



INSTITUTO BOLIVIANO DEL CEMENTO Y EL HORMIGÓN



CONTROL Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS DE SUELO - CEMENTO

TRADUCCIÓN AUTORIZADA

AUTOR:

ING. MÁRCIO ROCHA PITTA

TRADUCCIÓN:

INSTITUTO BOLIVIANO DEL CEMENTO Y EL HORMIGÓN

La Paz – Octubre – 2002

PREFACIO

El control de la ejecución y la fiscalización de obras de suelo - cemento comprenden cuatro factores básicos: Contenido de cemento, contenido de humedad, compactación y espesor.

El tratamiento de estas variables debe ser efectuado ordenada y sistemáticamente, de manera que se obtengan resultados apropiados a un perfecto dominio del material y de la obra en sí.

La obtención de un producto final de calidad apropiada deriva de la observación rigurosa, de los siguientes aspectos:

- a) La investigación de bancos de materiales, ensayos de dosificación, proyecto geométrico y las especificaciones deben estar de acuerdo con los requisitos y condiciones de la obra.
- b) El equipo de construcción debe ser dimensionado y ajustado para las condiciones reales de trabajo.
- c) La pulverización del suelo debe ser suficiente y adecuada para un mezclado fácil con el cemento.
- d) La mezcla de cemento y el suelo debe ser uniforme y homogénea.
- e) El control de humedad debe ser riguroso.
- f) El espesor y el ancho de la capa deben estar de acuerdo con el proyecto y dentro de las tolerancias admisibles.
- g) El acabado debe proporcionar una superficie final húmeda, compacta y libre de escamas o laminas.
- h) Las juntas de construcción deben ser ejecutadas con suelo - cemento bien mezclado y bien compactado.
- i) El grado de compactación debe ser alcanzado sin grandes dificultades.
- j) El curado debe ser realizado con material apropiado y mantenido por tiempo suficiente para que el suelo - cemento alcance la resistencia y las cualidades mínimas requeridas;
- k) Los defectos aleatorios que surjan, deben ser reparados inmediatamente.

El objetivo de este trabajo es sugerir métodos útiles para el control de cada uno de los aspectos arriba mencionados. La aplicación con criterio de las recomendaciones señaladas por personal técnico capaz de evaluar el significado y las limitaciones de ellas, posibilitará la ejecución de pavimentos económicos durables y eficientes.

Palabras claves: Pavimentos de suelo - cemento, Pavimentos de suelo – cemento - construcción; Suelos - estabilización.

SIMBOLOGÍA ADOPTADA

C	=	<i>longitud de la línea de construcción</i>
c_m	=	<i>contenido de cemento en peso</i>
c_v	=	<i>contenido de cemento en volumen</i>
d	=	<i>distancia recorrida</i>
e	=	<i>espesor compactado de suelo - cemento</i>
\hat{e}	=	<i>espesor medio</i>
e_i	=	<i>espesor individual</i>
f	=	<i>número de líneas de construcción</i>
G_c	=	<i>grado de compactación</i>
G_p	=	<i>grado de pulverización</i>
h	=	<i>contenido de humedad de suelo</i>
h_e	=	<i>humedad de evaporación</i>
h_o	=	<i>contenido de humedad óptima</i>
L	=	<i>ancho de esparcido</i>
L_f	=	<i>ancho de la línea de construcción</i>
N	=	<i>número de bolsas de cemento</i>
n	=	<i>numero de pasadas de riego, por línea de construcción</i>
P_a	=	<i>peso de agua</i>
P_{af}	=	<i>peso de arena no mezclada</i>
P_{ag}	=	<i>peso de arena gastada para llenar el hueco, en el ensayo de γ_s</i>
P_c	=	<i>peso de cemento</i>
P_{fc}	=	<i>peso final del conjunto</i>
P_g	=	<i>peso después de secado superficial</i>
P_h	=	<i>peso de suelo húmedo</i>
P_{hsc}	=	<i>peso húmedo de suelo - cemento</i>
P_{ic}	=	<i>peso inicial del conjunto</i>
P_r	=	<i>peso retenido en el tamiz No. 4</i>
P_s	=	<i>peso de suelo seco</i>
P_{sc}	=	<i>peso de suelo – cemento</i>
P_{ssc}	=	<i>peso seco de suelo – cemento</i>
P_t	=	<i>peso de muestra representativa</i>
P_1	=	<i>peso de muestra húmeda más tara</i>
P_2	=	<i>peso de muestra seca más tara</i>
Q	=	<i>flujo de regaderas</i>
Q_a	=	<i>cantidad de agua</i>
Q'_a	=	<i>volumen total de agua necesaria</i>
Q_f	=	<i>cantidad de agua, por línea de construcción</i>
Q_p	=	<i>cantidad de agua echada, por pasada de regaderas</i>
S	=	<i>área a ser ejecutada</i>
T	=	<i>tara de un recipiente</i>
t	=	<i>tiempo de uso por la regadera en curso</i>
V	=	<i>volumen de suelo</i>
v	=	<i>velocidad de regado</i>
V_c	=	<i>volumen de cemento</i>
V_f	=	<i>volumen de hueco</i>
V_{sc}	=	<i>volumen de suelo - cemento</i>

γ_{areia}	=	<i>peso unitario de la arena</i>
γ_c	=	<i>peso específico aparente del cemento</i>
γ_s	=	<i>peso específico seco aparente de suelo-cemento "in situ"</i>
γ_{sc}	=	<i>peso específico seco aparente de suelo-cemento</i>

SUMARIO

RESUMEN

SIMBOLOGÍA ADOPTADA.....	3
SUMARIO.....	5
RESUMEN.....	5
1 INTRODUCCIÓN	7
2 IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS	7
3 PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE	7
4 VERIFICACIÓN DEL EQUIPO.....	9
5 PULVERIZACIÓN	9
6 ADICIÓN DE CEMENTO	13
6.1 ADICIÓN DE CEMENTO PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA EN PLATAFORMA	13
6.1.1 Cemento a granel - Esparcido mecánico.....	13
6.1.2 Cemento en bolsas - Esparcido manual.....	14
6.2 DOSIFICACIÓN DE CEMENTO PARA CONSTRUCCIÓN CON PLANTA CENTRAL	16
6.2.1 Planta de mezclado continuo.....	16
6.2.2 Planta de tipo mezclador	20
7 ADICIÓN DE AGUA.....	22
7.1 PRELIMINARES	22
7.1.1 Ensayo de compactación.....	22
7.1.2 Ensayo de determinación del contenido de humedad.....	25
7.2 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA EN LA PLATAFORMA.....	25
7.3 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA CENTRALIZADA.....	27
7.4 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA EN PLANTA TIPO MEZCLADORA.....	28
7.5 CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN PLATAFORMA	28
7.5.1 Medidor de Humedad (<i>speedy</i>)	28
7.5.2 Refrigerador.....	28
7.5.3 Peso específico húmedo aparente	29
7.5.4 Alcohol	29
8 GRADO DE COMPACTACIÓN	29
8.1 ENSAYO DE LA ARENA	30
8.1.1 Calibración del frasco de arena	30
8.1.2 Calibración del embudo	32

8.2	ENSAYO DE ACEITE	35
8.3	RECIPIENTE DE MUESTRA.....	35
9	ESPESOR	36
10	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	38
	APÉNDICE I - RELACIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO DE CAMPO	40
	APÉNDICE II – NÚMERO MÍNIMO RECOMENDADO DE ENSAYOS RELATIVOS A LA INSPECCIÓN DE ÁREA CON CERCA DE 1400 M ² (7M X 200M).....	41
	APÉNDICE III - RESUMEN DE LOS REQUISITOS DE CONTROL PARA ACEPTACIÓN DEL TRAMO.....	42
	APÉNDICE IV - MÉTODO PARA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO EN MEZCLA FRESCA DE SUELO - CEMENTO.	43

1 INTRODUCCIÓN

Antes de ser iniciado el tramo de la obra en cuestión, el ingeniero - supervisor debe revisar las hojas de ensayos de laboratorio, observando los resultados de las investigaciones de bancos, el proyecto y las especificaciones. El lugar de la obra debe ser inspeccionado, a fin de asegurar que se observe el perfil apropiado, y que las capas de fundación (sub - base, refuerzo, subrasante) estén en las condiciones previstas en el proyecto.

2 IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Las características de suelo y los elementos de dosificación del suelo-cemento deben constar de una hoja resumen o certificado de ensayos, como se muestra en la *Figura 1* siendo un ejemplo típico. Los materiales procesados en el campo se comparan con los datos de identificación indicados en la hoja resumen y con las informaciones suministradas por el proyecto y especificaciones, para asegurar el uso de cantidades de cemento requerido por el suelo. Si surgiera una diferencia incuestionable entre el suelo ensayado en laboratorio y el suelo disponible en el campo, es obvio que nuevos ensayos deberán ser efectuados.

3 PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE

Las áreas de subrasante inestable o de calidad sospechosa deben ser sustituidas o corregidas, de manera que permitan una compactación adecuada de las capas superiores y, posteriormente, un comportamiento correcto del pavimento en cuanto a las deformaciones de su fundación.

Suelos inestables de subrasante son generalmente sujetos a saturación de humedad, pudiendo ser identificados por la constatación de deformación excesiva que presentan cuando son solicitados por un rodillo compactador. Manchas de humedad superficiales pueden ser eliminadas por un proceso de aireación; En caso de alcanzar profundidades mayores se requiere remover la capa afectada, y su sustitución por material de mejor calidad, siendo también válida la alternativa de realizar un tratamiento de subrasante con un aglomerante hidrófilo, por ejemplo, pequeñas cantidades de cemento.

Deben ser colocadas estacas - guías cerca de 40 cm al lado de los bordes futuros de pavimento, para controlar el ancho del tratamiento y orientar a los operadores durante la ejecución.

Interessado Associação Brasileira de Cimento Portland TRABALHO Nº 7305/42

Procedência: Estrada Belo Horizonte - Pedro Leopoldo (MG) AMOSTRA Nº 2

Localização da amostra: Furo 37 - Prof. 0,30m - 1,90m - jaz. única

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO					
GRANULOMETRIA			ÍNDICES FÍSICOS		
			(%)		
Pedregulho grosso	4,8 mm a 76 mm	10,0	Limite de liquidez	Não determinado	
Pedregulho fino	2,0 mm a 4,8 mm	18,0	Limite de plasticidade	NP	
Areia grossa	0,42 mm a 2,0 mm	29,0	Índice de plasticidade	NP	
Areia fina	0,85 mm a 0,42 mm	21,0	PEDREGULHO GROSSO		
Silte	0,005 mm a 0,05 mm	16,0	Absorção (%)	4,0	
Argila	inferior a 0,005 mm	6,0	Massa específica absoluta (g/cm ³)	2,63	
inferior	a 0,075 mm	25,0	Classificação segundo a AASHO (M 145)	A1-b (0)	

ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO					
Ensaio de Compactação		Ensaio à compressão de corpos de prova		Ensaio de durabilidade por malhagem e secagem	
Teor de cimento em massa (%)		Teor de cimento em massa (%)	Resistência média à compressão simples aos 7 dias (kPa)	Teor de cimento em massa (%)	Perda de massa corrigida (%)
5,0		5,0	3000		
Umidade ótima (%)	11,4				
Massa específica aparente seca máxima (kg/m ³)	1980				

Teor de cimento em volume indicado: 6,6 %

de acordo com o Método Norma Simplificada "B"

OBSERVAÇÕES: Solo-cimento destinado à sub-base do pavimento de concreto da MG-010

São Paulo, 18 de maio de 1973

Márcio Rocha Pitta

Engenheiro responsável - Depto de Solos e SC

Figura 1

4 VERIFICACIÓN DEL EQUIPO

Todo el equipo necesario para la construcción debe estar en la obra y en buenas condiciones de operación, antes del inicio del proceso.

Es interesante, - y constituye una excelente ayuda para un ajuste del equipo y del proceso constructivo - la ejecución de un pequeño tramo experimental, con unos 100 m de extensión, donde serán establecidas las directrices generales para la ejecución de la obra. Algunos puntos importantes del equipo que deben ser revisados antes del inicio de la ejecución son:

- a) *En Planta* - correa transportadora, silos de suelo, distribuidor de cemento, engranajes y láminas de la mezcladora, barra de esparcimiento de agua.
- b) *En plataforma* - motoniveladora, pulvimezcladora, barra distribuidora de agua de camión cisterna, rodillos compactadores, lastre, patas o neumáticos.

5 PULVERIZACIÓN

Algunos suelos, principalmente los arenosos, requieren poca o ninguna acción de pulverización antes del inicio de su procesamiento. Sin embargo, los suelos arcillosos exigen este trabajo preliminar. La correcta operación de pulverización en suelos finos es una función del control adecuado de humedad, junto a un equipo apropiado para la pulverización.

La mayoría de las especificaciones indican que, antes de las operaciones de adición y mezcla de cemento al suelo, el 80% de este último pase el tamiz n° 4 (4,8 mm), excluyéndose la gravilla y piedras naturalmente mayores a este diámetro. El ensayo del grado de pulverización es el método recomendado para esa verificación

El ensayo de grado de pulverización (*Figuras 2a, b, c y d*) se realiza con una muestra representativa, de peso igual o mayor a 2000 g, y obedece a la siguiente secuencia:

- a) Se pesa la muestra representativa, se obtiene P_t
- b) Clasificando una muestra en el tamiz n° 4 (4,8 mm), se obtiene el peso retenido en el tamiz, P_r ;
- c) Se lava, en el propio tamiz n° 4, el material retenido (de peso P_r), hasta que todo el material fino no pulverizado sea desechado de la porción originalmente retenida; obteniéndose, entonces, el peso del material graduado en la muestra representativa (el peso debe ser efectuado después del secado superficial del material graduado), P_g ;
- d) Se calcula el grado de pulverización (G_p) por la fórmula:

$$G_p (\%) = \frac{P_t - P_r}{P_t - P_g} \times 100 \quad (1)$$

La inexistencia de terrones en el suelo ($P_g = 0$), transforma la fórmula (1) en:

$$G_p(\%) = \frac{P_t - P_r}{P_t} \times 100 \quad (2)$$

EJEMPLO:

Datos:

- Peso de la muestra representativa P_t = 2500 g
- Peso retenido en tamiz n° 4 P_r = 914 g
- Peso de grava graduada en suelo ($> 4,8$ mm) = 250 g

Se requiere:

Grado de pulverización y comentario sobre el resultado.

Procedimiento:

- El grado de pulverización será:

$$G_p(\%) = \frac{P_t - P_r}{P_t - P_g} \times 100$$

$$G_p(\%) = \frac{2500 - 914}{2500 - 250} \times 100 \quad \therefore G_p = 70,5 \%$$

Comentarios:

Los trabajos de pulverización deben continuar, hasta $G_p \geq 80\%$. La pulverización de suelo puede ser alcanzada por:

- Pasadas adicionales de la pulvimezcladora;
- Reducción de su velocidad;
- Sustitución de las láminas gastadas del eje y verificación de los discos de fricción;
- Pre - humedecimiento y homogenización del suelo al inicio del proceso.

Suelos que tengan contenidos excesivos de humedad no se mezclan fácilmente con cemento, así, el contenido de humedad del suelo debe ser evaluado, por lo menos empíricamente, antes de la adición del cemento. El contenido de humedad del suelo antes de esa adición no debe exceder la humedad óptima, siendo aconsejable que esté por lo menos 2 puntos porcentuales debajo de ésta.

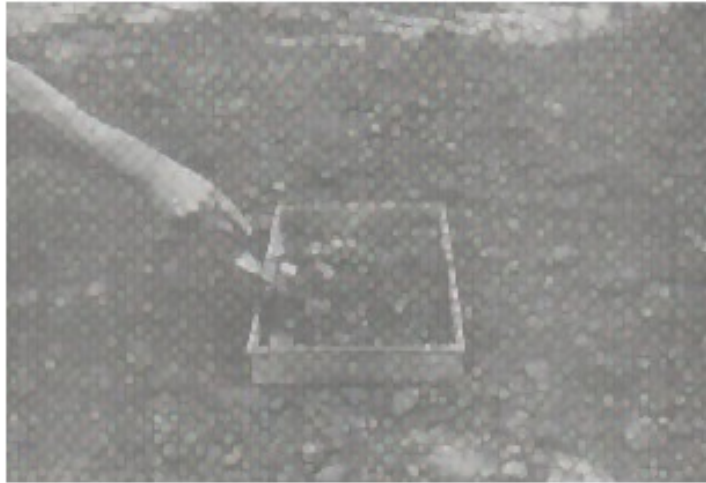


Figura 2a - Aspecto de colchón del suelo en fase de pulverización

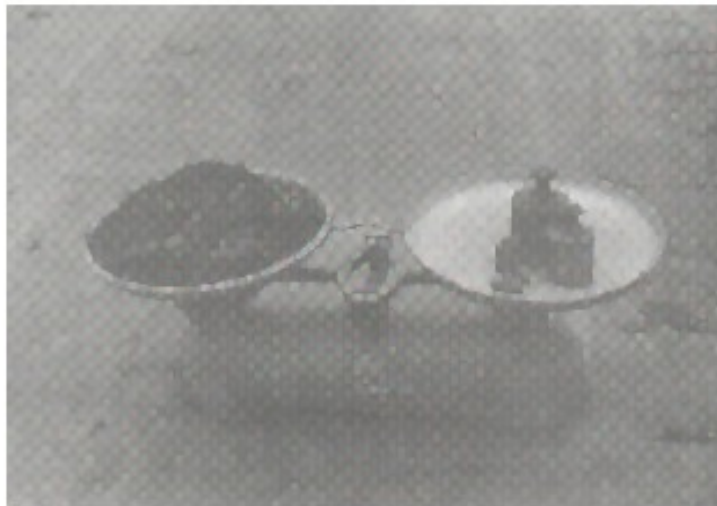


Figura 2b – Ejecución de pesaje de muestra total

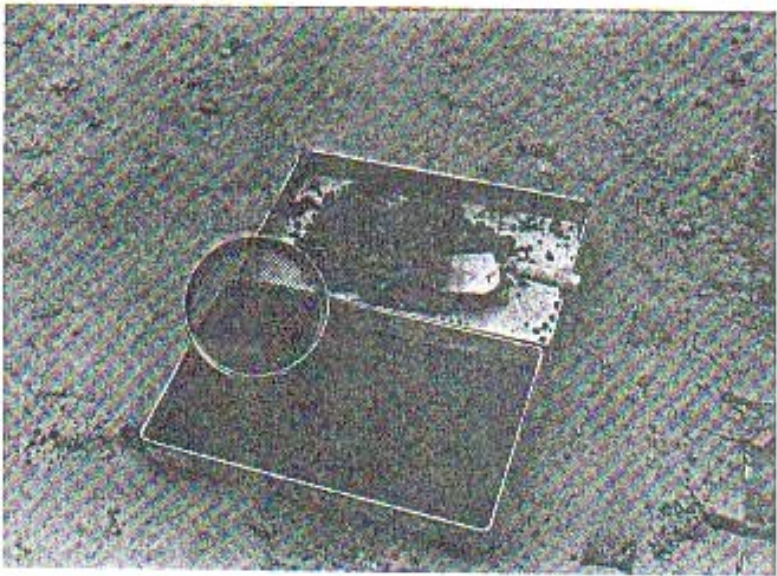


Figura 2c – Final de tamizado

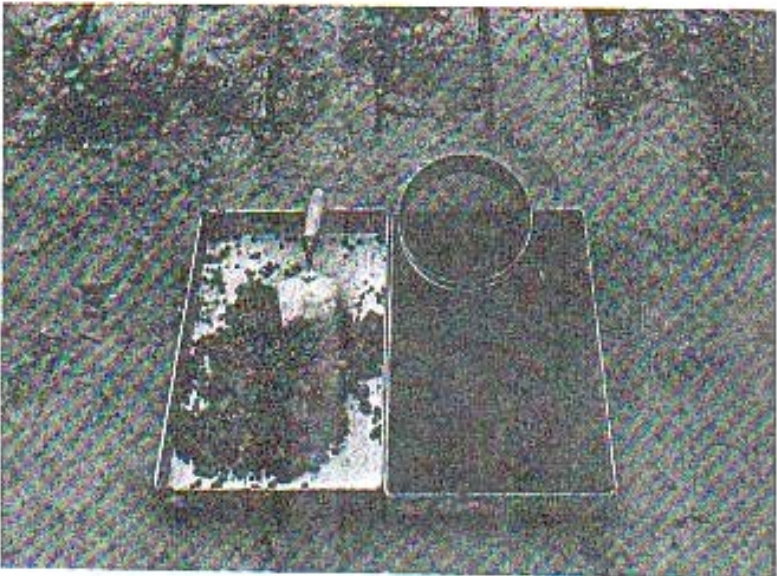


Figura 2d – Tamiz No. 4 material retenido y material que pasa

6 ADICIÓN DE CEMENTO

6.1 ADICIÓN DE CEMENTO PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA EN PLATAFORMA

6.1.1 Cemento a granel - Esparcido mecánico

Las esparcidoras de cemento deben operar a velocidad baja y constante, a fin de obtener un esparcido uniforme de cemento.

EJEMPLO:

Datos:

- Contenido de cemento en volumen (c_v) = 10%
- Espesor compactado de suelo - cemento (e) = 15 cm
- Ancho del esparcido (L) = 2,4 m
- Carga útil del camión = 3400 Kg

Se requiere:

Cantidad de cemento a ser esparcida (P_c), por metro lineal, y la distancia a ser recorrida por el camión para esparcir el cemento necesario (d), dentro de un determinado flujo unitario.

Procedimiento:

- a) Determinar el volumen del suelo de una faja de 1m de largo.
 $V = 0,15 \cdot 2,4 = 0,36 \text{ m}^3$

- b) Determinar el volumen de cemento:
 $V_C = 0,10 \cdot 0,36 = 0,036 \text{ m}^3$

- c) Determinar el peso del cemento:
 $P_C = \gamma_C \cdot V_C = 1430 \cdot 0,036 \text{ m}^3 = 51,48 \text{ Kg/m}$

- d) Determinar la distancia recorrida por el camión:

$$d = \frac{3400}{51,48} = 66,0 \text{ m}$$

- e) El gráfico de la *figura 3* proporciona el consumo de cemento por metro cuadrado de plataforma.

6.1.2 Cemento en bolsas - Esparcido manual

EJEMPLO:

Datos:

- Longitud de faja de construcción (C) = 200 m
- Ancho de la de faja de construcción (L_f) = 7,2 m
- Contenido de cemento en volumen (c_v) = 8%
- Espesor compactado de suelo - cemento (e) = 15 cm
- Peso específico aparente suelo del cemento (γ_c) = 1430 Kg/m³.

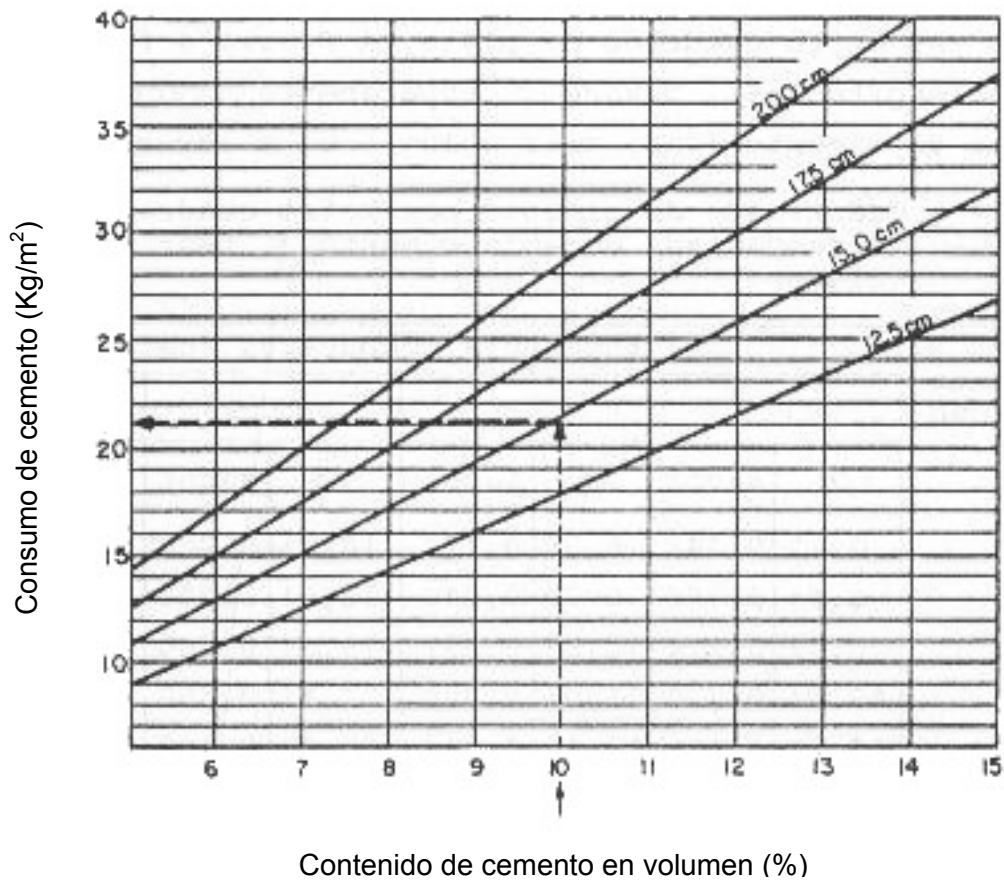


Figura 3 – Cantidad de cemento x m2 x contenido de cemento en volumen x espesor compactado

Se requiere:

Número de bolsas por metro cuadrado de plataforma, espaciamiento transversal y longitudinal entre bolsas de cemento.

Procedimiento:

En la *tabla 1*, se observa que son necesarias 0,343 bolsas de cemento por metro cuadrado de plataforma. La *figura 4* proporciona el espaciado longitudinal, fijando el espaciado transversal entre las bolsas de cemento (caso más común), o el inverso.

Tabla 1 - Cantidad de cemento por metro cuadrado × espesor compactado de suelo - cemento × contenido de cemento en volumen.

% cemento en volumen (C _v)	Espesor compactado (cm)							
	12,5		15,0		17,5		20,0	
	Kg	Bolsas	Kg	Bolsas	Kg	Bolsas	Kg	Bolsas
4	7,15	0,143	8,58	0,171	10,01	0,200	11,44	0,228
5	8,94	0,178	10,72	0,214	12,51	0,250	14,30	0,286
6	10,72	0,214	12,87	0,257	15,01	0,300	17,16	0,343
7	12,51	0,250	15,01	0,300	17,51	0,350	20,02	0,400
8	14,30	0,286	17,16	0,343	20,02	0,400	22,88	0,457
9	16,08	0,321	19,30	0,386	22,52	0,450	25,74	0,514
10	17,87	0,357	21,45	0,429	25,02	0,500	28,60	0,572
11	19,66	0,393	23,59	0,471	27,52	0,550	31,46	0,629
12	21,45	0,429	25,74	0,514	30,03	0,600	34,32	0,686

Analíticamente:

- a) Volumen de suelo - cemento, por metro de capa compactada:

$$V_{sc} = 1,00 \times 1,00 \times e = 1,00 \text{ m} \times 1,00 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} = V_{sc} = 0,15 \text{ m}^3$$

- b) Peso de cemento, por m²:

$$P_c = C_v \times V_{sc} \times \gamma_c \tag{3}$$

$$P_c = 0,08 \times 0,15 \times 1430 = 17,16 \text{ Kg/m}^2$$

- c) Número necesario de bolsas de cemento para el área total:

$$N = \frac{P_c \times C \times L_f}{50 \text{ Kg}} \tag{4}$$

$$N = \frac{17,16 \times 200 \times 7,2}{50 \text{ Kg}} = 494 \text{ bolsas de cemento}$$

- d) Dividiendo la faja total en 3 sub fajas de 2,4 m de ancho cada una, el número de bolsas por hilera será:

$$\frac{N}{6} = \frac{494}{6} = 83 \text{ bolsas}$$

- e) Para el sub tramo de 200 m de largo la distancia entre los centros de dos bolsas de cemento consecutivas será:

$$2L_f = \frac{200}{83} = 2,40 \text{ m}; \text{ y } L_f = \frac{2,40}{2} = 1,20 \text{ m}$$

- f) La disposición esquemática será como muestra la *Figura 5*.

6.2 DOSIFICACIÓN DE CEMENTO PARA CONSTRUCCIÓN CON PLANTA CENTRAL

La tendencia actual es utilizar plantas centrales en la construcción de suelo - cemento. Equipadas con mezcladoras de tipo pug - mill, facilitando ampliamente las operaciones de mezclado de suelo - arena, o suelo - agregado, con cemento.

El uso de este equipo exige que se suministre cemento en el suelo antes de entrar a la cámara de mezclado. De esta manera, es necesario calibrar el horno, de la manera que sigue:

6.2.1 Planta de mezclado continuo

Se opera inicialmente colocando el suelo en la correa transportadora. Se determina el peso del suelo para una longitud cualquiera de la correa, por ejemplo, 5m. Con la determinación de la humedad de suelo, se calcula el peso seco.

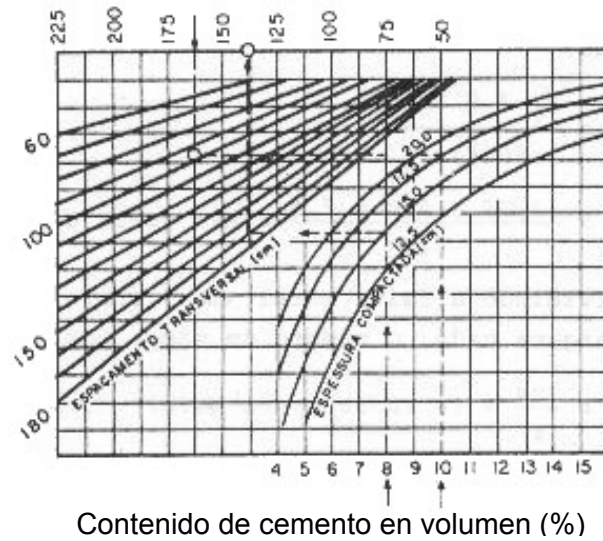


Figura 4 – Espaciamiento entre bolsas de cemento x cantidad de cemento en volumen x espesor compactado

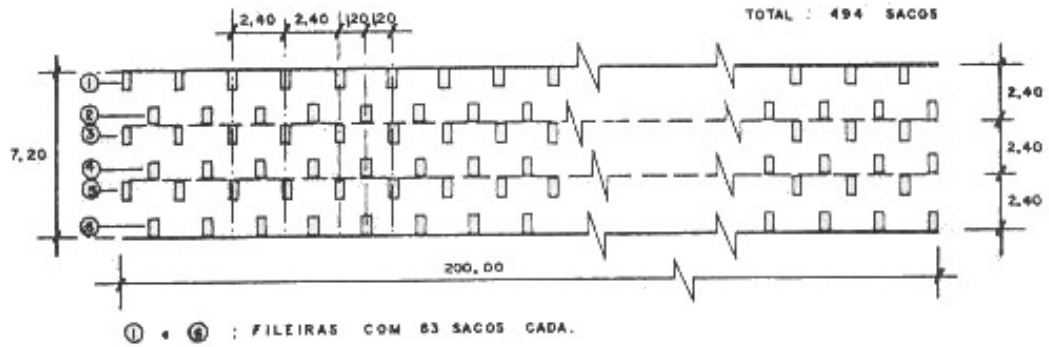


Figura 5 – Distribución esquemática de bolsas de cemento

La planta se opera a continuación sólo con el cemento en la correa transportadora; cuando se usa un silo alimentador de correa, deben ser hechos varios intentos, con diferentes aberturas del alimentador de cemento. El peso del cemento contenido en la unidad de longitud de la correa es entonces determinado, para varias aberturas del alimentador. Se diseña un gráfico de calibración, relacionando las aberturas del alimentador de cemento con los pesos de cemento por unidad de longitud de la correa transportadora. De esta manera, para un constante flujo de suelo, se puede determinar la abertura que permitirá el flujo de cemento requerido, por la relación entre el peso de cemento y el peso de suelo seco. Es aconsejable que cada punto del gráfico corresponda al valor medio obtenido, por lo menos en tres determinaciones.

EJEMPLO

Datos:

- Contenido de humedad del suelo (h) = 5%
- Contenido de cemento en peso (C_m) = 6%

Se pide:

Abertura del silo de alimentación de cemento.

Procedimiento:

- a) Determinar el peso de suelo en una extensión de 5 m de la correa transportadora. Para este ejemplo, considerar un valor de 300,00 kg para un suelo húmedo (P_h);

- b) Convertir el peso de suelo húmedo en peso de suelo seco:

$$P_s = \frac{P_h}{100 + h} \times 100 \quad (5)$$
$$P_s = \frac{300}{100 + 5} \times 100 = 285,7 \text{ kg}$$

- c) La cantidad necesaria de cemento será:

$$P_c = C_m \times P_s \quad (6)$$
$$P_c = 0,06 \times 285,7 = 17,14 \text{ kg/m de correa transportadora;}$$

- d) Operar la planta sólo con cemento, y pesar el cemento depositado en 5 m de la correa transportadora, para cuatro diferentes aberturas de un silo de cemento; por ejemplo:

$$2,0 \text{ cm de abertura} - P_c = 10,00 \text{ kg de cemento (media de 3 determinaciones)}$$
$$3,5 \text{ cm de abertura} - P_c = 17,50 \text{ kg de cemento (media de 3 determinaciones)}$$
$$5,0 \text{ cm de abertura} - P_c = 25,00 \text{ kg de cemento (media de 3 determinaciones)}$$
$$6.5 \text{ cm de abertura} - P_c = 31,50 \text{ kg de cemento (media de 3 determinaciones);}$$

- e) Colocar estos resultados en un gráfico, con las aberturas abscisas y los pesos en ordenadas. La *Figura 6* muestra el gráfico resultante para el presente ejemplo;
- f) A partir del gráfico, seleccionar la abertura que provea 17,14 Kg de cemento por metro lineal de correa, correspondiente a 6% del contenido de cemento en peso. En el presente caso, la abertura requerida sería de 3,43 cm.
- g) Verificar, por medio de pesaje directo en 5 m de correa, si la cantidad de cemento es, realmente, la requerida.

El mismo procedimiento puede ser usado cuando el alimentador es un tornillo sin fin con velocidad de rotación variable. Es suficiente construir un gráfico de *revoluciones por minuto* \times *kilogramos de cemento por unidad de largo de correa transportadora*.

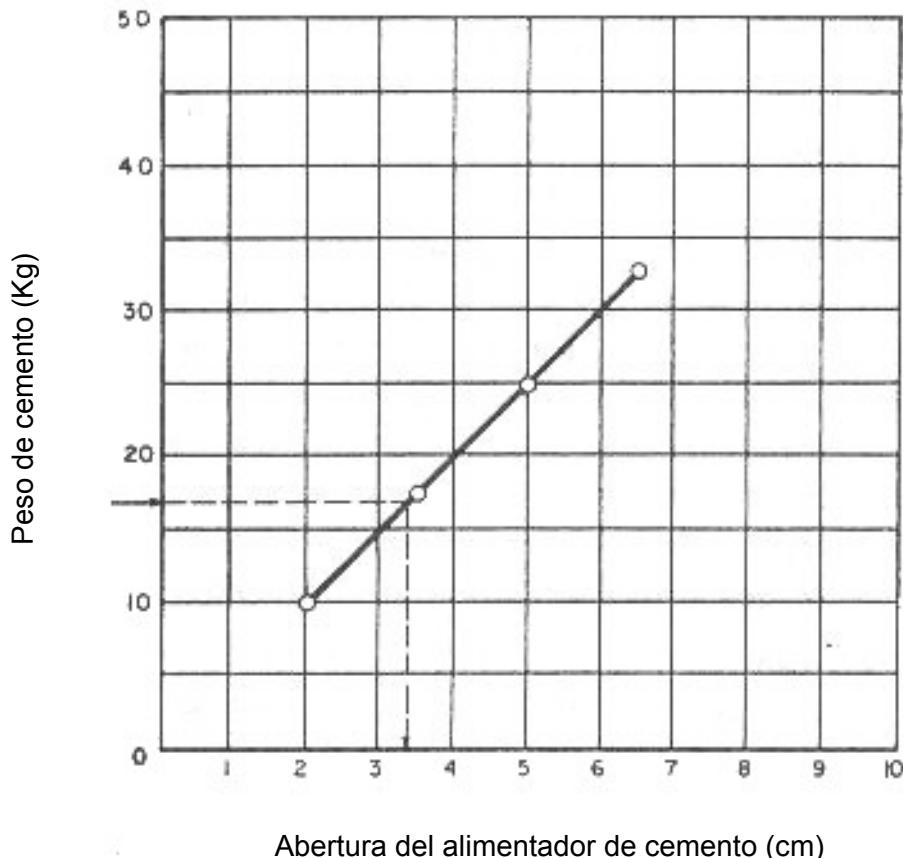


Figura 6 – Gráfico de calibración de planta

Otro procedimiento de calibración de planta de mezclado continuo es determinar, separadamente, las cantidades de suelo y de cemento que alimentan el mezclador, durante un cierto tiempo - generalmente, 60 segundos. Primero, el suelo es lanzado en el mezclador durante ese periodo de tiempo, descargado en un camión y pesado.

Entonces, el cemento es recogido directamente del alimentador, por el mismo espacio de tiempo, reajustada la abertura, si es necesario. Se repiten las operaciones hasta que la proporción exacta entre el cemento y suelo sea la requerida.

La calibración de la planta debe ser efectuada siempre que el ritmo de servicio lo permita. Las plantas excepcionalmente precisas permiten 2 verificaciones semanales como mínimo; en ciertos casos la verificación debe ser diaria. Como recomendación adicional, se debe evitar que la planta sea paralizada frecuentemente durante un día de servicio, pues eso conlleva una constante descalibración, obligando a un ajuste más seguido.

El control del contenido del cemento, en el suelo - cemento mezclado en planta, ha sido hecho a través de un ensayo químico, según la norma ASTM D 2901. La práctica corriente es ejecutar la verificación de hora en hora, con 2 muestras cada vez, como mínimo. El ensayo tiene un inconveniente serio, que es, la pequeña cantidad de muestra por ensayo - 5g, cuarteados de 500 g originales; ese inconveniente puede ser minimizado por la calibración cuidadosa y frecuente de suelo - cemento dosificado en planta y las soluciones empleadas.

La tolerancia admitida en la variación del contenido de cemento es tomada en la faja de 10% sobre el valor especificado, en más o en menos, en casi todos los organismos carreteros.

En el caso de suelo - cemento endurecido, se puede aplicar el método ASTM D 806, aplicable al caso.

En el apéndice, se presenta un método - alternativa; para la determinación del contenido de cemento en mezclas de suelo - agregado es objeto de la publicación *Suelo – grava tratado con cemento: método para la determinación del contenido de cemento en mezclas frescas*, de ABCP.

6.2.2 Planta de tipo mezclador

Cuando el suelo - cemento es mezclado en una planta de este tipo, todos los materiales son pesados para cada mezcla, antes de ser llevados al mezclador *pug - mill*.

EJEMPLO

Datos:

- contenido de cemento en peso (c_m)..... = 5%
- contenido de humedad óptima (h_c)..... = 10%
- contenido de humedad natural de suelo (h)..... = 4%

Se pide:

Peso de suelo, cemento y agua por mezclada.

Procedimiento :

Cálculo para mezclada de 500 kg

a) Proporciones y porcentajes

<i>suelo seco</i>	=	100,0%
<i>cemento</i>	=	5,0%
<i>agua: 10% x (100% + 5%)</i>	=	<u>10,5%</u>
<i>Total</i>	=	115,5%

b) Peso de suelo seco:

$$P_s = \frac{500}{1,155} \dots\dots\dots = 432,9 \text{ Kg}$$

c) Pesos para la mezclada, basadas en suelo seco:

<i>cemento: $P_c = 0,05 \times 432,9$</i>	=	21,6 Kg
<i>agua: $P_a = 0,105 \times 432,9$</i>	=	<u>45,5 Kg</u>
<i>peso total de la mezcla</i>	=	500,0 Kg

d) Agua conducida por el suelo, por mezclada:

$$P_a = 0,04 \times 432,9 \dots\dots\dots = 17,3 \text{ Kg}$$

e) Pesos corregidos para suelo húmedo

<i>cemento: P_c</i>	=	21,6 Kg
<i>suelo húmedo: $P_h = 432,9 + 17,3$</i>	=	450,2 Kg
<i>agua $P_a = 45,5 - 17,3$</i>	=	28,2 L
<i>($\gamma_{\text{agua}} = 1$)</i>		

En una planta - mezcladora el suelo y el cemento deben ser mezclados antes de añadir el agua. Es interesante mantener registros continuos de los pesos de suelo y cemento usados, para control y comparación.

7 ADICIÓN DE AGUA

7.1 PRELIMINARES

Uno de los cuatro parámetros de control para el suelo - cemento es el contenido de humedad. La humedad óptima es determinada en laboratorio y usada como referencia cuando se inicia la construcción. Al concluir la mezcla húmeda (ejecución con mezcla en el sitio) en el esparcimiento de mezcla (ejecución con central), se hace un ensayo de compactación con energía normal (conforme el método ponderado por el proyecto 16:5.2-3, de ABNT), con una muestra representativa de material. Eso determina la humedad óptima y la densidad máxima a ser usadas en el control de la ejecución del sub tramo a ser construido. Los resultados pueden diferir de los valores de laboratorio, debido a la variación de suelo, o a los efectos de hidratación parcial de cemento durante el tiempo de mezclado.

7.1.1 Ensayo de compactación

En el ensayo, la mezcla suelo - cemento está dispuesta en 3 capas, dentro de un cilindro metálico con el volumen útil de, aproximadamente, 1000 cm³. Cada capa es compactada por 25 golpes verticales de un martillo padronizado, con 2,5 Kg de peso y un diámetro de 5 cm, cayendo libremente de una altura igual a 30,5 cm (*Figuras 7a y 7b*).

El espesor de las capas es controlado de tal modo que la tercera capa alcance, cuando esté compactada, cerca de 1 cm encima de la parte superior del molde, dentro del collar.

Después de ser retirado el collar, el suelo - cemento es enrasado al tope del molde.

A continuación se determina el peso del cilindro con la probeta de ensayo. Ese peso es determinado para diferentes contenidos de humedad, de la manera descrita.

Los contenidos de humedad son calculados, así como los pesos secos de las probetas de ensayo y los pesos específicos secos aparentes correspondientes. Se relacionan en un gráfico los contenidos de humedad (en abscisas) y los pesos específicos secos aparentes (en ordenadas), obteniéndose la curva de compactación (*Figura 8*). El contenido óptimo de humedad es aquel en que el mayor peso específico aparente es obtenido en el ensayo; es entonces llamado *peso específico seco máximo aparente*, y deberá aproximadamente, ser obtenido en la ejecución del suelo - cemento.

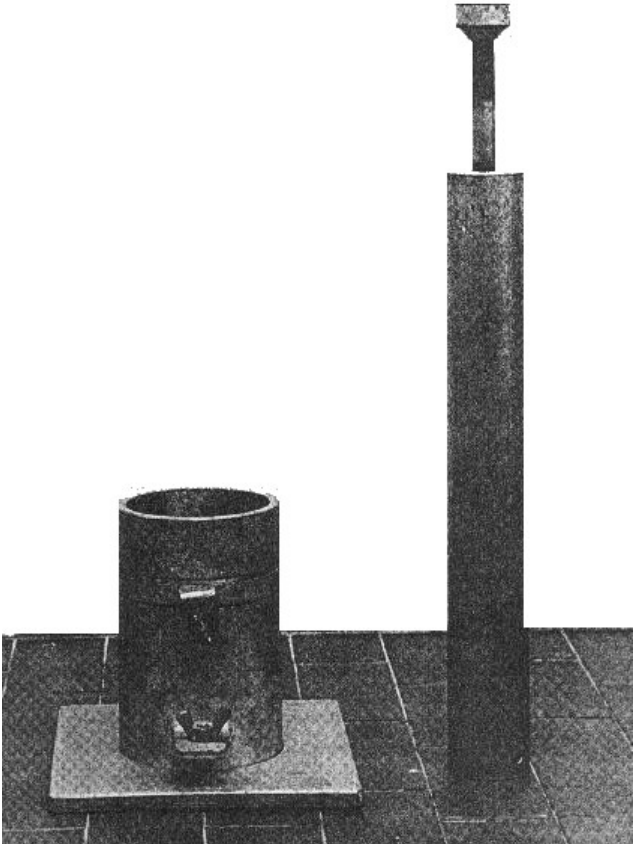


Figura 7a – Equipo para el ensayo de compactación

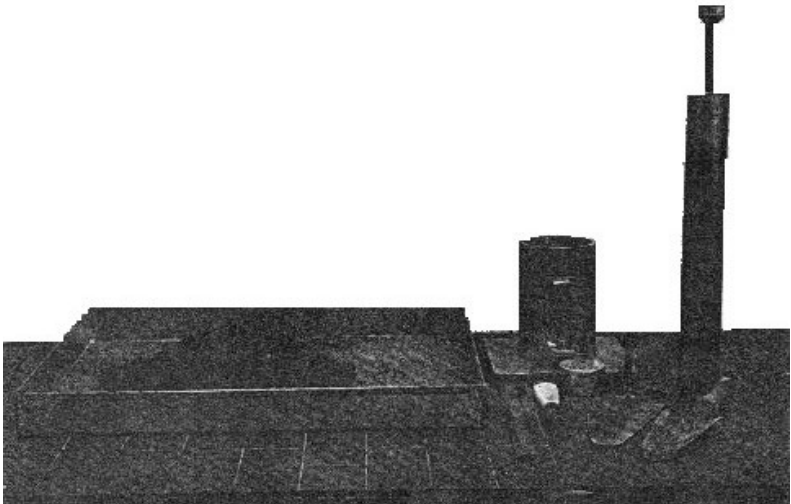


Figura 7b – Equipo para el ensayo de compactación

TRABALHO N.º 7303/39

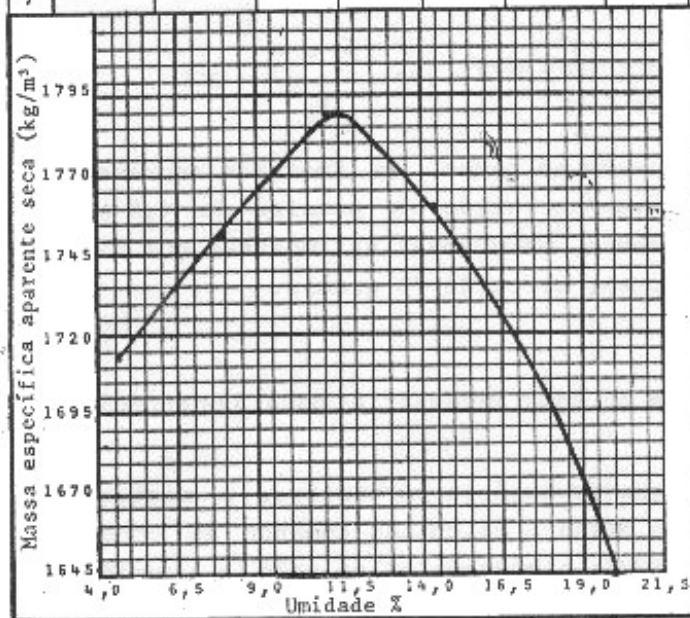
AMOSTRA N.º 1

DADOS DO ENSAIO	
% de solo graúdo	-
Absorção do solo graúdo	-
Umidade do solo miúdo	7,2%
Teor de cimento	6%

DADOS DOS APARELHOS	
Soquete n.º	1
Cilindro n.º	4
Volume do cilindro	0,996 dm ³
Massa do cilindro	2374 g

COMPOSIÇÃO DA MISTURA			
Massa total do solo (g)	Solo graúdo (g)		Massa do cimento (g)
	Massa seca: -	Solo miúdo (g)	
2500	Massa úmida: -	Massa seca: 2500	150
		Massa úmida: 2680	

P O N T O	Massa do corpo de prova úmido + cilindro (g)	Massa do corpo de prova úmido (g)	Determinação do teor de umidade							Massa do corpo de prova seco (g)	Massa específica aparente seca do corpo de prova (kg/m ³)
			Cáps.	Massa bruta úmida (g)	Massa bruta seca (g)	Tara da cápsula (g)	Massa da água (g)	Massa do solo seco (g)	Teor de umidade (%)		
N.º	(g)	(g)	N.º	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(kg/m ³)
1	4,160	1786	128	109,80	106,15	27,71	3,65	78,44	4,7	1706	1713
2	4,255	1881	141	115,84	109,43	26,89	6,41	82,54	7,8	1745	1752
3	4,355	1981	124	117,87	108,67	26,20	9,20	82,47	11,2	1781	1788
4	4,380	2006	110	133,53	120,25	28,20	13,28	92,05	14,4	1753	1760
5	4,340	1966	25	113,00	96,80	15,65	16,20	81,15	20,0	1638	1645
6											
7											



RESULTADOS	
γ_{max}	1790 kg/m ³
H_{ot}	11,5 %

Data inicial 14/março de 1973

Data final 15/março de 1973

Operador Celso

Calculista Paulo Eugênio

Revisor Paulo Eugênio

Figura 8

7.1.2 Ensayo de determinación del contenido de humedad

Para estimar el contenido de agua necesaria para la ejecución de suelo - cemento se debe determinar la humedad del suelo o de la mezcla, a partir de las muestras representativas.

Las muestras son pesadas húmedas, después se secan completamente en hornilla a 105 °C – 110 °C, y pesadas después del secado. El contenido de humedad se calcula por:

$$h \text{ (em \%)} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (7)$$

Para el ensayo realizado en campo, las muestras representativas que contengan grava retenida en el tamiz de 4,8 mm (No. 4) deben pesar, por lo menos, 300 gramos; las muestras que no posean grava pueden pesar cerca de 70 gramos.

7.2 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA EN LA PLATAFORMA

La cantidad de agua necesaria para llevar la mezcla de suelo - cemento hasta la humedad óptima se calcula tomando en consideración esta última, la humedad higroscópica del suelo y la humedad de evaporación (para compensar las pérdidas de agua durante las operaciones de mezclado y compactación). La humedad óptima y la de evaporación son referidas a la mezcla suelo - cemento; la humedad higroscópica es referida al suelo puro.

EJEMPLO

Datos:

- Humedad óptima de suelo - cemento (h_o) = 14%
- Humedad de evaporación (h_e) = 1%
- Humedad higroscópica de suelo (h) = 10%
- Contenido de cemento en volumen (c_v) = 10 %
- Peso específico seco aparente de suelo – cemento (γ_{sc}) = 1800 Kg/m³
- peso específico aparente suelo de cemento (γ_c) = 1430 Kg/m³
- Espesor compactado de suelo - cemento (e) = 0,15 m
- Área a ser ejecutada (S) = 1440 m²
- Largo de la faja de trabajo (C) = 200 m
- Ancho de la faja de trabajo (L_f) = 2,4 m
- Número de fajas (f) = 3
- Velocidad de la regadera (v) = 60 m/min
- Flujo de la regadera (Q) = 321 l/m

Se pide:

Litros de agua para el sub tramo total, y número de pasadas de la regadera (por faja).

Procedimiento:

- a) La cantidad de agua, por metro cuadrado, será:

$$Q_a = P_{sc}(h_o + h_e) - P_s \cdot h \quad (8)$$

siendo:

$$V_{sc} = 1,0 \times 1,0 \times 0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$P_{sc} = V_{sc} \cdot \gamma_{sc}$$

$$P_{sc} = 0,15 \times 1800 = 270,00 \text{ Kg/m}^2$$

$$P_c = V_c \cdot \gamma_c = C_v \cdot V_{sc} \cdot \gamma_c$$

$$P_c = 0,10 \times 0,15 \times 1430 = 21,45 \text{ Kg/m}^2$$

$$P_s = P_{sc} - P_c$$

$$P_s = 270,00 - 21,45 = 248,55 \text{ Kg/m}^2$$

tenemos:

$$Q_a = 270,00 (0,14 + 0,01) - 248,55 \times 0,10$$

$$Q_a = 15,65 \text{ L/m}^2 \text{ (teniendo en cuenta que } \gamma_{\text{agua}} = 1)$$

- b) El volumen total de agua necesario es:

$$Q'_a = Q_a \times S \quad (9)$$

$$Q'_a = 15,65 \times 1440$$

$$Q'_a = 22500 \text{ L}$$

- c) El número de pasadas de la regadera, por faja, para distribuir el agua necesaria será:

Cantidad de agua por faja:

$$Q_f = \frac{Q'_a}{f} = \frac{22500}{3} = 7500 \text{ L}$$

(10)

Tiempo que toma la regadera para recorrer la faja:

$$t = \frac{C}{v} = \frac{200}{60} = \frac{10}{3} \text{ minutos} \quad (11)$$

Cantidad de agua lanzada en una pasada de regadera

$$Q_p = Q \times t = 321 \times \frac{10}{3} = 1070 \text{ L} \quad (12)$$

Número de pasadas, por faja, para distribuir el agua necesaria:

$$n = \frac{Q_f}{Q_p} = \frac{7500}{1070} = 7 \text{ pasadas/faja} \quad (13)$$

El cálculo puede ser sintetizado por la fórmula:

$$n = \frac{Q'_a \times v}{f \times Q \times C} \quad (14)$$

7.3 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA CENTRALIZADA

EJEMPLO - Planta Central

Datos:

- Contenido de cemento, en peso (c_m) = 6%
- Humedad óptima de suelo - cemento (h_o) = 10%
- Humedad higroscópica de suelo (h) = 5%
- Velocidad de la correa transportadora = 91,5 m/min
- Peso del suelo (más humedad higroscópica) en 1 m de la correa transportadora = 47 Kg
- Humedad de evaporación = 2%

Se pide:

Número *aproximado* de litros de agua por minuto (flujo requerido).

Procedimiento:

- a) Convertir el peso húmedo de suelo (en 1 m de correa, en este ejemplo) en peso de suelo seco:

$$\frac{47,0}{100 + 5} \times 100 = 44,76 \text{ Kg}$$

- b) Calcular la cantidad de cemento requerido:

$$0,06 \times 44,76 = 2,69 \text{ Kg}$$

- c) Calcular el peso del suelo y cemento en 1 m de correa:

$$44,76 + 2,69 = \text{Kg}$$

- d) Calcular la cantidad de mezcla de suelo - cemento por minuto:

$$\frac{47,45 \times 91,5}{1} = 4341,67 \text{ kg/minuto}$$

- e) Calcular el número de litros necesarios por minuto, para 1,0% de humedad:

$$\frac{0,01 \times 4341,67}{1} = 43,4 \text{ l/minuto}$$

- f) Calcular el flujo aproximado (litros por minuto) necesario para llevar la mezcla hasta la humedad óptima:

$$(10 - 5 + 2) \times 43,4 = 303,8 \text{ l/minuto}$$

7.4 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA PARA CONSTRUCCIÓN CON MEZCLA EN PLANTA TIPO MEZCLADORA

Los cálculos son los mismos mostrados en el punto 6.2.2.

7.5 CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN PLATAFORMA

El control de humedad de suelo - cemento antes de la compactación puede ser hecho por métodos diversos. Los más empleados son:

- Medidor de humedad (*speedy*);
- Refrigerador;
- Densidad húmeda;
- Alcohol.

A continuación se presenta la descripción de cada uno de ellos.

7.5.1 Medidor de Humedad (*speedy*)

El medidor de humedad - más conocido por *speedy* - es un aparato constituido por una cámara y un manómetro unido a ella. Dentro de la cámara se coloca el suelo (o suelo - cemento) húmedo y una cierta cantidad de carburato de calcio. Después de cerrar la cámara, se asegura una mezcla íntima de los dos materiales, lo que provocará la reacción del agua de suelo con el carburato, produciendo gas acetileno. El gas acciona el manómetro, el cual indica el porcentaje relativo de agua en cuanto al peso de suelo seco utilizado - por lectura directa o con ayuda de tablas apropiadas.

El *speedy* es de rápida utilización debiendo ser calibrado para cada tipo de suelo que se utilizará en la obra, por medio de una correlación entre la humedad suministrada por ella y la suministrada por la estufa eléctrica.

7.5.2 Refrigerador

El método de determinación de humedad por el secado de suelo dentro de una heladera presenta un inconveniente de apreciación parcial del operador, que conlleva errores no sistemáticos.

Además de esto, tiene una desventaja de exigir un hornillo en el campo.

7.5.3 Peso específico húmedo aparente

El proceso que se utiliza es también expedito. Se moldea en un cilindro de compactación, una probeta de ensayo siguiendo las mismas condiciones de ensayo de compactación. Se determina el peso específico húmedo aparente, que, está próximo al peso específico húmedo máximo aparente, garantiza estar la humedad también próxima de la óptima de compactación. Exige gran práctica y discernimiento del operador.

7.5.4 Alcohol

El proceso del alcohol consiste en tomar una pequeña muestra (alrededor de 40 g) y colocarla en un recipiente de aluminio cribado de pequeños agujeros en el fondo (diámetro de 1 mm, como máximo); este recipiente reposa, por medio de tres pernos, en un plato también de aluminio. Cierta cantidad de alcohol es distribuida en la muestra y en su calor de combustión hace evaporar el agua en ella contenida. El contenido de humedad será:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - T} \times 100, \text{ en porcentaje \%}$$

en que:

P_1 = peso de la muestra húmeda mas el aparato, [g];

P_2 = peso de la muestra seca más el aparato, [g]; y

T = Peso del aparato, [g].

Este método de ensayo no dará resultado satisfactorio si el contenido de materia orgánica en el suelo fuera relativamente alto; en efecto, el resultado quedará alterado debido a la combustión de partículas de materia orgánica.

8 GRADO DE COMPACTACIÓN

La durabilidad de una mezcla de suelo - cemento, como su resistencia a la compresión simple, dependen grandemente que la compactación que la capa del material recibe al ser ejecutado.

El control de compactación se hace a través de la verificación del peso específico seco aparente de la capa lista, quiere decir, luego de terminada la operación de compactación. Entre tanto, a criterio de la fiscalización, es posible ampliar ese plazo.

Los métodos más empleados en la determinación de esa densidad son:

- Ensayo de la de arena;
- Ensayo de aceite;
- Barril demostrador.

8.1 ENSAYO DE LA ARENA

Es el más conocido y difundido, en la práctica. Las *Figuras 9a y 9b* muestran pormenores del equipamiento y del ensayo.

Se utiliza un frasco que contiene arena limpia, seca, con granulometría entre los tamices n° 20 (0,85 mm) y n° 30 (0,50 mm); cuanto más uniforme la arena, menor será la dispersión de los resultados.

8.1.1 Calibración del frasco de arena

- a) Determinar el peso del frasco completo (con el embudo), vacío;
- b) Llenar el frasco con la arena adecuada, colocando a través del embudo, sin vibrar o balancear el conjunto. Pesar el conjunto;
- c) Determinar el volumen del frasco, llenándolo con agua. Pesar el conjunto, y calcular el peso del agua empleada.

EJEMPLO

(1)	Peso del conjunto, lleno de arena	= 8,000 Kg
(2)	Peso del conjunto vacío	= 3,500 Kg
(3)	Peso de la arena = (1) - (2)	= 4,500 Kg
(4)	Peso del conjunto, lleno de agua	= 6,310 Kg
(5)	Peso del agua = (4) - (2)	= 2,810 Kg
(6)	Volumen del frasco = (5) / 1,000 Kg/m ³	= 2,810 m ³
(7)	Peso unitario de arena = (3) / (6)	= 1600 Kg/m ³

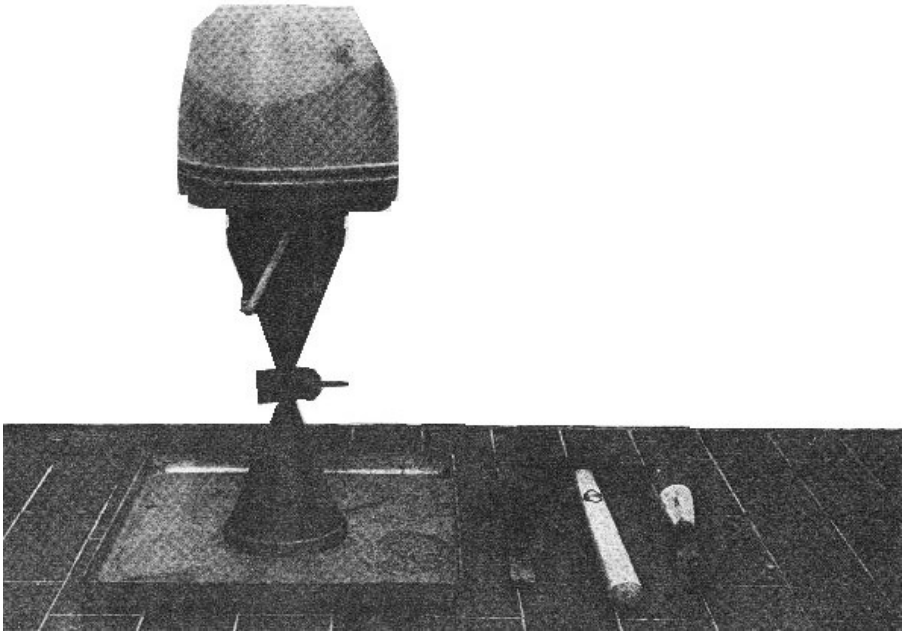


Figura 9a – Equipo para el ensayo de la arena

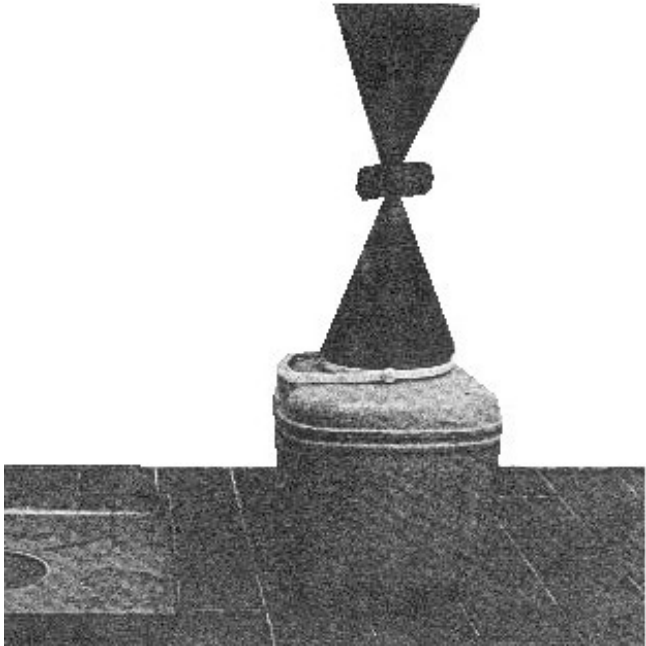


Figura 9b – Equipo para el ensayo de la arena

8.1.2 Calibración del embudo

Es suficiente colocar el conjunto (con el frasco lleno de arena) sobre una bandeja, abriendo la válvula, de modo que la arena escurra sin ser forzada por vibración o sacudida, cerrar la válvula al notar que la arena deja de fluir. Teniendo:

- a) Peso inicial del conjunto lleno;
- b) Peso final del conjunto mas arena restante;
- c) Peso de la arena del embudo = (1) - (2).

El ensayo tiene la siguiente descripción:

- a) Se abre un agujero en la capa compactada, con el auxilio de una bandeja perforada como guía, cuidándose de recoger el material retirado, sin pérdida. Con el peso de ese material, se obtiene el peso de suelo - cemento húmedo (P_h). Se retiran 2 cápsulas para la determinación de humedad. El agujero debe tener 10 cm de diámetro por una profundidad igual a la profundidad de la capa en estudio.
- b) A continuación, el conjunto del frasco es colocado sobre el agujero hecho anteriormente y se abre una válvula controladora de salida de arena. Se debe cuidar que el flujo de arena sea continuo, y ocurra sin vibración del conjunto y en la ausencia de tráfico de equipo pesado en la zona del ensayo. Se va a obtener, de ese modo, el volumen del agujero, como se muestra en los cálculos a continuación.
- c) Si el suelo fuera de alta incidencia de grava, determinar el porcentaje de material retenido en la tamiz n° 4 (4,8 mm), del material retirado del agujero;
- d) Cálculos:
 - Humedad de material retirado: *Fórmula (7)*
 - Peso seco del material retirado: *Fórmula (5)*
 - Porcentaje retirado del tamiz No. 4 (4,8 mm):

$$\% \text{ Retenido}(4,8 \text{ mm}) = \frac{\text{peso retenido}(4,8 \text{ mm})}{\text{peso total de la muestra}} \times 100 \quad (15)$$

- Volumen del agujero:

$$V_f = \frac{\text{peso de la arena usada para llenar el agujero} (dm^3)}{\text{peso unitario de la arena}} \quad (16)$$

- Peso específico seco aparente de suelo-cemento, *in situ*:

$$\gamma_s = \frac{\text{peso seco de material retirado}}{\text{volumen del agujero}}, \text{ en g/dm}^3 \quad (17)$$

EJEMPLO 1

Datos:

- Peso inicial del conjunto (P_{ic}) = 8,000 Kg
- Peso final del conjunto (P_{fc}) = 4,415 Kg
- Peso de arena en el embudo (P_{af}) = 1,660 Kg
- Peso húmedo medio de las cápsulas de humedad (P_h) = 0,753 Kg
- Peso seco medio de las cápsulas de humedad (P_s) = 0,685 Kg
- Peso unitario de arena (γ_{arena}) = 1600 Kg/m³
- Peso húmedo del material retirado (P_{hsc}) = 2,483 Kg

Se pide:

Peso específico seco aparente del suelo - cemento.

Procedimiento:

- a) Contenido de humedad de suelo – cemento:

$$h = \frac{0,753 - 0,685}{0,685} \times 100 = 9,93\%$$

- b) Peso seco de suelo - cemento retirado del agujero

$$P_{ssc} = \frac{2,483}{100 + 9,93} \times 100 = 2,259 \text{ Kg}$$

- c) Peso de arena usada en el relleno del agujero

$$P_{ag} = 8,000 - 4,415 - 1,660 = 1,925 \text{ Kg}$$

- d) Volumen del agujero:

$$V_f = \frac{1,925}{1600} = 0,001203 \text{ m}^3$$

- e) Peso específico seco aparente de suelo - cemento, *in situ*:

$$\gamma_s = \frac{2,259}{0,001203} = 1878 \text{ Kg / m}^3$$

- f) En el caso de un suelo altamente gravoso es interesante y aconsejable proceder a una corrección de peso específico aparente encontrado en el campo, ya que, en general, ocurren diferencias sensibles, entre esta y aquella de laboratorio, por causa de la naturaleza del material. La *Figura 10* muestra como efectuar esa corrección.

EJEMPLO 2

Datos:

- Porcentaje de grava graduada en el ensayo de compactación de campo ($> 4,8$ mm) = 25%
- Porcentaje de grava graduada en el material retirado del agujero ($> 4,8$ mm) = 33%
- Peso específico de la grava = 2,52
- Peso específico seco máximo aparente, en el ensayo de compactación de campo = 1950 Kg/m^3

Se pide

Peso específico seco aparente corregido, en una muestra que contiene 33% de grava.

Procedimiento:

En la *Figura 10*, marcar la intersección de 1950 Kg/m^3 con 25% de grava graduada; el punto encontrado es vinculado linealmente con el peso específico 2,52; donde esa línea recta corta la vertical marcada por 33% de grava, trazar una horizontal por la izquierda y determinar el peso específico seco aparente corregido. En el presente ejemplo, γ_s corregido = 1983 Kg/m^3 .

Este es el peso específico seco aparente, corregido teóricamente, en el ensayo de compactación de campo, para una muestra conteniendo 33% de grava graduada (en lugar de 25%). El peso específico seco aparente *in situ* debe, entonces, ser comparado con este, y no con el anterior.

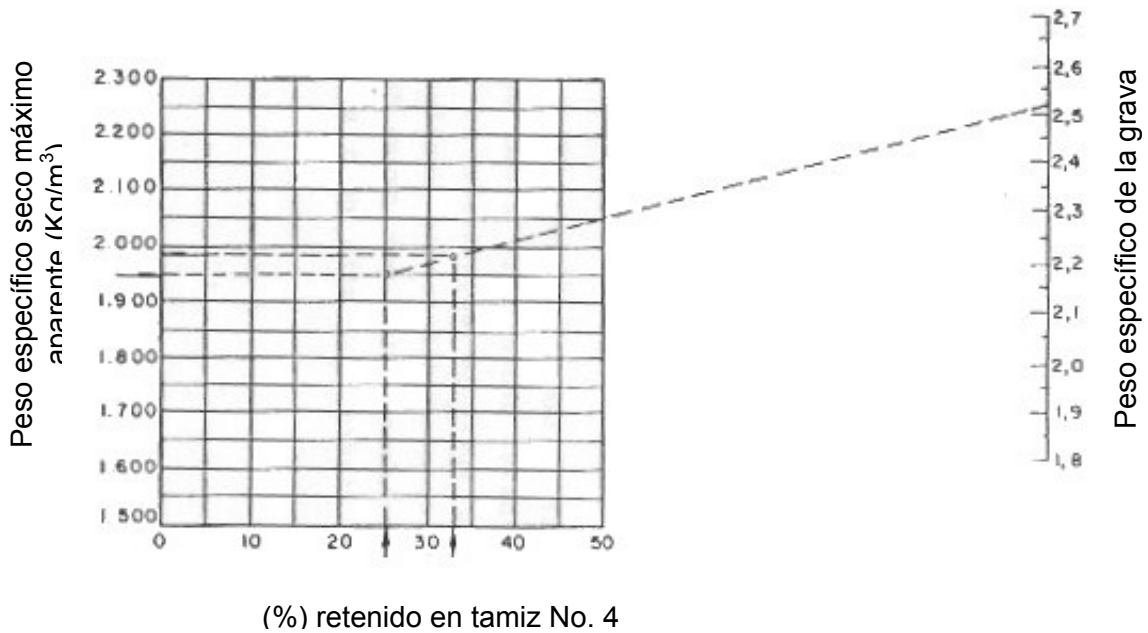


Figura 10 – Ábaco para corrección de peso específico seco máximo aparente debido a la variación en la cantidad de grava

8.2 ENSAYO DE ACEITE

Empleado rara vez hoy en día. Su ejecución es prácticamente la misma que el ensayo de arena, cambiando el material de relleno del agujero. Tiene la desventaja de ser menos precisa la determinación del volumen del agujero, debido al hecho de que el aceite lleva bolsas de aire y, todavía puede ser parcialmente absorbido por las paredes del agujero.

8.3 RECIPIENTE DE MUESTRA

El ensayo consiste en enclavar de un recipiente metálico, de volumen conocido, en la capa de suelo - cemento compactado. Por pesado y eliminación de la tara, seguida la determinación de la humedad del material, es posible conocer su peso específico seco aparente. Uno de los inconvenientes del método es el amasamiento de suelo - cemento al ser penetrado por el recipiente, lo que tiende a aumentar la cantidad de material muestreado y en consecuencia, aumentar el peso específico aparente. Esto va en contra la seguridad. Otro inconveniente es la obligatoriedad de ejecutar el ensayo luego del término de las operaciones de compactación de una capa, pues, después de algún tiempo de endurecimiento, es virtualmente imposible el enclavado del molde.

El grado de compactado (G_c) es calculado a partir de los datos encontrados en el ensayo de compactación de campo (sección 7.1.1 en Figuras 7a y 7b) y en una de los ensayos de verificación del peso específico aparente *in situ*, descritos anteriormente.

Llamando el peso específico seco máximo aparente encontrado en el ensayo de campo γ_{sc} , y el peso específico seco aparente *in situ* de γ_s , el grado de compactación (G_c) será:

$$G_c = \frac{\gamma_s}{\gamma_{sc}} \times 100, \text{ expresado en porcentaje \%} \quad (18)$$

EJEMPLO

Datos:

- Peso específico seco máximo aparente de suelo-cemento (γ_{sc}) = 2000 Kg/m³
- Peso específico aparente *in situ*: método de la arena (γ_s) = 1920 Kg/m³

Se pide:

Grado de compactación de la capa de suelo - cemento.

Procedimiento:

$$G_c = \frac{1920}{2000} \times 100 \quad \therefore \quad G_c = 96,0 \%$$

El grado de compactación a ser considerado varía con las especificaciones particulares de cada órgano caminero; la Asociación Brasileira de Cemento Pórtland recomienda un mínimo de 95 % de peso específico seco máximo aparente obtenido en el ensayo de compactación de campo (energía normal).

9 ESPESOR

Es necesario verificar el espesor de la capa de suelo - cemento en dos oportunidades:

- Inmediatamente después de la mezcla (construcción con la mezcla en la plataforma) o después de esparcida la mezcla (mezclado en planta) - llamándose espesor de colchón esponjoso;
- Después del término de las operaciones de acabado - verificación del espesor compactado o de la capa terminada.

Lo usual es hacer esas verificaciones del siguiente modo:

- a) *Espesor del colchón esponjoso:* en los lugares donde se retira la muestra para el ensayo de grado de pulverización, introducir una regla metálica, graduada en milímetros, y proceder a la lectura, teniendo el cuidado obvio de tomar como referencias los extremos de la capa de suelo - cemento (o sea, el borde de la base y el inicio de la sub-base);

- b) *Espesor compactado*: en los agujeros donde se efectuaron los ensayos de la de arena, para determinación de la densidad *in situ*, con el mismo procedimiento y cuidados descritos arriba.

Se acostumbra, también, verificar el espesor por medio de nivelación, o, últimamente, por la medición de deformaciones.

La Asociación Brasileña de Cemento Pórtland recomienda las siguientes tolerancias para el espesor compactado:

- Para agujeros individuales:

$$(1 - 0,12) \times e \leq e_i \leq (1 + 0,12) \times e$$

- Para un promedio de los agujeros:

$$(1 - 0,08) \times e \leq e_i \leq (1 + 0,08) \times e$$

EJEMPLO

En un tramo con 7,2 m x 200,0 m se efectuaron las siguientes medidas de espesor final (en cm):

e_1	=	16,2	e_6	=	15,2
e_2	=	14,7	e_7	=	13,0
e_3	=	13,4	e_8	=	13,6
e_4	=	16,2	e_9	=	15,0
e_5	=	15,1	e_{10}	=	14,8

Sabiendo que el espesor del proyecto es $e = 15,0$ m, calcular la tolerancia y comentar el resultado.

Procedimiento:

- a) Promedio de los agujeros:
- b) Tolerancia:

- Sobre el promedio:

$$e \times (1 \pm 0,08) \begin{cases} 15,0 \times 1,2 = 16,20 \text{ cm} \\ 15,0 \times 0,92 = 13,80 \text{ cm} \end{cases}$$

$$16,20 \geq e \geq 13,80$$
$$16,20 \geq 14,72 \geq 13,80$$

Aceptado en cuanto al promedio.

- *Sobre los agujeros individuales:*

$$e \times (1 \pm 0,12) \begin{cases} 15,0 \times 1,2 = 16,80 \text{ cm} \\ 15,0 \times 0,88 = 13,20 \text{ cm} \end{cases}$$

$$13,20 \leq e_i \leq 16,80$$

Por tanto: Proceder a un nuevo muestreo en la zona del punto n° 7 ($e_7 < 13,20 \text{ cm}$) para delimitar el área de sospecha, confirmando o no la falta de espesor, antes de aceptar o rechazar el sub tramo correspondiente.

10 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

El control de obras de suelo - cemento por la resistencia a la compresión simple es bastante difundido en el Brasil, a pesar de ser esta resistencia apenas un elemento parcial de verificación de la calidad de un suelo - cemento. En la realidad, el ensayo de resistencia a la compresión simple como control de suelo - cemento es bastante precario, pues muestran las investigaciones al respecto que ella es altamente influenciada por el grado de compactación obtenido, bien por el tiempo de reposo de la mezcla humedecida, antes de la compactación como por el tipo y duración del curado, etc.

Una otra restricción que se puede hacer en cuanto a la adopción de ese ensayo como padrón de control es la inexistencia de estudios estadísticos que posibiliten el conocimiento perfecto de las dispersiones que se verifican en ensayos de este tipo.

Su gran ventaja es el hecho de ser un ensayo universal, de fácil ejecución.

Otra observación es que no existe una dirección fija en cuanto a los valores límites de aceptación o rechazo. Algunos órganos camineros estipulan una resistencia mínima igual a 80 % de la resistencia obtenida en probetas de ensayo moldeadas en laboratorio de campo, antes de la ejecución; otros fijan un mínimo de 60 % en las mismas condiciones, y así sucesivamente. El único punto de acuerdo ha sido la duración del ensayo: 7 días.

En el *Apéndice III*, se presenta una sugerencia para el control estadístico de la resistencia a la compresión simple en mezclas de suelo - cemento.

La muestra de campo debe ser ejecutada con material recolectado inmediatamente después de la humidificación y homogenización, antes de la compactación, no dejando la mezcla recolectada en reposo por mucho tiempo. El moldeaje es ejecutado con la energía normal, o sea:

a) Cilindro:

- Diámetro = 10,16 cm
- Altura libre = 12,70 cm

- Volumen (aparente) = 1000 cm^3

b) Martillo

- Altura de caída libre = $30,5 \text{ cm}$
- Peso = $2,496 \text{ Kg}$

c) Condiciones

- Capas = 3
- Golpes por capa = 25

Después de moldeados, los cuerpos de prueba son envueltos en material húmedo y mantenidos a la sombra, hasta ser llevados la cámara húmeda. El tiempo de curado será de 7 días. Antes de la rotura, las probetas de ensayo deben ser sumergidas en agua, por un tiempo que varía con las especificaciones de cada órgano; la Asociación Brasileira de Cemento Pórtland recomienda 4 horas de inmersión.

Se sabe de antemano que influyen en sobremanera en la resistencia de las probetas de ensayo los factores descritos a continuación:

- Mezcla de suelo, de cemento y de agua en el campo* -nunca es totalmente uniforme, por buena que sea la calidad del servicio;
- Confeción de las probetas de ensayo* - el ensayo de compresión exige contacto íntimo entre las cabezas de la prensa y las bases de la probeta de ensayo; ese contacto es función del acabado de la probeta de ensayo;
- Curado de las probetas de ensayo* - es necesaria protección contra la evaporación rápida de la humedad en ella contenida;
- Humedad de mezcla* - la humedad es el elemento preponderante en la obtención de densidad, que influye significativamente en la obtención de la resistencia.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión hechos con las probetas de ensayo moldeadas con mezcla de campo llevan a resultados inferiores a los del laboratorio. Las causas fundamentales de esos resultados inferiores dependen de las condiciones de ejecución, como: dosificación volumétrica, mala pulverización, mezcla heterogénea y tiempo de procesamiento de mezcla.

APÉNDICE I - RELACIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO DE CAMPO

Equipo	Cantidad
Cilindro, base y collar	3
Martillo normal	3
Extractor de muestra	1
Cápsulas de aluminio con cubierta, para determinación de humedad higroscópica (grande)	50
Estufa para 105 ° C - 110 ° c	1
Balanza para 10 Kg, sensible a 5 g	1
Balanza <i>triple escala</i> para 200 g, sensible a 0,01 g	1
Prensa hidráulica para 100.000 N (\cong 10.000 Kg)	1
Probeta, graduada en cm ³ , para 1000 cm ³	3
Tamices (juego completo)	1
Frasco para el ensayo de la arena	1
Espátula	varias
Recolector de grava	varias
Vasija, bandeja	varias
Material de escritorio	-

APÉNDICE II – NÚMERO MÍNIMO RECOMENDADO DE ENSAYOS RELATIVOS A LA INSPECCIÓN DE ÁREA CON CERCA DE 1400 M² (7M X 200M)

Compactación (Energía Normal)

2 ensayos por tramo de 200 m de extensión x 7 a 7,2 m de ancho (o de 100 m en 100 m).

Pulverización

4 ensayos por tramo (o de 50 m en 50 m)

Verificación del colchón espumoso

4 verificaciones por tramo (aleatoriamente)

Porcentaje de granulometría pequeña

6 ensayos por tramo (aleatoriamente)

Consumo de cemento

- a) Mezcla en el lugar: 1 verificación
- b) Mezcla en la planta: 2 calibraciones por semana
4 registros por día

Humedad

- a) Control inicial: 10 determinaciones
- b) Control final: 10 determinaciones

Resistencia a la compresión simple

9 probetas de ensayo por tramo (cada 20 m)

Verificación del espesor

5 a 10 veces por tramo (cada 40 m - 20 m).

Grado de compactación

5 a 10 ensayos por tramo (cada 40 m -20 m).

APÉNDICE III - RESUMEN DE LOS REQUISITOS DE CONTROL PARA ACEPTACIÓN DEL TRAMO

Peso específico aparente en campo

Igual o mayor que 95 % del peso específico aparente máximo del ensayo normal de compactación.

Pulverización

Antes de adicionar el cemento, debe ser igual o mayor al 80 %, excluido el material grande.

Espesor

Perforaciones aisladas: ± 12 % del espesor del proyecto

Promedio de las perforaciones: ± 8 % del espesor del proyecto

Humedad

Suelos arenosos: ± 10 % sobre humedad óptima

Suelos arcillosos: $h_o \pm 1$ %

Suelos lateríticos: $h_o - 3$ %
 $h_o + 1$ %

Resistencia a compresión simple

$$\bar{R} - \frac{1,29 \times s}{N} \geq 0,80 \times R_{min. esp.}$$

- \bar{R} = resistencia promedio de probetas de ensayo;
- s = desviación estándar de las resistencias;
- N = nº de valores individuales en la muestra ($9 \leq N \leq 30$);
- $R_{min. esp.}$ = resistencia mínima especificada en el proyecto.

APÉNDICE IV - MÉTODO PARA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO EN MEZCLA FRESCA DE SUELO - CEMENTO.

1 OBJETIVO

- 1.1 Este método fija el procedimiento para la determinación del contenido de cemento en mezclas suelo - cemento.
- 1.2 Para evitar el ajuste trabajoso de soluciones, se recomienda la construcción de una curva de calibración (sección 6), donde ya son tomados en cuenta los factores que pueden influir en los resultados: suelo, cemento, soluciones y agua.
- 1.3 A partir de la curva, y siempre y cuando no sean modificadas las condiciones, el contenido de cemento es obtenido por interpolación del gráfico.

2 APARATOS Y MATERIAL

- Balanzas con capacidad de 200 g, sensibilidad 0,5 g
- Balón volumétrico de 1000 cm³
- Balón volumétrico de 200 cm³
- Vasos de vidrio de 250 cm³
- Cápsulas de porcelana de 10 cm de diámetro
- Probeta graduada de 50 cm³
- Probeta graduada de 100 cm³
- Probeta graduada de 1000 cm³
- Pipeta volumétrica de 20 cm³
- Pipeta volumétrica de 50 cm³
- Bastón de vidrio
- Bureta 100 o 50 cm³
- Vidrio oscuro de 100 cm³ con cuenta - gotas
- Erlenmeyer de 200 cm³
- Embudo de Φ 6 cm
- Titriplex III (100 g)
- Negro de Ericromo T (25 g)
- Clorato de amonio (1 Kg)
- Hidróxido de amonio (5 L)
- Ácido clorhídrico (2 L)
- Hoja de ensayo

3 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

3.1 Solución de Ácido Clorhídrico

- a) Con la probeta graduada, medir 75 cm³ de HCl, pasando poco enseguida a un balón volumétrico de 1000 cm³;
- b) Completar el volumen con agua destilada, y,

- c) Transferir la solución a un recipiente de vidrio oscuro y poner etiqueta.

3.2 Solución de *Titriplex III*

Pesar 10 g de *titriplex* y disolver en 1000 cm³ de agua destilada. Pasar la solución inmediatamente a un vidrio oscuro, colocar etiqueta.

3.3 Tapa de la solución (*Büffer*) PM-11

Pesar en un vaso de 250 cm³ 67,5 g de clorato de amonio (NH₄Cl), disolver con agua destilada y transferir a un balón volumétrico de 1000 cm³. Añadir 570 cm³ de hidróxido de amonio (NH₄OH) y completar el volumen hasta una marca de 1000 cm³. Pasar la solución a un vidrio oscuro. Colocar etiqueta.

3.4 Solución de *Negro de Eriocromo T* (Indicador)

Pesar 2 g de *negro de eriocromo T* negro y disolver en 100 cm³ de agua destilada. Pasar la solución a un vidrio oscuro provisto de cuentagotas. Colocar etiqueta.

4 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA – MUESTREO

4.1 Cuando la mezcla a ensayar está constituida por material de granulometría fina (100% que pasa el tamiz de 2 mm), la humedad de la mezcla es suficiente para evitar la segregación de los materiales - motivo por el que no se recomienda trabajar con mezclas secas.

4.2 Cuando la mezcla a ensayar está constituida por material de granulometría gruesa, deberá pasarse en el tamiz de 2 mm sólo el material fino que será usado en el ensayo. En este caso, para la construcción de la curva de la calibración o para el ensayo, se recomienda el siguiente procedimiento:

- a) Tomar una muestra de 500 g de la mezcla húmeda;
- b) Pasarla en el tamiz de 2 mm; y,
- c) Cuartear el material tamizado para tomar 5 g que se usarán en el ensayo o en la construcción de la curva de calibración.

5 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO

5.1 Pesar 5 g de la mezcla de suelo - cemento humedecida y con un contenido de humedad próxima a la óptima. Pasar a un vaso de vidrio.

5.2 Agregar aproximadamente 40 cm³ de la solución de ácido clorhídrico, mezclando bien aproximadamente unos 5 minutos.

5.3 Pasar el material a un balón volumétrico de 200 cm³ usando un embudo y lavar bien el vidrio con ayuda de un chorro de agua destilada.

- 5.4 Agregar aproximadamente 20 cm³ de hidróxido de amonio y agitar rápidamente el balón. Resultará una formación de un precipitado gelatinoso de hidróxido férrico y aluminio.
- 5.5 Completar el volumen de 200 cm³ con agua destilada. Homogeneizar el líquido, cuidando de no dispersar el precipitado.
- 5.6 Filtrar el precipitado, recogiendo lo filtrado en una copa de vidrio.
- 5.7 Medir con una pipeta volumétrica 20 cm³ de filtrado y pasar a un Erlenmeyer de 200 cm³.
- 5.8 Medir en una probeta aproximadamente 20 cm³ de la solución y agregar el material de sección 5.7.
- 5.9 Gotear de 3 a 8 gotas del indicador (*negro de eriocromo T*) y el líquido deberá quedar enrojecido.
- 5.10 Llenar la bureta con solución del *titriplex* (sección 3.2). Preparar previamente el grifo de la bureta lubricando con vaselina. Usar una pequeña cantidad y quitar cualquier residuo que pueda haber penetrado en el agujero del grifo.
- 5.11 Titular el material de la sección 5.9, hasta tornar al indicador azul.
- 5.12 Leer el volúmen, en cm³ usado en la titulación.
- 5.13 Leer en la curva de calibración el texto que corresponde al volúmen de *titriplex* usado en la titulación.

6 CURVA DE CALIBRACIÓN

- 6.1 A fin de evitar el ajuste trabajoso de las soluciones empleadas, debe ser construida una curva de calibración (*Figura A*), procediéndose de la manera indicada a continuación.
- 6.2 Preparar 3 mezclas de suelo - cemento en contenidos de cemento 2, 6 y 10 % y humedecer para el contenido de humedad óptima del ensayo de compactación.
- 6.3 El volumen, en cm³, de *titriplex* usado en la bureta, para llevar el indicador (de rojo a azul), para cada una de las cantidades de cemento (promedio de tres titulaciones), es marcado en un gráfico de acuerdo a esquema adjunto.
- 6.4 Cada curva es válida sólo para las soluciones preparadas con suelo, cemento y agua iguales a los que hayan sido preparados para las mezclas de calibración. Cada vez que se cambie de suelo, cemento, agua, o habiendo la necesidad de preparar nuevas soluciones, las curvas deberán ser ajustadas y etiquetadas con las siguientes informaciones:
 - a) Fecha de la preparación de la solución;

- b) Localización e identificación del suelo;
- c) Tipo, clase y marca comercial del cemento empleado; e,
- d) Identificación del agua.

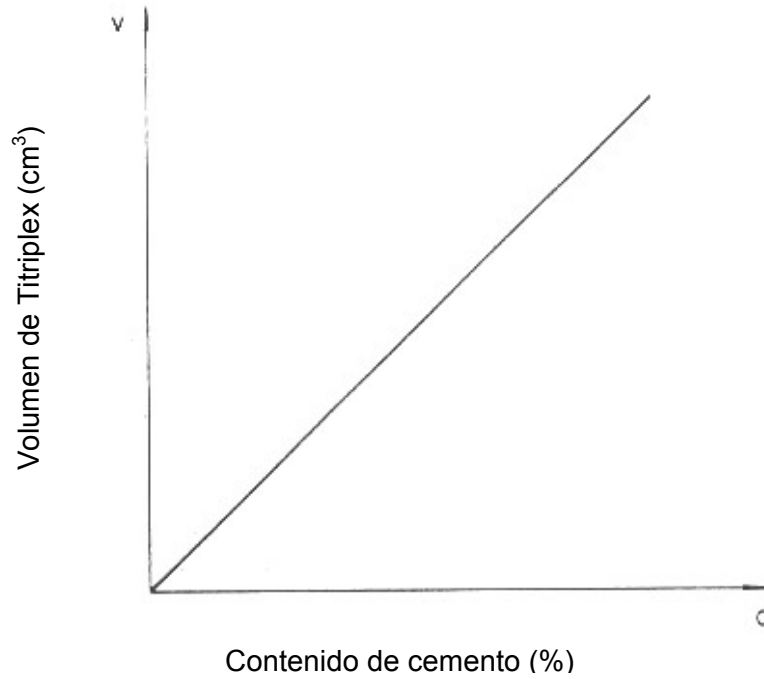


Figura A – Gráfico de Calibración