

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 inconfinada o el índice de plasticidad.

Nota 2: Algunos subproductos industriales altamente alcalinos (polvo 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 $[Ca(OH)_2]$ o una mezcla de hidróxido de calcio y óxido de magnesio (MgO) o hidróxido de magnesio $[Mg(OH)_2]$.
- 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, $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 25°C	1.0
Resistividad eléctrica, mínimo, $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 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

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			
Dióxido de carbono (medido en la fábrica): 5.0 % máximo	No deberá tener un retenido mayor de 3% en el tamiz de $600 \mu\text{m}$ (No. 30), ni mayor de 25 % en el tamiz de $75 \mu\text{m}$ (No. 200)		Deberá pasar, en su totalidad, el tamiz de 25 mm (1")
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:

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

[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 enfrian 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).

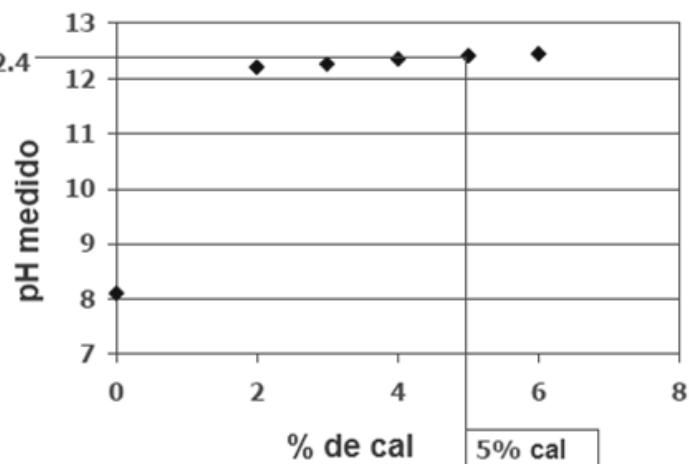


Figura 601 - 2. Variación del pH con el porcentaje de cal

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 Ca(OH)₂.

11.2 Se convierte el porcentaje de cal usada como cal viva (CaO) a porcentaje de cal como cal hidratada [Ca(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