

➤ **RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO CAL**

**S0601. RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO CAL (AASHTO  
T220)**

**OBJETIVO**

---

Este método se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión inconfinada de mezclas de suelo estabilizado con cal.

**EQUIPOS Y MATERIALES**

---

**Equipos**

1. Pisón automático, que es un dispositivo de compactación con placa de base para sostener moldes de 152 mm (6") de diámetro interior, equipado con un pisón de 4,5 kg (10 lb) y una altura de caída ajustable. La caída del pisón será de 457 mm (18"), y la cara con la cual golpea será un segmento de 40°, de un círculo de 76 mm (3") de radio.

Deberá suministrarse el pisón automático con una placa base extra para sostener el molde durante el alistamiento de la parte superior del espécimen.
2. Molde de compactación con collar removible de 152 mm (6") de diámetro interior, y 215 mm (8½") de altura.
3. Dispositivo de medida para la altura del espécimen, consistente en un dispositivo dial micrométrico con un juego normal de bloques espaciadores.
4. Balanza de 18,1 Kg. (40 lb.) de capacidad, con precisión de 0,0005 Kg. (0.001 lb.).
5. Prensa hidráulica, para sacar por extrusión los especímenes del molde.
6. Horno para el secamiento, controlado desde  $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $140 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) hasta  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ).
7. Bandejas metálicas, anchas y poco profundas, para mezclar y secar materiales, y recipientes rectangulares de acero inoxidable de aproximadamente 230 x 405 x 57 mm de profundidad (9" x 16" x 2/4"), equipados con placas porosas espaciadoras.
8. Piedras porosas circulares ligeramente menores de 152 mm (6") de diámetro y de 51 mm (2") de altura.
9. Celdas axiales, constituidas por cilindros livianos de acero inoxidable de 171 mm (6 3/4") de diámetro interior y de 305 mm (12") de altura, con válvula normal de aire continua, con membrana tubular de caucho de 152 mm (6") de diámetro.
10. Bomba para vacío, de 20 a 35 litros por minuto, (l/min) o aspirador.
11. Compresor de aire, de 4,7 a 7,1 litros por segundo (l/s) (10 a 15 pies cúbicos por minuto) con tanques de almacenamiento de 227 litros (60 galones) y controles reguladores de presión (manómetros y válvulas).
12. Cámara húmeda equipada con estantes y un suministro de presión constante de aire.
13. Deformímetro micrométrico con dial hasta 0,02 mm (0.001") con soporte para medir la deflexión del espécimen.
14. Una provisión de pesas guías para sobrecarga, de 2 1/4 y 4 1/2 kg (5 y 10 lb).
15. Anillos de carga calibrados u otros dispositivos para medir fuerza continua, de acuerdo con la AASHTO T 67. Verificación de máquinas de ensayo, excepto que se tolera un error de más o menos el 2%
16. Dispositivo de medida para la circunferencia, tal como una cinta metálica.
17. Prensa y dispositivo con gato de tornillo u otra prensa adecuada para ensayo, con su dial y con dos bloques de carga.

18. Tamices con aberturas cuadradas, de 75 mm (3"), 63 mm (2 ½"), 50 mm (2"), 45 mm (1 ¾"), 31,5 mm (1 ¼"), 22,4 mm (7/8"), 16 mm (5/8"), 12,5 mm (1/2"), 9,5 mm (3/8"), 4,75 mm (No 4), 2,00 mm (No 10), 0,850 mm (No 20) y 0,425 mm (No 40).
19. Pulverizador mecánico ajustable a la luz del plato de rotación.
20. Agitador mecánico para tamices, un agitador mecánico de laboratorio para tamices de 0,14 litros (½ pie<sup>3</sup>) es conveniente, pero no absolutamente necesario, para separar material para volver a combinar especímenes.
21. Una provisión de pequeñas herramientas y accesorios tales como un mortero metálico con borde de madera, pisón metálico forrado con caucho, martillo de cuero, espátulas, cucharas, palustres, tubos de sifón, recipientes para muestras, cajas de cartón, papeles de filtro de 510 por 510 mm (20 x 20").

#### Materiales

22. Una provisión de cal.
23. Agua de buena calidad.

### PREPARACION DEL SUELO

---

24. Escójase un mínimo de 91 Kg. (200 lb.) de muestra representativa para ensayo.
25. Extiéndase la muestra sobre un piso seco y limpio para secarla al aire libre o mediante corrientes forzadas de aire caliente.
26. Los grumos o terrones duros de arcilla, en suelos que no contengan cantidades apreciables de partículas gruesas deberán triturarse de manera que pasen por el tamiz de 2,00 mm (No.10) sin romper las partículas gruesas. El resto deberá pasarse sobre el tamiz de 850 µm (No.20) y deberán determinarse los porcentajes retenidos y que pasan dicho tamiz.
27. Arcillas y otros suelos que contengan partículas gruesas deberán disgregarse para que pasen por el tamiz de 4,75 mm (No.4) sin romper las partículas gruesas. Podrá efectuarse esto mediante un martillo plástico, o un martillo cubierto con caucho, o por medio de herramientas manuales similares. El material deberá separarse luego en la siguiente forma:

Materiales con partículas gruesas (piedra triturada, grava, arena y caliche), deberán tamizarse en seco sobre los siguientes tamices: 45 mm (1 ¾"), 31,5 mm (1 ¼"), 22,4 mm(7/8") 16 mm (5/8"), 9,5 mm (3/8"), 4,75 mm (No.4) y 2 mm (No.10), para separar los diferentes tamaños del material. Recójase todo el material que pase el tamiz de 2 mm (No.10). El material que pase el tamiz de 45 mm (1 ¾") se emplea para elaborar especímenes. Mézclense sobre el piso, todo el material menor de 2 mm (No.10) hasta que quede uniformemente mezclado con respecto al color, apariencia y contenido de humedad.

28. Pésese el material de cada fracción y calcúlense los porcentajes acumulados retenidos sobre cada tamiz y el porcentaje que pasa el tamiz de 2,00 mm (No.10). Estos valores no se emplean como datos del análisis granulométrico verdadero, sino que se usan para recombinar porciones que aseguren la gradación uniforme dentro de cada espécimen.
29. Sobre la base de porcentajes acumulados sobre tamices, obtenidos en el numeral 26, calcúlense y pésense 4,5 Kg. (10 lb.), de muestras representativas para un análisis granulométrico y determinación de los límites. Esta muestra de 4,5 Kg. (10 lb.) se prepara para ser ensayada por el método S0205. No deberá emplearse rodillos, tornos ni dispositivos que puedan alterar las partículas gruesas. Después de la preparación de la muestra mediante el método húmedo, se efectuarán los siguientes ensayos:
  - a) Análisis granulométrico:
  - b) Límite líquido
  - c) Límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP)

### DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CAL

---

30. Entrese con el índice de plasticidad y con el porcentaje que pasa por el tamiz de 425 µm (No.40), determinado en el punto "Preparación del suelo", del suelo no tratado, en la Figura S0601\_1 y determíñese el porcentaje que debe agregarse al suelo.

## PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO MAXIMO Y DE LA HUMEDAD ÓPTIMA

---

31. Determíñese el porcentaje de humedad higroscópica del suelo a partir de una muestra representativa usando el método S0301. Estímese el peso de material seco al aire que, cuando se humedezca y compacte, llene el molde de 152 mm (6") de diámetro interior hasta una altura de 203,2 mm (8"). Empleando este peso estimado y la granulometría secada al aire, calcúlense los pesos acumulados de cada tamaño para combinarlos y formar el espécimen de 152 mm (6") de diámetro y 203,2 (8") de altura. La cantidad de cal que se empleará, será el porcentaje del punto "Determinación del porcentaje de Cal", y se basa en el peso unitario seco del suelo.
32. Pése el material que se calculó en el numeral 30. Manténgase la fracción de partículas gruesas separadas de (1) el material que pasa tamiz de 2 mm (Nº 10) para bases flexibles, y (2) los terrones de arcilla y lo que pasa el tamiz de 0,85 mm (Nº 20) para materiales finos.
33. Calcúlese el peso de agua que debe agregarse con base en el peso seco del suelo y pése en un recipiente tarado.
34. Para preparar la mezcla de suelo cal para el ensayo de humedad peso unitario, pése la cal con la porción de material que pasa por el tamiz de 2,00 mm (Nº 10). Humedézcase la porción mayor de 2 mm con parte o con toda la cantidad de agua pesada (dependiendo de la humedad que tenga la porción de material mayor de 2 mm; agítense y humedézcanse las partículas gruesas completamente. Déjese asentar hasta que el agua libre de la superficie haya sido absorbida.
35. Vacíese el material que pasa por tamiz de 2 mm (No.10) o el de 850 µm (No.20), sobre la fracción húmeda de la muestra y distribúyase. Usando un palustre, mézclese hasta lograr uniformidad.

Cuidando de no perder material, manténgase la bandeja de mezcla cubierta, para evitar pérdida de agua por evaporación. Para conseguir una distribución uniforme e ideal en suelos arcillosos, pásese el material por un tamiz de 6,30 mm ( $\frac{1}{4}$  ").

36. Calcúlese y pése el material requerido para una capa. Este deberá ser  $\frac{1}{4}$  de peso de la mezcla húmeda. Colóquese esta capa en el molde usando espátulas, a mano, o con herramientas especiales, evitando la segregación de las partículas gruesas o de los finos. En materiales para bases o en otros materiales con partículas gruesas, colóquense algunos finos en exceso, en una primera capa de alrededor de 12,7 mm (0.5") de espesor, flojamente sobre el fondo de la superficie plana y empíécese luego con las partículas grandes, disminuyendo tamaños, hasta terminar con finos para asegurar una capa densa. En las capas sucesivas, se requiere un espesor suelto de finos menor que en la primera capa.

Este procedimiento asegura fondo cerrado para cada capa. Nívélése la capa a mano o con espátula y compáctese empleando un esfuerzo de compactación de 50 golpes ajustados exactamente a 457 mm (18") de caída con el martillo en 4,5 Kg. (10 lb.). Manténgase la cara del martillo limpia de material pegajoso o adherido, repítase esto hasta que las cuatro capas estén compactadas.

37. Despues de que la última capa haya sido compactada, asegure el molde que contiene el espécimen, sobre la placa de base extra y alíse la parte superior por medio de herramientas manuales, tales como un cuchillo o una regla, un mazo plástico una placa circular de acero con superficie plana pulida. Úsese un nivel de mano para comprobar que la superficie del espécimen es plana y que está a nivel con la parte superior del molde que la forma. No debe recortarse el espécimen.

Después de que la capa final haya sido compactada y de que se le haya dado el acabado manual del espécimen, deberán aplicarse los golpes (con martillos manuales), que a continuación se indican para completar el acabado.

No. de Golpes por capa	Clase de martillo	No. de golpes y descripción
15 - 20	Martillo de 0,454 a 0,907 kg (1 - 2 lbs)	2-4 golpes de "picotazo"
25	Martillo plástico de 0,454 a 0,907 kg (1-2 lbs)	5 a 10 ligeros
	Martillo de cuero de 1,814 a 2,268 kg (4-5 lbs)	2 medianamente firmes
50 o más	Martillo plástico de 0,454 a 0,907 kg (1-2 lbs)	5 a 10 ligeros
	Martillo de cuero 1,814 a 2,266 kg (4-5 lbs)	5 firmes

38. Remuévase el molde de la placa de base, pése el espécimen en el molde con precisión de 0,5 g (0.001 lbs) y mídase la altura con precisión de 0,0245 mm (0.001"). Anótense los datos.

39. Céntrese cuidadosamente el espécimen sobre una piedra porosa y colóquese en la prensa para sacar por extrusión el espécimen moldeado. Empújese sobre la piedra del fondo y hacia arriba del molde.
40. Colóquese el espécimen en una cazuela grande tarada, rómpase a mano el material, o empleando herramientas manuales convenientes y séquese en el horno hasta peso constante a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{C}$ ).
41. Si fuere necesario, ajústese el peso del material para obtener una altura de 203 mm (8") en el espécimen, varíese la cantidad de agua de moldeo y repítanse las operaciones de arriba empleando bachadas individuales para cada espécimen con el fin de obtener varios puntos para una buena curva de humedad peso unitario.

Determínese la humedad óptima y el peso unitario máximo para la mezcla de suelo-cal.

## COMPACTACIÓN DEL ESPECIMEN DE ENSAYO

---

42. Compáctense 3 especímenes de 152 mm (6") de diámetro y de 203 mm (8") de altura con el contenido de humedad óptimo y con el peso unitario hallado en el punto "Procedimiento para la determinación del peso unitario máximo y de la humedad óptima". Los especímenes de suelo tratado con cal para subrasante o para bases flexibles deberán compactarse en una forma tan idéntica, como sea posible. Los datos para estos especímenes así como los obtenidos en los siguientes procedimientos de ensayo deberán registrarse.

## CURADO PARA LOS ESPECIMENES DE ENSAYO

---

43. Inmediatamente después de sacar por extrusión el espécimen del molde con la piedra porosa del fondo, colóquese dentro de una celda triaxial. Almacénense los especímenes a la temperatura ambiente durante 7 días.
44. Después del curado húmedo, retírense las celdas y colóquense los especímenes en un secador de aire a una temperatura que no exceda de  $60^\circ\text{C}$  ( $140^\circ\text{F}$ ) por aproximadamente 6 horas o hasta que 1/6 de la humedad de moldeo haya sido removida. Todos los suelos tratados con cal se secan de esta forma, aún cuando ocurra un considerable agrietamiento. Déjense enfriar las muestras por lo menos durante 8 horas antes de continuar con el ensayo.
45. Pésense y midanse los especímenes y sométanse a capilaridad durante 10 días mediante el método que se describe a continuación.

## SOMETIMIENTO DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYO A CAPILARIDAD

---

46. Los especímenes son sometidos a capilaridad durante 10 días en la siguiente forma:
47. No deben removerse las piedras porosas de los especímenes hasta después de que éstos hayan sido ensayados. Córtense una pieza de papel de filtro, de 250 por 500 mm (10 x 20") de tamaño, dóblese hasta 125 por 500 mm (5 x 20") y efectúense algunos cortes con tijeras (a la manera de una calabaza cortada que remede una cabeza). Estos cortes evitarán cualquier restricción por medio del papel. Envuélvase el papel de filtro alrededor del espécimen y de las piedras y asegúrese con una pequeña pieza de cinta de celofán. Reinstálese la celda triaxial.
48. Colóquense los especímenes dentro de las bandejas rectangulares proporcionadas para absorción capilar y ajústese el nivel del agua sobre las piedras porosas hasta una altura de 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ ") por debajo de fondo de los especímenes.
49. Conéctese cada celda a la fuente de aire y ábrase la válvula para aplicar una presión lateral constante de 6,89 kPa (1 psi). Manténgase constante esta presión durante el período de absorción.
50. Colóquese una sobrecarga de control adecuada (la cual dependerá del uso propuesto o de la ubicación del material en la carretera), sobre la piedra porosa superior. Para bases flexibles empleese  $35,2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\frac{1}{2} \text{ lb/pulgada}^2$ ) y para subrasantes empleese  $70,2065 \text{ kg/cm}^2$  ( $1 \text{ lb/pulgada}^2$ ) del área del extremo del espécimen. Considéruese el peso de la piedra porosa superior como parte del peso de sobrecarga.

## **PREPARACIÓN DE LOS ESPECIMENES PARA ENSAYO**

---

51. Los especímenes que se someten a 10 días de capilaridad deberán prepararse en la siguiente forma:
  - a) Desconéctese la manguera de aire de la celda, remuévase el peso de sobrecarga y devuélvanse los especímenes al laboratorio para ensayo.
  - b) Úsese un vacío y desínflese la membrana de caucho para ayudar a la remoción de la celda de los especímenes y deséchese el papel de filtro. Si alguna cantidad de material apreciable se
52. Especímenes que se mantengan durante la noche en celdas, deberán prepararse de la siguiente forma:
  - a) Empléese un vacío y desínflese la membrana de caucho para ayudar a la remoción de la celda de los especímenes. Cualquier material que cuelgue de la membrana presiónese hacia atrás dentro de los huecos disponibles laterales y guárdese para colocarlo en el espécimen cuando esté seco.
  - b) Mídase el espécimen como en el primer párrafo y reemplácese la celda.

## **ENSAYE DE ESPECIMENES**

---

53. En resumen, los especímenes son ensayados a compresión mientras están sometidos a la presión lateral constante asignada. La prensa motorizada se gradúa para que tenga un recorrido a una tasa de 3,3 a 3,8 mm (0,13 a 0,15") por minuto. Deberán tomarse lecturas simultáneas de carga y deformación a intervalos de deformación de 0,25 mm (0,01"), hasta que falle la muestra.
54. Se libera el mecanismo de transmisión de la prensa y se baja el émbolo suficientemente para permitir la colocación del espécimen, los bloques metálicos de carga y el dial del deformímetro.
55. Céntrese el espécimen con los bloques metálicos de carga en la parte superior e inferior de la prensa. Ajústese el deformímetro de tal manera que se apoye contra el centro del bloque espaciador superior y comprimiéndolo casi toda la longitud del recorrido del vástagos. El deformímetro debe colocarse en esta posición puesto que el espécimen se mueve hacia afuera durante la compresión. Colóquese el dial del deformímetro en cero.
56. Colóquese la carcaza acampanada sobre el medidor de deformación y ajústese de tal manera que no toque el medidor ni sus soportes. Debe notarse en este punto que el esfuerzo de compresión necesariamente será aplicado en dirección de una línea vertical a través del centro de la bola que se monta en la parte superior de la carcaza acampanada. Ya que es deseable aplicar la fuerza de compresión a lo largo del eje vertical del espécimen de ensayo, desvíese lateralmente la carcaza acampanada, para llevar directamente la bola sobre el eje del espécimen. Levántese la prensa por medio del motor, alinéese y asiéntese la bola colocada sobre la carcaza acampanada dentro de la cuenca del anillo de carga. Luego, aplíquese suficiente presión para obtener una lectura perceptible sobre el manómetro del anillo de carga. Léase el deformímetro y anótese esa lectura, como deformación bajo carga muerta.
57. Conéctese la línea de aire a la celda axial y aplíquese presión lateral al espécimen. Las presiones laterales empleadas para una serie de ensayos son 0, 21, 34, 69, 103 y 138 kPa (0, 3, 5, 10, 15 y 20 psi). En los casos en los cuales la carga o el esfuerzo sean tan altos como de 1,207 a 1,241 kPa (175 a 180 psi) para los especímenes ensayados a presiones laterales de 104 kPa (15 psi), empléense 48 kPa (7 psi) en lugar de 138 kPa (20 psi) para el último espécimen. La presión lateral aplicada mediante aire tenderá a cambiar la lectura inicial del deformímetro. A medida que se ajuste la presión del aire, iníciense momentáneamente el motor para comprimir el espécimen hasta que el deformímetro lea lo mismo que se anotó según el numeral 54. Léase el manómetro del anillo de carga y anótese este valor en la columna de carga, enfrentado a la lectura de deformación inicial.
58. Acciónese el motor y léase la lectura del anillo de carga cada 0,25 mm (0,01") de deformación del espécimen. Continúese hasta que se hayan tomado un mínimo de 60 lecturas, a menos que antes ocurra la falla. La falla se produce cuando la lectura del anillo de carga permanece constante o cuando disminuye con incrementos posteriores de deformación. Al ensayar especímenes con partículas gruesas, el deslizamiento y corte de las partículas gruesas ocasionará disminuciones temporales en las lecturas del anillo de carga. El ensayo deberá continuarse hasta que se haya alcanzado la falla verdadera. Después de 60 lecturas, la sección transversal del espécimen se ha aumentado de tal manera que un incremento pequeño subsiguiente de la lectura de carga, es poco mayor que el incremento en la tensión de la membrana que actúa como presión lateral

59. Todos los procedimientos descritos arriba se aplican al espécimen inconfinado, excepto que no se usa aire ni celda axial. Para materiales que contienen una gran cantidad de partículas gruesas, compáctense y ensáyense dos especímenes con una presión lateral de cero (0). Empléese el promedio de los resultados de los ensayos, a menos que aparezcan piedras grandes que hayan creado puntos de apoyo: en este caso úsese el valor más alto.

## CÁLCULOS

---

60. Obtención del peso seco de especímenes y piedras.

El espécimen y las piedras porosas se retiran de la celda sobre una bandeja tarada para secado. Empléese una espátula para limpiar el material del interior de la celda y de las piedras porosas. Rómpase el espécimen en la bandeja para secar teniendo cuidado de no perder nada del material y colóquesele una tarjeta de identificación.

Séquese el material hasta peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ) y determínese el peso seco.

Cuando los especímenes hayan sido sometidos durante la noche a capilaridad, pésense las piedras húmedas, séquense a  $60^\circ\text{C}$  ( $140^\circ\text{F}$ ) hasta peso constante y anótense dichos pesos.

61. Calcúlese el volumen en metros<sup>3</sup> (pies<sup>3</sup>) para una altura de 25,4 mm (1") de molde, en la siguiente forma:

$$V = \frac{\text{Área del molde en } \text{mm}^2 \text{ (pulgada}^2\text{)} \times 25.4 \text{ mm (1 pulgada)}}{1000 (1728)}$$

62. Calcúlese el volumen de los especímenes como fueron moldeados, multiplicando el valor obtenido en el párrafo anterior por la altura del espécimen.

63. Calcúlese el peso unitario seco en la siguiente forma:

$$\text{Peso unitario seco} = \frac{\text{Peso seco del espécimen}}{\text{Volumen del espécimen}}$$

64. Calcúlese el esfuerzo de compactación para una capa de 50,8 mm (2") expresada en N·m (lb-pie/pie<sup>3</sup>).

$$\text{esfuerzo de compactación} = \frac{\# \text{ golpes} \times \text{peso del martillo} \times \text{caída del martillo}}{\text{Volumen de la capa del material}}$$

Multiplíquese por 1728 para obtenerlo en lb.-pie/pie<sup>3</sup>

65. Calcúlese el porcentaje de humedad de moldeo en la siguiente forma:

$$\text{Humedad de moldeo en porcentaje} = \frac{\frac{\text{Peso del espécimen} - \text{peso del espécimen}}{\text{humedo}}}{\text{Peso del espécimen seco}} \times 100$$

66. Calcúlese el porcentaje de humedad después de que los especímenes han sido sometidos a capilaridad empleando la fórmula

$$RC = \frac{Wa - Wb - Wd}{Wd} \times 100$$

Donde:

$Wa$  = Peso húmedo del espécimen y de las piedras después de la capilaridad.

$Wb$  = Peso húmedo de las piedras

$Wd$  = Peso seco del espécimen

67. Calcúlense los valores de esfuerzos y deformaciones para cada espécimen individual a partir de las relaciones siguientes:

$$S = \frac{d}{h} \times 100$$

Donde:

$S$  = Porcentaje de deformación

$d$  = Deformación vertical total en el instante dado

$h$  = Altura del espécimen medido después de que éste se ha removido de la capilaridad.

$$P = \frac{P}{A} \times 1 - \frac{S}{100}$$

$p$  = Esfuerzo vertical unitario corregido. Se hace necesaria la corrección a causa de que el área de la sección transversal aumenta a medida de que el espécimen se reduce en altura. El supuesto hecho es que el espécimen se deforma a un volumen constante.

$P$  = Carga vertical total sobre el espécimen para una deformación dada. Es igual a la suma de la carga aplicada medida por el anillo de carga, más el peso muerto de la piedra porosa superior, el bloque de carga y la carcaza del dial.

$A$  = Área extrema del espécimen cilíndrico al comienzo del ensayo.

68. Dibújese una curva de humedad peso unitario.



