

## 2.2. DETERMINACION DE LA DENSIDAD IN SITU.

El ensayo permite obtener la densidad de terreno y así verificar los resultados obtenidos en faenas de compactación de suelos, en las que existen especificaciones en cuanto a la humedad y la densidad.

Entre los métodos utilizados, se encuentran el método del cono de arena, el del balón de caucho e instrumentos nucleares entre otros.

Tanto el método del cono de arena como el del balón de caucho, son aplicables en suelos cuyos tamaños de partículas sean menores a 50 mm. y utilizan los mismos principios, o sea, obtener el peso del suelo húmedo (P hum) de una pequeña perforación hecha sobre la superficie del terreno y generalmente del espesor de la capa compactada. Obtenido el volumen de dicho agujero (Vol. Exc), la densidad del suelo estará dada por la siguiente expresión:

$$\gamma_{hum} = P_{hum} / Vol. Exc \quad ( grs/cc )$$

Si se determina luego el contenido de humedad (w) del material extraído, el peso unitario seco será:

$$\gamma_{seco} = \gamma_{hum} / ( 1 + w ) \quad ( grs/cc )$$

**2.2.1. Método del cono de arena según NCh 1516 Of. 1979.** Es el método lejos más utilizado. Representa una forma indirecta de obtener el volumen del agujero utilizando para ello, una arena estandarizada compuesta por partículas cuarzosas, sanas, no cementadas, de granulometría redondeada y comprendida entre las mallas N° 10 ASTM (2,0 mm.) y N° 35 ASTM (0,5 mm.).

- Equipo necesario.

- Aparato cono de arena, compuesto por una válvula cilíndrica de 12,5 mm. de abertura, con un extremo terminado en embudo y el otro ajustado a la boca de un recipiente de aproximadamente 4 lts. de capacidad. El aparato deberá llevar una placa base, con un orificio central de igual diámetro al del embudo (figura 2.11.).
- Arena estandarizada, la cual deberá ser lavada y secada en horno hasta masa constante. Generalmente se utiliza arena de Ottawa, que corresponde a un material que pasa por la malla N° 20 ASTM (0,85 mm.) y queda retenida en la malla N° 30 ASTM (0,60 mm.).
- Dos balanzas, de capacidad superior a 10 kgs. y 1000 grs., con precisión de 1 gr. y de 0,01 gr. Respectivamente.
- Equipo de secado, podrá ser un hornillo o estufa de terreno.
- Molde patrón de compactación de 4" de diámetro y 944 cc. de capacidad.

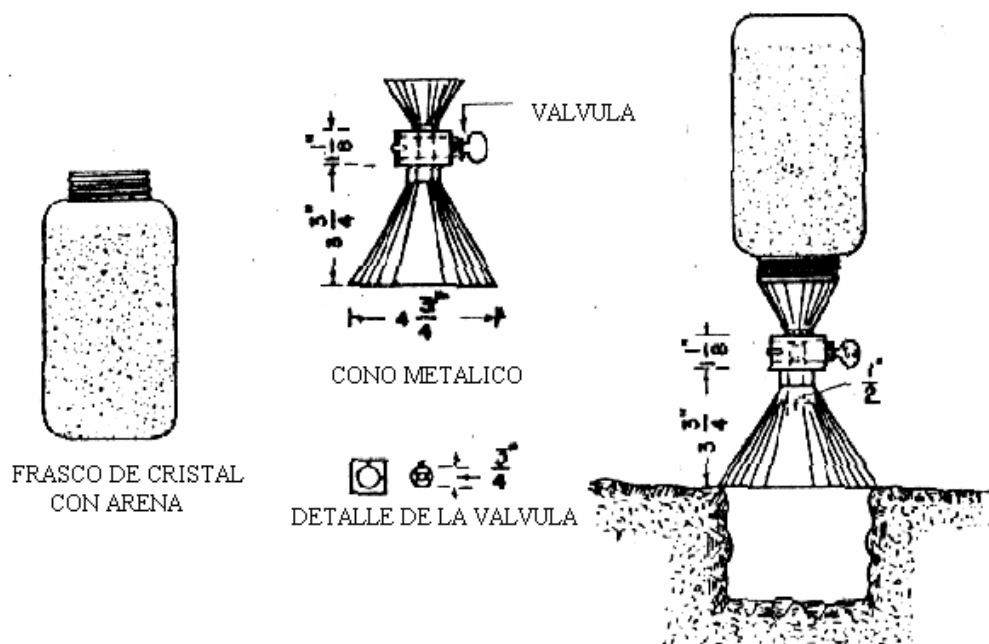


Figura 2.11. Equipo de densidad in situ.  
Fuente: Valle Rodas R., 1982.

- Herramientas y accesorios. Recipientes herméticos con tapa, martillo, cincel, tamices, poruña, espátula, brocha y regla metálica.

- Procedimiento.

- Determinación de la densidad aparente suelta de la arena estandarizada. Se pesa el molde de compactación ( $W_1$ ) con su base ajustada y se verifica su volumen ( $V_1$ ).

Se coloca el molde sobre una superficie plana, firme y horizontal, montando en él la placa base y el aparato de densidad, procurando que la operación sea similar a la que se desarrollará en terreno.

Luego se abre la válvula y se deja escurrir la arena hasta llenar el molde, se cierra la válvula, se retiran el aparato de densidad y la placa base y se procede a enrasar cuidadosamente el molde, sin producir vibración, registrando el peso del molde más la arena que contiene. Esta operación se repetirá hasta obtener, a lo menos, tres pesadas que no difieran entre sí más de un 1%.

Promediando los valores, se obtiene el peso del molde con arena ( $W_2$ ) y se determina la densidad aparente suelta de la arena.

- Determinación del peso de arena necesario para llenar el cono y el espacio de la placa base. Se llena el aparato de densidad con arena registrando el peso del conjunto ( $W_3$ ).

Luego se coloca la placa base sobre una superficie plana, firme y horizontal, montando en ella el aparato de densidad. Se abre la válvula y se espera hasta notar que la arena ha parado de fluir, momento en el cual se cierra la válvula.

Finalmente se registra el peso del aparato de densidad más la arena remanente ( $W_4$ ). Esta operación se repetirá para obtener un segundo valor que se promediará con el anterior y por diferencia de pesos se obtendrá la masa de arena que llena el cono y el espacio de la placa base ( $W_5$ ).

- Determinación del volumen del agujero. Nivelada la superficie a ensayar, se coloca la placa base y se procede a excavar un agujero dentro de la abertura de ésta. El volumen de suelo más o menos a remover, será el indicado en la tabla de la figura 2.12., la cual esta en función del tamaño máximo de las partículas del suelo. Este material extraído será depositado dentro de un recipiente hermético.

Luego se pesa el aparato de densidad con el total de arena ( $W_8$ ), el que es puesto enseguida sobre la abertura de la placa base y se abre la válvula dejando escurrir la arena hasta que se detenga, momento en el cual se cierra la válvula y se determina el peso del aparato de densidad más la arena remanente ( $W_9$ ).

Finalmente, se recupera la arena de ensaye desde dentro del agujero y se deja en un envase aparte, de modo de reacondicionarla para poder volver a utilizarla en otra toma de densidad.

Tamaño máximo de las partículas del suelo (mm.)	Tamaño mínimo de la perforación (cm <sup>3</sup> )	Tamaño mínimo de la muestra para determinar la humedad (grs.)
50	2800	1000
25	2100	500
12,5	1400	250
5	700	100

Figura 2.12. Tabla de valores mínimo y máximo para determinar humedad.  
Fuente: NCh 1516 Of. 1979.

- Determinación de la masa seca de material extraído. El material removido se deposita en un recipiente hermético al que previamente se le determinó su peso ( $W_6$ ). El conjunto se pesa para obtener el peso del material más el recipiente ( $W_7$ ).

Luego, dentro del recipiente se mezcla el material y se obtiene una muestra representativa ( $W_{10}$ ) según la tabla 2.12. para determinar mediante secado a estufa en terreno, el peso de la muestra seca ( $W_{11}$ ) y por ende su humedad ( $w$ ).

Finalmente, se extrae otra muestra representativa la que se deposita dentro de un envase sellado para obtener la humedad en laboratorio, la que se compara con la de terreno.

- Cálculos.

- Calcular la densidad aparente suelta (DAS) o peso unitario suelto de la arena, mediante la siguiente expresión:

$$DAS = (W_2 - W_1) / V_1 \quad (\text{grs/cc})$$

donde:

$W_1$  = peso del molde de compactación (grs.)  
 $W_2$  = peso del molde más arena estandarizada (grs.)  
 $V_1$  = volumen del molde de compactación (cc.)

- Calcular el peso de arena ( $W_5$ ) para llenar el cono y el espacio de la placa base, mediante la siguiente expresión:

$$W_5 = W_3 - W_4 \quad (\text{grs})$$

donde:

$W_3$  = peso aparato de densidad lleno de arena (grs.)  
 $W_4$  = peso aparato de densidad con arena remanente (grs.)

- Calcular el contenido de humedad ( $w$ ) del material removido:

$$w = (W_{10} - W_{11}) / W_{11} * 100 \quad (\%)$$

donde:

$W_{10}$  = peso de la muestra representativa húmeda (grs.)  
 $W_{11}$  = peso de la muestra representativa seca (grs.)

- Calcular el peso del material seco extraído ( $W_{12}$ ):

$$W_{12} = ( W_7 - W_6 ) / ( w + 100 ) * 100 \quad ( \% )$$

donde:

$W_6$  = peso del recipiente hermético (grs.)

$W_7$  = peso del recipiente hermético más el suelo húmedo (grs.)

- Calcular el volumen ( $V$ ) del material extraído:

$$V = ( W_8 - W_9 - W_5 ) / DAS \quad ( cc )$$

donde:

$W_8$  = peso del aparato de densidad lleno de arena (grs.)

$W_9$  = peso del aparato de densidad con arena remanente (grs.)

- Calcular el peso unitario o densidad seca in situ ( $\gamma_d$ ) del material extraído, mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_d = W_{12} / V \quad ( grs/cc )$$

#### - Observaciones.

- Generalmente es deseable contar con una arena uniforme o de un solo tamaño para evitar problemas de segregación, de modo que con las condiciones de vaciado pueda lograrse la misma densidad, del suelo que se ensaya.
- En el momento de ensayo en terreno, se debe evitar cualquier tipo de vibración en el área circundante, ya que esto puede provocar introducir un exceso de arena en el agujero.
- En suelos en que predominan las partículas gruesas es recomendable determinar la humedad sobre el total del material extraído.

**2.2.2. Método con densímetro nuclear.** La determinación de la densidad total ó densidad húmeda a través de este método, está basada en la interacción de los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva y los electrones de las órbitas exteriores de los átomos del suelo, la cual es captada por un detector gamma situado a corta distancia de la fuente emisora, sobre, dentro o adyacente al material a medir.

Como el número de electrones presente por unidad de volumen de suelo es proporcional a la densidad de éste, es posible correlacionar el número relativo de rayos gamma dispersos con el número de rayos detectados por unidad de tiempo, el cual es inversamente proporcional a la densidad húmeda del material. La lectura de la intensidad de la radiación, es convertida a medida de densidad húmeda por medio de una curva de calibración apropiada del equipo.

Existen tres formas para hacer las determinaciones, retrodispersión, transmisión directa y colchón de aire, entregando resultados satisfactorios en espesores aproximados de 50 a 300 mm.(figura 2.13.).

Estos métodos son útiles como técnicas rápidas no destructivas siempre y cuando el material bajo ensaye sea homogéneo.

- Calibración del equipo.

- Curvas de calibrado. Estas se establecen determinando la razón de conteo nuclear de cada uno de varios materiales de densidades conocidas, trazando la razón de conteo contra densidad y ajustando una curva a través de los puntos resultantes. El método usado para establecer la curva, es el mismo que se usa para determinar la densidad in situ. La densidad de los materiales usados para establecer la curva (como por ejemplo bloques de granito, aluminio, magnesio, caliza, etc.), deben ser uniformes y variar dentro de un rango de densidades que incluya la del suelo a medir.

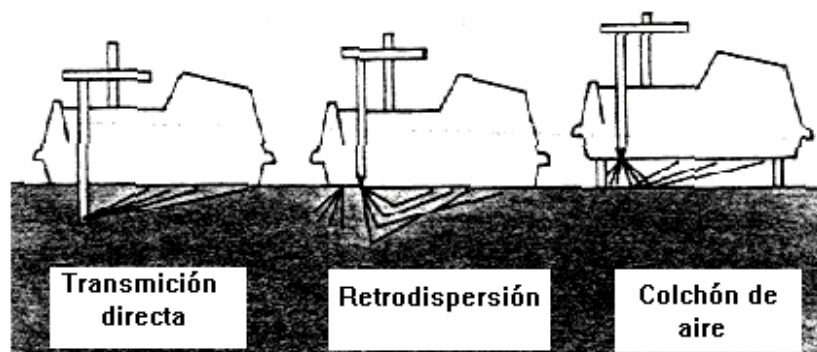


Figura 2.13. Métodos de ensayo.

Fuente: Manual de compactación CAT., 1990.

Las curvas de calibración deberán chequearse si el equipo está recién adquirido o si los resultados de los ensayos de rutina se estiman que sean inexactos. Si se utiliza el método del cono de arena para chequear la curva de calibración, se compara el promedio de por lo menos 5 mediciones con el instrumento nuclear y una con el cono de arena en exactamente la misma posición en terreno.

Si la densidad de cada uno de los ensayos de comparación determinados por el cono de arena varía menos de 0,08 grs/cc de la densidad determinada por el instrumento nuclear y si el promedio de los ensayos del cono de arena difiere menos de 0,032 grs/cc del promedio de las mediciones nucleares, no es necesario hacer ajustes a la curva de calibración.

Por el contrario, si el promedio de las determinaciones de densidad por el cono de arena está a más de 0,032 grs/cc por sobre ó bajo del promedio de las mediciones nucleares, los ensayos siguientes deben ser ajustados en el monto de la diferencia de los promedios, trazando así una curva de calibración corregida, que será paralela a la original.

- Precisión. La precisión (P) del sistema está determinada por la gradiente de la curva de calibración y la desviación standard de los rayos gamma detectados en cuentas por minuto (CPM), mediante la siguiente expresión:

$$P = S / m; \text{ donde:}$$

$$S = \text{desviación normal (CPM)}$$

$$m = \text{gradiente (CPM/kgs/m}^3\text{)}$$

Se determina la pendiente de la curva de calibración en el punto 1760 kgs/m<sup>3</sup> en CPM por kgs. por m<sup>3</sup>. Luego se determina la desviación normal de 10 lecturas repetitivas de 1 minuto, cada una tomadas en un mismo punto, en un material que tenga una densidad de 1760 ± 80 kgs/m<sup>3</sup>. Si el valor resultante (P) es menor que 20 kgs/m<sup>3</sup>, el equipo se considerará en estado óptimo.

- Normalización. Cada día de uso y cuando las medidas de los ensayos sean dudosas, se chequeará la operación del equipo con un patrón de referencia provisto con cada medidor.

Luego de emplear un tiempo de estabilización para el equipo de acuerdo a las instrucciones del fabricante, se realizan por lo menos 4 lecturas repetitivas de 1 minuto cada una sobre el patrón de referencia.

Los límites de aceptación están dados por la expresión:

$$N_s = N_o \pm 1,96 \sqrt{N_o}$$

donde:

$N_s$  = cuenta medida al chequear la operación sobre el patrón de referencia  
 $N_o$  = cuenta establecida previamente en el patrón de referencia (promedio de 10 lecturas)

Los criterios de evaluación serán:

- si la media de las lecturas repetitivas esta fuera de los límites de aceptación, se repite el chequeo,
- si el segundo chequeo cumple con los límites de aceptación, el equipo se considerará en condiciones satisfactorias,
- si el segundo chequeo no cumple con los límites establecidos, deberá chequearse la curva de calibración,
- si el chequeo de la curva de calibración muestra que no hay cambios significativos en ella, se deberá efectuar un nuevo conteo de referencia ( $N_o$ ) y
- si el chequeo de la curva de calibración muestra que no hay diferencias significativas, reparar y recalibrar el instrumento.

#### - Método retrodispersión.

- Equipo necesario.
  - Fuente gamma emisora de isótopos radiactivos, encapsulada y sellada.
  - Dispositivo de lectura, el cual normalmente contiene la fuente de alto voltaje necesaria para operar el detector y una fuente de bajo voltaje para operar el dispositivo de lectura y equipos accesorios.
  - Detector gamma.
  - Patrón de referencia, de densidad uniforme e invariable, para chequear la operación del equipo.
  - Cajas de construcción sólida que deberán estar provistos los instrumentos mencionados, de modo de protegerlos de la humedad y del polvo.
  - Herramientas y accesorios. Plana o escobilla para emparejar la superficie del terreno.
- Procedimiento. Se selecciona un lugar de ensaye donde el medidor quede ubicado a más de 150 mm. de distancia de cualquier proyección vertical.



El lugar a ensayar, deberá ser removido de todo material suelto y disgregado. El área horizontal será la necesaria para acomodar el medidor, aplanándola hasta dejarla lisa de modo de obtener el máximo contacto entre el medidor y el área a ensayar. El máximo hueco por debajo del medidor no podrá exceder los 3 mm., en caso contrario, se rellenará con arena fina para emparejar la superficie.

Finalmente, se asienta y estabiliza el medidor para tomar una o más lecturas de 1 minuto cada una (figura 2.14.).

- Cálculo. Determinar la densidad húmeda in situ utilizando la curva de calibración previamente establecida.
- Observaciones.
  - La densidad determinada, no es necesariamente el promedio de las densidades en el interior del volumen envuelto en la medición.
  - El equipo utiliza materiales radiactivos que pueden ser peligrosos para la salud de los operarios a menos que se tomen las precauciones adecuadas.
  - Los resultados obtenidos pueden ser afectados por la composición química, la heterogeneidad o la textura de la superficie del material medido (ejemplo: materiales orgánicos con alto contenido de sal).
  - La colocación del medidor en la superficie del material a medir, es crítica para la exitosa determinación de la densidad. La condición óptima es el contacto total entre la superficie del medidor y la del material bajo ensaye. Como esto no es posible en todos los casos, para corregir las irregularidades de la superficie, se utiliza una arena fina o material similar. El espesor del relleno no deberá exceder los 3 mm. y el área total rellenada no debe ser mayor que el 10% del área de la base del medidor.
  - Al momento de la medición, no debe haber otra fuente de radiación cercana al medidor que pueda alterar los resultados.
- Método transmisión directa. Lo que varía con respecto al método anterior, es que la fuente emisora o el detector pueden ser alojados dentro de una sonda que se inserta en incrementos de 50 mm., en un agujero hecho con anterioridad en el material a medir. La sonda al ser removida a la marca de profundidad deseada, deberá quedar en íntimo contacto con la pared del agujero al momento de realizar las lecturas.
- Método colchón de aire. Se diferencia de los métodos anteriores en que el equipo medidor se coloca sobre unos soportes o espaciadores que producen un espacio vacío (colchón de aire) entre la base del medidor y el área de la superficie de terreno a ensayar. Se requiere además tomar una o más lecturas en la posición de retrodispersión para chequear las mediciones.



Figura 2.14.  
Densímetro  
nuclear en  
funcionamiento.

Fuente: ELE Internacional Ltda., 1993.

### **2.2.3. Otros métodos para determinación de densidades in situ.**

- Método del balón de caucho. A través de este método, se obtiene directamente el volumen del agujero dejado por el suelo que se ha extraído. Por medio de un cilindro graduado, se lee el volumen de agua bombeado que llena la cavidad protegida con el balón de caucho que impide la absorción del agua en el terreno. Como ventaja, este método resulta ser más directo y rápido que el cono de arena, pero entre sus desventajas se encuentran la posibilidad de ruptura del balón o la imprecisión en adaptarse a las paredes del agujero, producto de cavidades irregulares o proyecciones agudas lo que lo hacen poco utilizado.

- Método del densímetro de membrana. Aplicable a suelos donde predomina la grava media y gruesa. Una vez nivelada la superficie, se coloca un anillo metálico de diámetro aproximado de 2 mt. y se procede a excavar el material que encierra el anillo en una profundidad aproximada de 30 cm.

Una vez removido el material, se coloca una membrana plástica que se adapta perfectamente al interior del anillo y al fondo de la grava. Esta membrana se llena con agua, registrando el volumen que llena la cavidad y que corresponderá al volumen de material extraído.

- Método del cono gigante. Aplicable a suelos donde predominan las partículas mayores a 50 mm. o en suelos como gravas uniformes, en donde la utilización de la arena no resulta conveniente puesto que esta ocuparía los vacíos que originalmente poseen las gravas. En reemplazo de arena, es común utilizar gravilla o bolitas de vidrio.
- Método mediante bloques. Se utiliza para determinar la densidad de suelos cohesivos en estado natural, en suelos compactados y

suelos estabilizados, donde se determina el peso y volumen de muestras en estado inalterado. Estas muestras son extraídas cuidadosamente mediante un cuchillo o espátula y son recubiertas con parafina sólida. De la pared de la excavación se extrae una muestra representativa para determinar el contenido de humedad. La muestra no perturbada, se pesa y se determina su volumen al depositarla dentro de un sifón, leyendo en un cilindro graduado el volumen de agua desplazado al cual se le debe restar el volumen de parafina que recubre la muestra para lo cual es necesario saber la densidad de ésta.

En la tabla de la figura 2.15. se señalan los volúmenes mínimo de muestra según el tamaño máximo de partículas del suelo.

Tamaño máximo de partículas ( mm. )	Volumen mínimo de la muestra (cm <sup>3</sup> )
5	750
10	1500
25	2000
50	3000
80	4000

Figura 2.15. Volumen mínimo a ensayar (Geotecnia LNV.1993.)

UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO  
 ESCUELA DE INGENIERIA EN CONSTRUCCION  
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

### DENSIDAD IN SITU

Proyecto :  
 Ubicación :  
 Descripción del suelo :  
 Fecha de muestreo :  
 Fecha de ensayo :

Densidad aparente de la arena				
Intento N°	1	2	3	Promedio
Peso del molde				D.A.S.=
Peso del molde + arena				
Volumen del molde				
Densidad aparente suelta ( D.A.S.)				

Calibración del cono y espacio de la placa base con arena				
Intento N°	1	2	3	Promedio
Peso del aparato de densidad lleno de arena				W <sub>5</sub> =
Peso del aparato con arena remanente				
Peso arena en el cono y espacio de la placa base				

Determinación del contenido de humedad del suelo extraído en terreno	
Peso recipiente + suelo húmedo	
Peso recipiente + suelo seco	
Peso recipiente	
Peso suelo seco	
Peso agua	
Contenido de humedad ( % )	

Peso del suelo seco removido ( W<sub>12</sub> ) =

Determinación del volumen del suelo extraído	
Peso del aparato de densidad lleno de arena	
Peso del aparato con arena remanente	
Volumen del suelo ( cm <sup>3</sup> )	

Densidad seca in situ =

Observaciones :



