

[Revisión CAGrijalva]

MECÁNICA DE SUELOS

NOTAS DE CLASE



DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE, CUNOC
CÉSAR A. GRIJALVA

PALABRAS INICIALES

La mecánica de suelos es una disciplina y ciencia de la ingeniería civil que es extrema, o gusta o no al futuro ingeniero civil. La razón de semejante aseveración es por su pragmatismo y practicidad.

Mecánica de suelos no es más que considerar aspectos físicos y aplicarlos a la investigación del suelo del proyecto de turno. Se hace la aclaración, que también son necesarios principios de física, biología y más. Pero lo físico es el punto de partida, que involucra, color, humedad, plasticidad, tamaño y forma de granos como otros.

Mecánica de suelos puede considerarse como un subconjunto de geología, puesto que la primera no llega al estudio de las rocas como la segunda. Mecánica de suelos generalmente busca la clasificación de suelos gruesos (gravas y arenas) y suelos finos (limos y arcillas)

Entonces la aplicación de estos principios físicos (en inicio) a los suelos gruesos y finos, con procedimientos específicos y prácticos, es lo que le da a la mecánica de suelos su carácter pragmático, en la búsqueda y obtención de resultados.

Buena parte de estos criterios son tecnología de guerra, que implica adaptarse o morir. Es la herencia e injerencia no solo en Guatemala de la tecnología estadounidense de la Segunda Guerra Mundial. Cabe decir que el mérito de esta propuesta tan básica y práctica hace que incluso varias de estas pruebas las reconozca la normativa DIN, de la Alemania que fuera parte del Eje, y enemiga de los Estados Unidos de América en dicho conflicto bélico.

Cambiando un poco el orden de la exposición, con las anteriores ideas, la importancia de la mecánica de suelos es por ser el soporte de la futura edificación. De manera económica y viable se evalúan los riesgos. Fortalezas, debilidades y oportunidades que el solar ofrece.

Por ejemplo, amable lector, si usted recibe una herencia monetaria, no la depositaría en cualquier financiera, primero se investiga por la seguridad de ese escaso capital. Igual es el suelo, hay que investigarlo, puesto que la futura edificación tiene un costo en tiempo y dinero. Si por frutas y verduras de la estación existe la cultura del regateo en cualquier mercado de barrio, ¿cuánto más con un proyecto que implica el costo de un sin número de canastas básicas de alimentación?

Espero que dicho curso despierte la curiosidad e indagación de la mente de un buen ingeniero, que no da nada por sentado. Penoso y dramático es el mal desempeño de edificaciones bien calculadas a las que se asume el comportamiento del suelo, tarde o temprano aparecen las consecuencias a manera de problemas de suelo.

En suma, como comentario final, de nada o poco sirve un buen cálculo estructural si se asume el suelo. Deja lo anterior la lección que la vulnerabilidad de riesgo de cualquier proyecto de la ingeniería civil comienza desde las consideraciones del diseño.

En la revisión del año 2025 se agregan normas de AASHTO y de ASTM, la traducción es mía asumiendo la responsabilidad. También agrego ejemplos y notas para trabajo de campo en esta materia. Sin faltar una mirada al Libro Azul de Caminos de Guatemala del presente año.

Solo espero que estos apuntes de libreta de clase sean de alguna utilidad. Cualquier comentario o duda puede escribir al siguiente correo electrónico institucional: cesargrijalva@cunoc.edu.gt

Identificación y clasificación de suelos y de rocas

1. Definición de suelo de roca

Los términos roca y suelo, tal como se usan en la ingeniería civil, implican una clara distinción entre dos clases de materiales de cimentación. Se dice que roca es un agregado natural de granos minerales unidos por grandes y permanentes fuerzas de cohesión.

Por otra parte, se considera que suelo es un agregado natural de granos minerales, con sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en el agua.

Estas útiles definiciones son generalmente aceptadas y se utilizarán en este libro. Sin embargo, en la práctica, no existe diferencia tan simple entre roca y suelo. Aun las rocas más rígidas y fuertes pueden sufrir el proceso de meteorización, y algunos suelos muy endurecidos pueden presentar resistencias comparables a las de la roca meteorizada. La experiencia y práctica son importantes en esta disciplina.

2. Descripción e identificación de los suelos

Tipos principales de suelos. Los términos principales que usan los ingenieros civiles para descubrir suelos son: **grava, arena, limo y arcilla**.

La mayor parte de los suelos naturales se componen de una mezcla de dos o más de estos elementos, y pueden contener por añadidura, material orgánico parcial o completamente descompuesto. A la mezcla se le da el nombre del elemento que parezca tener mayor influencia en su comportamiento, y los otros componentes se usan como adjetivos. Así, una arcilla limosa tiene predominantemente las propiedades de la arcilla, pero contiene una cantidad importante de material orgánico.

A las **gravas y a las arenas** se les llama **suelos de grano grueso**, y a los **limos y a las arcillas** **suelos de grano fino**. La distinción radica en que puedan diferenciarse las partículas a simple vista. Los métodos para describir los suelos de grano grueso difieren de los que son apropiados para los de grano fino; por lo tanto, los procedimientos se explican bajo encabezados diferentes.

Materiales de los suelos de grano grueso. Los materiales de los suelos de granos gruesos son fragmentos minerales que pueden identificarse principalmente tomando como base el tamaño de las partículas.

Las partículas que tienen un tamaño mayor que aproximadamente 5 mm se clasifican como **grava**. Sin embargo, si el diámetro excede de aproximadamente 200 mm, se aplica usualmente el nombre de *boleo*.

Si los granos son visibles a simple vista, pero tienen un tamaño menor de aproximadamente 5mm, el suelo se describe como **arena**. Este nombre se modifica todavía más dividiéndolo en *gruesa, media o fina*. Las fronteras entre estas categorías han de ser arbitrariamente establecidas. En los Estados Unidos se ha adoptado la clasificación de las ASTM, cuyos límites de tamaños dados en la siguiente tabla 1 se utilizan como norma para fines técnicos.

**Límites de los tamaños de los componentes
del Suelo según la Clasificación de la ASTM
(En milímetros)**

Grava	Mayor de 4.75
Arena Gruesa	de 4.75 a 2.00
Arena Media	de 2.00 a 0.425
Arena fina	de 0.425 a 0.075
Fino (mezclas de limo y arcilla)	Menores de 0.075

Tabla 1

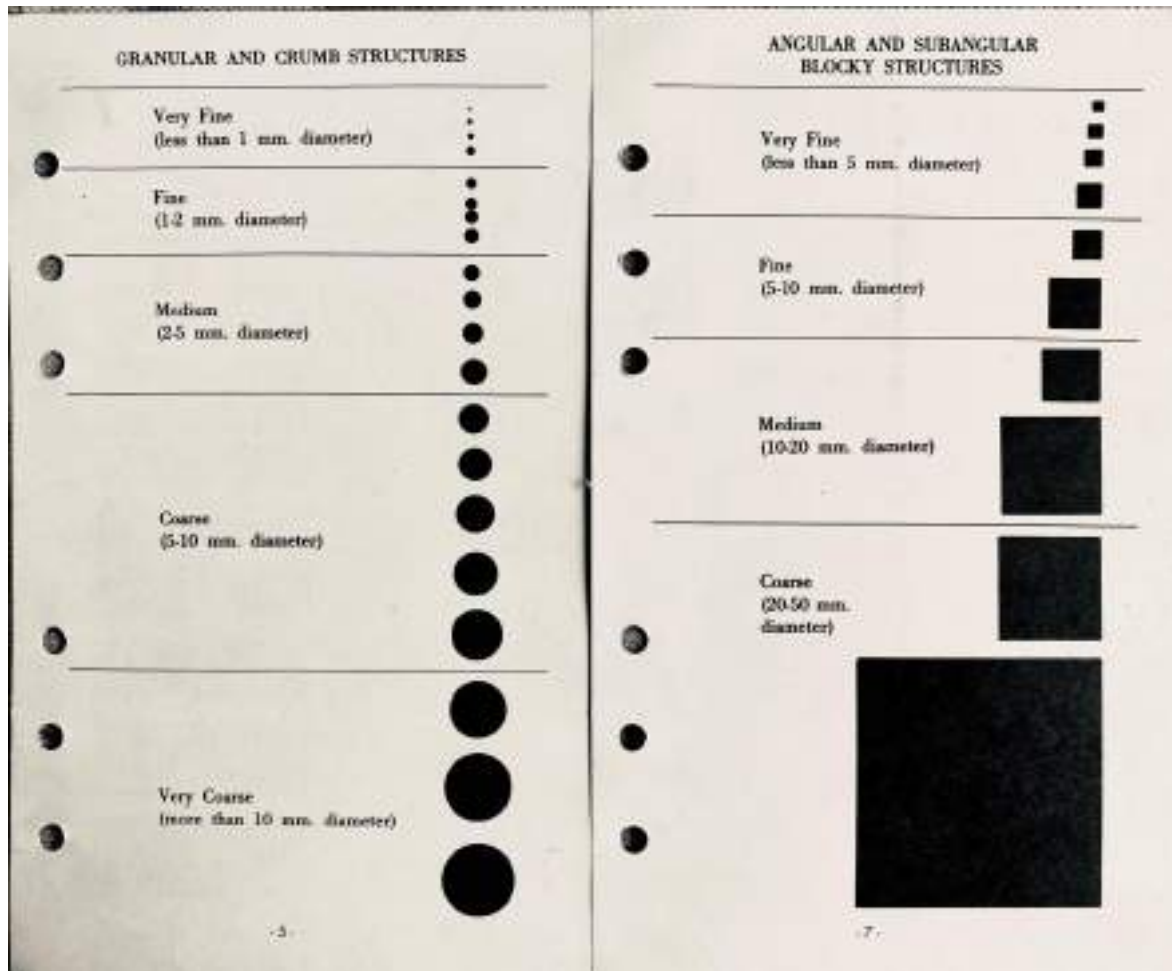
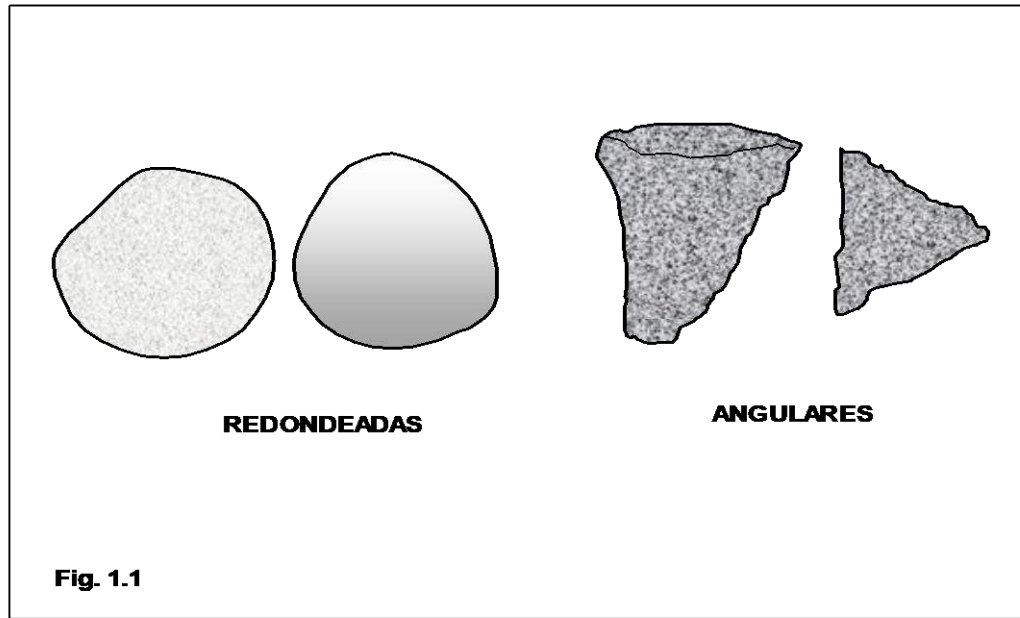
¿Por qué es tan importante el tamaño de las arenas en la ingeniería civil? Hay varias razones. Una es la graduación de tamaños, de mayor a menor, como la base para la construcción de filtros -lentos, de baja velocidad- para limpieza y remoción de sólidos de aguas al darles tratamiento.

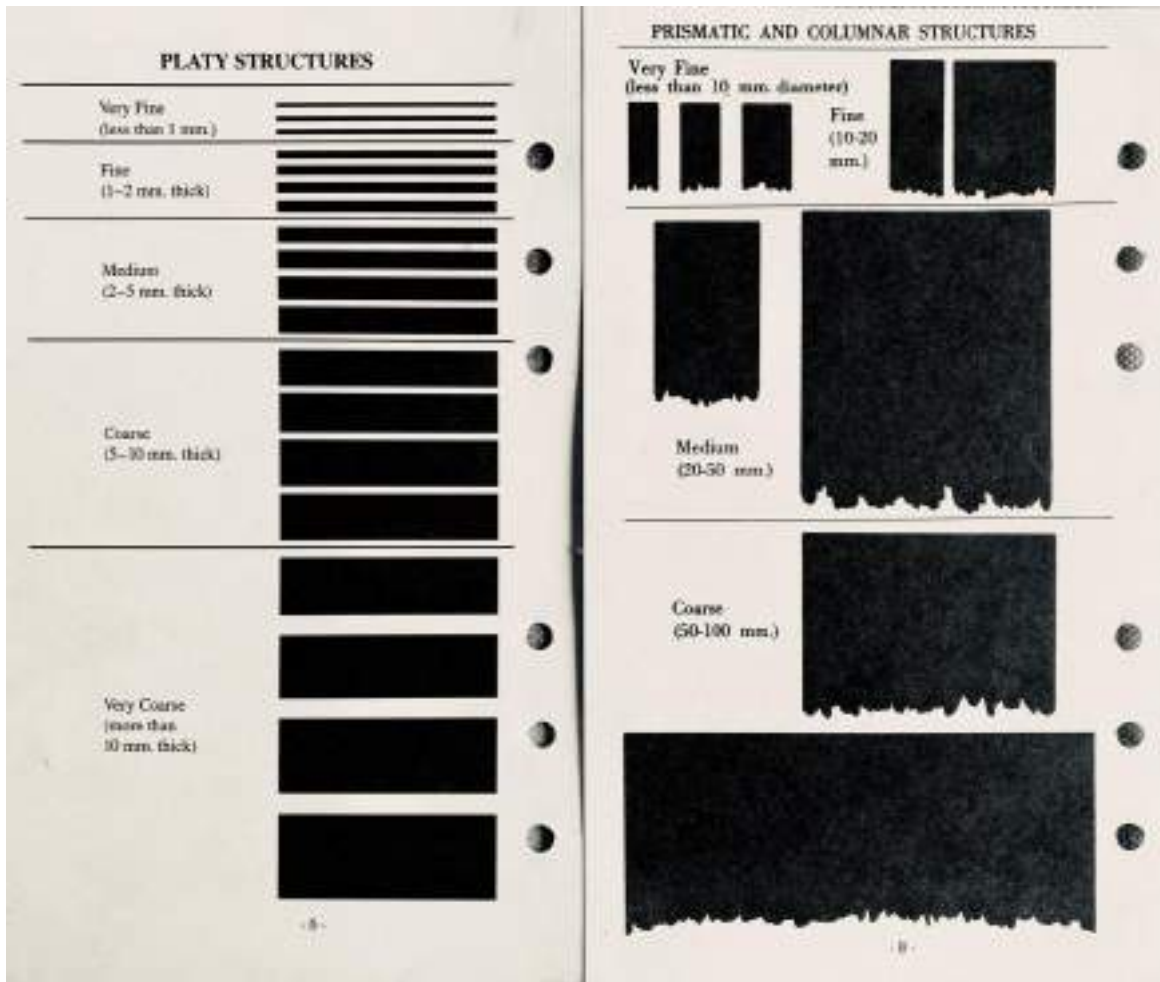
Otra segunda razón es por la importancia en la demanda de cemento al fabricar concreto. Arenas de grano grande resuelven concretos más porosos y permeables, que permiten el paso del agua y eso importa en la congelación y deshielo para que dicho concreto no se agriete, pero menos protección contra humedad. Además de menor consumo de cemento en la elaboración de concreto poroso.

Arenas finas nos entrega un concreto de poro cerrado, con mayor impermeabilidad o no paso del agua, pero requiere de mayor cantidad de cemento.

Una descripción verbal completa de un suelo de grano grueso incluye además de la estimación de la cantidad de material de cada orden de tamaño, la *graduación*, la *forma de las partículas*, y la *composición mineralógica*. La graduación permite definir a los suelos como *bien graduados*, *bastante bien graduados*, *bastante uniformes*, *uniformes*, y *de granulometría discontinua*. Los suelos bien graduados contienen una buena proporción de partículas de todos los tamaños, variando de gruesas a finas. En los suelos uniformes todas las partículas son aproximadamente del mismo tamaño. Los suelos de granulometría discontinua son mezclas de partículas finas de tamaños grueso uniforme y de partículas finas también de tamaño uniforme, faltando partículas de tamaño intermedio entre las gruesas y las finas. Todos los suelos que no están bien graduados, se denominan genéricamente *mal graduados*.

La forma de las partículas gruesas de un suelo influye en la compacidad y estabilidad del depósito del mismo. Los términos usuales con que se describe la forma de los granos se ilustran en la Fig. 1.1.





Munsell soil color charts. Gretagmacbeth, NY, USA; 2000.

Cuando se examinan las partículas más gruesas del suelo a simple vista o con una lupa pequeña, se debe tratar de estimar el grado de meteorización. La presencia de materiales débiles, como lutitas y mica, deberá también tenerse en cuenta, ya que estos materiales pueden influir en la durabilidad o compresibilidad del depósito.

Materiales de grano fino. Los Limos inorgánicos, que constituyen la porción gruesa de la fracción microscópica de los suelos, tienen poca o ninguna plasticidad o cohesión. Las variedades menos plásticas que consisten principalmente de granos de cuarzos muy finos y redondeados se llaman *polvo de roca*. Las variedades más plásticas que contienen una cantidad apreciable de partículas en forma de laminillas se llaman **limo plástico**.

La arcilla está formada por un agregado en que predominan los minerales de tamaño microscópico o submicroscópico en forma de laminillas cristalinas. Se caracterizan por tener las propiedades típicas de los coloides, como son la plasticidad y la facultad de absorber iones.

Estas propiedades aparecen en un amplio intervalo de contenidos de agua.

La distinción entre el limo y arcilla no puede basarse en el tamaño de las partículas, porque las propiedades físicas importantes de los dos materiales están

relacionadas sólo indirectamente con dicho tamaño. Además, como ambas son microscópicas, deberán usarse como criterio de identificación en el campo, otras propiedades físicas que no sean el tamaño de las partículas.

La resistencia en estado seco proporciona una base para distinguirlos. Se moldea un pequeño prisma de suelo que se deja secar al aire. Luego se rompe y tomando un fragmento de aproximadamente 3 mm se aprieta entre el pulgar y el índice. El esfuerzo necesario para romper el fragmento proporciona una base para describir su resistencia como *muy baja, baja, media y alta, o muy alta*. Un fragmento de arcilla puede romperse solamente con gran esfuerzo, mientras que uno de lino se rompe fácilmente.

Como los limos son más permeables que las arcillas, la *distancia o prueba de agitado* puede usarse también para distinguir los dos materiales. En esta prueba, se toma en la palma de la mano una pequeña porción de suelo y se mezcla con agua hasta que tome una consistencia muy blanda.

Luego se golpea el dorso de la mano ligeramente. Si el suelo es limoso, el agua sube rápidamente a su superficie y le da una apariencia brillante o reluciente. Luego, si se deforma la pasta de suelo, en algunos casos exprimiéndola y en otros estirándola, el agua regresa al interior dejando la superficie con una apariencia mate. Usualmente, cuanto mayor sea la proporción de arcilla en la muestra, más lenta será la reacción a la prueba. La reacción se califica como *rápida, lenta o ninguna*. La *plasticidad* es una propiedad característica de las arcillas y puede usarse también como base para hacer pruebas sencillas en el campo. A una humedad determinada, un suelo que contiene cantidades apreciables de arcilla puede deformarse y amasarse en la mano sin que se desintegre. Por lo tanto, si puede manipularse una muestra de suelo húmeda entre las palmas de la mano y formar con ella cilindros largos y delgados, indudablemente contiene una cantidad apreciable de arcilla. Al perder humedad con una manipulación prolongada, el suelo se aproxima al estado en que deja de ser plástico y se vuelve demororable. Precisamente antes de llegar a ese estado, una arcilla muy plástica puede convertirse en cilindros largos y delgados, con un diámetro aproximado de 3 mm, que tiene suficiente resistencia para soportar su propio peso. Por otra parte, un limo rara vez permite formar cilindros tan delgados como de 3mm sin romperse, notándose una completa falta de resistencia a la tensión, a menos de que contenga pequeñas cantidades de arcilla. El registro que se haga de una prueba sencilla de plasticidad debe indicar no solamente si pueden formarse los cilindros plásticos, sino también la tenacidad del cilindro al acercarse al estado desmoronable. Esta condición se califica como *débil y quebradiza, media, o tenaz*.

Existe un cuarto procedimiento, denominado *prueba de dispersión*; es también útil para distinguir los limos de arcilla en un material. Si se dispersa una pequeña cantidad de suelo en agua en una probeta o tubo de ensayo y se deja reposar. Las partículas más grandes caen primero, y las finas permanecen en suspensión un tiempo mayor. Ordinariamente, las arenas se asientan en un tiempo de 30 a 60 segundos.

Los limos emplean en asentarse de 15 a 60 minutos, mientras que las arcillas permanecen en suspensión cuando menos varias horas y, usualmente, durante varios días, amenos que se combinen formando grumos o flóculos.

Materia orgánica del suelo. Cantidades muy pequeñas de materia orgánica pueden tener influencia importante en las propiedades físicas de los suelos. La mayor parte de los suelos orgánicos son más débiles y compresibles que los suelos que posean la misma composición mineral, pero que carezcan de materia orgánica puede reconocerse usualmente por el color que de gris oscuro a negro tiene el suelo y por el olor de vegetación podrida.

El limo orgánico es un suelo de grano fino, más o menos plástico, que contiene partículas minerales de limo y partículas finamente divididas de materia orgánica. Pueden también estar presentes conchas y fragmentos visibles de materia vegetal parcialmente podrida.

La arcilla orgánica es un suelo arcilloso que debe algunas de sus propiedades importantes a la presencia de materia orgánica finamente dividida.

Los depósitos de suelos eminentemente orgánicos como la *turba*, pueden distinguirse por un color que ce del pardo oscuro al negro, por la presencia de partículas fibrosas de materia vegetal en estado variable de descomposición, y por el olor característico a materia orgánica.

No siempre se reconocen fácilmente las combinaciones de materiales orgánicos y minerales en los suelos, especialmente si la proporción de materia orgánica es pequeña. Sin embargo, la presencia materia orgánica debe siempre sospecharse, si el suelo tiene color pardo oscuro, gris oscuro, negro. Si no puede distinguirse el olor a materia orgánica, algunas veces puede hacerse evidente con un poco de calor.

En la tabla 1.2 se da un resumen de las reacciones de los suelos inorgánicos de grano fino y de los suelos parcialmente orgánicos en las pruebas sencillas de identificación de campo.

Tabla 1.2

Nombre típico	Resistencia en estado seco	Dilatancia	Tenacidad	Tiempo de Sedimentación en la prueba de Dispersión
Limo arenoso	De ninguna a muy baja	Rápida	De débil a baja	de 30 a 60 min
Limo	De muy baja a baja	Rápida	De débil a baja	de 15 a 60 min
Limo Arcilloso	De baja a media	De rápida a lenta	Media	de 15 min a varias horas
Arcilla arenosa	De baja a alta	De lenta a ninguna	Media	de 30 seg a varias horas
Arcilla limosa	De media a alta	De lenta a ninguna	Media	de 15 min a varias horas
Arcilla	De alta a muy alta	Ninguna	Alta	de varias horas a días
Limo orgánico	De baja a media	Lenta	De débil a baja	de 15 min a varias horas
Arcilla orgánica	De media a muy alta	Ninguna	Alta	de varias horas a días

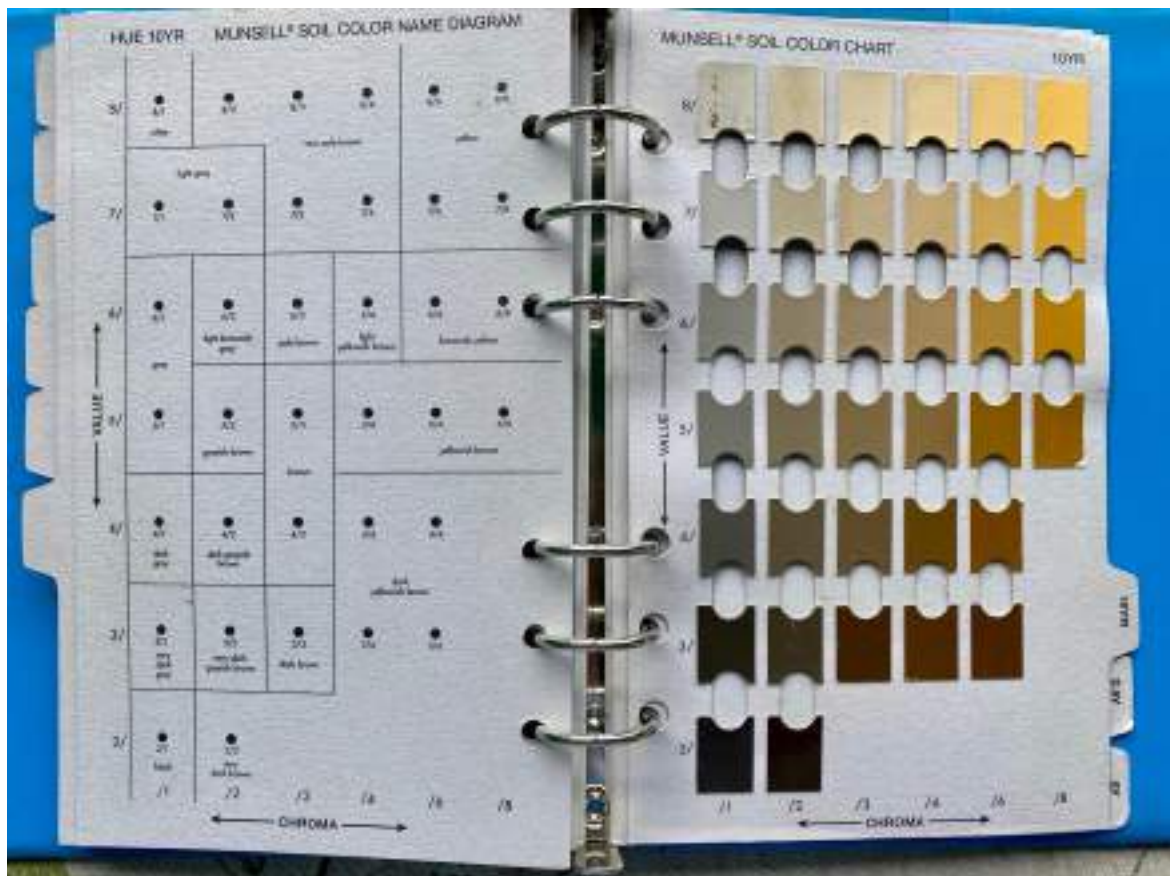
a. La escala Munsell del color

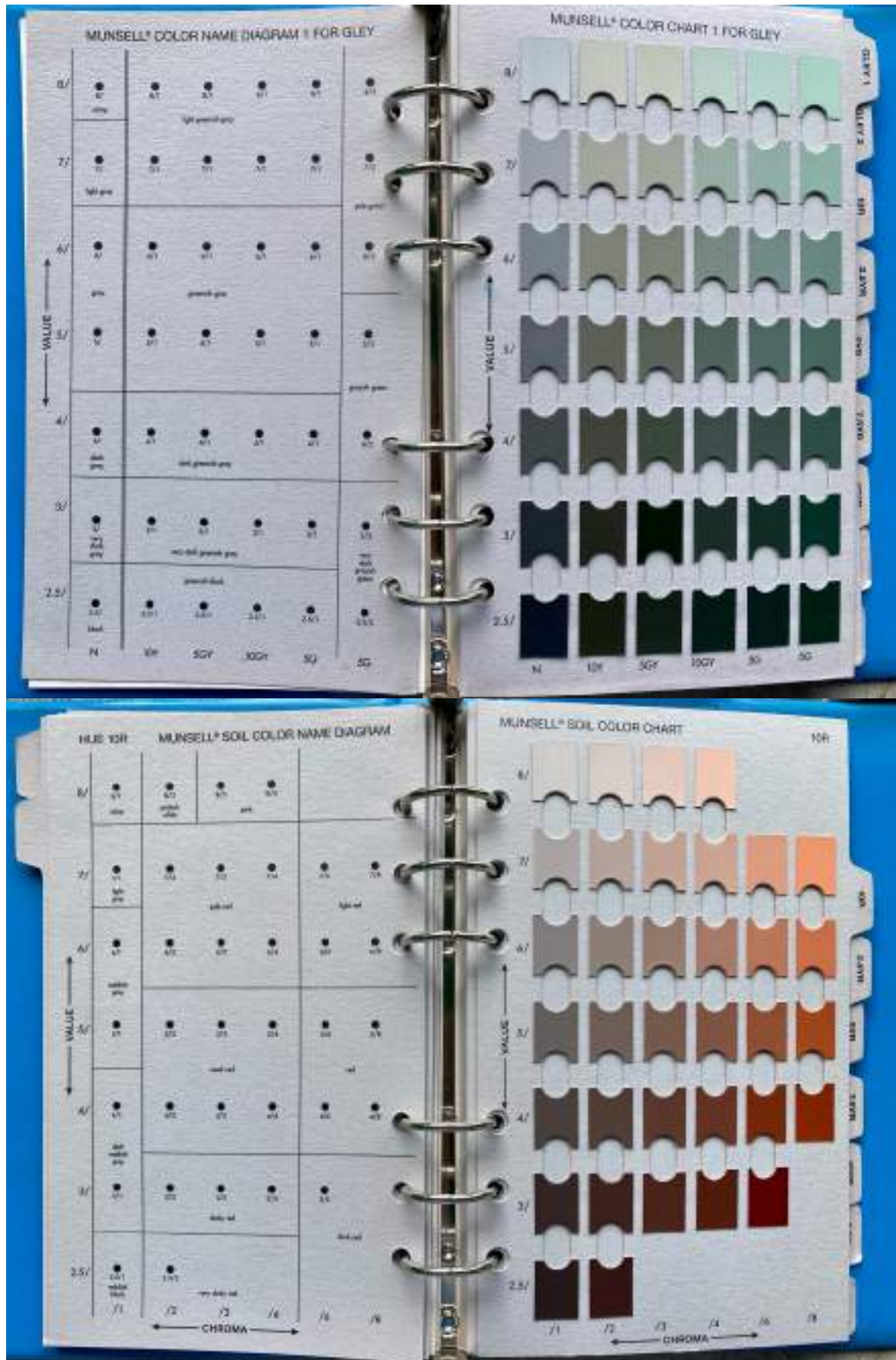
La escala Munsell, no sólo tiene la utilidad de ayudar a identificar coloraciones en los suelos. También tiene aplicaciones forenses, tales como coloración de uñas,

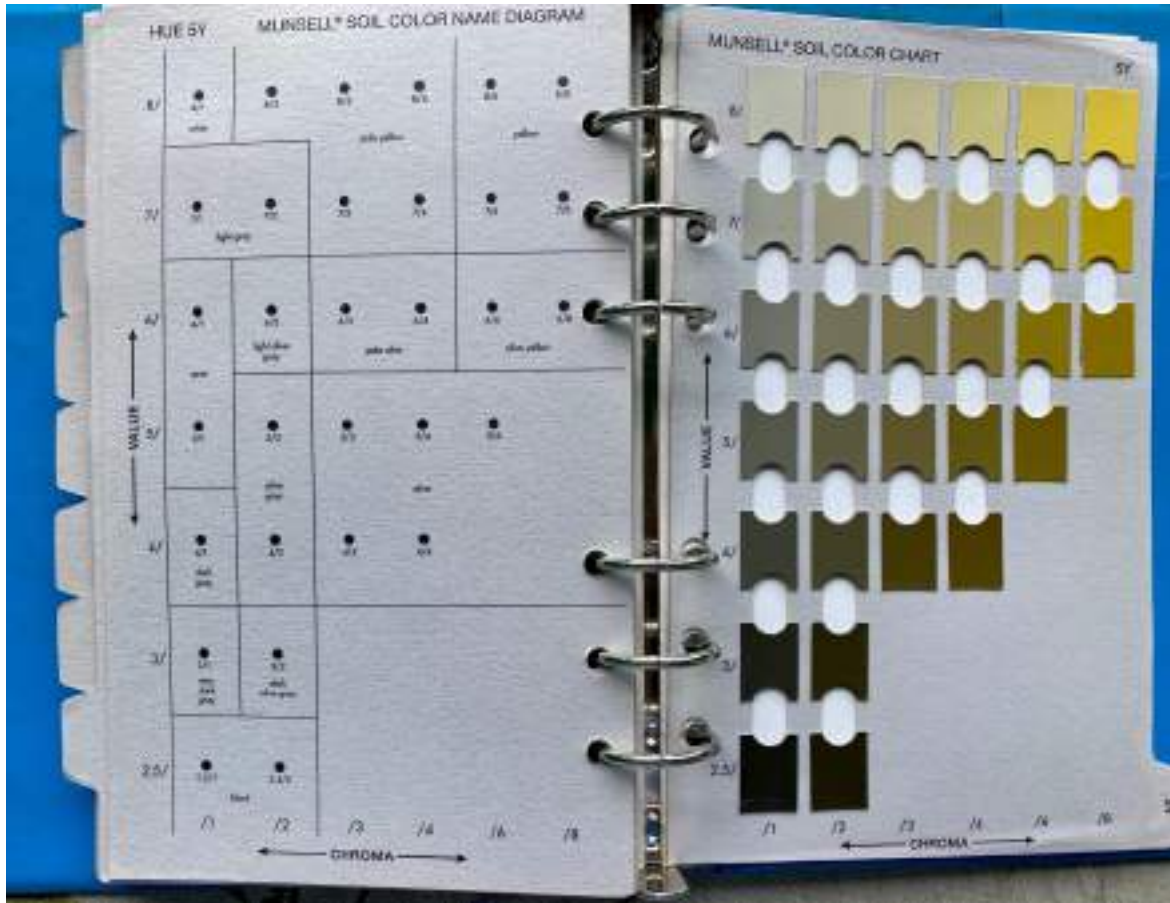
cabello o iris de ojos. A nivel de restauración de monumentos, puede ser de utilidad para conservar el color y aspecto original de la edificación o monumento que se lleva a su estado original. Es un catálogo de degradaciones de colores sobre grises, rojo (R), amarillo (Y) y la combinación de estos dos últimos.

Para mecánica de suelos, estratos con coloraciones amarillas en zonas volcánicas, es indicio de presencia de azufre. Coloraciones rojizas indica presencia de ferrita (hierro). Celeste grisáceo, puede ser indicio de magnesio y un gris profundo y brillante muestra un veta de plomo.

A continuación ejemplos de la carta de colores de la escala de Munsell







Munsell soil color charts. Gretagmacbeth, NY, USA; 2000.

3. Propiedades de las partículas sólidas

Tamaño de los granos. La propiedad más importante de los granos en los suelos de grano grueso es su *distribución granulométrica o por tamaños*, que se determina por medio de un *análisis mecánico*. Los tamaños de los elementos en granos gruesos pueden determinarse usando un juego de cribas . La malla que se usa más comúnmente en el campo o en el laboratorio es la No. 200 U.S. estándar, en la que la anchura de las mallas es de 0.075 mm. Por está razón se ha aceptado como la frontera estándar entre los materiales de grano grueso y los de grano fino.

Para determinarla distribución granulométrica de las partículas de cualquier suelo que contenga material de grano fino, deberá usarse el método de análisis mecánico en húmedo. Los métodos de análisis mecánico en húmedo se basan en la ley de Stokes, que dice que la velocidad a la que cae una partícula esférica a través de un medio líquido en función del diámetro y del peso específico de la partícula. Se hace una suspensión del suelo, que se agita y luego se deja en reposo. Después que ha transcurrido un tiempo dado, todas las partículas mayores que las de un tamaño determinado se han asentado debajo de un plano situado a una profundidad arbitraria en la suspensión. Este tamaño puede calcularse por medio de la ley de Stokes. La densidad correspondiente e la suspensión a la profundidad arbitraria es la medida de la cantidad de suelo menor que el tamaño

calculado. De esta manera, midiendo la densidad en tiempos diferentes, puede determinarse la distribución de los tamaños de las partículas.

El uso del microscopio electrónico permite a los investigadores determinar la forma y tamaño real de las partículas de suelo de grano fino, pero este refinamiento no resulta práctico ni económico en la clasificación de rutina de los suelos.

Los resultados de los análisis mecánicos se presentan usualmente por medio de una curva de distribución granulométrica. El porcentaje P de material más fino que el de un tamaño determinado se dibuja en el eje de ordenadas, a escala natural, y el diámetro correspondiente de la partícula, D_p , en milímetros, se dibuja en el eje de abscisas, a escala logarítmica. Una grafica de ese tipo tiene la ventaja que los materiales de igual uniformidad se representan por curvas de forma idéntica, sea el suelo de grano grueso o de grano fino. Además, la forma de la curva es una indicación de la granulometría. Los suelos uniformes están representados por líneas casi verticales, y los suelos bien graduados por curvas de forma de S que se extiende a través de varios ciclos de escala logarítmica. La Fig. 1.2 muestra curvas de los tamaños de las partículas para suelos de varios tipos.

Las características granulométricas de los suelos pueden compararse más cómodamente, estudiando ciertos valores numéricos importantes deducidos de las curvas de distribución. Los demás comúnmente usados por los ingenieros se designan como D_{10} , el *diámetro efectivo*, y $C_u = D_{60} / D_{10}$, el *coeficiente de uniformidad*. El diámetro efectivo es el diámetro de la partícula correspondiente a $P = 10$ por ciento en la curva granulométrica. Por lo tanto, el 10 por ciento de las partículas son menores que el diámetro efectivo y el 90 por ciento, son mayores (vea la Fig. 1.2). Es posible tener un suelo de granulometría discontinua con un coeficiente de uniformidad grande que esté realmente compuesto de dos fracciones uniformes. El coeficiente de curvatura, $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$, es un valor que puede usarse para identificar esos suelos como mal graduados. En las gravas bien graduadas, C_u es mayor que 4 y C_z queda entre 1 y 3. En las arenas bien graduadas, C_u es mayor que 6 y C_z está entre 1 y 3.

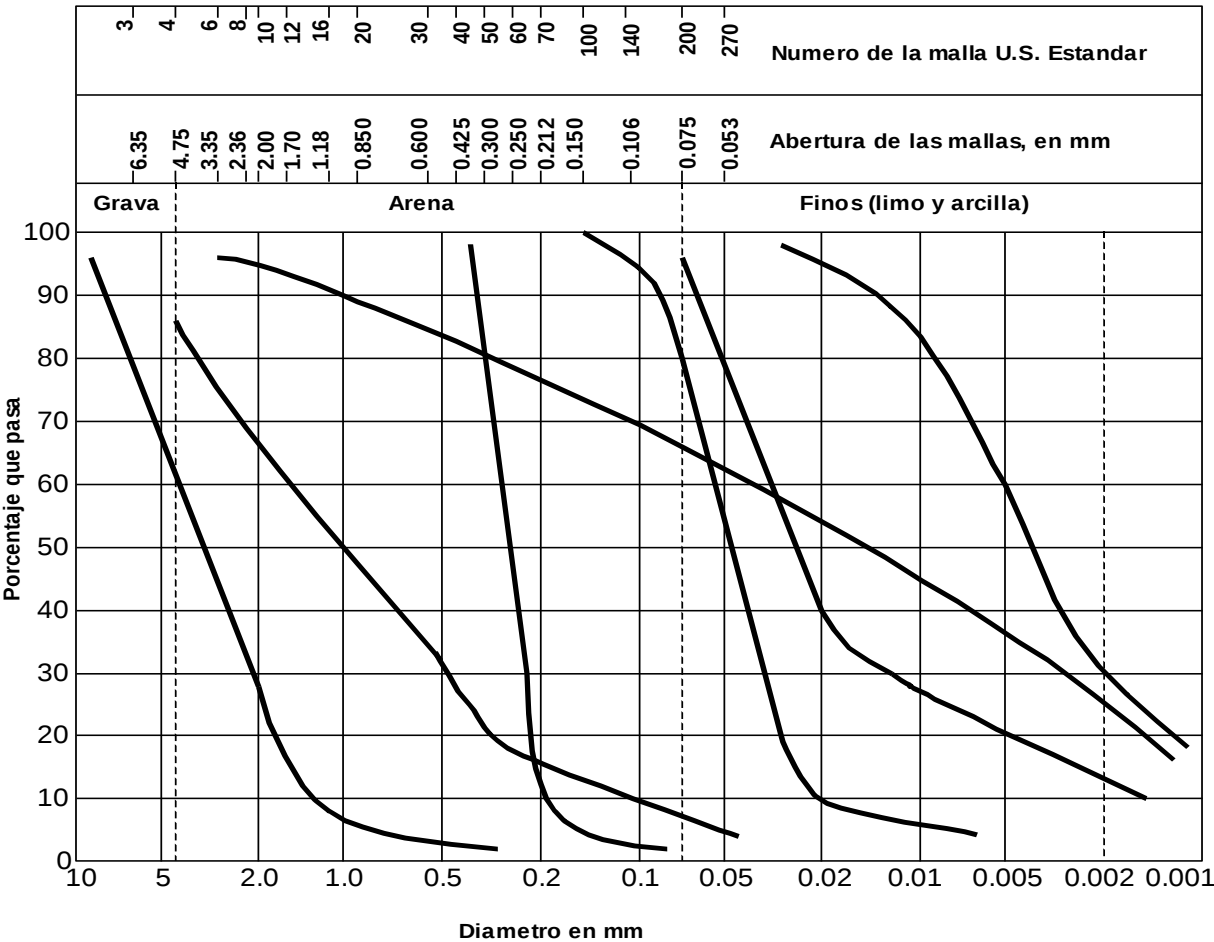


Fig.
1.2

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles of standardization established in the Declaration of Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: E11 - 24

Especificación estándar para Tamiz de prueba de alambre tejido y tamices de prueba¹ (Traducción mía, con las disculpas del caso)

Esta norma se emite con la designación fija E 11; el número que sigue inmediatamente a la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reprobación. Un épsilon (ε) en superíndice indica un cambio editorial desde la última revisión o reprobación.

Este estándar o normativa ha sido aprobado para uso por las agencias del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América.

¹ Esta especificación está bajo la jurisdicción del Comité ASTM E29 sobre partículas y Caracterización de Aspersión y es responsabilidad directa del Subcomité E29.01 en tamices. Métodos de corte. y medios de proyección. Edición actual aprobada el 1 de febrero de 2024. Publicado en junio de 2024. Originalmente aprobado en 2022. como E11 - 22 edición anterior aprobada en 2022 como E11-22. DOI: 10.1520/E0011 - 24

1. ALCANCE

1.1 Este documento especifica los requisitos técnicos para; la tela de tamiz de prueba de alambre tejido (tela de tamiz) utilizada en los tamices de prueba, la construcción de los tamices de prueba, los tamaños de marco de tamiz de prueba estándar y no estándar, y los procedimientos de prueba utilizados para inspeccionar la tela del tamiz y los tamices de prueba. Esta especificación se aplica a los tamices de prueba fabricado con tela tamiz que tiene un tamaño de apertura nominal que varía desde 125 milímetros (mm) hasta 20 micrómetros (pm).

1.2 Puede encontrar información de referencia adicional en las Especificaciones E161, E323 E2016 y en los Métodos de prueba C430 y E2427.

1.3 Se considerarán los valores expresados en unidades SI (Sistema Internacional) estándar para las dimensiones de las aberturas de la tela del tamiz y los diámetros de alambre utilizados en la tela de tamiz. Los valores indicados en la unidad pulgada-libra se considerará estándar con respecto a los tamices, cacerolas (bastidores) y tapas.

1.4 *Esta norma no pretende abordar todas las preocupaciones de seguridad, si las hay, asociadas con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma el establecer prácticas apropiadas de seguridad, salud y medio ambiente y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.*

1.5 *Esta norma internacional fue desarrollada de acuerdo con principios internacionalmente reconocidos sobre normalización establecidos en la Decisión sobre Principios para el Desarrollo de Normas, Guías y Recomendaciones Internacionales emitidas por la Organización Mundial del Comercio Comité de Obstáculos al Comercio (TBT).*

2. Documentos referenciados²

2.1 ASTM estándares

C430 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve. (Método de prueba para determinar la finura del cemento hidráulico mediante el tamiz de 45 µm (No. 325))

D6299 Practice for Applying Statistical Quality Assurance and Control Charting Techniques to Evaluate Analytical Measurement System Performance. (Práctica para aplicar técnicas de gráficos de control y garantía de calidad estadística para evaluar el rendimiento del sistema de medición analítica)

E161 Specification for Electroformed Material and Test Sieves. (Especificación para materiales electro formados y tamices de prueba)

E323 Specification for Perforated-Plate Sieves for Testing Purposes. (Especificación para tamices de placa perforada para fines de prueba)

E1638 Terminology Relating to Sieves, Sieving Methods, and Screening Media (Terminología relacionada con tamices, métodos de tamizado y medios de tamizado)

E2016 Specification for Industrial Woven Wire Cloth. (Especificación para tela metálica tejida industrial)

E2427 Test Method for Acceptance by Performance Testing for Test Sieve. (Método de prueba para la aceptación mediante pruebas de rendimiento para el tamiz de prueba)

2.2 MANUAL ASTM

² Para estándares ASTM referenciados. Visite el sitio web de ASTM www.astm.org o comuníquese con el Servicio de atención al cliente de ASTM en www.astm.org/contact. Para obtener información sobre el volumen del libro anual de normas ASTM, consulte la página resumen de documentos de la norma en el sitio web de ASTM.

Manual 32 Test Sieving Methods: Guidelines for Establishing Sieve Analysis Procedures; 5th Edition. (Métodos de tamizado de prueba: directrices para establecer procedimientos de análisis de tamiz; 5ta edición.)

2.3 Federal Standard:

Fed. Std. No. 123 Marking for Shipment (Civil Agencies) (Marcado para envío (agencias civiles))

2.4 Military Standard³:

MIL-STD-129 Marking for Shipment and Storage (Marcado para envío y almacenamiento)

2.5 ISO Standard⁴:

ISO 3310-1 Test Sieves Technical Requirements and Testing, Part 1: Test Sieves of Metal Wire Cloth (Pruebas y requisitos técnicos de tamices de prueba, Parte 1: Tamices de prueba de tela metálica)

2.6 ASTM Adjuncts⁵:

Distribution Analysis of Sieve Openings (Análisis de distribución de las aberturas de tamices)

3 Terminología

3.1 **Definiciones:** Temas adicionales pueden ser encontrados en Terminología E1638

3.1.1 **Apertura n:** La dimensión que define una abertura en una superficie de cribado.

3.1.2 **Paño de respaldo n:** una capa de soporte de malla de alambre utilizada directamente debajo de la tela del tamiz con una abertura más gruesa que la designación del tamiz.

³ Disponible en el mostrador de pedidos de documentos de estandarización DODSSP, Bldg. 4, Sección D, 700 Robbins Ave, Filadelfia, PA 19111-5098, <http://www.dodssp.daps.mil>.

⁴ Disponible en el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI). 25 W. 43rd St, 4to piso, Nueva York NY 10036, <http://www.ansi.org>

⁵ Disponible en la sede internacional de ASTM. Orden Adjunta No. ADJE0011-E-PDF. Adjunto original producido en 2024.



TABLE 1 Nominal Dimensions and Permissible Variations for Sieve Cloth and Compliance, Inspection and Calibration Test Sieves

(1)	(2a)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Standard Sieve	Sieve Designation U.S. Supplementary Sieve	Nominal Sieve Opening mm	Nominal Sieve Opening in.	±V Variation by Average Opening	±X Maximum Variation by Opening	Resulting Maximum Individual Opening mm	Compliance Sieves		Inspection Sieves		Calibration Sieves		Permissible Average Wire Diameter	
							Sample Openings per 100 ft ²	Minimum Standard Deviation	Sample Openings per 100 ft ²	Maximum Standard Deviation	Sample Openings per Sieve	Maximum Standard Deviation	Min	Max
125	5 in.	125	5.00	3.30	4.00	129.00	20	-	all	-	all	-	8.0	9.2
100	4 in.	100	4.00	2.86	3.74	111.74	20	-	all	-	all	-	6.0	6.8
75	3 in.	75	3.00	2.40	3.00	93.00	20	-	all	-	all	-	4.0	4.5
60	2 1/2 in.	60	2.50	2.00	2.50	76.20	20	-	all	-	all	-	3.0	3.5
50	2 in.	50	2.00	1.60	2.00	63.50	20	-	all	-	all	-	2.0	2.5
40	1 1/2 in.	40	1.50	1.20	1.50	50.80	20	-	all	-	all	-	1.5	1.8
37.5	1 1/4 in.	37.5	1.40	1.10	1.40	47.60	20	-	all	-	all	-	1.4	1.6
30	1 in.	30	1.00	0.80	1.00	38.10	20	-	all	-	all	-	1.0	1.2
25	3/4 in.	25	0.75	0.60	0.75	30.50	20	-	all	-	all	-	0.75	0.9
20	3/8 in.	20	0.50	0.40	0.50	25.00	20	-	all	-	all	-	0.50	0.6
15	3/16 in.	15	0.375	0.30	0.375	18.75	20	-	all	-	all	-	0.375	0.45
12.5	1/4 in.	12.5	0.3125	0.25	0.3125	15.62	20	-	all	-	all	-	0.3125	0.38
10	1/8 in.	10	0.125	0.10	0.125	6.35	20	-	all	-	all	-	0.125	0.15
7.5	3/32 in.	7.5	0.09375	0.075	0.09375	4.76	20	-	all	-	all	-	0.09375	0.11
5	1/16 in.	5	0.0625	0.05	0.0625	3.17	20	-	all	-	all	-	0.0625	0.075
4	1/32 in.	4	0.03125	0.025	0.03125	1.58	20	-	all	-	all	-	0.03125	0.038
3.75	3/64 in.	3.75	0.0244	0.02	0.0244	1.25	20	-	all	-	all	-	0.0244	0.03
3	1/64 in.	3	0.015625	0.0125	0.015625	0.79	20	-	all	-	all	-	0.015625	0.019
2.5	1/32 in.	2.5	0.015625	0.0125	0.015625	0.79	20	-	all	-	all	-	0.015625	0.019
2	1/16 in.	2	0.03125	0.025	0.03125	1.58	20	-	all	-	all	-	0.03125	0.038
1.7	3/128 in.	1.7	0.01328	0.0106	0.01328	0.66	20	-	all	-	all	-	0.01328	0.016



TABLE 1 Continued

(1)	(2a)	(2b)	(3) ^a	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9) ^b	(10)	(11) ^c	(12)	(13)	(14)	(15)
Standard Sieve	Sieve Designation		Nominal Sieve Opening	±Y Variation for Average Opening	+X Maximum Variation for Opening	Resulting Maximum Individual Opening	Compliance Series		Inspection Series		Calibration Sieves		Typical Wire Diameter	Remissible Average Wire Diameter	
	U.S.	Supplementary Size					Sample Openings per 100 ft ²	Maximum Standard Deviation	Sample Openings per Sieve	Minimum Standard Deviation	Sample Openings per Sieve	Maximum Standard Deviation		Min	Max
1.4	No. 14	1.6	0.0630	0.047	0.17	1.77	250	0.070	25	0.051	50	0.054	0.80	0.68	0.92
			0.0555	0.042	0.16	1.56	400	0.084	40	0.050	80	0.062	0.71	0.60	0.82
1.18	No. 16	1.25	0.0492	0.038	0.15	1.40	400	0.058	40	0.045	80	0.047	0.63	0.54	0.72
			0.0469	0.036	0.14	1.32	400	0.058	40	0.043	80	0.045	0.63	0.54	0.72
1	No. 18	1.12	0.0441	0.034	0.14	1.26	400	0.054	40	0.042	80	0.054	0.56	0.48	0.64
			0.0394	0.030	0.13	1.13	400	0.050	40	0.039	80	0.040	0.48	0.40	0.54
850	No. 20	900	0.0354	27.5	118	1015	400	45.51	40	35.22	80	36.74	0.500	0.43	0.58
			0.0331	26.2	114	964	400	43.69	40	33.79	80	35.25	0.500	0.43	0.58
710	No. 25	800	0.0315	24.8	109	909	400	41.79	40	32.34	80	33.74	0.450	0.38	0.52
			0.0278	22.2	101	811	500	38.36	60	30.43	100	31.62	0.450	0.38	0.52
600	No. 30	630	0.0248	19.9	93	723	500	35.23	50	27.95	100	29.04	0.400	0.34	0.46
			0.0234	19.0	91	691	500	34.04	50	27.00	100	28.08	0.400	0.34	0.46
500	No. 35	560	0.0220	17.9	87	647	500	32.43	50	25.73	100	26.73	0.355	0.30	0.41
			0.0197	16.2	80	580	600	29.96	60	24.21	120	25.09	0.315	0.27	0.38
425	No. 40	450	0.0177	14.7	75	525	600	27.86	60	22.51	120	23.30	0.280	0.24	0.33
			0.0165	14.0	73	498	600	26.79	60	21.65	120	22.43	0.280	0.24	0.33
355	No. 45	400	0.0157	13.3	70	470	600	25.71	60	20.78	120	21.52	0.250	0.21	0.29
			0.0139	12.0	65	420	800	23.72	80	19.88	160	20.30	0.224	0.19	0.26
300	No. 50	315	0.0124	10.4	60	375	800	21.90	80	18.75	160	18.75	0.200	0.17	0.23
			0.0117	10.4	58	368	800	21.26	80	17.59	160	18.15	0.200	0.17	0.23
250	No. 60	280	0.0110	9.8	56	336	800	20.28	80	16.81	160	17.34	0.180	0.15	0.21
			0.0098	8.9	52	302	800	18.82	80	15.61	160	16.11	0.160	0.13	0.19
212	No. 70	224	0.0088	8.1	48	275	800	17.53	80	14.54	160	15.01	0.160	0.13	0.19
			0.0083	7.8	47	259	800	16.50	80	14.05	160	14.40	0.140	0.12	0.17
180	No. 80	200	0.0070	7.4	45	245	800	15.27	80	13.54	160	13.97	0.140	0.12	0.17
			0.0070	6.8	43	223	1000	13.65	100	12.01	200	13.28	0.126	0.106	0.150
150	No. 100	160	0.0063	6.3	40	200	1000	12.25	100	11.53	200	12.34	0.112	0.095	0.130
			0.0059	6.0	38	188	1000	11.46	100	10.66	200	11.85	0.100	0.085	0.115
125	No. 120	140	0.0055	5.7	37	177	1000	10.66	100	9.66	200	11.38	0.100	0.085	0.115
			0.0049	5.2	34	159	1000	9.45	100	9.00	200	10.63	0.080	0.077	0.104
105	No. 140	112	0.0044	4.8	32	144	1000	8.85	100	8.33	200	9.96	0.080	0.068	0.090
			0.0041	4.7	31	137	1000	8.29	100	7.58	200	9.65	0.071	0.060	0.082
90	No. 170	100	0.0039	4.5	30	130	1000	7.79	100	6.96	200	9.23	0.071	0.060	0.082
			0.0031	4.2	29	119	1000	7.24	100	6.30	200	8.78	0.060	0.052	0.072
75	No. 200	80	0.0028	3.9	27	107	1000	6.75	100	5.67	200	8.33	0.056	0.048	0.064
			0.0028	3.7	26	101	1000	6.25	100	5.07	200	8.04	0.050	0.043	0.058
63	No. 230	71	0.0025	3.6	25	95	1000	5.75	100	4.54	200	7.86	0.050	0.043	0.058
			0.0025	3.4	24	87	1000	5.25	100	4.04	200	7.31	0.045	0.038	0.051
53	No. 270	56	0.0022	3.2	22	78	1000	4.75	100	3.54	200	6.87	0.040	0.034	0.045
			0.0021	3.1	21	74	1000	4.25	100	3.04	200	6.37	0.036	0.031	0.041
45	No. 325	50	0.0017	3.0	21	71	1000	3.75	100	2.54	200	6.07	0.031	0.027	0.037
			0.0017	2.8	20	65	1000	3.25	100	2.04	200	5.67	0.026	0.022	0.031
38	No. 400	40	0.0016	2.7	19	59	1000	2.75	100	1.54	200	5.35	0.020	0.016	0.021
			0.0015	2.6	18	56	1000	2.25	100	1.04	200	5.00	0.016	0.013	0.018
30	No. 450	35	0.0014	2.6	18	54	1000	1.75	100	0.96	200	4.66	0.015	0.012	0.017
25	No. 500	25	0.0012	2.4	17	49	1000	1.50	100	0.86	200	4.35	0.010	0.008	0.011
20	No. 635	20	0.0010	2.2	15	40	1000	1.25	100	0.76	200	4.06	0.008	0.006	0.009
			0.0008	2.1	13	33	1000	1.00	100	0.66	200	3.74	0.006	0.005	0.008

^a Column 3—These numbers may only be approximate but are in use for reference and are not to be used for calculations.

^b Column 9 and 11—See Annex A.1, which specifies that all openings will be inspected for test sieves having 15 openings or less.

^c Column 9 and 11—These number of sample openings are listed on an 8-in. diameter test sieve.

3.1.3 Rizado o corrugado, n. la corrugación en el alambre de urdimbre y cierre o ambos. El engarzado en los cables se forma durante el proceso de uso o con una máquina prensadora antes de tejer. Si se forma durante el proceso de tejido, la tensión existente entre los alambres de urdimbre y de cierre determina fundamentalmente la cantidad o profundidad respectiva de engarce, que bloquea los cables en su lugar, y en parte establece el endurecimiento de la tela del tamiz.

3.1.4 Firmeza, n. un término subjetivo que se refiere a lo rígido y plano de tela tamiz (como un rollo bueno, no montado en una prueba marco del tamiz), establecido por la resistencia a la tracción del material, la relación de la malla con los diámetros de alambre, el tipo de tejido y cantidad de rizado en los cables. La ausencia de firmeza en tela tamizadora es denominada sordida

3.1.5 Tamiz de prueba combinada, n. Tamiz de prueba que reproduce el resultado de rendimiento de otro tamiz de prueba dentro de lo definido por el usuario, para los límites para un material designado (solo para información y puede no cumplir con esta especificación)

3.1.6 Malla o Criba, n. el número de cables, alambres o aberturas por línea -pulgadas (25,4 mm) cortadas desde el centro de cualquier cable hasta un punto exactamente a 1 pulgada (25,4 mm) de distancia, incluida la fracción distancia entre cualquiera de ellos.

3.1.7 Entramado de malla (tejido tafetán), n. Tela de criba en la que se colocan los alambres de urdimbre. Los cables de cierre pasan por encima y por debajo de uno en ambas direcciones.

3.1.8 Cerrado de entramado o cerrado de hilos, n. Los cables que corren en el camino corto o a lo largo de la tela como tejido (también conocido como brote, relleno o alambres de trama).

3.1.9 Tela del tamiz, n. Tela metálica tejida conforme a esta especificación.

3.1.10 Tamiz de Prueba (tela de tamiz), n. un aparato fabricado montando un tamiz E11 en un marco diseñado para su uso en el análisis del tamaño de partículas mediante tamizado.

3.1.10.1 Tamiz de prueba de cumplimiento, n. Un tamiz de prueba fabricado utilizando un tamiz que haya sido inspeccionado antes de ser montado en el marco del tamiz; y que cumpla con los requisitos de la Tabla 1, basada en parte en la desviación estándar de lo requerido para el número de aberturas para muestras por cada 100 pies cuadrados de tela tamizadora. Que (Columna 7) que no exceda el máximo permitido para un nivel de confianza del 66 % (columna 8).

3.1.10.2 Tamiz de prueba de inspección, n. Un tamiz de prueba fabricado utilizando un tamiz que haya sido inspeccionado después de su montaje, en el marco del tamiz; y que cumpla con los requisitos de la Tabla 1. En parte basado en la desviación estándar del número requerido de aberturas de muestra en el tamiz de prueba {Columna 9} que no exceda el máximo permitido para un nivel de confianza del 99 % (Columna 10).

3.1.10.3 Tamiz de prueba de calibración, n. Un tamiz de prueba fabricado utilizando un tamiz que haya sido inspeccionado después de su montaje en el marco o bastidor de tamiz; y que cumpla con los requisitos de la Tabla 1. En parte basado en la desviación estándar del número requerido de aberturas de muestra en el tamiz de prueba (Columna 11) que no excedan el máximo permitido para un nivel de confianza del 99,73 % (Columna 12).

(1) **Discusión.** Los tamices de calibración han tenido al menos dos veces tantas aberturas medidas como tamices de inspección.

3.1.11 Tejido (diagonal) de sarga, n. La tela tamiz en la que se colocan los alambres de urdimbre o tejido y los cables de cierre pasan por encima de dos y por debajo de dos cables en ambas direcciones.

3.1.12 Alambres de urdimbre o tejido, n. Los cables que recorren el largo camino de tela tejida

4 INFORMACIÓN DE PEDIDO

4.1 Los pedidos de artículos bajo esta especificación deben incluir la siguiente información según sea necesario:

4.1.1 Descripción del(los) artículo(s) (tamiz de prueba o tela tamiz)

4.1.2 ASTM E11 designación y año de emisión

4.1.3 Cantidad de cada artículo, y

4.1.4 Designación del tamiz (Tabla 1, Columna estándar a, Columna alternativa 2).

4.1.4.1 Los sistemas de prueba se pueden suministrar en función de diferentes niveles de confianza como tamices de cumplimiento, tamices de inspección y tamices de calibración

4.2 Tamices de prueba en marco circular estándar o no estándar

4.2.1 Diámetro nominal del marco del tamiz (ver Tabla 2) o descripción dimensional del marco del tamiz de prueba no estándar. Y

4.2.2 Altura nominal del marco del tamiz (ver Tabla 2).

5 Requisitos de tela tamiz

5.1 La **tela de tamiz** utilizada en los tamices de prueba deberá cumplir con los requisitos de la Tabla 1 y deberá denominarse Tela de tamiz Especificación E11. El número de aberturas inspeccionadas deberá estar de acuerdo con la Tabla 1 (Columna 7). La tela tamiz que cumpla con esta especificación deberá estar tejida de acero inoxidable, latón o bronce. La tela tamiz con aberturas mayores o iguales a 75 micrómetros se tejerá en ligamento tafetán. Para telas de tamiz con aberturas iguales o inferiores a 71 micrómetros, la tela de tamiz se puede suministrar con tejido de sarga. La tela del tamiz no deberá estar revestida ni chapada.

5.2 Todas las **mediciones de las aberturas** y los **diámetros de los cables** se realizarán a lo largo de los puntos medios de las aberturas como se muestra en la Figura 1.

5.3 No habrá **perforaciones ni defectos** evidentes en la tela del tamiz.

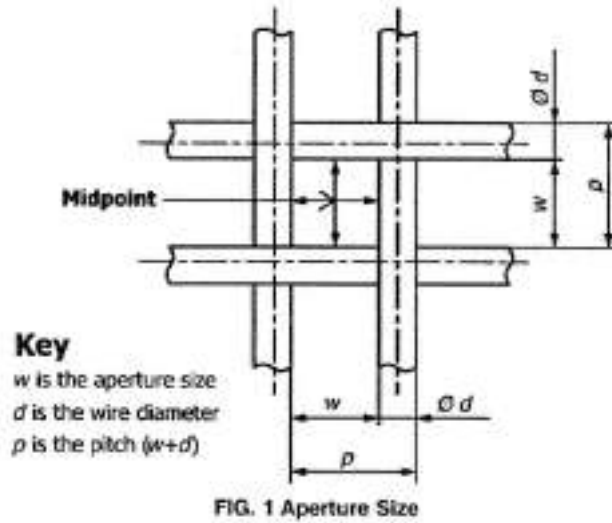
TABLE 2 Dimensions of Standard Frames

Nominal Diameter, in.	Diameter Tolerance, in. (mm)	Typical Frame ^a
	Inside at Top ^b	Nominal Height, in. (mm)
3	3.000 + 0.030/-0.000 (76.2 + 0.76/-0.00)	1¼ (31.8) FH ^c ¾ (15.8) HH
6	6.000 + 0.030/-0.000 (152.4 + 0.76/-0.00)	1¾ (44.5) FH 1 (25.4) HH
8	8.000 + 0.030/-0.000 (203.2 + 0.76/-0.00)	2 (50.8) FH 1 (25.4) HH
10	10.000 + 0.030/-0.000 (254 + 0.76/-0.00)	3 (76.2) FH 1½ (38.1) HH
12	12.000 + 0.030/-0.000 (304.8 + 0.76/-0.00)	3¼ (82.6) FH 2 (50.8) HH 1¾ (41.3) HH

^a Frame height measured from top of frame to top of sieve cloth.

^b Measured 0.2 in. (5 mm) below the top of the frame.

^c FH = full height; HH = half height; IH = intermediate height.



6 Requisitos técnicos

6.1 Tamaños de apertura, tolerancias y desviación estándar:

6.1.1 Se aplicarán cuatro tolerancias: la variación para apertura media (1.), la variación máxima (X), la máxima desviación estándar y el diámetro promedio del alambre. La apertura. Las tolerancias se aplican al tamaño de la abertura medido en el punto medio de la abertura (ver Fig. 1) y se aplican por separado en ambas las direcciones de deformación y cierre.

6.1.2 El tamaño promedio de la abertura no debe exceder el tamaño del tamiz designación por más de $\pm Y$ (Tabla 1, Columna 4):

$$Y = \left(\frac{w^{0.98}}{24} + 1.6 \right) 0.9$$

donde Y y w se expresan en micrómetros.

6.1.3 El tamaño máximo de abertura medido no excederá el tamaño de abertura nominal w (Tabla 1, Columna 1) en más de X (Tabla 1, Columna 5):

$$X = \left(\frac{2w^{0.75}}{3} + 4w^{0.25} \right) 0.9$$

donde X y w se expresan en micrómetros.

6.1.4 El valor intermedio Z se indicará como sigue:

$$Z = \frac{X + Y}{2}$$

6.1.5 La desviación estándar máxima se calcula en función de una curva de distribución normal gaussiana (ver Apéndice X5), truncado en el extremo izquierdo en 0 y en el extremo derecho en $w + X$. El área bajo la curva al valor máximo $w + X$ menos el área bajo la curva al valor intermedio Z , es igual a esta área crítica entre $(w + Z)$ y $(w + X)$ que no exceda más del 5 % de las aperturas (ver Apéndice X2). Las tolerancias para sigma luego se calculan basándose en:

$$\frac{\Phi\left(\frac{X}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{Z}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{X}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-w}{\sigma}\right)} = 0.05 \text{ Ver apéndice X4}$$

y los resultados se dan en la Tabla 1 para el tamiz de cumplimiento de tela metálica (Columna 8).

6.1.5.1 Para aumentar la probabilidad o aceptación nivel de confianza del 66% en un sigma a $X\sigma$, específicamente 99% (2.58σ) y 99.73 % (3σ) para Inspección y Calibración de tamices respectivamente. Estos valores máximos de desviación estándar se determinan dividiendo sigma por una corrección o factor K . Estos factores K se determinan basándose en la aproximación a un Distribución de chi cuadrado para la varianza de muestra de la siguiente manera

$$K = 1 + \frac{X\sigma}{\sqrt{2(n-1)}}$$

6.1.5.2 Los factores K resultantes aplicables (ver Apéndice ver aapéndice X3) se aplican y se calcula la desviación estándar máxima. Las tolerancias se determinan de la siguiente manera:

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{K}$$

6.1.5.3 Las tolerancias resultantes se dan en la Tabla 1 para los Tamices de inspección (columna 10) y tamices de calibración (Columna 12), y se presentan por conveniencia en función de los Factores K por el número mínimo requerido de aperturas.

6.1.6 La desviación estándar real de las aberturas en las direcciones de la urdimbre y trama, cuando se toman por separado, no deben exceder los valores mostrados en la Tabla 1 para cada tipo. Si el número de aberturas de muestra es inferior a 15, el estándar máximo de la desviación no se evalúa. Si es mayor que el número mínimo de aberturas que se miden, la desviación estándar máxima se calculará (ver Ec. 5) en base al correspondiente Cálculo del factor K (ver Ec. 4)

6.1.6.1 Se obtiene la desviación estándar poblacional o midiendo todas las aberturas completas si se encuentran en el tamiz de prueba y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (w_t - \bar{w})^2}$$

6.1.6.2 La desviación estándar muestral s se calcula a partir de la medida del número de aperturas, n como se indica en Tabla 1 (Columna 8 para Tela tamiz, Columna 10 para Inspección Tamices y columna 12 para la calibración del tamiz), utilizando la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (w_i - \bar{w})^2}$$

6.2 Diámetros de alambre

6.2.1 Los diámetros del alambre indicados en la Tabla 1, Columna 13 son Típicos.

6.2.2 El diámetro medio del alambre en un tamiz de prueba o en una tela de tamiz caerá entre la tolerancia (d min y d max) dada en Tabla 1, Columna 14 y 15. respectivamente. Se reconoce que la deformación mecánica del alambre se produce durante el tejido y por lo tanto el diámetro medido después del tejido puede ser diferente al diámetro del alambre antes de tejer. El promedio del diámetro del alambre se calculará basándose en el mismo número de aperturas de muestra medidas de acuerdo con la Tabla 1.

6.2.3 Los alambres se engarzarán de tal manera que la tela presenta firmeza, según lo acordado entre el usuario y el proveedor, tal como se aplica a las telas metálicas en rollo.

6.3 Marcos de tamiz de prueba.

6.3.1 *Requisitos generales:* los marcos para los tamices de prueba deben construirse de tal manera que sea rígido. La tela del tamiz deberá montarse sobre una base sin holgura distorsionadora, u ondulación. El método utilizado para unir la tela tamiz al marco se hará de modo que el material que se tamiza no se quedar atrapado en la junta entre la tela del tamiz y el marco.

6.3.2 *Los marcos de tamices* estándar deberán ser circulares. Los tamaños típicos de los marcos son 3 pulg., 6 pulg., 8 pulg., 10 pulg. y 12 pulg. de diámetro (o 76, 152, 203, 254 o 305 mm). Tolerancias para las dimensiones de los marcos de los tamices de prueba se dan en la Tabla 2. Los Marcos deberá ser un material no corrosivo como latón o acero inoxidable. La parte inferior del marco se construirá de manera que pueda proporcionar

un ajuste fácil de deslizar o encajar con cualquier marco de tamiz del mismo diámetro nominal conforme a lo especificado en las dimensiones.

6.3.3 La junta o filete en el punto donde se coloca la tela tamiz y el encuentro del marco proporcionará una superficie de tamizado mínima y transparente con diámetro igual al diámetro nominal, menos 0,5 pulg. (13 mm) en marcos de hasta 8 pulg. (inclusive), y 1,0 pulg. (25 mm) en marcos de más de 8 pulgadas.

6.4 Tamices de prueba no estándar

6.4.1 *Marcos no estándar.* Se pueden utilizar otros marcos de tamiz como cuadrado, rectangular, circular. o no metálico. El marco puede tener la tela del tamiz permanentemente adherida, o puede ser diseñado para que la tela del tamiz sea reemplazable. Las disposiciones de 6.3.1 se aplican. Los tamices de prueba no estándar pueden certificarse de conformidad con la Sección 7.

6.4.2 *Tamices con tela de respaldo.* Las especificaciones de tela o malla pueden variar según el fabricante del tamiz de prueba. El uso de un paño de respaldo afectará el rendimiento del tamiz. Los tamices de prueba con tela de soporte sólo se pueden suministrar como Tamices de conformidad.

7 Tamiz de prueba y documentación de tela de tamiz y proceso de dar una certificación

7.1 Documentador de la medición de las aberturas en la tela tamiz debe garantizar que el tamiz de prueba sea rastreable y certificable. Todos los certificados de tamiz de prueba deben ser rastreables por el número de serie del tamiz de prueba. Los tamices de inspección y calibración deben incluir también la fecha, nombre y firma de la persona, certificando a la prueba la calidad del tamiz.

7.2 Los tamices de prueba se pueden suministrar como Cumplimiento, Inspección, o Tamices de calibración.

4. Relaciones volumétricas y Gravimétricas de los suelos.

DEFINICIONES: lo suelto o lo compacto de una muestra de suelo puede determinarse cuantitativamente en el laboratorio. Los términos porosidad, relación de vacíos y el peso específico relativo de los sólidos se usan comúnmente para definir la densidad de la muestra. La figura 1.3 es un diagrama de una muestra de suelo en un recipiente sellado, con el aspecto que presentaría si fuera posible separar las fases sólida, líquida y gaseosa. El volumen de sólidos se designa por el símbolo de V_s , el volumen de agua por V_w , y el volumen de gas por V_g .

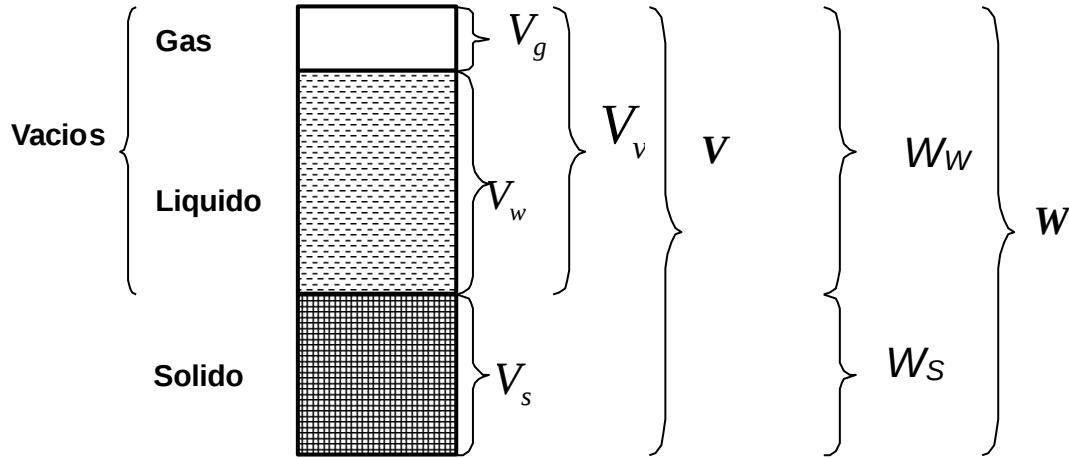
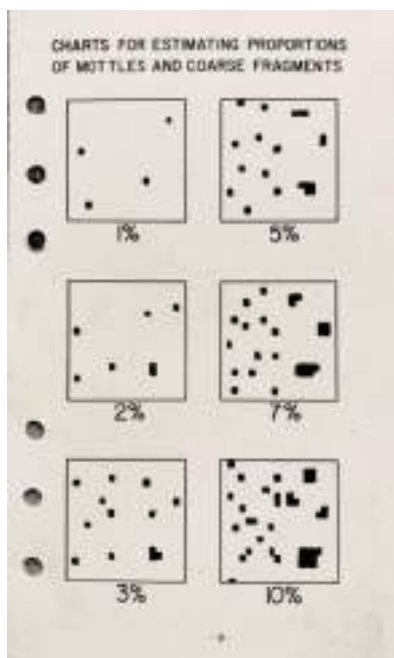
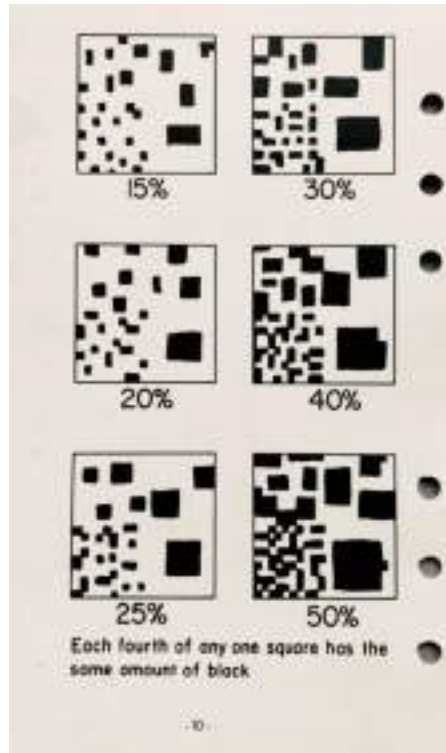


Fig. 1.3 Diagrama de una muestra de suelo que ilustra el significado de los símbolos usados en las relaciones Gravimétricas y volumétricas.

Como la relación entre V_g y V_w cambia usualmente con las condiciones del agua en el subsuelo, así como bajo el efecto de las cargas aplicadas, es conveniente designar todo el volumen que no está ocupado por material sólido como volumen de vacíos, V_v . Si se designa el volumen total de la muestra por V , entonces la *porosidad* se defina con la ecuación:

$$\text{Porosidad, } n = V_v / V \quad 1.1$$





Munsell soil color charts. Gretagmacbeth, NY, USA; 2000.

Usualmente, este valor se expresa como porcentaje. Cuando un suelo se comprime, cambian los valores de la ecuación anterior tanto del numerador como del denominador, por lo que es conveniente en muchos de los cálculos que es necesario efectuar para determinar los asentamientos, referir el espacio vacío a un denominador invariable. Por esta razón se usa la cantidad conocida como *relación de vacíos u oquedad*. Se define como:

$$\text{Relación de vacíos, } e = V_v / V_s$$

1.2

Una de las propiedades índice más importantes de los suelos finos es el contenido de agua o *humedad*, w . Se define como:

$$\text{Humedad, } w(\%) = 100W_w / W_s$$

1.3

En esta ecuación, W_w es el peso del agua y W_s es el peso de la materia sólida secada en el horno. El peso de agua se refiere a la cantidad invariable W_s en vez de al peso total de la muestra. Al aumentar la temperatura de una mezcla de suelo y agua que se está secando, la mezcla continúa perdiendo humedad, hasta que a una temperatura relativamente elevada, los minerales que constituyen el suelo se descomponen y pierden el agua de constitución.

Por está razón, las comparaciones de humedades no tienen significado, a menos que la temperatura estándar del horno es de 105° a 115°C.

Muchos de los suelos que se encuentran abajo del nivel de agua freática y algunos suelos finos que están arriba del mismo, se encuentran saturados. Sin embargo, los vacíos de la mayor parte de los suelos que están arriba del nivel de agua freática están en parte de agua y en parte de aire. Incluso algunos de los suelos sumergidos tienen una proporción importante de aire o de gas. El *grado de saturación* se define como:

Grado de saturación,

$$S_r (\%) = 100V_w / V_v$$

1.4

Por lo tanto, cuando el grado de saturación es de 100 por ciento todo el espacio vacío está lleno de agua.

El peso por unidad de volumen o *peso volumétrico* γ es una de las propiedades físicas más importantes de un suelo. Por ejemplo, deberá conocerse para poder calcular la presión de tierra o la producida por sobrecargas.

Por definición:

$$\text{Peso volumétrico, } \gamma = W / V$$

1.5

en la que W es el peso total. Es conveniente indicar los valores especiales del peso volumétrico por medio de subíndices. Si el suelo está completamente saturado, es decir, si $V_g = 0$ su peso volumétrico se designa por γ_{sat} . Si el suelo está secado en el horno, su peso se indica con γ_d , llamándose peso volumétrico seco y se defina.

$$\text{Peso volumétrico, } \gamma_d = W_s / V$$

1.6

Si se conoce la humedad, puede calcularse el peso volumétrico seco de la siguiente manera:

$$\gamma_d = \frac{100W}{(100 + w)V} = \frac{100\gamma}{100 + w}$$

1.6^a

En estudios de comparación de suelos en ocasiones es útil calcular el peso volumétrico seco que hubiera obtenido, si se hubiera disminuido el volumen de una muestra húmeda, expulsando el aires hasta que el grado de saturación de la muestra llegara al 100 por ciento. A este estado se le designa *exento de huecos con aire*. Este peso volumétrico puede calcularse con la expresión: El peso volumétrico del suelo seco exento de huecos con aire,

$$\gamma_z = \frac{W_s}{V_w + V_s}$$

1.7

En la practica, con frecuencia es inconveniente determinar directamente el valor de γ , midiendo el peso total y el volumen total. Es más común determinarlo indirectamente basándose en el conocimiento del peso volumétrico de los componentes sólidos γ_s . Esta cantidad se define como:

Peso unitario de los componentes sólidos,

$$\gamma_z = W'_s + V_s$$

1.8

Frecuentemente, es preferible utilizar el peso específico relativo de los sólidos G , definidos como:

Peso específico relativo de los sólidos,

$$G = \gamma_s / \gamma_w$$

1.9

donde γ_w es el peso volumétrico del agua tomado con 1 g/cm^3 . El valor de γ_s o G pueda determinarse por pruebas en el laboratorio, pero puede estimarse usualmente con suficiente precisión. Para cálculos de rutina, puede tomarse como 2.65 el valor de G para las arenas. Las pruebas efectuadas en gran número de suelos de arcilla han indicado que el valor de G usualmente está comprendido en el intervalo de 2.5 a 2.9 con un valor promedio de 2.7.

La tabla 1.3 proporciona el peso específico relativo de los sólidos de los componentes de los suelos más importantes. Puede ayudar a estimar el valor de G para un suelo de composición mineralógica conocida.

En la tabla 1.4 se da una lista de los valores típicos de la porosidad, relación de vacíos, y de pesos volumétricos de varios suelos.

Densidad del agregado del suelo. En el comportamiento del suelo influye mucho lo suelto o lo compacto de su estructura. Sin embargo, es necesario señalar una diferencia a este respecto entre los suelos de grano grueso sin cohesión y los materiales cohesivos. En una masa de suelo de grano grueso, la mayor parte de los granos tocan a otros, produciendo contactos de punto a punto, y esfuerzos que se hagan para compactar la masa pueden reducir la relación de vacíos solamente por el reacomodo de las partículas o por su ruptura. Por otra parte, la densificación de los suelos finos, especialmente de la arcilla, dependen

Tabla 1.3 Peso específico relativo de los más Importantes Componentes^a del suelo.

Yeso	2.32	Dolomita	2.87
Montmorillonita	2.65-2.80	Aragonita	2.94
Ortoclasa	2.56	Biotita	3.0-3.1
Caolinita	2.6	Augita	3.2-3.4
Illita	2.8	Hornblenda	3.2-3.5
Clorita	2.6-3.0	Limonita	3.8
Cuarzo	2.66	Hematita, hidratada	4.3
Talco	2.7	Magnetita	5.17+-
Calcita	2.72	Hematita	5.2
Muscovita	2.8-2.9		

Tabla 1.4 Porosidad, Relación de vacíos, y peso volumétrico de suelos típicos en Estado Natural

Descripción	Porosidad (n)	Relación de Vacíos	Humedad (w) ^a	Peso volumétrico			
				g/cm^3		lb/ pie^3	
				γ_d^b	γ_{sat}^c	γ_d	γ_{sat}
1. Arena uniforme, suelta	0.46	0.85	32	1.43	1.89	90	118
2. Arena uniforme, compacta	0.34	0.51	19	1.75	2.09	109	130
3. Mezclas de arena, sueltas	0.40	0.67	25	1.59	1.99	99	124
4. Mezclas de arena, compacta	0.30	0.43	16	1.86	2.16	116	135
5. Limo eólico (loes)	0.50	0.99	21	1.36	1.86	85	116
6. Morrena, granos muy mezclados	0.20	0.25	9	2.12	2.32	132	145
7. Arcilla glacial blanda	0.55	1.2	45	1.22	1.77	76	110
8. Arcilla glacial dura	0.37	0.6	22	1.7	2.07	106	129
9. Arcilla blanda con poca mat. Orgánica	0.66	1.9	70	0.93	1.58	58	98
10. Arcilla blanda con mucha mat. Orgánica	0.75	3.0	110	0.68	1.43	43	89
11. Arcilla blanda montmorillonítica (bentonita cálcica)	0.84	5.2	194	0.43	1.27	27	80

^a w = humedad para suelos saturados del peso del material seco

^b γ_d = peso volumétrico seco

^c γ_{sat} = peso volumétrico saturado

de otros factores como la cohesión y la presencia de películas de agua sobre las superficies de las partículas.

La relación de vacíos o la porosidad de cualquier suelo usualmente no proporcionan de por sí una indicación directa de su comportamiento cuando se carga o cuando se excava. De dos suelos gruesos que tengan la misma relación de vacíos, uno puede estar muy compacto mientras que el otro puede estar suelto. Por lo tanto, la

compacidad relativa de un material grueso es más importante que la sola relación de vacíos. La compacidad puede expresarse numéricamente por la *Compacidad Relativa* I_d , que se define como:

$$\text{Compacidad Relativa, } I_d = \frac{e^{\text{máx}} - e}{e^{\text{máx}} - e^{\text{mín}}} \quad 1.10$$

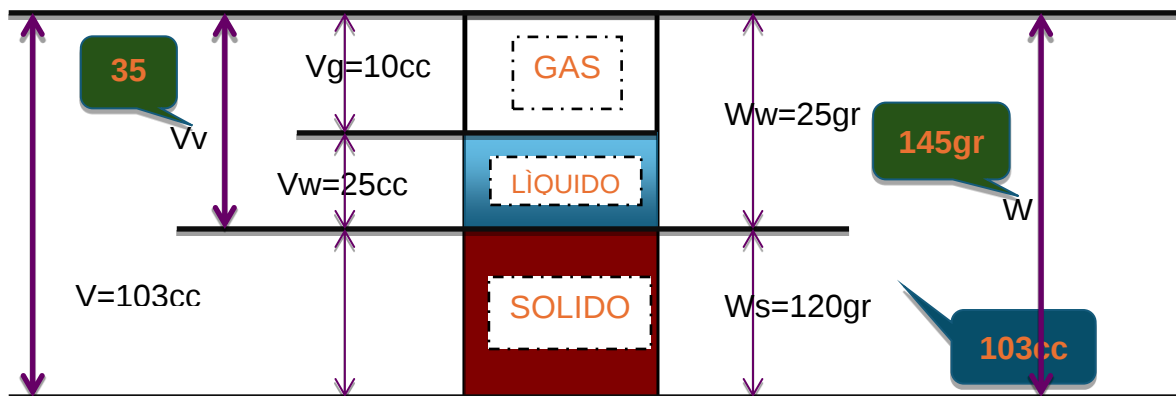
en la que $e^{\text{máx}}$ es la relación de vacíos del suelo en su estado más suelto; e es la relación de vacíos real; y $e^{\text{mín}}$ es la relación de vacíos en el estado más compacto posible. Por tanto, $I_d = 1.0$ para los suelos muy sueltos.

En la práctica, la Compacidad Relativa de los suelos granulares usualmente se juzga de manera indirecta mediante pruebas de penetración o de carga, porque la medida directa de la relación de vacíos en el campo no resulta práctica. Sin embargo, si se conoce e , pueden determinarse los valores de $e^{\text{máx}}$ y $e^{\text{mín}}$ en el laboratorio. El estado más suelto generalmente puede obtenerse permitiendo que el material pulverizado y seco caiga en un recipiente desde embudo sostenido de manera que la caída libre sea aproximadamente de 1.3 cm. Si el material es limoso, puede lograrse que quede más suelto permitiéndole que se asiente en agua. El estado más denso generalmente puede obtenerse apretando el suelo dentro de un recipiente por medio de una combinación de presión estática y vibración o, en algunas ocasiones, “haciendo llover” la arena desde una altura que permita que el impacto de los granos al caer compacte la capa superficial.

Los procedimientos estándar de la ASTM describen varios medios de producir el $e^{\text{mín}}$. Ya que distintos procedimientos conducen a diferentes relaciones de vacíos en los diversos materiales, los valores numéricos de $e^{\text{máx}}$ y de $e^{\text{mín}}$, no siempre pueden determinarse definitivamente. En consecuencia, el valor de I_d queda algo indeterminado y debe acompañarse de descripciones de la manera que se empleó para determinar $e^{\text{máx}}$ y $e^{\text{mín}}$.

EJEMPLOS DE RELACIONES POR PESO POR VOLUMEN DE SUELOS

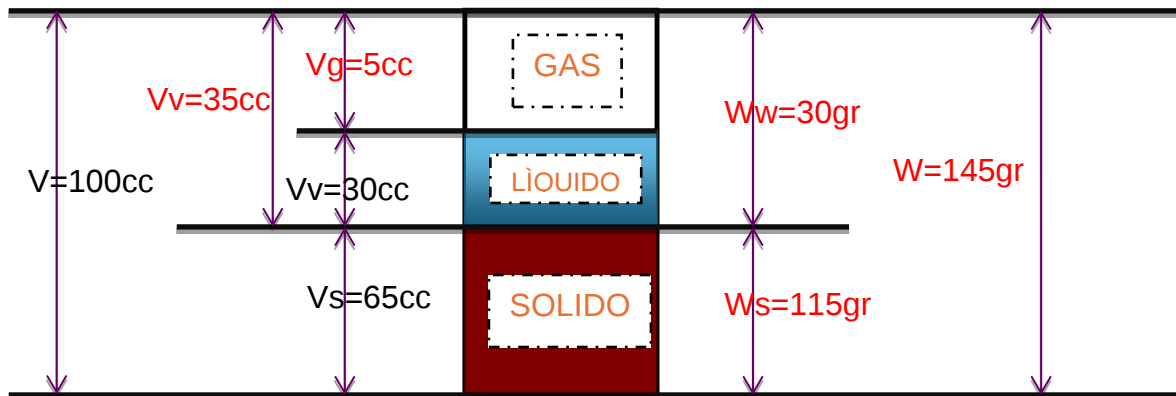
EJEMPLO1, sea el siguiente diagrama



Entonces

1. $V_v = V_g + V_w = 10 + 25 = \mathbf{35cc}$
2. $V = V_v + V_s = V_g + V_w + V_s = 35 + 68 = \mathbf{103cc}$
3. $W_v = W_w = \mathbf{25gr}$
4. $W = W_w + W_s = W_v + W_s = 25 + 120 = \mathbf{145gr}$
5. Peso volumétrico $= \gamma = W/V = 145gr/103cc = \mathbf{1.41 \text{ gr/cc}}$
6. Peso volumétrico seco $= \gamma_d = W_s/V = 120gr/103cc = \mathbf{1.17 \text{ gr/cc}}$
7. Humedad $= H\% = 100W_w/W_s = 100 \times 25/120 = \mathbf{21\%}$
8. Grado de saturación $= S\% = 100V_w/V_v = 100 \times 25/35 = \mathbf{71\%}$
9. Relación de vacíos $= e = V_v/V_s = 35/68 = \mathbf{0.51}$
10. Porosidad $= \eta = V_v/V = 35/103 = \mathbf{0.34}$

EJEMPLO2, se tiene un suelo con una densidad o peso volumétrico de 1.45 gr/cc, un peso volumétrico seco de 1.15 gr/cc, con un volumen seco o de suelo de 65cc y 30 cc de agua. Calcule las relaciones por peso y por volumen.

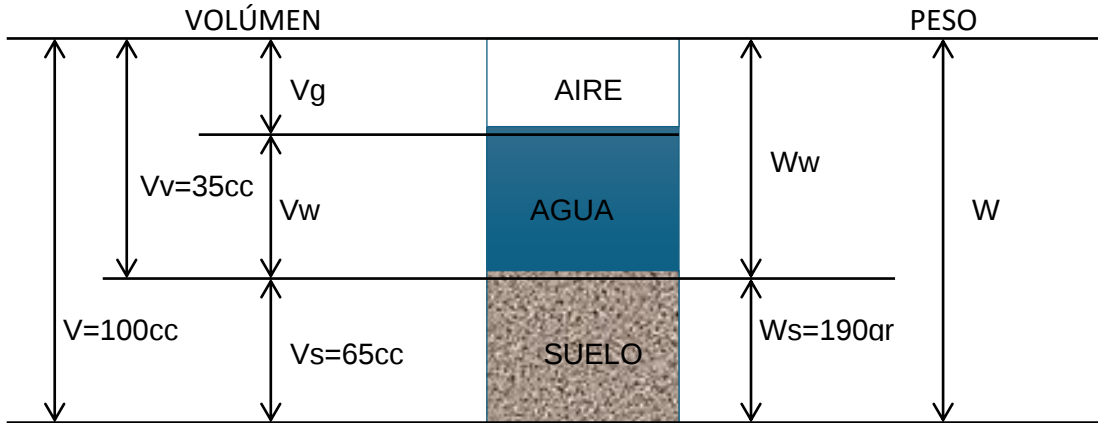


Por cada 100cc de volumen de suelo se tiene

1. $\gamma_{100} = 1.45gr/cc \times 100cc = \mathbf{145 \text{ gr} = W}$, si $V = 100cc$
2. $\gamma_{d100} = 1.15gr/cc \times 100cc = \mathbf{115 \text{ gr} = W_s}$, si $V = 100cc$
3. $W_w = W - W_s = 145 - 115 = \mathbf{30gr = W_w}$
4. $V_g = V - V_s - V_w = 100 - 65 - 30 = \mathbf{5cc = V_g}$
5. $V_v = V_g + V_w = 5 + 30 = \mathbf{35cc = V_v}$
6. Humedad $= H\% = 100W_w/W_s = 100 \times 30/115 = \mathbf{26\%}$
7. Grado de saturación $= S\% = 100V_w/V_v = 100 \times 30/35 = \mathbf{86\%}$
8. Relación de vacíos $= e = V_v/V_s = 35/65 = \mathbf{0.54}$
9. Porosidad $= \eta = V_v/V = 35/100 = \mathbf{0.35}$

EJEMPLO 3 Se tiene un suelo con porosidad de 0.35, un peso volumétrico seco de 1.90 gr/cc y relación de vacíos de 0.54. Si la humedad es del 15%

- a. ¿Qué grado de saturación hay?
- b. ¿Qué peso volumétrico?



Entonces si el peso volumétrico seco (γ_s) es de 1.90 gr/cc, con un volumen total de $100\text{cc} = V$, se tiene un peso de sólido de $190\text{gr} = W_s$.

Porosidad $n = V_v/V = 0.35 = V_v/100 \rightarrow V_v = 35\text{cc}$

Relación de vacíos $e = 0.54 = V_v/V_s \rightarrow 35/V_s = 0.54 \rightarrow V_s = 65\text{cc}$

Si el porcentaje de humedad es 15%, $W(\%) = 0.15 = W_w/W_s \rightarrow 0.15 \times 190$

$W_w=29\text{gr}$, si densidad de agua es $1\text{gr/cc} \rightarrow V_w=29\text{cc}$

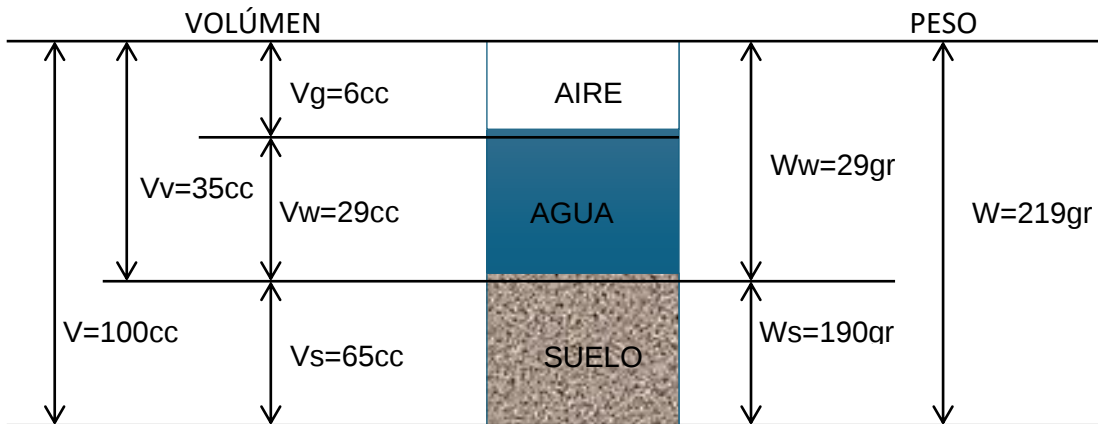
$W=W_w+W_s = 29\text{gr} + 190\text{gr} = 219\text{gr}$

$V_v=V_w + V_g \rightarrow V_v - V_w = 35 - 29 = 6\text{cc}$, o $V=V_s+V_w+V_g \rightarrow V-V_s-V_w=V_g = 100-65-29 = 6\text{cc}$

Respondiendo a las preguntas:

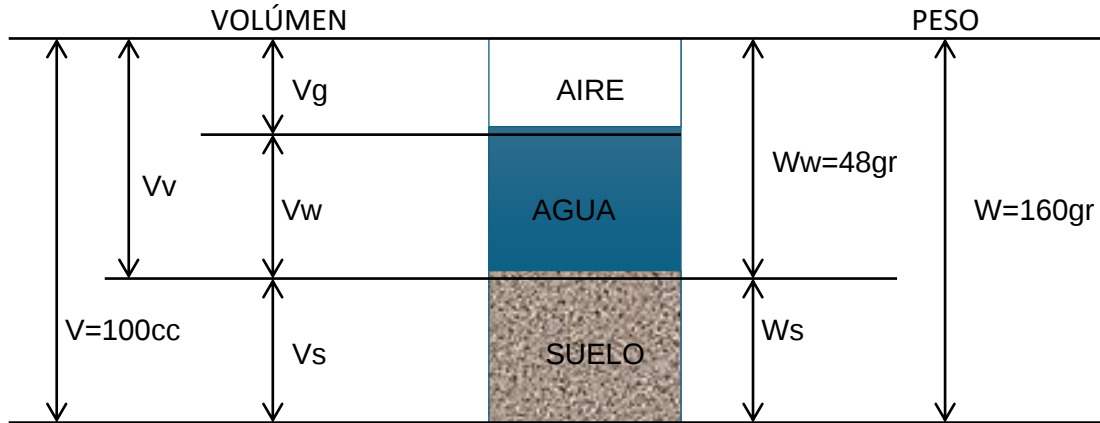
a. Grado de saturación $S(\%) = 100 \times (29/35) = 83\%$

b. Peso volumétrico $\gamma = W/V = 219\text{gr}/100\text{cc} = 2.19 \text{ gr/cc}$



EJEMPLO 4. Sea el siguiente suelo con una humedad del 30%, un peso unitario seco de 1.60 gr/cc, una saturación del 80% y 48 gr de agua.

- ¿Qué porosidad hay?
- ¿Qué relación de vacíos?
- ¿Qué peso unitario seco?



Si el peso unitario seco es de 1.60 gr/cc, por comodidad un peso total de la muestra de 160 gr = W y un volumen total de muestra de 100 cc = V.

Sea $W_w = 48 \text{ gr}$ y densidad del agua 1 gr/cc, implica $V_w = 48 \text{ cc}$.

Con $S(\%) = 80 = 100(V_w/V_v) \rightarrow 0.8 = 48/V_v \rightarrow V_v = 60 \text{ cc}$.

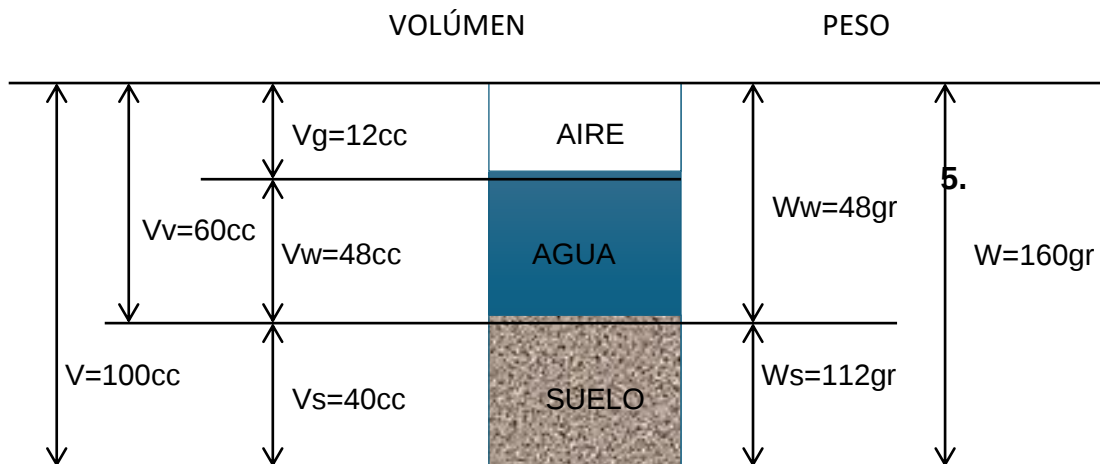
$V_s = 100 - 60 = 40 \text{ cc}$.

$V_g = 60 - 48 = 12 \text{ cc}$.

$W_s = 160 - 48 = 112 \text{ gr}$

Respondiendo a las preguntas:

- Porosidad (η) = $60/100 = 0.60$
- Relación de vacíos (e) = $60/40 = 1.5$
- Peso unitario seco (γ_s) = $112 \text{ gr}/100 \text{ cc} = 1.12 \text{ gr/cc}$



Estructura y consistencia de los suelos

Límites de Atterberg. Si el contenido de agua de una suspensión espesa de arcilla se reduce gradualmente, la mezcla de arcilla y agua pasa del estado líquido al estado plástico y, finalmente, al estado sólido.

Se ha encontrado que los contenidos de agua correspondientes a las transiciones de un estado a otro usualmente son diferentes en las arcillas que tiene propiedades

físicas diferentes cuando se han remoldeado, y son aproximadamente iguales en las arcillas que tienen propiedades físicas semejantes.

Por lo tanto, las fronteras entre los estados de consistencia pueden servir como propiedades índices, útiles en la clasificación de las arcillas.

El significado de los contenidos de agua que sirven de límite para cada estado físico fue sugerido por primera vez por A. Atterberg en 1991. Por lo tanto, estos límites se conocen comúnmente como *límites de Atterberg*, y las pruebas para determinarlos se llaman determinación de los *límites de Atterberg*. En la realidad, al pasar la mezcla de suelo y de agua de un estado a otro, no se produce un cambio brusco en las propiedades físicas. Por lo tanto, las pruebas de los límites son pruebas empíricas, que se ha adoptado para definir los valores de los mismos.

Arriba del límite líquido w_L , el sistema de suelos y agua es una suspensión. Abajo del límite líquido y arriba del *límite plástico* w_p , el sistema de suelo y agua se dice que está en estado plástico. En este estado, el suelo puede deformarse o remoldearse sin la formación de grietas y sin que cambie de volumen. La amplitud de variación de la humedad en la cual el sistema se comporta como material plástico se llama frecuentemente *intervalo plástico*, y la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico se le llama *índice de plasticidad* I_p (con frecuencia se designa **PI**):

$$\text{Índice de plasticidad, } I_p = W_l - W_p$$

1.11

Algo abajo del límite plástico, el sistema de agua y suelo llega al *límite de contracción* W_s . La reducción de la humedad del suelo por secado abajo del límite de contracción no se acompaña de disminución de volumen; por el contrario, el aire entra en los huecos del sistema y el material se convierte en no saturado.

Los límites de Atterberg varían con la proporción de arcilla en el suelo, con el tipo de mineral arcilloso, y con la naturaleza de los iones adsorbidos en la superficie de la arcilla. Ya se dijo en el Art. 3 que las diferencias en la estructura atómica de los minerales arcillosos producen diferencias en las cargas eléctricas que están en las superficies de la arcilla. La existencia de estas cargas la indica la capacidad de las arcillas para adsorber iones de la solución. Los cationes (iones positivos) son más fácilmente absorbidos que los aniones (iones negativos); por lo tanto, las cargas negativas deben predominar en las superficies de la arcilla. Un catión, como Na^+ , es fácilmente atraído a la superficie de la arcilla. Sin embargo, el ion adsorbido de Na^+ no se une permanentemente; y pueden reemplazarlo iones de K^+ , si la arcilla se coloca en una solución de cloruro de potasio KCl. Al proceso por el que se reemplaza el catión en exceso se le llama *intercambio catiónico*.

+La capacidad de cambio de cationes de los diferentes tipos de minerales arcillosos, puede medirse lavando una muestra de cada uno de ellos en una solución de una sal que comúnmente no se encuentre en estado natural, como el cloruro de amonio NH_4Cl , y determinando la cantidad adsorbida de NH_4^+ , midiendo la diferencia entre la concentración original y final de la solución de lavado.

Conviene expresar la capacidad de intercambio catiónico en función del número de pesos equivalentes de un ion adsorbido por 100 g de mineral arcilloso, ya que este factor es independiente del peso de cada ion adsorbido y del número de cargas que se le asocian.

En la tabla 1.5 se dan los intervalos típicos de capacidades de intercambio catiónico de varios minerales arcillosos.

Tabla 1.5	
Capacidad de Intercambio Catiónico de los Minerales de la Arcilla	
Mineral de la Arcilla	Capacidad de Intercambio Catiónico en Miliequivalentes por 100 g
Caolinita	3-15
Illita	10-40
Montmorillonita	70-100

La tabla 1.6 indica que las montmorillonitas son aproximadamente 10 veces más activas para adsorber cationes que las caolinitas. Por lo tanto, se requiere una cantidad mucho menor de montmorillonita que de caolinita para impartir las propiedades típicas de una arcilla a un suelo que tenga granos mezclados.

Aunque la facultad de adsorber agua en la superficie de un mineral arcilloso varía en el mismo orden que su capacidad de intercambio, también la afecta el tipo de cationes presentes. Por lo tanto, hay ciertas correlaciones entre las propiedades del sistema suelo-agua, tales como los límites de Atterberg, el tipo de mineral arcilloso, y la naturaleza de los iones adsorbidos. La tabla 1.6 presenta el límite líquido y el índice de plasticidad de diferentes minerales de arcilla con distintos iones adsorbidos. Comparando las tablas 1.5 y 1.6 se ve que existe realmente una correspondencia entre la capacidad de intercambio catiónico de una arcilla y sus propiedades con respecto a su humedad, medida por los límites de Atterberg. Resulta También evidente que cuanto mayor es la capacidad de intercambio de cationes de una arcilla, mayor será el efecto al intercambiar el catión adsorbido.

Tabla 1.6 Valores de los Límites de Atterberg de los Minerales de la Arcilla con Varios Cationes Adsorbidos

Cación	Na^{+}		K^{+}		Ca^{++}		Mg^{++}	
	W_L	I_P	W_L	I_P	W_L	I_P	W_L	I_P
Mineral de la arcilla:								
Caolinita	29	1	35	7	34	8	39	11
Illitita	61	27	81	38	90	50	83	44
Montmorillonita	344	251	161	104	166	101	158	99

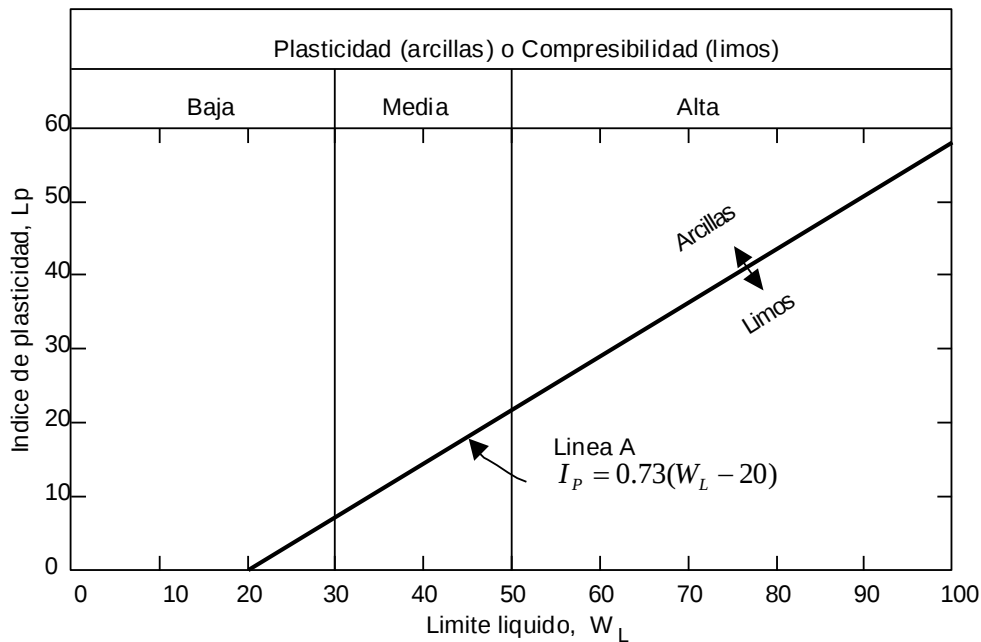
Según W. A. White (1958).

El tipo de mineral arcilloso y la naturaleza de los iones adsorbidos son importantes para la estabilización química de los suelos, en la extracción del agua por métodos eléctricos, y en otros problemas relativamente especializados. Puede obtenerse la información necesaria valiéndose de técnicas como las del análisis por medio de los rayos x. Sin embargo, para la mayor parte de los problemas sobre cimentaciones, la influencia de las características mineralógicas y químicas se acusan en forma adecuada en los valores de los límites de Atterberg.

El límite líquido y el índice de plasticidad constituyen juntos una medida de la plasticidad de un suelo. Los suelos que poseen W_L y I_P de grandes valores se dice que son muy plásticos. A los que tienen bajos valores se les llama ligeramente plásticos. La interpretación de las pruebas de los límites líquido y plástico se facilita usando la *Carta de plasticidad* desarrollada por A. Casagrande. Es esta carta (Fig. 1.3), las ordenadas representan valores del límite líquido. La carta se divide en seis regiones ecuación $I_P = 0.73(W_L - 20)$ y las dos líneas verticales $W_L = 30$ y $W_L = 50$. Todos los suelos representados por puntos arriba de la línea A son arcillas inorgánicas; la plasticidad varía de baja ($W_L < 30$) a alta ($W_L > 50$) con valores crecientes del límite líquido. Los suelos representados por puntos que quedan debajo de la línea A pueden ser limos inorgánicos, limos orgánicos, o arcillas orgánicas.

Si son inorgánicos, se dice que son de compresibilidad baja, media o elevada, lo que depende de que su límite sea inferior a 30, esté comprendido entre 30 y 50. Si son limos orgánicos, están representados por puntos situados en la región correspondiente a un límite líquido entre 30 y 50 y, si son arcillas orgánicas, a un límite líquido superior a 50.

Figura 1.4



La diferencia entre suelos orgánicos e inorgánicos puede hacerse usualmente, ejecutando dos pruebas para determinar dos límites líquidos con el mismo material, una consuelo húmedo o secado al aire, y otra con el suelo secado en el horno.

El secado en el horno produce cambios irreversibles en los componentes orgánicos que producen un límite líquido significativamente inferior.

Si el límite de la muestra secada en horno es inferior a aproximadamente 0.75 veces el de la muestra que no se secó de esa manera, el suelo puede clasificarse como orgánico. Unos cuantos minerales inorgánicos de arcilla y otros componentes de los suelos finos también experimentan cambios irreversibles al secarlos en el horno; por lo tanto, la identificación un puede basarse siempre en los resultados de las pruebas de los límites.

La humedad natural de una arcilla es en sí una propiedad índica útil. Sin embargo, tiene un mayor significado la relación de la humedad natural a los límites líquidos y plástico.

Los depósitos que tienen humedades cercanas al límite líquido son usualmente mucha más blandos que los que tienen humedades de los depósitos de arcilla natural es, por lo tanto, el *índice de liquidez*, definido por la ecuación:

$$I_L = \frac{W - W_P}{W_L - W_P} = \frac{W - W_P}{I_P}$$

Puede verse que I_L es negativo en los suelos que tengan humedades menores que el límite plástico. Al aumentar el contenido de agua del límite plástico al límite líquido, el valor de I_L aumenta de 0 a 1.0. Si la humedad natural es mayor que el límite líquido, el índice de liquidez es mayor que 1.0.

La consistencia de una arcilla remoldeada puede estimarse cuando se conocen su humedad natural y los valores de sus límites. Las relaciones se ilustran en la Fig. 1.5.

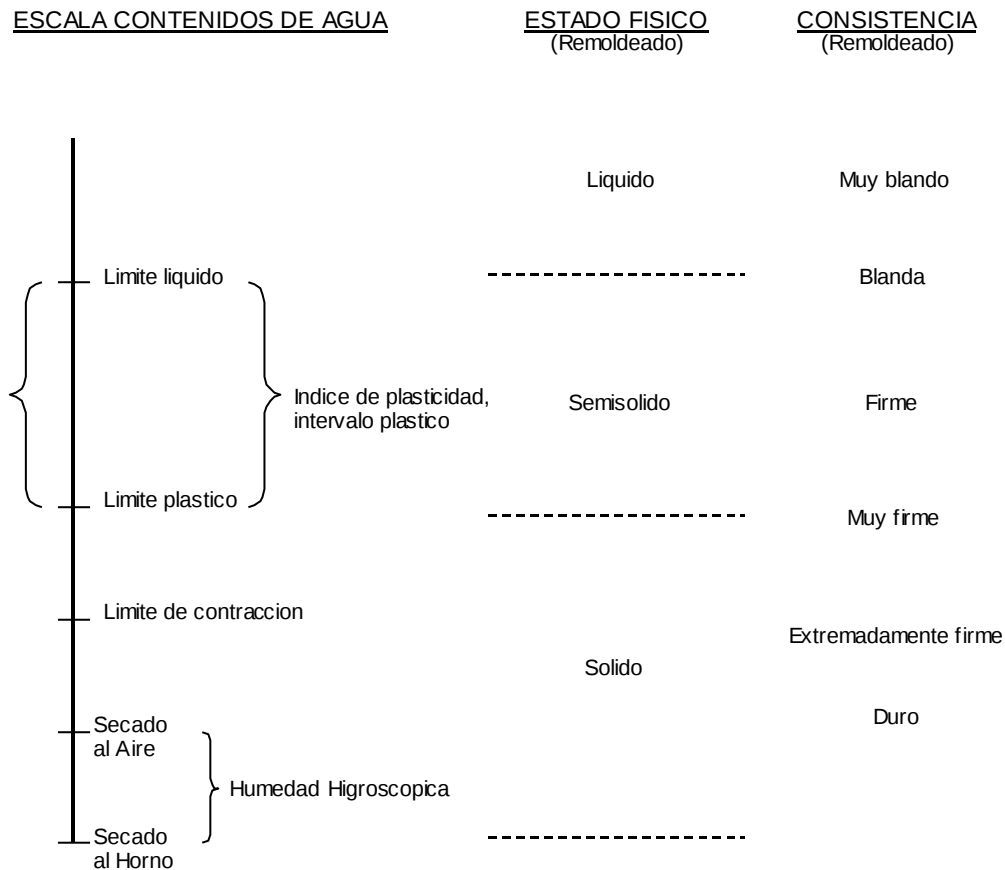


Figura 1.5 Escala de contenidos de agua de un suelo, mostrando los Límites de Atterberg, el estado físico correspondiente, y la consistencia aproximada del suelo remoldeado.

Ninguna de las pruebas para determinar los límites de Atterberg es difícil de ejecutar, aunque se requiere cierta experiencia para desarrollar la técnica necesaria para obtener resultados reproducibles. La determinación del límite líquido se hace comúnmente, utilizando un aparato mecánico diseñado por A. Casagrande (Fig.1.6). Se coloca una muestra del suelo remoldeado en la copa, y se hace una ranura de 2 mm de ancho en su base, y de 8 mm de altura, en el centro de la pasta de suelo. Luego, el operador da vuelta a la manivela que levanta la copa a cierta altura de manera que el punto de contacto entre la copa y la base quede a un centímetro sobre la base. Desde esta posición la copa cae libremente. El suelo está en el límite líquido, si se requieren 25 golpes para hacer que los extremos inferiores

de la ranura queden en contacto entre sí en una longitud de 13 mm. La humedad que tenga la muestra cuando se le da este número de golpes es límite líquido.

La determinación del límite plástico se ejecuta formando cilindros delgados con una muestra de suelo plástico con un diámetro de 3 mm. Si el suelo no se desmorona, se recoge el cilindro, se vuelve a amasar y se rola de nuevo. Se repite este proceso hasta que el cilindro se comienza a desmoronar precisamente cuando adquiera el diámetro de 3 mm. A la humedad a la que se desmorone el cilindro se la define como límite plástico.

El límite de contracción de un suelo se determina preparando una muestra de volumen conocido con una humedad superior al límite líquido, misma que se seca en un horno. Se miden el peso y el volumen de la muestra secada en el horno. Con estos datos y el contenido de agua inicial, se hace un cálculo de la humedad a la que la muestra seca estaría precisamente saturada. Se considera que esta humedad es el límite de contracción.

En los métodos estándar de la ASTM D-423, D-424, y D-427, se dan los procedimientos detallados para realizar las pruebas del Límite Líquido, el Límite Plástico y el Límite de Contracción.

Método estándar de prueba para Determinación del límite líquido de los suelos Traducción CAGrijalva

Designación: AASHTO T 89-2022

Revisado técnicamente: 2022 Subcomité Técnico: 1a, Suelo y Materiales

Reciclados No Consolidados

AASHTO Asociación estadounidense de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte

555 12th Street NW, Suite 1000 Washington, DC 20004

1. ALCANCE

1.1. El límite líquido de un suelo es el contenido de agua, determinado de acuerdo con el siguiente procedimiento, en el que el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido.

1.2. Lo siguiente se aplica a todos los límites especificados en esta norma: Para efectos de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor observado o un valor calculado deberá redondearse "a la unidad más cercana" en el último lugar a la derecha de las cifras utilizadas para expresar el valor límite, de acuerdo con ASTM E29.

1.3. La calidad de los resultados producidos por esta norma depende de la competencia del personal que realiza el procedimiento y de la capacidad, calibración y mantenimiento del equipo utilizado. Las agencias que cumplen el criterio de R18 generalmente se consideran capaces de realizar pruebas, inspecciones, etc. competentes y objetivas. Se advierte a los usuarios de esta norma que el cumplimiento de R 18 por sí solo no garantiza completamente resultados confiables. Los resultados confiables dependen de muchos factores; Seguir las sugerencias de R 18 o alguna directriz aceptable similar proporciona un medio para evaluar y controlar algunos de estos factores.

2. DOCUMENTOS REFERENCIADOS

2.1 Normativa AASHTO

M 231, Weighing Devices Used in the Testing of Materials (Dispositivos de pesaje utilizados en el ensayo de materiales)

M 339M Thermometers Used in the Testing of Construction Materials (Termómetros utilizados en las pruebas de materiales de construcción)

R 18, Establishing and Implementing a Quality Management System for Construction Materials Testing Laboratories (Establecimiento e implementación de un sistema de gestión de calidad para laboratorios de pruebas de materiales de construcción)

R 58, Dry Preparation of Disturbed Soil and Soil-Aggregate Samples for Test (Preparación en seco de muestras de suelo desclasificado y agregados de suelos para pruebas)

R 74, Wet Preparation of Disturbed Soil Samples for Test (Preparación de muestras húmedas de suelos no clasificados)

T 265, Laboratory Determination of Moisture Content of Soils (Determinación en laboratorio del contenido de humedad de suelos)

2.2 Normativa ASTM

D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (Métodos de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos)

E1, Standard Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers (Especificación estándar para termómetro de vidrio y líquido ASTM)

E29, Standard Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications (Práctica estándar para el uso de dígitos significativos en datos de prueba para determinar la conformidad con las especificaciones)

E230/E230M, Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples (Especificación estándar para tablas de temperatura y fuerza electromotriz (fem) para termopares estandarizados)

E2877, Standard Guide for Digital Contact Thermometers (Guía estándar para termómetros de contacto digitales)

2.3 Normativa de Comisión Electrónica Internacional

IEC 60584-1:2013 Termopares – Parte 1 FEM Tolerancias y especificaciones

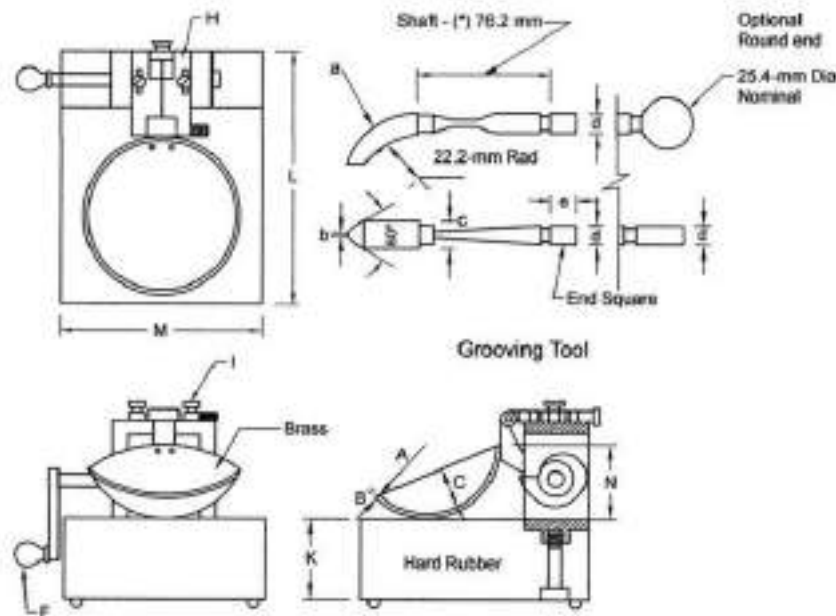
3. APARATOS (EQUIPO)

3.1 **Plato:** Un plato de porcelana, preferiblemente sin esmaltar, o un plato similar para mezclar, de aproximadamente 115 mm de diámetro.

3.2 **Espátula:** una espátula o pastillero que tiene una hoja de aproximadamente 75 a 100 mm de largo y aproximadamente 20 mm de ancho.

3.3 Dispositivo de Límite Líquido

3.3.1 **Operado manualmente:** un dispositivo que consta de un plato y un carro de latón, construido de acuerdo con el plano y las dimensiones que se muestran en la Figura 1 (ver Nota 1).



Dimensions	Liquid Limit Device							Grooving Tool				
	Cap Assembly				Base			Curved End			Gauge	
Description	A	B	C	N	K	L	M	a	b	c	d	e*
Metric, mm	54	2.0	27	47	50	150	125	10.0	2.0	13.5	10.0	15.9
Tolerance, mm	±2	±0.1	±1	±1.5	±5	±5	±5	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	—

Note: Plate "H" may be designed for using one (1) securing screw (I).
An additional wear tolerance of 0.1 mm shall be allowed for dimension "M" for used grooving tools.
Fem for base shall be of resilient material.
(*) Nominal dimensions.
All tolerances specified are plus or minus (+) except as noted above.

Figure 1—Manual Liquid Limit Device

3.3.2 **Operado mecánicamente:** para un dispositivo motorizado equipado para producir el aumento y la velocidad de los impactos en una copa de latón como se describe en las Secciones 5.2 y 6.3 de este procedimiento, respectivamente. La copa y las dimensiones críticas del dispositivo deberán ajustarse a las que se muestran en la Figura 1 de este

procedimiento. El dispositivo deberá dar los mismos valores límite líquidos que los obtenidos con el dispositivo operado manualmente. (Nota 1)

Nota 1: La base del dispositivo de límite líquido debe tener una resiliencia de al menos el 80 por ciento y no más del 90 por ciento cuando se determina de acuerdo con el procedimiento dado en el Apéndice.

3.4. Herramienta de ranurado

3.4.1. Herramienta de ranurado curvo: una herramienta de ranurado que se ajusta a las dimensiones críticas que se muestran en la Figura 1. No es necesario que el calibre forme parte de la herramienta.

3.4.2. Herramienta de ranurado plano (alternativa): una herramienta de ranurado hecha de plástico o metal no corrosivo que cumple con las dimensiones críticas que se muestran en ASTM D4318, Figura 3. No es necesario que el calibre sea parte de la herramienta. (Nota 2)

Nota 2: La herramienta ranuradora plana no debe usarse indistintamente con la herramienta ranuradora curva. Hay algunos datos que indican que el límite líquido aumenta ligeramente cuando se utiliza la herramienta plana en lugar de la herramienta curva.

3.5. Calibre-A. el calibre, ya sea conectado a la herramienta de ranurado o separado, conforme a la dimensión crítica "d" mostrada en la Figura 1 de este método de prueba o "K" en la Figura 3 de ASTM D4318, y puede ser, si está separada, una barra de metal de 10,0 * 0,2 mm de espesor y aproximadamente 50 mm de largo.

3.6. Contenedores: recipientes adecuados hechos de material resistente a la corrosión y no sujetos a cambios de masa o desintegración por calentamiento y enfriamiento repetidos. Los contenedores deberán tener tapas de cierre hermético para evitar la pérdida de humedad de las muestras antes de la determinación inicial de la masa y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación final de la masa. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

3.7. Balanza: La balanza deberá tener suficiente capacidad y cumplir con M 231, Clase G 1.

3.8. Horno: Un horno de secado controlado termostáticamente capaz de mantener temperaturas de 110 $\pm$ 5°C para secar muestras de humedad. Los hornos para calentar y secar deberán poder funcionar a las temperaturas requeridas, entre 100 y 120 °C (212 a 248 °F), dentro de $\pm$ 5 °C ($\pm$ 9 °F), según lo corregido, si es necesario, mediante la estandarización. Se puede utilizar más de un horno, siempre que cada uno se utilice dentro de su rango de temperatura de funcionamiento adecuado. El termómetro utilizado para monitorear la temperatura del horno o para medir la temperatura de los materiales deberá cumplir con los requisitos de M 339M/M 339 con un rango de temperatura de al menos 90 a 130 °C (194 a 266 °F) y una precisión de $\pm$ 1,25°C ($\pm$ 2,25 °F) (ver Nota 3).

Nota 3. Los tipos de termómetros adecuados para su uso incluyen termómetros de mercurio ASTM E1; Termómetro digital de vástago metálico ASTM E2877; Termómetro de termopar ASTM E230/E230M, tipo J o K, clase especial, tipo T cualquier clase; Termómetro de termopar IEC 60584, tipo J o K, clase 1, tipo T cualquier clase; o termómetro de vástago metálico (bimetálico) con indicador de cuadrante.

METODO A

4. Muestra

4.1 Se tomará una muestra con una masa de unos 100 gr de la porción bien mezclada del material que pasa el tamiz de 0,425 mm obtenido según R 58 o R 74; para el análisis estructural se utiliza R 74, Método B.

5. AJUSTE DEL DISPOSITIVO DE LÍMITE LÍQUIDO

5.1. El **Dispositivo de Límite Líquido** deberá ser inspeccionado para determinar que esté en buen estado de funcionamiento; que el pasador que conecta la copa no está lo suficientemente desgastado como para permitir el juego lateral; que los tornillos de la conexión de la copa al brazo del colgador esté apretada; que los puntos de contacto entre la copa y la base no estén excesivamente desgastados; que el borde de la copa no esté excesivamente desgastado, si se ha dado un uso prolongado.

La herramienta ranuradora debe ser inspeccionada para determinar que las dimensiones críticas son las que se muestran en la Figura 1 de este método de prueba o con la normativa ASTM D4318, ver Figura 3.

Nota 4: El desgaste se considera excesivo cuando el punto de contacto en la copa o base excede en aproximadamente 13 mm de diámetro, o cuando cualquier punto del borde de la copa está desgastado aproximadamente la mitad del espesor original.

Aunque un ligero surco en el centro de la copa se nota, no es objetable. Si el surco se vuelve pronunciado antes que otros signos de desgaste, la copa debe considerarse excesivamente desgastada. Se reemplazarán las copas excesivamente desgastadas.

Una base que esté excesivamente desgastada se puede repintar siempre y cuando el espesor no exceda a la tolerancia mostrada en la Figura 1 de este método de prueba en más de -2,5 mm y la distancia entre la copa en el seguidor de leva y la base se mantienen dentro de las tolerancias especificadas en la Figura 1.

5.2. Ajuste la altura de caída de la copa de modo que el punto de la copa que entra en contacto con la base se eleva a una altura de 10,0 $\pm$ 0,2 mm. Consulte la Figura 2 para conocer la ubicación adecuada del medidor en relación con la copa durante el ajuste. Verifique la altura de caída de la copa antes de la prueba de cada día.

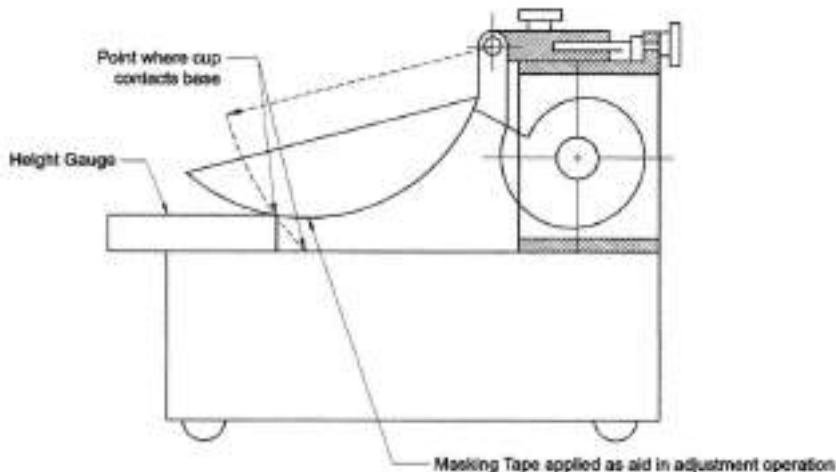


Figure 2—Calibration for Height of Drop

Nota 5—Un procedimiento conveniente para ajustar la altura de caída es el siguiente: coloque un trozo de cinta adhesiva a lo largo del fondo exterior de la taza paralela al eje del pivote del colgador de tazas.

El borde de la cinta alejado del colgador de tazas debe dividir en dos el punto de la taza que hace contacto con la base. Para copas nuevas, coloque un trozo de papel carbón en la base y deje caer el vaso varias veces y marcarán el punto de contacto.

Conecte la taza al dispositivo y gire la manivela hasta que la copa se eleve a su altura máxima. Deslice el medidor de altura debajo de la copa desde el frente y observe si el medidor hace contacto con la copa o la cinta (consulte la Figura 2). Si la cinta y la copa son ambas en contacto, la altura de caída es aproximadamente correcta. Si no, ajuste la copa hasta que se haga contacto.

Verifique el ajuste girando la manivela a dos revoluciones por segundo mientras va sosteniendo el medidor en posición contra la cinta y la copa. Si se escucha un timbre o un clic sin que la copa se eleve del maneral, el ajuste es correcto. Si no suena ningún timbre o si la copa se eleva desde el medidor, reajuste la altura de caída. Si la copa se balancea en el medidor durante este, al comprobar el funcionamiento, el pivote del seguidor de leva está excesivamente flojo y las piezas desgastadas deben ser reemplazadas. Retire siempre la cinta después de completar la operación de ajuste.

6. PROCEDIMIENTO DE USO DE LA HERRAMIENTA DE RANURADO CURVO

6.1. La muestra de suelo se colocará en el plato de mezcla y se mezclará completamente con 15 a 20 ml de agua destilada o desmineralizada revolviendo, amasando y picando alternativa y repetidamente con una espátula. Se realizarán más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml. Cada incremento de agua se mezclará completamente con el suelo como se describió anteriormente antes de otro incremento de agua.

Una vez que la prueba ha comenzado, no se debe agregar tierra seca adicional al suelo humedecido. La copa del dispositivo de límite líquido no se utilizará para mezclar tierra y agua.

Si se ha añadido demasiada humedad a la muestra, la muestra deberá desecharse o mezclarse, y se amasa hasta que la evaporación natural reduzca el punto de cierre a un rango aceptable.

Nota 6: Algunos suelos tardan en absorber agua; por lo tanto, es posible sumar los incrementos de agua tan rápido que se obtiene un valor de límite líquido falso. Esto se puede evitar si se mezcla más o se revuelve más tiempo.

Se puede utilizar agua del grifo para pruebas de rutina si las pruebas comparativas indican que no hay diferencias en los resultados entre el uso de agua del grifo y agua destilada o desmineralizada. Sin embargo, las pruebas arbitrales o disputadas se realizarán utilizando agua destilada o desmineralizada.

Cuando se ha mezclado completamente agua suficiente con el suelo para formar una masa uniforme de consistencia rígida, se colocará una cantidad suficiente de esta mezcla en la taza encima del lugar donde la copa reposa sobre la base y se debe apretar y extender con la espátula hasta nivelar y al mismo tiempo recortando a una profundidad de 10 mm en el punto de máximo espesor.

Con unos pocos trazos de la muestra a ensayar, se utilizará la mayor espátula de muestra posible, teniendo cuidado de evitar que queden atrapadas burbujas de aire dentro de la masa.

El exceso de tierra se devolverá al plato de mezcla y se cubrirá para retener la humedad en la muestra.

La tierra en la copa del dispositivo se dividirá con un golpe firme de la herramienta ranuradora. a lo largo del diámetro a través de la línea central del seguidor de leva de modo que se forme una ranura limpia y afilada. Se formarán las dimensiones adecuadas como se muestra en la Figura 3.

Para evitar que se rompan los lados de la ranura o se manifieste un deslizamiento de la torta de tierra en la taza, se harán hasta seis golpes de adelante hacia atrás o de atrás hacia adelante y se permitirá que no contabilice como un golpe. La profundidad de la ranura debe aumentarse con cada golpe y sólo el último debe raspar el fondo de la copa.



Figure 3—Liquid Limit Device with Soil Sample in Place

6.2. El vaso que contiene la muestra preparada como se describe en la Sección 6.2 deberá ser levantado y dejado caer por el girado la manivela F a una velocidad aproximada de dos revoluciones por segundo hasta que los dos lados de la pequeña muestra entre en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de aproximadamente 13 mm.

Se registrará el número de golpes necesarios para cerrar la ranura en la base de este disco.

No se deberá sujetar la máquina con la mano libre mientras la manivela F esté girada.

NOTA 7: Algunos suelos tienden a deslizarse sobre la superficie de la copa en lugar de fluir. Si esto ocurre, se debe agregar más agua a la muestra y mezclar, luego colocar la mezcla de suelo y agua en la taza, y hacer un corte de ranura con la herramienta ranuradora y repita la Sección 6.2. Si la tierra seca continúa deslizándose sobre la taza con un número de golpes menor que 25, la prueba no es aplicable y se debe tomar nota de que no se pudo determinar el límite líquido.

6.3. Una rebanada de tierra de aproximadamente el ancho de la espátula que se extiende de borde a borde de la torta de tierra, en un ángulo recto con respecto a la ranura incluyendo la parte de la ranura en la que fluyó el suelo, se retirará y se colocará en un recipiente adecuado. La tierra en el contenedor será secada según T 265 para determinar el contenido de humedad, y registrar los resultados.

6.4. La tierra que quede en la taza se transferirá al plato de mezcla. La herramienta de copa y ranurado se lavará y secará para luego dar lugar a la preparación del próximo ensayo.

6.5. Repita las operaciones anteriores, agregando suficiente agua para que el suelo alcance una condición más fluida. Obtenga la primera muestra en el rango de 25 a 35 golpes, la segunda muestra en el rango de 20 a 30 golpes, y la tercera muestra en el

rango de 15 a 25 golpes. El rango de las tres determinaciones será de al menos 10 golpes.

7. PROCEDIMIENTO ALTERNO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA RANURADORA PLANA

7.1. El procedimiento será el mismo que el prescrito en las Secciones 6.1 a 6.6, excepto por el procedimiento en la Sección 6.2 para formar la ranura. Forme un surco en la capa de tierra de acuerdo con Sección 11.2 de ASTM D4318.

8. CÁLCULO

8.1. El contenido de agua del suelo se expresará como el contenido de humedad en porcentaje de la masa del suelo secado al horno y se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de humedad} = 100 \times \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de tierra secada al horno}}$$

8.2. Calcule el porcentaje de humedad al porcentaje entero más cercano.

9. PREPARACIÓN DE LA CURVA DE FLUJO

9.1. Una "curva de flujo" que representa la relación entre el contenido de humedad y el número correspondiente de los golpes se trazarán en un gráfico semilogarítmico con el contenido de humedad en abscisas en una escala aritmética y el número de golpes en ordenadas en una escala logarítmica. La curva de flujo será una línea recta trazada lo más cerca posible de los tres o más puntos trazados.

10. LÍMITE LÍQUIDO

10.1. El contenido de humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con 25 golpes y la ordenada se tomará como límite líquido del suelo. Redondee este valor al número entero más cercano.

METODO B

11. MUESTRA

11.1. Se tomará una muestra con una masa de aproximadamente 50 g como se describe en la Sección 4.1.

12. PROCEDIMIENTO

12.1. Usando la herramienta de ranurado curvo (Sección 6) o la herramienta de ranurado plano (Sección 7), el procedimiento deberá ser el mismo que lo prescrito en las Secciones 6.1 a 6.5 excepto que la cantidad inicial de agua que se agregue de acuerdo con la Sección 6.1, será de aproximadamente 8 a 10 ml y la muestra de humedad tomadas de acuerdo con la Sección 6.4 y se tomarán únicamente para la prueba aceptada.

12.2. Para una precisión igual a la obtenida por el método estándar de tres puntos, el número aceptado de los golpes para el cierre de ranuras se limitarán a entre 22 y 28 golpes. Después de obtener un cierre preliminar en el rango de cierre aceptable, devolver inmediatamente la tierra restante en la taza al plato para mezclar y, sin agregar agua adicional, repita como se indica en las Secciones 6.2 y 6.3. Si el segundo cierre ocurre en el rango aceptable (22 a 28, inclusive) y el segundo cierre está a dos (2) golpes del primer cierre, asegure una muestra de contenido de agua como se indica en Sección 6.4.

12.3. Se pueden aceptar cierres de ranura entre 15 y 40 golpes si se realizan variaciones de ± 5 por ciento del valor real. El límite líquido es tolerable.

13. CÁLCULO

13.1. El contenido de agua del suelo en el momento del cierre aceptado se calculará de acuerdo con la Sección 8.1.

14. LÍMITE LÍQUIDO

14.1. El límite líquido se determinará mediante uno de los siguientes métodos: el nomograma, Figura 4; el método del factor de corrección, Tabla 1: o por cualquier otro método de cálculo que produzca igualmente valores límite líquidos precisos. El método estándar de tres puntos se utilizará como prueba de referencia para resolver todas las controversias.

14.2. La clave de la Figura 4 ilustra el uso del nomograma (pendiente media).

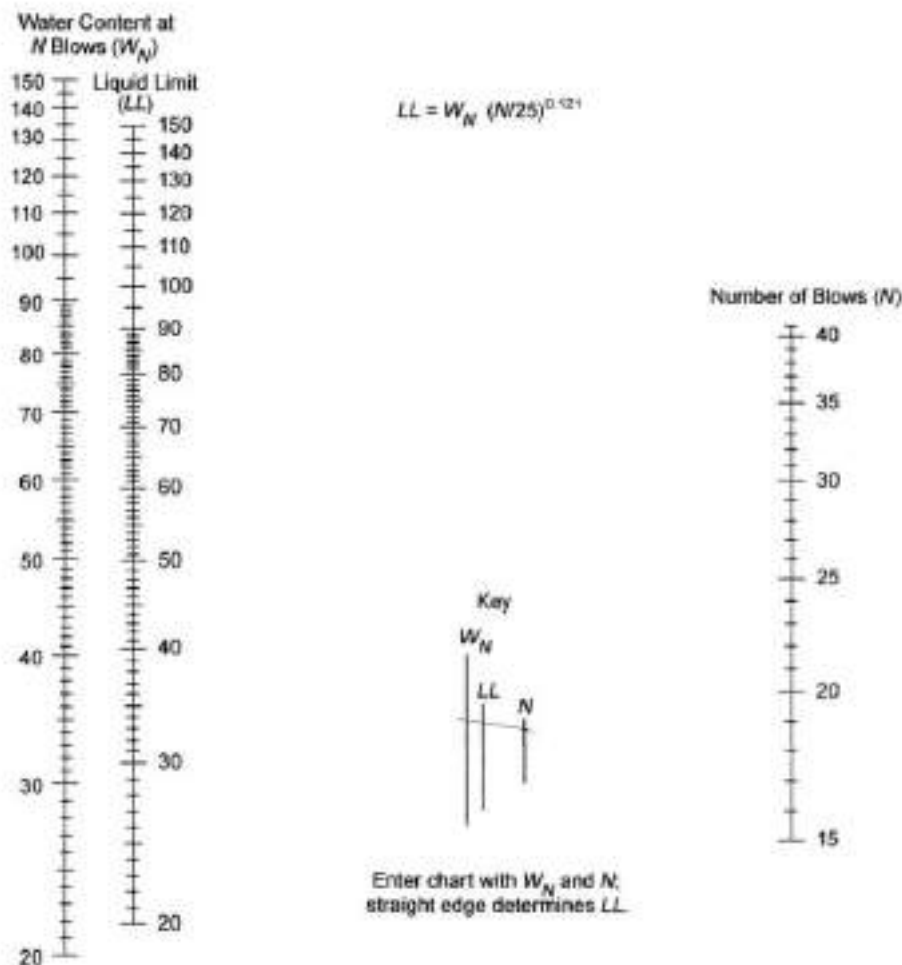


Figure 4—Nomographic Chart Developed by the Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, to Determine Liquid Limit Using Mean Slope Method

14.3. El método del factor de corrección, Tabla 1, utiliza el contenido de humedad de la muestra de límite líquido multiplicado por un factor (k) del conteo del segundo golpe de cierre. La figura 5 fue desarrollada para el cálculo del límite líquido

$$LL = W_N \left(\frac{N}{24} \right)^{0.121} \tag{2}$$

$$LL = k w_n \tag{3}$$

donde: N = número de golpes que provocan el cierre de la ranura a un contenido de agua,
 LL = límite líquido corregido para cierre a 25 golpes,
 W_N = contenido de agua, y
 k = factor dado en la Tabla 1

Table 1—Factors for Obtaining Liquid Limit from Water Content and Number of Blows Causing Closure of the Groove

Number of Blows, N	Factor for Liquid Limit, k
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014

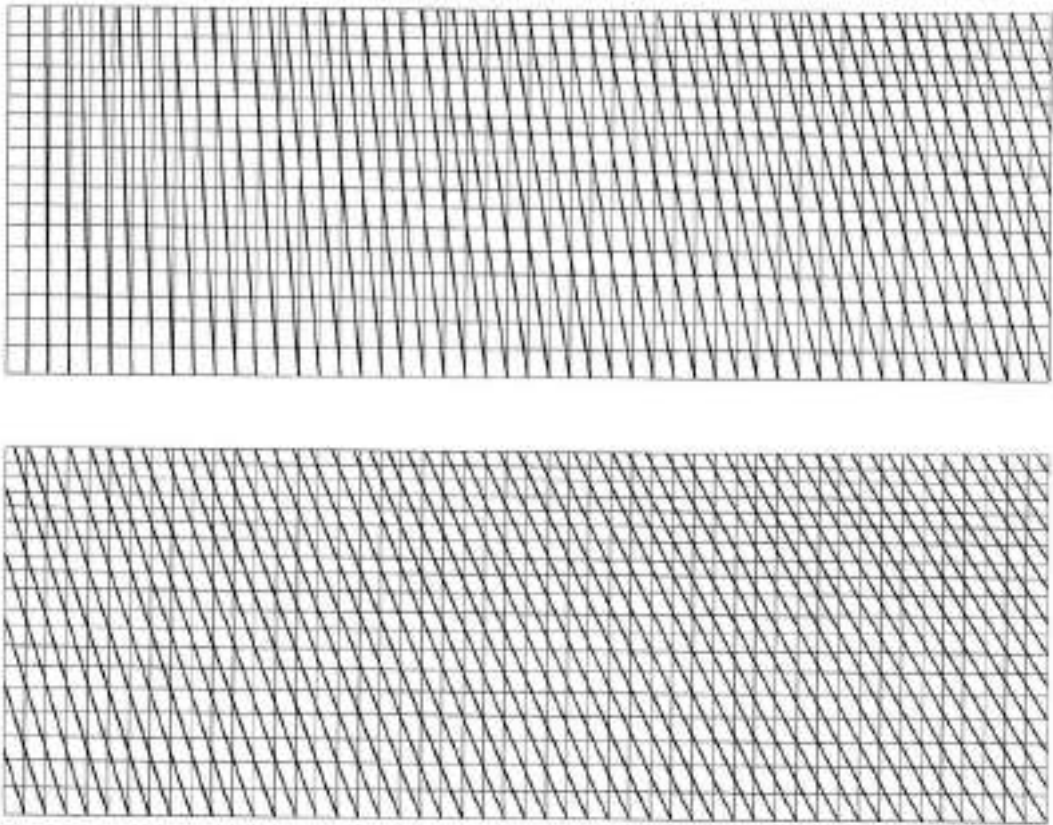


Figure 5—Chart Developed by Washington State Highway Department for the Calculation of the Liquid Limit

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN O ÁRBITRO

15. MÉTODO A UTILIZAR

15.1. Se utilizará el método A, utilizando el procedimiento de herramienta de ranurado curvo (Sección 6), para realizar controles o pruebas de árbitro. Los resultados de las pruebas de límite líquido están influenciados por:

- 15.1.1. El tiempo necesario para realizar la prueba;
- 15.1.2. El contenido de humedad con el que se inicia la prueba; y
- 15.1.3. La adición de suelo seco a la muestra sazónada (o puesta a punto).

16. PROCEDIMIENTO

16.1. Por lo tanto, al realizar la prueba de límite líquido con fines de verificación o arbitraje, el siguiente tiempo se utilizará como horario:

16.1.1. Mezclado del suelo con agua de 5 a 10 min, utilizándose el periodo más largo para los suelos más plásticos,

16.1.2. Condimento (mezcla) en el humidificador, 30 min;

16.1.3. Volver a mezclar antes de colocarlo en la copa de latón; agregar 1 ml de agua y mezclar durante 1 min;

16.1.4. Colocar en la copa de latón y probar (ensayar), 3 min; y

16.1.5. Agregar agua y remezclar, 3 min.

16.2. No se registrará ninguna prueba que requiera más de 35 golpes o menos de 15 golpes. En ningún caso se deberá agregar tierra seca a la tierra sazónada (preparada y mezclada) que se está probando.

17. DECLARACIÓN DE PRECISIÓN

17.1. Esta declaración de precisión se aplica a suelos que tienen un límite de líquido de rango de 21 a 67.

17.2. **Repetibilidad** (de operación única) Dos resultados obtenidos por el mismo operador en la misma muestra en el mismo laboratorio utilizando el mismo aparato y en días diferentes, se debe considerar sospechosos si difieren en más del 7 por ciento de su media.

17.3. **Reproducibilidad** (Multilaboratorio): Dos resultados obtenidos por diferentes operadores en diferentes laboratorios deben considerarse sospechosos si difieren entre sí con más del 13 por ciento de su media.

18. PALABRAS CLAVE

18.1. Atterberg; suelo arcilloso; Índice de plasticidad y límite líquido.

APÉNDICE (información no obligatoria)

X1.1. En la Figura X1.1 y Tabla 1.1. se muestra un dispositivo para medir la resiliencia de las bases de dispositivos de límite líquido. El dispositivo consta de un tubo de plástico acrílico transparente y una tapa pulida de 8 mm de diámetro, con una bola de acero y

una pequeña barra magnética. El cilindro puede estar cementado a la tapa o roscado como se muestra.

La pequeña barra magnética se sujeta en el hueco de la tapa y la bola de acero se fija en el hueco de la parte inferior de la tapa con la barra magnética. Luego se pone el cilindro en posición vertical y se coloca sobre la superficie superior de la base a probar.

Sostenga el tubo ligeramente contra la base del dispositivo de límite de líquido con una mano y suelte la bola tirando del imán para sacarlo de la tapa. Utilice las marcas de escala en el exterior del cilindro para determinar el punto más alto alcanzado por la parte inferior de la bola. Repita la caída al menos tres veces, colocando el probador en un lugar diferente para cada caída.

El promedio del rebote de la bola de acero, expresado como porcentaje de la caída total, es igual a la resiliencia del límite líquido a la base del dispositivo. Las pruebas deben realizarse a temperatura ambiente.

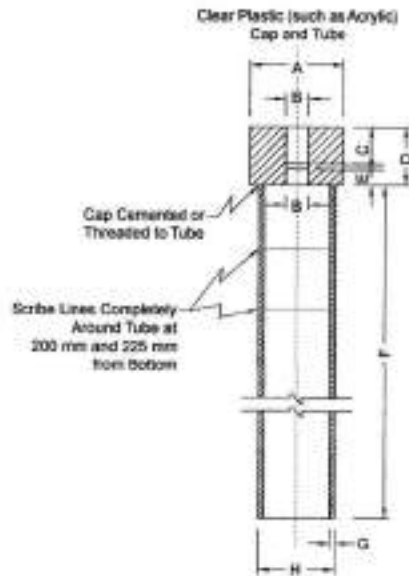


Figure X1.1—Resilience Tester

Table X1.1—Table of Measurements for Resilience Tester^a

Dimension	Description	Metric, mm
A	Diam. of cap	38.0 ^b
B	Diam. of hole	9.0 ^b
C	Depth of hole	18.0 ^b
D	Height of cap	25.5 ^b
E	Depth of hole	8.0
F	Length of tube	250.0
G	Wall thickness	3.2 ^b
H	O.D. of tube	31.8 ^b
Scribed lines from bottom	Upper 90%	225.0
	Lower 80%	200.0

^a Tube stands plumb.

^b These dimensions are not critical in the performance of the test.

Método estándar de prueba para Determinación del límite plástico e Índice de Plasticidad de Suelos. Traducción CAGrijalva.

Designación: AASHTO T 90-2022

Revisado técnicamente: 2022. Subcomité Técnico: 1a, Suelo y Materiales

Reciclados No Consolidados

AASHTO Asociación estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte

555 12th Street NW, Suite 1000 Washington, DC 20004

1. ALCANCE

- 1.1. El límite plástico de un suelo es el contenido de humedad más bajo al cual el suelo permanece plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el rango de contenido de humedad, expresado como porcentaje de la masa del suelo secado al horno, dentro del cual el material se encuentra en estado plástico. El índice de plasticidad se calcula como la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.
- 1.2. Lo siguiente se aplica a todos los límites especificados en esta norma: A los efectos de determinar de conformidad con estas especificaciones, un valor observado o un valor calculado que se redondeará "a la unidad más cercana" en el último lugar a la derecha de las cifras utilizadas para expresar la magnitud del valor límite, de acuerdo con ASTM E29.
- 1.3. En este método se proporcionan dos procedimientos para examinar muestras de suelo: el método de rodillo manual y el Método del Dispositivo Límite Plástico. El método rodillo manual se utilizará como procedimiento árbitro o de referencia.
- 1.4. Este método de prueba a menudo se realiza junto con el T 89, que se utiliza para determinar el límite líquido de los suelos.
- 1.5. *La calidad de los resultados producidos por esta norma depende de la competencia del personal que realiza el procedimiento y la capacidad, calibración y mantenimiento del equipo utilizado. Las agencias que cumplen con los criterios de R 18 generalmente se consideran capaces de pruebas competentes y objetivas, en inspección de muestreo, etc. Los usuarios de esta norma recomiendan que el cumplimiento de R 18 por sí solo no garantiza completamente resultados fiables. Los resultados confiables dependen en muchos factores: el seguir las sugerencias de R 18 o alguna pauta aceptable similar que proporciona un medio para evaluar y controlar algunos de esos factores.*

2. DOCUMENTOS REFERENCIADOS

2.1 Normativa AASHTO

M 231, Weighing Devices Used in the Testing of Materials (Dispositivos de pesaje utilizados en el ensayo de materiales)

M 339M/M 339 Thermometers Used in the Testing of Construction Materials (Termómetros utilizados en las pruebas de materiales de construcción)

R 18, Establishing and Implementing a Quality Management System for Construction Materials Testing Laboratories (Establecimiento e implementación de un sistema de gestión de calidad para laboratorios de pruebas de materiales de construcción)

R 58, Dry Preparation of Disturbed Soil and Soil-Aggregate Samples for Test (Preparación en seco de muestras de suelo desclasificado y agregados de suelos para pruebas)

R 61, Establishing Requirements for Equipment Calibrations, Standardizations, and Checks. (Establecimiento de Requisitos para Calibraciones, chequeos y Estandarizaciones de Equipos)

R 74, Wet Preparation of Disturbed Soil Samples for Test (Preparación de muestras húmedas de suelos no clasificados)

T 89, Determining the Liquid Limit of Soils (Determinación del límite líquido de los suelos)

T 265, Laboratory Determination of Moisture Content of Soils (Determinación en laboratorio del contenido de humedad de suelos)

2.2 Normativa ASTM

E1, Standard Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers (Especificación estándar para termómetro de vidrio y líquido ASTM)

E29, Standard Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications (Práctica estándar para el uso de dígitos significativos en datos de prueba para determinar la conformidad con las especificaciones)

E230/E230M, Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples (Especificación estándar para tablas de temperatura y fuerza electromotriz (fem) para termopares estandarizados)

E2877, Standard Guide for Digital Contact Thermometers (Guía estándar para termómetros de contacto digitales)

2.3 Normativa de Comisión Electrónica Internacional

IEC 60584-1:2013 Termopares – Parte 1 FEM Tolerancias y especificaciones

3. APARATOS (EQUIPO)

3.1. **Plato:** Un plato de porcelana, preferiblemente sin esmaltar, o un plato similar para mezclar, de aproximadamente 115 mm de diámetro.

3.2. **Espátula:** una espátula o pastillero que tiene una hoja de aproximadamente 75 mm de largo y aproximadamente 20 mm de ancho.

3.3. **La superficie para rodar:** consistirá en uno de los siguientes:

3.3.1. **Una placa de vidrio esmerilado o un trozo de papel liso y sin esmaltar:** sobre el cual enrollar la muestra. Papel, si es utilizado, no deberá agregar materias extrañas (fibras, fragmentos de papel, etc.) al suelo durante el proceso de laminado y deberá quedar plano sobre una superficie horizontal lisa.

3.3.2. **Dispositivo rodante de límite de plástico^{1,2}:** dispositivo fabricado en acrílico conforme a las dimensiones mostradas en Figura 1.

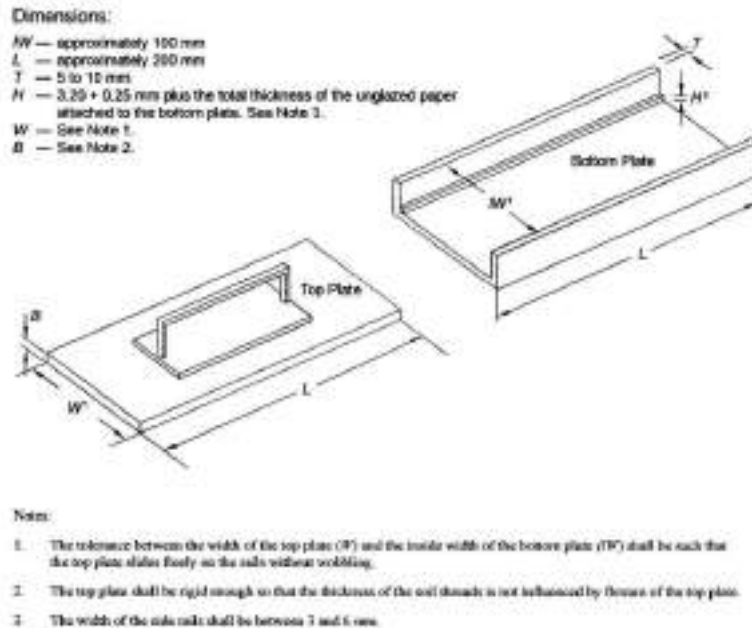


Figure 1—Plastic Limit Rolling Device

3.3.2.1. **Papel para Dispositivo de Liar:** Papel sin esmaltar que no añade materias extrañas (fibras, papel en fragmentos, etc.) al suelo durante el proceso de laminación. Coloque el papel sin vidriar en la parte superior y placas inferiores del dispositivo mediante un adhesivo en aerosol o mediante el uso de un respaldo autoadhesivo.

Nota 1: Tenga especial cuidado en retirar el adhesivo que queda en el dispositivo rodante de límite de plástico después de la prueba. Las pruebas repetidas sin dicha eliminación darán como resultado una acumulación de adhesivo residual, y un diámetro reducido de la rosca de la muestra de suelo.

3.4. **Contenedor de contenido de humedad:** Hecho de material resistente a la corrosión y no sujeto a cambios en masa o desintegración durante el calentamiento y enfriamiento derogados. El contenedor tendrá una tapa hermética para evitar la pérdida de humedad de las muestras antes de la determinación de masa inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación

final de la masa. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

3.5 Balanza: Balanza de clase G1 que cumpla con los requisitos de precisión de M 231.

3.6. Horno: Controlado termostáticamente y capaz de mantener temperaturas de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante el secado muestras. Los hornos para calentar y secar deberán poder funcionar a las temperaturas requeridas, entre 100 y 120°C (212 a 248°F), con $\pm 5^\circ\text{C}$ ($\pm 9^\circ\text{F}$), corrigiendo si es necesario, por normalización. Se puede utilizar más de un horno, siempre que cada uno se utilice dentro de sus condiciones adecuadas de rango de temperatura de funcionamiento. El termómetro utilizado para monitorear la temperatura del horno, o para medir la temperatura de los materiales deberá cumplir los requisitos de M 339M/M 339 con un rango de temperatura de al menos 90 a 130°C (194 a 266°F) y una precisión de $\pm 125^\circ\text{C}$ ($\pm 2,25^\circ\text{F}$) (ver Nota 2).

Nota 2: los tipos de termómetros adecuados para su uso incluyen termómetros de mercurio ASTM E1; ASTM Termómetro digital de vástago metálico E2877; Termómetro termopar ASTM E230/E230M, tipo J, o K, Clase Especial, Tipo T cualquier Clase; Termómetro termopar IEC 605M, tipo J o K, Clase 1, Tipo T cualquier Clase; o medidor de cuadrante, vástago metálico, bimetálico).

4. CALIBRACIONES, NORMALIZACIONES Y CHEQUEOS

4.1. A menos que se especifique lo contrario, siga los requisitos e intervalos para las calibraciones de equipos, estandarizaciones y controles en R 18.

4.2. Siga los procedimientos para realizar calibraciones, estandarizaciones y comprobaciones de equipos que se encuentran en R 61.

5. MUESTRA

5.1. Si sólo se puede determinar el límite plástico: tome una cantidad de suelo con una masa de aproximadamente 20 gr de la porción completamente mezclada del material que pasa por el tamiz No. 40 de 0,425 mm, obtenido de acuerdo con R 58 o R 74. Coloque la tierra secada al aire en un recipiente para mezclar y mezcle bien con agua destilada, desmineralizada o agua desionizada hasta que la masa se vuelva lo suficientemente plástica como para poder ser fácilmente amasada en forma de bola (Notas 3 y 4). Tome una porción de muestra de esta bola con una masa de aproximadamente 10 g para la prueba.

Nota 3: Se puede utilizar agua del grifo para pruebas de rutina si las pruebas comparativas no indican diferencias en los resultados entre el uso de agua del grifo y agua destilada, desmineralizada o desionizada. Sin embargo, use destilado, desmineralizado, o agua desionizada para pruebas arbitrales o disputadas.

Nota 4: El objetivo es agregar suficiente humedad a una muestra de suelo de plástico para que la rosca o rollito de 3 mm descrito en la Sección 6 no se desmenuce en el primer rollo. Para un suelo no plástico, esto no será posible.

5.2. Si se va a determinar el índice de plasticidad (límite líquido y plástico): tome una muestra de prueba con una masa de aproximadamente 10 g de la porción del suelo completamente húmeda y mezclada preparada de acuerdo con T 89. Tome la muestra en cualquier etapa del proceso de mezcla en la que la masa se vuelva plástica, lo suficiente como para darle forma fácilmente a una bola sin que se pegue excesivamente a los dedos cuando se aprieta. Si la muestra se toma antes de completar la prueba de límite líquido, déjela a un lado y déjela sazonar en el aire hasta que se haya completado la prueba de límite líquido. Si la muestra tomada durante la prueba de límite líquido está

demasiada seca para permitir el enrollado hasta obtener una rosca o rollito de 3 mm como se describe en la Sección 6, agregue más agua y vuelva a mezclar. (Nota 4)

6. PROCEDIMIENTO

6.1. Determine y registre la masa del contenedor (tara o recipiente) de contenido de humedad.

6.2. Seleccione una porción de 1.5 a 2 gr de la masa de 10 g de suelo preparada de acuerdo con la Sección 5. Forme una masa elipsoidal con la porción seleccionada.

6.3. Utilice uno de los siguientes métodos para enrollar la masa de suelo en una banda de 3 mm de diámetro a una velocidad de 80 a 90 golpes por minuto, contando un golpe como un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás. Volver a la posición inicial nuevamente.

6.3.1. **Método de enrollado manual:** haga rodar la masa entre la palma o los dedos y la placa de vidrio esmerilado o papel sin esmaltar con presión suficiente para enrollar la masa en un hilo de diámetro uniforme en toda su longitud. Deforme más el hilo (rollito) en cada pasada hasta que su diámetro alcance los 3 mm. No tome más de 2 minutos para hacer rodar la masa de tierra hasta alcanzar un diámetro de 3 mm.

Nota 5: La cantidad de presión requerida con la mano o los dedos variará mucho según el suelo. Los suelos frágiles de baja plasticidad se enrollan mejor debajo del borde exterior de la palma o en la base del dedo pulgar.

6.3.2. **Procedimiento alternativo, Método del dispositivo de límite plástico:** coloque la masa de suelo sobre la placa de fondo o base, donde la cara superior de la placa este en contacto con la masa de suelo. Simultáneamente aplique una ligera fuerza hacia abajo y hacia atrás, con un movimiento de ida y vuelta hacia la placa superior para que la placa entre en contacto con los rieles laterales en 2 minutos. Durante este proceso de enrollado, no permita que la tierra entre en contacto con los rieles laterales.

Nota 6: En la mayoría de los casos, se puede enrollar más de una masa de suelo (hilo/rollito) simultáneamente en el dispositivo rodante de límite de plástico.

6.4. La tierra debe rodar hasta un diámetro de hilo de 3 mm al menos una vez para que se considere plástica. Cuando el diámetro del hilo alcanza los 3 mm, apriete el hilo entre el pulgar y los dedos y formar la masa nuevamente en una forma aproximadamente elipsoidal. Repita el proceso de laminado y reformado

descrito en la Sección 6.3 hasta que la tierra ya no pueda enrollarse en forma de hilo y comience a desmoronarse. El desmenuzamiento podrá producirse cuando el hilo tenga un diámetro superior a 3 mm, siempre que el suelo tenga

previamente una forma de rosca enrollada de 3 mm de diámetro (Nota 7). Esto se considera satisfactorio como punto final. Si no está seguro de que se haya alcanzado un punto final satisfactorio, verifíquelo intentando reformar la masa de tierra hasta formar una masa elipsoidal y, si es posible, repetir el proceso de laminado hasta que la tierra ya no pueda mantener la forma de un hilo o rollo cuando se aplica una ligera presión a la masa elipsoidal. No intentar producir una falla en un diámetro exacto de 3 mm reduciendo intencionalmente la velocidad de rodamiento o la presión de la mano, o ambos aspectos previamente mencionados (Nota 8).

Nota 7: El desmoronamiento se manifestará de manera diferente con varios tipos de suelo. Algunos suelos caen en partes de numerosas y pequeñas segregaciones de partículas; otros pueden formar una capa tubular exterior que comienza a dividirse en ambos extremos. La división puede progresar hacia la mitad y el hilo puede finalmente

deshacen en muchas pequeñas partículas laminares. Los suelos arcillosos pesados requieren mucha presión para deformarse, particularmente cuando se acercan al límite plástico. Estos tipos de suelos pueden romperse y formar una serie de segmentos en forma de barril, cada uno de unos 6 a 9 mm de longitud.

Nota 8: Para suelos débilmente plásticos, puede ser necesario reducir la cantidad total de deformación acercando el diámetro inicial de la masa de forma elipsoidal a los 3 mm de diámetro final requerido.

6.5. Reúna las porciones de tierra desmenuzada y colóquelas en el recipiente de contenido de humedad. Cubra inmediatamente el recipiente con una tapa hermética para evitar una pérdida adicional de humedad.

6.6. Repita las operaciones descritas en las Secciones 6.3 a 6.5 hasta que toda la muestra de 10 gr esté probada y ensayada. Coloque todas las porciones desmenuzadas en el mismo recipiente de contenido de humedad.

6.7. Determine el contenido de humedad del suelo en el contenedor de acuerdo con T 265 y registre los resultados obtenidos.

7. CÁLCULOS

7.1. El límite plástico del suelo es el contenido de humedad determinado en la Sección 6.7, expresado como el porcentaje de la masa seca al horno, y se determina de acuerdo con T 265. Informe el límite plástico como el número entero más cercano.

7.2. Si corresponde, calcular el índice de plasticidad de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico, es como sigue:

$$\text{Índice de plasticidad} = \text{límite líquido} - \text{límite plástico}$$

7.3. Informe los resultados calculados en la Sección 7.2 como índice plástico, excepto en lo siguiente condiciones:

7.3.1 Cuando no se pueda determinar el límite líquido o el límite plástico, reporte el índice de plasticidad como NP (no plástico). Cuando el límite plástico sea igual o mayor que el límite líquido, reportar el índice de plastificación como NP.

8. DECLARACIÓN DE PRECISIÓN

8.1 Esta declaración de precisión se aplica a suelos con un rango de límite plástico entre 15 y 32, probados utilizando el método de enrollado manual.

8.2. **Repetibilidad (un solo operador):** dos resultados obtenidos por el mismo operador en la misma muestra, en el mismo laboratorio, utilizando el mismo aparato deben considerarse sospechosos si difieren por más del 10 por ciento de su media.

8.3 Reproducibilidad (multilaboratorio): dos resultados obtenidos por diferentes operadores en diferentes laboratorios deben considerarse sospechosos si difieren entre sí en más del 11 por ciento de su media.

9. PALABRAS CLAVE

9.1. Atterberg; suelo arcilloso; límite plástico; índice de plasticidad.

1. El dispositivo rodante de límite de plástico está cubierto por una patente (patente estadounidense número 5.027.660). Los interesados están invitados a enviar información sobre la identificación de una alternativa a esta patente a la sede de AASHTO. Sus comentarios recibirán una cuidadosa consideración en una reunión de la Sección Técnica de AASHTO sobre Pruebas de Materiales del Suelo.
2. Bobrowski. L. J., Jr. y D. M. Crikspoor, "Determinación del límite plástico de un suelo mediante un rodillo Device", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 3, septiembre de 1992, págs. 284-287.

6. Sistemas de clasificación de suelos

Introducción. Como los depósitos de suelos son infinitamente variados, no ha sido posible crear un sistema universal de clasificación de suelos para diferenciarlos en grupos y subgrupos sobre la base de todas sus propiedades índice importantes. Sin embargo, se han ideado sistemas útiles basados en una o dos propiedades características. Algunos de estos sistemas han llegado a generalizarse tanto entre los trabajadores de los diversos campos en los que intervienen los suelo, que es necesario que el ingeniero posea al menos un conocimiento general de los mismo. Al mismo tiempo, es indispensable tener presente que ningún sistema describe adecuadamente ningún suelo para todos los objetos que persigue la ingeniería. En Realidad, muchos sistemas ignoran las propiedades más importantes desde el punto de vista del ingeniero especialista en cimentaciones.

Sistemas basados en la textura. Como el tamaño de las partículas es probablemente la característica más evidente de un suelo, es natural que los primeros sistemas de clasificación se hayan basado únicamente en la granulometría. En realidad se ha sugerido muchos de estos sistemas. En la figura 1.7, se muestran varios de los más comunes. El MIT y el Unificado son los más usados por los especialistas en cimentaciones; el sistema AASHTO por los ingenieros de caminos, y el sistema Unificado por los ingenieros encargados de presas y aeropistas.

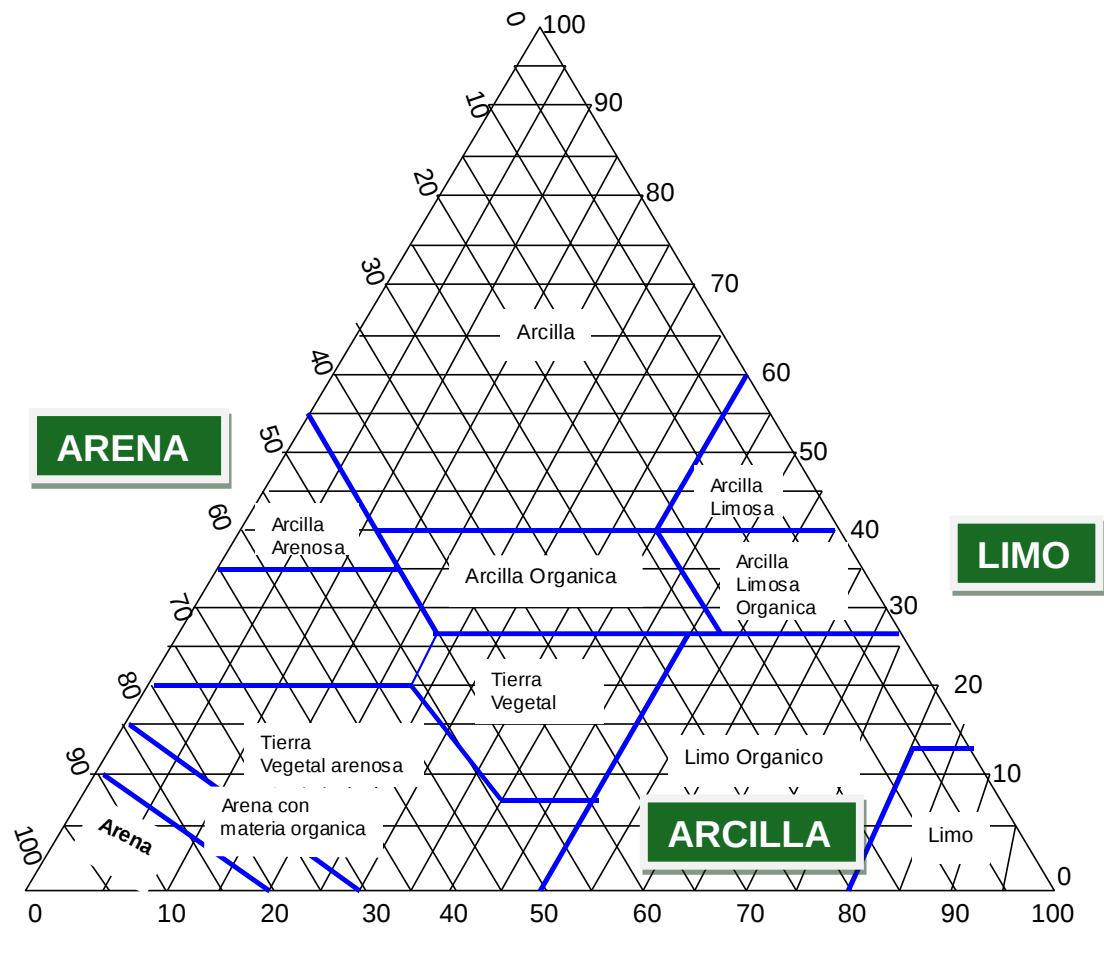
Figura 1.7 Comparación de varios sistemas comunes de clasificación granulométrica

Sistema de Clasificadon	Tamaño de los granos, en mm					
	100	10	1	0.1	0.01	0.001
U.S. Bureau of Solis, 1980-95	Grava		Arena	Limo	Arcilla	
	1		0.05	0.005		
Atterberg	Grava	Arena Gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	
	2		0.2	0.02	0.002	
MIT, 1931	Grava	Arena		Limo	Arcilla	
	2		0.6		0.002	
U.S. Dept. Agr., 1938	Grava	Arena		Limo	Arcilla	
	2		0.05		0.002	
ASSHO, 1970	Grava	Arena	Limo		Arcilla	Coloide
	75	2	0.075		0.002	0.001
Unificado 1953 ASTM 1967	Grava	Arena	Finos (limo y arcilla)			
	75	4.75	0.075			

Para clasificar un suelo usando un sistema basado en la granulometría, usualmente se construye la curva granulométrica y se calculan los porcentajes en peso de las partículas contenidas dentro de cada intervalo de tamaño especificado en el sistema. Así, un suelo que tiene mezclados granos de varios tamaños puede describirse como “3 por ciento de grava, 46 por ciento de arena, 17 por ciento de limo, y 34 por ciento de arcilla, de acuerdo con la clasificación del MIT”.

En el sistema de clasificación granulométrica que usan los científicos del Departamento de Agricultura de los E.U., se especifican sólo tres ordenes de tamaños de las partículas y se excluye el material mayor de 2.0 mm. Por lo tanto, los porcentajes de arena, limo y arcilla pueden representarse en un diagrama triangular (Fig. 1.8). Después que se han determinado estos porcentajes en una muestra dada, el punto que representa esta composición mecánica se localiza en el diagrama triangular y se da al suelo el nombre asignado al área en que está situado el punto.

Figura Diagrama para la clasificación granulométrica usado por el U.S. Department of Agriculture



Si el suelo contiene una cantidad importante de material mayor de 2.0 mm, se añade al nombre correspondiente un adjetivo adecuado, “con grava” o “con boleos”, Aunque el diagrama triangular no revela otras propiedades del suelo aparte

de la distribución granulométrica, se usa mucho en varias formas modificadas por los individuos que trabajan en el campo de la agricultura y de la ingeniería de carreteras.

Desafortunadamente, el nombre correspondiente obtenido del diagrama, no siempre expresa correctamente las características físicas del suelo. Por ejemplo, como algunas partículas del tamaño de la arcilla son menos activas que otras, un suelo al que se da el nombre de arcilla basándose en un criterio de tamaño puede tener propiedades físicas que son más comunes en el limo.

El sistema de la AASHO. Hacia 1298, el Bureau of Public Roads presentó un sistema de clasificación de suelos que todavía usan muchos de los ingenieros de caminos. Este divide a los suelos en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. Como se consideró que el mejor para ser usado en la subrasante de una carretera es un material graduado compuesto principalmente de arena y grava, pero que contenga una pequeña cantidad de excelente cementante arcilloso, a este material se le dio el nombre de A-1. Los suelos restantes se agruparon en orden decreciente de estabilidad. El sistema ha sufrido muchas modificaciones. Al principio, ni los porcentajes de las diferentes fracciones de tamaños, ni las características de plasticidad de la fracción de arcilla estaban especificados definitivamente.

En 1945 se hizo una amplia modificación del sistema del Public Roads por un comité de ingenieros de caminos para Highway Research Board. En 1949, y de nuevo, en 1966, fueron adoptadas modificaciones por la American Association of State Highway Officials, y el método se conoce ahora como sistema AASHO.

Las características de los diferentes grupos y subgrupos, y el procedimiento de clasificación se dan en la tabla 1.7. En el sistema de la AASHO los suelos inorgánicos se clasifican en 7 grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de 12 subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8. Cualquier suelo que contenga material fino se identifica además por su *índice de grupo*; cuanto mayor es el índice, peor es el suelo.

El índice de grupo se calcula con la fórmula:

Índice de grupo

$$= (F - 35)[0.2 + 0.005(W_L - 40)] + 0.01(F - 15)(I_p - 10)$$

1.13

en la que:

F = porcentaje del suelo que pasa por la malla No. 200, expresado como número entero.

W_L = límite líquido

I_p = índice de plasticidad

El índice de grupo siempre se reporta como cero. El índice de grupo se agrega a la clasificación de grupo y subgrupo. Por ejemplo, un suelo arcilloso que tenga un índice de grupo de 25, puede clasificarse como A-7-6(25).

Sistema Unificado. El sistema de clasificación de suelos que más usan los ingenieros especialistas en cimentaciones en Norte América, en la actualidad fue

elaborado por Arthur Casagrande para el Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los E.U. Primero se le llamó sistema de clasificación para aeropistas (CA) , y su objeto original era servir de ayuda en el proyecto y construcción de las aeropistas militares durante la Segunda Guerra Mundial. Después de la guerra fue adoptado con pequeñas modificaciones por el Cuerpo de Ingenieros y por el Bureau of Reclamation de los E.U. con el nombre de sistema *Unificado*. En 1969, el sistema Unificado fue adoptado por la American Society for Testing and Materials como método estándar de clasificación de suelos para obras de ingeniería, ASTM D-2487.

Tabla Clasificación de Suelos y de Mezclas de Agregados de Suelos de la American Association of State Highway Officials
Título AASHO M-145

Clasificación General ^a	Materiales Granulares (35% o menos para la malla No. 200)							Materiales Limo Arcilloso (Pasan más del 35 por ciento la malla No. 200)				
Clasificación Por Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6	
Análisis												
Granulométrico % que pasa:												
No. 10	50 máx											
No. 40	30 máx	50 máx	51 mín									
No. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	
Características de la tracción que pasa la malla No. 40												
Límite Líquido				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	
Indice de Plasticidad	6 máx		<i>N.P.^b</i>	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	
Tipos usuales de los Materiales componentes importantes	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena Fina	Arena y grva limosas o arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		
Clasificación general Como subrasante	De excelente a buena							De regular a mala				

^a **Procedimiento de clasificación.** Teniendo presentes los datos de prueba necesarios, procédase de izquierda a derecha en el cuadro; se encontrará el grupo correcto siguiendo un proceso de eliminación. El primer grupo de la izquierda que corresponda con los datos de la prueba es la clasificación correcta. El grupo A-7 se subdivide en A-7-5 o A-7-6, según el límite plástico. Para $w_p < 30$, la clasificación es A-7-6; para $w_p > 30$, A-7-5.

^b **N.P. significa no plástico.**

De acuerdo con el sistema Unificado, los suelos de grano se dividen en:

1. Grava y suelos gravosos; símbolo G.
2. Arenas y suelos arenosos; símbolo S.

Las gravas y las arenas se dividen separadamente en cuatro grupos:

- a. Bien graduadas, material relativamente limpio; símbolo W.
- b. Material bien graduado con excelente cementante arcilloso; símbolo C.
- c. Mal graduadas, material relativamente limpio; símbolo P.
- d. Materiales gruesos con finos, comprendidos en los grupos anteriores; símbolo M.

Los suelos finos se dividen en tres grupos:

1. Suelos limosos inorgánicos y suelos arenosos muy finos; símbolo M.
2. Arcillas inorgánicas; símbolo C.
3. Limos y arcillas orgánicos; símbolo O.

Cada uno de estos tres grupos de suelos finos se subdivide de acuerdo al límite líquido en:

- a. Suelos finos con límite líquido de 50 o menos; es decir, de baja a mediana compresibilidad; símbolo L.
- b. Suelos finos con límite líquido mayor que 50; es decir, de elevada compresibilidad; símbolo H.

Suelos con elevada proporción de materia orgánica, usualmente fibrosos, como la turba y los fangos de muy alta compresibilidad, no se subdividen y se colocan en un grupo; su símbolo es *Pt*, basándose en la clasificación a simple vista. Las características correspondientes a los diferentes grupos se dan en la tabla 1.8.

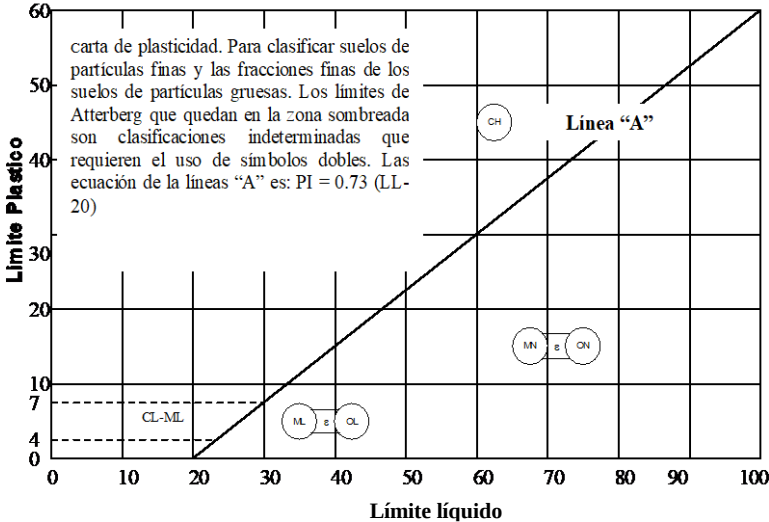
Inconvenientes de las clasificaciones Ingenieriles. Los diferentes sistemas basados en la granulometría, el sistema de la AASHO, y el sistema Unificado se basa en las propiedades, ya sea de los mismos granos o del material remoldeado; y no consideran las propiedades del material tal como se encuentra en la naturaleza. Son estas últimas las que determinan principalmente el comportamiento del suelo durante y después de la construcción.

Por lo tanto, ninguno de los sistemas de clasificación puede servir más que como un punto de partida para la adecuada descripción de los suelos, en las condiciones en que se encuentran en el campo.

Sin embargo, aun con estas limitaciones, gran parte de la información que se refiere a las características generales de un suelo puede inferirse como consecuencia de una clasificación apropiada, dentro de una de los sistemas descritos bajo subtítulos anteriores.

Tabla 1.8 Sistema Unificado de clasificación de Suelos bajo el punto de Vista de la Ingeniería
Título D-2487 de la ASTM

Divisiones Principales	Símbolo del Grupo	Nombres típicos	Criterios para la clasificación	
Suelos de Partículas Gruesas Más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas 50% más de la fracción gruesas se retiene en la malla No. 4	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	Clasificación indeterminada que requiere el uso de símbolos dobles	$C_u = D_{60} / D_{10}$ Mayor que 4
		Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos		$C_z = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.		No satisfacen ambos criterios para GW
		Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla		No satisfacen ambos criterios para GW
	Arenas 50% más de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos	Clasificación según el porcentaje de finos GW, GP, SW, SP, GM, GC, SM, SC	$C_u = D_{60} / D_{10}$ Mayor que 6
		Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos		$C_z = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
		Arenas limosas, mezclas de arena y limo		No se satisfacen ambos criterios para SW
		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla		No se satisfacen ambos criterios para SW
	Arenas Más del 50% de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos	Pasa menos del 5% por la malla No. 200	Los límites de Atterberg quedan debajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4
		Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos		Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A", o el índice plástico es mayor que 7
Suelos de Grano Fino 50% o más pasa la malla No. 200	Limos y Arcillas con Límite Líquido de 50% o menor	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	Clasificación indeterminada que requiere el uso de símbolos dobles	Los límites de Atterberg quedan debajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4
		Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas dobles.		Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A", o el índice plástico es mayor que 7
		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad		Los límites de Atterberg quedan debajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4
		Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos		Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A", o el índice plástico es mayor que 7
	Limos y Arcillas con Límite Líquido mayor de 50%	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas	Clasificación indeterminada que requiere el uso de símbolos dobles	Los límites de Atterberg quedan debajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4
		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad		Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A", o el índice plástico es mayor que 7
		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas		Los límites de Atterberg quedan debajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4
		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad		Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A", o el índice plástico es mayor que 7
	Limos y Arcillas con Límite Líquido mayor de 50%	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas	Clasificación indeterminada que requiere el uso de símbolos dobles	Los límites de Atterberg quedan debajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4
		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad		Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A", o el índice plástico es mayor que 7
Suelos con elevada proporción de materia orgánica	PT	Turba y otros suelos altamente orgánicos.	Identificación visual o manual	



Recuerde la siguiente clave para el Sistema Unificado:

G = gravel = grava
S = sand = arena
W = well = bueno (graduación)
P = poor = pobre (graduación)
C = clay = arcilla
M = mud = limo
O = organic = orgánico
L = low = baja (plasticidad)
H = high = alta (plasticidad)

Sistema de acróstico para recordar a un suelo. Sistema usual en el perfil de suelos para pozos profundos.

El ingeniero que trabaja con suelos y cimentaciones debe memorizar los detalles de cuando menos el sistema de clasificación técnico que parezca más adecuado en el campo de su actividad. Debe entrenarse constantemente en la identificación y clasificación correcta de suelos en el campo de las muestras de suelos con los resultados correspondientes del laboratorio. Ya que todos los sistemas de clasificación de suelos que se acaban de describir son de uso común, conviene estar familiarizado completamente con cada uno de ellos.

Además, también puede obtenerse información útil de fuentes que quedan fuera del campo de la ingeniería civil, especialmente de la geología y de la pedología. El especialista en cimentaciones debe conocer cuando menos la terminología de las descripciones de estas dos ciencias.

**SISTEMA SINTETICO DE CLASIFICACION DE SUELOS
TIPOS DE RELLENO PARA MUROS DE RETENCIÓN⁶**

TIPO	DESCRIPCIÓN
1	Suelo granular con aditamento de partículas finas, muy permeable, arenas limpias y gravas.
2	Suelo granular de baja permeabilidad, con aditamento de partículas de tamaño de sedimento limoso
3	Suelos residuales de piedra, arena fina limosa y materiales granulares con un contenido representativo de arcilla.
4	Arcilla muy blanda, limos orgánicos, limos arcillosos.
5	Arcilla medianamente dura.

⁶ Soil Mechanics in engineering practice, by Terzaghi & Peck.

Presión lateral Del Relleno⁷ pcf

Tipo suelo	nivel	5h:1v	4h:1v	3h:1v	2h:1v
1	30	31	32	33	39
2	36	37	38	40	45
3	45	47	49	50	59
4	100	100	103	105	No aplica
5	120	125	130	133	155

Presión vertical del Relleno⁸ pcf

Tipo suelo	nivel	5h:1v	4h:1v	3h:1v	2h:1v
1	0	5	9	10	17
2	0	5	9	12	20
3	0	6	12	15	70
4	0	0	0	0	0
5	0	17	28	40	No aplica

CARACTERISTICAS PROMEDIO DE SUELOS EN CLASIFICACION SINTETICA

TIPO DE SUELO	DENSIDAD Kg/m ³	ANGULO FRICCION INTERNA ϕ	FRICCION CONCRETO Tan δ
1	1700 – 1900	33 – 40	0.5 – 0.6
2	1900 – 2000	25 - 35	0.4 – 0.5
3	1700 - 1900	23 – 30	0.3 – 0.4
4	1600 - 1900	25 – 35 (NO SATURADO)	0.2 – 0.4
5	1400 - 1700	20 – 25 (NO SATURADO)	0.2 – 0-3

EL ADOBE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Y EL SUELO

El adobe es un material relativamente frecuente en las áreas rurales, pues como material local se ahorra el transporte. Basta con fabricar moldes o maquetas para iniciar una pequeña producción artesanal de auto subsistencia. No es más que lodo que se amolda en rectángulos, donde dicha mezcla se enriquece con rastrojo de milpa o trigo. Estos últimos son fibra para que el bloque de tierra seca no se agriete.

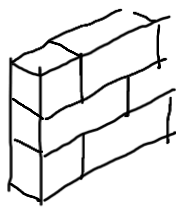
⁷ ibid

⁸ ibid

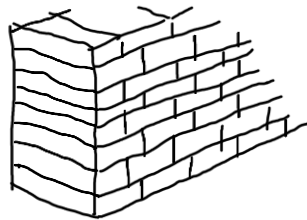
Sin embargo, a raíz del terremoto guatemalteco de 1976, al adobe se le adosa mala fama, que es mal material para la resistencia estructural. Pero puede pensarse que es el resultado de la toma de ventaja de la industria del cemento.

Tan mala fama se le ha dado al adobe, que la normativa de AGIES -Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales- no lo toma en cuenta en sus ediciones de los años 2010 y 2018; pero se consideraba en la edición 2000 – 2001.

¿Pero de dónde esa mala fama? Puede pensarse que se saca ventaja del mal uso del adobe. En el centro de Guatemala en el terremoto de 1976, las viviendas de adobe que colapsan y matan a sus habitantes, generalmente eran viviendas de áreas populares con muros de carga de adobe mal colocados. A continuación, se ilustra.



INCORRECTO, muro esbelto.



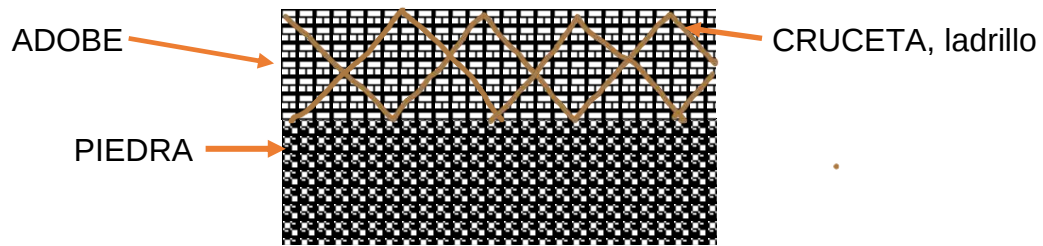
CORRECTO, muro no esbelto

Como se puede ver, el adobe se colocaba de manera vertical y no horizontal, siendo la última la correcta. Como resultado muros de carga esbeltos que no soportan el empuje lateral de las fuerzas de sismo. El desastre era inminente. A raíz de ello los fabricantes de cemento, con la ayuda de la academia y hoy con normativas nacionales prorrumpen: el adobe es malo con las cargas estructurales. Se consolida la construcción con bloques de arena pómez y cemento. Se cierra el negocio.

Sin embargo, con los terremotos de los años 2012 y 2013 que afectan principalmente al departamento de San Marcos, hay n gran número de viviendas construidas con bloques de arena pómez y cemento que fallan. ¿Entonces? ¿Por qué no se pronuncian las industrias de cemento? ¿No es incriminatorio dicho silencio?

Un contra ejemplo sobre la ineptitud del adobe para resistir cargas, en especial de sismos, es el gran número de viviendas del centro histórico de la ciudad de Quetzaltenango. Muros con adobe que resistieron los terremotos de 1902 - algunos- 1976 hasta hoy.

Son paredes de tapial, donde el cimiento y media pared levantado con piedra a hilo -piedra, por piedra para que no queden vacíos u oquedades- para finalizar con adobe al que se le aplican crucetas -breizas- de ladrillo tayuyo y piedra, estos últimos aportan rigidez a los paneles de adobe.



Como se puede ir viendo, el adobe bien aplicado y endentado funciona, no hay que dejarse llevar por los intereses y opiniones de industrias que buscan consolidar un monopolio. Hasta hay cooptación de la academia y normativa.

A continuación, se analizan ventajas y desventajas del adobe, como cualquier material:

Ventajas:

1. Material local, ahorro en transporte
2. Bajo coeficiente térmico, ambiente fresco al calor del medio día y cálido para el frío de atardecer amanecer. Al menos para el altiplano guatemalteco.
3. Ambiente mas agradable y fresco con la debida ventilación.
4. Mejor conservación de alimentos y otros bienes precederos.
5. Si se maneja bien es durable
6. Muros gruesos permiten realizar en sus muros muebles y gabinetes inmersos y tallados dentro de la pared.

Desventajas:

1. Muros muy anchos y pesados
2. Se requiere de un solar o terreno amplio
3. Requiere mantenimiento y remozado, repello en buenas condiciones, es propenso a absorber humedad de la estación de lluvia. Para manejar este problema se puede colocar drenaje francés que vierta en un espacio al aire y con sol.
4. Requiere mayor cantidad de mano de obra
5. Es mas caro.

Fabricación.

Se necesita seleccionar un suelo con buena plasticidad a modo de que se pueda amoldar en una maqueta -por ejemplo, de madera- para dar la forma característica.

Es de dejar al sol seque dichos pedazos de suelo húmedo en los moldes. Se puede agregar rastrojo de tallos de milpa y de trigo a manera de fibra, incluso varillas de madera, a manera de fibra de refuerzo e inhibir agrietamiento. A veces un poco de cal mejora la plasticidad de la masa de suelo húmeda.

Cuando dichos bloques se someten a cocimiento en horno, es el principio de la fabricación de ladrillos. Estos es barro, o suelo de alta plasticidad al que la temperatura o calor endurecen.

Problemas Ilustrativos

1. Una muestra de suelo tiene las siguientes características granulométricas:

Tamaño mm	Porcentaje que pasa
2.0 (No. 10)	100
0.075 (No. 200)	71
0.05	67
0.005	31
0.002	19

El límite líquido es 53 por ciento, y el índice de plasticidad 22 por ciento.
Clasifique este suelo de acuerdo con los siguientes sistemas: Departamento de Agricultura de los E.U.; el de la AASHO; y el Unificado.

Solución. Según el Departamento de Agricultura de los E.U.:

Arcilla 19 por ciento. Limo $67-19=48$ por ciento.

Clasificación (Fig. 1.8): Tierra vegetal

Según la AASHO:

Cálculo del índice de grupo:

$$F = 71$$

$$w_L = 53$$

$$I_p = 22$$

Índice

$$= (71 - 35)[0.2 + 0.005(53 - 40)] + 0.01(71 - 15)(22 - 10) = 16$$

Apoyándose en los valores límite y en la tabla 1.7, el suelo es A-7-5 o A-7-6. Ya que $W_p = 53 - 22 = 31$, que es mayor de 30, la clasificación es A-7-5(16).

Según el sistema Unificado:

Tomando como base la tabla 1.8 (incluyendo la Carta de plasticidad) la clasificación es *MH*.

2. Una muestra de suelo residual originado por arenisca esquistosa tiene una distribución granulométrica de las siguientes características:

Tamaño mm	Porcentaje que pasa
2.0 (No. 10)	100
0.075 (No. 200)	45
0.050	39
0.005	20
0.002	16

El límite líquido es 27 por ciento y el índice de plasticidad es de 6 por ciento.
Clasifique el suelo de acuerdo con los tres sistemas mencionados en el problema 1.

Solución.

Según el departamento de Agricultura de los E.U.

Arcilla: 16 por ciento. Limo: $39 - 16 = 23$ por ciento

Clasificación (Fig. 1.8): Tierra vegetal arenosa. Según la AASHO:

Cálculo del índice de grupo:

$$F = 45$$

$$w_L = 27$$

$$I_p = 6$$

Índice

$$= (45 - 35)[0.2 + 0.005(27 - 40)] + 0.01(45 - 15)(6 - 10) = 0.15, \text{ es decir cero.}$$

Tomando como base los valores de los límites y la tabla 1.7, la clasificación es A-4(0).

Según el sistema Unificado:

Con más del 50 por ciento queda retenido en la malla No. 200, el suelo es grueso, y como más del 50 por ciento de la fracción gruesa es más fina que la malla No. 4, se trata de una arena (tabla 1.8).

Además, como más del 12 por ciento es más fino que la malla No. 200, el suelo debe ser SM o SC. Tomando como base los valores de los límites y la Carta de plasticidad, la clasificación está en la línea de separación de SM-SC.

3. Clasificar el suelo representado por la curva 6 (Fig. 1.2), de acuerdo con la clasificación del MIT. ¿Cuál es el diámetro efectivo de sus gramos y su coeficiente de uniformidad?

Solución. El suelo tiene 12 por ciento de arcilla, $82-12=70$ por ciento de limo, y 18 por ciento de arena, de acuerdo con la clasificación del MIT.

Diámetro efectivo de los granos, $M_{10} = 0.0014 \text{ mm}$

Coeficiente de uniformidad,

$$C_u = 0.04 / 0.0014 = 28.6 .$$

IDEAS DE SUELO Y AGUA EN GUATEMALA

El mapa de Guatemala es como la palma de una mano con los dedos extendidos. Es este un recurso de mnemotecnia o de memoria. Ver las siguientes ilustraciones.



Un tanto forzada la comparación en inicio. Sea el dedo pulgar la zona del Petén y el meñique el litoral del pacífico, ambas regiones planas. La primera con suelos cal arenisca y poca agua superficial y la segunda rica en sedimentos de se suelo arrastrados por ríos de las cumbres volcánicas. En esta última región es importante hacer ingeniería e hidrología de montaña.

La cercanía del océano Pacífico al sur de Guatemala, hace que la región del litoral Pacífico o franja sur (meñique) disponga de altas tasas de humedad, tal como lluvias por convección. Históricamente es una región agrícola, que condiciona a una buena limpia y chapeo para hacer mecánica de suelos y obra de cimentación.

Sea el espacio entre los dedos meñique y anular la Sierra Madre (principal) de Guatemala, donde se localizan los principales volcanes. Es una región con vulnerabilidad sísmica, de inundaciones en las partes bajas, como de actividad volcánica. Todas estas aunadas. Por la cercanía con el océano Pacífico, la parte sur de esta sierra con gran disposición de lluvia orográfica, pero la parte norte es un poco más seca. Menos probabilidades de encontrar nacimientos de aguas de montaña.

El dedo anular es el altiplano de Guatemala, las tierras altas donde se ubican un buen número de ciudades importantes de este país, incluyendo su capital. Área densamente poblada y con explotación agrícola, pero también de recurso hídrico para usos humanos, tal como agricultura y dotación para consumo humano. Se debe sumar la gran cantidad de aguas servidas que contaminan en gran manera los cuerpos de agua, tal como ríos y lagos. Un aspecto importante en gestión de riesgo y vulnerabilidad para renglones de saneamiento.

El espacio entre dedo anular y corazón (o medio) como la Sierra de las Minas, cuya frontera sur al oriente de Guatemala es el principal río de este país, el Motagua, que nace en los altos de Totonicapán y desemboca en el litoral o costa atlántica de Izabal. De dicho río se puede decir que divide a este país en dos partes geográficas, su cauce es una falla geológica, y es una frontera entre dos zonas sísmicas.

El dedo medio o corazón como algunos valles intermedios, que tienden a ser corredores secos. Por ejemplo, el valle de San Antonio Sajcabajcá, Zacualpa, San Miguel Chicaj y Salamá. Esto del departamento del Quiché (bajo) a Baja Verapaz.

El espacio entre el dedo medio y el índice como los Cuchumatanes en su parte central y principal en el norte de Huehuetenango. Allí el mirador de López Olaverri, pasando por la cresta y caer por el camino de las piedras de Captzin.

Sea el dedo índice el valle o espacio bajo de San Pedro Soloma, como de otro valle intermedio tal como el de Santa Eulalia en las partes altas de Huehuetenango. Para caer al espacio entre el dedo índice y pulgar que son las montañas de San Mateo Ixtatán. No quede más que ir al norte en las tierras bajas del norte de Huehuetenango, Quiché y las Verapaces para buscar el río la Pasión y están en el Peten o dedo pulgar de este recurso de memoria para la geografía física descriptiva.

CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO⁹

El objetivo de la **compactación** de un suelo natural, perturbado o removido es **reducir a un mínimo los espacios vacíos** (el volumen de poros) –llenos de aire o agua- .

Gracias al aumento **de la densidad** del suelo es posible alcanzar un **incremento de la capacidad de soportante** y una **menor tendencia a la permeabilidad** del mismo. Paralelamente se reduce el peligro de que suelos cohesivos o semicohesivos absorban agua y, por ende, aumenten su volumen. Por lo tanto, es posible evitar **asentamientos posteriores** y posibles **daños consecuentes** en general.

⁹ FUNDAMENTOS SOBRE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS. Ing. Dirk R. Weissig. WACKER ESPAÑOLA S. A. Deutschland. 1995. Capítulo 3.

Por las razones recién mencionadas, el **control y la verificación** de la compactación del material “suelo” alcanzada en la obra es de **suma importancia**. Los ensayos, los cuales en general sólo son efectuados por personal capacitado y cuyos resultados son analizados por técnicos o ingenieros civiles, son decisivos para la **evaluación de los trabajos de compactación efectuados**.

Es así que sin lugar a dudas sea de importancia que cada uno de los empleados en la obra tenga o adquiera ciertos **conocimientos básicos** sobre la ejecución de este tipo de control.

¿ Ahora, como es posible saber sí y cuándo se ha logrado alcanzar el grado de compactación correcto?

Recuerde: Para poder determinar con precisión el grado de compactación de un cierto suelo, restituido y compactado en una cierta obra, es necesario establecer la **densidad seca** y la **densidad Proctor** de este mismo material.

DENSIDAD SECA Y DENSIDAD PROCTOR

En los años 30, en busca de un método uniforme de control para laboratorio, y con el fin de:

- Evaluar la compactación (densidad) lograda con un cierto tipo de suelo en una obra y
- definir un valor de referencia para la evaluación del grado de compactación alcanzado

el ciudadano norteamericano **Proctor** descubre una **íntima relación entre:**

- el **trabajo de compactación** al cual fuera sometido un suelo,
- la densidad seca y
- el **contenido de agua** de este mismo suelo.

Luego de prolongados e intensivos ensayos, Proctor verifica que – partiendo de un trabajo de compactación o trabajo por impacto constante – la densidad seca máxima de un cierto tipo de suelo es alcanzada sólo a un determinado valor del contenido de agua del mismo.

Este valor máximo de la densidad seca alcanzada para un cierto tipo de suelo se define como “**densidad Proctor**” –el contenido de agua correspondiente como “**contenidos óptimos de agua**”.

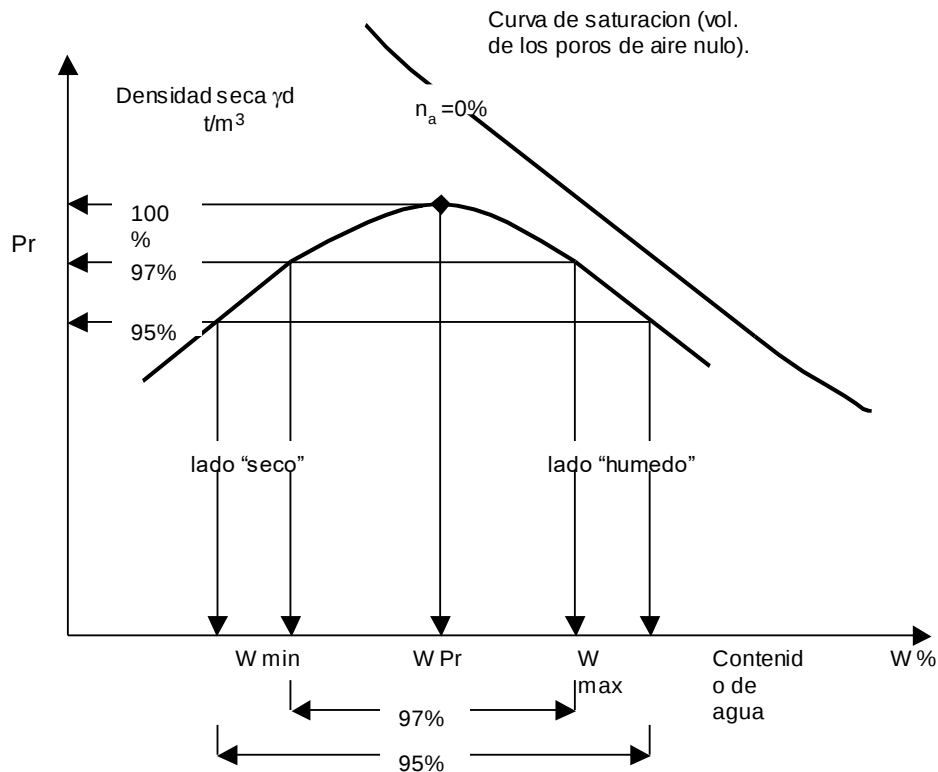
Al mismo tiempo Proctor descubre que el agua contenida dentro de un suelo es de suma importancia para la compactación. Mientras que el suelo comienza a vibrar –debido a la acción del equipo de compactación – las **partículas más pequeñas** comienzan a migrar – en virtud del trabajo introducido con **alta frecuencia** al suelo – hacia los espacios vacíos llenos de aire o agua. Durante este proceso, **el agua** contenida en el material suelo actúa, por así decir, en forma de un **medio deslizante o lubricante**.

Antes de profundizar aún más en el tema, será necesario definir con mayor precisión los términos, arriba mencionados:

Recuerde: La densidad seca (D_d) es la **masa** (peso) de un determinado **volumen** de una muestra de suelo **seca**. El estado seco del suelo sólo es alcanzado después de un prolongado secado de material en hornos de laboratorio. En general, la unidad utilizada para definir la **densidad seca** de un suelo es la t/m^3 (toneladas por metro cúbico).

Recuerde: El **trabajo de compactación**, o sea, el trabajo resultante de una serie de impactos sucesivos, es el trabajo aplicado al material suelo por equipos vibratorios, tales como por ejemplo un vibroapisonador, una plancha vibradora o un rodillo vibratorio, al impactar esto sobre el suelo.

Recuerde: El **contenido de agua o humedad** (ω en %) es la masa (peso) de agua contenida en una determinada muestra de suelo. Esta masa de agua puede ser determinada o medida al secarse un muestra del suelo en un horno de laboratorio. El contenido de agua expresa en forma de un tanto por ciento en peso (%) – parte en peso – de la masa del material suelo seco.



Curva Proctor o curva de relaciones entre humedad y densidad.

A partir de ese momento el método de R. R. Proctor fue universalmente aceptado en el mundo de la construcción, siendo llamado: **Ensayo Proctor Estándar**. Debido a la creciente tendencia a estructuras aún mas pesadas y a las demandas cada vez mas severas en las especificaciones de compactación, se desarrolló con el correr de los años el **Método Proctor Modificado**. En general hoy día este último método esta incluido en las Licitaciones Internacionales, siendo parte de las Condiciones Especiales del Contrato. En ellas se espera valores de compactación de suelos que pueden variar, en general de 95 a 103% densidad Proctor.

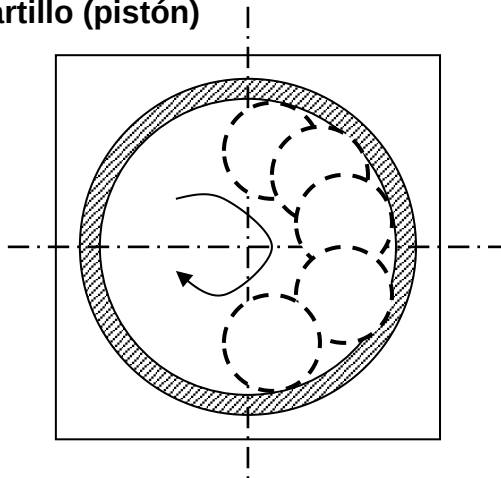
La norma **DIN 18127 Ensayos Proctor** especifica el método para la determinación de la densidad Proctor y contenido óptimo de agua. En Estados Unidos el método Proctor estándar fue adaptado por las normas **AASHTO T-99 y ASTM D698**, mientras que el método Proctor modificado es tomado en **AASHTO T-180 y ASTM D 1557**. En el Reino Unido, tanto Proctor Estándar como Modificado, son adaptados como **Normas Británicas para la Compactación de Suelos, Tests BS 1377** Light Hammer (pistón liviano) **BS 1377** Heavy Hammer (pistón pesado)

Sin embargo, antes de poderse proceder a efectuar controles de compactación, se debe determinar un **valor de comparación (normativo o de referencia)** bajo condiciones en un laboratorio de suelos.

En promedio para en **ensayo Proctor en general**, se necesita una **muestra de mas o menos 16¹⁰ kg**. Confinada en costal de fibra plástica con su respectiva identificación.

Para ello se procede como sigue: en el laboratorio de suelos se colocan pruebas del material a ensayar en forma de capas dentro de un cilindro de acero o cilindro de Proctor. Cada una de las capas es compactada por medio de un pistón normalizado, el cual se deja caer una determinada cantidad de veces, tratando de cubrir toda el área de planta de dicho cilindro a una altura determinada.

distribución golpe martillo (pistón)



¹⁰ MANUAL PARA LABORATORISTA DE SUELOS EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS.
Enrique Anckerman Álvarez. Facultad de Ingeniería. USAC. Pág. 145.

El anterior proceso se repite una cantidad de veces (de 4 a 5) debiéndose agregar previamente a cada ensayo cantidades diferentes y mayores de agua en el suelo a ensayar.

El material así compactado es removido del cilindro después de cada ensayo, para ser pesado, secado en horno

1. durante 24 horas
2. hacer lecturas de peso a intervalos regulares, por Ej, cada hora (1h) hasta encontrar lecturas constantes que indican que no hay mas agua que evaporar.

Posteriormente se vuelve a pesar la muestra seca. Con esa diferencia entre peso húmedo y seco se encuentra la humedad de la muestra.

RECUERDE:

¿qué es Proctor? Método dinámico de simulación en laboratorio de un proceso de compactación de suelo.

Finalidad ú objetivo de Proctor: encontrar la humedad óptima para la compactación de un suelo en obra o campo.

Algunas anotaciones técnicas¹¹

AASHO STANDARD T-99 Proctor normal

Molde 4"	Molde 6"	Martillo
Volumen: $1/30 \text{ pie}^3 = 944 \text{ cm}^3$	Volumen: $1/13.33 \text{ pie}^3 = 2125 \text{ cm}^3$	Diámetro: 2" = 5.08 cm
Diámetro: 4" = 10.16 cm	Diámetro: 6" = 15.24 cm	Caída: 12" = 30.48 cm
Altura: 4.6" = 11.68 cm	Altura: 5" = 12.70 cm	Peso: 5.5 lb = 2.49 kg



Ilustración 1 Martillo Proctor Normal y Modificado

MÉTODOS ALTERNATIVOS:

Método A	Método B	Método C	Método D
Molde 4"	Molde 6"	Molde 4"	Molde 6"
Material < tamiz No. 4	Material < tamiz No. 4	Material < tamiz No. ¾"	Material < tamiz No. ¾"
3 capas	3 capas	3 capas	3 capas
25 golpes por capa	56 golpes por capa	25 golpes por capa	56 golpes por capa

¹¹ MANUAL PARA LABORATORISTA DE SUELOS EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Enrique Anckerman Álvarez. Facultad de Ingeniería. USAC. Pág. 175 - 176.



Ilustración 2 Molde de 4 y 6 pulgadas diámetro

AASHO STANDARD T-180 Proctor modificado

Molde 4"	Molde 6"	Martillo
Volumen: $1/30 \text{ pie}^3 = 944 \text{ cm}^3$	Volumen: $1/13.33 \text{ pie}^3 = 2125 \text{ cm}^3$	Diámetro: 2" = 5.08 cm
Diámetro: 4" = 10.16 cm	Diámetro: 6" = 15.24 cm	Caída: 18"
Altura: 4.6" = 11.68 cm	Altura: 5" = 12.70 cm	Peso: 10 lb



Ilustración 3 Martillos Proctor Normal y Modificado alineados

MÉTODOS ALTERNATIVOS:

Método A	Método B	Método C	Método D
Molde 4"	Molde 6"	Molde 4"	Molde 6"
Material < tamiz No. 4	Material < tamiz No. 4	Material < tamiz No. $\frac{3}{4}$ "	Material < tamiz No. $\frac{3}{4}$ "
3 capas	3 capas	3 capas	3 capas
25 golpes por capa	56 golpes por capa	25 golpes por capa	56 golpes por capa



Ilustración 4 Moldes Proctor 4 y 6 pulgadas desarmados

De este modo se conocen por un lado el peso del material húmedo (**m**) y por otro el peso del material seco (m_d).

Ahora es posible determinar la cantidad de agua contenida en la muestra del material suelo ($m_w = m - m_d$) y, además, el **contenido de agua o humedad (w en %)**. Ya que el volumen (v) del cilindro Proctor es conocido a priori, se puede proceder al cálculo de la **densidad seca** $D_d = m_d / V$ correspondiente a la muestra del material suelo en estudio.

Los pares de valores **densidad seca** (D_d) y **contenido de agua o humedad (w en %)**, determinados encada uno de los ensayos de compactación con la maquina automática para ensayos Proctor, deberán ser representados en un grafico. Al ser conectados los puntos individuales se obtiene una curva llamada **curva Proctor, curva de relaciones entre humedad y densidad** o, simplemente, **curva de control**.

Al estudiar la curva es fácil observar que la densidad seca (D_d) de una muestra con un contenido relativamente bajo de agua (**w en %**) no está ubicado bajo ningún concepto cerca del punto máximo (más alto) de la curva. **El “lubricante”, o sea, el agua contenida en la muestra aún es insuficiente.**

Por otro lado, y en presencia de un **contenido de agua o humedad relativamente alto**, se podrá observar que aquí también la densidad seca obtenida se encuentra por debajo del valor máximo posible. La curva desciende cada vez más rápidamente al aumentar el contenido de agua del material. El **agua** contenida en la muestra no sólo actúa como lubricante sino, a su vez **llena** también los **espacios vacíos y no deja**, como es bien sabido, **comprimir**.

El punto más alto de la curva Proctor el material suelo alcanza su **máxima densidad seca** (D_{Pr}), el grado más alto de compactación y a un **valor contenido de agua muy especial**. El valor aquí alcanzado se denomina **“Densidad Proctor”** o también **“100% densidad Proctor”** y el contenido de agua correspondiente **“contenido óptimo de agua o humedad óptima”**.

El valor de la densidad seca (D_d) obtenido al compactar el material de construcción suelo en la obra por medio de quipos de compactación vibratorios podrá ser comparado ahora con la densidad seca máxima, la densidad Proctor (D_{Pr}), obtenida en el laboratorio de suelos.

$$\text{Grado de compactación en \%} = \frac{D_d}{D_{Pr}} * 100$$

RECUERDE: Esta ecuación nos permite determinar el **grado de compactación porcentual** del suelo compactado en obra en función de la densidad Proctor D_{Pr} obtenida por medio de ensayos en el laboratorio de suelos.

Ejemplos prácticos:

Supongamos que la Condiciones Especiales del Contrato requieran **una densidad d Proctor del 100%** para un cierto sector de la obra civil en construcción. **Una muestra del material a ser compactado** durante la ejecución de la obra es llevada al laboratorio de suelos. En el laboratorio se determina, por medio de los ensayos correspondientes, una **densidad Proctor** o también, un **Proctor (densidad seca máxima) D_{Pr}** de por ejemplo $1.82 t / m^3$.

1. Una vez efectuada la compactación de una capa (tongada) en un sector de la obra, se extrae **una muestra del material suelo compactado** y se lleva al laboratorio de suelo para su análisis. En el laboratorio se determina que la **densidad seca D_d** del material compactado en obra es equivalente a $1.80 t / m^3$. El grado de compactación de la muestra se calcula con la formula ya conocida:

$$D \text{ en } \%_{Pr} = \frac{1,80}{1,82} * 100 = 98.9\% \text{ Proctor}$$

En este caso el trabajo de **compactación** efectuado en esta sector de la obra **no alcanza a cumplir** con el **grado de compactación especificado** en el contrato. Se deberá por ello **efectuar como mínimo una pasada adicional** con el equipo de compactación para llegar al valor requerido.

2. Otra muestra, removida en un sector distinto de la obra y bajo las mismas condiciones, arroja como resultado del control en el laboratorio una densidad seca D_d de $1.82 t / m^3$.

$$D \text{ en } \%_{Pr} = \frac{1,82}{1,82} * 100 = 100\% \text{ Proctor}$$

En este caso el grado de compactación obtenido en obra concuerda exactamente con las especificaciones del Contrato. Ya no se requieren pasadas adicionales con el equipo vibratorio de compactación.

3. Una tercera muestra tomada en obra tiene una densidad seca D_d de $1.87 t / m^3$.

$$D \text{ en } \%_{Pr} = \frac{1,87}{1,82} * 100 = 102\% \text{ Proctor}$$

En este sector de la obra el **grado de compactación obtenido** con los equipos de compactación **es mayor** que el especificado por Contrato. En este caso se deberá considerar si las circunstancias permiten la **reducción del número de pasadas en una o dos**, para poder así ganar tiempo de trabajo, reducir en consecuencia gastos y disminuir el desgaste de los equipos.

RECUERDE: Se deberán efectuar una o más pasadas con los equipos de compactación si el valor del grado obtenido se ubica por debajo del valor especificado en las Condiciones Especiales del Contrato. Si, por otro lado, el valor obtenido se ubica por arriba –es mayor- que el especificado en el Contrato se **deberá considerar la posibilidad de disminuir el número de pasadas** con el equipo de compactación.

Determinación del contenido de agua en base a la curva Proctor

La curva Proctor, o curva de relaciones entre densidad y el contenido de agua, no sólo se presta para la determinación de la densidad Proctor de un determinado tipo de suelo. Si las Condiciones Especiales del Contrato requieren, por ejemplo, una densidad seca de 95% Proctor, es fácil determinar por medio de la curva Proctor, dentro de cuáles límites se podrá mover el contenido de agua o humedad **(en %)**.

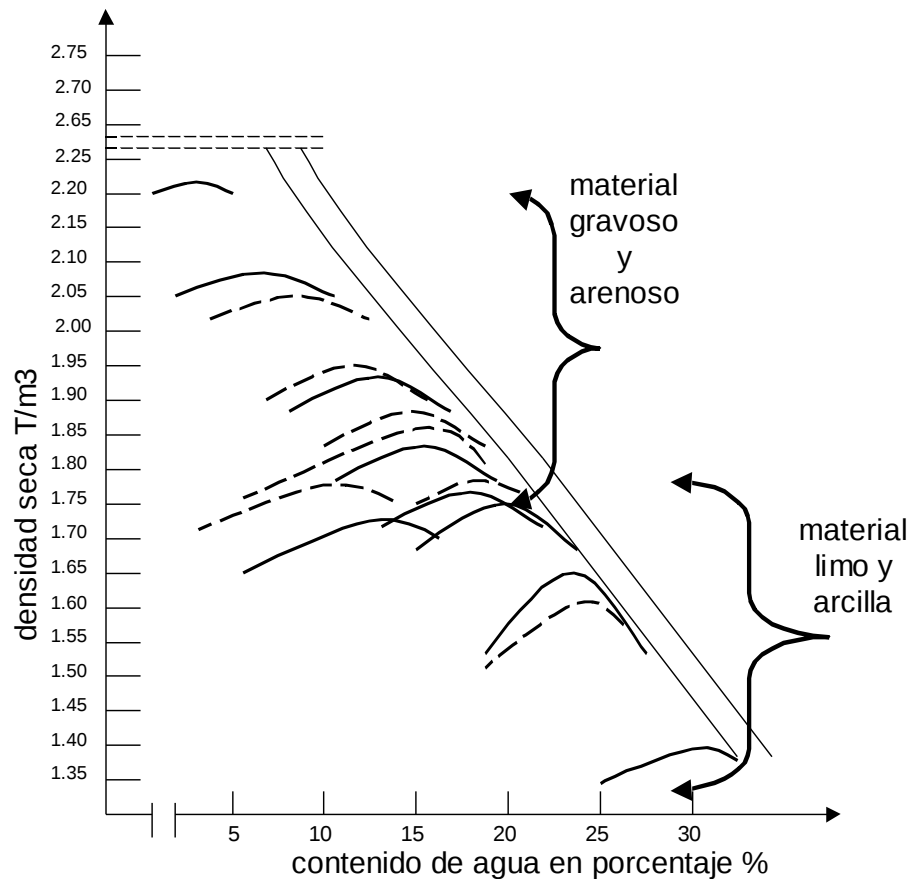
En zonas extremadamente secas o zonas tropicales esta información puede ser de importancia, dado que es posible definir si:

- El contenido natural de agua o la humedad natural del suelo es suficiente, o
- si resulta necesario agregar agua – es decir aumentar el contenido de agua – del material suelo para poder lograr la compactación requerida.

Por otro lado, y bajo condiciones diferentes, la curva de relaciones entre la densidad y el contenido de agua –curva Proctor – nos informa si resulta necesario secar el material, por ejemplo por medio de trabajos de arado, debido al contenido de agua excesivo del mismo.

RECUERDE: El representar los pares de valores “densidad seca / contenido de agua” en forma de un gráfico – la curva Proctor- cumple con diferentes finalidades, como, por ejemplo:

- determinar los valores de referencia de la “**densidad Proctor**” y el “**contenido óptimo de agua**” para la compactación en obra;
- reconocer los límites dentro de los cuales se podrá mover el contenido natural de agua del suelo a trabajar para obtener una cierta densidad seca del material una vez compactado;
- determinar los valores de densidad seca que se pueden obtener en base a un cierto contenido de agua del material
- verificar el grado de compactación de un suelo natural, no perturbando y poder juzgar si el contenido natural de agua admite una compactación adicional.



CBR California Bearing Ratio

¿Qué es? Es una simulación de penetración de suelo en laboratorio.

Objetivo: encontrar el porcentaje de carga de penetración de un suelo cualquiera con respecto a una base de pedrín triturada.

La idea es que los neumáticos o llantas de los vehículos en movimiento generan penetración móvil sobre el pavimento de manera constante. La pequeña área que ejerce presión de penetración es el área de contacto del neumático con el suelo, y es lo que se replica en el laboratorio.

Prensa con molde de Proctor donde se aplica carga para pistón de penetración.
CBR

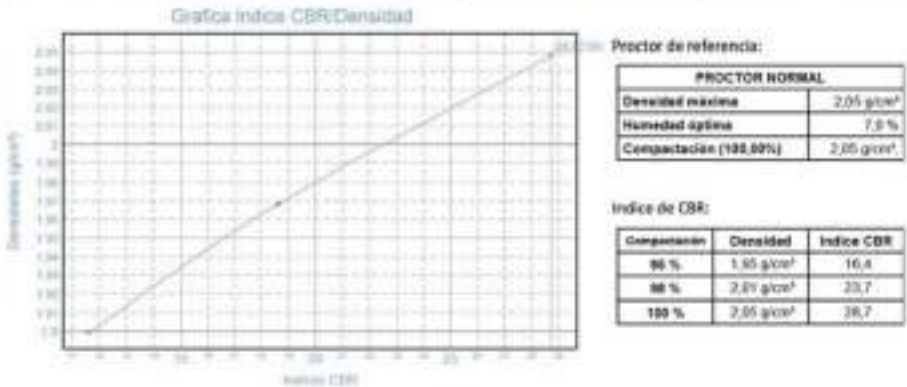


Número y porcentaje de comparación para uso en construcción de caminos.

No. C.B.R.	Clasificación general	Uso	SUCS	AASHTO
0 - 3	Muy pobre	Sub - base	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3 - 7	Muy pobre a regular	Sub – base	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7 - 20	Regular	Sub – base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Sub – base y base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A25, A5, A26
>50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A24, A3

Se relaciona el CBR con Proctor.

	1	2	3
Energía compactación (%)	100% (98 golpes)	50% (30 golpes)	25% (15 golpes)
Densidad (g/cm³)	2.05 g/cm³	1.97 g/cm³	1.95 g/cm³
Humedad (%)	6.9 %	6.6 %	6.6 %
Absorción (%)	3.6 %	3.9 %	4.2 %
Hinchamiento (%)	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Índice C.B.R.	38.7	18.6	11.8



Es una prueba de penetración para comprobar las características mecánicas de un suelo. Fue desarrollado por el Departamento de Transportes de California antes de la Segunda Guerra Mundial.

La prueba consiste en medir la presión necesaria para hacer penetrar un pistón en una muestra de suelo. Se calcula en un laboratorio, haciendo penetrar un pistón en una muestra de suelo, a velocidad constante de 1,27 mm/minuto a una profundidad de 0,1 y 0,2 pulgadas. La muestra de suelo se compacta en un molde cilíndrico de 15,24 cm de diámetro y 12,7 cm de altura. La humedad que tenga la muestra de suelo ha de ser la máxima que probablemente tenga la explanación una vez que la carretera o camino esté en servicio. La prueba dura 10 minutos.

El índice CBR se ha desarrollado para medir la capacidad de carga de los suelos a la hora de construir carreteras, aunque también se puede utilizar para caminos rurales.

Una tierra cultivada puede tener un CBR de 3, un suelo arcilloso 4,75, un suelo arenoso 10, y las rocas por encima de 80. No es raro que un suelo bien compactado posea valores superiores a 100.

Métodos para la toma de muestra y control de la compactación en la obra.

Para el cálculo de la densidad seca y del grado de compactación D en $\%_{Pr}$ del suelo compactado, se hace necesario **tomar muestra del suelo compactado en la obra**. Este método **directo y concluyente** es llevado a cabo en general, y por razones de costos, sólo en forma **puntual** en **áreas seleccionadas**.

En la República Federal Alemana, por ejemplo, la **ZTVE-StB** (Normas técnicas y Directivas Adicionales para Trabajos de Movimientos de tierras en obras Viales) fija un **número mínimo de muestras** a tomar para los trabajos en las obras viales. De la misma manera, en las **Condiciones Especiales de Contrato**, condiciones estas que formaron parte de la mayoría de los **Documentos del Contrato** internacionales, se especifica una cantidad mínima de muestras para el control de la compactación. En general los Contratos especifican una muestra por cada tanto metro cuadrado de material compactado en cada tongada (capa).

RECUERDE: Para poder evaluar el grado de compactación de un suelo compactado en obra se deberá determinar por un lado la **densidad Proctor** en el laboratorio de suelos y por el otro la **densidad seca** del material efectivamente **compactado en obra**.

Tipo de Suelo		Métodos de control	
		Métodos apropiado	Método no apropiado
Suelos Cohesivos	Sin partículas gruesas	Método de extracción de testigos- y todos los demás métodos	Ninguno
	Con partículas gruesas	Todos los métodos sustitutivos	Métodos de extracción de testigos
Suelos no cohesivos	Arenas finas a gruesas	Métodos de extracción de testigos	Ninguno
	Mezclas de arena y grava	Métodos de sustitución por balón de agua, por engrudo, por yeso o método de sustitución por agua	Métodos de extracción de testigos
	Grava pobre en arena	Métodos de sustitución por balón de agua, por yeso o por agua	Métodos de extracción de testigos, de sustitución por arena y por bentonita
Piedras y bloques		Excavaciones de ensayo, método de sustitución por agua	Todos los demás métodos

Selección del método de ensayo para la determinación del volumen de una Muestra.

La variedad de métodos existentes para la extracción de muestra de suelos en la obra es amplia. La norma alemana **DIN 18125, BL 2 aconseja** la aplicación de los diferentes métodos en relación con el tipo de suelo a analizar. Algunos ejemplos han sido enumerados en la tabla anterior.

Una Muestra del suelo deberá ser extraída de una cierta y determinada posición – en general a ser definida por el inspector de obra – de la tongada o capa compactada en la obra para cada uno de los métodos diferentes recomendados en el tabal anterior.

- El volumen de la muestra es **conocido a priori** (p. Ej. Método de extracción de testigos) o, alternativamente, deberá **ser determinada en el lugar** (p. Ej. Método de sustitución por balón de agua o arena). Las muestras extraídas deberán ser remitidas al laboratorio de suelos donde se **determinarán** por medio de **mediciones o cálculos** los valores definidos a continuación:

- Peso húmedo m
- Peso seco m_d
- Peso del agua $m_w = m - m_d$
- Contenido de agua en % w en %
- Densidad seca D_d
- Densidad Proctor D_{pr} (ya determinada con antelación).

Con los dos últimos valores, D_d y D_{pr} y con la fórmula ya vista en el capítulo 3 se hace posible el cálculo del **grado de compactación en %_{pr}**, pudiéndose

consecuentemente evaluar el estado actual de la compactación del suelo en ese punto específico de la obra.

A continuación, describiremos en detalle algunos de los métodos más usuales para la extracción de muestra y la determinación volumétrica de los mismos.

Métodos de extracción de testigos

Una vez que el suelo compactado ha sido raspado hasta una profundidad de aprox. 50 mm con, por ejemplo, una regla de acero, se deberá fijar con clavos especiales (N) la placa base de forma circular (K), con su tubo de guía integrado (F), al suelo.

El cilindro de perforación (EZ) consiste de un tubo de acero sin costuras de alta precisión y lleva incorporado un canto de corte interior. Este cilindro, cuyo volumen es perfectamente conocido, se introduce dentro del tubo guía con el canto de corte dirigido hacia abajo.

Luego se deberá colocar a presión el cilindro de perforación preferiblemente dentro del suelo **no alterado**.

Si esto no fuera posible, se deberá hincar el cilindro con una masa pesada hasta aprox. 10mm debajo de la superficie del suelo.

Como paso siguiente el cilindro de perforación deberá ser extraído cuidadosamente del suelo con una pala, para luego ser colocado sobre una base sólida. Las porciones de suelo que sobresalen de los bordes del cilindro deberán ser removidas con sumo cuidado y capa por capa, utilizándose para ello una regla rasante de acero o un cuchillo, hasta obtener una superficie al ras (coincidente) con los bordes superior e inferior del cilindro. Luego se procede a cerrar el cilindro de ambos lados con sendas tapas numeradas, debiéndose fijar esta última con una cinta autoadhesiva para garantizar un cierre completamente estanco.

RECUERDE: Errores típicos cometidos durante el ensayo o durante el cálculo pueden hacer variar el resultado del grado de compactación, por ejemplo:

- pérdida de una parte de la muestra debido a una extracción inadecuada del cilindro del suelo
- pérdida de una parte de la muestra al emparejar la superficie de la muestra con los bordes superior e inferior del cilindro
- aflojamiento del material a investigar durante el proceso de hincado del cilindro dentro del suelo compactado
- aplastamiento longitudinal del cilindro de perforación, debido al hincado del mismo en suelos muy duros. El aplastamiento conduce a una disminución –frecuentemente desapercibida– del volumen del cilindro.

Cada uno de los errores recién mencionados conduce a valores de la **densidad seca más bajos** y, por ende, a una **reducción del grado de compactación** en comparación a la compactación realmente alcanzada en la obra.

RECUERDE: la correcta y adecuada extracción de las muestras y la subsecuente determinación volumétrica, conforme a las reglas de arte, es de suma importancia debido a las razones mencionadas anteriormente.

Método de sustitución por balón de agua

También en este caso se deberá aplanar en primer lugar el suelo compactado con una regla metálica. Luego de colocada y fijada la placa base anular, se deberá extraer material suelo ubicado dentro del anillo de la base hasta una profundidad de aproximadamente 50 mm. Material suelto deberá ser removido por medio de un cepillo de mano o un pincel. Luego se coloca el equipo del balón de agua sobre la placa base anular y, una vez abierta la válvula de purga, se empuja el pistón hacia abajo por medio de las empuñaduras. Una vez que el balón (globo) de agua queda firmemente apretado contra el suelo y que el nivel del líquido dentro de la barra entre el pistón y las empuñaduras haya ascendido hasta la marcación correspondiente, se efectúa una lectura L_o en el vernier.

Una vez efectuada la lectura L_o , se deberá llevar hacia arriba el pistón, inclusive el globo, para luego colocar el equipo dentro de la caja de transporte. El material suelo que se encuentra ubicado dentro de la apertura de la base anular deberá ser excavado con herramientas apropiadas hasta una profundidad equivalente a 1 o 1, 5 veces el diámetro interior de la apertura de la placa base. El material así extraído se deposita dentro de un recipiente de almacenamiento con tapa. Los costados de la excavación deberán ser lo más verticales posible y no deberán extenderse por debajo de la placa base. El material suelo adherido a las paredes y en el suelo de la excavación deberá ser removido por medio del pincel y agregado al material dentro del recipiente de almacenamiento, el cual deberá ser cerrado en forma estanca para evitar la entrada de aire o un escape de la humedad.

Una vez concluido este trabajo se vuelve a ubicar el equipo del balón de agua sobre la base para efectuar una nueva medición, tal como ya fuera descrito anteriormente. El balón lleno de agua es empujado nuevamente, de modo firme, hacia abajo, ahora contra las paredes y la base de la excavación. Luego se procede a efectuar una nueva lectura L_1 .

El volumen a determinar de la excavación es equivalente al volumen de líquido desplazado por el pistón entre las dos mediciones:

$$V = (L_1 - L_o) * F$$

donde F es una constante para el equipo de ensayo a balón de agua y depende de la superficie del pistón.

RECUERDE: Errores típicos de manejo u cálculo son:

- purgado defectuoso del balón de agua
- presión insuficiente entre el balón de goma y las paredes de la excavación (el nivel del líquido no llega hasta la marcación dentro de la barra)
- pérdida de material excavado al pasarlo al recipiente de almacenamiento
- pérdida de humedad del material en áreas tropicales por no cerrar en forma correcta el recipiente de almacenamiento.

Método equivalente de arena

Luego de fijar la base anular de acero correspondiente sobre el suelo compactado, se efectúa una excavación similar a la efectuada para el ensayo del balón de agua. Una vez terminada la excavación se coloca sobre la base anular y por encima de la excavación un cono doble, lleno en su parte superior con arena fina de ensayo, calibrada y pesada con exactitud. Después de abrir la válvula la arena fluye hacia abajo hasta llenar completamente la excavación y el cono inferior. Luego se cierra la válvula, se remueve el cono doble y se vuelve a pesar con exactitud. En base a la diferencia entre las dos pesadas se puede determinar por cálculos el volumen de arena introducido dentro de la excavación

RECUERDE: Errores típicos de manejo y cálculo durante la determinación volumétrica por el método equivalente de arena son:

- pérdida de parte de la muestra
- uso de arena no calibrada (volumen erróneo)
- vibraciones en el suelo durante el ensayo (la arena es parcialmente compactada) debido a, por ejemplo, el tráfico de camiones de transporte de material.

Ensayo con sonda nuclear

Se denominan “métodos radiométricos” aquellos en los cuales las radiaciones de isótopos radiactivos son medidas con la ayuda de detectores. Los **valores medidos** por los detectores son electrónicamente correlacionados con la **densidad** y el **contenido de agua (humedad)** del suelo penetrado por los rayos. La **ventaja más importante** de este método de control, en el cual los valores medidos son de **alta precisión y confiabilidad**, es el **tiempo de medición extremadamente corto**. Al contrario de los métodos mencionados anteriormente, para los cuales el tiempo invertido en la determinación del grado de compactación en $\%_{pr}$, inclusive los trabajos de laboratorio son de aproximadamente 24 horas, el método radiométrico permite la determinación de los valores en un tiempo total de aproximadamente 5 minutos.

Una segunda ventaja es que durante el control del grado de compactación no resulta necesario remover el suelo a ensayar ni tampoco efectuar ensayos destructivos en aplicaciones sobre capas asfálticas.

En la mayoría de los países del mundo el uso y manejo de las sondas nucleares sólo le es permitido a personas que han sido autorizadas oficialmente por un ente del gobierno para este tipo de trabajos.

Métodos de la sonda de penetración

La sonda de penetración se utiliza especialmente en presencia de suelos con un alto porcentaje de partículas finas.

La **principal ventaja** de este **método de medición indirecto** es el **control relativamente rápido en una variedad de puntos diferente** de una superficie o tongada ya compactada; otro aspecto es el fácil manejo por ejemplo en pendientes o en zonas estrechas como por ejemplo zanjas.

Sin embargo se debe prestar atención que

- al estar en presencia de condiciones del suelo variables
- al existir contenidos de agua diferente
- al haber suelos mixtos con piedras
- en el caso de suelos semi-a altamente cohesivos

este método no permite una definición inequívoca sobre el grado de compactación alcanzado por el material compactado en la obra.

Es posible **controlar** la resistencia a la penetración de una tongada (capa) **en toda su profundidad**, si se comparan los números de golpes necesarios para penetrar con la sonda de penetración (punta + 1m) dentro del material de relleno.

El método de la sonda de penetración permite una verificación rápida del material compactado en obra siempre que el material compactado en obra varíe sus propiedades a lo largo de grandes áreas o la obra entera. Una vez alcanzados los valores de densidad requeridos por el Contrato –determinados por medio de la densidad seca del material (por Ej. Con alguno de los métodos descritos anteriormente) o por medio del método de la placa de carga – se efectúan paralelamente mediciones con la sonda. En consecuencia, se conoce el número de golpes mínimos requeridos para ese material, a una profundidad de por Ej. 40, 60 o también 80 cm de profundidad. **De allí en más es posible reconocer rápidamente aquellas áreas en la cuales no se ha llegado a la densidad requerida** y se podrá, por ende, proceder a una **compactación adicional** en forma seleccionada.

Método Clegg para control de suelos

El equipo Clegg para control de suelos – un método utilizado a menudo en Gran Bretaña – consiste básicamente de un martillo de compactación modificado, con un peso de 4,5 Kg., ubicado dentro de un tubo. Al liberar el martillo a partir de una cierta altura, este cae a través del tubo, impactando sobre la superficie de soporte y perdiendo su aceleración en forma proporcional a la rigidez del material dentro del área de impacto.

Una acelerómetro conectado al martillo genera una carga eléctrica. La carga es medida y registrada por una unidad digital, o sea que la unidad registra el pico de la aceleración negativa. El nivel pico obtenido después de efectuarse el cuarto impacto del martillo se denomina **“valor de impacto”**.

Para efectuar el ensayo se remueve con el pie material suelto y se coloca el tubo verticalmente sobre el punto a medir o controlar. La unidad digital, sostenida en

una mano, deberá estar conectada y en funcionamiento. Luego se procede a levantar el martillo hasta la altura indicada en el tubo (450mm) para luego dejarlo caer libremente, Este proceso se repite cuatro veces en el mismo lugar, bebiéndose registra (tomar nota) del **valor de impacto** de la última caída.

Esta técnica permita efectuar una cantidad grande de ensayos en un corto período de tiempo; 250 ensayos han sido efectuados sin problemas con este equipo en el correr de una mañana o tarde.

El valor de impacto es una indicación de la resistencia del material suelo y demuestra una buena correlación con los resultados del CBR. Es por ello que los valores determinados con el método por impacto Clegg pueden ser utilizados en forma similar a los valores determinados con ensayos CBR efectuados en el laboratorio y en la obra.

El equipo Clegg puede ser utilizado para determinar en la obra misma aquellas áreas en las cuales aún no se ha alcanzado el valor de compactación requerido y, asimismo, para evitar sobrecompactaciones. Trabajos de compactación defectuosos pueden ser determinados y corregidos a medida que ocurren. Una calibración del material en ensayo permite especificar un valor de impacto, a un cierto grado de contenido de agua (en %) , para llegar al valor de compactación requerido.

El equipo es ampliamente utilizado para ensayar diseño y construcción de pavimentos, subrasantes y trabajos de movimientos de tierras y también para confirmar una compactación uniforme a lo largo de grandes trechos. En el caso de la compactación de suelos en zanjas, y una vez colocados caños o tubos, es posible efectuar rápidamente mediciones de control para poder asegurarse que los niveles de compactación hayan alcanzado los niveles especificados por los Contratos.

Métodos de ensayo con placa de carga

A menudo se efectúan ensayos con una placa de carga para determinar, en forma indirecta, el grado de compactación de un suelo de relleno.

También aquí se carga el suelo a lo largo y ancho de una tongada (capa) y en sitios diferentes.

Se mide el **asentamiento** del material en un punto al ser aplicada una cierta **presión** con un cilindro hidráulico sobre el suelo por medio de una placa circular apoyada en el suelo.

Se repite el proceso. Luego se relacionan los dos pares de valores por medio del cálculo del **módulo de deformación** E_{v1} y E_{v2} . Las normas requieren – según tipo de suelo y profundidad de la subrasante - **una valor mínimo** E_{v2} .

Numéricamente prefijado y un **valor máximo para la relación** E_{v2}/E_{v1} .

Hemos optado por no entrar en mayores detalles, dado que este tipo de ensayo sólo podrá ser efectuado por un experto y de acuerdo con las normas alemanas **DIN 18 134** o normas americanas equivalentes.

La gran ventaja de éste método es la inversión en tiempo y equipo requerido para efectuar el ensayo. Se tarda aprox. 1 hora por punto de ensayo, incluyendo montaje y desmontaje del equipo. Además, se necesita un contrapeso o punto de apoyo superior para el cilindro hidráulico – en general un camión cargado de material. Además **no es posible obtener valores reales** en el caso de **suelos**

cohesivos reblandecidos, aún si estos hubieran sido compactados anteriormente hasta el grado de compactación requerido.

RECUERDE: El grado de compactación de un material compactado puede ser determinado (medido) en forma directa o indirecta. El método a utilizar depende principalmente del tipo de material a ser controlado o investigado.

En el caso de los métodos directos – con excepción del método de la sonda nuclear – se toma una muestra directamente de la tongada (capa) compactada.

En el laboratorio se determina a continuación la densidad seca de la muestra, para luego comparar la misma con el valor de la densidad Proctor previamente establecido.

En el caso de los métodos indirectos se deberá establecer una serie de valores, los cuales sin embargo no siempre se dejan relacionar en forma físico-matemática con la densidad seca del material.

DENSIDAD DE CAMPO CON PICNÓMETRO DE ARENA

Es uno de los métodos más conocidos y comunes, como de los más exactos. Pero requiere de una gran habilidad del operario o laboratorista para la búsqueda de resultados. Es un método lento, tedioso y engorroso. Los resultados de densidades de campo se entregan en el momento, no son para llevar a un laboratorio, puesto que es de verificar en obra la compactación de la subbase y base. A continuación el equipo básico:

1. **Picnómetro de arena:** de 4 pulgadas diámetro para suelos comunes y finos y de 6 pulgadas diámetro para suelos granulares y de piedrín triturado.
2. **Plato** a juego con picnómetro en 4 y 6 pulgadas diámetro.
3. **Balanza:** para pesar picnómetro de arena lleno.
4. **Arena calibrada**, uniforme y de densidad conocida.
5. **Brocha o escobilla:** para limpieza de los puntos de densidad de campo.
6. **Clavos de lámina:** para sujetar el plato sobre muestra compactada.
7. **Martillo:** para aplicar clavos de sujeción del plato y para apoyo en sacado de muestra.
8. **Punzón, formón y cincel:** para picar y aflojar suelo de muestra en el círculo del centro del plato.
9. **Taras o recipientes:** para colocación, pesado y secado de muestras de campo.
10. **Espátula y cocharoncillo:** para sacar muestra y colocar en taras y recipientes.
11. **Estufa y horno:** de temperatura calibrada para secado de muestras.



Se comienza con la limpieza del punto seleccionado a tomar muestra de compactación. La limpieza consiste en limpiar con la brocha toda basura y material suelto para no afectar el resultado. Se buscan áreas lo más plano posible, para que secciones del plato no queden con vacíos entre este y el suelo compactado. Se procede a colocar el plato y sujetarlo clavando los clavos de lámina, al menos 2 en diagonal.



Ahora se pesa el picnómetro con suficiente arena calibrada para hacer las densidades de campo



La arena para picnómetro debe ser de naturaleza silícica (cuarzosa o granítica que no absorbe humedad fácilmente), limpia, libre de materia orgánica y con características inertes similares. Las especificaciones comunes incluyen un tamaño de partícula que pase el tamiz de 600 micras (No. 30) y sea retenido por el de 300 micras (No. 60), o que pase el tamiz de 1.18 mm (No. 16) y sea retenido en el de 600 micras (No. 30). Arena de densidad conocida.



Entre el picnómetro y el cono que encaja al plato hay una válvula para cerrar y abrir el paso de la arena, verificar que esté cerrado para no alterar el peso, que se abra cuando sea necesario.



Válvula cerrada



Válvula abierta



Colocación del cono en su planto, se abre la válvula y se golpea suavemente para que la arena llene todo el volumen posible



Se retira el picnómetro del cono y se procede a extraer muestra siguiendo la circunferencia interior y central del plato. Se pica y corta el suelo lo más parejo

posible para la toma de muestra de suelo compactado. Con una profundidad de unas 2 pulgadas para dicho cilindro, que sale a pedazos. Se debe dejar ese corte de extracción de muestra limpio de material suelto.



Resumiendo, el procedimiento

1. Se tiene una arena calibrada de picnómetro de densidad relativa de **1.65**, que equivale a **1.65 gr/cc**
2. Se limpia de arenilla suelta y basura el punto de análisis.
3. Se coloca y sujeta el plato de picnómetro.
4. Se pesa el picnómetro con arena y tiene un peso de 6000 gramos, el **peso 1**.
5. Se coloca el cono del picnómetro sobre su respectivo plato.
6. Se abre la válvula o llave del picnómetro para que la arena llene el cono de este hasta la superficie del suelo donde se tomará la muestra. Se cierra la válvula o llave del picnómetro.
7. Se pesa el picnómetro nuevamente y si el **peso 2** es de 4470.
8. El peso de la arena dentro del cono del picnómetro hasta la superficie de la muestra a extraer es de: $6000 - 4470 = 1530$ gramos = **Peso1 – Peso 2**.
9. Se limpia y retira la arena calibrada del picnómetro dentro y en el plato, revisado que se puede recuperar (sin contaminación con el suelo compactado, en inspección visual) para posteriores tiradas de picómetro. Esta se recolecta en un recipiente definido para este uso.
9. Se procede a cortar y extraer la muestra. Por ejemplo, al excavar cercano a las 2 pulgadas de profundidad con la muestra del círculo del plato, se pesa dicha **muestra en un peso de 2000 gramos**. Es la muestra de densidad de campo. Se deja el agujero cilíndrico limpio de material y arena suelta.
10. Se vuelve a colocar el picnómetro de arena, se abre de nuevo la llave para que llene el cono del primero más el volumen de la muestra retirada. Se cierra la llave del picnómetro nuevamente.
11. Se pesa por tercera vez el picnómetro y por ejemplo el **peso 3** es de 880 gramos.

12. El peso de la arena dentro del cono dl picnómetro más el volumen de la muestra retirada es de $4470 - 880 = 3590$ gramos = Peso 2 – Peso 3.

13. Sea el peso de la arena del picnómetro de la arena en el volumen retirado de muestra compactada como $= 3590 - 1530 = 2060$ gramos, que es igual a:

$$\text{Peso Muestra} = (\text{Peso 2} - \text{Peso 3}) - (\text{Peso 1} - \text{Peso 2}) = 2P_2 - P_3 - P_1$$

$$PM_{Sej.} = (4470 - 880) - (6000 - 4470) = 2 \times 4470 - 880 - 6000 = 2060 \text{ gr}$$

14. Entonces el volumen de la muestra retirada es =

$$\frac{2060 \text{ gr}}{1.65 \text{ gr/cc}} = 1248.5 \text{ cc}$$

15. La densidad de la muestra compactada retirada es de: $2000 \text{ gr} / 1248.5 \text{ cc} = 1.60 \text{ gr/cc} = 1600 \text{ kg/m}^3$. La anterior muestra es a la que se debe determinar en el mismo lugar de la extracción su porcentaje de humedad y comparar esta densidad y humedad con los resultados de Proctor.

16. Si los datos del ensayo Proctor indican una densidad de 1.61 gr/cc y una humedad del 14%, si la densidad de campo es de 1.60 gr/cc y una humedad de campo del 13%. Así la compactación está a: $100 \times 1.60 / 1.61 = 99\%$ y la humedad a: $100 \times 13 / 14 = 93\%$, es decir a un 7% bajo lo pedido. La compactación casi es perfecta, lo que hay que bajar a un 2% de variación es la humedad, que debe ser del 14%.

La selección correcta de equipos para la compactación de suelos.

¿Cuáles son los factores que influyen sobre la compra y las aplicaciones de equipos de compactación?

Estas preguntas no siempre pueden ser contestadas con facilidad.

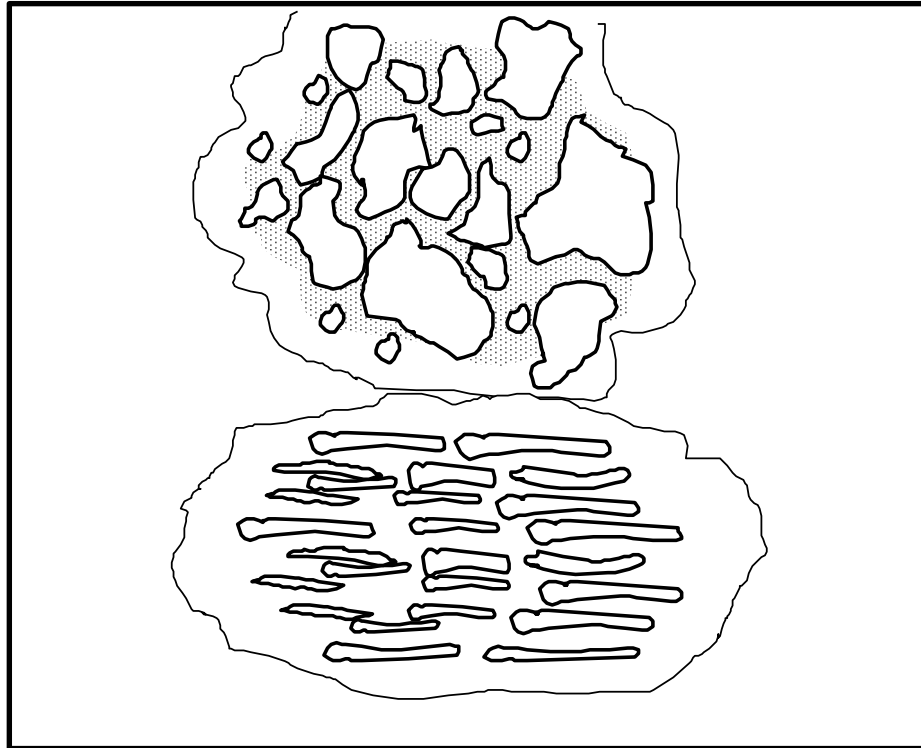
Se deben considerar toda una serie de factores, factores estos que forman parte del “acta personal” del material a compactar, tales como por ejemplo tipo de suelo, forma y rugosidad de la partícula individual como también la distribución granulométrica.

Adicionalmente se deben considerar las condiciones específicas de la obra, el porcentaje de compactación prescripto del material a ser compactado (densidad Proctor), además de las Condiciones Especiales del Contrato.

Los factores recién mencionados deberán ser analizados para poder determinar:

1. Qué tipo de máquina es la más adecuada según el trabajo a efectuar y
2. Con que equipo se logra alcanzar, en la forma más económica, los resultados requeridos.

Al **decidir sobre un equipo de compactación**, se deberá definir, ante todo, desde el inicio, si el equipo va a ser utilizado predominantemente para **suelos granulares (no cohesivos) o suelos cohesivos!**



Suelos granulares y cohesivos

Suelos no cohesivos

RECUERDE: Los **suelos no cohesivos** (granulares) se dejan compactar de mejor forma y lo más económicamente posible por medio de la **vibración**

La **vibración** (compactación dinámica) reduce la fricción entre las partículas individuales del suelo, permitiendo simultáneamente una redistribución de estas mismas partículas.

Gracias a la vibración se logran **reducir los volúmenes de poros** (espacios vacíos) y las inclusiones de agua y aire son desplazadas hacia la superficie. Obteniéndose paralelamente una **mayor compactación** (densidad seca) del material

suelo. Dado que **la vibración aumenta el efecto de la compactación en la profundidad** es posible especificar tongadas (capas) de mayor profundidad, contribuyéndose con ello a una **compactación más efectiva y económica**.

En general, y gracias a su intensivo efecto de compactación, **planchas vibratoras** se utilizan para lograr óptimos resultados en la compactación de **suelos no cohesivos**.

Adicionalmente se deberán considerar los excelentes resultados en la compactación, la alta performance (producción), el alto de confiabilidad y los costos resultantes relativamente bajos, de esta clase de equipos.

Para la compactación de grandes superficies con suelos granulares (no cohesivos) se utilizan en general **rodillos vibratorios**.

Suelos cohesivos

RECUERDE: Para llevar a cabo en forma correcta y efectiva la compactación de un **suelo cohesivo** es necesario que el material sea **amasado**, ala par, **presionado o golpeado en forma vigorosa**.

En suelos cohesivos la acción de la fuerza de impacto de un **vibroapisonador** reduce a un mínimo la adhesión (cementación) entre las partículas individuales (cohesión real). Adicionalmente es reducida la fricción entre partículas.

Las inclusiones de aire y/o agua son desplazadas en dirección de la superficie. De esta manera se obtiene una compactidad mayor.

A menudo dentro de zanjas se utilizan **rodillos vibratorios con tambores pata de cabra**, un tipo de máquina de uso universal o sea para todo tipo de suelos. El tambor pata de cabra es especialmente apto para la compactación de suelos cohesivos, ya que no solo vibra con alta frecuencia sino que además bate y amasa simultáneamente al material, acciones estas que ayudan a la eliminación de las inclusiones de agua y aire. Al mismo tiempo se reducen a un mínimo los terrones grandes incluidos en el material suelo, obteniéndose así tongadas (capas) homogéneas y densas.

RECUERDE: Al seleccionar un equipo de compactación para ser utilizado sobre **suelos semicohesivos a no cohesivos (granulares)** considere siempre en primer lugar una **plancha vibradora** o un **rodillo vibrante**.

RECUERDE: Al seleccionar un equipo de compactación para ser utilizado sobre **suelos semicohesivos a cohesivos** considere siempre en primer lugar un **vibroapisonador o un rodillo vibratorio con tambores pata de cabra**.

El instituto de Investigaciones para Construcciones Viales en Colonia, Alemania, ha preparado una tabla en la cual se enumeran diferentes tipos de equipos de compactación, divididos en distintas categorías de peso, correlaciones con diferentes grupos de suelos y profundidades de compactación. Aún cuando esta tabla ha sido destinada en primer lugar a la compactación de materiales en zanjas, la relación entre el tipo de equipo y el tipo de suelo a compactar puede ser claramente reconocida.

Zonas y tipos de equipos para la compactación	Peso de servicio Kg	Tipos de suelos									
		I			II			III			
		Suelos granulares (no cohesivo levemente cohesivos)			Suelos mixtos (levemente cohesivos cohesivo)			Suelos arcillosos (cohesivos)			
Aptitud	Tongada (capa) cm	No. De pasadas	Aptitud	Tongada (capa) cm	No. De pasadas	Aptitud	Tongada (capa) cm	No. De pasadas			
1. Equipos livianos de compactación (principalmente para la zona de servicios en zanjas)											
Vibroapisonadores	liviano	hasta 25	+	hasta 15	2-4	+	hasta 15	2-4	+	hasta 10	2-4
	mediano	25-60	+	20-40	2-4	+	15-30	3-4	+	10-30	2-4
Pisones de explosión	liviano	hasta 100	●	20-30	3-4	+	15-25	3-5	+	20-30	3-5
Planchas vibratoras	liviano	hasta 100	+	hasta 20	3-5	●	hasta 15	4-6	-	-	-
	mediano	100-300	+	20-30	3-5	●	15-25	4-6	-	-	-
Rodillos Vibrantes	liviano	hasta 600	+	20-30	4-6	●	15-25	5-6	-	-	-
2.Equipos semipesados y pesados de compactación (por encima del área de servicios en zanjas)											
Vibroapisonadores	mediano	25-60	+	20-40	2-4	+	15-30	2-4	+	10-30	2-4
	pesado	60-200	+	40-50	2-4	+	20-40	2-4	+	20-30	2-4
Pisones de explosión	mediano	100-500	●	20-40	3-4	+	25-35	3-4	+	20-30	3-5
	pesado	más de 500	●	30-50	3-4	+	30-50	3-4	+	30-40	3-5
Planchas vibratoras	mediano	300-750	+	30-50	3-5	●	20-40	3-5	-	-	-
	pesado	más de 750	+	40-70	3-5	●	30-50	3-5	-	-	-
Rodillos Vibrantes		600-8000	+	20-50	4-6	+	20-40	5-6	-	-	-
+ Apropiado ● Sitatisfactorio - No apto											
Las altura incluidas de las tongadas (capas) incluidas en esta tabla son empíricas y además variables según la distribución granulométrica y al contenido de agua (grado de humedad) del suelo al compactar. La información se basa en tablas publicadas por el Instituto de Investigaciones para Construcciones Viales de Colonia, Alemania.											

Campos de aplicaciones para equipos mecánicos de compactación

Aplicaciones típicas para equipos de compactación dinámica

En general los equipos de compactación vibratorios (compactación dinámica) son utilizados principalmente en la **compactación de suelos y capas asfálticas**, pero adicionalmente se los utiliza para otros tipos de aplicaciones tales como la vibración de pavimentos adoquinados también llamados autoblocantes o adocretos, o para la compactación de tongadas (capas) poco espeses de hormigón pesado. La tabla siguiente muestra algunas de los muchos campos de aplicaciones posibles para equipos vibratorios.

Campos de aplicaciones principales	Tipo de Máquina					
	Vibroapi- sonador	Planchas vibradoras	Rodillos mono- cilíndricos	Rodillos de doble vibración	Rodillos pata de cabra	Rodillos vibrantes articulados
Compactación de Suelos						
Zanjas estrachas para cables y tuberías	+	●	-	-	-	-
Zanjas estrachas para cables y tuberías	+	+	●	-	+	-
Trabajos de cimientos	+	+	●	+	+	-
Rellenos alrededor de estructuras	+	+	●	+	+	-
Parques y jardines	+	+	+	+	●	+
Caminos para peatones y ciclistas	●	+	+	+	-	+
Accesos a parques y jardines	●	+	+	+	-	+
Instalaciones deportivas	-	+	●	+	-	+
Estacionamientos y zonas industriales	-	●	-	+	-	+
Construcciones viales	●	●	-	+	●	+
Construcciones ferroviarias	●	+	-	+	●	-
Ingeniería hídrica y basurales	●	●	-	●	+	-
Compacatación de Asfaltos						
Trabajos de bacheo	+	+	+	+	-	+
Caminos para peatones y ciclistas	●	+	+	+	-	+
Accesos a parques y jardines	●	+	+	+	-	+
Estacionamientos y zonas industriales	-	●	●	+	-	+
Construcciones viales	●	●	●	●	-	+
Otros trabajos de compactación						
Adoquines naturales o de hormigón	●	+	-	-	-	-
Hormigón rodillado (roll-crete)	●	+	●	+	●	+
Hormigón seco apisonado	+	●	-	-	-	-
+ apropiado (ideal) ● satisfactorio - no apto						

NOTAS SOBRE PAVIMENTOS

Esto pueden ser rígidos o flexibles. Los pavimentos de planchas de concreto se consideran rígidos, mientras que los de asfalto y adoquín se consideran flexibles.

En pavimentos asfalto hay de trabajo en frío y en caliente. Los primeros la emulsión asfáltica se aplica a temperatura ambiente, mientras que en los otros se necesita de un quemador para incrementar la temperatura del asfalto en su aplicación.

El asfalto en frío es para tráfico liviano, no se necesita una mayor resistencia al punzonamiento del tránsito vehicular o CBR. Mientras que el asfalto en caliente se baja la viscosidad de la emulsión por temperatura para su aplicación, donde al caer la temperatura a la del ambiente, dicho asfalto se endurece y ofrece una mayor resistencia al punzonamiento del tránsito vehicular. Cada neumático o llanta que rueda sobre el pavimento es como una carga de punzonamiento móvil. Dicho punzonamiento es la pequeña sección del neumático en contacto momentáneo con la carpeta de rodadura o pavimento.

ELEMENTOS DE PAVIMENTOS

Básicamente son la subrasante, la subbase, la base y la carpeta de rodadura o pavimento

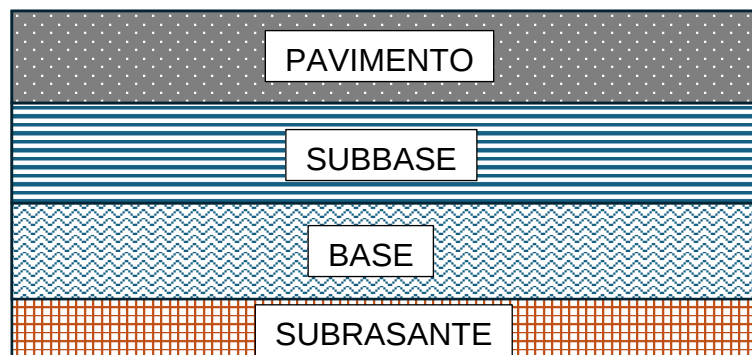
SUBRASANTE: o suelo local o del lugar donde pasa el camino o carretera, previo corte por nivel especificado en planos, sobre el cual se aplican las capas mejoradas previo al pavimento per se.

SUB-BASE: puede ser el material local o del lugar, en su estado natural o mejorado con aditamentos de arena y piedrín para un mejor desempeño para carga vehicular. Generalmente la subbase se realiza por bajar los costos en banco de materiales y transporte de estos.

BASE: no es más que una subbase mejorada, con mayor capacidad para resistir la carga vehicular. Puede ser el material local mejorado o de un banco de cercano que cumpla con los requerimientos. Se busca optimizar el trasporte de este.

CARPETA o pavimento flexible como rígido. Generalmente los pavimentos flexibles requieren de más cuidado en la base y subbase que los flexibles, pues estos últimos trasladan con más facilidad las cargas vehiculares a estas capas inferiores.

El enemigo principal de los pavimentos es el agua de escorrentía por lluvia, en especial a la carpeta de asfalto que la disuelve en el tiempo. Por eso es tan importante la buena ubicación de drenaje de agua de lluvia, pluvial o de tormentas, que busca evacuar dicha escorrentía. El encharcamiento de agua acelera el deterioro de los pavimentos, donde del agrietamiento o piel de lagarto a la formación de baches. La temporada adecuada para mantenimiento de pavimentos es en la estación seca o sin lluvias.



APLICACIÓN DE ENSAYO DE PROCTOR

Se toma el criterio de la Dirección General de Caminos de la República de Guatemala, para los principales casos de caminos. Se comparará entre la primera (1956) edición con respecto a la última (2001) del Libro Azul, o reglamento de caminos para nuestro país.

Esta última edición es apoyada en su proyecto por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) con el aval del Colegio de Ingenieros de Guatemala (CIG) y el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda (MICIVI) Una primera edición de 500 ejemplares.

La primera edición del Libro Azul es una consultoría que hace el Gobierno de Guatemala a la "Tippetts-Abbett-McCarthy-Stratton of Panama, Inc. Gibbs & Hill, Inc. adoptando los patrones norteamericanos de carreteras y caminos. (vigente hoy en día)

SUB-BASES Y BASES

Definición: capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de un pavimento y se extiende hasta una profundidad que no afecta el diseño del tránsito previsto.

Criterio 2025	Criterio 2001	Criterio 1956
-Cortes y rellenos de no más de 200 mm. -Se eliminan rocas mayores a 100 mm. -Tolerancia en un 2 % de la densidad Proctor establecida.	-Humedad en 3% de lo especificado -95% densidad Proctor -Tolerancia en un 2 % de la densidad Proctor establecida. -Ensayos cada 400 m2	-C.B.R. 30 -capas de 20 cm máximo -95% densidad Proctor

ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

Definición: Es la operación que consiste en escarificar o pulverizar, incorporar materiales estabilizadores, homogeneizar, mezclar, uniformizar, conformar y compactar la mezcla de la subrasante con materiales estabilizadores para mejorar sus características mecánicas y su función como cimiento de la estructura del pavimento, adecuando su superficie a la Sección Típica y Elevaciones de Subrasante establecidas en los planos u ordenadas por el Delegado Residente, efectuando cortes y rellenos con un espesor no mayor de 200 milímetros

Criterio 2025	Criterio 2001	Criterio 1956
-100% debe pasar el tamiz 38.1mm (1 ½") -50% debe pasar el tamiz 4.75mm (No. 4) -Tolerancia en un 2 % de la densidad Proctor establecida. -Ensayos cada 400 m2. -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal. De preferencia control de compactación se debe hacer entre las orillas interiores de la capa estabilizada de subrasante, a una distancia no menor de 1 metro del borde y siguiendo un orden alternado de derecha, centro e izquierda del eje.	-95% densidad Proctor. -Tolerancia en un 2 % de la densidad Proctor establecida. -Ensayos cada 400 m2. -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal	-95% densidad Proctor.

CAPA SUB-BASE COMÚN

Definición: capa de la estructura del pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas de tránsito sobre el pavimento hacia el suelo, de manera que este último pueda resistir y la sub-rasante no se defleccione y resista también.

Criterio 2025	Criterio 2001	Criterio 1956
-95% densidad Proctor Modificado. -CBR mínimo de 30. -Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado. -Proctor, granulometría, valor soporte, plasticidad y equivalente de arena cada 3000 m³ de material -Ensayos cada 400 m² de capa compactada. -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal. -capas de 100 a 300 milímetros de grosor mínimo y máximo respectivamente. - Distancias máximas de colocación por tirada 1 km.	-100% densidad Proctor. -Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado. -Proctor máximo cada 2000 m³ de material -Ensayos cada 400 m². -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal. -capas de 100 a 300 milímetros de grosor mínimo y máximo respectivamente.	SUELO CEMENTO: -100% densidad Proctor. -Agua a 50 galones por minuto GPM. -Humedad en $\pm 2\%$ de lo especificado. ARENA – ARCILLA: -100% densidad Proctor.

CAPA SUB-BASE Y BASE GRANULAR

Definiciones:

Subbase granular. Es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para constituir una Subbase integrante de un pavimento, la cual está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de subrasante las pueda soportar.

(b) Base granular. Es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para constituir una base integrante de un pavimento.

Criterio 2025	Criterio 2001	Criterio 1956
-95% densidad Proctor. - Hinchamiento máximo del 5%. -CBR mínimo de 40 para la subbase. -CBR mínimo de 70 para la base.	-100% densidad Proctor -Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado -Proctor máximo cada	-100% densidad Proctor.

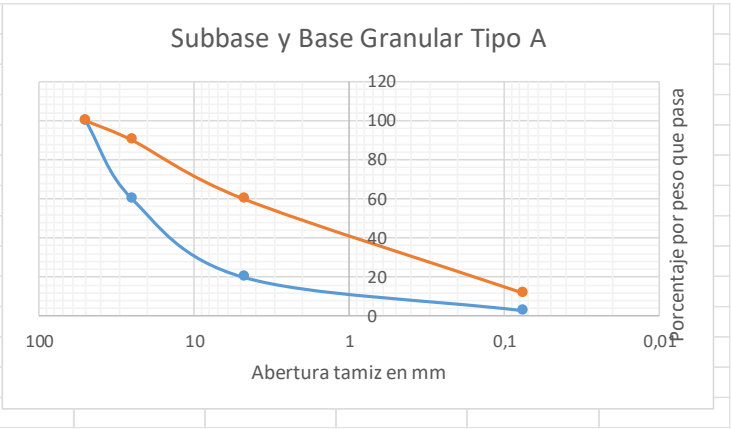
-Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado -Proctor, Plasticidad y equivalente de arena, valor soporte y partículas planas y alargadas cada 5000 m3 de material. -Graduación cada 200m3 -capas de 100 a 300 milímetros de Grosor mínimo y máximo respectivamente. -Ensayos cada 400 m2. -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal. - La distancia máxima a que puede ser colocado el material de Subbase o base granular, medida desde el extremo anterior de la capa terminada, en ningún caso debe ser mayor de 2 kilómetros para la Subbase y de 4 kilómetros para la base imprimada.	3000 m3 de material. -capas de 100 a 300 milímetros de grosor mínimo y máximo respectivamente. -Ensayos cada 400 m2 -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal.	
---	---	--

Tabla 304.1
Tipos de graduación para material de Subbase o Base Granular

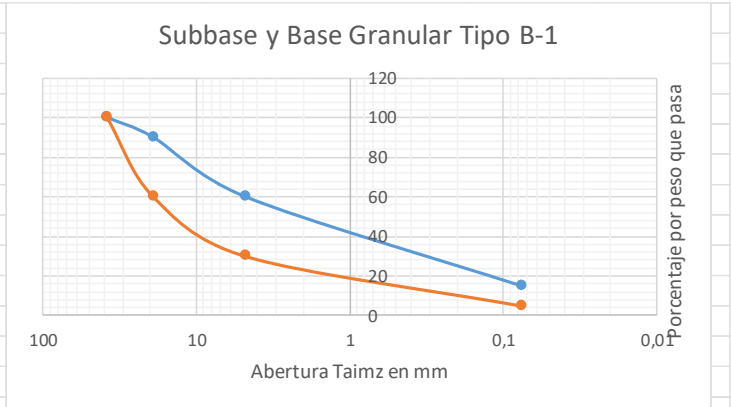
Standard mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)			
		Tipo "A" (Subbase) 50 mm (2") máximo	Tipo "B" (Subbase y base) 38.1 mm (1 1/2") máximo		Tipo "C" (Subbase y base) 25 mm (1") máximo
		A-1	B-1	B-2	C-1
50.0	2"	100			
38.1	1 1/2"	-	100	100	
25.0	1"	60-90	-	-	100
19.0	3/4"	-	60-90	-	-
9.5	3/8"	-	-	-	50-85
4.75	N° 4	20-60	30-60	20-50	35-65
2.00	N° 10	-	-	-	25-50
0.425	N° 40	-	-	-	12-30
0.075	N° 200	3-12	5-15	3-9	5-15

GRÁFICOS DE SUELOS

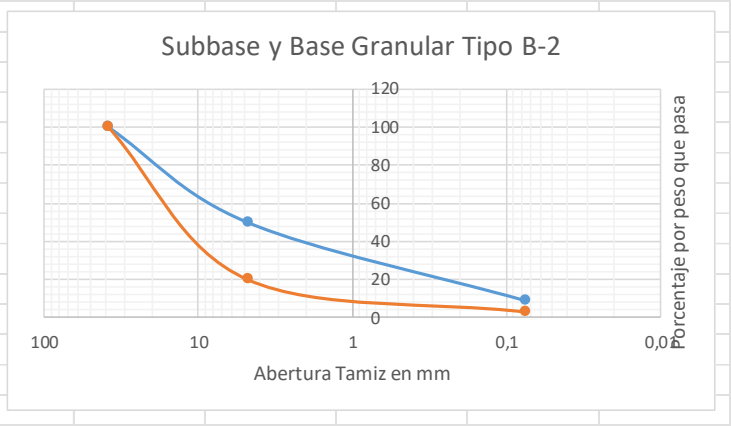
TIPO A			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
2"	50	100	100
1"	25	90	60
No. 4	4,75	60	20
No. 200	0,075	12	3



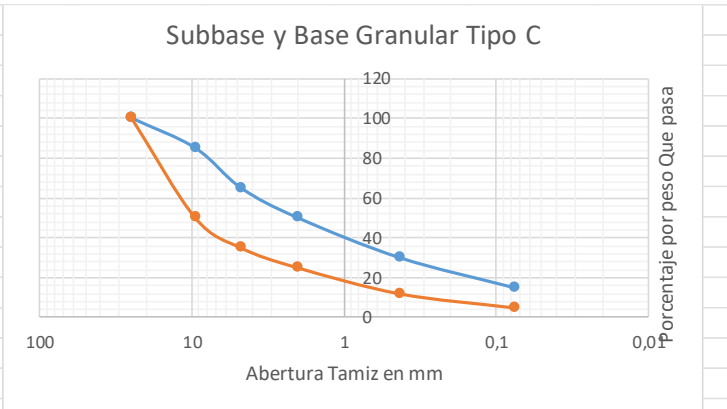
TIPO B - 1			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
1 1/2"	38,1	100	100
3/4"	19	90	60
No. 4	4,75	60	30
No. 200	0,075	15	5



TIPO B - 2			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
1 1/2"	38,1	100	100
No. 4	4,75	50	20
No. 200	0,075	9	3



TIPO C			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
1"	25	100	100
3/8"	9,5	85	50
No. 4	4,75	65	35
No. 10	2	50	25
No. 40	0,425	30	12
No. 200	0,075	15	5



Nota: El Libro Azul de caminos recomienda que su material para base y subbase quede lo más al centro posible de las curvas máxima y mínima.

CAPA SUB-BASE Y BASE DE GRAVA O PIEDRA TRITURADAS

Definiciones:

Subbase Triturada. Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, para constituir una Subbase integrante de un pavimento, la cual está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de subrasante las pueda soportar.

(b) Base Triturada. Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, para constituir una base integrante de un pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes.

Criterio 2025	Criterio 2001	Criterio 1956
-95% densidad Proctor Modificado. --CBR mínimo de 50 para la subbase. -CBR mínimo de 90 para la base. -Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado. -Proctor, Valor soporte, abrasión caras fracturadas, planas y alargadas, cada 5000 m3 de material. -Graduación cada 200 m3. -capas de 100 a 300 milímetros de grosor mínimo y máximo respectivamente. -Ensayos cada 400 m2.	100% densidad Proctor. -Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado. -Proctor cada 5000 m3 de material. -capas de 100 a 300 milímetros de grosor mínimo y máximo respectivamente. -Ensayos cada 400 m2. -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal	-100% densidad Proctor -C.B.R. especificado en planos. -capas de 15 cm máximo

-Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal. - La distancia máxima a que puede ser colocado el material de Subbase o base granular, medida desde el extremo anterior de la capa terminada, en ningún caso debe ser mayor de 2 kilómetros para la Subbase y de 4 kilómetros para la base imprimada.		
---	--	--

Tabla 305-1
Tipos de graduación para material de Subbase y base triturada

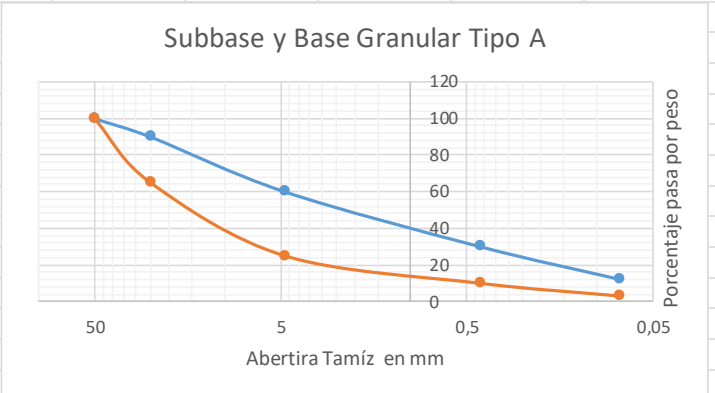
Estándar mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)			
		Tipo "A" 50 mm (2") máximo	Tipo "B1" 38.1 mm (1 1/2") máximo	Tipo "B2" 38.1 mm (1 1/2") máximo	Tipo "C" 25 mm (1") máximo
		Subbase	Subbase y base	Base	Subbase y base
50.0	2"	100			
38.1	1 1/2"	-	100	100	
25.0	1"	65-90	70-100	83-93	100
19.0	3/4"	-	60-90	73-83	70-100
9.5	3/8"	-	45-75	49-59	-
4.75	N° 4	25-60	30-60	30-40	35-65
2.00	N° 10	-	20-50	18-28	-
0.425	N° 40	10-30	10-30	5-15	12-30
0.075	N° 200	3-12	5-15	3-9	5-15

* La graduación TIPO B2 se localiza en el rango correspondiente a la máxima densidad de los agregados. Esta graduación ofrece ventajas para su aplicación en proyectos de carreteras con elevada magnitud de carga de diseño. Esta graduación también es adecuada para obtener los mejores resultados en la dosificación de las mezclas de bases estabilizadas con cemento.

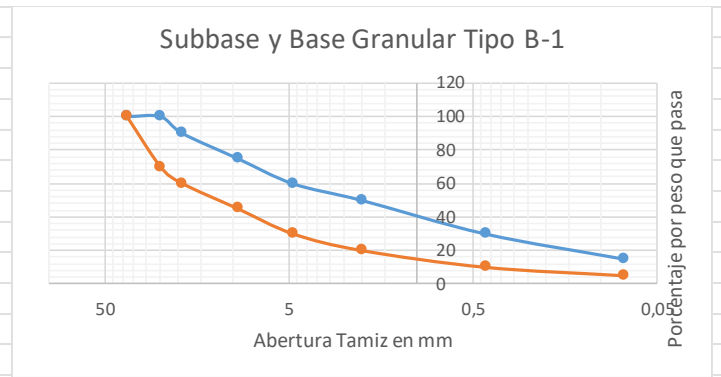
Libro Azul año 2025

GRÁFICOS DE SUELOS

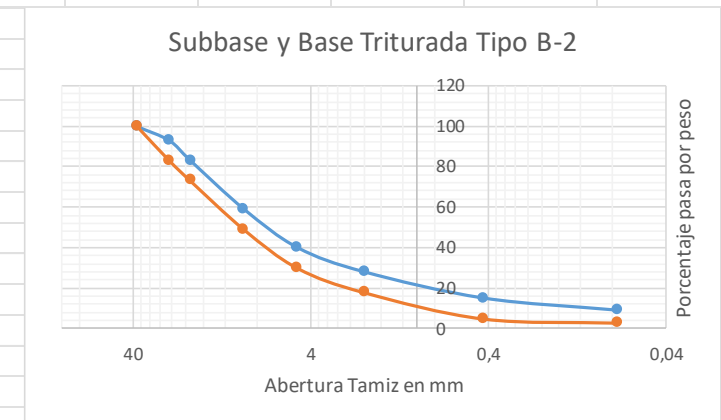
TIPO A			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
2"	50	100	100
1"	25	90	65
No. 4	4,75	60	25
No. 40	0,425	30	10
No. 200	0,075	12	3



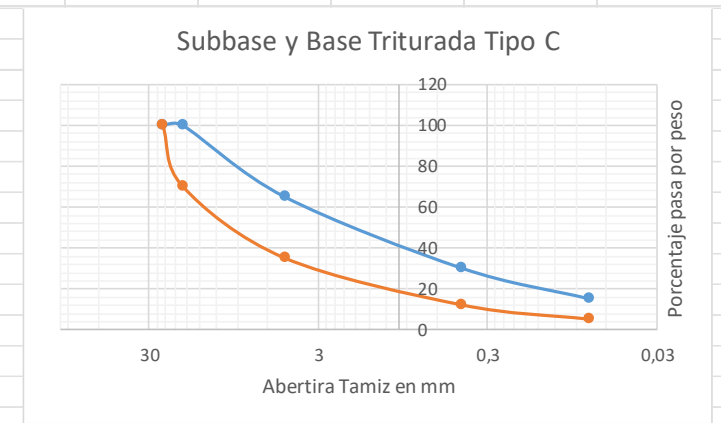
TIPO B - 1			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
1 1/2"	38,1	100	100
1"	25	100	70
3/4"	19	90	60
3/8"	9,5	75	45
No. 4	4,75	60	30
No. 10	2	50	20
No. 40	0,425	30	10
No. 200	0,075	15	5



TIPO B - 2			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
1 1/2"	38,1	100	100
1"	25	93	83
3/4"	19	83	73
3/8"	9,5	59	49
No. 4	4,75	40	30
No. 10	2	28	18
No. 40	0,425	15	5
No. 200	0,075	9	3



TIPO C			
TAMIZ		Porcentaje por peso	
No.	mm	max	min
1"	25	100	100
3/4"	19	100	70
No. 4	4,75	65	35
No. 40	0,425	30	12
No. 200	0,075	15	5



Nota: El Libro Azul de caminos recomienda que su material para base y subbase quede lo más al centro posible de las curvas máxima y mínima. Se ve en lo anterior la influencia de la norma ASTM C33

CAPA SUB-BASE Y BASE DE RECUPERACIÓN PAVIMENTO EXISTENTE

Definición: Es la capa de Subbase o Base obtenida de la recuperación de la capa de rodadura y de la base del pavimento existente en combinación con material de aporte según se establezcan en las Disposiciones Especiales, la cual debe tener el ancho, profundidades, espesores y proporciones indicadas en los planos, ajustándose a los alineamientos, niveles y pendientes longitudinales y transversales determinadas en los planos

Criterio 2025	Criterio 2001	Criterio 1956
-El material pulverizado deberá cumplir con una granulometría del 100% para el tamiz de 50 milímetros (2 pulgadas) y el material de sobre tamaño deberá ser procesado o removido fuera de la Sección Típica. -100% densidad Proctor Modificado. -Proctor máximo cada 3000 m³ de material. -La densidad máxima puede efectuarse por cada 10,000 metros cúbicos de material de Subbase o base recuperada. -Ensayos cada 400 m². -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal.	-100% densidad Proctor. -Tolerancia en $\pm 3\%$ de lo especificado -Proctor máximo cada 3000 m³ de material. -capas de 100 a 300 milímetros de grosor mínimo y máximo respectivamente. -Ensayos cada 400 m². -Densidades de campo con un mínimo de 20 m. Lineal en sentido longitudinal.	<i>NO EXISTE ESTE RENGLÓN</i>

Informaciones generales sobre compactación, mantenimiento y economía

Hasta aquí se han discutido en detalle los diferentes tipos de suelo, sus densidades y los métodos de control como así también las ventajas de una buena compactación del material de relleno.

Adicionalmente se han estudiado los principios de funcionamiento y aplicaciones de vibroapisonadores, planchas vibratoras y rodillos vibratorios. Se han discutido además los criterios para la correcta selección de la máquina de compactación. Nuestra meta ha sido ofrecer un mejor entendimiento respecto al tema de la compactación en general y específicamente de los equipos conectados con la compactación de suelos, sin olvidar los equipos pequeños o medianos para la compactación de asfaltos. Consideramos en el futuro la correcta selección de un equipo para la compactación de suelos o también asfaltos no debería presentar ningún tipo de dificultades.

No vacile en tomar contacto con el representante más cercano del fabricante de estos tipos de equipos si, debido a causa de trabajos fuera de lo ordinario, tales como por ejemplo condiciones extremadamente confinadas o suelos difíciles, sugiera en el futuro la necesidad de **asistencia, apoyo o consejos**, o también simplemente porque se desea verificar o corroborar que la **relación entre costos y rendimiento** es la correcta. Un representante calificado y capaz gustosamente le asistirá con **consejos, ayuda, demostraciones con equipos y servicio**.

En el presente capítulo nos ocuparemos de indicaciones generales sobre el tema de la compactación de suelos y el mantenimiento de equipos para la compactación y sin olvidar por ello de hacer consideraciones de interés general tanto para el operario como igualmente para los dueños de los equipos, contratistas y jefes de obra.

Informaciones generales sobre compactación

En casi toda obra de construcción se podrán encontrar equipos de compactación manuales o de conducción manual de todo tipo de tamaño y para los usos más variados.

Todos estos equipos deberían estar en uso continuo y en todos lados para **evitar posibles asentamientos** posteriores en , por ejemplo, zanjas para tuberías de servicios restituidas.

Desgraciadamente esto no siempre es el caso; la cantidad de fallas y daños por causa de asentamientos es considerable. No obstante las técnicas de compactación altamente desarrolladas, hundimientos en los pavimentos de calles o aceras, rajaduras en los fundamentos de edificios o estructuras, paredes o superficies ocurren a diario.

En general la compactación en la zanja es iniciada una vez terminado el resto de los trabajos. Ya que no queda mucho tiempo el resto de los trabajos deberán ser **“apurados”**. Las zonas angostas, confinadas son gustosamente **omitidas o pasadas por alto** y la superficie de la zanja muchas veces es **alisada rápidamente con una máquina con neumáticos** tal como por ejemplo una máquina cargadora frontal, un retroexcavadora, un camión o cualquier otro vehículo de la obra. Zonas inaccesibles y esquinas son superficialmente **apisonadas con el pie**. ¡Estas soluciones improvisadas son rápidamente llevadas a cabo, la compactación básicamente queda en la nada y futuros asentamientos o hundimientos podrán ser prácticamente garantizados por escrito!

La compactación de las zanjas se torna especialmente problemática. La falta de lugar, la humedad o el polvo, además de las condiciones de trabajo por lo general bastante sucias debido al material proveniente de las paredes plantean un problema para el operario en las zanjas estrechas confinadas ¿Quién no trataría de omitir una o dos pasadas con el equipo de compactación? – a menos que, naturalmente, la plancha vibradora o el rodillo haya sido equipado con un control remoto a cable o a rayos infrarrojos.

Muchas veces la razón que conduce a una compactación defectuosa es la falta de conocimientos sobre el proceso de compactación o también, alternativamente, la falta de información sobre la interacción entre el material a ser compactado y el equipo en uso.

Justamente en estos casos es muy importante que un operario entrenado se ocupe de esta parte del trabajo, especialmente en obras pequeñas en las cuales, por lo general, no se miden ni controlan los valores de la compactación. Este operario deberá estar lo suficientemente entrenado respecto a la altura **correcta de la tongada** (capa) y el **número de pasadas requerido** en correspondencia con el material a ser compactado.

Cursos de entrenamiento y capacitación, llevados a cabo dentro de las mismas empresas de construcción o, por otro lado, externamente en por ejemplo escuelas patrocinadas por los gremios de la construcción, serían la solución ideal para eliminar este tipo de falta en la calidad de trabajo.

RECUERDE: Medidas útiles y significativas para una optimización del proceso de compactación podrían ser:

- El material de relleno deberá estar formado por una **mezcla bien granulada compuesta de partículas de diferentes tamaños**, es decir con una curva de distribución granulométrica bastante plana.
- El material de relleno deberá ser humedecido en forma pareja pero no excesiva – y llevado lo más cerca posible al **contenido óptimo de agua (humedad)**. El agua actúa como un lubricante y facilita por ende la redistribución de las partículas individuales del material suelo.
- La **altura de las tongadas (capas) individuales** deberá ser lo más reducida posible. En tongadas de mayor altura habrá por cierto una cierta compactación en las zonas inferiores, sin lograrse sin embargo la **densidad Proctor** requerida.
- **No** se deberá **transitar** con vehículos por **tramos definidos** por encima de la tongada recién colocada. Se deberá prestar atención de **circular en forma pareja por toda la superficie** si el material de relleno va a ser distribuido y reubicado por medio de máquinas topadoras o niveladoras.
- Antes de proceder a la compactación de una nueva tongada la misma deberá ser **“aplanada o alisada”** lo mejor posible. Con ello se podrán evitar posibles depresiones que no podrán ser alcanzadas con el equipo de compactación.
- La colocación de las tongadas de material de relleno y la compactación deberán ser efectuadas, dentro de lo posible, con condiciones climáticas secas.
- Siempre efectuar – un **alto número de pasadas** con el **equipo de compactación más pesado y poderoso**.
- No emplear personal inexperto sino sólo personal correctamente entrenado y calificado (llevar a cabo cursos de entrenamiento internos dentro de la empresa).

- **Controlar** intensivamente **la densidad de compactación** de las zonas en donde se ha procedido a efectuar la compactación.

Informaciones generales sobre el mantenimiento de equipos para la compactación de suelos.

Los equipos de compactación de suelos trabajan casi exclusivamente en zonas de mucho polvo. Por esta razón es de suma importancia un **mantenimiento correcto** del quipo, para garantizar, entre otros, **una larga vida útil y la durabilidad** del equipo. La **falta de mantenimiento** o un **mantenimiento deficiente** conducen, por lo general, a **averías, roturas y/o un desgaste prematuro** del equipos.

RECUERDE: El **manual con instrucciones de servicio** para el equipo de compactación –provisto por el fabricante del equipo – siempre deberá ser **accesible al operario en el obrador**; las instrucciones mencionadas en el manual deberán ser estrictamente observadas.

1. Vibroapisonadores

- Antes de arrancar el vibroapisonador se deberá controlar si todos los **dispositivos de seguridad**, por ejemplo, la chapa lateral protectora para el carburador o la chapa protectora contra quemaduras del escape, están correctamente montados y firmemente fijados o atornillados.
- Es conveniente **llenar el tanque de combustible** del equipo antes del primer arranque del día. De esta forma es posible evitar que el combustible tome contacto con partes calientes del motor. ¡Favor de no fumar durante esta tarea!
- El peor enemigo de un motor a combustión interna es el **siempre presente polvo**. Por ello es suma importancia que el **elemento del filtro de aire** sea **inspeccionado y limpiado** al menos **una vez por día** o, si fuera necesario, reemplazarlo por uno nuevo.
Resortes de fijación débiles o desgastados y una protección de filtro dañada – alternativamente, un **filtro ovalado con carcasa o tapa dañada** – deberán ser reemplazados.

Nunca haga funcionar el equipo sin su filtro de aire.

- **Filtros de combustibles sucios** impiden el flujo libre del combustible. Como consecuencia el motor del vibroapisonador marcha en forma irregular o se detiene completamente. Para garantizar **un** perfecto funcionamiento del

- motor utilice sólo **repuestos auténticos y originales**, tal como recomendados por el fabricante del equipo.
- Se recomienda remover y limpiar a fondo al menos una vez al año aquellos tanques de combustibles que **incorporan en su interior un filtro de combustible**, ya que todos los residuos retenidos por el filtro quedan en el fondo del tanque mismo.
 - También el **sistema de apisonado** requiere lubricación. Controle el **nivel de aceite** del sistema de apisonado antes de arrancar el motor. Para este fin algunos fabricantes han equipado sus vibroapisonadores con una **mirilla de aceite**. En este caso, simplemente inclina el vibroapisonador un poco hacia atrás hasta llegar a la posición vertical (perpendicular) para luego observar si hay aceite en el sistema.
 - Controle diariamente si el **fuelle** pierde aceite o si ha sido dañado en la parte exterior. En caso de una pérdida de aceite en la parte superior o inferior se deberá ajustar la abrazadera correspondiente. Si el fuelle estuviera dañado se le deberá reemplazar inmediatamente para evitar daños mayores en el interior del sistema de apisonado.
 - Se deberá reajustar todas las **conexiones roscadas** aproximadamente 100 horas después de la primera puesta en marcha. Además, se recomienda controlar una vez por semana el correcto ajuste de las conexiones roscadas del pisón y las conexiones con juntas.
 - Manténgase siempre en estado limpio al apisonador. Lavarlo si fuera necesario.



NOTAS: para trabajar con vibropisonadores, sapitos o bailarinas, además del equipo básico de trabajo como casco, chaleco reflectante, zapatos de trabajo con punta de acero, guantes, se necesita de utilizar faja en la cintura para proteger a la columna vertebral. Es proteger a esta última por vibraciones e impactos que pueden provocar dislocaciones en las vértebras.

Además, este equipo mecánico de compactación en poco tiempo sufre de desgastes, desalineación y des calibración. Entonces si se es un principiante, no es recomendable adquirir este tipo de equipos de segunda mano, o de primera mano o se arrenda a quien además de ofrecer este tipo de equipo ofrece apoyo, seguimiento y atención al cliente.

Es un equipo adecuado para compactar pequeñas áreas como zanjas y trincheras de tuberías, en suelo de preminencia fino. La carga y golpe va rompiendo las láminas de estratos de suelos finos.

3. Plancha vibradoras

- Controle diariamente para verificar si todos los **dispositivos de seguridad**, por ejemplo la chapa protectora contra quemaduras del escape, el armazón de protección, la tapa cubre-correa etc. Se encuentran correctamente montados y firmemente fijados o atornillados.
- Reaprovisionar la plancha vibradora con el **combustible correcto** antes del primer arranque del día dentro de lo posible. ¡Favor de no fumar durante esta tarea!
- Controlar **diariamente el filtro en baño de aceite**, tal como fuera el caso con el vibroapisonador, y como sigue:
 - En el caso del **filtro de aire en baño de aceite** se deberá controlar el nivel y el estado de limpieza del aceite.
 - En el caso del **filtro de aire seco** se deberán efectuar los trabajos de mantenimiento indicados en el manual con instrucciones de servicio del fabricante, sin olvidar de reemplazar el filtro cuando sea necesario.

Nunca haga funcionar el equipo sin su filtro de aire.

- Controle diariamente, y antes de arrancar el motor el **nivel de aceite** del mismo y complete si fuera necesario. No olvidar que la plancha deberá estar ubicada en una superficie plana horizontal.
- En el caso de las planchas vibradoras unidireccionales (con marcha de avance) se deberán ajustar todas las superficies de contacto (zonas de juntas) si se notaran **pérdidas de aceite**. En general el torque de apriete para estas atornilladuras estará indicado en el manual de servicio de la máquina. Controle asimismo el nivel de aceite del excitador y complételo si fuera necesario.



NOTAS: para trabajar con las planchas vibratorias, además del equipo básico de trabajo como casco, chaleco reflectante, zapatos de trabajo con punta de acero,

guantes, se necesita de utilizar faja en la cintura para proteger a la columna vertebral. Es proteger a esta última por vibraciones que pueden provocar dislocaciones en las vértebras.

Además, este equipo mecánico de compactación en poco tiempo sufre de desgastes, desalineación y des calibración. Entonces si se es un principiante, no es recomendable adquirir este tipo de equipos de segunda mano, o de primera mano o se arrenda a quien además de ofrecer este tipo de equipo ofrece apoyo, seguimiento y atención al cliente.

Es un equipo adecuado para compactar pequeñas áreas como zanjas y trincheras de tuberías, en suelo de preminencia grueso. La carga y vibración va acomodando los granos de suelos gruesos.

3. Rodillos vibratorios

- Controle diariamente para verificar si todos los **dispositivos de seguridad** están correctamente montados y firmemente fijados y atornillados. Favor de controlar la efectividad y el correcto funcionamiento del **sistema de hombre muerto** y de la **barra de seguridad especial para marcha en reversa** en aquellos rodillos provistos con estos sistemas.
- Reaprovisionar el rodillo vibratorio con el **combustible correcto** dentro de lo posible antes del primer arranque del día. ¡Favor de no fumar durante esta tarea!
- En general es recomendable **llenar los tanques de agua** antes de comenzar con el trabajo de compactación de capas asfálticas.
- Controle el estado de limpieza y el nivel de aceite del **filtro de aire diariamente**. Completar o recambiar el aceite si fuera necesario. Efectúe los trabajos de mantenimiento necesarios en el caso de filtros de aire del tipo seco.

Nunca haga funcionar el equipo sin su filtro de aire.

- Controle diariamente, y antes de arrancar el motor el **nivel de aceite** del mismo y complete si fuera necesario. No olvidar que el rodillo deberá estar ubicado en una superficie plana y horizontal.
- Controle diariamente, y complete si fuera necesario, el **nivel del líquido hidráulico** en rodillos de accionamientos hidrostáticos o semi-hidrostáticos. Controle al mismo tiempo si existen pérdidas de aceite en las tuberías hidráulicas. Apriete las uniones si fuera necesario.
- Mantenga la máquina en estado limpio. Lave diariamente el rodillo a fondo en caso de aplicaciones sobre suelos semi-cohesivos a cohesivos.



Nota: Es un equipo adecuado para compactar áreas de suelo de preminencia grueso. La carga y vibración va acomodando los granos de suelos gruesos. Suelos de subbase y base granular como de piedrín triturado son ejemplos clásicos.



NOTA: Es un equipo adecuado para compactar áreas de suelo de preminencia fino. La carga y golpe del taco o tarugo va rompiendo las láminas de estratos de suelos finos. Suelos de subbase y base común es un ejemplo clásico.

¿Equipo o tractor de oruga o de neumáticos (llantas)?

Es lo que se debe resolver al escoger entre retroexcavadoras de oruga o de neumático, como ejemplo en este tipo de oferta de equipos y maquinarias de construcción. ¿Algún criterio para decidir? Es lo que se revisa brevemente, en principio.



Equipo de movilidad de oruga es adecuado en el corte de suelo donde predomina puntas y cabezas de piedras. El neumático en este suelo se gasta con gran facilidad y existe el riesgo de ponchaduras y roturas de neumáticos a cada rato. Tiene mejor desempeño la oruga. Pero no es buena idea hacer circular un equipo de oruga sobre un pavimento de asfalto, este quedará con marcas y surcos de la oruga, en buen "chapín" queda un suelo "marimbeado"



Equipo con neumáticos de goma u hule vulcanizado tiene la gran ventaja de poder circular en casi todo tipo de terreno, excepto donde predominen las puntas de cabeza de piedra que las desgasta rápidamente y las puede romper y ponchar.

Servicio postventa y asistencia técnica al cliente

Es de suma importancia no sólo desde el punto de vista del contratista sino también por parte del operador que haya a disposición un **servicio de asistencia** por parte del **fabricante de la máquina** o, alternatively, por parte de su **representante o agente**.

RECUERDE: Las empresas constructoras deberían incluir y contar – al efectuar la compra de quipos nuevos –con **escalas o reglas de evaluación** que incluyan los siguientes criterios **para el servicio de asistencia** por otra parte de los fabricantes para la construcción:

- **Capacidad de entrega** rápida de equipos nuevos
- **Asesoramiento y demostraciones prácticas** del equipo directamente en obra.
- **Instrucción práctica para el personal** durante la entrega de equipos nuevos.
- Disponibilidad y puesta a disposición de **equipos para arrendamiento (alquiler)** o, alternatively, recomendaciones sobre un alquilador de confianza.
- **Servicio de asistencia** para el cliente **localizado lo más cerca posible**.
- **Servicio de asistencia** en intervalos regulares para la **inspección y el mantenimiento preventivo** – pero también para la **ejecución de pequeños trabajos de reparación**.
- Servicio de fax **24 horas al día** para poder efectuar **pedidos de repuestos o piezas de recambio** con **entrega pronta al día siguiente** – si fuera posible.
- **Seminarios técnicos** para clientes y sus empleados.
- **Reparaciones rápidas y a precios ventajosos** o reacondicionamientos por medio de reparaciones individuales o, alternatively, reemplazo de grupos constructivos completos.

Economía por rendimiento

Al calcular los costos de la compactación se deberá tomar en consideración, al margen de los costos de adquisición de la máquina misma, los costos de la mano de obra (costos de funcionamiento) como así también los costos adicionales del empleado.

El siguiente ejemplo enseñará como calcular los **costos de la compactación** y, a la par, como el rendimiento del mismo equipo de compactación influye sobre estos costos.

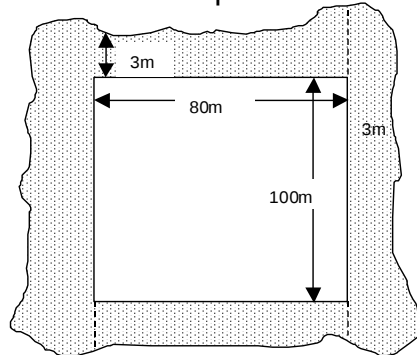
El ejemplo se basa en la comparación de dos **planchas vibradoras** eficientes en el rendimiento y de alta calidad, en **diferentes categorías de peso** y con **fuerzas centrífugas generadas diferentes**, ambas provenientes del mismo fabricante. Tanto el precio de la máquina como también los costos laborales (en dólares) son hipotéticos mientras que los valores de los rendimientos y las fórmulas reales utilizadas corresponden a máquinas bien conocidas en el mundo de la construcción.

Descripción		Plancha A	Plancha B
Peso de Servicio	kg	328	445
Ancho de trabajo	cm	60	71
Fuerza centrífuga	kN	33	60
Tongada (de acuerdo al suelo)	cm	35	50
Velocidad de avance	m/min	21	22
Rendimiento Superficial	m ² /h	756*	937*
Rendimiento de			
Compactación	m³/h	265	468
Consumo de Combustible	l/h	1,3	2,2
Precio de lista hipotético	U\$S	12.107	17.821

Tabla 1

Alrededor del fundamento de un edificio un material de relleno granular mixto (bien graduado) deberá ser compactado con una densidad Proctor de 95-100%.

Se estima alcanzar la densidad Proctor (densidad seca) requerida en **3 pasadas**, debiéndose para ello prestar atención a la altura máxima efectiva de la tongada (capa) para cada una de las máquinas y también si el porcentaje de humedad (contenido de agua) del material de relleno se ubica cerca del valor óptimo. El fundamento es rectangular, midiendo 100 x 80 m y la excavación tiene un ancho medio de 3 m como también una profundidad media de 3m.



Sección de la obra para el cálculo del material de relleno

Para determinar los **costos operativos** y el **costo total** se asumirá que:

1. La **expectativa de vida** de planchas vibradoras puede ser establecida en **3000 horas** cada una (300 horas por año, 10 años).
2. Los **costos de depreciación por hora de trabajo** se determinarán al amortizar el precio de la máquina por las 3000 horas de expectativa de vida.
3. Los **costos de mantenimiento y reparaciones** se fijarán con un valor del 80% de los costos de depreciación.
4. El precio de combustible diesel se ha estimado en U\$S 0,80 por litro.
5. Los **costos laborales y costos adicionales** podrán ser estimados en U\$S 43,- por hora.

Con los valores o suposiciones recién mencionadas se podrá proceder a calcular los **costos de depreciación, mantenimiento y reparaciones y además lo costos del combustible**.

Plancha A	Plancha B
Costos de depreciación	
Precio de lista/expectativa de vida	
12.107/ 3000 = 4,04 U\$S/h	17.821 / 3000 = 5,94 U\$S/h
Costos de Mantenimiento y reparaciones	
Depreciación x 80%	
4,04 x 80/100 = 3,23 U\$S/h	5,94 x 80/100 = 4,75 U\$S/h
Costo del combustible	
Litros/h x U\$S/Litro	
1,3 x 0,80 = 1,04 U\$S/h	2,2 x 0,80 = 1,76 U\$S/h
Costo de la máquina por hora de trabajo	
Depreciación + mantenimiento y reparaciones + combustible	
4,04 + 3,23 + 1,04 =	5,94 + 4,75 + 1,76 =
8,31 U\$S/h	12,45 U\$S/h

Tabla 2 Costos de la máquina por hora de trabajo

El volumen total en m^3 del material de relleno a ser compactado podrá ser calculado en base a las medidas dadas en la figura anterior.

$$2 \times [(80 \times 3 \times 3) + (106 \times 3 \times 3)] = 3348 m^3$$

Comparación: Para rellenar una zanja de 372 m de largo con 3 m de ancho y 3 m de profundidad se requiere la misma cantidad de material de relleno ($3348 m^3$).

Ahora se podrá calcular el costo total resultante para la compactación completa del material de relleno con las máquinas mencionadas anteriormente, tal como indicado en la tabla siguiente

Plancha A	Plancha B
Rendimiento de compactación - véase especificaciones técnicas -	
265 m ³ /h	468 m ³ /h
Rendimiento con 3 pasadas Rendimiento de compactación/ número de pasadas	
265 / 3 = 88,3 m ³ /h	468 / 3 = 156,0 m ³ /h
Tiempo requerido para la compactación Metros cúbicos totales / metros cúbicos por hora	
3348 / 88,3 m ³ /h	3348 / 156 = 21 h
Costo total para el trabajo de compactación (Máquina + costos laborales) x tiempo de compactación	
(8,31 + 43) x 38	(12,45 + 43) x 21
U\$S 1.950,-	U\$S 1.164,-
Ahorro al utilizarse la máquina B Costo total máquina A - costo total máquina B	
	1.950 - 1.164 =
	U\$S 786,-

Tabla 3 Costo total para el trabajo de compactación

La tabla 3 es muy importante, dado que se podrán sacar los siguientes datos y conclusiones para efectuar comparaciones:

- El rendimiento real de cada una de las máquinas individuales,
- La cantidad total de material de relleno a ser compactado.
- Los costos laborales e incidentales (adicionales) del operario.

Al observar la tabla 2 es fácil notar que los **costos reales por hora de trabajo** de la máquina B **son 50% más altos** que los de la máquina A.

Por otro lado, y al estudiar la tabla 12, se hace evidente que la **máquina de menor costo y rendimiento**. A requiere un **gasto adicional** de U\$S 786 (68%) para **compactar la misma cantidad de material de relleno en m^3** . Por otro lado, la **máquina más costosa (+ U\$S 5.714) pero más eficiente B con su alto rendimiento de compactación** terminará el mismo trabajo en **casi la mitad del tiempo (55%)**.

Proyectando más allá la eficiencia de la máquina con el **mayor rendimiento de compactación** – palabra clave **“economía por rendimiento”** – se hace evidente que la máquina originalmente más cara (precio de compra) neutraliza o compensa la diferencia de precio con la máquina menos costosa en un período muy corto de tiempo. Se podrá percibir en la tabla 12 que el ahorro de U\$S 786,- será alcanzado en sólo 21 horas de trabajo. La **diferencia de precio inicial** de U\$S 5.714,- **entre las dos máquinas desaparecerá después de sólo $5.714 \times 21 / 786,- = 153$ horas de trabajo**.

En conclusión, se podrá aseverar definitivamente que el contratista que siempre vuelve a tener trabajos de compactación **ahorrará dinero con la máquina más**

eficiente en el rendimiento, aún cuando esta tenga un costo más elevado en el momento de la compra, ya que el alto rendimiento de compactación (rendimiento volumétrico) rápidamente compensará los costos más altos de la inversión original.

¿Económico o justiprecio?

El juego de palabras en el encabezamiento de esta parte del capítulo es un tema a ser ponderado sin reservas en el momento de la **compra** de un **equipo de construcción de conducción manual**.

Ud. Justificadamente podrá preguntar “¿**Porqué justamente aquí?**”

La razón es simple: Como ya hemos visto, la **economía** depende del **rendimiento** de la maquina y no, tal como creen muchos, del precio de compra. Con **costos laborales y adicionales en constante aumento** se hace cada vez más decisivo para el contratista o para los empleados responsables de los cálculos de costos, poder determinar si el operario es capaz de compactar una mayor cantidad de metros cuadrados, o sea, una cantidad adicional de material de relleno o también asfalto con una **máquina más eficiente en el rendimiento**.

Una máquina **económica** – es decir, una máquina barata – con un **20% menos en el rendimiento**, resulta a fin de cuantas, por ejemplo, a lo largo de una obra, mucho más cara para el contratista.

Una **máquina de alto rendimiento**, por otro lado, **vale su precio** _ aún cuando el primer momento, en el momento de la compra, parezca ser un tanto más cara.

Rogamos se tome el tiempo para estudiar el siguiente cálculo y una vez más Ud. Podrá determinar cuánto realmente cale la pequeña diferencia entre las palabras precio y economía.

Comencemos por asumir que para Ud. El precio de, por ejemplo, un vibroapisonador es de mucha más importancia que cualesquiera de los criterios siguientes:

- Alto rendimiento en la compactación,
- Ventajas en el manejo y funcionamiento, tales como por ejemplo la variabilidad en 4 posiciones diferentes de la fuerza por golpe y del ajuste de la altura de salto,
- Ventajas de equipamiento, tales como el motor de diseño especial resistente a las vibraciones o también la cercanía y asistencia de la filiales y delegaciones de propiedad del fabricante mismo.

Dejando de lado algunas de las características especiales e ignorando las ventajas antes mencionadas, enfocaremos el siguiente cálculo basándonos solamente en el vibroapisonador de menor eficiencia, en la “máquina económica”, asumiendo al mismo tiempo para el propósito de este cálculo una conservadora **diferencia en el rendimiento de sólo un 20%** respecto del equipo algo más costoso pero a su vez más eficiente. Además, nosotros sabemos, en base de una serie de ensayos

comparativos, que una diferencia del 20% en el rendimiento entre un equipo de alto rendimiento y otro de rendimiento inferior, no se ubica nada fuera de lo común.

- Precio de compra del quipo “de alto rendimiento”, por ejemplo **U\$S 4.530,-**
- Precio de compra del equipo “económico”, por ejemplo **U\$S 3.970,-**
- Ventaja en el precio en el momento de la compra **U\$S 560,-**
- Costos laborales y adicionales por hora, por ejemplo **U\$S 43,-**
- Comparando los costos laborales totales con el déficit en el rendimiento del 20%, tendremos una pérdida total por hora de trabajo de $\$3 \times 20 / 100$
U\$S 8,60
- Después de U\$S 560,-/U\$S 8,60 por hora = **65 horas de trabajo**, la **ventaja de U\$S 560,- en el precio de compra**, comparado a la **pérdida por hora de trabajo** de U\$S 8,60,- sumará a un total de **U\$S 0,-**
- Estimando un total de 300 horas de trabajo por año, la ventaja en el precio recién mencionada habrá desaparecido en aproximadamente un quinto (1/5) de las horas totales de trabajo por año.
- Al terminar el primer año de operaciones se habrá pagado para el “equipo económico” aproximadamente **U\$S 2.200,- más que para el quipo más costoso pero de mayor rendimiento.**

Al hacer la comparación anterior no hemos tomado en consideración beneficios tales como las ventajas en el funcionamiento del equipo, las ventajas del equipo mismo o cuestiones de servicio.

Sin embargo, se hace evidente que, en conexión con la afirmación “**economía por rendimiento**”, de vez en cuando se deberá proceder a **invertir una cantidad mayor** para así poder realmente lograr ahorros reales.

Resumen

Al estudiar cuidadosamente los capítulos precedentes se podrá descubrir que, en conformidad con el material a compactar, el material de relleno y el grado de compactación requerido, los vibroapisonadores, las planchas vibratorias y los rodillos vibratorios se ajustan excepcionalmente bien a los trabajos generales de compactación.

Sin embargo se requiere un análisis exhaustivo de las propiedades técnicas, ventajas y aplicaciones posibles como para poder recomendar el quipo correcto para el trabajo a efectuar.

Se recomienda equipar el plantel de máquinas con un número suficiente de quipos coma para poder permitir – de acuerdo al trabajo a efectuar – una **asignación fija** de una o más máquinas a **cada grupo o cuadrilla de obreros individual**. La experiencia muestra que el menor número de fallas ocurre en aquellas obras en la cuales cada grupo o cuadrilla tiene asignada una o más máquinas, siendo al mismo tiempo responsables por el correcto funcionamiento del equipo. **En el interés de buenas ganancias**, especialmente cuando el grupo o la cuadrilla trabaja “a

contrato” y cuando los resultados dependen de la disponibilidad y el buen funcionamiento de la máquina asignada a ellos, ocurren **verdaderos milagros** en lo que concierne a la **durabilidad, rendimiento** y el **almacenado a prueba de robos** fuera de las horas de trabajo. Justamente también en este tipo de situación el personal mismo se ocupa de efectuar el mantenimiento y servicio en forma consecuente y regular.

Una cantidad suficiente de equipos modernos y de alta rendimiento contribuyen sin lugar a dudas de forma notable hacia la realización económica de una obra a la siguiente y el constante cambio de una mano a la otra. Los hechos o realidades antes mencionados contribuyen irrefutablemente a reflexiones responsables sobre rendimiento y costos, independiente de la decisión tomada respecto del equipo de compactación correcto.

RESUMEN DE TRABAJO CON MAQUINARIA

Al trabajar con maquinaria para corte y compactación de suelos, no es un buen negocio el tener la maquinaria detenida y sin trabajar. Hay que pagar la planilla de los operarios en algunos casos y además se incrementan los costos si esta maquinaria es arrendada.

Si se arrenda maquinaria, como si es propia el horómetro es un contador de tiempo de funcionamiento importante. En el primer caso para el cobro de horas de trabajo y en el segundo para el control de mantenimientos.



Sin embargo, también está la posibilidad de cobro por horas de tenencia del equipo arrendado por horas y tiempo de tenencia, se utilice o no. Esto es sobre la idea del costo de oportunidad.

Trabajar con maquinaria en si requiere algunos renglones y rubros generales que se anotan a continuación:

1. **Operarios:** evaluar el desempeño en campo. Ojo con la manera de política de pago salarial.
2. **Combustible:** programar y verificar cuidadosamente.
3. **Lubricantes:** mantener lo suficiente, a veces se tiene combustible, pero sin lubricantes no se puede trabajar.
4. **Hidráulicos**
 - a. Líquidos para hidráulicos
 - b. Empaques: se necesitan con frecuencia.
5. **Repuestos y refacciones**
 - a. Dientes de corte: suelos arenosos tienden a desgastarlos más rápido.
 - b. Fajas: se necesitan con frecuencia.
 - c. Neumáticos y llantas
 - d. Filtros de aceite
 - f. Fusibles y seguros

BIBLIOGRAFÍA

1. NSE 2 Demandas estructurales y condiciones de sitio. Normas Estructurales de Diseño y Construcción para la República de Guatemala. EDICIÓN 2018. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
2. NSE 2.1 Estudios geotécnicos. Normas Estructurales de Diseño y Construcción para la República de Guatemala. EDICIÓN 2018. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
3. INGENIERÍA DE CIMENTACIONES PECK - HANSON - THORNBURN. Limusa Noriega Editores. México 1993.
4. MANUAL PARA LABORATORISTA DE SUELOS EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Ing. Enrique Anckermann Álvarez. Tesis Ingeniería Civil USAC, AGOSTO 1969.
5. ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS. Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. Enero 2025.
6. ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS. Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. Año 2001.
- ESPECIFICACIONES PARA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES Y CARRETERAS.
7. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. Dirección General de Caminos. AGOSTO 1956.
- Tippetts-Abbett-McCarthy-Stratton of Panama, Inc.
8. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN PEQUEÑAS POBLACIONES. Crites & Tchobanoglous. McGraw - Hill. Colombia MAYO 2000.
9. Soil Compaction and Equipment for Confined Areas. Copyrigh December 1999, Wacker Corporation.
10. FUNDAMENTOS SOBRE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS. Dirk R. Wiessig. Copyrigh 1995 WACKER-WERKE GMBH & Co. KG, Munchen. República Federal Alemana.
11. FUNDAMENTOS SOBRE LA COMPACTACION DEL HORMIGÓN. Sepp Rixner, Hans Schindelbeck & Dirk R. Wiessig. Copyrigh 1999 WACKER-WERKE GMBH & Co. KG, Munchen. República Federal Alemana.
12. ASTM E11 -24. American Society Test Materials. Año 2024. www.astm.org/contact.
13. AASHTO T 89-2022. 555 12th Street NW, Suite 1000 Washington, DC 20004.
14. AASHTO T 90-2022. 555 12th Street NW, Suite 1000 Washington, DC 20004.

Tabla de contenido

Identificación y clasificación de suelos y de rocas	3
EJEMPLOS DE RELACIONES POR PESO POR VOLUMEN DE SUELOS	28
5.....	31
Estructura y consistencia de los suelos	31
IDEAS DE SUELO Y AGUA EN GUATEMALA.....	67
CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO.....	68
DENSIDAD SECA Y DENSIDAD PROCTOR	69
AASHO STANDARD T-99 Proctor normal.....	72
AASHO STANDARD T-180 Proctor modificado	73
Determinación del contenido de agua en base a la curva Proctor	76
Métodos para la toma de muestra y control de la compactación en la obra.....	79

ANOTACIONES: