").

8.1.4 Longitud de la luz libre, mm (pg.).

8.1.5 Máxima carga aplicada, N (lbf).

8.1.6 Módulo de rotura calculado, aproximado a los 35 kPa (5 lbf/pg²) más cercanos.

8.1.7 Datos relativos al historial de curado y a la condición de humedad aparente del espécimen en el momento del ensayo.

8.1.8 Defectos del espécimen, si los tenía.

8.1.9 Edad del espécimen.

9 PRECISIÓN Y SESGO

9.1 *Precisión* – La precisión de este método de ensayo no ha sido establecida mediante un programa de investigación de varios laboratorios. Sin embargo, con base en los datos de ensayo disponibles, la siguiente información puede servir como guía para la estimar la variabilidad de los resultados de los ensayos de resistencia a la flexión.

9.1.1 Se efectuaron ensayos en un solo laboratorio sobre un loam limoso con un pasante por el tamiz de 75 μ m (No. 200) = 92 %, límite líquido = 26 e índice plástico = 7. Se ensayaron 24 muestras, 12 con 6 % de cemento y 12 con 14 % de cemento. Los especímenes se curaron en una cámara húmeda a 23° C (73° F) durante 28 días. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 616 - 1.

- 9.2 *Sesgo* – El sesgo no se puede determinar, por cuanto no hay un valor de referencia aceptado para este método de ensayo.

Tabla 616 - 1. Precisión

TIPO DE MUESTRA	RESISTENCIA PROMEDIO A LA FLEXIÓN, lbf/pg ²	DESVIACIÓN ESTÁNDAR, lbf/pg ²	COEFICIENTE DE VARIACIÓN, %
Especímenes con 6 % de cemento	94	6	6.4
Especímenes con 14 % de cemento	157	9	5.7

10 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D1635/D1635M – 12

CONTENIDO DE CEMENTO EN MEZCLAS FRESCAS DE SUELO– CEMENTO

INV E – 617 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Este método se refiere a la determinación del contenido de cemento en mezclas frescas de suelo–cemento.
- 1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E–810–07.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1 Se extrae una muestra del material fresco que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) empleando una solución de cloruro de amonio. Después de permitir la sedimentación de la muestra, se diluye en agua una alícuota del material que sobrenada. Se ajusta el pH a 13 y se añade trietanolamina a los interferentes complejos. La muestra se titula con una solución EDTA hasta el punto final de azul del indicador de azul de hidroxinaftol. El contenido de cemento se lee en una curva de calibración preparada a partir de titulaciones de diferentes mezclas con contenidos de cemento conocidos, hechas con la misma agua y los mismos suelo y cemento que la muestra que se ensaya.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1 Este método determina el contenido de cemento en mezclas con suelos o agregados mediante análisis químico. Fue desarrollado, principalmente, como un ensayo relativamente rápido para emplear en el sitio de la construcción, para verificar el cumplimiento de las especificaciones. El método sirve para materiales que se ensayan rápidamente una vez que se ha completado la mezcla. Si la mezcla presenta algún grado significativo de hidratación del cemento o de endurecimiento, se deberá emplear la norma INV E–618.

4 EQUIPO

- 4.1 *Balanza* – Con capacidad de 1000 g o más, y legible a 0.1 g.

- 4.2** *Elementos de vidrio* – Cilindros graduados de 25 ml y de 1000 ml, buretas de 25 ml, jeringas o pipetas volumétricas de 10 ml, frascos Erlenmeyer de 250 ml, gotero para drogas médicas.
- 4.3** *Elementos de plástico* – Recipientes de polietileno de 2 litros (2 cuartos de galón) con tapas de encaje a presión, embudo de plástico de 300 mm (12") de diámetro, botellas de polietileno de 20 litros (5 galones) para almacenar cloruro de amonio y agua destilada o desmineralizada.
- 4.4** *Soporte para bureta* – Para sostener una bureta de 25 ml.
- 4.5** *Agitador magnético y barra de agitación.*
- 4.6** *Varillas de agitación* – De acero inoxidable, aproximadamente de 300 mm (12") de largo.
- 4.7** *Un medidor de pH o papel indicador (rango de 10 a 14).*

5 REACTIVOS

- 5.1** *Pureza de los reactivos* – Para todos los ensayos se deberán emplear reactivos de grado químico. A menos que se especifique de manera diferente, se entenderá que todos los reactivos deberán cumplir las especificaciones del comité para reactivos analíticos de la Sociedad Americana de Química. Se pueden emplear grados diferentes si se demuestra que el reactivo es de pureza suficientemente alta que permita su empleo sin disminuir la exactitud de la determinación.
- 5.2** *Solución de cloruro de amonio (10 %)* – Se transfieren 2000 g. de cloruro de amonio granular (NH_4Cl) a una botella plástica de 20 litros. Se completa hasta 20 litros con agua tibia destilada o desmineralizada y se mezcla bien.
- 5.3** *Solución EDTA (0.1 M)* – Se puede encontrar en muchas empresas de suministro de productos químicos como una solución previamente preparada o, también, se puede preparar de la siguiente forma: se disuelven 74.45 g de polvo de tetraacetato disódico dihidratado ($\text{Na}_2\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en aproximadamente 1 litro de agua tibia, destilada o desmineralizada, en un vaso de precipitados. Se deja enfriar a temperatura ambiente, se transfiere cuantitativamente a un frasco volumétrico de 2 litros y se diluye hasta la marca del frasco con agua destilada o desmineralizada. Se almacena en una botella de polietileno.

- 5.4** *Polvo indicador de azul de hidroxinaftol*
- 5.5** *Solución de hidróxido de sodio (50 %)* – Se encuentra como un reactivo previamente preparado, bajo en carbonatos. Para su empleo, se diluye 1+1 con agua destilada o desmineralizada. Esta solución se puede preparar así: se agregan lenta y cuidadosamente 500 g de gránulos de hidróxido de sodio (NaOH) a 600 ml de agua destilada o desmineralizada y se deja enfriar a la temperatura ambiente. Se diluye hasta 1 litro con agua destilada o desmineralizada. Se almacena en una botella plástica. Para su empleo, se diluye 1+1 con agua destilada o desmineralizada.
- 5.6** *Solución de trietanolamina (20 %)* – Se diluyen 20 ml de reactivo trietanolamina (HOCH₂CH₂)₃N hasta completar 100 ml con agua destilada o desmineralizada.
- 5.7** *Soluciones amortiguadoras (buffer)* – De pH 7 y 12.5, empleadas para calibrar el medidor de pH.

6 MUESTREO

- 6.1** Se toman muestras representativas de la mezcla de suelo-cemento en el instante de completar la mezcla. Las muestras se ensayan inmediatamente o se colocan en recipientes plásticos cubiertos y se ensayan dentro de los 30 minutos siguientes a la conclusión de la mezcla. Dependiendo de la cantidad de material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se siguen los numerales 6.1.1 o 6.1.2.
- 6.1.1** Para mezclas de suelo-cemento en las cuales 100 % pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4), se pesa una porción de 300 g. y se titula como se describe en la Sección 8.
- 6.1.2** Para mezclas de suelo-cemento con material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se pesa una muestra de 700 g. Se tamiza completamente la muestra sobre el tamiz de 4.75 mm (No. 4) hasta que el material retenido quede libre de partículas adheridas de menor tamaño. Se determina la masa del material total que pasa el tamiz y se registra como M_{fcw} . Se mezcla el material que pasa el tamiz, se pesa una porción de 300 g. y se titula como se describe en la Sección 8.

Nota 1: Si se debe efectuar alguna corrección por variaciones en el contenido de agua, se determina ésta, w' , empleando una porción separada del material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4). En la nota 6 se presentan los cálculos para la corrección.

7 PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

- 7.1 Con los materiales que se van a emplear en la construcción, se preparan tres series de muestras por duplicado con la humedad de diseño y con los siguientes contenidos de cemento: Serie 1, dos muestras con el 75 % del contenido de cemento de diseño; Serie 2, dos muestras con el 100 % del contenido de cemento de diseño; Serie 3, dos muestras con el 125 % del contenido de cemento de diseño. Las cantidades de suelo, cemento y agua para cada muestra se calculan así:

$$M_s = \frac{S}{\left(1 + \frac{w}{100}\right) \left(1 + \frac{C}{100}\right)} \quad [617.1]$$

$$M_r = \left(\frac{R}{100}\right) \times M_s \quad [617.2]$$

$$M_f = M_s - M_r \quad [617.3]$$

$$M_c = \left(\frac{C}{100}\right) \times M_s \quad [617.4]$$

$$V_w = \left(\frac{w}{100}\right) \times (M_s + M_c) \quad [617.5]$$

Donde: w : Humedad de diseño, % respecto de la masa seca de suelo y cemento;

C : Contenido de cemento, % respecto de la masa seca del suelo;

R : % del material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4);

S : Tamaño de la muestra: 300.0 g cuando el 100 % del suelo pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), 700.0 g cuando parte del suelo queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), g;

M_s : Masa total de suelo seco al horno, g

M_r : Masa del material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), g;

M_f : Masa del material que pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4), g;

M_c : Masa de cemento, g;

V_w : Volumen de agua, ml.

7.1.1 Para cada muestra, se mezclan perfectamente el cemento y el suelo hasta obtener un color uniforme. Se agrega el agua y se mezcla completamente.

Nota 2: Si es necesario, se pueden establecer más puntos de calibración, para cubrir un rango más amplio de contenidos de cemento.

Nota 3: El contenido de humedad del suelo secado al aire tendrá un ligero efecto sobre la exactitud de los resultados de la calibración. Esto se puede corregir empleando cantidades de suelo y agua calculadas en la siguiente forma:

$$M'_f = \left(1 + \frac{w_s}{100}\right) \times M_f \quad [617.6]$$

$$V'_w = V_w - (M'_f - M_f) \quad [617.7]$$

Donde: w_s : Contenido de humedad del suelo secado al aire que pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4).

7.2 Dependiendo de si la muestra contiene o no material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se debe seguir lo indicado en los numerales 7.2.1 o 7.2.2:

7.2.1 Para suelos en los cuales el 100 % pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4), se titula cada muestra de 300 g como se describe en la Sección 8. Después de titular las seis muestras, se construye un gráfico que represente los mililitros de solución EDTA contra el % de cemento en masa, empleando los valores promedio de las Series 1, 2 y 3.

7.2.2 Para suelos con material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se tamiza completamente cada fracción de 700 g de muestra sobre el tamiz hasta que todo el material retenido se halle libre de partículas más pequeñas. Se mezcla el material que pasa el tamiz, se pesa una porción de 300 g y se titula como se describe en la Sección 8. Después de titular las seis muestras, se dibuja un gráfico que muestre los mililitros de solución EDTA empleando las cifras promedias de las Series 1, 2 y 3, contra los gramos de cemento, M_{c300} , en una muestra de 300 g. calculados así:

$$M_{c300} = \left[\frac{300}{(700 - M_r)} \right] \times 100 \quad [617.8]$$

- 7.3** Las curvas de calibración son diferentes para cada tipo de suelo y pueden ser no lineales.
- 7.4** Se debe volver a calibrar la curva cada vez que se introduzca un nuevo despacho de reactivos químicos.
- 7.5** Se producen imprecisiones cuando el contenido de calcio de las muestras de ensayo difiere del de las muestras de calibración. Los ensayos de calibración se deberán volver a efectuar siempre que las muestras varíen significativamente en su contenido de calcio, medido mediante ensayos de titulación sobre los suelos sin tratar (Sección 8). Las imprecisiones se pueden presentar, también, si la fuente de agua utilizada para la calibración es diferente de la empleada con las muestras de ensayo.

8 PROCEDIMIENTO PARA LA TITULACIÓN

- 8.1** Se coloca cada muestra de 300 g dentro de un recipiente de polietileno de 2 litros y se agregan 500 ml de solución de NH_4Cl . Se coloca una cubierta sobre el recipiente y se agita la mezcla durante $2 \text{ min} \pm 2 \text{ s}$. Se deja asentar la mezcla durante $4 \text{ min} \pm 2 \text{ s}$ para que el material que sobrenada sea claro. Se lleva con una jeringa o una pipeta una alícuota de 10 ml de la solución que sobrenada a un vaso de precipitados de 250 ml que contenga una barra de agitación magnética y se agregan 100 ml de agua destilada o desmineralizada. Mientras se mezcla completamente con el agitador magnético, con el gotero se agregan gotas de solución de NaOH hasta que se alcance un pH entre 13.0 y 13.5, determinado con el medidor de pH o con el papel indicador. Cuando se emplee este último, se utiliza una varilla de agitación para transferir gotas de la solución al papel indicador. Después del ajuste del pH, se espera de 20 a 30 s para asegurar que el pH no cae por debajo del rango especificado. Se agregan cuatro gotas de solución de trietanolamina y alrededor de 0.2 g del polvo indicador. Se continúa agitando la solución en el agitador magnético. Se titula con solución EDTA hasta un punto final completamente azul. Se anotan los mililitros de EDTA requeridos para obtener el punto final.

Nota 4: Se puede obtener un punto final más definido agregando aproximadamente 90 % de la cantidad anticipada de solución EDTA antes de la adición de la solución de NaOH .

Nota 5: Todo el equipo se debe mantener escrupulosamente limpio enjuagándolo completamente con agua destilada o desmineralizada. Todos los reactivos se deben almacenar en recipientes de polietileno.

9 CÁLCULOS

9.1 Dependiendo de la cantidad de muestra retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se sigue el numeral que corresponda entre el 9.1.1 y el 9.1.2.

9.1.1 Si el 100 % de la mezcla de suelo–cemento pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se lee el contenido de cemento mediante la masa seca del suelo (excluido el cemento) directamente de la curva de calibración que corresponda a los resultados de la titulación en mililitros de EDTA para la muestra de ensayo.

9.1.2 Si el suelo contiene material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se leen los gramos de cemento de la curva de calibración correspondiente a los resultados de la titulación en mililitros de EDTA para la muestra de ensayo. Se calculan A y B en la siguiente forma:

$$A = \left(\frac{M_{fcw}}{300} \right) \times M_{c300} \quad [617.9]$$

$$B = \frac{700}{\left[1 + \frac{w}{100} \right]} \quad [617.10]$$

Donde: M_{fcw} : Gramos de suelo húmedo que pasan el tamiz de 4.75 mm, descrito en el numeral 6.1.2;

M_{c300} : Gramos de cemento leídos de la curva de calibración;

w: Contenido de humedad de diseño, %;

A: Gramos de cemento en la muestra de 700 g;

B: Gramos de suelo más cemento en la muestra de 700 g.

9.1.3 Se calcula luego C, porcentaje de cemento en la masa seca de la muestra total (excluido el cemento), en la siguiente forma:

$$C = \frac{A}{B - A} \times 100 \quad [617.11]$$

Nota 6: Las variaciones del contenido de humedad tendrán un efecto ligero en la exactitud del ensayo. La corrección por variación de humedad, C, se puede calcular así:

$$C' = \frac{1 + \left(\frac{w'}{100}\right)}{1 + \left[\frac{V_w}{(M_f + M_c)}\right]} \times 100 \quad [617.12]$$

Donde:	C' :	Porcentaje de cemento corregido por variación de la humedad;
	C :	Porcentaje de cemento determinado a partir de la muestra de ensayo;
	w' :	Porcentaje de humedad de la muestra de ensayo determinado como se indica en la nota 1;
	V_w , M_f y M_c :	Cantidades calculadas en la Sección 7 para la calibración de la Serie 2.

10 PRECISIÓN Y SESGO

10.1 Durante los años de 1967 y 1968, los programas de ensayo adelantados por parte de varios laboratorios indicaron un error promedio en la determinación del contenido de cemento del 3.6 % [(error/contenido de cemento) × 100], a partir del cual se estimó un coeficiente de variación del 4.5 %. Sobre especímenes duplicados empleados en el proceso de calibración, la desviación media en mililitros de EDTA fue de 2.4 % [((desviación en mililitros)/(mililitros promedio)) × 100].

11 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 2901 – 99 (retirada por la ASTM en 2006)

CONTENIDO DE CEMENTO EN MEZCLAS ENDURECIDAS DE SUELO–CEMENTO

INV E – 618 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Este método se refiere a la determinación, mediante análisis químico, del contenido de cemento en mezclas de suelo–cemento endurecidas.
- 1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E–811–07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1 Mediante este método determina el contenido de cemento en mezclas de cemento con suelo o agregados mediante un análisis químico. Se desarrolló, principalmente, para ensayar muestras con un grado importante de hidratación de cemento o de endurecimiento. El contenido de cemento de mezclas de suelo–cemento fresco se determina mediante la norma INV E–617.
- 2.2 Este método se basa en la determinación del contenido de óxido de calcio (CaO) en la muestra mediante análisis químico. El método no es aplicable a materiales de suelo–cemento que contengan suelos o agregados que produzcan cantidades significativas de óxido de calcio (CaO) disuelto bajo las condiciones del ensayo.

3 EQUIPO

- 3.1 *Balanza analítica* – Con capacidad de 200 g y con posibilidad de lectura de 0.001 g.
- 3.2 *Papeles de filtro* –Whatman No. 1, de 11 y 15 cm de diámetro; Whatman No. 41, de 15 cm de diámetro; y Whatman No. 2, de 11 o 15 cm de diámetro.
- 3.3 *Pipeta* – De 50 ml.
- 3.4 *Equipo misceláneo* – Equipos complementarios, tales como hornos eléctricos, placas de calentamiento, un pequeño cuarteador, un tamiz de 425 μm (No. 40) con recipiente de fondo y tapa, un mortero de hierro fundido con maja y, si es posible, un molino de bolas.

4 REACTIVOS

4.1 Pureza de los reactivos – Para todos los ensayos se deberán emplear reactivos de grado químico. A menos que se especifique de manera diferente, se entenderá que todos los reactivos deberán cumplir las especificaciones del comité para reactivos analíticos de la Sociedad Americana de Química. Se pueden emplear grados diferentes si se demuestra que el reactivo es de pureza suficientemente alta que permita su empleo sin disminuir la exactitud de la determinación.

4.2 Permanganato de potasio, solución normal (0.1 N) – Se prepara una solución 0.1 N de KMnO_4 y se normaliza contra un patrón primario de ácido oxálico, oxalato de sodio o sulfato de hierro (II) y amonio hexahidratado (sal de Mohr).

Nota 1: El uso de una solución normal de KMnO_4 no es necesario cuando las muestras se titulan de acuerdo con el numeral 6.9 y los resultados se calculan como se indica en el numeral 7.2. Sin embargo, la concentración real del reactivo se debe determinar por titulación contra un patrón primario de ácido oxálico, oxalato de sodio o sulfato de hierro (II) y amonio hexahidratado.

4.3 Solución de nitrato de amonio – Se disuelven 20 g de NH_4NO_3 en un litro de agua destilada.

4.4 Ácido clorhídrico (1 + 3) – Se adicionan 200 ml de HCl (gravedad específica 1.19) a 600 ml de agua destilada.

4.5 Ácido clorhídrico (1 + 1) – Se agregan 25 ml de HCL (gravedad específica 1.19) a 25 ml de agua destilada.

4.6 Ácido nítrico – Ver nota 4.

4.7 Solución de oxalato de amonio (5%) – 50 g de oxalato de amonio. (**Advertencia:** En adición a otras precauciones, la solución se elabora agregando el ácido lentamente al agua mientras se revuelve, para evitar alzas repentinas de temperatura que causen ebullición y salpicaduras de la solución)

4.8 Hidróxido de amonio – NH_4OH (gravedad específica 0.90).

4.9 Ácido sulfúrico (1 + 1) – Se agregan 500 ml de H_2SO_4 (gravedad específica 1.84) a 500 ml de agua destilada.

5 MUESTRAS

- 5.1** Para el ensayo, se deben escoger muestras de lo siguiente:
- 5.1.1** Suelo original, representativo de la fase suelo de la mezcla de suelo-cemento.
 - 5.1.2** Cemento, representativo de la fase cemento de la mezcla del suelo-cemento.
 - 5.1.3** Mezcla de suelo-cemento que se va a analizar.
- 5.2** La muestra bruta de laboratorio de cada componente deberá pesar aproximadamente 200 g. Esto se puede lograr reduciendo la muestra en volumen y, si fuere necesario, en tamaño de partículas, mediante el empleo de secado, cuarteo y pulverización.

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1** Se secan 25 g de cada una de las muestras en un horno hasta masa constante, a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$), para remover la humedad libre. Las muestras se reducen para que pasen el tamiz de $425 \mu\text{m}$ (No. 40).
- 6.2** Se miden en la balanza analítica las siguientes cantidades de cada una de las muestras: Suelo original, 5 g; mezcla de suelo-cemento 5 g; cemento, 1 g. Se coloca cada una de las muestras pesadas en un vaso de precipitados de 250 ml. Se agregan a cada muestra 50 ml de HCl (1+1) (nota 2), se cubre y se hierve levemente durante 5 minutos sobre la placa de calentamiento.

Nota 2: En el caso de la muestra de cemento, generalmente es preferible agregar primero 25 ml de agua y agitar para obtener una mezcla completa. Se agregan luego 25 ml de HCl (densidad 1.19) y se hierve levemente durante un tiempo suficiente para obtener la descomposición del cemento. Rara vez es necesario hervir vigorosamente durante un período largo las muestras de suelo o cemento, y los resultados frecuentemente se traducen en una filtración mucho más lenta.

- 6.3** Se adicionan 25 ml de agua caliente a los vasos de precipitados, se agita, se deja asentar momentáneamente y en seguida se decantan los contenidos a través de un papel de filtro Whatman No. 1 (nota 3), preferiblemente de 15 cm de diámetro. El filtrado se deberá recibir en un frasco volumétrico de 250 ml. Cuando el líquido haya pasado a través del papel de filtro, el residuo se lava una vez por decantación, empleando agua caliente. El frasco volumétrico deberá ser vaciado rápidamente, transfiriendo así el material suelto al papel

de filtro. El material sobre el filtro se deberá lavar 4 veces adicionales, consistiendo cada lavada en 10 a 15 ml de agua caliente dirigida en un chorro desde la botella de lavado. Cantidades muy pequeñas de residuo pasarán ocasionalmente a través del filtro las cuales, por lo general, se pueden despreciar.

Nota 3: En el caso de las muestras de suelo y de suelo-cemento, el volumen del residuo algunas veces disminuye apreciablemente la filtración. Generalmente, no se encuentra ninguna dificultad con las muestras de cemento y, como regla general, las muestras de suelo se deben filtrar y lavar en menos de 30 minutos. Algunas mezclas de suelo-cemento requieren más tiempo pero, si este período excede 1 hora, la filtración subsiguiente en casos similares se puede hacer más rápida, sustituyendo el papel No. 41 por el papel No. 1. La filtración lenta en tales casos es causada generalmente por ebullición excesiva, produciéndose gelatinización de la sílice, la cual retarda materialmente la filtración.

- 6.4** Cuando se haya completado el lavado, se descarta el filtro y se diluye el filtrado en el frasco volumétrico de 250 ml con agua fría. La temperatura de la solución deberá estar cerca del punto de calibración del frasco. Se agita el frasco para mezclar completamente el contenido; se remueve luego una alícuota de 50 ml y se transfiere al vaso de precipitados original de 250 ml (numeral 6.2) empleando una pipeta de 50 ml. Se diluye hasta 100 ml. Se elabora la solución ligeramente amoniacal (nota 4) adicionando gota a gota el hidróxido de amonio, se hierve entre 1 y 2 minutos y se dejan asentar los hidróxidos.

Nota 4: Si las muestras contienen hierro ferroso, es deseable agregar unas pocas gotas de HNO_3 antes de la precipitación de los hidróxidos. También, se puede usar papel de pH para asegurar que se ha agregado suficiente hidróxido de amonio.

- 6.5** Se filtran los hidróxidos a través del papel de filtro Whatman No. 1 de 11 cm (o No.41), recibiendo el filtrado en el vaso de precipitados de 600 ml. Se lava una vez el vaso de precipitados original de 250 ml sobre el filtro con una corriente de solución caliente de NH_4NO_3 (20 g/L), seguido por el lavado del hidróxido precipitado, una o dos veces con solución caliente de NH_4NO_3 (20 g/L). Se deja el filtrado a un lado y se coloca el vaso de precipitados original bajo el embudo. Se perfora el papel con una varilla (nota 5) y se lavan los hidróxidos dentro del vaso de precipitados original, empleando una corriente de solución de NH_4NO_3 (20 g/L) para remover la mayor parte del precipitado del papel de filtro. Se trata el papel de filtro con 20 ml de HCl (1+3) caliente, dirigiendo el ácido sobre el papel con una varilla de vidrio. Se lava varias veces el papel con agua caliente y luego se descarta. Se diluye la solución hasta 75 ml.

Nota 5: En lugar de perforar el papel de filtro, se pueden transferir el papel y el precipitado al vaso de precipitados original, disolver los hidróxidos con 20 ml de HCl (1+3) caliente y diluirlos hasta 75 ml con agua, y continuar el procedimiento como se describe en el numeral 6.6. En este caso, los hidróxidos re-precipitados y la pulpa son subsecuentemente removidos al mismo tiempo.

- 6.6** Se elabora la solución ligeramente amoniacal y se hierve durante 1 a 2 minutos. Se deja que el precipitado se asiente, se decanta luego a través de un papel Whatman No.1 como antes, recibiendo el filtrado en el vaso de precipitados de 600 ml previamente dejado al lado (numeral 6.5). Se lava y limpia el vaso en el cual tuvo lugar la precipitación y se lava finalmente el precipitado sobre el filtro, 3 o 4 veces con solución NH_4NO_3 (20 g/L). Se descarta el hidróxido precipitado. Se agregan 2 ml de NH_4OH (gravedad específica 0.90) al filtrado, el cual tendrá ahora un volumen de 250 a 350 ml. Se calienta la solución hasta la ebullición y se agregan 10 ml de solución caliente de oxalato de amonio saturada. Se mantiene la mezcla cerca de la ebullición hasta que el precipitado se vuelva granular; se coloca luego a un lado sobre una placa de calentamiento tibia, durante 30 minutos o más. Antes de filtrar el oxalato de calcio, se verifica que la precipitación sea completa (nota 6), asegurándose que esté presente un ligero exceso de NH_4OH . Se filtra la mezcla a través de un papel filtrante Whatman No. 2 de 11 o 15 cm de diámetro o, si se prefiere, un papel Whatman No. 42, verificando que todo el precipitado quede retenido. Empleando un limpiador de caucho, se limpia completamente el vaso en el cual tuvo lugar la precipitación y se transfiere el contenido al filtro, con una corriente de agua caliente. Se lava el filtro de 8 a 10 veces con agua caliente (no más de 75 ml) (nota 7), empleando una corriente de la botella de lavado.

Nota 6: A veces, la precipitación del oxalato de calcio no es completa, lo que se traduce en bajos valores de CaO. Por lo tanto, la operación de precipitación se debe llevar a cabo con minuciosidad y cuidado.

Nota 7: El filtro se puede lavar 4 veces, cada una con NH_4OH (2+98) y agua caliente, en el orden establecido.

- 6.7** Se abre cuidadosamente el papel de filtro y se lava el precipitado dentro del vaso en el cual se efectuó la precipitación. Se diluye hasta 200 ml y se agregan 10 ml de H_2SO_4 (1+1). Se calienta la solución hasta justo antes de la ebullición y se titula con la solución estándar KMnO_4 (nota 8) hasta obtener un color rosado persistente. Se agrega el papel de filtro y se machaca. Se continúa la titulación lentamente hasta que el color rosado persista por 10 segundos.

Nota 8: La temperatura de la solución estándar KMnO_4 no deberá variar de la temperatura de normalización tanto como para causar un error serio en la determinación del CaO. A temperaturas ambientales ordinarias, el volumen del agua pura cambia entre 0.01 y 0.04 % por cada grado Celsius, dependiendo de la temperatura.

- 6.8** *Blanco* – Se hace una determinación en blanco, siguiendo el mismo procedimiento y empleando las mismas cantidades de todos los reactivos.
- 6.9** *Procedimiento alternativo de titulación* – Se titula como se describió en el numeral 6.7, excepto que la solución de KMnO_4 no necesita ser una solución 0.1

normal, pero la misma solución se deberá usar para la titulación de todos los componentes. Se omite la determinación en blanco descrita en el numeral 6.8.

7 CÁLCULOS

7.1 Se calcula el contenido de cemento de las mezclas de suelo-cemento en la siguiente forma:

7.1.1 Cuando la determinación se haya completado de acuerdo con los numerales 6.7 y 6.8:

7.1.1.1 Se calculan los porcentajes de CaO en el suelo, en el cemento y en la mezcla de suelo-cemento, como sigue:

$$\text{CaO, \%} = \left[\frac{(A - B)C \times 0.28}{D} \right] \times 100 \quad [618.1]$$

- Donde:
- A: Solución de KMnO_4 requerida para la titulación de la muestra, ml;
 - B: Solución de KMnO_4 requerida para la titulación del blanco, ml;
 - C: Normalidad de la solución del KMnO_4 ;
 - D: Masa de muestra representada por la alícuota titulada (nota 9), g;
 - 0.028: Equivalente CaO de 1 ml de solución 1.0 N de KMnO_4 .

7.1.1.2 Se calcula el porcentaje de cemento respecto de la masa del suelo, como sigue (nota 10):

$$\text{Cemento, \%} = \left[\frac{(G - F)}{(E - F)} \right] \times 100 \quad [618.2]$$

- Donde: E: % de CaO en el cemento;

F: % de CaO en el suelo natural;

G: % de CaO en la mezcla de suelo-cemento.

Nota 9: Las alícuotas tituladas son equivalentes a 1 g de suelo o de suelo-cemento y a 0.2 g de cemento.

Nota 10: El valor del porcentaje (en masa) de cemento obtenido de acuerdo con los numerales 7.1 y 7.2 está en términos de cemento hidratado. Estos valores se pueden convertir a un valor equivalente aproximado de cemento seco, multiplicándolos por el factor 1.04.

7.2 Cuando la determinación se ha completado de acuerdo con el numeral 6.9, el porcentaje de cemento por masa del suelo se calcula como sigue (nota 10):

$$\text{Cemento, \%} = \left[\frac{(J - I)}{(5H - I)} \right] \times 100 \quad [618.3]$$

Donde: H: Solución de KMnO_4 necesaria para la titulación de la muestra de cemento, ml;

I: Solución de KMnO_4 necesaria para la titulación de la muestra de suelo natural, ml;

J: Solución de KMnO_4 necesaria para la titulación de la muestra de suelo-cemento, ml.

8 PRECISIÓN Y SESGO

8.1 *Precisión* – No se presentan datos sobre precisión, debido a la naturaleza de los suelos ensayados mediante este método. No es fácil o resulta demasiado costoso en la actualidad disponer de 10 o más laboratorios para adelantar un programa sobre el particular.

8.2 *Sesgo* – No se puede determinar, por cuanto no hay un material de referencia aceptado para este método de ensayo.

9 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 806 – 11

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

DISEÑO DE MEZCLAS ABIERTAS EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

INV E – 621 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma cubre el procedimiento para la preparación de amasadas de prueba de mezclas abiertas con emulsión asfáltica, empleando agregados que cumplan alguna de las granulometrías indicadas en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías para las mezclas abiertas en frío.
- 1.2** En el diseño, se deberán emplear el agregado a utilizar en el proyecto y una emulsión asfáltica de rotura media (CRM) compatible, para establecer un contenido de emulsión óptimo basado en la evaluación del escurrimiento (*runoff*) del asfalto.

Nota 1: El diseño de la mezclas de tipo denso con emulsión asfáltica se deberá basar en el procedimiento descrito en la norma INV E-622.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1** Se elaboran mezclas con contenidos variables de emulsión, en incrementos de 1 %, y se someten a un método que determina el escurrimiento del residuo asfáltico. El contenido de emulsión que da lugar a un escurrimiento de 10 g de residuo asfáltico es recomendado como el óptimo.

3 EQUIPO

- 3.1** *Bandejas metálicas* – O tazas, de acero inoxidable, para preparar las mezclas.
- 3.2** *Tamiz* – De 2.36 mm de abertura de malla (No. 8).
- 3.3** *Balanza* – Con capacidad mínima de 2500 g y legibilidad de ± 0.1 g.
- 3.4** *Horno* – De ventilación forzada, que pueda mantener temperaturas de $60 \pm 5^\circ$ C ($140 \pm 9^\circ$ F) y de $110 \pm 5^\circ$ C ($230 \pm 9^\circ$ F).
- 3.5** *Elementos misceláneos* – Cuchara de mango largo, tazas, palustre, paño, papel, ventilador, etc.

4 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

4.1 Se debe emplear el siguiente procedimiento para preparar mezclas de agregado y emulsión asfáltica, con el fin de ensayarlas y determinar el contenido óptimo de emulsión:

4.1.1 Se obtiene una muestra representativa del agregado de trabajo, de acuerdo con la norma INV E-201, y se seca hasta masa constante a 60° C (140° F) en un horno de ventilación forzada. Luego del secado, se permite el enfriamiento de la muestra a temperatura ambiente durante un período mínimo de 2 h.

4.1.2 Se pesa un número suficiente de porciones de 2000 g de agregado seco, utilizando la granulometría promedio del acopio.

4.1.3 Empleando recipientes de acero inoxidable, se mezcla el agregado de cada porción con 40 g de agua (2 %) hasta que esté homogéneamente húmedo. Se cubre cada recipiente con un paño limpio y se deja así durante 15 minutos.

4.1.4 Se añade al agregado húmedo la cantidad deseada de emulsión asfáltica, precalentada a 60° C, y se prepara la mezcla manualmente durante 2 min, empleando una cuchara de mango largo. Se observa y se anota la trabajabilidad de la mezcla (seca, satisfactoria o muy fluida) y el porcentaje de recubrimiento. Se recomiendan contenidos de emulsión en incrementos de 1 %, referido a la masa del agregado seco. Para los agregados de mayor tamaño máximo (37.5 y 25 mm) se recomienda comenzar con 4 % de emulsión, y para los de menor tamaño máximo (19.0 mm) con 6 %.

5 PROCEDIMIENTO

5.1 Inmediatamente después de preparar la mezcla, se transfiere toda la amasada a un tamiz de 2.36 mm (No. 8), el cual deberá estar colocado sobre una bandeja tarada, apoyada a su vez sobre una balanza. Antes de volcar la amasada, se deberá humedecer ligeramente la malla del tamiz con agua.

5.2 Se deja que la mezcla drene sobre el tamiz, a la temperatura ambiente, durante 30 min.

- 5.3 Se retira de la balanza el tamiz conteniendo la mezcla drenada y se registra la masa de la emulsión escurrida.
- 5.4 Se retira del tamiz la mezcla drenada y se extiende sobre una bandeja cubierta con papel. Se seca la superficie de la mezcla con un ventilador y se evalúa el recubrimiento del asfalto.
- 5.5 Se coloca la bandeja que contiene el asfalto escurrido en un horno de ventilación forzada a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) y se seca hasta masa constante.
- 5.6 Terminado el período de secado, se determina y anota la masa de la bandeja con el residuo asfáltico, y restando la masa de la bandeja se obtendrá el residuo asfáltico escurrido.

6 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN

- 6.1 Se grafica el contenido de emulsión, expresado como porcentaje de la masa del agregado seco, en función de los gramos de asfalto escurrido, dibujando una curva suave (Figura 621 - 1).
- 6.2 Se dibuja la línea horizontal correspondiente a la ordenada de 10 g, y por el punto de intersección con la curva se traza una vertical hasta cortar el eje de las abscisas. El punto de corte, redondeado a 0.1 %, será el contenido óptimo de emulsión.

Nota 2: Para el contenido óptimo de emulsión, la mezcla debe presentar una trabajabilidad satisfactoria. Se prefiere que el recubrimiento esté tan cerca de 100 % como sea posible. Sin embargo, las mezclas serán consideradas satisfactorias si el recubrimiento es, como mínimo, 60 % para capas de base.

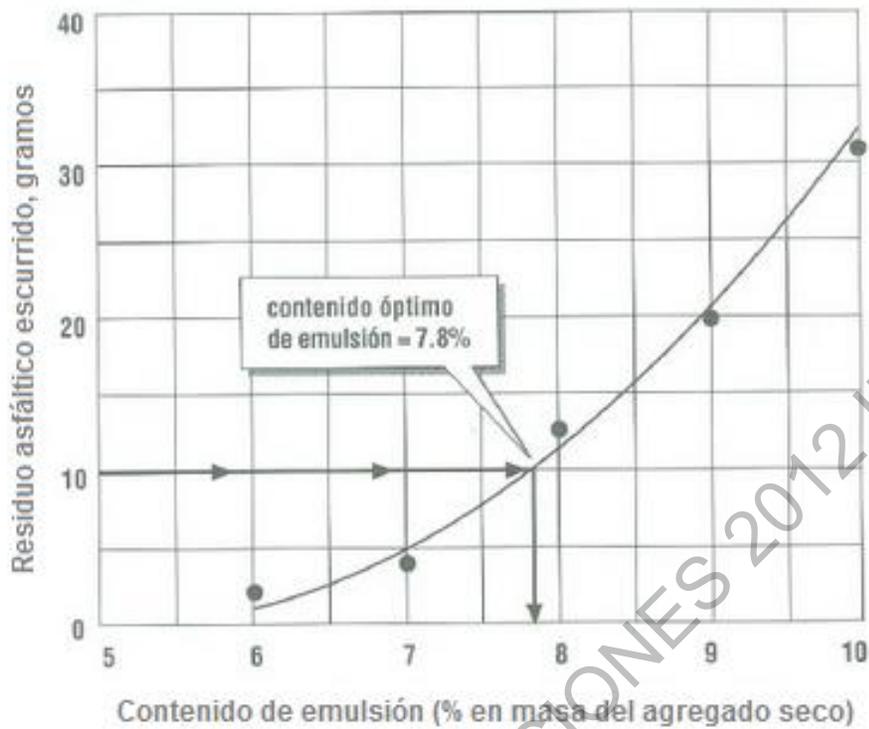


Figura 621 - 1. Selección del contenido óptimo de emulsión para una mezcla abierta en frío

7 INFORME

7.1 Se deberán informar los siguientes resultados:

7.1.1 Contenido óptimo de emulsión, %.

7.1.2 Trabajabilidad de la mezcla (seca, satisfactoria, muy fluida).

7.1.3 Recubrimiento de la mezcla, %.

8 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

ASPHALT INSTITUTE, AEMA, "Manual básico de emulsiones asfálticas", Manual Series No. 19, Capítulo 10, Lexington KY, Annapolis, MD, 2000

DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS, RECICLADOS O SIN RECICLAR, CON EMULSIÓN ASFÁLTICA, MEDIANTE EL MÉTODO DE INMERSIÓN – COMPRESIÓN

INV E – 622 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma describe el procedimiento para medir la pérdida de resistencia a la compresión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, preparadas con emulsión asfáltica. En el ensayo se obtiene un índice numérico de la pérdida producida al comparar las resistencias a la compresión simple obtenidas entre probetas curadas al aire y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua, en las condiciones que se indican más adelante.
- 1.2** Mediante este método se puede determinar el contenido óptimo de emulsión de una mezcla de agregados, de composición y granulometría determinadas, ensayando series de probetas con proporciones variables de emulsión asfáltica.

2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

- 2.1** Se elaboran mezclas de agregados, agua y emulsión asfáltica de rotura lenta, con diferentes contenidos de emulsión, ajustadas con el contenido óptimo de fluidos de compactación. Las mezclas se compactan bajo condiciones normalizadas en juegos de seis probetas por cada contenido de emulsión. Las probetas compactadas se someten a curado, divididas en dos grupos: uno se cura en seco y el otro bajo una combinación de curado seco e inmersión en agua. Finalmente, las probetas se someten a rotura por compresión simple.

3 EQUIPO

- 3.1** *Moldes* – Moldes cilíndricos, en los que la mezcla se coloca para ser compactada posteriormente. Sus dimensiones serán tales, que se puedan elaborar probetas de 101.6 mm (4") de altura por 101.6 mm (4") de diámetro. El espesor nominal de las paredes y del fondo de cada molde deberá ser 6.4 mm ($\frac{1}{4}$ "). Los moldes deben tener perforaciones laterales para facilitar el drenaje del agua de la emulsión durante la compactación.

- 3.2 Pistones** – Pistones cilíndricos para la compactación de la mezcla, los cuales debe pasar a través del molde libremente para ejercer la compactación. La diferencia máxima entre el diámetro del molde y el diámetro del pistón debe ser de 1.27 mm (0.05"). Los pistones pueden ser sólidos o ahuecados o tener otro tipo de estructura. Sus extremos deben tener una longitud no menor de 12.7 mm (1/2") y formar un ángulo recto con las paredes del molde. El pistón inferior deberá tener una altura de 50 ± 4 mm ($2 \pm 1/8$ "), mientras el superior debe tener una altura apropiada para el ensayo.

Nota 1: Para la compactación de probetas se pueden emplear moldes y pistones cilíndricos de acero con la forma y dimensiones detalladas en la Figura 747 - 1 de la norma INV E-747, con la siguientes salvedades: (1) el molde deberá contener perforaciones laterales para facilitar la expulsión del agua de la mezcla durante el proceso de compactación; (2) el pistón de compactación podrá tener más de tres aletas.

- 3.3 Soportes** – Los soportes para mantener temporalmente los moldes por encima de la base de sustentación del pistón inferior, estarán formados por dos varillas de acero de sección cuadrada de 25.4 ± 3.1 mm ($1 \pm 1/8$ ") y una longitud mínima de 76.2 mm (3").
- 3.4 Máquina para ensayo** – La máquina para ensayar las probetas puede ser cualquier tipo de prensa que cumpla las condiciones de capacidad de carga y velocidad exigidas por esta norma. Puesto que la velocidad de deformación vertical está especificada en 0.05 mm/min por mm de altura de la probeta (0.05 pg/min·pg) y como puede ser necesario ensayar probetas con tamaños desde 50.8×50.8 mm (2×2 ") y hasta 203×203 mm (8×8 "), para cumplir el requisito de velocidad se precisa que la máquina pueda dar velocidades de deformación entre 2.5 mm/min (0.1"/min) para las probetas de 50.8 mm (2") hasta 10.2 mm/min (0.4"/min) para las de 203 mm (8"). La máquina deberá estar equipada con dos placas de carga de acero templado; la superior debe estar provista de un apoyo de forma esférica y la inferior será plana para servir de base a la probeta. El tamaño de las caras de carga de las placas deberá ser ligeramente superior al diámetro máximo de las probetas a ensayar. La superficie de las placas deberá ser completamente lisa y plana, no permitiéndose variaciones con respecto al plano verdadero superiores a 0.0127 mm (0.0005") en placas nuevas y a 0.025 mm (0.001") en placas en uso. En la placa superior con apoyo esférico, el centro de la esfera deberá coincidir con el centro de la cara de carga de la placa. La parte móvil de esta pieza debe encajar ajustadamente en el apoyo esférico; pero el diseño deberá ser tal, que la placa de carga gire libremente y bascule en ángulos pequeños en cualquier dirección.

- 3.5** *Horno* –Se dispondrá de un horno de ventilación forzada y capaz de alcanzar y mantener desde la temperatura ambiente hasta 100° C, dentro de una variación de $\pm 3^\circ$ C.
- 3.6** *Baño de aire* – Un baño de aire con control manual o automático de la temperatura y con capacidad suficiente para mantener las probetas a $25 \pm 0.5^\circ$ C ($77 \pm 1.0^\circ$ F) hasta el momento del ensayo.
- 3.7** *Baño de agua con control termostático* – Un baño de agua que disponga de un dispositivo regulador de temperatura (reóstato), capaz de mantener la temperatura con precisión de $\pm 1^\circ$ C, con capacidad suficiente para mantener totalmente sumergidas las probetas, estando apoyadas en una bandeja o placa de transferencia, separadas del fondo del recipiente. El material será no reactivo, y el agua para llenar el baño será destilada o libre de electrolitos, y se deberá renovar para cada serie de ensayos.
- 3.8** *Balanza* – De 2000 g de capacidad y 0.1 g de legibilidad.
- 3.9** *Mezcladora mecánica* – Las mezclas se deberán preparar, preferiblemente, en una mezcladora mecánica, pudiendo emplearse una de cualquier tipo, siempre que pueda proporcionar un mezclado completo y homogéneo, sin segregaciones, en el tiempo especificado. La forma y la disposición de las paletas deberán reducir al mínimo la adherencia a éstas de parte de la mezcla, que pudiera alterar la correcta proporción de finos y de asfalto en ella. Si fuera necesario, el mezclado se podrá efectuar manualmente en un recipiente adecuado.

4 ESTUDIO PRELIMINAR DE LOS MATERIALES

- 4.1** Se determina la granulometría del agregado de acuerdo con la norma INV E-213. Si no encaja en la franja granulométrica especificada para la obra, se deberán tomar las medidas necesarias para corregirla, ya sea eliminando los tamaños por fuera de la especificación o añadiendo fracciones de aporte adecuadas para corregir la granulometría. El agregado de aporte deberá ser de la misma naturaleza y origen que el que se tiene previsto emplear en la obra.
- 4.2** Aparte de la granulometría, se deberá verificar que el agregado cumpla los demás requisitos de calidad establecidos en la especificación de construcción aplicable.

- 4.3** A una muestra con la gradación de diseño se le determina la humedad inicial, de acuerdo con la norma INV E-122.
- 4.4** Si se requiere calcular el contenido de vacíos de la mezcla compactada, se deberá determinar la densidad del agregado en aceite de parafina, según la norma INV E-244.
- 4.5** La emulsión asfáltica deberá presentar las características que se especifiquen y, de éstas, la estabilidad y la velocidad de rotura deberán ser las apropiadas para la plasticidad del agregado que se va a estabilizar.
- 4.6** En el caso de que el agregado provenga de un proceso de recuperación en un pavimento existente y contenga material asfáltico, no será necesario, por lo general, efectuar ninguna acción especial, pues éste se considerará, en las condiciones de ejecución del ensayo, como material granular a todos los efectos.

5 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA Y ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

- 5.1** *Contenido óptimo teórico de emulsión* – Se determina mediante cálculo, empleando algún método de superficie específica. A manera de ejemplo, se presenta el siguiente:

- 5.1.1** Se calcula la superficie específica (Σ), considerando los siguientes factores de superficie específica (FSE):

TAMAÑO DEL AGREGADO, mm	% DE LA MASA TOTAL SECA DEL AGREGADO	FSE
> 10	A	0.17
4.76 -10	B	0.33
0.300-4.76	C	2.3
0.075- 300	D	12
<0.075	F	135

$$100 \Sigma = 0.17A + 0.33B + 2.3C + 12D + 135F$$

[622.1]

- 5.1.2** El contenido de asfalto residual (% L), en porcentaje con respecto a la masa total seca del agregado, viene dado por:

$$\% L = k \sqrt[5]{\Sigma} \quad [622.2]$$

Donde: k: Coeficiente de riqueza, el cual toma valores entre 2.5 y 3.5.

5.1.3 Se determina el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica, con respecto a la masa total seca del agregado:

$$\% \text{ emulsión óptimo teórico} = \frac{\% L}{C} \quad [622.3]$$

Donde: C: Concentración de la emulsión, en tanto por uno.

5.2 *Determinación del contenido teórico de fluidos de compactación (CTF):*

5.2.1 Se determinan la humedad óptima del agregado y su peso unitario seco máximo, empleando el procedimiento descrito en la norma INV E-142. Esta humedad óptima, junto con la humedad natural (si el agregado empleado no se ha secado previamente) serán los datos a tener en cuenta para la determinación del contenido teórico de fluidos en la compactación del agregado con la emulsión.

5.2.2 Con los datos determinados previamente de humedad natural (si procede), humedad óptima de compactación y conocido el tipo de emulsión, se procede a definir el contenido teórico de fluidos de compactación, CTF.

5.2.3 El contenido teórico de fluidos de compactación, CTF, corresponde a la humedad efectiva que debe tener la muestra de agregados como valor de referencia para iniciar las pruebas de envuelta y compactación, más unas cantidades fijas o variables de emulsión:

$$\text{CTF (\% humedad óptima)} = \% \text{ humedad natural} + \% \text{ agua de pre-envuelta} + \% \text{ agua de la emulsión} \quad [622.4]$$

Nota 2: El agua de pre-envuelta, APE, varía de acuerdo con el porcentaje de emulsión presente en la mezcla.

5.3 *Determinación del contenido óptimo de fluidos de compactación (COF):*

- 5.3.1** El porcentaje definitivo, óptimo, de fluidos de compactación, COF, se determina realizando varios ensayos de envuelta con el agregado, el porcentaje establecido de emulsión, y cantidades variables de agua de pre-envuelta tales que proporcionen un total de fluidos de compactación comprendido entre el CTF - 2% y el CTF. Para estas pruebas, se tomará como porcentaje inicial de fluidos de compactación, el valor teórico, CTF, previamente determinado según el numeral 5.2, modificándolo si es necesario, mediante variaciones en el porcentaje de agua de pre-envuelta APE hasta obtener una mezcla con características de manejabilidad y curado adecuados.
- 5.3.2** El ensayo de cubrimiento se realiza como se describe en los numerales 5.1 a 5.5 de la norma INV E-769 y humedeciendo los agregados previamente con el agua de pre-envuelta o, alternativamente, realizando varias pruebas de mezclado con diferentes cantidades de agua de pre-envuelta y con la cantidad de emulsión estipulada. Se hace una valoración visual del proceso de cada una de las pruebas realizadas, siguiendo un criterio análogo al de la Sección 7 de la norma INV E- 769.
- 5.3.3** Los tiempos mínimos de envuelta y rotura de la emulsión se pueden establecer a partir de las pruebas de cubrimiento descritas más arriba. Los tiempos deben ser del orden de 30 a 60 segundos para el cubrimiento, e inferiores a 300 segundos para la rotura.
- 5.3.4** Con este ensayo queda definida la cantidad o proporción realmente necesaria de agua de pre-envuelta, APE, así como la idoneidad de la emulsión elegida con respecto al agregado que se estudia. Los fluidos de envuelta y compactación finalmente escogidos deben quedar comprendidos en el intervalo CTF - 1% y CTF. Si no se puede conseguir un cubrimiento adecuado dentro de este intervalo, se deberá cambiar de emulsión.

6 ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS

- 6.1** Se deben obtener unos 1800 g de agregado, para que la altura de la probeta compactada esté en el intervalo 101.6 ± 2 mm y, además, altura = diámetro ± 2.5 % (nota 3).

Nota 3: Si al compactar la primera probeta no se consigue la altura especificada, la masa de agregados se deberá ajustar con la expresión:

$$\text{Masa corregida, g} = \frac{101.6 \times \text{masa utilizada, g}}{\text{altura obtenida en el primer tanteo, mm}} \quad [622.5]$$

- 6.2** Con los datos del contenido óptimo de fluidos de compactación, COF, y la masa de agregados para cada probeta, se procede a elaborar las mezclas para fabricar las probetas necesarias para que se puedan ensayar con los contenidos de ligante residual (cemento asfáltico en la emulsión) que se estimen convenientes para determinar el óptimo de asfalto residual en la mezcla. Se deberá fabricar una amasada individual para cada espécimen. Se deben elaborar seis especímenes por cada porcentaje de ligante residual que se utilice.
- 6.3** Se determina la cantidad de emulsión que corresponde al porcentaje de asfalto residual que se ensaye. La cantidad de agua de pre-enuelta necesaria se calcula por diferencia entre la que representa el COF y el porcentaje de emulsión.
- 6.4** Se coloca en un recipiente tarado sobre una balanza, la cantidad necesaria de agregados para elaborar una probeta. Se vierten los agregados al tazón de la mezcladora y, sobre ellos, se añade el agua de pre-enuelta previamente determinada y se mezcla vigorosamente durante unos 30 segundos o hasta que se obtenga un aspecto homogéneo. Antes de la primera amasada, se deberán humedecer ligeramente las paredes del tazón.
- 6.5** A continuación, se va adicionando la cantidad calculada emulsión (nota 4) lentamente sobre los agregados humedecidos, sin parar la agitación y hasta conseguir la completa envuelta de mezcla, sin prolongar excesivamente esta acción (nota 5). Esta última fase se logra en un término comprendido entre 60 y 90 s.
- Nota 4: La emulsión se deberá haber homogeneizado previamente con una varilla de vidrio.*
- Nota 5: En las mezclas con agregados vírgenes, ellos no suelen quedar completamente cubiertos por el ligante (asfalto residual), puesto que el porcentaje de éste es bajo. El ligante sí debe quedar bien distribuido en toda la masa del agregado. Un mezclado excesivo provocaría desprendimientos de ligante inicialmente adherido a la superficie de las partículas más gruesas.*
- 6.6** Concluido el mezclado, se deja la mezcla en reposo, si es necesario, hasta que se comience a observar la rotura de la emulsión (cambio de color y pérdida de movilidad). Si la rotura tarda mucho en producirse, la mezcla se puede guardar en bolsas de plástico cerradas, para evitar pérdida de humedad de compactación, durante el tiempo requerido (nota 6).

Nota 6: Si es necesario, se pueden calentar las bolsas con su contenido a una temperatura no mayor de 60° C, con el fin de acelerar la rotura de la emulsión. Normalmente, la rotura de la emulsión se inicia inmediatamente después de su mezcla con los agregados.

- 6.7** Se repite todo el proceso mencionado en los numerales 6.1 a 6.6 para la preparación de todas las mezclas necesarias para la confección de las probetas que se hayan previsto con los diferentes contenidos de asfalto residual. Se tendrá en cuenta que la cantidad de agua de pre- envuelta que se añada en cada caso se debe reducir al aumentar los contenidos de ligante residual (al aumentar la cantidad de emulsión aumenta la cantidad de agua que ella aporta). El contenido óptimo de fluidos de compactación COF (agua de pre- envuelta más la emulsión) debe permanecer constante.

Nota 7: Se deben preparar, al menos, mezclas para cuatro series de seis (6) probetas, variando el porcentaje de ligante residual: una serie con el óptimo teórico (L), otra con L - 1, otra L+1 y otra con L+2.

7 COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS

- 7.1** El molde, ligeramente engrasado en su interior mediante un trapo limpio impregnado con algunas gotas de aceite, se coloca sobre el pistón inferior, intercalando las dos varillas de soporte. Previamente a la colocación del molde, se intercala una bandeja entre la placa inferior de la prensa y el molde, cuya función será recoger el agua expulsada de la mezcla a través de los orificios laterales del molde en el proceso de compactación (nota 8). Se vierte aproximadamente la mitad de la mezcla semi- rota en el molde, distribuyéndola mediante 25 golpes aplicados con una espátula, aplicando los 15 primeros en la periferia y distribuyendo los restantes al azar; seguidamente, se añade el resto de la mezcla y se aplican en forma similar, otros 25 golpes con la espátula. En estas operaciones, la espátula deberá penetrar lo más profundamente posible en la mezcla, habiéndose encontrado ventajoso el empleo de una espátula con sus bordes redondeados. Finalmente, a la parte superior de la mezcla se le dará un acabado ligeramente cónico o esférico, para facilitar el asentamiento del pistón superior.

Nota 8: Durante la compactación de la probeta se estima si el proceso de rotura de la emulsión es adecuado o no, observando si el líquido expulsado no contiene asfalto o lo contiene, respectivamente.

- 7.2** A continuación, se coloca el pistón superior, y manteniendo todavía las varillas soporte intercaladas, se aplica sobre la mezcla una presión inicial o de asentamiento de 1 MPa (10 kgf/cm²) o de 150 lbf/pg², con objeto de asentar inicialmente la mezcla; se retiran entonces las dos varillas de soporte para compactar por el sistema de doble émbolo, y se comienza la compactación definitiva de la mezcla mediante la aplicación de una carga creciente,

regulando la velocidad lo más uniformemente posible, hasta alcanzar, en un tiempo de 2 a 3 minutos, una presión máxima de 20.7 MPa (210 kgf/cm²) o de 3000 lbf/pg², manteniendo esta presión sobre la mezcla durante 2 minutos. Para las probetas normalizadas de 101.6 mm (4") de diámetro, esta presión viene a representar una carga de unos 170 kN.

- 7.3** Las probetas se dejan en el molde por 24 horas y se extraen a continuación mediante cualquier dispositivo que permita deslizar la probeta de una manera suave y uniforme. Luego, se determina su masa con una precisión de 1 g (nota 9).

Nota 9: La extracción de las probetas de los moldes se puede realizar inmediatamente después de la compactación. No obstante, si la mezcla no ha adquirido aún suficiente consistencia, o se considera conveniente que el curado se inicie con ellas aún dentro de los moldes para que la eliminación del agua sea algo más lenta, esta operación se puede retrasar, dejando las probetas en sus moldes durante cierto tiempo a la temperatura ambiente o a la temperatura de curado.

- 7.4** *Gravedad específica de las probetas* – La determinación de la gravedad específica de las probetas se puede realizar una vez extraídas del molde. Al respecto, se puede seguir el procedimiento de la norma INV E-733.

8 CURADO DE LAS PROBETAS

- 8.1** Antes de ensayar cada serie de 6 probetas, se dividirán en dos grupos, de tal forma que la gravedad específica bulk promedio de ambos grupos sea sensiblemente igual.

- 8.2** Cada grupo debe ser sometido a un curado diferente, así:

8.2.1 *Grupo 1* – Las tres probetas de este grupo se curan durante 14 días en el baño de aire a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$) y con una humedad relativa del 50 %.

8.2.2 *Grupo 2* – Las probetas tres de este grupo se curan durante 7 días en el baño de aire y luego durante 7 días en el baño de agua a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$).

9 ENSAYO DE LAS PROBETAS

- 9.1** Terminado el período de curado, se coloca cada probeta en el centro de la placa de carga de la máquina de ensayo y se somete a compresión axial sin

soporte lateral, a una velocidad de deformación vertical constante equivalente a 1.3 mm/min (0.05"/min) por cada 25 milímetros (1") de altura de la probeta. Para las probetas normalizadas de 101.6 mm (4") de diámetro, este valor representa una velocidad de deformación de 5.08 mm/min (0.2"/min).

10 CÁLCULOS

10.1 Se determina la resistencia a compresión simple de cada probeta, dividiendo la carga máxima obtenida en el ensayo por el área de su sección transversal, (81.1 cm² para las probetas de 101.6 mm (4") de diámetro).

10.2 Como para cada grupo de ensayo se emplean tres probetas por cada incremento de asfalto residual, se toma el valor medio de las tres resistencias obtenidas como resultado del ensayo a la compresión simple para ese grupo.

Nota 10: Si algún valor individual de resistencia se aparta sensiblemente de los otros dos del grupo y se considera que incluirlo en el promedio altera la tendencia natural de los resultados del ensayo, no se deberá considerar para el cálculo del promedio. Si 2 o las 3 probetas presentan valores muy heterogéneos, se deberán preparar y ensayar nuevos especímenes con el contenido correspondiente de asfalto residual.

10.3 Se calcula la resistencia conservada para la serie de seis especímenes evaluados para cada porcentaje de ligante residual, así:

$$\text{Resistencia conservada (\%)} = \frac{R_2}{R_1} \times 100 \quad [622.6]$$

Donde: R_1 : Resistencia a compresión de los especímenes curados en seco (grupo 1);

R_2 : Resistencia a compresión de los especímenes sometidos a inmersión en agua (grupo 2).

10.4 Representación gráfica – Se dibujan tres curvas (Figura 622 - 1):

10.4.1 Una que relacione el contenido de emulsión (o de asfalto residual) de cada juego de probetas contra la resistencia a la compresión para las probetas curadas en seco (grupo 1).

10.4.2 Otra que relacione el contenido de emulsión (o de asfalto residual) de cada juego de probetas contra la resistencia a la compresión para las probetas sometidas a inmersión (grupo 2).

10.4.3 La tercera, relacionando el contenido de emulsión (o de asfalto residual) de cada juego de probetas contra la resistencia conservada.

10.5 *Selección del contenido óptimo de emulsión* – El contenido óptimo de emulsión se determinará a partir de las tres curvas mencionadas en el numeral 10.4, tomando como referencia las resistencias mínimas a compresión y conservada que establezca la especificación aplicable al diseño.

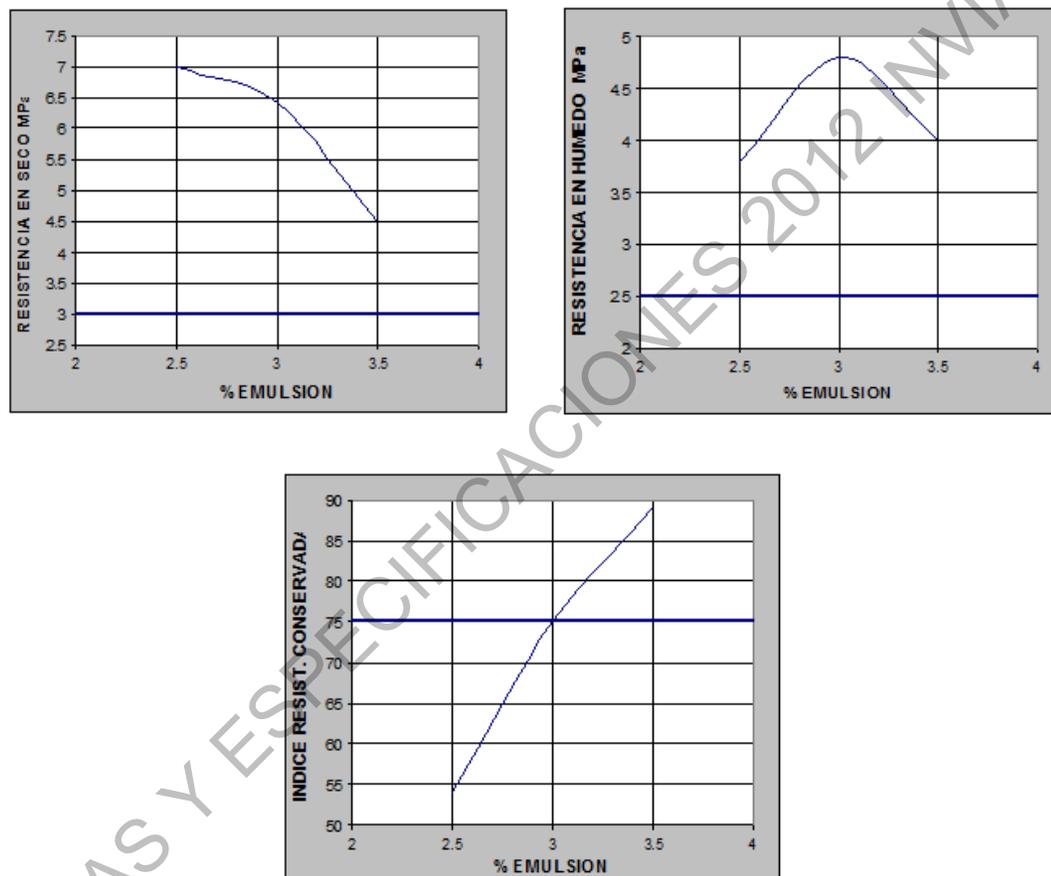


Figura 622 - 1. Curvas porcentaje de emulsión versus resistencia

11 NORMAS DE REFERENCIA

NLT-389/00

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS

