



12
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ARAGON"

FALLA DE ORIGEN

*"EQUIPOS NUCLEARES PARA MEDICION
DE LA COMPACTACION EN VIAS TERRESTRES"*

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
JUAN MANUEL BARBOSA ESPINOSA



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

JUAN MANUEL BARBOSA ESPINOZA
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 28 de marzo del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. AMILCAR GALINDO SOLORZANO pueda dirigirse el trabajo de Tesis denominado "EQUIPOS NUCLEARES PARA MEDICION DE LA COMPACTACION EN VIAS TERRESTRES", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento, me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Mex. 31 de marzo de 1995
EL DIRECTOR


M en CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO


c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/ta


A mis Padres:

MOISES Y ANTONIA

A mis Hermanos:

MIGUEL ANGEL
ALEJANDRO ISAIAS
ANTONIO DANIEL
MOISES MARTIN
JUANA LETICIA
NORMA ARACELI
ALMA DELIA
RUPERTO

A mis Abuelos:

TEODULO
MANUELA
VICTORINO q.e.p.d.
DELFINA q.e.p.d.

A mi Novia:

GABY

A mis Tíos y Tías: quienes son muchos,
pero pienso en todos.

A mis amigos y compañeros,
en especial al Ing. Camilo
y al Ing. Benito.

A mi Madre Antonia:

Después de tantos años,
al fin se lo cumplí.
Por usted y para usted,
con todo amor.

Gracias por ser mi pilar,
por esperar con mucha paciencia y
aguantar con dulzura mis enojos.
Por enseñarme con risas y
enojos a ser como soy,
porque todo se lo debo a usted.
Gracias, te quiero mucho, mamá.

A mi padre Moisés:

A quién le falta crecer junto a nosotros,
para entendernos, porque el amor no se
demuestra con permisos para todo,
sino con razones.

Gracias por infundirme la ilusión de niño,
con los aviones.

A mis Hermanos:

Los sueños, ...sueños son, pero el trabajo
hace realidad esos sueños; para realizarlos,
hay que luchar a cada día, sin conformismos,
buscando subir, crecer, ...valorar.
Y al final, se verá la recompensa al sacrificio.

A mis Abuelos:

Quienes siempre están junto a mí.
¡gracias!, aunque no los vea.

A Gaby:

El amor es... un paso a las metas
y un corazón iluminando el camino.
Gracias amor, por empujarme...e ir conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Con un agradecimiento especial y con todo respeto, al ING. AMILCAR GALINDO SOLORZANO, por concederme bastante de su valioso tiempo, por sus enseñanzas, por molestarlo con los creditos voladores e interrumpiéndolo de los Etruscos.

Por lo que le estoy sinceramente agradecido, por su apoyo y comprensión.

Al Ing. Gabriel Gutiérrez Rocha y al Ing. Carlos Domínguez Suárez, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Y a todas las personas que me brindaron su ayuda y apoyo, para la realización de este trabajo.

Gracias

Juan Manuel Barbosa Espinosa

I N D I C E

CAPITULO I

1. INTRODUCCION.....	1
----------------------	---

CAPITULO II

2. HISTORIA DE LA COMPACTACION.....	4
-------------------------------------	---

CAPITULO III

3. PRUEBAS TRADICIONALES.....	19
3.1 CONCEPTOS BASICOS.....	19
3.2 PRUEBAS TRADICIONALES.....	23
3.2.1 PRUEBA PARA LA DETERMINACION DE LA HUMEDAD O CONTENIDO DE AGUA DE LOS SUELOS.	23
3.2.2 PRUEBA PARA LA DETERMINACION DE LOS PESOS ESPECIFICOS O PESOS VOLUMETRICOS DE LOS SUELOS.....	33
3.2.3 DETERMINACION DEL GRADO DE COMPACTACION...	69
3.2.4 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO SECO MAXIMO Y LA HUMEDAD OPTIMA.....	71

CAPITULO IV

4. CRITICA A LAS PRUEBAS TRADICIONALES.....	93
4.1 CRITICA GENERAL.....	93
4.2 CRITICA A LAS PRUEBAS PARA LA OBTENCION DE LA HUMEDAD.....	94
4.3 CRITICA A LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO.....	95
4.4 CRITICA A LA OBTENCION DEL GRADO DE COMPACTACION.....	96
4.5 CRITICA A LAS PRUEBAS DE MEDICION DE LA COMPACTACION EN CAMPO.....	96
4.6 CONCLUSIONES.....	97

CAPITULO V

5. EQUIPOS NUCLEARES.....	99
5.1 INTRODUCCION.....	99
5.1.1 HISTORIA.....	99
5.1.2 ISOTOPOS.....	107
5.1.3 ENERGIA.....	109
5.1.4 LA RADIOACTIVIDAD.....	111
5.1.5 PRINCIPIOS DE FUNCIONALIDAD.....	117
5.2 MEDICION DE LA DENSIDAD POR MEDIOS NUCLEARES	120
5.3 MEDICION DE LA HUMEDAD POR MEDIOS NUCLEARES	121
5.4 METODOS EMPLEADOS PARA LA DETERMINACION DE LA DENSIDAD Y LA HUMEDAD.....	124

5.4.1	RETRODISPERSION.....	124
5.4.1.1	Definición.....	124
5.4.2	TRANSMISION DIRECTA.....	126
5.4.2.1	Definición.....	126
5.5	APARATOS EXISTENTES EN EL MERCADO.....	127
5.5.1	INTRODUCCION.....	127
5.5.2	EQUIPOS DE LA MARCA CPN.....	130
5.5.2.1	Modelo MC-1DR.....	130
5.5.2.2	Modelo MC-3.....	130
5.5.2.3	Modelo MC-S-24.....	130
5.5.3	EQUIPOS DE LA MARCA TROXLER.....	131
5.5.3.1	Modelo de la Serie 3400-B.....	131
5.5.3.2	Modelo 3430.....	131
5.5.3.3	Modelo 3440.....	132
5.6	SEGURIDAD RADIOLOGICA.....	134
5.7	NORMAS ASTM PARA EQUIPO NUCLEAR.....	141
5.7.1	DESIGNACION D 2922-91.....	141
5.7.2	DESIGNACION D 3017-88.....	163

CAPITULO VI

6.	CONCLUSIONES.....	184
	BIBLIOGRAFIA.....	186

CAPITULO I

1. INTRODUCCION

Las vías terrestres constituyen en cualquier nación un valioso patrimonio que sustenta la importante actividad del transporte de bienes y personas y contribuye por lo tanto, de una manera predominante a la solidez de la economía y a la calidad de la vida de los habitantes.

Aún, cuando la humanidad construye vías terrestres desde hace muchos siglos, sólo en la presente centuria se establecieron los fundamentos científicos de las mejores técnicas constructivas para garantizar el buen funcionamiento y la durabilidad de esas vías.

Entre esas técnicas destaca por su importancia la compactación. Actualmente se estima indispensable medir de una manera rápida y confiable la compactación que en el campo se proporciona a los terraplenes que forman una vía para garantizar la buena calidad de la obra.

Existen pruebas tradicionales para la medida de la compactación que han sido el fruto de una extensa investigación y que están apoyadas por normas. Sin embargo, estas pruebas tienen el inconveniente de ser lentas y onerosas, por lo que su número suele ser limitado y su eficiencia a menudo no es suficiente, porque los resultados se obtienen tardíamente, dando lugar a retrasos en el programa de construcción.

Estas limitaciones han quedado superadas al disponerse comercialmente de equipos de medición de la compactación, que son desarrollos tecnológicos basados en la radiación nuclear.

El objetivo de la presente tesis, es el de presentar estos equipos, explicar la forma como se utilizan y analizar las ventajas que tiene su uso respecto a la aplicación de las prácticas tradicionales.

Para cumplir con ese objetivo, en el primer capítulo se presenta una breve reseña histórica del desarrollo del concepto de la compactación en las vías terrestres, desde su difusión a base de experiencias prácticas hasta su fundamentación teórica con base en la Mecánica de Suelos, que permitió su normalización.

En el capítulo tercero, se describen las pruebas tradicionales para la medida de la compactación y se proporcionan las normas respectivas vigentes. En el capítulo cuarto, se hace una crítica de estas pruebas tradicionales, cuestionando su representatividad y su eficacia por los inconvenientes que ya han sido señalados.

En el capítulo quinto, se presentan los nuevos equipos nucleares para la medida de la compactación, empezando por la explicación de los principios básicos de la física nuclear, de la naturaleza del átomo y de la radiación. Se complementa este capítulo con la presentación de las normas para la aplicación de estos equipos siguiendo varios métodos.

En el último de los capítulos se presentan las reflexiones del autor sobre la trascendencia que humildemente espera pueda tener este trabajo. El punto más relevante de estas reflexiones es que el autor se sentirá muy satisfecho si en este trabajo se logra transmitir la idea de la importancia de la ciencia en el desarrollo tecnológico de nuevos equipos y la importancia de esta nueva tecnología en la obtención de vías terrestres de alta calidad, que sustenten el desarrollo y el progreso de la nación.

CAPITULO II

2. HISTORIA DE LA COMPACTACION

Desde que el hombre dejó de ser nómada, aprendió a vivir del suelo, o sea, de la agricultura, por lo que empezó a distinguir los tipos de suelo; se dio cuenta cuál era bueno y cuál era malo para fines de cultivo. A pesar de ser el suelo el más viejo material de construcción y el más complejo, su variedad es enorme y sus propiedades son variables y por lo tanto difíciles de entender y de medir.

En épocas remotas ya se utilizaba la compactación de una forma primitiva, pero en la antigüedad su aplicación no era general, ni sistemática. Un ejemplo de ello fueron los métodos de apisonado por el paso de personas o animales que se utilizaron en épocas muy lejanas, como por ejemplo en la construcción de grandes obras hidráulicas en diversas partes de Asia.

En las fotografías anexas (fig. 1 y 2) se muestra un antiguo rodillo de compactación (según la autorizada opinión del historiador Silvanus G. Morley), que usaron los antiguos mayas aquí en México para la construcción de una importante red de caminos, que enlazaba los centros ceremoniales importantes en lo que hoy son los Estados de Yucatán y Quintana Roo.



Fig. 1 Y 2

Rodillo de piedra que parece haber sido usado por los antiguos mayas para compactar sus caminos.

Aquí también se muestran fotografías (fig. 3 y 4) de los caminos que se cree fueron realizados por este método. El rodillo se encontró sobre el camino que unía los centros de Cobá y Yaxumá; medía originalmente 4 m. (hoy está fragmentado en dos porciones), con un diámetro de 0.65 m. y un peso aproximado de 5 ton., por lo cual se cree que se requerían 15 hombres para su manejo.



Fig. 3

Vista de un antiguo camino maya



Fig. 4

Otra vista del mismo camino en el que se aprecia las hileras externas de piedra gruesa confinando el material central más fino.

Al observar esta herramienta de los antiguos mayas no se puede dejar de dudar de la extendida afirmación de que ellos desconocían el uso de la rueda.

Después de que el hombre primitivo se dio cuenta de que tras sus propias huellas y después de varias pasadas el terreno quedaba más apto para su tránsito futuro, formándose atajos y veredas, debió descubrir que el apisonado constante del suelo, lo hacía menos deformable y más resistente.

Antes de la Revolución industrial, la compactación de los caminos se realizaba principalmente por su apisonamiento a mano, una técnica usada desde el tiempo de lo Romanos. El instrumento apisonador típico tenía 1.5 m de longitud, con una capa de acero y un tocón de madera de 20 kg. El apisonamiento a mano era un arte comercial (fig. 5). En 1846, John PYM, un capataz londinense presentó a sus trabajadores unas herramientas apisonadoras y en respuesta fue agredido recibiendo una paliza con una barra, así se recibían las innovaciones en ese tiempo (fig. 6), pero el incremento en la productividad debido al uso de esta herramienta, causó sensación en el público.

Alrededor del año 600 D.C., los Chinos desarrollaron una técnica novedosa y efectiva de compactación, usando una larga pieza de piedra que era sacudida en el aire al tensar rápidamente las cuerdas con que estaba radialmente atada.



Fig. 5

Uso de los primeros pisones de mano.



Fig. 6

Vista del apisonado de una calle londinense, en la cual los trabajadores van a un mismo ritmo impuesto por un capataz.

En el Imperio Romano, cuando la situación lo demandaba se realizaba la deseable compactación mediante el rodamiento sobre los caminos de largos y pesados cilindros de piedras impulsados por bueyes o esclavos y guiados manualmente por una extensión del eje de la flecha, lo cual tiene una gran similitud con la técnica maya. Esta técnica fue revivida en los antiguos tiempos medievales, sin embargo, la compactación fue algún tiempo realizada usando el paso de manadas de animales, aunque el trote de puercos tuvo un efecto tan dañino sobre los primeros caminos australianos que a estos animales se les prohibió el paso por las calles. También se usaron manadas de cabras, para la compactación de cortinas de presas hasta finales de 1893.

Hay patentes inglesas emitidas en 1619 a John SHOTBOLTE, Nathaniel BARD y Edward HEMMING para caminos al igual que para maquinaria. En 1725, fue publicado un libro llamado "Theatrum Machinarium" por Thiel LEUPOLD que contiene el dibujo de un rodillo de hierro fundido tirado por un caballo, y el primer informe del uso práctico de un rodillo fue dado por Stony STRATFORD en Inglaterra en 1772. En 1787 Louis DE CESSART, Inspector General de Puentes y Carreteras de Francia, construyó un rodillo de hierro fundido de 3.5 ton., el cual fue probado con éxito sobre empedrado, tal equipo fue empleado en la construcción de la autopista Boonsborough, en los Estados Unidos en 1823.

En 1829 A. R. POLONCEAU, recomendó el uso de un rodillo de madera de 2 m. de diámetro, sobre superficies de macadam (pavimento

hecho con piedra machacada y arena aglomerada con el apisonador); sin embargo, una serie de publicaciones francesas de 1837 y posteriores indican que las recomendaciones de CESSART y POLONCEAU, fueron dejadas al olvido. Hay afirmaciones de que en Inglaterra en 1817, Phillip CLAY usó un rodillo de 20 ton., tirado por un caballo, pero este uso no es anotado en la aparentemente amplia revisión de Henry LAW y Daniel CLARK de 1907. Otro reporte describe ese artefacto como un rodillo de 6 ton., que podía ser cargado con un peso total de 20 ton.

John BURGOYNE, quien fue presidente fundador de la Institución Irlandesa de Ingenieros y presidente de la junta de trabajadores irlandeses, introdujo rodillos de madera en Irlanda en los años de 1820 y promovió fuertemente caminos rodillados en Inglaterra e Irlanda durante los años de 1840; recomendó el uso de un rodillo de hierro fundido de 1.5 m de diámetro que llegó de Hannover en Prusia por vía francesa; Prusia introdujo el rodillo lleno de agua en 1853.

TELFORD y McADAM, estuvieron entre quienes consideraron como adecuada la compactación por tráfico, para sus pavimentos de piedra, pero un apisonamiento podría producir una superficie lisa y menos permeable, pero también quebradiza por debajo de cada piedra y así reducir la vida del pavimento. En los años de 1830, los franceses, quienes adoptaron los principios de McADAM, incluyeron el rodillado como una parte integral del proceso de construcción, sin embargo, un problema mayor fue que frecuentemente los caballos,

no podían tirar de rodillos suficientemente pesados para producir las elevadas presiones de contacto, necesarias para tener una adecuada compactación, especialmente a los niveles requeridos para el balasto de las nuevas vías de ferrocarril.

En 1842, aparecieron los motores de tracción de vapor y el rodillo AVELING de fabricación británica, para reemplazar la insuficiente tracción de los caballos. Su primera solución fue una réplica directa de un rodillo tirado por caballos (fig. 7). La siguiente etapa lógica consistió en la combinación de una máquina de arrastre y un rodillo en una sola unidad, esto pudo haber ocurrido antes de 1850. Existen reportes de la utilización de un compactador automotor en la construcción de la Avenida de Marigny en París en 1850. Sin embargo comúnmente se dice que el primer aparato desarrollado fue un rodillo de 17 ton., producido por Louis LEMOINE de Burdeos en 1859, seguido por BALLAISON en París en 1860-1862. Este invento fue comercializado por la compañía GELLERAT de París en 1864.

La municipalidad de París, dirigió una prueba comparativa entre el rodillo tirado por caballos y el nuevo rodillo de vapor GELLERAT, como consecuencia concedió a GELLERAT un contrato a 6 años para mantener siete rodillos de vapor para la ciudad. Estos fueron principalmente utilizados en caminos macadamizados en el bosque de Boulogne y el bosque de Vincennes.



Fig. 7
Primer rodillo de vapor.

En 1855 el ingeniero en jefe de la ciudad de Calcuta, William CLARK, preocupado por la utilización inapropiada de bueyes para tirar de los rodillos, en conjunto con William BATHE, especificó un nuevo rodillo impulsado por vapor. Desde entonces AVELING y BATHE ya tenían una asociación libre y decidieron unir sus fuerzas para producir rodillos. En 1866, un rodillo AVELING de 20 ton., fue usado con éxito en caminos del Hyde Park en Londres. Un rodillo de 30 ton. (fig. 8) fue empleado en Liverpool en 1867, pero el peso causaba la ruptura de las piedras, destruyendo la trabazón del macadam. Se definió entonces que se obtenía un rodillado satisfactorio con un peso de alrededor de 20 ton, y quedó claro para todos que durante la construcción de una vía, era necesaria alguna compactación, como un paso esencial para lograr una vida satisfactoria del pavimento, bajo tráfico pesado. Así, el uso de un rodillo de vapor, pronto fue una parte inherente de la construcción de caminos.

Los rodillos tirados por caballos generalmente podían aplicar hasta 4.5 ton. por metro de rodillo, y los de vapor alcanzaban 8 t/m. Durante 40 años se discutió si los rodillos tirados por caballos o el más pesado rodillo de vapor producían el mejor resultado. Por ejemplo, dos ingenieros de Nueva Jersey, SPIELMAN y BRUSH, escribieron en 1879:

Observando el rodillo de vapor, es a menudo cuestionable si es esencial o aún deseable, en la construcción de caminos macadamizados. La acción principal del rodillo de vapor, es la de incrustar la piedra entre las hendiduras y como resultado formar rápidamente una capa. Por otro lado, en el rodillo tirado por caballos la función general es la de vibrar y sacudir las pequeñas piedras, hasta que quedan bien acomodadas, pero no se forma la capa superficial, y en su lugar se tiene una masa compacta y homogénea, que es mucho más deseable.

En realidad, el rodillo de mayor peso produjo caminos más aptos para resistir el tráfico de vehículos jalados por caballos, pero causaba un daño prematuro a la base del camino. Al final, el rodillo de vapor se impuso, debido a su eficiente trabajo de campo, más que por la eficacia a largo plazo de sus acciones.

En la fig. 9 se muestra un rodillo AVELING-BARFORD de los años de 1870, donde se observan las características contemporáneas de esos modelos. Un rodillo AVELING-PORTER, construido en 1882 fue usado en la construcción de la autopista M1 de Inglaterra en 1959, siendo retirado en 1960, después de 78 años de servicio. La firma hizo su último rodillo de vapor en 1950, con la llegada del diesel, el rodillo de vapor pasó a la historia.

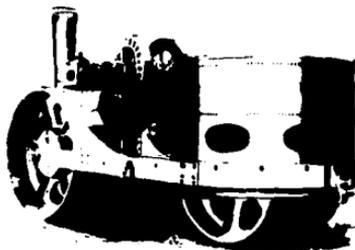


Fig. 8
Primer rodillo AVELING, usado en Liverpool en 1867.

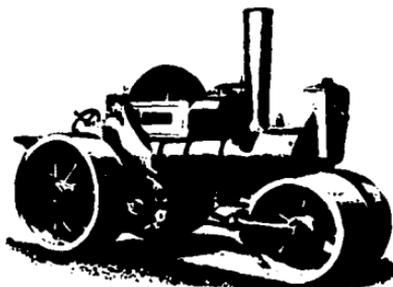


Fig. 9
Compactador AVELING BARFORD de 1870.

Los rodillos impulsados por combustión interna, fueron introducidos en 1905, inicialmente como rodillos ligeros de 6 ton. cargados con agua, como lastre (fig. 10). Dos rodillos diferentes de los años de 1870, son el rodillo pesado LINDELOF (fig. 11) y el ROSS (fig 12), que apisonan más que rodillan.

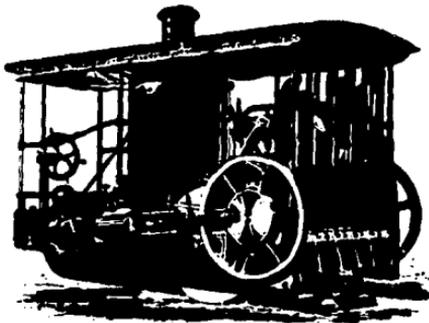


Fig. 10
Uno de los primeros compactadores de motor BARFORD Y PERKINS.

Con rapidez se evolucionó del hacer pasar un hato de animales sobre relleno con la idea de apisonarlo, a los equipos mecanizados, aprovechando las máquinas de vapor primero, y luego las de combustión interna. La esencia general de este desarrollo consistía y consiste en la actualidad, en el empirismo. Las herramientas y los equipos de compactación de campo se desarrollaron mucho más rápido que los principios teóricos en que se sustenta la compactación.



Figs. 11 y 12
Los compactadores
LINDELOF Y ROSS, los
cuales tenían un gran
peso.



Por siglos la gente de campo ha entendido el papel que juega el contenido de agua y el esfuerzo de compactación o la necesidad de roturar el terreno, en las labores de labranza. Los ingenieros también entendían algo acerca del contenido de agua, y se mostraban enterados de los efectos que las estaciones del año provocaban, al generar suelos muy húmedos o muy secos lo cual repercutió para alcanzar ciertos resultados al compactarlos.

El desarrollo de las modernas técnicas de compactación tuvo lugar en los últimos años del siglo pasado y en los primeros del presente, principalmente en los Estados Unidos, en donde John FITZGERALD en 1900, observó los altos niveles de compactación conseguidos por una manada de 10,000 ovejas corriendo a través de caminos californianos escarificados e impregnados de aceite. Lo cual le condujo al desarrollo del "rodillo pata de cabra", para compactar arcillas y suelos cohesivos. Esta historia debe tomarse con reservas ya que el rodillo de llantas angostas estaba entonces en uso en los Estados Unidos y pudo haber impulsado la tecnología hacia el desarrollo del rodillo pata de cabra.

La llegada de una multitud de vehículos automotores después de la primera Guerra Mundial, incrementó la demanda de caminos compactados, por esa circunstancia no hubo duda que la capa del pavimento, tuvo que ser compactada a su máxima densidad para evitar fallas prematuras. En suma, la nueva superficie de asfalto necesitaba un cuidadoso rodillado para conseguir la superficie final deseada. El rodillo fue una parte clave de todo el mayor trabajo del camino.

Así como se debe de tener equipo para compactar, es también necesario tener un índice de la medida de compactación obtenida. En 1928 y 1929 O. J. Porter desarrolló en la División de Carreteras de California las investigaciones básicas de laboratorio, que permitieron el inicio de técnicas razonadas de compactación en la construcción de carreteras. En 1933 los conocimientos semiempíricos que desde la antigüedad tuvieron los primeros constructores, fueron

sistematizados para crear una prueba moderna de compactación, la cual fue introducida en 1933 por Ralph PROCTOR, un empleado de la oficina de Obras Publicas de los Angeles, a través de una serie de artículos que se publicaron en los Estados Unidos; en ellos se estandariza un procedimiento de compactación en el laboratorio, que permite analizar la influencia de algunos de los factores que inciden en este proceso.

Su prueba mostró, la existencia de una relación, entre la densidad del suelo y su contenido de humedad y que, para suelos arcillosos, había un único contenido óptimo de humedad, con la cual la compactación máxima, sería alcanzada. Este conocimiento permitió a los camineros, encargados de administrar los procesos de construcción, asegurar que los pavimentos por producir fueran rígidos y resistentes.

Como quiera que haya sido la forma y extensión de este conocimiento, en la literatura ingenieril no se tienen, sino hasta la década de los treinta, los primeros esfuerzos por sistematizar el proceso, y establecer los principios fundamentales de la compactación; en éstos se incluyen las relaciones entre el contenido de agua, el peso volumétrico seco y la energía de compactación.

A raíz de las publicaciones de Proctor, se generaron múltiples estudios con diversos suelos, y con diferentes tamaños de moldes y energía de compactación.

Con lo cual se estableció un procedimiento de prueba estandarizado de laboratorio, que pudo usarse como una base para hacer las comparaciones pertinentes con la compactación de campo, y juzgar así el grado relativo de compactación alcanzado en el campo. Tal prueba fue la de impactos conocida como "Proctor Estándar", misma que proporcionó pesos volumétricos adecuados para la usual construcción de carreteras de ese tiempo.

Durante la Segunda Guerra Mundial, las fuertes cargas de los aeroplanos exigieron más altos valores de pesos volumétricos secos en la construcción de aeropistas; con lo cual necesariamente surgió la Prueba "Proctor Modificada" con una energía mayor que la estándar.

Con lo cual se ve, que las guerras generan una mayor rapidez en la investigación ya que pasó mucho tiempo sin un estudio profundo, pero a raíz de las necesidades en la guerra, se originó una aceleración en las investigación de compactación de vías, por la aparición de nuevos y más grandes tipos de aviones.

CAPITULO III

3. PRUEBAS TRADICIONALES

Antes de describir las pruebas que tradicionalmente se realizan para el control de la compactación, es necesario definir los conceptos básicos de éste fenómeno.

3.1 CONCEPTOS BASICOS

La compactación se define como: "La aplicación mecánica de cierta energía, o cantidad de trabajo por unidad de volumen, para lograr una reducción de los espacios entre las partículas sólidas de un suelo, con el objeto de mejorar sus características mecánicas". Esta reducción de espacios entre las partículas genera un aumento en el peso específico o volumétrico, ya que también se pierde aire retenido en las partículas.

Algunos conceptos básicos, necesarios para una buena determinación de la compactación son:

- Peso específico seco máximo
- Humedad óptima
- Grado de compactación

Para entender el concepto de Peso Específico Seco Máximo, consideremos un suelo con humedad baja al que se le va incrementando contenido de agua y se le aplica cada vez la misma energía de compactación. El peso volumétrico va aumentando por la

acción lubricante del agua, hasta que llega un momento en que el peso volumétrico del material seco, calculado a partir del peso volumétrico del material húmedo y de la humedad, alcanza un valor máximo.

A la Humedad Óptima, se la puede definir como el contenido de agua con el que se obtiene el mejor acomodo de las partículas y el mayor peso específico del material seco, para una determinada energía de compactación.

El contenido de agua óptimo y el peso específico seco máximo de un suelo también varían con la energía de compactación; cuando ésta aumenta, se obtienen mayores pesos específicos secos máximos con humedades óptimas menores. A su vez la humedad óptima y el peso específico seco máximo son función del tipo de suelo; los suelos gruesos, para una misma energía de compactación, tienen en general mayores pesos específicos y menores contenidos de agua que los suelos finos.

Esto se genera a partir de ir agregando agua al material hasta llegar al punto medio o de inflexión, ya que al rebasar, la mayor cantidad de agua provocaría una disminución del peso específico. Los respectivos pesos específicos con su respectiva humedad, determinan una serie de puntos que unidos forman una curva, que representa la variación del peso específico o volumétrico de un material para diferentes contenidos de agua y una misma energía de compactación; esta curva adopta aproximadamente la forma de una parábola, siendo más pronunciada su curvatura en el caso de suelos arenosos que en el de suelos arcillosos (figs. 14 y 15).

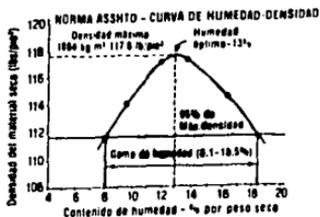


Fig. 14
Curva de humedad-densidad

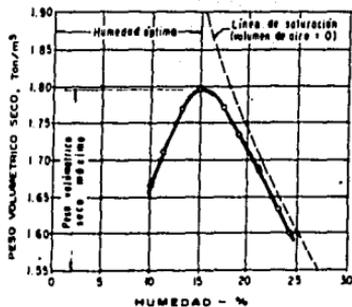


Fig. 15
Curva de compactación típica.

El Grado de Compactación, tiene por objeto determinar el grado de acomodación de las partículas de un suelo, relacionando el peso volumétrico seco, obtenido por el equipo en campo, con el respectivo peso volumétrico seco máximo obtenido en el laboratorio, expresándose el resultado en por ciento; ambas determinaciones se efectúan con porciones de suelo o material correspondiente a un mismo tamaño máximo.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, por ejemplo, tiene la norma de no compactar el cuerpo de las terracerías a menos del 90% en ningún caso, y exige por lo general el 95% en la porción superior de los terraplenes y el 100% en la capa subrasante y en las diversas capas del pavimento.

Es evidente que el procedimiento que da los mayores pesos específicos secos máximos, corresponde una menor "humedad óptima". Dicho en otras palabras, la humedad óptima es una variable que depende de la energía de compactación. En el campo, la humedad óptima es una variable que depende del tipo y peso de los rodillos usados en la compactación.

La parte fundamental en la compactación, es el tipo de suelo a utilizar, por lo cual es importante definir las características propias del tipo a utilizar y al mismo tiempo, saber de antemano las características que va a tomar en la compactación. Como hay diferentes tipos de suelo, también habrá para cada tipo, diferentes características después de la compactación, por lo tanto es importante definir el concepto de suelo, así como los tipos de suelo existentes.

Para los fines de la Vías Terrestres, la palabra Suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidas de la definición, las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo. Por lo tanto es importante clasificar a los suelos, para lo cual en la siguiente tabla se darán las clasificaciones de suelo, así como sus características:

(Ver tablas anexas)

FALLA DE ORIGEN

TABLA 22.1
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS
(VERSION SOP)

CRITERIO DE CLASIFICACION EN EL LABORATORIO		PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACION EN EL CAMPO	
SUELOS DE SUELOS FINOS (SUELOS DE SUELOS FINOS)		SUELOS DE SUELOS FINOS (SUELOS DE SUELOS FINOS)	
GW	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K) MAYOR QUE 10 ⁻⁶ cm/s	GW	AGUAS FREAS EN LOS TUBOS DE LAS PARTICULAS Y CANTIDAD APROXIMADA DE TODOS LOS TUBOS OBSERVADOS
GP	NO SATURAR TODOS LOS RESULTADOS DE PERMEACION PARA GP	GP	PRESENCIA DE UN TUBO DE UN TIPO DE TUBOS CON NIVEL DE AGUAS FREAS DIFERENTE
GM	LIMITES DE PLASTICIDAD MENORES DE LA LINEA "A" O LA MENOR DE 6	GM	PRESENCIA Poca agua y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
GC	LIMITES DE PLASTICIDAD MENORES DE LA LINEA "A" O LA MENOR DE 6	GC	PRESENCIA Poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
SW	NO SATURAR TODOS LOS RESULTADOS DE PERMEACION PARA SW	SW	AGUAS FREAS EN LOS TUBOS DE LAS PARTICULAS Y CANTIDAD APROXIMADA DE TODOS LOS TUBOS OBSERVADOS
SP	NO SATURAR TODOS LOS RESULTADOS DE PERMEACION PARA SP	SP	PRESENCIA Poca agua y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
SM	LIMITES DE PLASTICIDAD MENORES DE LA LINEA "A" O LA MENOR DE 6	SM	AGUAS FREAS FRECUENTES Y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
SC	LIMITES DE PLASTICIDAD MENORES DE LA LINEA "A" O LA MENOR DE 6	SC	AGUAS FREAS FRECUENTES Y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
ML	ESTADISTICA DE SUELOS	ML	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4
CL	COMPANIZACION EN SUELOS LIQUIDOS Y SUELOS PLASTICOS	CL	LIMITE LIQUIDO MENOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4
OL	COMPANIZACION EN SUELOS LIQUIDOS Y SUELOS PLASTICOS	OL	LIMITE LIQUIDO MENOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4
MH	COMPANIZACION EN SUELOS LIQUIDOS Y SUELOS PLASTICOS	MH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4
CH	COMPANIZACION EN SUELOS LIQUIDOS Y SUELOS PLASTICOS	CH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4
CH	COMPANIZACION EN SUELOS LIQUIDOS Y SUELOS PLASTICOS	CH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4
PI	COMPANIZACION EN SUELOS LIQUIDOS Y SUELOS PLASTICOS	PI	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4

SUELOS DE SUELOS FINOS (SUELOS DE SUELOS FINOS)		SUELOS DE SUELOS FINOS (SUELOS DE SUELOS FINOS)	
GW	AGUAS FREAS EN LOS TUBOS DE LAS PARTICULAS Y CANTIDAD APROXIMADA DE TODOS LOS TUBOS OBSERVADOS	GW	AGUAS FREAS EN LOS TUBOS DE LAS PARTICULAS Y CANTIDAD APROXIMADA DE TODOS LOS TUBOS OBSERVADOS
GP	PRESENCIA DE UN TUBO DE UN TIPO DE TUBOS CON NIVEL DE AGUAS FREAS DIFERENTE	GP	PRESENCIA DE UN TUBO DE UN TIPO DE TUBOS CON NIVEL DE AGUAS FREAS DIFERENTE
GM	PRESENCIA Poca agua y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6	GM	PRESENCIA Poca agua y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
GC	PRESENCIA Poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6	GC	PRESENCIA Poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
SW	AGUAS FREAS EN LOS TUBOS DE LAS PARTICULAS Y CANTIDAD APROXIMADA DE TODOS LOS TUBOS OBSERVADOS	SW	AGUAS FREAS EN LOS TUBOS DE LAS PARTICULAS Y CANTIDAD APROXIMADA DE TODOS LOS TUBOS OBSERVADOS
SP	PRESENCIA Poca agua y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6	SP	PRESENCIA Poca agua y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
SM	AGUAS FREAS FRECUENTES Y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6	SM	AGUAS FREAS FRECUENTES Y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
SC	AGUAS FREAS FRECUENTES Y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6	SC	AGUAS FREAS FRECUENTES Y poca plasticidad PARA CLASIFICACION LINEA "A" O LA MENOR DE 6
ML	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4	ML	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4
CL	LIMITE LIQUIDO MENOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4	CL	LIMITE LIQUIDO MENOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4
OL	LIMITE LIQUIDO MENOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4	OL	LIMITE LIQUIDO MENOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4
MH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4	MH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MENOR QUE 4
CH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4	CH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4
CH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4	CH	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4
PI	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4	PI	LIMITE LIQUIDO MAYOR QUE 15 Y LIMITE PLASTICO MAYOR QUE 4

PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACION EN EL CAMPO (continuación de la Tabla 22.1)

INFORMACION NECESARIA PARA LA DESCRIPCION DE LOS SUELOS

PRELIMINARIO DE IDENTIFICACION PARA SUELOS FINOS Y FRACCIONES FINAS DE SUELO EN EL CAMPO

Después de quitar las partículas mayores que la malla N° 40, preparar una pasta de suelo homogénea de aproximadamente 10 cm³, si es necesario, agregando suficiente agua para dar al suelo consistencia, pero no pegajoso.

Coloque la pasta en la palma de la mano y agite horizontalmente golpeando ligeramente varias veces contra la otra mano. Una reacción positiva consiste en la separación de agua en la superficie de la pasta. Si los cambios adecuados una apariencia de ligazón o se vuelve lustrosa. Cuando la pasta se agita entre las dedos, el agua o el limo desaparecen de la superficie. La pasta se vuelve fina y finalmente se agrieta o se desmenuza. La prueba de la cohesión del agua cuando el agua o el limo desaparecen durante la separación entre las palmas indica el carácter de los limos en un suelo.

RESISTENCIA EN ESTADO SECO (Característica al comportamiento)

Después de eliminar las partículas mayores que la malla N° 40, moldear un cilindro de suelo de 2.5 cm de diámetro por 2.5 cm de altura hasta alcanzar un comportamiento de muestra adecuada para la prueba. Dejar secar el cilindro en un lugar seco y bien ventilado hasta que se haya secado completamente y se haya vuelto rígido. La resistencia en un punto de ruptura se determina al aplicar una fuerza constante de tracción a lo largo del cilindro. El aumento en el esfuerzo de tracción se registra.

ENSAYO DE COMPRESION EN ESTADO SECO (Característica al comportamiento)

Después de eliminar las partículas mayores que la malla N° 40, moldear un espécimen de aproximadamente 10 mm de diámetro y 10 mm de altura en la malla N° 40. Si el suelo es muy fino y se agrega agua, pero si esta pequeña cantidad de agua el espécimen formando una capa delgada que permita al agua ser absorbida por el espécimen. Posteriormente el espécimen se reduce a menos sobre una superficie lisa o entre las palmas, hasta hacer un cilindro de aproximadamente 5 mm de diámetro, se amasa y se vuelve a moldear varias veces. Durante esta operación el contenido de agua se reduce gradualmente y el espécimen se vuelve a punto, pero pierde finalmente su plasticidad y se desmenuza cuando se aplica el límite plástico. Después que el rollo se ha desmenuzado, los palmas deben juntas y se comprime el espécimen entre los dedos en forma ligera, hasta que la masa se desmenuza nuevamente.

† TODOS LOS TUBOS DE LAS HALLAS EN CADA CADA SON CON UN SUELO

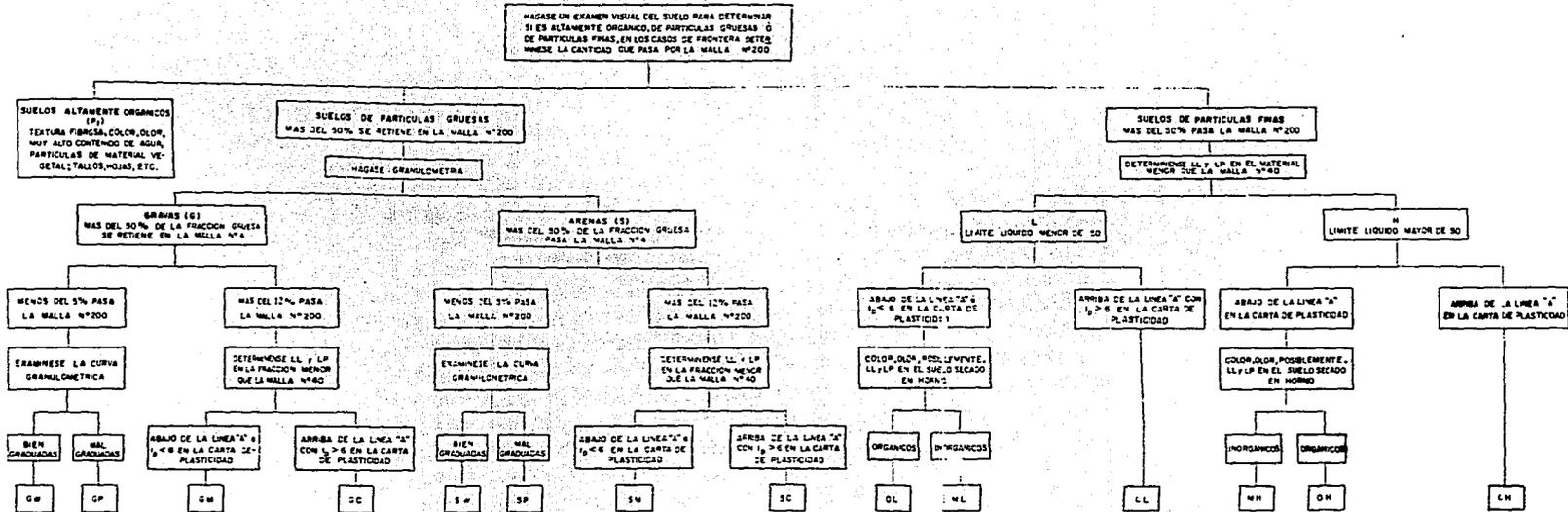
Si el coeficiente de permeabilidad es mayor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como GW. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como GP. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como GM. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como GC. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como SW. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como SP. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como SM. Si el coeficiente de permeabilidad es menor que 10⁻⁶ cm/s, el suelo se clasifica como SC.

Tomado del libro "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres."

FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN

TABLA 22.2
PROCEDIMIENTO AUXILIAR PARA IDENTIFICACION DE SUELOS
EN EL LABORATORIO
 S. U. C. S. (versión S.O.P.)



NOTA: Los límites de los máximos son de la US Standard
 Si los fines interferen con las propiedades de drenaje
 debe usarse un símbolo sobre el como G_s-G_m-G_u

Tomado del libro "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres."

3.2 PRUEBAS TRADICIONALES

A continuación se describen las pruebas tradicionalmente empleadas para medir las características de compactación de los suelos.

La normatividad en que se basan, es la aplicada en México en la construcción de carreteras.

3.2.1 PRUEBA PARA LA DETERMINACION DE LA HUMEDAD O CONTENIDO DE AGUA DE LOS SUELOS

La humedad o contenido de agua de un suelo es la relación expresada en por ciento, entre el peso del agua que tiene el suelo y el peso de sus partículas sólidas. Para los fines de esta prueba el contenido de agua es el peso que pierde la muestra al someterla a un proceso de secado en horno a ciento cinco más menos cinco grados centígrados ($105 \pm 5^{\circ}\text{C}$) y el peso de las partículas sólidas es el que tiene la muestra después de someterla a dicho proceso. Su determinación proporciona una información complementaria y en ciertos casos constituye una etapa fundamental de otras pruebas que se efectúan a los suelos. Por otra parte, el conocimiento del contenido natural de agua de un suelo en algunas ocasiones puede dar idea cualitativa de su consistencia o de su probable comportamiento (fig. 16).

La determinación de la humedad se efectuará siguiendo el procedimiento de prueba estándar, o bien cuando no se requiera mucha exactitud, se podrá aplicar la prueba rápida.

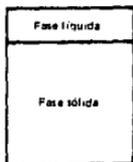


Fig. 16

La muestra que se destine para la prueba deberá tomarse de tal manera que sea representativa del material cuyo contenido de agua se desea obtener. Cuando se trate de conocer la humedad natural de un suelo, es conveniente que al tomar en el campo la muestra se determine de inmediato el peso inicial del material húmedo con todo y recipiente; cuando haya necesidad de transportarla al laboratorio para determinarle su humedad.

La cantidad de muestra que debe tomarse para la determinación de la humedad será la indicada en el método de prueba correspondiente; si no hay indicación al respecto, los pesos mínimos estarán de acuerdo con lo siguiente:

Tamaño máximo del material, en milímetros.		Peso mínimo de la muestra, en gramos.
4.75 (pasa la malla Núm. 4)		100
25.00 (pasa la malla 1")		500
50.00 (pasa la malla 2")		1000

La prueba estándar para la determinación de la humedad y contenido de agua, consiste en obtener una muestra de suelo cuyo peso estará de acuerdo con lo indicado en el párrafo anterior, someterla a un proceso de secado al horno y determinar la relación que existe entre el peso del agua que contiene y el peso seco del material.

El procedimiento de prueba será el siguiente:

- 1) Se pesa un recipiente limpio y seco, con su tapa y se anota este peso como W_t en gramos.
- 2) Se coloca la muestra de suelo húmedo en el recipiente, se tapa e inmediatamente después, se determina su peso incluyendo el del recipiente y se registra este peso como W_1 , en gramos.
- 3) Posteriormente se quita la tapa al recipiente y se mantiene la muestra en el horno a una temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados ($105 \pm 5^\circ\text{C}$), hasta obtener un peso constante, lo cual puede ocurrir en un lapso aproximado de dieciséis (16) horas. En caso de suelos que contengan materia orgánica o minerales como el yeso que tiene agua de composición y la pierden cuando se les seca a la temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados ($105 \pm 5^\circ\text{C}$), la temperatura de secado no deberá ser mayor de sesenta grados centígrados (60°C) (fig. 17).

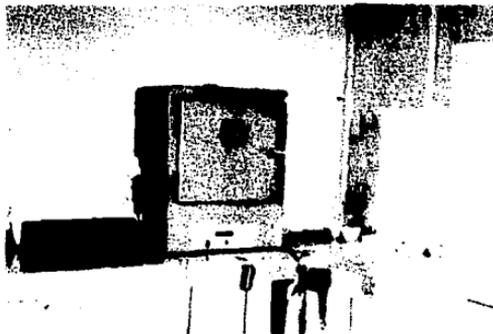


Fig. 17

- 4) Una vez que se ha secado la muestra, se saca del horno y se coloca en el desecador, dejándola enfriar hasta que alcance aproximadamente la temperatura ambiente, después se pesa en su recipiente original, previamente tapado, anotándose este peso como W_2 , en gramos (fig. 18).

Se calculará la humedad expresándola en por ciento, por medio de la fórmula siguiente:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_t} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

En donde:

w - es el contenido de agua, en por ciento.

W_1 - es el peso de la muestra húmeda más el peso del recipiente, en gramos.

W_2 - es el peso de la muestra seca más el peso del recipiente, en gramos.

W_t - es el peso del recipiente, en gramos.

$W_w = W_1 - W_2$, es el peso del agua que contiene el suelo, en gramos.

$W_s = W_2 - W_t$, es el peso de la muestra seca, en gramos.



Fig. 18
Desecador de cristal

Para la ejecución de esta prueba se recomienda observar las siguientes precauciones:

- 1) Que la muestra de material para la prueba sea suficiente.

- 2) Que la balanza con que se trabaje tenga la sensibilidad requerida.
- 3) Que la temperatura de secado sea la apropiada para el tipo de material.
- 4) Que el secado se haga a peso constante.

La prueba rápida para la determinación de la humedad o contenido de agua se lleva a cabo en el campo cuando se necesita conocer la humedad en un lapso breve, para lo cual se eleva la temperatura de la muestra colocada en su recipiente, utilizando una fuente de calor de flama abierta. Con este procedimiento las muestras se llegan a calentar a un grado tal que puede originarse la pérdida de agua de hidratación o de composición, y la calcinación de la materia orgánica que contengan, siendo necesario por lo tanto efectuar una corrección (fig. 19 y 20).



Fig. 19
Fuentes de calor de flama abierta



Fig. 20
Método de secado rápido

Para efectuar esta prueba deberá seguirse el procedimiento que a continuación se indica:

- 1) Se pesa un recipiente limpio y seco y se registra este peso como W_t , en gramos.

- 2) Se coloca la muestra de suelo húmedo en el recipiente inmediatamente después se determina su peso, incluyendo el del recipiente, anotando este peso como W_1 , en gramos.

- 3) A continuación se coloca en la fuente de calor el recipiente que contiene la muestra, permitiendo la libre evaporación del agua durante el tiempo necesario para que se seque, lo cual se comprueba haciendo pasar repetidamente un vidrio de reloj sobre la muestra; mientras ésta contenga agua, se formará una condensación de vapor en la superficie del vidrio. Con el fin de lograr un secado más rápido y uniforme, se recomienda remover moderadamente la muestra dentro del recipiente durante este proceso, evitando pérdidas de material.

- 4) Una vez que se ha secado la muestra, se retira el recipiente de la flama con las pinzas y se deja enfriar hasta que se pueda pesar la muestra seca con su recipiente anotándose este peso como W2, en gramos.

El contenido de agua se calculará mediante la fórmula de la prueba estándar, expresándolo en por ciento. En caso de suelos que contengan materia orgánica en cantidades importantes o minerales que puedan perder su agua de hidratación o de composición, se deberá efectuar la corrección siguiente:

Corrección al contenido de agua, determinado con la prueba rápida

Esta prueba tiene por objeto corregir el contenido de agua determinado con la prueba rápida, tomando en cuenta el error que puede introducir la presencia de materia orgánica o agua de composición o de hidratación en el material, al eliminarse éstas por un calentamiento excesivo de la muestra.

La prueba se elabora de la siguiente manera:

- Se toman por cuarteo dos porciones de la muestra que se va a ensayar.
- A una de estas porciones se le determinará su contenido de agua mediante la prueba estándar, obteniéndose el valor de w .
- A la otra porción se le determina su contenido de agua por medio de la prueba rápida, obteniéndose el valor de w_r .
- Se calculará la corrección empleando la siguiente fórmula:

$$C = w_r - w$$

En donde:

C - es el valor de la corrección, en por ciento.

w_r - es el contenido de agua determinado con la prueba rápida, en por ciento.

w - es el contenido de agua determinado con la prueba estándar, en por ciento.

Para obtener el contenido real de agua, se resta el valor C de la corrección al de la humedad obtenida con la prueba rápida en determinaciones en el mismo material. En caso de duda, se efectuarán como mínimo tres (3) determinaciones de la corrección C y se tomará el valor promedio de éstas.

3.2.2 PRUEBA PARA LA DETERMINACION DE LOS PESOS ESPECIFICOS O PESOS VOLUMETRICOS DE LOS SUELOS.

La determinación de los pesos específicos o volumétricos de los suelos, se hará tomando en cuenta:

Peso específico del suelo o del material pétreo húmedo, γ_m , en gramos por centímetro cúbico.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_{vi} + V_{vp}}$$

En este caso se considera el volumen total del suelo o material pétreo, designándose comúnmente al peso específico γ_m , como peso volumétrico, el cual se acostumbra expresarlo en kilogramos por metro cúbico. En la práctica el volumen impermeable, V_{vi} , se considera incluido en el volumen de sólidos, V_s , ya que es difícil determinarlo separadamente.

Peso específico del suelo o del material pétreo secos, γ_d , en gramos por centímetro cúbico.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_m} = \frac{W_s}{V_s + V_{vi} + V_{vp}}$$

Este es un caso particular de ρ_m , en donde W_w es igual a cero (0) y generalmente se le designa como peso volumétrico del material seco expresándolo en kilogramos por metro cúbico.

En donde:

- V_m - es el volumen total de la muestra
- V_s - es el volumen de la fase sólida
- V_{vi} - es el volumen de los vacíos impermeables
- V_{vp} - es el volumen de los vacíos permeables
- W_m - es el peso total de la muestra
- W_s - es el peso de la fase sólida
- W_w - es el peso de la fase líquida o peso del agua

De acuerdo con la compacidad del suelo o grado de acomodo que presenten sus partículas sólidas, los pesos específicos o volumétricos pueden ser:

- 1) Peso específico o volumétrico del suelo en estado natural, cuando el acomodo que tienen sus partículas es consecuencia de un proceso de la naturaleza. Este peso volumétrico es el que corresponde a la condición que tienen los materiales en los bancos en su estado original y en general, es el que se refiere al terreno natural sin haber sido removido.

- 2) Peso específico o volumétrico del suelo en estado suelto, cuando su estructura natural ha sido alterada por algún proceso artificial como los de extracción, disgregación, cribado, trituración, etc. y que se ha depositado o almacenado sin someterlo a ningún tratamiento especial de compactación. Este peso específico es variable para un mismo material de acuerdo con el acomodo que adopten sus partículas sólidas, dependiendo de diversos factores, tales como el sistema de carga, el medio de transporte, tipo y altura de almacenamiento, etc. Para que el peso específico o volumétrico de un material suelto sea representativo, deberá determinarse en las condiciones reales de trabajo o de almacenamiento en que se encuentre.
- 3) Peso específico o volumétrico del suelo en estado compacto, cuando las partículas sólidas que lo constituyen han adquirido un cierto acomodo por algún procedimiento de compactación. En este caso se presentan dos (2) posibilidades, siendo una de ellas la que toma en cuenta la totalidad de las partículas del material y la otra, que considera sólo la fracción del material que pasa por determinada malla. La primera se aplica generalmente para el cálculo de coeficiente de variación volumétrica y la segunda para obtención de grados de compactación.

- 4) En general, al referirse al peso específico o volumétrico de un material en el lugar, se trata de los pesos específicos determinados en los estados natural o compacto del suelo, "in situ".

El peso específico o volumétrico de un suelo en estado suelto sirve principalmente para determinar los coeficientes de variación volumétrica y puede determinarse en el campo o en el laboratorio. Cuando la prueba se efectúa en el laboratorio, se sigue el procedimiento adecuado para ello, excepto que la muestra no se seca al prepararse y no es necesario determinar su contenido de agua.

La determinación del peso específico o volumétrico del suelo en estado suelto en el campo, deberá tratar de reproducir las condiciones reales de trabajo, por lo que el procedimiento que se aplique para medir el peso y el volumen del material en estudio, dependerá del tipo de recipiente y de la forma de llenarlo con el suelo; así por ejemplo, para efectos de acarreo, será necesario medir el peso del material depositándolo en la caja del camión, con el equipo de carga que se vaya a utilizar en la obra, determinando su peso total en una báscula para vehículos o bien, si no se dispone de esta báscula, pesando el material en forma parcial, y calculando el volumen de la caja por medición directa.

La determinación del peso específico o volumétrico de un suelo seco y suelto en el laboratorio, consiste en obtener la relación entre el peso del material y su volumen, una vez que la muestra respectiva ha sido debidamente preparada y corregir el valor encontrado de acuerdo con el contenido de agua.

La prueba se realiza de la siguiente manera:

- 1) De una muestra preparada, se toma por cuarteo la porción necesaria para llenar completamente el recipiente y se mezcla para homogeneizarla.
- 2) Empleando un cucharón de lámina se deja caer el material dentro del recipiente desde una altura de veinte (20) centímetros, hasta que se llene, utilizando como referencia el escantillón y evitando que el material se reacomode por movimientos indebidos; después se procede a enrasar el material utilizando la regla de treinta (30) cm.
- 3) Se pesa el recipiente conteniendo el material y se registra su peso W_{rm} con aproximación de cinco (5) gramos.
- 4) Se determina el contenido de agua del material.

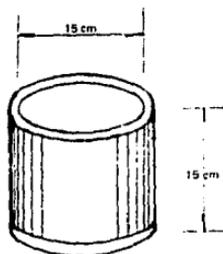
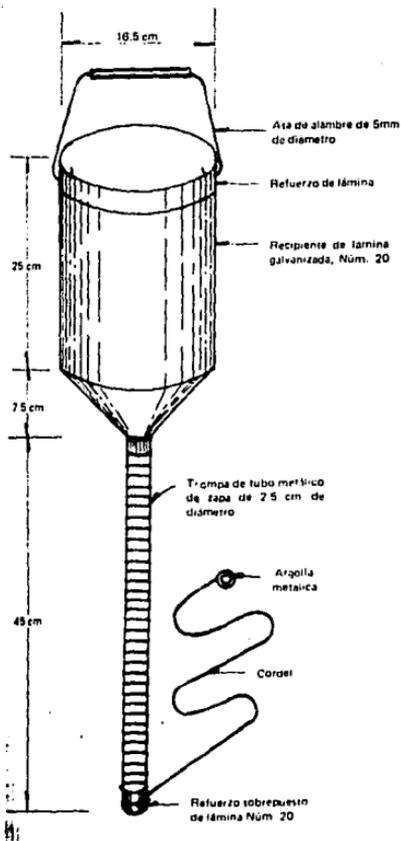
Se calcula el peso específico o volumétrico del material seco y suelto, por medio de la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{100 (W_{rm} - W_r)}{V (100 + w)} = \frac{100 W_m}{V (100 + w)}$$

En donde:

- γ_d - es el peso específico o volumétrico del material seco y suelto, en Kg por m³.
- W_{rm} - es el peso del recipiente conteniendo el material, en Kg.
- W_r - es el peso del recipiente, en Kg.
- W_m - es el peso del material contenido en el recipiente, en Kg.
- V - es el volumen del recipiente o del material contenido en el mismo, en metros cúbicos.
- w - es el contenido de agua remanente en el material, en por ciento.

La determinación del peso específico o volumétrico en el lugar, por el método de la trompa y arena (fig. 21), se efectúa en los materiales tanto en estado natural como en estado compactado y sirve para obtener los coeficientes de variación volumétrica y los grados de compactación. La determinación del peso específico o volumétrico en el lugar por este método, consiste esencialmente en hacer una excavación en el sitio de prueba elegido, pesar el material extraído y relacionar este peso con el volumen de la excavación, medido con arena.



Recipiente de calibración para determinar el peso volumétrico de la arena. La base y el borde superior serán perpendiculares al eje del cilindro, el borde superior estará bien terminado sin salientes ni muescas.

Fig. 21
Equipo para la prueba de Trompa y arena

Se verifica previamente el peso específico o volumétrico de la arena γ_{sd} , en la forma siguiente:

- 1) Se determina el V_r del recipiente, para lo cual se pesa vacío registrando su peso con aproximación de cinco (5) gramos y a continuación se coloca sobre una superficie plana de manera que su borde superior quede en posición horizontal; se vierte agua en el recipiente evitando la formación de burbujas de aire, hasta llenarlo, lo cual se verifica colocándole sobre el borde una placa de vidrio tratada con una película de aceite delgado; se elimina el agua que se haya derramado en la superficie exterior del molde y se pesa con la aproximación mencionada. La diferencia de pesos entre el recipiente lleno de agua y vacío, en gramos, es para estos fines, numéricamente igual al volumen del recipiente en centímetros cúbicos. Se repite este procedimiento hasta que en tres (3) determinaciones no exista una discrepancia mayor de tres (3) centímetros cúbicos; el promedio de estos tres (3) valores será el volumen V_r del recipiente, en centímetros cúbicos.
- 2) Se coloca el dispositivo en posición de trabajo, se recoge la trompa con el cordel, manteniéndola en esta posición y se llena con arena su depósito.

- 3) Se coloca el recipiente en una superficie sensiblemente horizontal y firme, en posición de ser llenado.
- 4) En seguida se vacía arena dentro del recipiente, para lo cual se introduce la trompa con su extremo levantado hasta tocar el fondo de aquél; logrado lo anterior, simultáneamente y en forma gradual se levanta el dispositivo y se suelta el cordel que sujeta la trompa, hasta que ésta quede en posición vertical y deje salir la arena con una altura mínima de caída, permitiéndole que se distribuya en toda la sección del recipiente, para lo cual se desplaza el dispositivo sin que la trompa pierda su posición vertical y se sube lo conveniente a fin de conservar la altura mínima de caída. Esta operación se continúa hasta llenar el recipiente, el que se enrasa con una regla de madera y con el menor número de pasadas.
- 5) Se pesa la arena contenida en el recipiente y se registra su peso en gramos.
- 6) Los procedimientos antes descritos se repiten a lo menos tres (3) veces para obtener el promedio del peso de la arena utilizada para llenar el recipiente mencionada, descartando el valor que discrepe en más de uno por ciento (1%) y repitiendo dichas determinaciones en caso de ser incongruentes. Este promedio es el peso de la arena seca W_{sd} , en gramos.

7) Se determina el peso específico o volumétrico de la arena

γ_{sd} , empleando la siguiente fórmula:

$$\gamma_{sd} = \frac{W_{sd}}{V_r} \times 1000$$

En donde:

γ_{sd} - es el peso específico o volumétrico de la arena seca, en kilogramos por metro cúbico.

W_{sd} - es el peso de la arena seca empleada para llenar el recipiente, en gramos.

V_r - es el volumen del recipiente, en centímetros cúbicos.

El procedimiento para determinar el peso específico o volumétrico del suelo en el lugar, es el siguiente:

- 1) Una vez seleccionado el sitio en que se efectuará la prueba se limpia y prepara la superficie de tal manera que se tenga una porción sensiblemente plana y libre de partículas sueltas.
- 2) Se efectúa una excavación en el sitio de prueba preparada para el objeto, con dimensiones de acuerdo con el tamaño máximo del material y con el espesor de la capa o estrato,

cuyo peso volumétrico se desea determinar; el sondeo deberá hacerse cuidadosamente para evitar alteraciones en sus paredes y fondo, y tendrá un volumen mínimo de acuerdo con la siguiente tabla:

TAMAÑO MAXIMO DEL MATERIAL	VOLUMEN DEL SONDEO DE PRUEBA NO MENOR DE:	MUESTRA MINIMA PARA HUMEDAD
Pasa malla	Centímetros cúbicos	Gramos
Núm. 4.75	2000	100
1/2"	2000	250
1"	2500	500
2"	2500	1000
3"	3000	1000

- 3) Se coloca en un recipiente todo el suelo que se vaya extrayendo del sondeo tomando las precauciones necesarias para evitar pérdida de material y de humedad.
- 4) Se pesa inmediatamente después el material extraído del sondeo y se registra su peso como W_m , en kilogramos.
- 5) Se mezcla dicho material hasta homogeneizarlo, se toma una muestra representativa, cuyo peso estará de acuerdo con el tamaño máximo del agregado antes especificado y se determina su contenido de agua, anotando dicho contenido de agua como w , en por ciento.

- 6) Se pesa arena seleccionada y se seca en una cantidad estimativamente superior en veinticinco por ciento (25%) a la requerida para llenar el volumen del sondeo; se anota su peso como W_{si} , en gramos y con ella se alimenta el dispositivo, manteniendo el tubo flexible recogido con el cordel, para evitar la salida de la arena.
- 7) Se introduce la trompa del dispositivo dentro del sondeo y se vacía en éste la arena siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 4) anterior, repitiendo el procedimiento las veces que sea necesario para llenar el sondeo.
- 8) Se determina el peso de la arena que sobró incluyendo la del dispositivo, se anota como W_{sf} , en gramos y se obtiene por diferencia el peso de la arena W_s , empleada en total para llenar el sondeo, anotándolo en gramos.

En esta prueba se calculará y reportará lo siguiente:

- 1) El volumen del sondeo de prueba, mediante la siguiente fórmula:

$$V_m = \frac{W_{si} - W_{sf}}{d_{sd}} \times 1000 = \frac{W_s}{d_{sd}} \times 1000$$

En donde:

V_m - es el volumen del sondeo de prueba, en centímetros cúbicos.

W_{si} - es el peso inicial de la arena preparada, en gramos.

W_{sf} - es el peso final de la arena sobrante incluyendo la del dispositivo, en gramos.

γ_{sd} - es el peso específico o volumétrico de la arena empleada en la prueba, en kilogramos por metro cúbico.

W_s - es el peso de la arena empleada para llenar el sondeo, en gramos.

- 2) Se calcula y reporta el peso específico o volumétrico del material húmedo en el lugar, empleando la siguiente fórmula:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \times 1000$$

En donde:

γ_m - es el peso específico o volumétrico del material húmedo en el lugar, en kilogramos por metro cúbico.

W_m - es el peso del material extraído del sondeo, en gramos.

V_m - es el volumen del sondeo de prueba, en centímetros cúbicos.

- 3) Se calcula y reporta el peso específico o volumétrico del material en estado seco, en el lugar, empleando la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + w} \times 100$$

En donde:

- γ_d - es el peso específico o volumétrico del material en estado seco, en el lugar, en kilogramos por metro cúbico.
- γ_m - es el peso específico o volumétrico del material húmedo, en el lugar, en kilogramos por metro cúbico.
- w - es el contenido de agua del material, en por ciento

Las causas más frecuentes de error en esta prueba son las siguientes:

- 1) Que las paredes y fondo del sondeo presenten huecos por donde se fugue la arena.
- 2) Que la determinación del peso específico o volumétrico de la arena empleada no se verifique con la frecuencia requerida.
- 3) Que la arena empleada no esté seca o que no se limpie frecuentemente.

La determinación del peso específico o volumétrico en el lugar por el **método del cono y arena** (fig. 22), se aplica principalmente a suelos que pasan la malla Núm. 19.0 tanto en su estado natural como en estado compactado; sirve para obtener los coeficientes de variación volumétrica y los grados de compactación de los materiales que forman las terracerías. Es un procedimiento semejante al de trompa y arena, excepto que la medición del volumen del sondeo con arena graduada de peso específico o volumétrico previamente determinado, se hace utilizando un dispositivo constituido esencialmente por dos (2) conos metálicos que se ajustan a un frasco de vidrio.



Fig. 22
Instalación del equipo de cono y arena

Se determina el peso de la arena necesaria para llenar el cono de mayor tamaño, que se denomina cono de arena, de acuerdo al procedimiento siguiente:

- 1) Se vierte arena en el frasco del dispositivo en una cantidad suficiente para llenar el cono de arena, se montan los conos en la boca del frasco y se cierra la válvula.
- 2) Se pesa el dispositivo conteniendo la arena, anotando su peso como Wfs , en gramos.
- 3) Se pone la base sobre una superficie limpia, a nivel y sensiblemente plana.
- 4) Se invierte el dispositivo y se coloca sobre la base.
- 5) Se abre la válvula y se mantiene en estas condiciones hasta que se detenga el flujo de arena, es decir, hasta que se haya llenado el cono de mayor tamaño.
- 6) Se cierra perfectamente la válvula, se pesa el dispositivo con la arena remanente y se anota este peso como Wsr , en gramos.
- 7) Se determina el peso del cono de arena mediante la fórmula siguiente:

$$Wsc = Wfs - Wsr$$

En donde:

Wsc - es el peso del cono de arena, en gramos.

Wfs - es el peso inicial del dispositivo conteniendo arena, en gramos.

Wsr - es el peso del dispositivo con la arena remanente, en gramos.

El peso específico o volumétrico de la arena se determina siguiendo el procedimiento que se indica a continuación:

- 1) Se llena el frasco del dispositivo con la arena limpia y seca, se instalan los conos en la boca del frasco y se cierra la válvula.
- 2) Se pesa el dispositivo conteniendo la arena y se anota dicho peso como **Wfs**, en gramos.
- 3) Se coloca el recipiente de calibración sobre una superficie sensiblemente horizontal y firme en posición para ser llenado.
- 4) Se instala sobre el recipiente de calibración la base metálica del aparato sujetándola adecuadamente para evitar fugas de arena y se monta en ésta el dispositivo conteniendo la arena.
- 5) Se abre la válvula y se mantiene en estas condiciones hasta que se detenga el flujo de arena, quedando en esta forma llenos el recipiente de calibración y el cono de arena.

- 6) Se cierra perfectamente la válvula, se pesa el dispositivo con la arena remanente y se anota este peso como W_{fsr} , en gramos.
- 7) Se determina el peso específico o volumétrico de la arena ρ_{sd} , empleando la siguiente fórmula:

$$\rho_{sd} = \frac{W_{sd}}{V_r} \times 1000 = \frac{(W_{fs} - W_{fsr}) - W_{sc}}{V_r} \times 1000$$

En donde,

- ρ_{sd} - es el peso específico o volumétrico de la arena seca, en kilogramos por metro cúbico.
- W_{sd} - es el peso de la arena seca empleada para llenar el recipiente de calibración, en gramos.
- V_r - es el volumen del recipiente de calibración, en centímetros cúbicos.
- W_{fs} - es el peso del dispositivo con el frasco lleno de arena, en gramos.
- W_{fsr} - es el peso del dispositivo con la arena remanente, en gramos.
- W_{sc} - es el peso del cono de arena, en gramos.

El procedimiento para determinar el peso específico o volumétrico de un suelo, en el lugar, por este método, es el siguiente:

- 1) Una vez seleccionado el sitio en que se efectuará la prueba se prepara la superficie de tal manera que se tenga una porción plana de aproximadamente cincuenta (50) por cincuenta (50) centímetros, libre de partículas sueltas.
- 2) Se coloca sobre la base la superficie preparada, se marca en ésta el borde interior de dicha base para delimitar el sondeo y a continuación se efectúa éste a la profundidad requerida; se coloca en un recipiente el material extraído en dicho sondeo, se le determina su peso, y se toma la muestra para la prueba de humedad, todo lo anterior similar al método de la trompa y arena.
- 3) Se llena con arena el frasco del dispositivo, se montan los conos en la boca del frasco y se cierra la válvula.
- 4) Se pesa el dispositivo conteniendo la arena y se anota su peso como Wfs , en gramos.
- 5) Se invierte e instala el dispositivo sobre la base metálica previamente colocada en el sondeo, se abre la válvula y una vez que el flujo de arena se haya suspendido, por haberse llenado el sondeo y el cono de mayor tamaño, se cierra completamente la válvula.
- 6) Se pesa el dispositivo con la arena remanente en el frasco y se registra dicho peso como $Wfsr$, en gramos.

En esta prueba deberá calcularse y reportarse lo siguiente:

$$Vm = \frac{(Wfs - Wfsr) - Wsc}{\gamma_{sd}} \times 1000$$

En donde:

- V_m - es el volumen del sondeo, en centímetros cúbicos.
- W_{fs} - es el peso del dispositivo con el frasco lleno de arena, en gramos.
- W_{fsr} - es el peso del dispositivo con la arena remanente, en gramos.
- W_{sc} - es el peso del cono de arena, en gramos.
- γ_{sd} - es el peso específico o volumétrico de la arena seca, en kilogramos por metro cúbico.

- 2) Se calcula y reporta el peso específico o volumétrico del material húmedo en el lugar γ_m y el peso específico o volumétrico del material seco γ_d , empleando las fórmulas respectivas, que se indican en el método de la trompa y arena, en donde el volumen del sondeo de prueba V_m , se calculará como se indicó anteriormente.

Las causas más frecuentes de error en esta prueba son las mismas que se indicaron en el método anterior y además que la base de apoyo del aparato esté mal asentada en el sitio de prueba, propiciando la fuga de arena.

El método del agua (fig. 23), se emplea para la determinación de los pesos específicos o volumétricos de los suelos con fragmentos de roca, ya sea en estado natural o bien en estado compactado, cuando están formando capas o estratos de más de cero punto cuatro (0.4) metros de espesor. La prueba consiste en efectuar en dichos suelos, a partir de una superficie horizontal, un sondeo de forma regular, pesar el material extraído y relacionar su peso con el volumen de la excavación; este volumen se determina cubriendo la superficie del sondeo con una tela delgada de plástico y midiendo el volumen de agua que se necesita para llenarlo. Este método se utiliza en la determinación de los coeficientes de variación volumétrica.

La prueba se efectúa en la forma siguiente:

- 1) Se limpia y despalma el sitio de prueba, dejando una superficie de forma sensiblemente cuadrada y de un (1) metro por lado, como mínimo, prácticamente plana y horizontal lo que se comprobará con el nivel de burbuja.
- 2) Se efectúa en el sitio de prueba, sin abarcar toda la superficie preparada, un sondeo de forma sensiblemente cúbica o cilíndrica, cuyo volumen aproximado sea de cien (100) decímetros cúbicos o más, evitando alterar el acomodo del material en las paredes y fondo del sondeo. Se coloca sobre la lona el material que se vaya obteniendo de la excavación, sin que se produzcan pérdidas del mismo y

se cubre con una lona húmeda para evitar en lo posible que pierda humedad.

- 3) Inmediatamente después se pesa el material extraído del sondeo y se registra su peso total W_m , en kilogramos.
- 4) Se mezcla el material hasta homogeneizarlo convenientemente, se toma una muestra representativa cuyo peso esté de acuerdo con el tamaño máximo del material, de acuerdo a lo estipulado en la prueba de la trompa y arena, pero no menor de tres (3) kilogramos si el material contiene fragmentos de roca; se determina su contenido de agua y se anota dicho contenido como w , en por ciento.
- 5) Cuando la excavación del sondeo se dificulta, haciendo lenta la extracción del material, se efectúa el sondeo en dos (2) o más partes y al finalizar cada una (1) de ellas, se pesa el material correspondiente, se registra el peso parcial W_{mp} , en kilogramos y se determina su contenido de agua, de acuerdo con lo que se indica en el párrafo anterior, anotándolo como w_{mp} , en por ciento; lo indicado también se efectuará cuando se observen variaciones importantes en las características del material o en su compactación, para lo cual el sondeo se divide de acuerdo con dichos cambios.

- 6) Una vez terminado el sondeo, se coloca la tela de plástico cubriendo las paredes y piso de dicho sondeo, sujetando las orillas de la misma en la parte exterior para evitar fugas de agua.



Fig. 23
Preparación del lugar para el método de agua

- 7) Se vierte agua sobre la tela de plástico hasta llenar el sondeo, utilizando primero los recipiente aforados y después la probeta, y se anota el volumen de agua utilizada para llenarlo como volumen del sondeo V_m , en decímetros cúbicos con aproximación de diez (10) centímetros cúbicos.

Los cálculos y reportes de esta prueba son los siguientes:

- 1) Cuando el sondeo se haga en partes, se calcula el peso de todo el material húmedo extraído, sumando los pesos parciales W_{mp} , y registrando dicho peso como W_m , en kilogramos; también se calcula la humedad media w del material extraído, aplicando la siguiente fórmula:

$$w = \frac{W_{mp1} \times w_{mp1} + W_{mp2} \times w_{mp2} + \dots + W_{mpn} \times w_{mpn}}{W_m}$$

En donde:

w - es la humedad media del material extraído del sondeo, en por ciento.

$W_{mp1} \times w_{mp1} + W_{mp2} \times w_{mp2} + \dots + W_{mpn} \times w_{mpn}$, es la suma de los productos del peso del material húmedo extraído de cada parte del sondeo, W_{mp} , en kilogramos, por su contenido de agua correspondiente, w_{mp} , expresado en por ciento.

W_m - es el peso de todo el material húmedo extraído del sondeo, en kilogramos.

- 2) Se calcula el peso del material seco, extraído del sondeo, empleando la siguiente fórmula:

$$W_d = \frac{W_m}{100 + w} \times 100$$

En donde:

W_d - es el peso del material seco extraído del sondeo, en kilogramos.

W_m - es el peso total del material húmedo extraído del sondeo, en kilogramos.

w - es el contenido de agua del material, en por ciento.

- 3) Se calcula y reporta el peso específico o volumétrico del material húmedo en el lugar, empleando la siguiente fórmula:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \times 1000$$

En donde:

γ_m - es el peso específico o volumétrico del material húmedo en el lugar, en kilogramos por metro cúbico.

W_m - es el peso del material húmedo extraído del sondeo, en kilogramos.

V_m - es el volumen del sondeo, en decímetros cúbicos.

- 4) Se calcula y reporta el peso específico o volumétrico seco del material en el lugar, empleando la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V_m} \times 1000$$

En donde:

ρ_d - es el peso específico o volumétrico del material seco en el lugar, en kilogramos por metro cúbico.

W_d - es el peso del material seco extraído del sondeo, en kilogramos.

V_m - es el volumen del sondeo, en decímetros cúbicos.

Las causas más frecuentes de error en esta prueba, son las siguientes:

- 1) Que las paredes y el fondo del sondeo presenten huecos o irregularidades que dificulten el acomodo de la tela plástica o bien que se haya dejado material suelto en el sondeo, que impidan la evaluación correcta de su volumen.
- 2) Que no se adapte correctamente la tela de plástico a las paredes del sondeo, propiciando la formación de bolsas de aire.
- 3) Que la tela de plástico propicie alguna fuga de agua.
- 4) Que no se hagan las determinaciones parciales que se requieren de acuerdo con las variaciones en las características del material.

El método de la parafina se emplea para la determinación del peso específico o volumétrico en muestras inalteradas, extraídas de suelos finos utilizados en terracerías, que puedan labrarse sin que se disgreguen y cuyas partículas tengan un tamaño máximo inferior a la malla Núm. 4.75.

La prueba se efectúa en la forma siguiente:

- 1) Se pone la parafina o mezcla de parafina y petrolato en el vaso de aluminio y se le aplica calor únicamente hasta licuarla.
- 2) De una muestra inalterada obtenida, se labra un espécimen de forma sensiblemente regular y que tenga un volumen de cien (100) centímetros cúbicos, aproximadamente.
- 3) Se nivela y se tara la balanza con el hilo, se sujeta el espécimen con éste, dejándole un extremo libre y a continuación se pesa el espécimen y se anota su peso como W_m , en gramos.
- 4) Se toma el espécimen por el extremo libre del hilo y se sumerge brevemente en el vaso con la parafina licuada, cuantas veces sea necesario para que la parafina forme una capa delgada que lo cubra totalmente.

- 5) Se pesa el espécimen cubierto con parafina y se anota este peso como W_{mp} , en gramos.
- 6) Se coloca sobre el soporte giratorio de la balanza el vaso de precipitado conteniendo agua limpia a una temperatura comprendida entre quince y veinticinco grados centígrados (15-25°C). Se suspende de la balanza el espécimen sumergiéndolo en el agua y centrando el vaso en tal forma que el espécimen cuelge libremente sin tocarlo; se determina el peso sumergido en el agua del espécimen cubierto con parafina y se anota este peso como W'_{mp} , en gramos.
- 7) Se saca el espécimen del agua, se descuelga de la balanza y se le elimina totalmente la parafina que lo cubre.
- 8) Se determina el contenido de agua w del espécimen.
- 9) Se repite el procedimiento anterior para tener resultados de dos (2) especímenes como mínimo.

Los cálculos y reportes que se efectuarán en esta prueba son los que se indican a continuación:

- 1) Se determina el volumen de la parafina que cubre cada uno de los especímenes, empleando la siguiente fórmula:

$$V_p = \frac{W_{mp} - W_m}{\Delta_p}$$

En donde:

V_p - es el volumen de la parafina que cubre el espécimen, en centímetros cúbicos.

W_{mp} - es el peso del espécimen cubierto con parafina, en gramos.

W_m - es el peso del espécimen sin parafina, en gramos.

Δ_p - es el peso específico de la parafina o de la mezcla de parafina y petrolato, en gramos por centímetro cúbico, el cual deberá verificarse periódicamente. El valor promedio del peso específico de la parafina es de cero punto noventa y siete (0.97) gramos por centímetro cúbico.

2) Se calcula el volumen de cada uno de los especímenes sin parafina, aplicando la siguiente fórmula:

$$V_m = V_{mp} - V_p = \frac{W_{mp} - W'_{mp}}{\Delta_o} - V_p$$

En donde:

V_m - es el volumen del espécimen, en centímetros cúbicos.

V_{mp} - es el volumen del espécimen con parafina, en centímetros cúbicos.

- V_p - es el volumen de la parafina que cubre el espécimen, en centímetros cúbicos.
- W_{mp} - es el peso del espécimen cubierto con parafina, en gramos.
- W'_{mp} - es el peso sumergido del espécimen cubierto con parafina, en gramos.
- χ_o - es el peso específico del agua, considerado de un (1) gramo por centímetro cúbico.

- 3) Se calcula para cada espécimen húmedo su peso específico o volumétrico χ_m , mediante la siguiente fórmula:

$$\chi_m' = \frac{W_m}{V_m} \times 1000$$

En donde:

- χ_m - es el peso específico o volumétrico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
- W_m - es el peso del espécimen sin parafina, en gramos.
- V_m - es el volumen del espécimen, en centímetros cúbicos.

- 4) Se calcula para cada espécimen su peso específico o volumétrico en estado seco χ_d , empleando la siguiente fórmula:

$$\chi_d = \frac{\chi_m}{100 + w} \times 100$$

En donde:

- δ_d - es el peso específico o volumétrico del espécimen en estado seco, en kilogramos por metro cúbico.
- δ_m - es el peso específico o volumétrico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
- w - es el contenido de agua del espécimen, en por ciento.

5) Se calcula el promedio de los pesos específicos o volumétricos en estado húmedo, de los pesos específicos o volumétricos en estado seco y de los contenidos de agua, reportando estos valores como los correspondientes a la muestra.

Las causas más frecuentes de error en esta prueba son las siguientes:

- 1) Que se originen pérdidas de humedad en el espécimen por no protegerlo adecuadamente cuando no esté cubierto con parafina.
- 2) Que para cubrir el espécimen se utilice parafina demasiado caliente, originando pérdida de humedad en el mismo o formación de burbujas en la parafina.

- 3) Que al determinar el peso sumergido del espécimen cubierto con parafina, éste no se introduzca completamente en el agua o quede en contacto con el vaso.
- 4) Que no se le elimine completamente al espécimen la capa de parafina para la determinación del contenido de agua.

Se emplea el método de los especímenes labrados para la determinación del peso específico o volumétrico en muestras inalteradas de materiales cohesivos suaves, cuya estructura de partículas finas permite su labrado en forma regular. Los especímenes utilizados en esta prueba en general se pueden aprovechar posteriormente en otros ensayos.

La prueba se realiza de la forma siguiente.

- 1) De una muestra inalterada, se corta un prisma rectangular de bases sensiblemente paralelas y del tamaño adecuado para obtener un espécimen cilíndrico de tres punto seis (3.6) centímetros de diámetro y nueve (9) centímetros de altura, aproximadamente.
- 2) Se coloca y se centra el prisma en el torno y deslizando el arco apoyado sobre dos (2) de los soportes verticales del torno, se efectúan los cortes necesarios haciendo girar el prisma alternativamente hasta formar el espécimen cilíndrico.

- 3) A continuación se saca el espécimen del torno y se miden con el calibrador su altura y sus diámetros superior, central e inferior, anotando respectivamente estos valores como h , d_s , d_c y d_i , con aproximación de cero punto cero un (0.01) centímetro.
- 4) Se pesa el espécimen con aproximación de cero punto cero un (0.01) gramo, y se anota este valor como W_m .
- 5) Se determina el contenido de agua w del espécimen.

Los cálculos y reportes que se efectúan en esta prueba son los siguientes:

- 1) Se calcula el área de la sección del espécimen correspondiente a cada uno de sus diámetros superior, central e inferior, por medio de la siguiente fórmula:

$$A = 0.7854 d^2$$

En donde:

- A - es el área de la sección considerada, en centímetros cuadrados.
- d - es el diámetro de la sección considerada, en centímetros.

- 2) Se calcula el área promedio de la sección del espécimen, aplicando la siguiente fórmula:

$$A_p = \frac{A_s + 4A_c + A_i}{6}$$

En donde:

- A_p - es el área promedio de la sección del espécimen, en centímetros cuadrados.
 A_s - es el área de la sección superior del espécimen, en centímetros cuadrados.
 A_c - es el área de la sección central del espécimen, en centímetros cuadrados.
 A_i - es el área de la sección inferior del espécimen, en centímetros cuadrados.

- 3) Se calcula el volumen del espécimen, por medio de la siguiente fórmula:

$$V_e = A_p \times h$$

En donde:

- V_e - es el volumen del espécimen, en centímetros cúbicos.
 A_p - es el área promedio de la sección del espécimen, en centímetros cuadrados.
 h - es la altura del espécimen, en centímetros.

- 4) Se calcula el peso específico en estado húmedo γ_m , mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_e} \times 1000$$

En donde:

- γ_m - es el peso específico o volumétrico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
 W_m - es el peso del espécimen húmedo, en gramos.
 V_e - es el volumen del espécimen, en centímetros cúbicos.

- 5) Se calcula el peso específico en estado seco γ_d , aplicando la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + w} \times 100$$

En donde:

- γ_d - es el peso específico del espécimen en estado seco, en kilogramos por metro cúbico.
 γ_m - es el peso específico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
 w - es el contenido de agua del espécimen, en por ciento.

- 6) Se reportan como pesos específicos del material en los estados húmedo y seco, los valores de γ_m y γ_d , respectivamente, en kilogramos por metro cúbico y el contenido de agua w , en por ciento.

Al efectuar esta prueba se tomarán las siguientes precauciones:

- 1) El prisma rectangular utilizado deberá estar sobrado en sus dimensiones laterales para que se pueda labrar el espécimen cilíndrico, a fin de evitar que alguna de sus secciones tenga un diámetro menor que el especificado.
- 2) Al colocar el prisma de suelo en la base del torno no deberá dársele presión excesiva con el tornillo de sujeción, para evitar que se deforme o dañe el espécimen.
- 3) Una vez labrado el espécimen deberá determinarse su peso inmediatamente, para evitar errores por pérdida de humedad.
- 4) Los especímenes que presenten oquedades o salientes en su superficie, deberán desecharse o determinar su peso específico por otro procedimiento.

3.2.3 DETERMINACION DEL GRADO DE COMPACTACION

El procedimiento tiene por objeto determinar el grado de acomodo de las partículas de un suelo en su estado natural o bien, de las de un material pétreo que forma parte de una estructura, ya sea que esta se encuentre en construcción o terminada; fundamentalmente consiste en relacionar el peso volumétrico seco en el lugar, con el respectivo peso volumétrico seco máximo, expresándose el resultado en por ciento; ambas determinaciones se efectúan con porciones del suelo o material, correspondientes a un mismo tamaño máximo, el cual queda limitado de acuerdo con la fracción de suelo que se utilice en la prueba de compactación de laboratorio considerada.

- El grado de compactación se determina de la siguiente forma:
- Se obtiene el peso específico seco máximo $\gamma_{d\max}$ del material.
- Se obtiene el peso volumétrico seco en el lugar, del material o fracción del mismo γ_d , excepto que para medir el volumen del sondeo una vez extraído todo el material, las partículas mayores al tamaño máximo con que se realiza la prueba de compactación en el laboratorio, serán separadas mediante cribado y devueltas al sondeo después de iniciarse el vaciado de arena para no considerar el peso y volumen de aquellas, ni tomarlas en cuenta para la determinación del contenido de agua; dichas partículas deberán colocarse cuidadosamente en

la excavación, interrumpiendo el vaciado de la arena, de tal manera que al depositarlas no se altere el acomodo de ésta, la que deberá cubrir a cada una de las partículas individualmente, en tal forma que al completar el vaciado de la arena, ésta las envuelva totalmente sin dejar huecos. En los casos en que haya partículas que por su tamaño deben ser devueltas al sondeo, es más practico utilizar el método de la trompa y arena, ya que ello no implicaría remover el aparato instalado como ocurriría con el procedimiento de cono y arena.

- Se calcula el grado de compactación del material aplicando la siguiente fórmula:

$$G_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dm\acute{a}x}} \times 100$$

En donde:

- G_c - es el grado de compactación del material, en por ciento.
- γ_d - es el peso específico o volumétrico del material en estado seco, en el lugar, en kilogramos por metro cúbico.
- $\gamma_{dm\acute{a}x}$ - es el peso específico o volumétrico seco máximo del material, en kilogramos por metro cúbico.

3.2.4 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO SECO MAXIMO Y LA HUMEDAD OPTIMA

De acuerdo a la naturaleza de los materiales y al uso que se les pretenda dar, se han establecido procedimientos de prueba para llevar a cabo la compactación de los suelos en el laboratorio, con objeto de evaluar la compactación que se alcanza con los procedimientos aplicados en el campo. Las pruebas que generalmente se aplican son de los siguientes tipos:

- 1) Por impacto, como son las pruebas de: Compactación dinámica AASHTO estándar, Proctor SOP, AASHTO modificada tres (3) y cinco (5) capas y los Métodos de California y de Texas.
- 2) Por carga estática, como la prueba de compactación Porter.
- 3) Por amasado, como el método de compactación de Hveem.
- 4) Por vibración, como el método de compactación por mesa vibratoria.

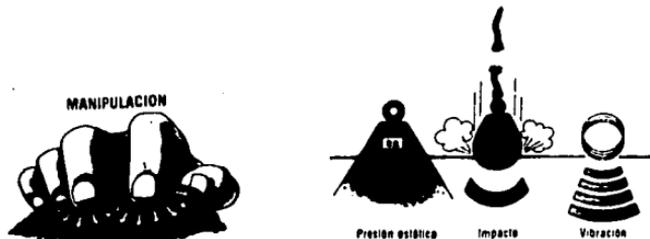


Fig. 24

PRUEBA AASHTO ESTANDAR

Sirve para determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima en suelos que se emplean en la construcción de terracerías. El método consiste esencialmente en preparar especímenes utilizando una misma muestra de material con diferentes contenidos de agua, compactándolos mediante impactos, para determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima (fig. 25). La prueba tiene cuatro (4) variantes:



Fig. 25
Elaboración del espécimen de prueba

- La variante A, que se aplica a materiales que pasan por la malla Núm. 4 y se compactan en molde de ciento uno punto seis (101.6) milímetros de diámetro interior.
- La variante B, que se aplica a materiales que pasan la malla Núm. 4 y se compactan en molde de ciento cincuenta y dos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior.
- La variante C, que se aplica a materiales con retenido en la malla Núm. 4; se efectúa utilizando la fracción que pasa la malla de 3/4" y se compacta en molde de ciento uno punto seis (101.6) milímetros de diámetro interior.
- La variante D, que se aplica a materiales con retenido en la malla Núm. 4; se efectúa utilizando la fracción que pasa la malla de 3/4" y se compacta en molde de ciento cincuenta y dos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior.

Los materiales que pasan la malla Núm. 4 o los que presenten retenido en dicha malla, de acuerdo con las variantes antes indicadas, pueden compactarse en moldes de ciento uno punto seis (101.6) milímetros o en moldes de ciento cincuenta y dos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior. Para seleccionar cuál de dichos moldes es el más apropiado y por tanto la variante correspondiente, se tomará en cuenta la conveniencia de utilizar especímenes de prueba más pequeños o la necesidad de emplear muestras de mayor tamaño, según los problemas de cada obra en

particular. Por ejemplo, en los materiales que frecuentemente contengan partículas retenidas en la malla Núm. 4 o que se degraden fácilmente, o bien que por diferentes razones presenten problemas de reproducibilidad, es conveniente compactarlos en el molde de mayor diámetro.

- 1) De una muestra obtenida y preparada, respectivamente, se obtiene por cuarteo una muestra de prueba de cuatro (4) kilogramos aproximadamente; para las variantes A y C y de siete punto cinco (7.5) kilogramos aproximadamente, para las variantes B y D.

- 2) Para las variantes A y B, se verifica que la muestra de prueba pase la malla Núm. 4 y de existir alguna partícula retenida en dicha malla se elimina. Para el caso de las variantes C y D se criba la muestra por la malla de 3/4", y si existe retenido se elimina; a continuación se disgregan los grumos y se mezcla perfectamente el material que constituye la muestra de prueba.

- La prueba se efectúa en la forma siguiente:

1) Se le agrega a la muestra de prueba, la cantidad de agua necesaria para que al ser repartida uniformemente, se tenga una humedad inferior en cuatro a seis por ciento (4 a 6 %) a la óptima estimada; en el caso de suelos que pasen la malla Núm. 4, se considera que se cumple lo

anterior cuando presente una consistencia tal que, al comprimir una porción de la muestra en la palma de la mano, no deje partículas adheridas en ésta, ni la humedezca y que a la vez, el material comprimido pueda tomarse con dos (2) dedos sin que se desmorone.

- 2) Se criba la muestra de prueba por la malla Núm. 4 en el caso de las variantes A y B, y por la malla de 3/4" para las variantes C y D, disgregando los grumos que se hayan formado durante la incorporación de agua. Se mezcla cuidadosamente la muestra para homogeneizarla, se disgregan los grumos y se divide en tres (3) fracciones aproximadamente iguales; se coloca una de las fracciones en el cilindro de prueba seleccionado de acuerdo con la variante respectiva, se apoya sobre el bloque de concreto y se compacta con veinticinco (25) golpes del pisón, para el caso de las variantes A y C, o con cincuenta y seis (56) golpes para las variantes B y D, manteniendo la altura de caída de treinta punto cinco (30.5) centímetros y repartiendo uniformemente los golpes en la superficie de la capa. Se escarifica ligeramente la superficie de la capa y se repiten estas operaciones con cada una de las dos (2) fracciones restantes.

- 3) Terminada la compactación, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del cilindro en un espesor promedio de uno punto cinco (1.5)

centímetros, pues de lo contrario la prueba deberá repetirse, utilizando de preferencia una nueva muestra con peso ligeramente menor que el inicial; se enrasa cuidadosamente el espécimen con la regla metálica y se deposita en una charola el material excedente. A continuación se pesa el cilindro con su contenido y se anota su valor W_1 en gramos.

- 4) Se seca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de su parte central se obtiene una porción representativa, a la que se le determina su humedad, anotando los datos correspondientes.
- 5) Se incorporan las fracciones del espécimen al material que sobró al enrasarlo, se disgregan los grumos, se agrega dos por ciento (2%) de agua, aproximadamente, con respecto al peso inicial de la muestra y se repiten los pasos descritos en los incisos 2) a 4) anteriores.
- 6) Con la misma muestra se repite lo indicado en el inciso 5) anterior, incrementando sucesivamente su contenido de agua, hasta que la muestra esté muy húmeda y el último espécimen elaborado presente una disminución apreciable en su peso con respecto al anterior. Para definir convenientemente las variación del peso específico de los especímenes elaborados, se requiere que las determinaciones sean cuatro (4) o cinco (5); así también,

que en la segunda determinación el peso del cilindro con el espécimen húmedo, sea mayor que en la primera, y que en la penúltima determinación sea mayor que en la última.

- Los cálculos y reportes que deberán efectuarse en esta prueba son los siguientes:

- 1) Se calcula el contenido de agua de cada espécimen.
- 2) Se calcula el peso específico del material húmedo por medio de la siguiente fórmula y se anota su valor.

$$\gamma_m = \frac{W_i - W_c}{V} \times 1000$$

En donde:

- γ_m - es el peso específico del material húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
- W_i - es el peso del material húmedo compactado más el peso del cilindro en gramos.
- W_c - es el peso del cilindro, en gramos.
- V - es el volumen del cilindro, en centímetros cúbicos.

- 3) Se calcula el peso específico de cada espécimen en estado seco, mediante la siguiente fórmula y se anota su valor.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + w} \times 100$$

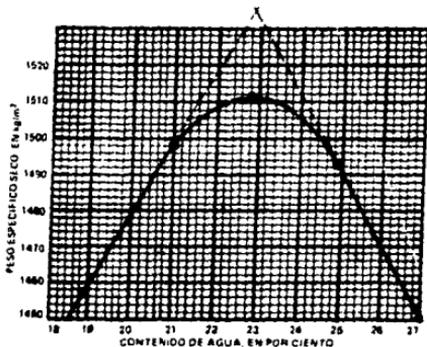
En donde:

γ_d - es el peso específico del espécimen en estado seco, en kilogramos por metro cúbico.

γ_m - es el peso específico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.

w - es el contenido de agua, en por ciento.

- 4) Se determina el peso específico máximo del material en estado seco, partiendo de una curva como la que se ilustra en la Fig. 26, en donde las ordenadas representan los pesos específicos y las abscisas los contenidos de agua, de cada uno de los especímenes. El punto más alto de dicha curva es el que representa el peso específico seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$, y la humedad correspondiente, w_o es la óptima del material.



- 5) Se reporta el peso específico seco máximo $\rho_{dm\acute{a}x.}$, en kilogramos por metro cúbico y la humedad óptima w_o , en por ciento.

Al efectuar esta prueba deberán tomarse las siguientes precauciones:

- 1) La muestra utilizada para la prueba de compactación, se secará solamente lo necesario para poderla disgregar.
- 2) Durante la compactación, los golpes del pisón se repartirán uniformemente en toda la superficie del espécimen, manteniendo la guía en posición vertical, verificando que la caída del pisón sea libre y que la superficie del mismo se mantenga limpia.
- 3) La curva peso específico seco-húmedo, se obtendrá de una sola muestra de prueba y no se secará ésta para determinar puntos de la curva que correspondan a humedades menores de la que ya tiene el material.
- 4) La humedad del primer espécimen será inferior a la óptima y cada una de las ramas de la curva mencionada se definirá con dos (2) puntos.

PRUEBA PROCTOR SOP

Esta prueba de compactación dinámica sirve para determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima en suelos que se emplean en la construcción de terracerías, cuando pasan la malla Núm. 4, con una tolerancia máxima de diez por ciento (10%) de retenido en dicha malla, pero que pasan totalmente por la malla de 1/8". No se efectuará en arenas y en los materiales cuyo índice plástico sea igual o menor que seis (6). El método consiste esencialmente en preparar especímenes utilizando una misma muestra de material con diferentes contenidos de agua, compactándolos en tres (3) capas, mediante impactos con pisón de dos punto cinco (2.5) kilogramos de peso y altura de caída de treinta punto cinco (30.5) centímetros.

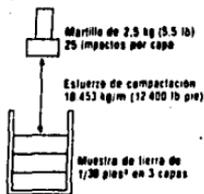


Fig. 27

- A) El equipo y materiales necesarios para efectuar esta prueba son los que se requieren para la prueba AASHTO estándar variante A, incluyendo además las mallas de 1/8" y la Núm. 10.

B) La preparación de la muestra deberá efectuarse como se indica a continuación:

- 1) De una muestra obtenida y preparada, se toma por cuarteo una porción de prueba, de tres (3) kilogramos aproximadamente.
- 2) Se criba la porción de prueba por la malla Núm. 4 y si el material tiene un retenido de diez por ciento (10%) como máximo en esta malla y pasa todo por la malla de 1/8", se criba por la malla Núm. 10, disgregando manualmente los grumos que se retengan; se vuelven a cribar por la misma malla y se continúa este proceso hasta que las partículas que se retengan en dicha malla no puedan ser disgregadas. Terminada la disgregación se mezcla perfectamente toda la muestra de prueba.

- El procedimiento de prueba es el mismo indicado en la variante A, del método AASHTO estándar, excepto que en lugar de veinticinco (25) golpes se dan treinta (30) golpes por capa.
- Los cálculos y reportes que deberán efectuarse son los mismos que se citan en la prueba dinámica AASHTO estándar.
- Al efectuarse esta prueba se tomarán las mismas precauciones indicadas en la prueba dinámica AASHTO estándar.

- **PRUEBA AASHTO MODIFICADA (3) CAPAS**

La prueba sirve para determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima en suelos que se emplean en la construcción de terracerías; consiste en preparar especímenes de prueba, utilizando la misma muestra de material, con diferentes contenidos de agua, la que se compacta en tres (3) capas en molde de dimensiones especificadas, mediante la aplicación de impactos con un pisón de cuatro punto cincuenta y cuatro (4.54) kilogramos de peso y altura de caída de cuarenta y cinco punto siete (45.7) centímetros.

Esta prueba tiene cuatro (4) variantes:

- La variante A, que se aplica a materiales que pasan la malla Núm. 4, y se compactan en molde de ciento uno punto seis (101.6) milímetros de diámetro interior.
- La variante B, que se aplica a materiales que pasan la malla Núm. 4, y se compactan en molde de ciento cincuenta y dos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior.
- La variante C, que se aplica a materiales con retenido en la malla Núm. 4, se efectúa utilizando la fracción que pasa la malla de 3/4" y se compacta en molde de ciento uno punto seis (101.6) milímetros de diámetro interior.

- La variante D, que se aplica a materiales con retenido en la malla Núm. 4, se efectúa en la fracción que pasa la malla de 3/4" y se compacta en molde de ciento cincuenta y dos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior.

Los materiales que pasan la malla Núm. 4, o los que presentan retenido en dicha malla, de acuerdo con las variantes antes mencionadas, pueden compactarse en moldes de ciento uno punto seis (101.6) milímetros o en molde de ciento cincuenta y dos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior. Para seleccionar cuál de dichos moldes es el más apropiado y por tanto la variante correspondiente, se tomará en cuenta la conveniencia de utilizar especímenes de prueba más pequeños o la necesidad de emplear muestras de mayor tamaño, según los problemas de cada obra en particular; por ejemplo, en los materiales que con frecuencia contengan partículas retenidas en la malla Núm. 4, o que se degraden fácilmente, o bien, que por diferentes razones presenten problemas de reproducibilidad, es conveniente utilizar el molde de mayor tamaño.

- El equipo y materiales necesarios para efectuar esta prueba son los que se requieren para la prueba AASHTO estándar descrita, excepto que el pisón para la prueba AASHTO modificada tres (3) capas será de cuatro punto cincuenta y cuatro (4.54) kilogramos de peso, acoplado a una guía metálica tubular para que tenga una caída libre de cuarenta y cinco punto siete (45.7) centímetros, con las

mismas tolerancias en peso y altura de caída indicadas en la prueba AASHTO estándar.

- La preparación de la muestra deberá efectuarse como se indicó para la prueba dinámica AASHTO estándar.

- El procedimiento de prueba será el mismo indicado para la prueba dinámica AASHTO estándar, excepto que el pisón para compactar los especímenes es el que se describió anteriormente.

- Los cálculos y reportes que deberán efectuarse son los mismos que se indican para la prueba dinámica AASHTO estándar.

- Al efectuar esta prueba se tendrán las mismas precauciones que las mencionadas para la prueba dinámica AASHTO estándar.

- **PRUEBA AASHTO MODIFICADA (5) CAPAS**

Prueba similar a la prueba de compactación dinámica AASHTO modificada tres (3) capas, ya descrita, excepto que para elaborar los especímenes de prueba se divide la muestra en cinco (5) porciones para integrar cada espécimen con cinco (5) capas, aplicándoles sucesivamente a cada una de ellas el mismo número de golpes que se especifica en el inciso mencionado, de acuerdo con el tamaño del molde de compactación.

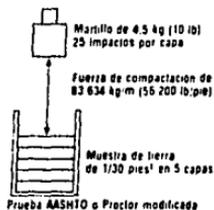


Fig. 28

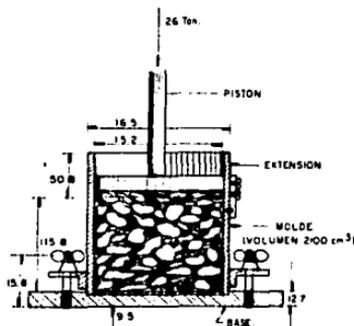
- La preparación de la muestra, el equipo y materiales necesarios y el procedimiento de prueba son los mismos que se indican para la prueba anterior, excepto que los especímenes se elaboran con cinco (5) capas en vez de tres (3).

- Los cálculos y reportes que se efectúan en esta prueba son los mismos mencionados en la prueba anterior.

- **PRUEBA PORTER POR CARGA ESTÁTICA**

Prueba que sirve para determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima, en suelos con partículas gruesas que se emplean en la construcción de terracerías, pudiendo efectuarse también en arenas y en materiales finos cuyo índice plástico sea menor de seis (6). El método consiste en preparar especímenes con

material que pasa la malla de 1", agregándoles diferentes cantidades de agua y compactándolos con carga estática. La principal aplicación de este procedimiento es la elaboración de especímenes de suelo para determinar el valor relativo de soporte y también se utiliza en la determinación del grado de compactación en los casos en que el proyecto así lo indique (fig. 29).



DIMENSIONES EN m.m.
COMPACTACION POR CARGA ESTÁTICA.

Fig. 29
Esquematzación de prueba

- La preparación de la muestra se efectúa como se indica a continuación:

- 1) De una muestra obtenida y preparada, teniendo cuidado de secar el material únicamente lo necesario para facilitar su disgregación, se toma y criba una cantidad suficiente para obtener una porción de dieciséis (16) kilogramos de material que pasa la malla de 1".

- 2) Se divide mediante cuarteo la porción que pasa por la malla de 1", con pesos aproximadamente iguales.

La prueba se efectúa en la forma siguiente:

- 1) Se toma una de las cuatro (4) partes del material y se le incorpora la cantidad de agua necesaria, para que una vez repartida uniformemente, presente una consistencia tal que, al ser comprimido en la palma de la mano, la humedezca muy ligeramente. Para favorecer lo anterior, en algunos casos será necesario dejar el material húmedo un cierto tiempo en reposo, cubierto con una lona húmeda.
- 2) Se coloca el material humedecido, dentro del molde con su collarín instalado, en tres (3) capas del mismo espesor aproximadamente y se le da a cada una de ellas veinticinco (25) golpes con la punta de la varilla, distribuyéndolos uniformemente.
- 3) Al terminar la colocación de la última capa, se toma el molde que contiene el material, se coloca en la máquina de compresión y se compacta aplicando lentamente carga uniforme, hasta alcanzar en un lapso de cinco (5) minutos la presión de ciento cuarenta punto seis (140.6) kilogramos por centímetro cuadrado, equivalente a una carga de veintiséis punto cinco (26.5) toneladas, aproximadamente; se mantiene esta carga durante un minuto

y se hace la descarga en el siguiente minuto. Al llegar a la carga máxima se observa la base del molde y si está ligeramente humedecida, el material tiene la humedad óptima de compactación y ha alcanzado su peso específico o volumétrico máximo (fig. 30).



Fig. 30
Realización de la prueba

- 4) Si al llegar a la carga máxima, no se humedece la base del molde, la humedad con que se prepara la muestra es inferior a la óptima y por lo tanto, se toma otra porción representativa del material y se le adiciona una cantidad de agua igual a la del espécimen anterior, más ochenta (80) centímetros cúbicos; se mezcla uniformemente y se repiten en ésta los pasos descritos en los subpárrafos 2)

y 3) de este párrafo. Se preparan los especímenes que sean necesarios siguiendo los pasos indicados en este subpárrafo, hasta lograr que en uno de ellos se observe el inicio del humedecimiento de la base del molde con la carga máxima, lo cual generalmente se consigue con menos de cuatro (4) especímenes.

- 5) Si antes de llegar a la carga máxima se humedece la base del molde por haberse iniciado la expulsión de agua, la humedad con que se preparó la muestra es superior a la óptima y en este caso se procede como se indica en el subpárrafo 4) de éste párrafo, con la diferencia de que en lugar de adicionar ochenta (80) centímetros cúbicos de agua, se disminuyen en cada nueva porción representativa del material, hasta lograr que en una de ellas, con la carga máxima, se observe el inicio del humedecimiento de la base del molde.
- 6) Terminada la compactación del espécimen preparado con la humedad óptima, se retira el molde de la máquina de compresión y se determina la altura del espécimen, he, restando de la altura del molde, la altura entre la cara superior del espécimen y el borde superior del molde; se registra este valor en centímetros, con aproximación de cero punto un (0.1) milímetro.

7) Se pesa el molde de compactación que contiene el espécimen compactado y se anota dicho peso W_i en kilogramos, con aproximación de cinco (5) gramos.

8) Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de la parte central se obtiene una muestra representativa y se le determina su contenido de agua w_o , el cual se anota.

- Los cálculos y reportes en esta prueba son los siguientes:

1) El volumen del espécimen compactado con la humedad óptima se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{A_m \times h_e}{1000}$$

En donde:

V - es el volumen del espécimen, en decímetros cúbicos.

A_m - es el área de la sección transversal del cilindro de compactación, en centímetros cuadrados.

h_e - es la altura del espécimen, en centímetros.

2) El peso específico húmedo se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\gamma_m = \frac{W_i - W_t}{V} \times 1000$$

En donde:

γ_m - es el peso específico del espécimen, en kilogramos por metro cúbico.

W_i - es el peso del espécimen húmedo más el peso del molde de compactación, en kilogramos.

W_c - es el peso del molde de compactación, en kilogramos.

V - es el volumen del espécimen, en decímetros cúbicos.

3) El peso específico seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma_{dm\acute{a}x} = \frac{\gamma_m}{100 + w_o} \times 100$$

En donde:

$\gamma_{dm\acute{a}x}$ - es el peso específico máximo del espécimen en estado seco, en kilogramos por metro cúbico.

γ_m - es el peso específico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.

w_o - es la humedad óptima del espécimen en por ciento.

4) Se reporta el peso específico seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$, en kilogramos por metro cúbico y la humedad óptima w_o , en por ciento, como valores correspondientes al material ensayado.

- Las causas más frecuentes de error en esta prueba son las siguientes:

- 1) Que la distribución del agua en el material no se uniforme.
- 2) Que la carga de compactación no se aplique en la forma especificada.
- 3) Que para fines de estimación de la humedad óptima se considere como humedecimiento de la base del molde, un exceso de agua libre expulsada al aplicar la carga de compactación.

- **OTRAS PRUEBAS**

La prueba de amasado es llevada a cabo en campo. Sin embargo, dentro del laboratorio resulta impráctica, por la falta de equipo adecuado, por lo que no se realiza.

La prueba de vibrado es poco utilizada en laboratorio, porque sólo es representativa para materiales granulares, gravas y tezontles.

CAPITULO IV

4. CRITICA A LAS PRUEBAS TRADICIONALES

4.1 .- CRITICA GENERAL

En la actualidad las pruebas que se realizan en el laboratorio y en el campo van acompañadas de errores de varios tipos con origen tanto en el operador como en el equipo.

Los errores del operador, se deben a:

- Fallas de apreciación.
- Falta de experiencia.
- Tiempos excesivos en la ejecución de las pruebas, y sobre todo,
- Al desconocimiento del criterio que debe aplicarse a cada prueba.

Los errores en el equipo, surgen por el mal manejo y deterioro del mismo, porque en lugar de reemplazarlo, únicamente se le repara, no hay servicio de mantenimiento, y puede llegarse el caso extremo de repararlo con partes improvisadas, no con las que originalmente corresponden.

En general, las pruebas pueden ser mal aplicadas o mal elegidas y si aunamos a esto los errores del laboratorista, se crea cierta desconfianza e incertidumbre en el constructor, ya que no le es posible igualar los resultados de campo con los obtenidos en el laboratorio y se ve obligado a recurrir a medidas improvisadas para evitar atrasos en la obra.

4.2 .- CRITICA A LAS PRUEBAS PARA LA OBTENCION DE LA HUMEDAD

Entre las pruebas tradicionales, la obtención de la humedad está sujeta a varios aspectos que determinan su veracidad, algunos de estos son: el personal, el equipo y el clima.

- En el aspecto del personal el resultado de la prueba dependerá del estado de ánimo del laboratorista, porque éste puede aminorar su rendimiento y esmero a pesar de su experiencia.
- El equipo servirá o no, de acuerdo a las condiciones en que se encuentre y los resultados estarán en función de si es el adecuado.
- El clima es el factor más importante, que provoca cambios significativos en los resultados, porque en climas húmedos o calientes la confiabilidad dependerá del tiempo de ejecución de la prueba. Se tendrán mejores resultados a menor tiempo y, por el contrario, resultados menos representativos a mayor tiempo.

Esto sucede porque en climas húmedos, la mayor exposición del material al medio ambiente permite mayor absorción de humedad en las muestras; de la misma forma en climas calientes, la evaporación es más acentuada a mayor tiempo de manejo de las muestras.

4.3 .- CRITICA A LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR EL PESO ESPECIFICO

Las pruebas para determinar el peso específico están sujetas principalmente a restricciones de tipo personal como son: conocimientos, habilidad y criterio; porque de éstas se derivan:

- El tiempo de ejecución, que por lo general varía entre 20 a 30 min.
- La precisión obtenida, tanto en la ejecución de la cala, como en la profundidad y forma de llenado, porque aunque existen normas para estos procedimientos, por lo general, el personal los realiza de acuerdo con su habilidad y conocimiento.
- La falta de cuidado para aplicar las pruebas adecuadas al tipo de material, porque éstas varían para suelos finos o suelos gruesos, en estos últimos los resultados se tornan más imprecisos, por lo que en ellos la experiencia y habilidad del laboratorista será un factor fundamental.

4.4 .- CRITICA A LA OBTENCION DEL GRADO DE COMPACTACION

Las críticas planteadas a las pruebas anteriores repercuten en la confiabilidad del grado de compactación que se obtiene a partir de los datos aportados por dichas pruebas. Los errores debidos a una mala determinación de los pesos volumétricos, a una mala técnica o a un criterio mal empleado, alteran fácilmente los resultados.

4.5 .- CRITICA A LAS PRUEBAS DE MEDICION DE LA COMPACTACION EN CAMPO

Los procedimientos tradicionales para medir la compactación en campo a menudo arrojan resultados poco confiables e imprecisos, que generan problemas en la obra. Esto se debe, entre otras causas a lo siguiente:

- El personal que realiza las pruebas generalmente sólo cuenta con conocimientos empíricos, obtenidos en su trabajo como ayudantes a lo largo de varios años y carece de criterio técnico para evitar errores en la realización de los procedimientos.
- Por norma los sondeos de prueba se ubican en lugares previamente definidos lo que se presta a que constructores sin escrúpulos efectúen una compactación especial en esos lugares que ya no serán representativos de toda la obra.

- El número de pruebas es limitado ya que cada una de ellas requieren de un tiempo prolongado para su ejecución y para la obtención de resultados, lo que impide dar una mayor extensión al área inspeccionada.

Por otra parte las pruebas tradicionales por su lentitud suelen producir resultados inoportunos, ya que no pueden reflejarse en las correcciones de los procedimientos constructivos. Esta lentitud obedece a que hay que tomar una muestra en el campo, trasladarla al laboratorio y esperar por lo menos 24 horas para que seque.

A los problemas anteriores hay que añadir que las calas que se practican en el cuerpo de las terracerías en ocasiones son origen de pequeñas deformaciones y baches que aparecen después de terminada la carretera y demeritan la calidad de la superficie de rodamiento.

4.6 .- CONCLUSIONES

Las criticas anteriores indican que las pruebas tradicionales para la compactación a menudo sólo permiten definir un índice que sirve para cumplir ciertos requisitos, pero no para llevar a cabo un verdadero control de calidad que se refleje en una buena obra terminada.

Por supuesto los problemas señalados pueden mitigarse con un personal debidamente capacitado y motivado, con equipos originales en buen estado de conservación y con mayor interés por parte de todos los participantes: constructores, supervisores y administradores.

Sin embargo, algunas de las inconveniencias señaladas no pueden evitarse porque son intrínsecas de los equipos y procedimientos tradicionales como son: la lentitud e inoportunidad de los resultados.

La corrección de estas inconveniencias, ha sido posible por el desarrollo de equipos innovadores para el control de la compactación.

Entre esos equipos destacan los medidores nucleares que representan una opción ventajosa para los constructores y supervisores, ya que permiten obtener resultados más precisos, más confiables y más oportunos, con lo que puede lograrse un adecuado control de calidad y en consecuencia un mejor manejo de recursos materiales, financieros y humanos, que desemboca en obras de buena calidad, construidas dentro del marco previsto de economía y en el cumplimiento de los programas preestablecidos.

CAPITULO V

5. EQUIPOS NUCLEARES

5.1 INTRODUCCION

5.1.1 HISTORIA

Para entender la teoría atómica, es necesario precisar los conceptos de molécula y de átomo.

Se llama Molécula, a la partícula más pequeña en que se puede dividir una sustancia sin que cambien sus propiedades esenciales.

Las moléculas son susceptibles de dividirse bajo la influencia del calor, de la electricidad y de los agentes químicos, pero al dividirse se pierde la naturaleza de la sustancia primitiva.

Las moléculas de agua que se parten por corriente eléctrica se convierten en 2 átomos de Hidrógeno y uno de Oxígeno, que ya no son agua, sino que son dos gases de propiedades muy distintas a las del agua.

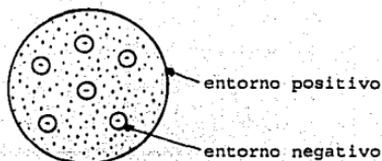
Toda la materia del Universo está formada por moléculas que a su vez están constituidas por átomos. Hace sólo 50 años el átomo significaba poco o nada para la mayoría de las personas. Demócrito, quien nació aproximadamente en el año 470 A.C. fue el primer hombre

que pensó en el átomo. Conjeturó que la materia debía estar formada por partículas muy pequeñas, indivisibles e invisibles, a las que llamó "ATOMOS" (del latín atomus y éste del griego ατομος; de α, sin, y τομω, cortar, dividir) y que consideró indestructibles. Supuso que los átomos de cada elemento eran diferentes en tamaño y en forma, y que esas diferencias eran las que hacían que cada elemento tuviera sus propias propiedades. Esta manera de pensar, que ahora parece de gran actualidad, no trascendió en su época, debido a que los filósofos griegos no comprobaban experimentalmente sus teorías, sino que llegaban a sus conclusiones por razonamientos sistemáticos y además porque los escritos de Demócrito desaparecieron y sólo quedaron fragmentos de ellos.

Pero hubo otra razón por la que fue olvidado y esa razón fue la teoría de Aristóteles sobre la materia. Aristóteles creía que la materia estaba formada por sustancias básicas llamadas "ELEMENTOS" Fuego, Aire, Tierra y Agua, que a diferencia de los átomos, sí se podían ver y se podían sentir por el tacto. Las ideas de Aristóteles tuvieron más peso que las de Demócrito y dominaron el conocimiento sobre la materia por casi 2000 años.

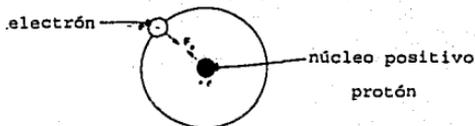
Los filósofos griegos ya habían hablado de átomos, pero la teoría atómica se inicia propiamente en el siglo pasado.

Entre los primeros intentos de explicar la estructura del átomo está el modelo atribuido a J. J. Thomson, el descubridor del electrón (en 1897). En ese modelo los electrones se ubicaban en un espacio esférico de carga positiva, como se muestra en la figura siguiente:



En su modelo se explicaba la neutralidad del átomo, postulando iguales cantidades de carga positivas y negativas.

Este modelo de Thomson duró poco tiempo debido al trabajo de Ernest Rutherford en 1911, quien bombardeando una delgada lámina metálica con un haz de partículas alfa logró una gran dispersión de las mismas, obteniendo la primera evidencia del núcleo atómico, la que explicó suponiendo que toda la carga positiva de un átomo se encontraba concentrada en una región pequeña, llamada núcleo del átomo y que los electrones estaban distribuidos en el espacio circundante a esa carga positiva.

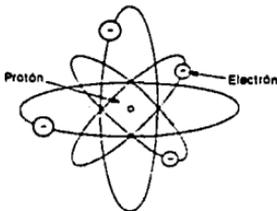


Los experimentos de Rutherford demostraron que el núcleo contenía la mayor parte de la masa de un átomo y que dicho núcleo tiene por diámetro, aproximadamente, una diezmilésima parte del diámetro del átomo.

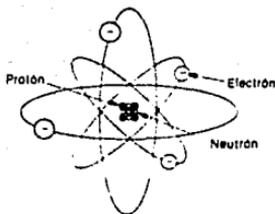
Así un átomo típico tiene un diámetro de 10^{-10}m (100 pm) y su núcleo un diámetro de 10^{-14}m (10 fm).

La modelación de Rutherford, consideraba únicamente una partícula positiva en el núcleo, por lo que se le considera el descubridor del protón, pero aun con esto, no estaba completa la estructura ni la forma del átomo, para esto fue necesario que un discípulo de Rutherford, Niels Bohr, dedujera la configuración del átomo en 1913.

Bohr consideraba trayectorias elípticas en los electrones con centro en el núcleo, siguiente figura.



En 1932 la configuración y la estructura del átomo fueron finalmente completadas por J. Chadwick, quién descubrió la partícula del núcleo que faltaba, el neutrón, la parte másica sin carga, que comparte junto con el protón el núcleo del átomo.



El Protón y el Neutrón tienen prácticamente la misma masa, pero se diferencian en que el primero posee una carga eléctrica positiva (+), mientras que el segundo carece de carga. Protones y Neutrones fuertemente unidos entre sí integran, como ya se ha mencionado, lo que se denomina el núcleo del átomo o nucleón, cuya masa es igual a la suma de Protones y Neutrones que lo componen. De la constitución del núcleo se desprende que éste tendrá una carga eléctrica positiva. Como todo átomo es normalmente neutro, se comprenderá que existan en el mismo cargas eléctricas negativas rigurosamente iguales y opuestas a las de los protones, que son los electrones.

El electrón, aunque 1840 veces más ligero que el protón, posee una carga eléctrica negativa (-) equivalente a la de éste.

Partícula	Símbolo	Masa, Kg	en u.m.a.	Carga, C
Electrón	e	9.1×10^{-31}	0.000550	-1.6×10^{-19}
Protón	p	1.673×10^{-27}	1.007276	$+1.6 \times 10^{-19}$
Neutrón	n	1.675×10^{-27}	1.008668	0

El número de Protones que contiene el Núcleo de un átomo se denomina Número atómico y se designa con la letra Z , y es igual al número de electrones orbitales.

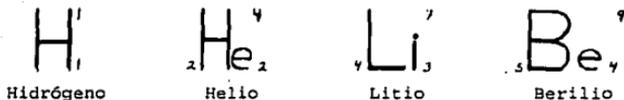
La suma del número de Protones y el de Neutrones se conoce como Número de Masa y se designa con la letra A , este número es aproximadamente igual al peso atómico del elemento, puesto que proporciona una idea aproximada de la masa del átomo. La masa de un neutrón es aproximadamente igual a la de un protón, la de los electrones es comparativamente despreciable.

El número de Neutrones en el Núcleo se representa por N y es igual al número másico menos el número atómico ($A-Z$).

En la naturaleza existen 272 átomos estables con distintos números de masa, que dan lugar a 103 elementos plenamente identificados mediante la notación siguiente:



En donde la X representa el símbolo químico. Como ejemplos de esta notación se tienen:



Si se considera al núcleo como un Sol minúsculo, los electrones son como planetas que gravitan en torno del mismo. Como dos cuerpos diferentemente electrizados se atraen, el electrón debería precipitarse sobre el núcleo del átomo. No ocurre así

porque, al girar en torno de aquél, engendra una fuerza centrífuga exactamente opuesta a la fuerza de atracción eléctrica. (En cierto modo, aunque con fuerzas de índole diferente, se reproduce el caso de la Tierra respecto al Sol o de un satélite artificial respecto a la Tierra: la velocidad adquirida sobre la órbita engendra una fuerza centrífuga que se opone a la atracción del cuerpo central.)

Resulta de lo antedicho que el átomo consta de un núcleo y de electrones planetarios, en número normalmente igual al de los protones.

Los electrones no pueden girar en torno al núcleo a cualquier distancia de éste, sino a ciertas distancias perfectamente determinadas, llamadas niveles de energía o capas, que, a partir de la más próxima al núcleo se designan con las letras K, L, M, N, O, P y Q. Por otra parte, cada uno de estos niveles no pueden contar sino con cierto número máximo de electrones: el primero (K) sólo puede tener 2 como máximo, el segundo (L) 8, y los otros 18 (M), 32 (N), 50 (O), 72 (P), y 98 (Q). Un electrón necesita tanta más energía para mantenerse en una órbita cuanto más grande sea ésta. Si se halla en una órbita o nivel determinado y recibe energía suficiente (en forma de un rayo de luz, por ejemplo), absorbe esta energía y pasa a un nivel superior, Si, por el contrario, pasa de un nivel a otro inferior -donde exista un sitio disponible- emite un exceso de energía en forma de ondas electromagnéticas. Tal es, por ejemplo, el origen de la luz o de la radiación gamma; en los cuerpos luminosos hay paso de electrones de algún nivel a otro inferior.

Se puede señalar el papel importante que representan en química los electrones de la última capa o electrones de valencia, pues ellos son los que permiten que los átomos se enlacen unos con otros para formar moléculas.

Como ya se ha dicho, el átomo normal, eléctricamente neutro, tiene exactamente tantos electrones planetarios como protones cuenta su núcleo. Cuando no es así, se dice que el átomo está ionizado y se le designa con el nombre de ion. Si tiene electrones en exceso, su carga eléctrica es negativa y se llama anión; si los tiene en número insuficiente, su carga es positiva y es un catión. La cohesión de los electrones en la capa periférica es tanto mayor cuanto más numerosos son.

El átomo tiende a aumentar el número de sus electrones de la capa exterior cuando el número de éstos es superior a 4, y a perderlos cuando los tiene en número inferior. Así, el Sodio solamente tiene un átomo periférico, mientras que el Cloro tiene siete. Aquél cederá, pues, a éste el referido electrón y se volverá así catión, mientras que el cloro pasará a ser un anión. Como dos electricidades de signo opuesto se atraen, los dos átomos permanecen unidos y constituirán el compuesto químico llamado cloruro de sodio, que no es más que la sal común. Los cuerpos que, como el Helio, el Argón, etc. tienen su capa periférica completa (con 2, 8, etc. electrones en la misma) no se pueden combinar químicamente con otros y no dan reacciones químicas, por lo que son llamados gases inertes; en este mismo caso se encuentran ciertos metales. En estos cuerpos la molécula y el átomo se confunden, por

que algunas moléculas están conformadas con un sólo átomo, un ejemplo de ello es la molécula del Helio.

Las moléculas de un elemento siempre contienen una sola clase de átomos, por ejemplo el oxígeno común O_2 y el Ozono O_3 .

Y si los átomos de dos o más elementos diferentes se combinan para formar una molécula, a la substancia formada se le llama compuesto, por ejemplo la molécula de agua H_2O .

5.1.2 ISOTOPOS

Las observaciones prácticas sobre el átomo han demostrado que estas propiedades de un elemento están caracterizadas principalmente por el número de protones que tiene su átomo. Existen átomos que tienen igual número de protones y en consecuencia propiedades muy similares, pero con masas atómicas diferentes por poseer en sus núcleos un número de neutrones. Muchos elementos están formados por átomos de diferente masa atómica, que tienen las mismas propiedades y que son muy difíciles de separar.

Por lo tanto podemos hablar de ISOTOPOS como núclidos de igual número atómico Z , pero masa atómica A , diferente.

Cada elemento tiene uno o varios isótopos, por lo que resulta que, aunque químicamente hay poco más de 100 elementos diferentes conocidos, existen más de 1300 variedades distintas de átomos. Cada una de estas variedades es llamado núclido.

El número de isótopos de un elemento es muy variable: el Estaño, por ejemplo, se presenta en forma de 10 isótopos con las siguientes masas atómicas: 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122 y 124. No así el flúor, que tiene únicamente uno, el de masa atómica 19.

Existen, 3 isótopos naturales del Oxígeno con masas atómicas de 16, 17 y 18; el isótopo de número másico 16 es el más abundante. Y el Hidrógeno tiene tres isótopos con masas atómicas de 1, 2 y 3, este elemento es tan importante que sus tres isótopos reciben diferentes nombres. El isótopo de número másico 1 se llama Hidrógeno, el de 2 Deuterio y el de 3 Tritio.

La creación de isótopos es difícil de llevar a cabo, porque como se ha visto, la principal diferencia entre los elementos es el número de protones en el núcleo, y lo único que distingue los isótopos del mismo elemento es el número de neutrones. Si se desea cambiar un elemento en otro, es necesario agregar o sustraer protones, y si se desea transformar los isótopos, es preciso manipular los neutrones.

Esto no es tan fácil como suena, porque el núcleo está empacado de modo muy compacto y no acepta con facilidad a recién llegados, ni deja salir a sus ocupantes. El método principal usado para transmutar de modo artificial un núcleo, es bombardearlo con pequeñas partículas móviles a gran velocidad.

El aparato utilizado para dar a esas partículas la velocidad que necesite el bombardeo nuclear, se llama acelerador de partículas y puede ser de varias clases. Algunos de ellos son los ciclotrones, betatrones, generadores de Van de Graaff y sincrotrones de protones. Dichos aparatos sólo pueden acelerar partículas cargadas. Los neutrones no pueden acelerarse de este modo por no tener carga.

5.1.3 ENERGIA

Se ha encontrado que la masa del núcleo no es exactamente igual a la suma de las masas de sus nucleones. Por ejemplo, el átomo de Helio, He_2 , que tiene dos electrones alrededor del núcleo, integrado por dos protones y dos neutrones, y que en la tabla periódica se encuentra con una masa atómica de 4.0026 u.m.a., que se compara de esta manera con la masa de las partículas individuales que la constituyen:

$$2p = 2(1.007276 \text{ u.m.a.}) = 2.014552 \text{ u.m.a.}$$

$$2n = 2(1.008665 \text{ u.m.a.}) = 2.017330 \text{ u.m.a.}$$

$$2e = 2(0.000550 \text{ u.m.a.}) = 0.001100 \text{ u.m.a.}$$

$$\text{S U M A T O R I A} \quad 4.032982 \text{ u.m.a.}$$

La masa de las partículas (4.032982 u.m.a.) es aparentemente mayor que la masa del átomo (4.0026 u.m.a.)

$$m_{\text{partículas}} - m_{\text{átomo}} = 4.032982 \text{ u.m.a.} - 4.0026 \text{ u.m.a.} = 0.030382 \text{ u.m.a.}$$

Cuando los nucleones se unen para formar el núcleo del Helio la masa se reduce. A esta diferencia de masa se llama defecto de masa.

El defecto de masa se define como la diferencia entre la masa en reposo del núcleo y la suma de las masas en reposo de sus nucleones constituyentes.

A partir del trabajo de Einstein se estableció que la masa y la energía son cantidades equivalentes. Ya que la energía se conserva, y una disminución de la masa del sistema significa que debe liberarse energía en el proceso de unir al sistema. En el caso del Helio la energía proviene de una masa de 0.0304 u.m.a. y es igual a

$$E = mc^2 = (0.0304 \text{ u.m.a.}) \frac{931 \text{ MeV}}{1 \text{ u.m.a.}} = 28.3 \text{ MeV}$$

La energía total que se liberaría si se formara o fragmentara un núcleo en sus partículas constituyentes, es llamada energía de enlace o de amarre, que para el caso del Helio es de 28.3 MeV.

5.1.4.- LA RADIOACTIVIDAD

En la última década del siglo pasado ROENTGEN realizó experimentos con la luz fluorescente, al pintar una pieza de cartón con cierto compuesto químico de bario, de alta fluorescencia, descubrió que la pantalla brillaba aun cuando los electrones en ese momento no podían llegar hasta ella. Así se dio cuenta de que la fuente que tenía era el origen de otra nueva clase de rayos que penetra el cartón; luego colgó una hoja de metal entre el tubo y la pantalla de metal y siguió observando fluorescencia, aunque menos intensa. Después metió su mano entre el tubo y la pantalla, y lo que vio debió de asustarlo sobremanera: en la pantalla se veía el esqueleto de una mano en movimiento, al mover su mano en vida. Fue enorme el impacto que causó el descubrimiento de estos rayos. Qué el llamó X por desconocer de qué se trataban.

MARTIN HEINAICH KLAPROTH científico alemán separó en 1789 del mineral Pechblenda, el Uranio, que es un polvo negro. Se encontró que sus propiedades químicas eran muy diferentes a las de los elementos conocidos, pero durante mucho tiempo se le consideró, sin embargo, como un elemento de poca importancia que se utilizaba en raras ocasiones. En esa época Klapproth se impresionó profundamente con el descubrimiento del planeta Urano, por lo que bautizó al elemento recién descubierto por él con el nombre de Uranio.

En 1818, JOE JAKOB BERZELIUS químico sueco descubrió el Torio al separarlo de un mineral conocido actualmente como Torita. Ni Klaproth ni Berzelius sospecharon que los elementos descubiertos por ellos llegarían a ser tan importantes en el desarrollo del conocimiento de la ciencia y mucho menos que emanaran radiaciones de ellos. Este descubrimiento fue realizado en el Uranio por ANTOINE HENRI BECQUEREL en 1896.

En París en el año de 1896, Becquerel notó que al poner en contacto el compuesto de Uranio con una placa fotográfica envuelta en papel negro, se producía el mismo efecto que si la placa estuviera en presencia de los rayos X:

Becquerel pronto se dio cuenta de que las radiaciones provenientes del compuesto de Uranio no eran originadas por una reacción química, y que al aumentar la concentración del Uranio en el compuesto químico, más rápidamente se velaba la placa fotográfica que cuando tenía menos Uranio.

Así, transcurrieron 107 años entre el descubrimiento del Uranio (por Klaproth, en 1789) y el hallazgo de que este elemento emana radiaciones; a partir de entonces los nuevos descubrimientos se desarrollaron con mucha rapidez.

Cuando Becquerel publicó los resultados de sus investigaciones sobre los rayos provenientes del Uranio, los esposos Pierre y Marie Curie, se interesaron mucho en este fenómeno tan misterioso.

Mientras PIERRE CURIE continuaba con sus proyectos de investigación MARIE CURIE empezaba a estudiar la radiactividad natural. Con lo cual presentó un informe en el que hacía constar que todos los compuestos de Uranio y Torio que había examinado emitían radiaciones. Pierre y Madame Curie se dieron cuenta que las radiaciones emitidas por un mineral de uranio eran más intensas que las observadas en los compuestos puros de Uranio. Por lo que Madame Curie empezó a separar por procesos químicos todos los elementos, quedando un producto cuyas radiaciones eran cientos de veces más intensas que las que emitían el Uranio, además estas radiaciones eran capaces de atravesar el papel, la madera y hasta placas de metal. El producto que ellos obtuvieron fue el Polonio, pero aún este seguía emitiendo radiaciones, por lo que siguieron separando y finalmente llegaron a encontrar el elemento desconocido que era la fuente de las radiaciones misteriosas, y la denominaron RADIO.

A la propiedad que poseen el Radio y otros elementos inestables de emitir radiaciones espontáneamente al desintegrarse, transformándose en otros materiales, ya sea del mismo elemento o de otro, Marie Curie le dio el nombre de Radiactividad.

En la actualidad la radiactividad puede definirse como ...
" la explosión, desintegración o descomposición de los átomos, que liberan partículas subnucleares o radiación electromagnética, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo".

Por tanto existen dos tipos de radiación:

- Radiación de partículas.
- Radiación electromagnética.

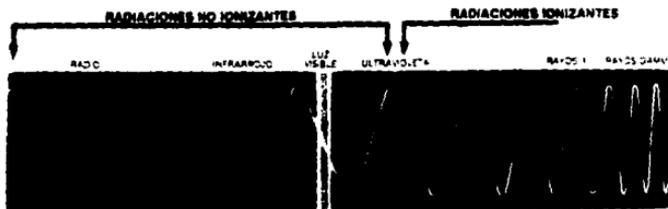
En la liberación de partículas subnucleares, el elemento se transforma en otro diferente.

La radiación de partículas se conforma de la siguiente manera:

- Partículas alfa (α): son nucleones formados por dos neutrones asociados a dos protones, lo cual forma un núcleo de helio, por lo que el que emite pierde esta masa y quien recibe la gana.
- Partículas beta (β): partículas de masa pequeña, igual a la del electrón, que puede ser positiva o negativa.
 - Partícula negativa o negatrón (β^-), es el electrón generado en la transformación de un neutrón en protón y electrón.
 - Partícula positiva o positrón (β^+), es la partícula emitida de similar masa que el electrón, pero con carga positiva, generada al transformarse un protón en neutrón.

- Radiación de neutrones: partículas sin carga, generadas como resultado de una reacción nuclear secundaria, porque ningún núcleo emite neutrones espontáneamente, salvo en el caso poco común de la fisión nuclear, la cual va acompañada por la emisión de neutrones.

En el caso de radiación electromagnética, sigue siendo el mismo elemento, pero pasa a otro estado de energía.



La radiación electromagnética se conforma de la siguiente manera:

- Rayos gamma: no son partículas, sino ondas de energía que se liberan cuando se desintegra un átomo. Son similares a los rayos X, la luz u ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda y por tanto mayor energía. Son producidas por la transición entre niveles de energía, en el núcleo; son a menudo llamados fotones.

La emisión de rayos gamma, se realiza en ciertos átomos que se encuentran en un estado de excitación por un exceso de energía, que para estabilizarse es necesario que emitan ese exceso en forma de radiación gamma.

- Rayos X : es similar a la radiación gamma, difiere únicamente en su origen, el cual es extranuclear (se forma por la transición de los electrones en los niveles cuánticos de energía).

La unidad de radiactividad es el Curie o Curio, que se define como cualquier cantidad de material radiactivo que sufre 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo (dps) ó 2.22×10^{12} desintegraciones por minuto (dpm), equivalen aproximadamente a la relación de decaimiento de 1 gr. de radio. Se abrevia Ci y sus fracciones más usadas son el mCi (milicurio 1×10^{-3} Ci) y el μ Ci (microcurio 1×10^{-6} Ci).

En los últimos años, ha sido creada otra unidad para medir la radiactividad, el Becquerel, que se abrevia Bq y se define, como la cantidad de cualquier material radiactivo que sufre una desintegración por segundo.

En consecuencia:

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq y}$$

$$1\text{Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

5.1.5. PRINCIPIOS DE FUNCIONALIDAD

Toda radiación posee energía, ya sea intrínseca, como en el caso de la radiación electromagnética o como energía cinética de movimiento, en el caso de las radiaciones de partículas.

La radiación comúnmente se da por dos tipos, la ionización y la excitación.

a) IONIZACION: Es cualquier proceso que resulta en la expulsión de un electrón de un átomo (o molécula), el cual queda cargado positivamente.

b) EXCITACION: Es la adición de energía a un sistema atómico o molecular, el cual pasa de un estado base o estabilizado a otro excitado. La energía añadida puede ser absorbida por el núcleo o por un electrón orbital, dependiendo del tipo de interacción.

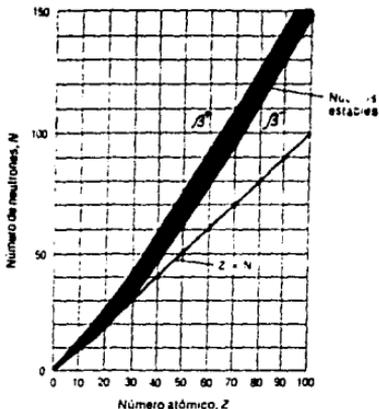
Las radiaciones son capaces de expulsar uno o más electrones de su órbita o bien de trasladar a los electrones orbitales a un nivel más alto de energía.

En el primer caso (ionización) se forma un átomo cargado positivamente y un electrón libre.

En el otro caso (excitación electrónica), el átomo excitado puede perder su energía excedente cuando un electrón que se encuentra en una capa de energía alta pasa a ocupar una vacante (de menor energía) creada por el proceso de excitación; cuando esto ocurre, la energía excedente se libera como un fotón o radiación electromagnética (que puede escapar del material, pero que sufre usualmente otro proceso de interacción). La excitación nuclear tiene importancia solamente para neutrones o radiaciones de energías relativamente altas.

La radiactividad que existe en la naturaleza se limita con algunas excepciones a los elementos más pesados, comenzando con el Polonio, que es el núm. atómico 84; estos tienen un gran número de protones y neutrones que representan un gran número de masa. Sin embargo, algunos elementos más livianos tienen isótopos radiactivos naturales, el Carbono 14 con núm. atómico 6 y el Potasio 40 con núm. atómico 19, son isótopos radiactivos naturales.

Si se traza una gráfica de neutrones (N) contra protones (Z) para los 272 isótopos estables encontrados en la naturaleza, con lo que se obtiene una curva que principia por tener una pendiente de 45 grados. De este modo, la relación N/Z empieza por ser igual o casi igual a 1 para los elementos ligeros y llega a ser mayor que 1 para los elementos pesados.



Los isótopos inestables o radiactivos se sitúan a ambos lados de esta curva, porque la relación se rompe mediante un exceso de neutrones o protones. En el primer caso, los núcleos emiten partículas β^- (negatrones) que transforma un neutrón en protón para restablecer la relación.

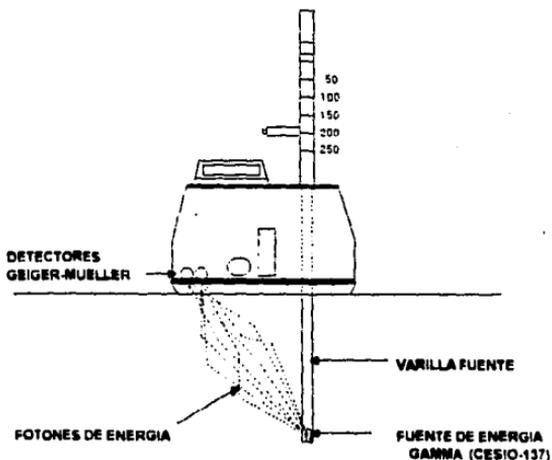
En el segundo caso se emite una partícula β^+ (positrón) o un electrón orbital capturado, con lo que un protón se transforma en neutrón, restableciéndose nuevamente la relación.

En general, sólo isótopos de los elementos más pesados, con $Z > 84$, emiten partículas alfa (α), para conseguir su estabilidad.

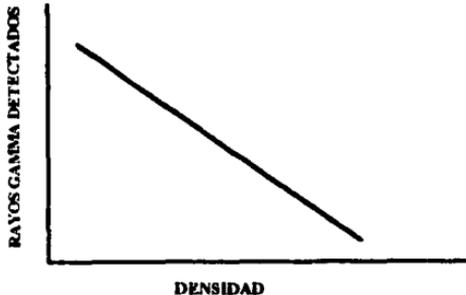
5.2.- MEDICION DE LA DENSIDAD POR MEDIOS NUCLEARES

El densímetro nuclear es una caja que contiene una "varilla fuente" que en su punta contiene Cesio-137 que emite rayos gamma y detectores Geiger-Mueller.

MODALIDAD DE TRANSMISION DIRECTA



La varilla fuente emite fotones que al chocar con los electrones del suelo que se están midiendo se dispersan parcialmente. Los detectores Geiger-Mueller miden los fotones que no son dispersados. A mayor lectura de estos detectores menor densidad.



GRAFICA REPRESENTATIVA DE DENSIDAD

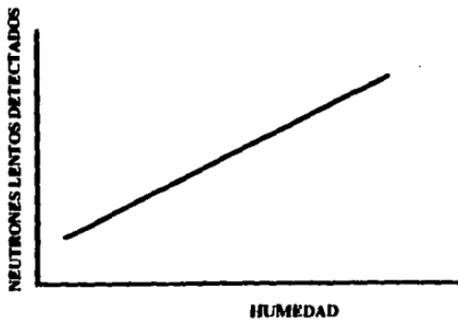
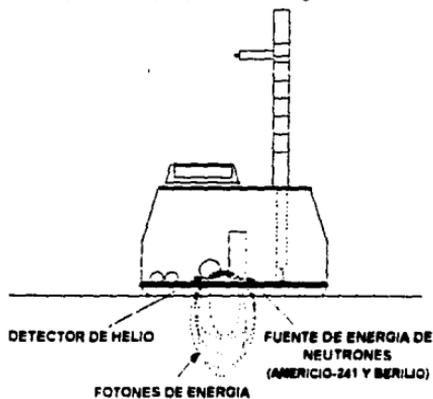
5.3.- MEDICION DE LA HUMEDAD POR MEDIOS NUCLEARES

Para la medición de la humedad dentro del equipo se cuenta con dos fuentes radiactivas, una de Americio-241 y otra de Berilio, así como un detector que contiene Helio.

El Americio 241 emite rayos gamma que al incidir sobre el Berilio ocasiona que éste genere neutrones con gran aceleración.

Estos neutrones al penetrar en el suelo, cuya humedad se desea medir, chocan con los átomos de Hidrógeno que contienen las moléculas de agua en ese suelo. Como consecuencia de este choque los neutrones se desaceleran y se convierten en neutrones lentos que pueden ser capturados por el detector con Helio. A mayor captura de neutrones lentos mayor humedad.

MEDICION DE LA HUMEDAD EN CUALQUIER MODALIDAD



GRAFICA REPRESENTATIVA DE HUMEDAD

La emisión de radiación se realiza a una profundidad que está en función del contenido de humedad y disminuye con el incremento de la misma. La medición está comprendida, aproximadamente, entre 15 a 20 cm en un suelo con una humedad de 0.24 gr/cm^3 .

En el procedimiento para medir la humedad, será necesario incluir un valor de corrección, ya que el resultado será el promedio de humedades de las capas en las cuales tiene alcance la medición.

El valor de corrección será el valor determinado mediante una prueba tradicional, hecha en el sitio exacto donde se realizó una prueba de humedad con el densímetro nuclear.

El valor de corrección será la diferencia entre el valor dado por la prueba tradicional y el valor obtenido con el densímetro; esta diferencia ya sea positiva o negativa se introducirá en el renglón de desviación de humedad (wet bias).

Este valor regirá las pruebas con el densímetro a lo largo de la obra que tenga las mismas características del material, con el cual se realizó la corrección, en caso contrario se realizará una nueva corrección.

5.4.- METODOS EMPLEADOS PARA LA DETERMINACION DE LA DENSIDAD Y LA HUMEDAD

5.4.1 RETRODISPERSION

El método de medición de la dispersión de retorno o retrodispersión puede realizar ensayos no destructivos, por lo que es usado principalmente para pavimentos asfálticos y de concreto, en los cuales la capa a probar es de un espesor delgado y la perforación de una cala no es muy factible. Esto es posible ya que el dispositivo de medición descansa sobre la superficie, pero para lo cual será necesario preparar la superficie conforme a la norma que posteriormente se describe.

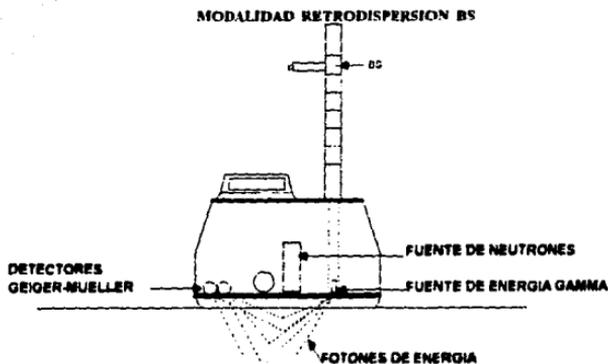
5.4.1.1 Definición

Se llama retrodispersión a la radiación emitida por la fuente que tiende a regresar a la misma para ser capturada y registrada por el detector correspondiente.

Dentro de este procedimiento se tienen dos posiciones:

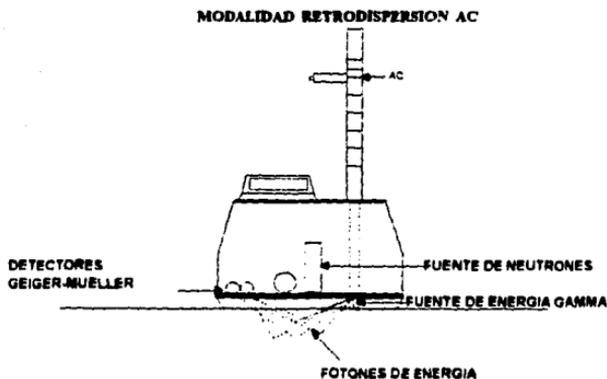
a) Posición BS

En esta posición la fuente radiactiva se coloca un poco elevada con respecto al nivel del suelo, lo que permite bloquear el curso de los fotones en la superficie del pavimento. De esta forma se obtienen lecturas de mayor profundidad y se minimiza el error debido a la rugosidad de la superficie. La medición de densidad alcanza hasta 71 mm. Esta posición se usa frecuentemente en pavimentos con espesores de 76 mm.



b) Posición AC

En esta posición la fuente se coloca al nivel del suelo, con lo cual los fotones se dispersan más y la profundidad de medida es menor, lo que permite medir densidades hasta en 51 mm. Se usa principalmente en pavimentos con recubrimientos delgados y en superficies o carpetas gastadas.



5.4.2. TRANSMISION DIRECTA

Este método no necesita gran preparación a excepción de eliminar la irregularidad del terreno en el que se realizará la prueba, para lo que se procederá como se indica en las normas para la Retrodispersión.

El modo de Transmisión Directa mide densidades de suelos y agregados a profundidades de 50 a 200 mm. Hay modelos opcionales que miden hasta profundidades de 300 mm.

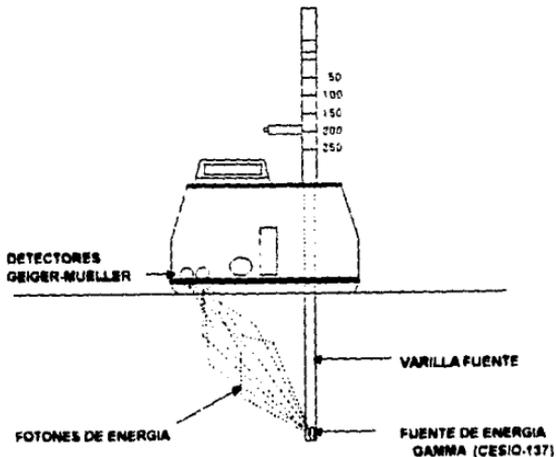
Este método ofrece la mayor precisión y el menor error, por la composición y desigualdad de la superficie.

El aspecto más importante del método es la ventaja que tiene el operador de seleccionar la profundidad de prueba, una vez determinado el espesor del estrato.

5.4.2.1 Definición

El método consiste en la exposición directa de la fuente radiactiva en el material bajo prueba, por lo que se necesita taladrar un agujero pequeño en el material a ensayar, con la suficiente abertura para que penetre el vástago del densímetro. Una vez realizado éste, se sitúa el equipo y se procede a realizar la prueba, descendiendo la varilla fuente móvil, teniendo cuidado de pegar la punta del vástago en el costado que interesa medir en el material. Los incrementos de profundidad son de 25 o 50 mm hasta llegar a la profundidad deseada.

MODALIDAD DE TRANSMISION DIRECTA



5.5. APARATOS EXISTENTES EN EL MERCADO

5.5.1 INTRODUCCION:

Los densímetros nucleares son instrumentos prácticos, basados en la aplicación de un microprocesador que realiza mediciones de densidad y humedad en suelos y materiales de construcción en el mismo lugar de la obra, es decir "in situ".

Proporcionan medidas rápidas en unidades métricas o inglesas y las presentan en una pantalla de cristal líquido, de fácil lectura.

Los densímetros deben satisfacer las siguientes normas de la ASTM:

- D 2922 : Medición de densidades "in situ" de suelos áridos por métodos nucleares.
- D 3017 : Medición de humedad "in situ" de suelos áridos por métodos nucleares.
- D 2950 : Determinación "in situ" de densidades de materiales bituminosos por métodos nucleares.

Dependiendo de marcas y modelos, la medición de la densidad se realiza cada 25 ó 50 mm, hasta una profundidad de 200 ó 300 mm; y para la medición de la humedad regularmente los equipos promedian los valores correspondientes a una profundidad de 100 a 250 mm.

El teclado del instrumento permite al operador la introducción de valores máximos alcanzables de densidad y humedad y valores iniciales de referencia en la calibración para la humedad; así como el almacenamiento y la recuperación de resultados y su transferencia a un computador o una impresora y en otros equipos, también determina la precisión o el tiempo de prueba.

Los equipos dependiendo del modelo, darán ciertos resultados, así en los modelos sencillos se pueden obtener:

- Densidad total (húmeda).
- Densidad seca.
- Contenido de humedad.
- Porcentaje de humedad.

CPN**PANTALLA NORMAL DE MUESTRA DEL 80-3**

(No. referencia) E 64538	(fecha) 09 07	(hora) 09:00
(No. prueba)		
(índice prof.) Ia o Ib	(conteo regresivo de prueba) RT 00:30	(tiempo prueba) T01:00
(unidad) g/m ³	(PMS) SET	(cont. agua) RED
(densidad) D	2.100	0.100
(precisión) P	0.008	0.008
(% W)		8.00
(paso máx. lab.) M (En A)		2.000
(desviación) S1	(densidad) 0.0	(humedad) 0.0

ENTER

-

?

8

0

CLEAR

STEP

0

4

3

0

START

0.05

1.5

2

3

En los equipos más complejos se obtienen los mismos resultados, pero además se obtienen estos otros:

- Porcentaje de compactación total (húmedo) o seco.
- Porcentaje de huecos de aire.
- Referencia de ensayo.
- Día y hora de realización.
- Valores máximos de densidad húmeda y seca.

FALLA DE ORIGEN

Por ser más complejos estos equipos, tienen una memoria que guarda los resultados de las pruebas para su posterior verificación.

5.5.2 EQUIPOS DE LA MARCA CPN

5.5.2.1 Modelo MC-1DR

Este equipo es de los más sencillos, calcula y muestra los resultados de densidad y humedad en pruebas de un minuto.

El modelo MC-1DR, es fácil de operar y mantener, porque consta únicamente de tres teclas.

5.5.2.2 Modelo MC-3

Este modelo es de los más completos, realiza las pruebas en un tiempo determinado por el mismo operador o con la precisión requerida, la profundidad de medida varía entre 200 a 300 mm con descensos de 25 a 50 mm. Tiene programas especiales, para medición de capas delgadas, en donde la profundidad que puede medir, varía de 0.0 hasta 71 mm; y programa para mediciones en zanjas. Posee una capacidad de memoria de 128 pruebas.

5.5.2.3 Modelo MC-S-24

Este equipo se utiliza para medir la densidad y el contenido de humedad en suelos, agregados y en concreto compactado con rodillos (CCR), a profundidades específicas (estratos) del material compactado. La profundidad de medición varía de 50 hasta 600 mm. El modelo MC-S-24 es el único medidor nuclear autorizado en Estados

Unidos, para llevar el control de compactación en estructuras de CCR. También este equipo tiene la ventaja de no promediar la profundidad para la medición de la humedad, sino que la va midiendo por estrato directamente, con lo cual el resultado es más confiable y veraz.

El equipo para estratos es un medidor de doble vástago que facilita su operación, además de estas cualidades posee todas las ventajas de un equipo complejo.

5.5.3 EQUIPOS DE LA MARCA TROXLER

5.5.3.1 Modelo de la serie 3400-B

Esta serie agrupa los modelos 3401-B y 3411-B, que son medidores superficiales de humedad/densidad, para el control de compactación de suelos, agregados, asfaltos y concretos.

Tienen facilidad de uso y de obtención de resultados, por ser un equipo sencillo. El tiempo para cada prueba es de un minuto, los métodos de medición empleados en la serie 3400-B son los mismos que utilizan los otros equipos del mercado: Retrodispersión y Transmisión Directa.

5.5.3.2 Modelo 3430

Medidor nuclear de densidad y humedad, que permite utilizar los dos métodos generales, es un equipo sencillo que consta de ocho teclas, la profundidad de medida que tiene es de 150 mm.

5.5.3.3 Modelo 3440

Equipo nuclear para el control de compactación de suelos, agregados, asfalto y concretos.

Trabaja con los dos métodos generales y es uno de los equipos más completos que proporciona una gran variedad de resultados, la innovación que presenta con respecto al resto de los equipos es el ajuste automático de la profundidad y la posibilidad de recuperar datos borrados; tiene la posibilidad de variar el tiempo de prueba para obtener la precisión deseada.

PRECISION DE LOS EQUIPOS EN PRUEBAS DE 15 SEGUNDOS

MODALIDAD	EQUIPO CPN			EQUIPO TROXLER		
	MC-1DR	MC-3	MC-S-24	3400-B	3430	3440
	Kg/m ³					
RETRODISPERSION	--	--	--	±18.80	±18.00	±18.00
TRANSMISION DIRECTA	--	--	--	±9.38	±8.80	±8.80
HUMEDAD	--	--	--	±11.00	±10.30	±10.00
ERROR QUIMICO	RETRODISP.	--	--	--	±40.00	±40.00
	TRANS. DIR.	--	--	--	±20.00	±20.00
ERROR DE RUGOSIDAD	RETRODISP.	--	--	--	-55.00	-55.00
	TRANS. DIR.	--	--	--	-14.00	-14.00
TEMPERATURA DE OPERACION	0 a 75°C	0 a 80°C	--	-10 a 70°C	-10 a 70°C	-10 a 70°C
RADIACION MAXIMA QUE SE EMITE HACIA EL OPERADOR	0.8 mrem/hr	0.8 mrem/hr	--	18 mrem/hr	27.4 mrem/hr	20.8 mrem/hr

PRECISION DE LOS EQUIPOS EN PRUEBAS DE UN MINUTO

MODALIDAD	EQUIPO CPN			EQUIPO TROXLER		
	MC-1DR	MC-3	MC-S-24	3400-B	3430	3440
	Kg/m ³					
RETRODISPERSION	±18.00	±8.00	--	±8.30	±8.00	±8.00
TRANSMISION DIRECTA	±4.00	±4.00	--	±4.68	±3.40	±3.40
HUMEDAD	±4.00	±4.00	--	±5.90	±5.10	±5.00
ERROR QUIMICO	RETRODISP.	±18.00	±18.00	--	±40.00	±40.00
	TRANS. DIR.	±12.00	±12.00	--	±20.00	±20.00
ERROR DE RUGOSIDAD	RETRODISP.	-84.00	-84.00	--	-55.00	-55.00
	TRANS. DIR.	-8.00	-8.00	--	-14.00	-14.00
TEMPERATURA DE OPERACION	0 a 75°C	0 a 80°C	--	-10 a 70°C	-10 a 70°C	-10 a 70°C
RADIACION MAXIMA QUE SE EMITE HACIA EL OPERADOR	0.8 mrem/hr	0.8 mrem/hr	--	18 mrem/hr	27.4 mrem/hr	20.8 mrem/hr

5.6.- SEGURIDAD RADIOLOGICA

Los medidores nucleares implican una mínima probabilidad de absorción de radiación para los operadores, si se manejan adecuadamente.

Para fundamentar las recomendaciones para el uso adecuado de medidores nucleares es necesario revisar los conceptos básicos de la seguridad radiológica.

Los efectos dañinos de la radiación ionizante en un organismo vivo se deben en primera instancia a la energía absorbida por las células y a los tejidos que lo forman.

Aunque todas las radiaciones ionizantes son capaces de producir efectos biológicos similares, dosis iguales absorbidas pueden producir efectos de magnitudes distintas, según el tipo de radiación de que se trate. Esta diferencia ha motivado la creación del llamado factor de calidad (Q) para cada tipo de radiación.

TIPO DE RADIACION	Q
RAYOS X, γ	1
ELECTRONES	1
NEUTRONES TERMICOS	5
NEUTRONES RAPIDOS	10
PROTONES	10
PARTICULAS α	20

Para promover la seguridad radiológica a nivel internacional existe una Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), que es un organismo establecido con el fin de recomendar prácticas seguras sobre el manejo de la radiación.

Para el personal ocupacionalmente expuesto, se ha usado el concepto de dosis máxima permitida, aunque en la actualidad se prefiere el término Límite de Dosis Equivalente (LDE), que se ha fijado en 5 rem por año.

Considerando el LDE de 5 rem/año para el personal, se obtienen aproximadamente en promedio el valor de 100 mrem/semana; si se consideran 40 horas de trabajo por semana, esto equivale a 2.5 mrem/hora.

Si por alguna razón una persona no ocupacionalmente expuesta recibe una dosis, deberán tomarse las medidas para evitar que ésta exceda de 0.5 rem/año, o sea, una décima parte del límite de dosis equivalente para el personal ocupacionalmente expuesto.

- RADIACION NATURAL Y ARTIFICIAL

Por radiación natural el hombre a lo largo de su vida recibe una dosis mínima, pero constante, por ejemplo:

- Se recibe radiación cósmica al nivel del mar y en el Ecuador de 35 mrem/año. En la Cd. de México se reciben aproximadamente 116 mrem/año, ya que a mayor altura, mayor radiación.

- De ciertos elementos radiactivos presentes en cualquier mineral, como el Uranio, el Torio y el Potasio 40, se reciben en general, dependiendo de variaciones locales, entre 30-100 mrem/año.

Como ejemplos de radiación artificial tenemos las emitidas por los reactores nucleares y las de los aparatos para usos médicos e industriales:

Una radiografía de tórax, produce 20 mrem en un segundo aproximadamente.

Una radiografía dental 1 rem, pero en una región muy localizada del cuerpo.

Las emisiones de rayos X y gamma, así como las de neutrones, constituyen las fuentes de mayor riesgo externo, debido principalmente a que por su gran poder de penetración pueden afectar cualquier órgano del cuerpo humano.

- **PROTECCION CONTRA LA RADIACION EXTERNA**

Las medidas de protección contra la radiación por fuentes externas son: tiempo, distancia y blindaje.

Tiempo : A mayor tiempo de exposición a la fuente radiactiva, mayor radiación absorbida.

Distancia: La radiación o dosis que recibe una persona es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente.

Blindaje : Al interponer entre la fuente y la persona un material, adecuado, se atenúa la radiación.

En el caso particular de la radiación gamma, no se debe perder de vista el efecto Compton de dispersión, que si bien atenúa la radiación en línea recta, produce a cambio radiación en otras direcciones, debido a que puede haber materiales dispersores entre la fuente y la persona o simplemente en la vecindad de la fuente.

- DAÑOS BIOLÓGICOS

El daño biológico tendrá diferentes manifestaciones en función de la dosis. A bajas dosis (menos de 5 rem) no se espera observar ninguna respuesta clínica. Al aumentar a dosis mayores, el organismo va presentando diferentes manifestaciones hasta llegar a la muerte, la sig. tabla, muestra una tabla con dosis y efectos.

La radiación ionizante puede producir en las células aumento o disminución de volumen, muerte, estado latente y mutaciones genéticas.

Las células más activas y de crecimiento más rápido, tenderán a ser más radiosensitivas en un tejido dado, por ejemplo, los tejidos y células menos vulnerables a la radiación, en los mamíferos son la médula ósea, el tejido linfático, las células

RESUMEN DE LOS EFECTOS PROBABLES DE LA IRRADIACION TOTAL DEL ORGANISMO

	Dosis Súper		Dosis estándar		Dosis muy superior	Dosis mortal
	0 - 25 rmas	50 rmas	100 rmas	200 rmas	400 rmas	600 rmas
Prácticamente sin efecto detectable		Ligeros cambios pangénetos en la sangre	Náuseas y fatiga con posibles vómitos por causas de 125 röntgens	Náuseas y vómitos en las primeras 24 horas.	Náuseas y vómitos al cabo de 1-2 horas	Náuseas y vómitos al cabo de 1-2 horas
Probablemente sin efecto detectable		Ningún otro efecto clínicamente detectable.	Alteraciones sangüneas transitorias con establecimiento diferido.	A continuación, un período latente de una semana, caída del cabello, pérdida del apetito, debilidad general y otros síntomas (como irritación de garganta y diarrea).	En un período latente de una semana, caída del cabello, pérdida del apetito y debilidad general con fiebre.	Corto período latente a partir de la última dosis
		Posibles efectos diferidos, pero muy improbables efectos graves en un individuo medio.	Probable aumentamiento de la vida	Posible fallamiento al cabo de 2-6 semanas de una proporción insignificante de los individuos irradiados.	fallamiento grave de baxa y compañado en la semana a semana.	Diarrea, vómito, fallamiento de baxa y muerte hacia el final de la primera semana
			Restablecimiento probable de mo- vimiento complicaciones a causas de poca dosis anterior o irradiaciones crónicas.	Posible fallamiento al cabo de 2-6 semanas de una proporción insignificante de los individuos irradiados.	Síntomas tales como palidez, diarrea, erupción y rigidez estancamiento hacia la cuarta semana	Fiebre, rápida estancación y fallamiento muerto en la segunda semana.
					Algunos destrucciones a las 2-6 semanas	Fallamiento probable de todos los individuos irradiados
					Mortalidad probable del 50%	

FALLA DE ORIGEN

sanguíneas, las células que recubren la pared intestinal y los órganos reproductores. Los músculo y las células óseas están entre los menos sensibles.

En la siguiente tabla se presentan las radiaciones absorbidas por los operadores de equipos de medición nuclear. Como puede observarse, un operador que trabajara seis días a la semana, continuamente, con estos aparatos en un año alcanzaría la LDE (límite de dosis equivalente), quedando en los límites de la seguridad.

Sin embargo, los fabricantes de estos equipos recomiendan que para minimizar el riesgo de radiación peligrosa, se observen las siguientes medidas de seguridad en su manejo:

- No tocar las fuentes radiactivas con la mano ni acercar la cara a ellas.
- Permanecer junto al aparato sólo el tiempo mínimo necesario para encenderlo y para tomar su lectura. Para este efecto se debe seleccionar con cuidado el sitio de medida, colocar el aparato, encenderlo, alejarse de él durante el tiempo de medición, y regresar a él para tomar la lectura.
- Realizar periódicamente pruebas de fuga en las fuentes para ello se manipularán éstas con pinzas largas para no tocarlas. Si las fuentes presentan fugas, deberá devolverse el equipo al fabricante para su reposición.
- Al manejar los equipos el operador tendrá cuidado de protegerse siempre con la caja, poniendo la parte superior hacia el cuerpo.

- Es aconsejable que un operador que trabaje sistemáticamente con estos equipos utilicen un dosímetro de bolsillo, que consiste en una placa fotográfica que se va velando al recibir radiación y que es revisada cada año para cuantificar la radiación recibida por el portador.
- La capacitación de los operadores es fundamental para concientizarlos en la importancia del manejo adecuado de los equipos. Los operadores deben entonces escogerse entre personal con educación de bachillerato por lo menos, y deben periódicamente tomar cursos que los adiestren en el manejo adecuado de este tipo de equipo, tanto desde el punto de vista de seguridad personal, como por los aspectos de confiabilidad técnica.

MEDIDOR	TAMBA DE NIVELES DE RADIACION EN MREM II																
	DISTANCIA HACIA EL EQUIPO		FRENTE		POSTERIOR		CONT. IZQ		CONT. DER		SUPERIOR		INFERIOR		MANGO		
	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	GAMMA	NEUTRON	
ESTUCHE	0.05 m	4.990	N R	3.800	N R	6.850	N R	7.610	N R	7.860	N R	18.180	N R	0.660	0.430		
	0.30 m	0.830	0.530	0.740	0.870	1.800	0.380	0.760	0.420	0.740	0.610	10.390	1.620				
	1.00 m	0.180	0.060	0.140	0.210	0.470	0.060	0.140	0.040	0.190	0.090	0.150	0.150				
MEDIDOR	0.05 m	1.770	N R	3.040	N R	0.440	N R	7.610	N R	4.320	N R	4.440	N R				
	0.30 m	0.590	0.590	0.740	1.260	0.140	0.710	0.800	1.930	0.800	0.810	1.770	0.450				
	1.00 m	0.140	0.054	0.140	0.190	0.060	0.040	0.140	0.230	0.140	0.080	0.290	0.040				

LOS DATOS QUE POSEEN N R, SON DATOS QUE EL CONTADOR GERBER-MUELLER NO PUEDE REGISTRAR POR NO SER UN DETECTOR DE NEUTRONES

ESTO NO QUIERE DECIR QUE NO SE TIENGA RADIACION, POR EL CONTRARIO LA RADIACION DE NEUTRONES ES LA MAS PELIGROSA, POR SER MAS POTENTE, PERO PARA ESTA SE REQUIERE DE UN DETECTOR ESPECIAL DE NEUTRONES

SUMATORIAS TOTALES DE RADIACION DE UN EQUIPO NUCLEAR

MEDIDOR	DISTANCIA HACIA EL EQUIPO	SUMA		FACT. NEUTRON	RADIACION TOTAL
		GAMMA	NEUTRON		
ESTUCHE	0.05 m	49.950	0.430	4.300	54.250
	0.30 m	15.460	4.430	44.300	59.760
	1.00 m	1.170	0.610	6.100	7.270
MEDIDOR	0.05 m	21.620	0.000	0.000	21.620
	0.30 m	5.000	5.750	57.500	62.500
	1.00 m	0.910	0.614	6.140	7.050

SI TOMAMOS LA RADIACION MAS ALTA EN CADA POSICION Y HACEMOS UN CALCULO, VEREMOS LA RADIACION QUE ABSORBE UN OPERADOR

RADIACION	DIN		# DE DIAS		FACTOR DE ABSORCION	SEMANAS	MREM ABS.	REM ABS.
	MED. 10	100	10	100				
62.50	1.042	20	6	0.96	50	6.811.92	6.800	
59.76	0.996	20	6	0.96	50	57.46.96	5.74	

5.7.- NORMAS ASTM, PARA EQUIPOS NUCLEARES

5.7.1 DESIGNACION: D 2922-91

METODOS NORMALIZADOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE SUELO EN EL LUGAR CON EQUIPOS NUCLEARES (A POCA PROFUNDIDAD).

1.- ALCANCE

- 1.1 Esta prueba determina la densidad en estado húmedo del suelo y de las mezclas de suelo y agregados mediante la atenuación de la radiación gamma emitida, cuando la fuente y el detector(es) se colocan sobre la superficie (Método de retrodispersión) o cuando la fuente o el detector están colocados a una profundidad conocida de hasta 300 milímetros en tanto que el detector o la fuente permanecen sobre la superficie (Método de transmisión directa).
- 1.2 La densidad, en masa por unidad de volumen del material bajo prueba se determina comparando la radiación gamma detectada con el dato de calibración previamente establecido.
- 1.3 Los resultados obtenidos de las pruebas en unidades del Sistema Internacional, se consideran como estándar. Los equivalentes en otras unidades, se consideran aproximados.
- 1.4 En la práctica común de la ingeniería se recurre al uso de kilogramos para representar, tanto unidades de masa (kgm)

como unidades de fuerza (kgf). Esto implica combinar dos sistemas de unidades separados; esto es, el sistema absoluto y el sistema gravitacional. Es científicamente indeseable combinar el uso de dos sistemas, dentro de una sola norma. En este sistema el kilogramo (kgf) representa unidad de fuerza (peso). Sin embargo, el registro de kilogramos masa (kgm) en balanzas o escalas, o el registro de densidad en kgm/m^3 , no debe considerarse como incompatible con esta norma.

- 1.5 Esta norma no tiene el propósito de cubrir todos los posibles problemas de seguridad asociados con su aplicación. Es responsabilidad del usuario establecer prácticas adecuadas de seguridad y salud, así como determinar las limitaciones reglamentarias aplicables previamente al uso de la norma. Para disposiciones específicas sobre peligros véase la sección 6.

2.- DOCUMENTOS DE REFERENCIA

2.1 NORMAS DE ASTM:

- D 698 Método de prueba para la relación humedad-densidad del suelo y de mezclas de suelo y agregados, usando un pisón de 2.49 Kg y 305 mm de caída.
- D 1556 Método de prueba para obtener la densidad del suelo "in situ" por el método del cono de arena.

- D 1557 Método de prueba para la relación humedad-densidad del suelo y mezclas de suelo y agregados, usando un pisón de 4.54 Kg y 457 mm de caída.
- D 2167 Método de prueba para obtener la densidad del suelo en el lugar por el método del balón de goma.
- D 2216 Método para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo y agregados.
- D 2937 Método de prueba para determinar la densidad del suelo en el lugar por el método del cilindro guiado.
- D 3017 Método de prueba para determinar el contenido de agua en suelo y roca "in situ" por métodos nucleares (a poca profundidad).
- D 4253 Método de prueba para determinar el índice máximo de densidad y el peso unitario de suelos, usando una mesa vibratoria.
- D 4643 Método de prueba para la determinación del contenido de agua (humedad) del suelo por el método del horno de microondas.
- D 4718 Práctica para la corrección del peso unitario y el contenido de agua para suelos que contienen partículas de gran tamaño.
- D 4944 (Método de la esfera) Método de prueba para la determinación en campo del contenido de agua (humedad) del suelo, por la prueba a presión del gas producido por el carburo de calcio.
- D 4959 Método de prueba para la determinación del contenido de agua (humedad) por el método de calentamiento directo.

3.- SIGNIFICADO Y USO

- 3.1 El método de prueba descrito es una técnica útil, rápida y no destructiva para la determinación "in situ" de la densidad en suelo y agregados.
- 3.2 El método de prueba es apropiado para el control de calidad, pruebas de aceptación para la construcción, y aplicaciones de investigación en desarrollo.
- 3.3 La naturaleza no destructiva de la prueba permite realizar medidas repetitivas en un sólo sitio de prueba.

4.- INTERFERENCIAS

- 4.1 La composición química de la muestra puede afectar la medición por lo que puede ser necesario realizar ajustes.
- 4.2 El método de prueba presenta una variabilidad especial ya que el instrumento es más sensible a la densidad del material muy próximo a la superficie (Únicamente en el método de retrodispersión).

NOTA 1. Los medidores de densidad nuclear se ven de algún modo influidos por las capas superficiales del suelo a prueba. Esta tendencia ha sido corregida considerablemente en el método de la Transmisión Directa, aún cuando queda alguna remanencia

insignificante. El método de Retrodispersión es todavía más sensible a los materiales contenidos dentro de las primeras pulgadas, a partir de la superficie.

4.3 La presencia de rocas voluminosas o de vacíos grandes en la zona cubierta por el detector puede causar una determinación más alta o más baja de la densidad. Cuando se sospeche que no hay uniformidad en el suelo por causa de la estratificación, presencia de rocas o vacíos, deberá extraerse y examinarse visualmente la muestra para determinar si es representativa del material total en general o si se requiere la corrección de roca. (véase 9.6)

4.4 El volumen de muestra es aproximadamente 2.8 dm^3 para el método de retrodispersión y 5.7 dm^3 para el método de la transmisión directa, cuando la profundidad de prueba es de 15 cm. El volumen real de muestra es indeterminado y varía con el aparato y con la densidad del material. En general, entre mayor sea la densidad, menor será el volumen.

5.- EQUIPOS

5.1 Medidor nuclear - Instrumento de conteo electrónico, que puede colocarse sobre la superficie del material bajo prueba, y que contiene:

- 5.1.1 Fuente Gamma- Fuente sellada de radiación gamma de alta energía, que puede ser de cesio o radio.
- 5.1.2 Detector de radiación gamma - cualquier tipo detector de radiación gamma, como el tubo(s) Geiger-Mueller.
- 5.2 Bloque de referencia - Bloque de un material determinado que se usa para verificar la operación del instrumento y para establecer las condiciones que permitan un conteo repetible de referencia.
- 5.3 Dispositivo para la preparación en el lugar - Una placa de acero, un escantillón o alguna otra herramienta adecuada para nivelar el sitio de prueba, para dar la uniformidad requerida al terreno. Para el método de la transmisión directa, un dispositivo para guiar la barra de taladro para preparar una perforación perpendicular.
- 5.4 Barra de taladro - Una varilla de acero con diámetro un poco mas grande que el diámetro de la varilla usada en el método de la transmisión directa, con la cual se preparará un agujero en el material bajo prueba, en donde se insertará dicha varilla.
- 5.5 Extractor de la barra de taladro - Un instrumento que se utiliza para sacar la barra de taladro en una dirección

vertical, de modo que esa barra no altere el agujero durante el proceso de extracción.

- 5.5.1 Un martillo adjunto a la barra de taladro, puede usarse como auxiliar para realizar un agujero en el material a prueba y para extraer la barra sin alterar el agujero.

6.- PELIGROS

- 6.1 Este equipo utiliza materiales radiactivos, que pueden ser peligrosos para la salud de los usuarios, a menos que se tomen las precauciones debidas. Los usuarios de este equipo deberán familiarizarse con los procedimientos de seguridad aplicables y con las regulaciones gubernamentales.

- 6.2 Se recomienda dar instrucciones eficaces a los usuarios, así como practicar procedimientos rutinarios de seguridad tales como, prueba de fugas en la fuente, registro y evaluación de los datos, etc., como parte de operación y almacenaje de este equipo.

7.- CALIBRACION

- 7.1 La calibración del instrumento se hará de acuerdo con el anexo A1.

8.- NORMALIZACION Y VERIFICACION DE REFERENCIAS.

8.1 El aparato de pruebas nucleares, esta sujeto al envejecimiento a largo plazo de la fuente radiactiva y de los detectores y sistemas electrónicos, los cuales pueden cambiar la relación entre el conteo promedio y la densidad del material. Para contrarrestar este envejecimiento, el aparato puede ser calibrado a la relación entre el conteo medido y el conteo hecho sobre una referencia, o al conteo sobre una holgura de aire (para la técnica de retrodispersión, véase 9.5.1.3).

El conteo de referencia deberá ser del mismo orden de magnitud que el conteo medido y estar en el rango útil de densidad del aparato.

8.2 La calibración del medidor se hará al inicio de cada día de trabajo, y se llevará un registro permanente de los datos obtenidos. Hágase la calibración con el densímetro situado por lo menos a 8 m de otras fuentes de material radiactivo, y retirada de grandes masas u otros objetos que puedan afectar el conteo de referencia.

8.2.1 En caso de que lo recomiende el fabricante del equipo para obtener resultados más estables y consistentes, se procederá a:

- 1) Encender el instrumento antes de su uso para que se estabilice y
- 2) Dejar encendido durante su tiempo de uso en el día.

8.2.2 Tórnense al menos cuatro lecturas repetidas durante un periodo normal de medida y calcúlese la media. Si es posible realizarlo con el equipo, un periodo de medida cuatro veces superior a lo normal, es aceptable. Esto constituye una verificación estándar.

8.2.3 Si el valor obtenido está dentro de los límites fijados en seguida, el aparato está en condiciones satisfactorias de operación y el valor puede ser usado para determinar las relaciones de conteos de ese día. Si el valor está fuera de estos límites, se le permitirá un tiempo adicional al medidor para estabilizarse, para asegurarse que la zona está libre de fuentes de interferencia y posteriormente se realizará otra calibración. Si la segunda calibración está dentro de los límites, el aparato puede ser usado, pero si esta prueba también falla, el medidor será ajustado o reparado según lo recomiende el fabricante. Los límites serán como sigue:

$$|N_s - N_o| \leq 2.0 \sqrt{N_o/F}$$

donde:

N_s = Valor del conteo estándar en vigor.

N_o = Promedio de los cuatro valores últimos de N_s , tomados previamente.

F = Valor de la pre-escala. (el valor de pre-escala (F) es un divisor que reduce el valor real para que pueda aparecer en el tablero. El fabricante proporcionará este valor si difiere de 1.0). Algunos instrumentos pueden tener mecanismos para incluir ese factor y mostrar valores ya corregidos.

8.2.3.1 Si la calibración del equipo no ha sido verificada en los tres meses anteriores se realizarán por los menos cuatro nuevas calibraciones y se utilizará el promedio como el valor para No.

8.3 Se tomara el valor de N_s para determinar la relación de conteo que será utilizada por el equipo en ese día. Si por alguna razón la densidad medida en un momento del día no resulta muy convincente, se realizará otra verificación.

9.- PROCEDIMIENTO PARA USO EN CAMPO

9.1 Calibre el medidor. (ver sección 8).

9.2 Elija un sitio de prueba. Si el medidor queda a menos de 250 mm de cualquier paramento vertical (tal como un tubo o una zanja) eso puede tener gran influencia en el resultado, por lo que se aplicará el procedimiento de corrección recomendado por el fabricante.

- 9.3 Remueva todo el material suelto. Retire todo el material que sea necesario para alcanzar un material representativo de la zona o estrato que se va a probar. El secado superficial y la variabilidad espacial deberán ser considerados al determinar la profundidad del material por remover.
- 9.4 Aplane o escarbe una superficie horizontal lisa para obtener un contacto máximo entre el medidor y el material a prueba. La colocación del medidor sobre la superficie del material será siempre importante, pero es especialmente crítica para la determinación exitosa de la densidad por el método de la retrodispersión. La condición óptima en todos los casos, será la de tener un contacto total entre la base del densímetro y la superficie del material a prueba. Para corregir las irregularidades en la superficie, de ser necesario, se usarán finos locales o arena fina como relleno. El espesor del relleno no deberá exceder de 3 mm aproximadamente, y el área total rellenada no deberá de exceder del 10 % del área de la base del aparato. La profundidad máxima de cualquier vacío bajo el medidor que puede ser tolerada sin relleno no deberá exceder de 3 mm aproximadamente. Tal vez se requieran varios tanteos de colocación para cumplir estas condiciones.
- 9.5 Se procederá con la prueba de la siguiente manera:
- 9.5.1 Procedimiento de retrodispersión:

- 9.5.1.1 Asentar el medidor firmemente en el sitio preparado para la prueba.
- 9.5.1.2 Mantener otras fuentes radiactivas lejos del medidor, para evitar afectaciones en las mediciones así como también para no alterar las lecturas.
- 9.5.1.3 Tomar y registrar una o más lecturas durante el período normal de mediciones en la posición de retrodispersión.

NOTA 2. Cuando se utilice el procedimiento de retrodispersión con holgura de aire, se seguirán las instrucciones del fabricante en relación a la colocación del aparato. Tome el mismo número de lecturas en un período normal de medida en la posición con holgura de aire, así como también en la posición normal de retrodispersión. Determine la relación de holgura de aire dividiendo el conteo por minuto, obtenido en la posición con holgura de aire entre el conteo por minuto obtenido en la posición normal de retrodispersión.

- 9.5.1.4 Determine la relación de las lecturas al conteo normal o al conteo con holgura de aire. De esta relación de conteo, de la calibración apropiada y del ajuste de datos, determine la densidad húmeda en el lugar.
- 9.5.2 Procedimiento de transmisión directa.

9.5.2.1 Se realizara una perforación perpendicular a la superficie preparada, utilizando la guía y la barra de taladro (aparato descrito en 5.4) o perforando si es necesario. El agujero tendrá una profundidad tal y con la alineación necesaria para que al insertar la varilla fuente, no se ocasione una inclinación del medidor sobre el plano del área preparada para la prueba. La profundidad del agujero tiene que ser mayor que aquella a la que se colocara la varilla fuente en el sitio a prueba. La guía será del mismo tamaño que la base del densímetro con el agujero de la guía en la misma posición que la varilla fuente del medidor. Las esquinas de la guía remarcaran acotando la superficie del suelo. La placa guía se retira y si se requiere se realizan reparaciones a la superficie, preparada.

9.5.2.2 Proseguir la prueba de la siguiente manera:

9.5.2.3 Colocar el densímetro en la superficie del suelo, alineándolo con cuidado con las marcas hechas en el suelo para que la varilla fuente quede directamente sobre el agujero preformado.

9.5.2.4 Insertar la varilla fuente en el agujero.

9.5.2.5 Colocar el densímetro firmemente rotándolo alrededor de la varilla fuente con un movimiento hacia atrás hacia adelante.

9.5.2.6 Halar suavemente el densímetro en una dirección tal que lleve el lado de la varilla fuente al lado del agujero más cercano a la posición del detector dentro de la caja del densímetro.

9.5.2.7 Deben mantenerse alejadas otras fuentes radiactivas del medidor para evitar alteraciones en las mediciones.

9.5.2.8 Tome y registre una o más lecturas en el período normal de mediciones.

9.5.2.9 Determine la relación de las lecturas al conteo normal. De esta relación de conteo, de la calibración apropiada y del ajuste de datos, determine la densidad húmeda en el lugar.

NOTA 3. Algunos instrumentos incluyen dispositivos internos para calcular la relación, densidad húmeda y para introducir los datos de ajuste.

Adicionalmente algunos instrumentos tienen aditamentos para medir y calcular el contenido de humedad y la densidad en estado seco.

9.6 Si el volumen probado, según se define en 4.4, tiene excesivo material de gran tamaño respecto a los límites establecidos por los métodos de prueba D 698, D 1557 ó D 4253, se debe aplicar una corrección para la densidad húmeda (peso unitario) y para el contenido de agua. Esta corrección se hará de acuerdo con la práctica D 4718. Este

método de prueba requiere de muestras tomadas del volumen real de prueba.

9.6.1 En caso de que deban tomarse muestras del material medido con el propósito de correlacionar con otros métodos de prueba, o de corregir por contenido de roca, el volumen medido puede ser definido como el de un cilindro de 200 mm de diámetro localizado directamente debajo del eje central de la fuente radiactiva y del detector. La altura del cilindro por excavar será la profundidad a que se colocó la varilla fuente en el método de la transmisión directa, y será de 75 mm cuando se haya aplicado el método de la retrodispersión.

9.6.2 Una alternativa para la corrección de partículas con tamaños grandes que puede usarse con métodos de densidad de masa o en situaciones de contenido mínimo de partículas grandes involucra la ejecución de pruebas. Las pruebas pueden realizarse en lugares adyacentes y los resultados pueden ser promediados para obtener un valor representativo. Se necesita hacer comparaciones para definir si la posible presencia de una sola roca grande o de un hueco en el suelo están ocasionando valores no representativos de la densidad.

Siempre que los valores obtenidos sean cuestionables, el volumen probado en el sitio deberá ser extraído y examinado visualmente.

10.- CALCULO DE RESULTADOS

10.1 La densidad húmeda en el lugar se determinará como se indico en el inciso 9.5. Si se requiere la densidad seca se determinará el contenido de agua en el lugar, utilizando muestras gravimétricas y la prueba para la determinación del contenido de agua en el laboratorio (métodos de prueba D 2216, D 4643, D 4959, D 4944) o mediante un instrumento que determine el contenido de agua mediante neutrones termalizados (método de prueba D 3017)

10.1.1 Si el contenido de humedad es determinado por métodos nucleares (método de prueba D 3017), se restará el valor de la humedad en Kg/m^3 del valor de la densidad húmeda y para obtener la densidad seca en Kg/m^3 .

10.1.2 Si el contenido de agua se obtiene por otros métodos y está en forma porcentual, se procederá como sigue:

$$\rho_d = \frac{100 \rho_m}{100 + W}$$

donde:

ρ_d = Densidad seca en Kg/m^3 ,

ρ_m = Densidad húmeda en Kg/m^3 , y

W = Agua en por ciento de la masa seca

11.- **REPORTE**

11.1 El reporte debe incluir lo siguiente:

11.1.1 Estandarización y ajuste de datos para la fecha en que se hicieron las pruebas

11.1.2 Marca, modelo y número de serie de los instrumentos de la prueba

11.1.3 Nombre del operador

11.1.4 Identificación del sitio de prueba

11.1.5 Descripción visual del material probado.

11.1.6 Tipo de prueba (retrodispersión o transmisión directa) y profundidad de la prueba (si es aplicable).

11.1.7 Densidades húmeda y seca en Kg/m^3 .

11.1.8 Contenido de agua en por ciento de la masa seca o peso unitario seco.

12.- PRECISION Y VARIABILIDAD

12.1 PRECISION:

12.1.1 Se están evaluando datos para determinar el grado de precisión de este método de prueba. Adicionalmente, el subcomité D 18.08 está buscando datos pertinentes de los usuarios de este método de prueba.

12.1.2 La precisión del conteo del equipo es típicamente de 8 Kg/m³ en el método de la retrodispersión y de 4 Kg/m³ en el método de la transmisión directa, esto para materiales de aproximadamente 2000 Kg/m³ de densidad, con un tiempo de medición de un minuto.

12.1.2.1 La precisión del conteo de un instrumento, se define como el cambio de densidad que en correspondencia al cambio en la desviación estándar del conteo debida a la degradación aleatoria de la fuente radiactiva. La densidad del material y el período de tiempo del conteo, deben ser establecidos. Pueden determinarse mediante una serie de 20 o más conteos, tomados sin mover el aparato o alternativamente a partir de los datos de calibración y suponiendo que σ es igual a la raíz cuadrada del conteo a esa densidad. El conteo debe ser el conteo real del aparato corregido por cualquier factor de pre-escala. (ver 8.2.3.)

$$P = \frac{\sigma}{S}$$

donde:

- P = Precisión del instrumento en términos de densidad (Kg/m³)
σ = Desviación estándar del conteo
S = Pendiente de la curva de calibración en el valor definido de la densidad.

12.2 VARIABILIDAD:

- 12.2.1 Para este método de prueba no existen valores aceptados de referencia, por lo tanto, la variabilidad no puede ser determinada.

13.- PALABRAS CLAVE

- 13.1 Densidad; densidad de campo; métodos nucleares

ANEXO

(Información Obligatoria)

A.1 CALIBRACION

A.1.1. Verificar o restablecer las curvas, tablas o los coeficientes de las ecuaciones de calibración al menos cada 12 a 18 meses y después de reparaciones mayores que puedan afectar las características geométricas del aparato.

A.1.2. El aparato debe ser calibrado de tal manera que se produzca una respuesta de calibración dentro de $\pm 16 \text{ Kg/m}^3$ en bloques estándares de material de densidad establecida. Esta calibración debe ser realizada por el fabricante, el usuario o el vendedor. La respuesta del equipo nuclear es influida por la composición química del material medido. Esta respuesta debe ser tomada en cuenta al establecer la densidad asignada al bloque estándar.

Las densidades de los materiales que se usen para establecer o verificar la calibración deben cubrir un rango representativo de la densidad de los materiales por probar. La densidad de esos materiales estándares debe determinarse con una exactitud de $\pm 0.2 \%$.

A.1.3 Deben tomarse suficientes datos en cada estándar de densidad, para asegurar una precisión de conteo del aparato de por lo menos un medio de la precisión de conteo del aparato

requerida para su uso en el campo. Los datos pueden ser presentados en forma de gráficas, tablas, coeficientes de ecuaciones, o pueden ser almacenados en el medidor, para permitir la cobertura por los datos de conteo de la densidad del material.

A.1.4 El método y los procedimientos de prueba utilizados al establecer la calibración de los datos de conteo, debe ser el mismo que se emplee para obtener los datos de conteo de campo.

A.1.5 El tipo del material, la densidad real y la densidad asignada del bloque estándar utilizado para cada calibración estándar para establecer o verificar la calibración del aparato, deben ser manifestados parte de los datos de calibración.

A.1.6 El bloque estándar debe tener el suficiente tamaño para no modificar el conteo si se amplía en cualquier dirección. Las dimensiones superficiales mínimas de 610 mm de longitud por 430 mm de ancho han resultado satisfactorias. Para el método de retrodispersión la mínima profundidad adecuada es de 230 mm para el método de transmisión directa se debe tener una profundidad de por lo menos 50 mm más que la profundidad máxima de la varilla fuente. Probablemente se requiera de una mayor área superficial para la técnica de la retrodispersión con holgura de aire. Las dimensiones

superficiales mínimas pueden reducirse ligeramente si los bloques estándares están adyacentes a un material denso.

A.1.7 Los bloques estándares que con mayor éxito han permitido realizar una calibración precisa son los hechos de aluminio, magnesio, aluminio/magnesio, granito y caliza. Estos bloques estándares se han usado en combinación unos con otros y empleando con curvas establecidas anteriormente para producir una calibración precisa y confiable.

A.1.7.1 Los bloques estándares de suelo, roca y concreto con características de reproducibilidad uniforme, son difíciles de elaborar. Estos bloques estándares pueden usarse para algunas calibraciones especiales o en calibraciones de campo en sitios donde las características química del material local o los antecedentes de la situación requiera de una adaptación especial.

**METODO DE PRUEBA PARA CONTENIDO DE AGUA EN SUELO Y ROCA "IN SITU"
POR METODOS NUCLEARES (A POCA PROFUNDIDAD)**

1.- ALCANCE

- 1.1 Este método de prueba permite la determinación del contenido de agua en suelos y roca, por la termalización o por la disminución de velocidad de neutrones rápidos, encontrándose la fuente y el detector de neutrones lentos en la superficie.
- 1.2 El contenido de agua en masa por unidad de volumen del material bajo prueba se determina comparando la tasa de detección de neutrones termalizados o lentos con los datos de calibración previamente establecidos.
- 1.3 Los valores fijados en unidades del Sistema Internacional se consideran como los normalizados. Los equivalentes en otras unidades, se consideran aproximados.
- 1.3.1 Una práctica común en la profesión de ingeniería es el uso de kilogramos tanto para determinar una unidad de masa (Kgm) como una de fuerza (Kgf). Esto combina implícitamente 2 sistemas de unidades: el sistema absoluto y el gravitacional. Esta norma se ha escrito usando el sistema

absoluto para el contenido de agua (Kg por m^3) en unidades S.I. La conversión al sistema gravitacional de peso en unidades KN/m^3 se debe hacer multiplicando por 9.807. El registro del contenido de agua en Kgf por m^3 no debe considerarse disconforme con esta norma aunque este uso es científicamente incorrecto.

- 1.4 Esta norma puede incluir materiales, operaciones y equipos peligrosos. Esta norma no pretende tratar todos los problemas de seguridad asociados a su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma el establecer las prácticas apropiadas de seguridad y de salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones regulativas antes de su uso.

2.- DOCUMENTOS DE REFERENCIA

2.1 *NORMAS DE ASTM:*

- D 1556 Método de prueba para la densidad del suelo "in situ" por el método del cono de arena.
- D 2167 Método de prueba para establecer la densidad del suelo, en el lugar por el método del balón de goma.
- D 2216 Método para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en el suelo, roca y mezclas de suelo-agregados.

- D 2922 Método de prueba para densidad de suelo-agregados y roca "in situ" por métodos nucleares (a poca profundidad).
- D 2937 Método de prueba para determinar la densidad del suelo, en el lugar por el método del cilindro guiado.
- D 4643 Método de prueba para la determinación del contenido de agua (humedad) del suelo por el método del horno de microondas.
- D 4718 Práctica para la corrección del peso unitario y del contenido de agua para suelos que contienen partículas de gran tamaño.

3.- SIGNIFICADO Y USO

- 3.1 El método de prueba descrito es útil como una técnica no destructiva y rápida para la determinación "in situ" del contenido de agua en suelo y roca.
- 3.2 El método de prueba se utiliza para el control de calidad y para la aceptación de suelos y rocas compactadas, en la construcción, investigación y desarrollo. La naturaleza no destructiva de la prueba permite medidas repetitivas en una localidad única de prueba y el análisis estadístico de los resultados.
- 3.3 Las suposiciones fundamentales inherentes al método de prueba son que el hidrógeno se encuentra presente en forma de agua, según se define en el método D 2216, y que el material bajo prueba es homogéneo.

- 3.4 Los resultados de la prueba pueden ser afectados por la composición química, heterogeneidad de la muestra, y en menor grado, por la densidad del material y la textura superficial del material que se está probando. La técnica también muestra un sesgo espacial, ya que el aparato es más sensible al agua contenida en el material más próximo a la superficie y menos sensible al agua a niveles más profundos.

4. INTERFERENCIAS

- 4.1 La composición química de la muestra puede afectar considerablemente a la medición, y puede ser necesario realizar algunos ajustes. El hidrógeno, en otras formas distintas que el agua, según se define en el método D 2216 y el carbón, pueden causar mediciones por encima del valor verdadero. Algunos elementos químicos tales como Boro, Cloro y pequeñas cantidades de Cadmio, pueden dar lugar a mediciones por debajo del valor verdadero.

- 4.2 El contenido de agua determinado por éste método de prueba no es necesariamente el promedio de agua contenida en el volumen de la muestra medida. La medición se ve fuertemente influida por el contenido de agua del material que se encuentra más próximo a la superficie. El volumen de suelo y roca que se representa en la medición es indeterminado y

variará con el contenido de agua del material. En general, a mayor contenido de agua del material, es menor el volumen involucrado en la medición. A 160 Kg/m³, aproximadamente el 50% de una medición típica resulta del contenido de agua de los 50-75 mm superiores.

- 4.2.1 Si las muestras del material medido se toman con fines de correlación con otros métodos de prueba, o para corrección de roca, el volumen por medir puede determinarse aproximadamente con un cilindro de 200 mm de diámetro, situado directamente debajo de la línea central de la fuente de neutrones rápidos y el detector de neutrones lentos. La altura del cilindro a excavar es aproximadamente:

Contenido de humedad Kg/m ³	Altura del cilindro mm	Volumen m ³
80	250	0.0079
160	200	0.0063
240	150	0.0047
320	125	0.0039
400	112	0.0035
480	100	0.0031

NOTA 1. El volumen de material compactado de campo muestreado por la prueba puede aumentarse efectivamente repitiendo la prueba en localidades inmediatamente adyacentes (vertical u horizontalmente) y promediando los resultados.

4.3 Otras fuentes de neutrones deben situarse a más de 8 m de distancia del equipo en operación.

5. APARATOS

5.1 Aunque los detalles exactos de construcción de los aparatos pueden variar, el sistema consistirá de:

5.1.1 Fuente de neutrones rápidos. Una mezcla sellada de material radiactivo como Americio o Radio y otro material de objetivo, como el Berilio.

5.1.2 Detector de neutrones lentos. Cualquier tipo de detector de neutrones lentos tal como un contador proporcional de Trifluoruro de Boro o Helio-3.

5.1.3 Dispositivo de lectura. Una escala regulada apropiadamente a tiempo. Normalmente contendrá la fuente del alto voltaje necesario para operar el detector, y la fuente de energía de bajo voltaje para operar los dispositivos de lectura y accesorios.

5.1.4 Cubierta. La fuente, el detector, el aparato de medida y el aporte de energía se guardarán en una cubierta fuerte que sea resistente al agua y el polvo.

- 5.1.5 Bloque de referencia. Un bloque de material hidrogenado para comprobar la operación del equipo y para establecer las condiciones para una tasa reproducible de conteo.
- 5.1.6 Dispositivo para la preparación del lugar. Una placa de acero de bordes rectos, u otra herramienta de nivelado apropiada que pueda usarse para aplanar el lugar de prueba hasta lograr el alisamiento requerido.
- 5.2 Aparato de calibración de acuerdo con el anexo A1.
- 5.3 Determinense la precisión de los aparatos de acuerdo con el anexo A2.

6. PELIGROS

- 6.1 Este equipo utiliza materiales radiactivos que pueden ser peligrosos para la salud de los usuarios a menos que se tomen las debidas precauciones.
- 6.2 La capacitación efectiva del operador junto con la aplicación de procedimientos rutinarios de seguridad, tales como pruebas de fugas en la fuente, el registro y evaluación de los datos de placas fotográficas, el uso de medidores, etc... se recomiendan para la operación de equipos de este tipo.

7. NORMALIZACION

7.1 Todos los instrumentos nucleares de contenido de agua están sujetos al envejecimiento a largo plazo de la fuente radiactiva, detectores y sistemas electrónicos, por lo que puede cambiar la relación entre conteo y contenido de agua. Para contrarrestar este envejecimiento, los instrumentos se calibran con una relación del conteo medido respecto al conteo hecho sobre una norma de referencia. El conteo de referencia deberá ser del mismo o mayor orden de magnitud que el conteo medido para todo el rango de utilidad del equipo.

7.2 La calibración del equipo respecto a la norma de referencia, es necesaria al inicio de cada día de trabajo y deberá llevarse un registro permanente de estos datos. La estandarización se efectuará con el equipo situado a una distancia mayor de 8 m de otros equipos y alejada de grandes masas de agua o de otros elementos que pudieran afectar las lecturas.

7.2.1 Encienda el equipo y permita su estabilización de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Si el instrumento se va a usar continua o intermitentemente durante el día, es mejor dejarlo en la posición "encendida" para no tener que repetir la estabilización. Esto proporcionará resultados más estables y consistentes.

7.2.2 Usando la norma de referencia, tome al menos cuatro medidas repetidas en el período normal de medida y obtenga la media. Si es posible con el instrumento, se considera aceptable una medida en un período de 4 o más veces el período normal. Esto constituye una comprobación de la estandarización.

7.2.3 Si el valor obtenido arriba está dentro de los límites establecidos abajo, el equipo se considera en condiciones satisfactorias y el valor puede usarse para determinar las relaciones de conteo para el día de uso. Si el valor obtenido está fuera de estos límites, debe hacerse otra comprobación de la normalización pero si también falla la prueba, el equipo se ajustará o reparará como recomienda el fabricante.

$$Ns \leq N_o + \frac{2.0 \sqrt{N_o}}{\sqrt{F}} \quad y$$

$$Ns \geq N_o - \frac{2.0 \sqrt{N_o}}{\sqrt{F}}$$

donde:

N_s : Valor de la comprobación de normalización actual (7.2.2) sobre la norma de referencia.

No : Media de los últimos cuatro valores de Ns tomados para anteriores usos, y

F : Valor de la pre-escala (A2.2.1)

7.3 El valor de Ns se usará para determinar las relaciones de conteo del equipo, para el uso diario. Si, por cualquier razón, el contenido de agua medido se hace sospechoso a lo largo del día, se realizará otra normalización.

8. PROCEDIMIENTO

8.1 Normalice el instrumento (Sección 7)

8.2 Seleccione un lugar para la prueba donde el instrumento en posición de prueba esté al menos a 250 mm de distancia de cualquier paramento vertical.

8.3 Prepare el lugar de prueba de la siguiente manera:

8.3.1 Quite todo el material suelto o alterado así como el material adicional que sea necesario para alcanzar el nivel superior del estrato que va a ser probado. Al determinar la profundidad a la cual debe situarse el equipo, debe considerarse el efecto de secado de la superficie y la variabilidad espacial.

8.3.2 Prepare un área horizontal, del tamaño suficiente para acomodar el instrumento, alisando la superficie para lograr el máximo contacto entre el instrumento y el material a examinar. Si la base del instrumento se coloca por debajo de la superficie circundante, el área horizontal será al menos dos veces el área de la base del instrumento. Si la depresión es mayor de 25 mm, debe cumplirse la condición 8.2 abriendo un área mayor.

8.3.3 La colocación del instrumento sobre la superficie del material a examinar es crítica para la determinación del contenido de agua con éxito. La condición óptima es el contacto total entre la base del instrumento y la superficie del material a examinar. El hueco por debajo del instrumento no debe sobrepasar de aproximadamente 3 mm. Use los finos locales de contenido de agua similar o arena de cuarzo seca para rellenar los huecos y nivele el exceso con una placa rígida o cualquier otra herramienta apropiada. El área total rellena no excederá del 10% del área de la base del instrumento.

8.4 Se procede con la prueba de la siguiente manera:

8.4.1 Asiente el instrumento firmemente, se coloca la fuente en la posición adecuada y se toma una cuenta para el período normal de medida.

8.4.2 Determine la relación de la lectura con el conteo normal. (Sección 7). A partir de esta relación, la calibración y el ajuste de datos, determine el contenido de agua "in situ" por unidad de volumen. (Nota 2).

Nota 2. Algunos instrumentos tienen dispositivos internos para calcular la relación, el contenido de agua por volumen incluyendo ajustes, la densidad seca y el contenido de agua en porcentaje de densidad seca (o peso unitario seco).

8.5 Si el volumen probado según se define en 4.2.1 es insuficiente para el tamaño de las rocas contenidas en el suelo (referirse al método de prueba D 4718), realice pruebas adicionales en sitios adyacentes y promedie los resultados (Nota 3).

Nota 3. El valor del contenido de agua debe compararse con otros contenidos de agua obtenidos para suelos y condiciones similares. La presencia de una gran partícula de roca o de un gran hueco en el suelo que se está probando puede dar un valor que no es representativo del contenido de agua. Si el valor es inusualmente alto o bajo, debe efectuarse otra determinación del contenido de agua. Para evitar la preparación de otro lugar de prueba, el instrumento puede volver a colocarse en el lugar original cambiándolo de posición (por ejemplo rotándolo 90°).

9. **CALCULO**

- 9.1 Calcule el contenido de agua, w , en porcentaje de densidad seca (o peso unitario seco) del suelo como sigue:

$$w = \frac{Mm \cdot 100}{\Delta d}$$

$$w = \frac{Mm \cdot 100}{\Delta - Mm}$$

donde:

w : Contenido de agua, porcentaje de densidad seca.

Mm : Contenido de agua, Kg/m^3 .

d : Densidad seca del suelo (Kg/m^3) o unidad de peso seco.

Δ : Densidad húmeda (total) del suelo o peso unitario húmedo (Kg/m^3)

10. **INFORME**

- 10.1 El informe incluirá lo siguiente:

10.1.1 Marca, modelo y número de serie del aparato de ensayo.

10.1.2 Cuenta estándar y datos de ajuste para la fecha de las pruebas.

10.1.3 Nombre del operador.

10.1.4 Identificación del lugar de prueba.

10.1.5 Descripción visual del material examinado.

10.1.6 Conteo para cada lectura, si es aplicable.

10.1.7 Contenido de agua en Kg/m^3 .

10.1.8 Densidades seca y húmeda en Kg/m^3 .

10.1.9 Contenido de agua en porcentaje de densidad seca o peso unitario seco.

11. PRECISION Y VARIABILIDAD

11.1 La precisión y la variabilidad de este método de prueba no han sido determinadas. Aun cuando se requiere una precisión en el aparato (repetibilidad en la misma muestra) de 4 Kg/m^3 y el procedimiento proporciona medios para evitar la variabilidad, no hay métodos disponibles que proporcionen valores lo suficientemente exactos del contenido de agua de un suelo y roca "in situ" contra los que se puedan determinar la precisión y la variabilidad del procedimiento y la varianza del operador.

A N E X O S
(Información Obligatoria)

A1. CALIBRACION

A1.1 Curvas de calibración. Las curvas, tablas o ecuaciones de calibración se establecerán o verificarán una vez al año mediante la determinación por prueba del conteo nuclear de al menos dos muestras con contenido de agua diferente y conocido. Este dato puede ser graficado o pueden determinarse ecuaciones para crear tablas o programas de computadora que permitan la conversión del conteo al contenido de agua. El método y los procedimientos de pruebas utilizados en la obtención del conteo (o relación, como se define en la sección 7) para establecer la relación de calibración, deben ser los mismos que los usados para medir el contenido de agua del material por examinar. El contenido de agua de los materiales usados para establecer la calibración debe variar en un rango que incluya el contenido de agua de los materiales por examinar y se encuentre en un rango de densidad entre 1600 a 2240 Kg/m³. Debido al efecto de la composición química, la calibración aportada por el fabricante con el aparato no será aplicable a todos los materiales. Será exacta para mezclas de arena silíceas y agua; por tanto, la calibración deberá comprobarse y ajustarse, si es necesario, de acuerdo con A.1.3.

A1.2 Normas de Calibración. Las normas de calibración pueden establecerse usando cualquiera de los siguientes métodos. Los contenedores o bloques estándar preparados deben ser lo suficientemente grandes como para no cambiar el conteo observado (o relación, según se define en la sección 7) si se hacen más grandes en cualquier dimensión.

Nota A1.1. Se han probado satisfactoriamente las dimensiones de 610 mm de largo por 460 mm de ancho por 360 mm de profundidad.

A1.2.1 Prepare una muestra homogénea de materiales hidrogenados con un contenido de agua determinado por comparación (usando un instrumento nuclear) con una muestra de arena silícea saturada preparada de acuerdo con A1.2.2. Una norma de densidad metálica según se define en los métodos de prueba D 2922 es una norma conveniente de contenido de agua cero.

A1.2.2 Prepare contenedores de material compactado con un porcentaje de contenido de agua determinado por secado en horno (Método D 2216), con una densidad húmeda calculada a partir de la masa del material y de las dimensiones interiores del contenedor. El contenido de agua puede calcularse como sigue:

$$M_m = \frac{M + w}{100 + w}$$

donde:

M_m : Contenido de agua, Kg/m^3 .

w : Contenido de agua, porcentaje de masa seca.

γ : Densidad húmeda (total), Kg/m^3 .

A1.2.3 Cuando no se dispone de ninguno de los dispositivos de calibración descritos antes, se puede calibrar el instrumento usando un mínimo de cuatro lugares de prueba seleccionados en una zona de un proyecto de compactación donde se ha colocado un material homogéneo con diversos contenidos de agua. Los lugares de prueba representarán el rango de contenidos de agua para los cuales se va a usar la calibración. Al menos se harán cuatro medidas nucleares repetidas en cada lugar de prueba. La densidad en cada lugar se medirá haciendo cuatro determinaciones poco espaciadas con un equipo calibrado de acuerdo con los métodos de prueba D 2922, D 1566, D 2167 ó D 2937. El contenido en agua de cada uno de las pruebas de densidad se determinará por el método D 2216. Use el valor medio de las lecturas repetidas como valor puntual de calibración para cada lugar.

A1.3 Ajustes de calibración

A1.3.1 La calibración de instrumentos recién adquiridos o reparados se verificará y ajustará antes de su uso. Las curvas de calibración se comprobarán antes de efectuar las pruebas en materiales que sean muy diferentes a los tipos de material previamente usados en la obtención o ajuste de la calibración. Los materiales de la muestra pueden seleccionarse mediante A1.3.1.1 o por A1.3.1.2. La cantidad de agua estará entre el $\pm 2\%$ del contenido de agua establecido como óptimo para la compactación. Determine el contenido de agua en Kg/m^3 mediante la ecuación A1.1.

Se puede utilizar un horno de microondas o un calentador directo para secar los materiales que no son sensibles a la temperatura, además de los métodos enumerados en A1.2.3. Se requiere un mínimo de cuatro comparaciones y la media de las diferencias observadas se usa como factor de corrección.

A1.3.1.1 Los contenedores de material compactado tomado del lugar de prueba pueden prepararse de acuerdo con A1.2.2.

A1.3.1.2 Los lugares de prueba sobre material compactado deben seleccionarse de acuerdo con A1.2.3.

A1.3.2 El método y los procedimientos de prueba que se usan en la obtención del conteo (o de la relación como se define en la sección 7) para establecer el error deben ser los mismos

que los usados para medir el contenido de agua en el material por probar.

A1.3.3 El valor medio de las diferencias entre el contenido de humedad de las muestras de prueba (como se determina en A1.3.1.1. ó A1.3.1.2) y los valores medidos con el instrumento se usará como una corrección de las medidas hechas en el campo. Algunos instrumentos que utilizan un microprocesador pueden tener la capacidad de introducir un factor de corrección que se establece mediante los valores relativos del contenido de agua como un porcentaje de la densidad seca, eliminando así la necesidad de determinar la diferencia en unidades de masa de agua.

A2. DETERMINACION DE LA PRECISION DEL APARATO

A2.1 La precisión del aparato para un contenido de agua de 160 Kg/m³ deberá ser mejor que 4 Kg/m³ en el período establecido por el fabricante para el tiempo de medida. (Nota A2.1). Puede haber disponibles otros periodos de tiempo (normalmente múltiplos de 4 del período normal) que pueden usarse donde se deseen precisiones más altas o más bajas con propósitos estadísticos. La precisión se determinará por el procedimiento definido en 5.2.1 ó 5.2.2.

Nota A2.1. Aun cuando el período normal de tiempo es de un minuto y puede usarse para la comparación de varios aparatos, la intención de este método de prueba es requerir un período de medida que

produzca la precisión establecida para todas las pruebas de aceptación.

A2.2 La precisión del aparato se determina a partir de la pendiente de la respuesta de calibración y la desviación estadística de la cuenta (neutrones detectados) para el período de medida, como sigue:

$$P = \frac{\sigma}{S}$$

donde:

- P : Precisión del aparato para el contenido de agua (Kg/m^3)
- σ : Desviación estándar en cuentas para el período de medida.
- S : Pendiente en el cambio de conteos por período medido, dividida entre el cambio en el contenido de agua (Kg/m^3).

A2.2.2 La cuenta por período de medida será, el número total de neutrones térmicos detectados durante el período regulado. El valor representado debe corregirse por cualquier pre-escala incluida dentro del aparato. El valor de pre-escala (F) es un divisor que reduce el valor real con el propósito de mostrarlo. El fabricante aportará este valor si difiere de 1.0.

A2.2.2 La desviación estándar en cuentas por período de medida se obtendrá como sigue:

$$\sigma = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{F}}$$

donde:

σ : Desviación estándar en cuentas por período de medida.

C : Cuentas por período de medida (antes de la corrección de pre-escala) en un contenido de agua de 160 Kg/m³.

F : Valor de pre-escala (A2.2.1).

A2.2.3 Los conteos por período medido (antes de la corrección de pre-escala) deberán ser obtenidos mediante curvas, tablas o ecuaciones de calibración.

A2.2.4 La pendiente de la respuesta de calibración obtenida en conteos por un período medido (antes de la corrección de pre-escala) para un contenido de agua de 160 Kg/m³ se determinará a partir de las curvas, tablas o ecuaciones de calibración.

A2.3 La precisión se calculará determinando la desviación estándar de al menos 20 mediciones repetitivas (sin mover el equipo después de la primera medida) en un material que tenga un contenido en agua de 130 a 190 Kg/m³. A fin de efectuar este procedimiento, la precisión del conteo mostrado, la respuesta de calibración u otro método que presente el contenido en agua debe ser igual o menor de ± 1 Kg/m³.

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES

1. La calidad de las vías terrestres se refleja en la eficiencia del transporte y en una mejoría sustancial de la economía. La compactación adecuada de las terracerías que integran una vía terrestre, es factor fundamental para su resistencia y durabilidad, por lo que debe vigilarse cuidadosamente y de manera continua que se cumpla durante el proceso constructivo.
2. Para la medición y ejecución de la compactación existen pruebas que se basan en los principios fundamentales de la Mecánica de Suelos y que están normadas extensamente. El Ingeniero de vías terrestres debe conocer estas normas, tanto teórica como prácticamente.
3. Los procedimientos tradicionales para el control de la compactación tienen el inconveniente de ser lentos y costosos, de no ser suficientemente representativos y de dar resultados que muchas veces son inoportunos o provocan demoras en la construcción.

4. Los nuevos equipos nucleares para la medición de la compactación pueden sustituir con ventaja a los equipos tradicionales. Permiten mediciones rápidas y confiables y pueden utilizarse con mayor frecuencia. Su aplicación requiere el adiestramiento de los operarios para la ejecución adecuada de las pruebas y para su protección contra los peligros de la radiación excesiva. Existen normas que permiten atender estos problemas. La adecuada calibración de estos equipos es un punto que no puede omitirse.

5. El desarrollo de los equipos nucleares para la medición de la compactación, es un buen ejemplo de cómo la investigación científica permite el desarrollo tecnológico aplicado y éste a su vez permite alcanzar objetivos concretos. En este caso, los principios de la física nuclear se aplican a la medida de la compactación, que a su vez sirve como un instrumento más para el objetivo final, que es el de lograr vías terrestres de alta calidad.

BIBLIOGRAFIA

- Alfonso Rico y Hermilio del Castillo
"La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres", Vol. I
Edit. Limusa, México, D.F., 1982
- Tippens, Paul E.
"Física, Conceptos y Aplicaciones"
Edit. Mc Graw Hill.
- Caterpillar
"Manual de compactación"
E.U.A., 1990
- Boart Longyear
"Curso de Radiología para Personal Ocupacionalmente Expuesto"
México, D.F., 1995
- M. Max G. Lay
"A history of compaction"
Routes Roads, No. 284, III, 1994
- Juárez Badillo, Rico Rodríguez
"Mecánica de Suelos", Vol. I
Edit. Limusa, México, D.F., 1989
- Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas
"Instructivo para efectuar pruebas en suelos", Vol. I
México, D.F., 1981
- Dr. Jorge Rickards Campbell
"Las radiaciones: retos y realidades"
Edit. Fondo de Cultura Económica
México, D.F.
- Diario Oficial del 22 de Noviembre de 1988
"Reglamento de Seguridad Radiológica"
- Normas ASTM
E.U.A., 1991