

La presente publicación es una recopilación y
ordenamiento de los conocimientos extraídos de un
curso teórico-práctico que se dictó en el Instituto
de Estudios de Ingeniería y Arquitectura de la
Universidad de Chile, durante el curso 1961-1962.

Para facilitar la comprensión del texto, por
parte del autor, se han incluido algunos
ejemplos de los casos que se han tratado.

ESTABILIZACION DE SUELOS

El propósito principal de esta obra es dar a los alumnos
de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura y Civil
de la Universidad de Chile, un texto comprensible, ordenado
y actualizado de los aspectos más importantes de
esta materia.

ING. RAUL A. COLOMBO

La presente publicación es una recopilación y ordenamiento de los conocimientos extraídos de las citas bibliográficas que figuran al final, habiéndose transcritto textualmente, en algunos casos, párrafos de las mismas.

Para facilitar la comprensión del tema por parte del alumno, se han desarrollado algunos ejemplos con datos supuestos, pero que pueden presentarse realmente en la construcción de las obras.

El propósito perseguido es dar a los alumnos de las cátedras de Vías de Comunicación y Construcción de Carreteras, un texto comprensible, ordenado y actualizado de los aspectos considerados dentro de este tema.

[Handwritten signature]

Cohesión es la otra porción de la resistencia al corte originada por la atracción de las partículas del suelo, entre sí. Esta cohesión puede ser verdadera y aparente. La cohesión verdadera se produce por la atracción molecular de las partículas, despreciable en general, y la aparente se atribuye a las finísimas películas de agua que rodean a aquellas partículas, produciendo una importante fuerza de vinculación entre ellas. En resumen la cohesión de un suelo depende de la magnitud y características físico-químicas de su superficie interna, como igualmente de su contenido de humedad.

Las arcillas son el ejemplo clásico de los suelos altamente cohesivos.

RESISTENCIA AL CORTE

Está dada por la fórmula de Coulomb hallada en 1773:

$$R_c = c + N_t g \varphi$$

$R_c = c + N_t g \varphi$ donde

c = cohesión (kg./cm^2)

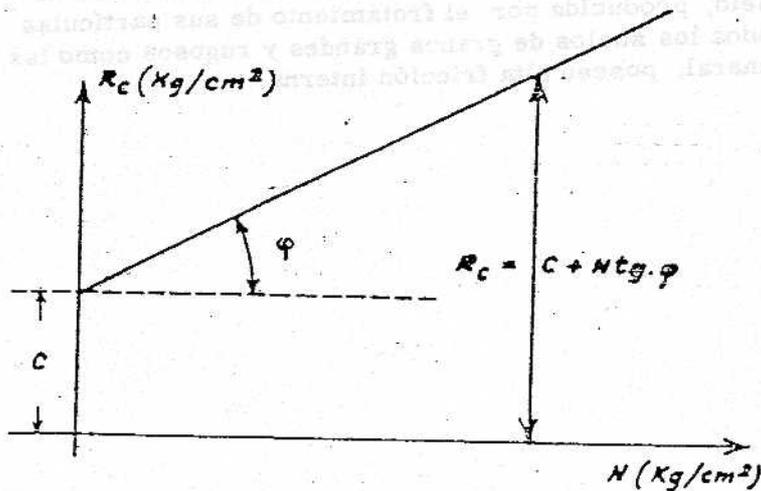
φ = ángulo de frotamiento interno

N = carga normal aplicada en la zona considerada por unidad de superficie (kg/cm^2)

R_c = resistencia al corte (kg/cm^2)

La representación grafica de la fórmula de Coulomb, se indica en la figura 1.

Fig. 1



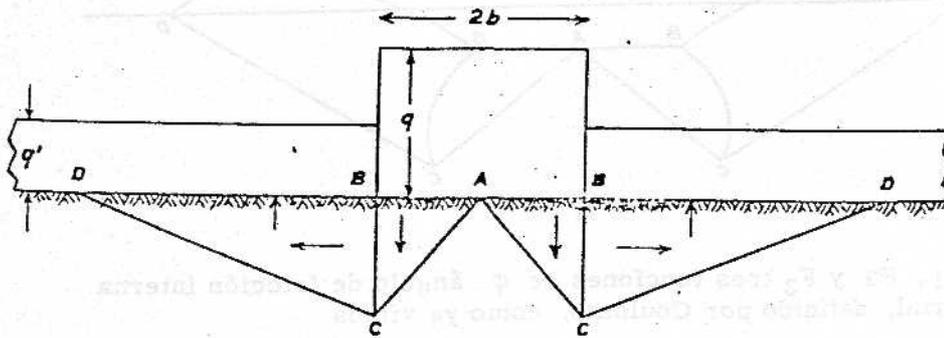


Fig. 2

CAPACIDAD PORTANTE O VALOR SOPORTE

Es la resistencia del suelo a la acción de las cargas o su capacidad para resistir cargas. Vamos a considerar la fórmula deducida por Terzaghi, atribuida también a Hogentogler, fórmula que está condicionada al esquema de cargas de la fig. 2. Sobre el terreno natural actúa una carga q por unidad de ancho, distribuida en un ancho $2b$ y en una longitud suficientemente larga para que los esfuerzos resultantes no dependan de la dirección normal a la figura.

Lateralmente considera cargas menores de valor q' por unidad de ancho.

La deformación del suelo es imaginada en la siguiente forma: los dos prismas ABC tienden a penetrar en el terreno y a deslizarse lateralmente, situación posibilitada por el deslizamiento y levantamiento de los prismas BCD. Cuando la carga q alcanza al valor que produce este fenómeno se ha llegado al valor soporte o capacidad portante del suelo, el que presenta las deformaciones del esquema de la fig. 3. Las deformaciones son semejantes a las reales (huellas) que produce la carga transmitida por la rueda de un vehículo a la superficie del suelo, y en casos extremos a la superficie de un pavimento flexible. El mecanismo ideado para explicar estas deformaciones, permitió a Terzaghi, considerando las resistencias al corte en los planos AC y CD, llegar a la fórmula del valor soporte que se expresa a continuación:

$$q = \frac{q'}{\operatorname{tg}^4 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} + \frac{b \Delta}{2 \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \left[\frac{1}{\operatorname{tg}^4 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} - 1 \right] + \frac{2c}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \operatorname{sen}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}$$

es decir

$$q = q' F_1(\varphi) + b \Delta F_2(\varphi) + c F_3(\varphi)$$

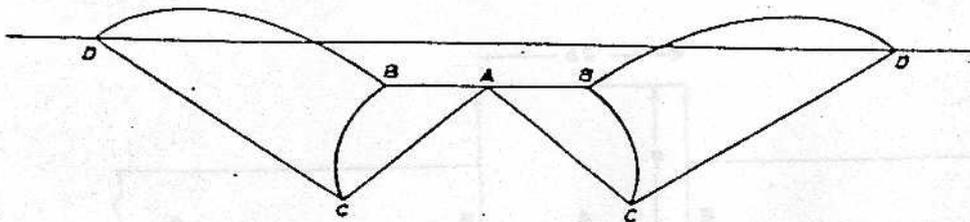


Fig. 3

Siendo F_1 , F_2 y F_3 tres funciones de φ ángulo de fricción interna del material, definido por Coulomb, como ya vimos

C: Cohesión del material

Δ : peso específico aparente del suelo o densidad como la llamaremos en adelante

q' : carga lateral aplicada

b: semiancho de aplicación de la carga deformante

Los métodos consecutivos de un alto valor soporte caen dentro del campo de la estabilización de suelos y la fórmula de Terzaghi indica cuales son las características inherentes al suelo, independientes de las cargas, que es preciso considerar para incrementar su estabilidad. Ellas son la densidad Δ , la cohesión C y la fricción interna representada por el ángulo φ .

El valor soporte q crece para valores crecientes de φ , C y Δ , y la importancia fundamental de la fricción interna se advierte por la presencia del ángulo de fricción φ en los tres términos de la fórmula. Cabe hacer notar que la función que desempeña la densidad Δ es más importante que la asignada por la fórmula de Terzaghi, ya que la mayor densificación de un suelo posibilita la incrementación de la cohesión y la fricción interna.

DIFERENTES TIPOS DE ESTABILIZACIONES

Habiendo explicado el papel que desempeñan los tres factores antes mencionados en la estabilidad de los suelos, vamos a clasificar los distintos procedimientos de estabilización, siguiendo a Winterkorn, en:

1. - Estabilización mecánica que comprende el manipuleo y compactación de los suelos para obtener su densificación.
2. - Estabilización física que persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez, al primitivo suelo.
3. - Estabilización físico-química, que se refiere al cambio de las propiedades del suelo por efectos físico-químicos de superficie mediante la adición de cementos orgánicos e inorgánicos y materiales impermeabilizantes.

Todo método práctico de estabilización de suelos, puede involucrar uno, dos o todos los principios que se han expuesto.

En la terminología caminera, suelen utilizarse las siguientes denominaciones, entre otras, para designar distintos tipos de estabilizaciones:

- a) Compactación especial.
- b) Estabilización granulométrica.
- c) Suelo-cal.
- d) Suelo-cemento.
- e) Suelo-betún.
- f) Estabilización con agentes químicos.

Excepción hecha de la "compactación especial" que se trata de una estabilización puramente mecánica, las demás pueden estar comprendidas en dos o tres tipos de estabilizaciones de la clasificación primaria. Por ejemplo, toda estabilización física de un suelo, realizada mejorando su granulometría, es complementada con una estabilización mecánica o compactación especial.

a) COMPACTACION ESPECIAL

Los principios relativos a la misma son bien conocidos a través de los trabajos del Ingeniero Americano R. R. Proctor autor y divulgador de una teoría sobre compactación de suelos, en la actualidad extensamente aplicada y cuyas conclusiones revolucionaron la técnica de la construcción de obras de tierra.

La base del método de Proctor se encuentra en la premisa por él demostrada de que, para cada suelo, existe un determinado contenido óptimo de humedad con el cual es posible obtener la máxima densidad del suelo por compactación con un determinado equipo.

La compactación es indispensable en todos los demás tipos de estabilizaciones de suelos y cuanto mayor sea la densidad obtenida, más efectivas son aquéllas.

Como en general la compactación especial no es considerada en la práctica vial como una verdadera estabilización de suelos, sino como un complemento de los otros tipos citados, pasaremos a referirnos a ellos, ya que este tema es considerado en otro capítulo al tratar de la compactación de suelos.

b) ESTABILIZACION GRANULOMETRICA

Es la más difundida y ampliamente conocida en el país. Alrededor del año 1930 los Estados Unidos de Norte América, por efecto de la crisis mundial, vieron disminuidos notablemente sus recursos para la construcción de carreteras; esto trajo como consecuencia una po-

lítica de cuidadosa reserva en los gastos tanto de construcción como de conservación de carreteras, descartándose de los planes viales los pavimentos de tipo superior (hormigón, concreto asfáltico, etc.) estudiándose a fondo el problema de la onerosa conservación de los caminos enripiados que constituyan la mayor longitud de su red. Se observaron entonces cuidadosamente diferentes tramos de estos caminos enripiados, y como resultado de esas observaciones, se llegó a la conclusión que algunas secciones, conservaban su estabilidad bajo la acción del tránsito sin desgranarse en épocas de sequía, ni ablandarse ni anudarse por la acción combinada de ese tránsito y las lluvias.

La habilidad de los técnicos viales americanos consistió en descubrir cuales eran las características de esos enripiados estables que, constituyen lo que hoy llamamos bases, revestimientos o suelos estabilizados granulométricamente.

Los buenos caminos enripiados no eran algo nuevo en nuestro país, pero, sí constituyó una novedad conocer la granulometría adecuada de las mezclas de ripio y algunas características de sus componentes.

Queda pues determinado que en un suelo estabilizado de este tipo, existen los mismos materiales y en idénticas proporciones que en cualquier buen enripiado, ya que del estudio de la estabilidad de estos últimos, han surgido las condiciones a cumplir para poder reproducirlos.

En esencia las condiciones que debe reunir una base estabilizada son: una granulometría determinada para el material que la constituye y características de plasticidad de las partes finas de ese material. Estas partes son las que constituyen con la humedad que las rodea, el medio ligante o cohesivo. Por esta razón suele denominarse a este tipo de estabilización "con ligante arcilla-agua".

Un suelo estabilizado puede utilizarse como un revestimiento que soporte directamente los efectos del tránsito sobre su superficie; como base de tratamientos bituminosos superficiales destinados a preservarlas de la humedad y del efecto abrasivo de las ruedas neumáticas o finalmente como una base para ser cubierta por pavimentos espesos que distribuirán las cargas y soportarán la acción de desgaste de los vehículos.

En todos los casos se tratará de una mezcla bien graduada de pedregullo o grava, arena, limo y arcilla, la que compactada alcanzará su máxima densidad. Dentro de esta mezcla las partículas más gruesas suministran fricción y resistencia al impacto, las intermedias acunamiento de la estructura y las más finas el sostén de delgadas películas de agua, que desarrollan una fuerte cohesión. Para la mezcla tipo "standard" que más adelante veremos, el rol

que desempeñan las partículas que la componen se indica en el cuadro que va a continuación:

Revestimiento Estabilizado Standard	Agregado grueso (R. T. 10)	De 25 a 2 mm. Suministra al conjunto fricción y dureza, resistencia al impacto y al desgaste. Debe ser aproximadamente de un 45 a 70% del total.
	Mortero del Suelo (P. T. 10)	<p>Agregado fino (Entre T. 10 y 200)</p> <p>Arena gruesa: Fricción y dureza (similar a la grava y agregado grueso). Entre tamices 10 y 40.</p> <p>Arena fina: Sirve para acuñamiento del material grueso. Entre tamices 40 y 200</p> <p>Limo: 50 a 5 μ. actúa como relleno para impedir el movimiento de las partículas gruesas.</p> <p>Arcilla: Menor de 5 μ. (coloides menor de 1 μ.) suministra poros diminutos de modo que las películas de agua sean suficientemente delgadas para que produzcan alta cohesión.</p>
	Limo y arcilla (P. T. 200)	

Quando las especificaciones de granulometría son correctamente satisfechas y el procedimiento constructivo es adecuado, pueden alcanzarse densidades de hasta 2,3 á 2,4 kg/dm³.

Las condiciones que debe cumplir un suelo estabilizado granulométricamente son las siguientes:

1. de granulometría
2. de plasticidad
3. de calidad de los materiales constitutivos de la mezcla.

1. - Condiciones de granulometría. Siempre es posible, partiendo de un tamaño máximo cualquiera, obtener una curva de gradación tal que, cumplida con una mezcla de materiales, podamos construir un revestimiento perfectamente estable; pero, razones constructivas y de sistematización de especificaciones, han puesto un límite superior a ese tamaño, relacionado con el espesor de las bases a ejecutar. Por razones de facilidad de construcción y lisura superficial, el tamaño máximo del material está comprendido entre 1/3 y 1/4 del espesor corriente de las bases a construir.

La granulometría de la mezcla de materiales que normalmente se especifica para un revestimiento estabilizado se expresa en porcentajes del peso de materiales, con respecto al peso total de la muestra ensayada, que pasan por cada tamiz de una serie determinada.

Si tomamos la especificación clásica correspondiente a un revestimiento estabilizado tipo standard cuyo tamaño máximo es de 1" (2,54 cm) la granulometría se expresa en la siguiente forma:

Abertura de la criba número del tamiz	Abertura en mm.	% en peso que pasa por cada tamiz o criba
1"	25,4	100
3/4"	19,0	80 - 100
3/8"	9,5	50 - 90
Nº 4	4,76	40 - 75
Nº 10	2,00	30 - 55
Nº 40	0,42	20 - 35
Nº 200	0,074	10 - 20

Estas especificaciones tiene ciertas condiciones complementarias con el fin de permitir cierto margen de tolerancia; así por ejemplo, se puede admitir hasta un 5% de partículas mayores de 1" siempre que ellas pasen totalmente por el tamiz de 1 1/4".

Otra condición complementaria relativa a los finos del suelo estabilizado que son aquellos que pasan por el tamiz Nº 40, como limo, arcilla y arena fina que controla la proporción de estos materiales en el conjunto, exige que la fracción que pase por el tamiz Nº 200 no exceda de las 2/3 partes de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40.

$$\frac{P T 200}{P T 40} = \frac{\text{Pasa tamiz 200}}{\text{Pasa tamiz 40}} \leq 2/3$$

Representadas las condiciones granulométricas del cuadro anterior, en un gráfico logarítmico del tamaño de las partículas se obtienen las curvas de la figura 4. La curva media o ideal entre ambas, responde muy aproximadamente a la ecuación:

$$p = 100 \left(\frac{a}{A} \right)^{1/3} \text{ donde}$$

p = porcentaje que pasa por el tamiz de abertura a.

A = abertura máxima en la serie de tamices.

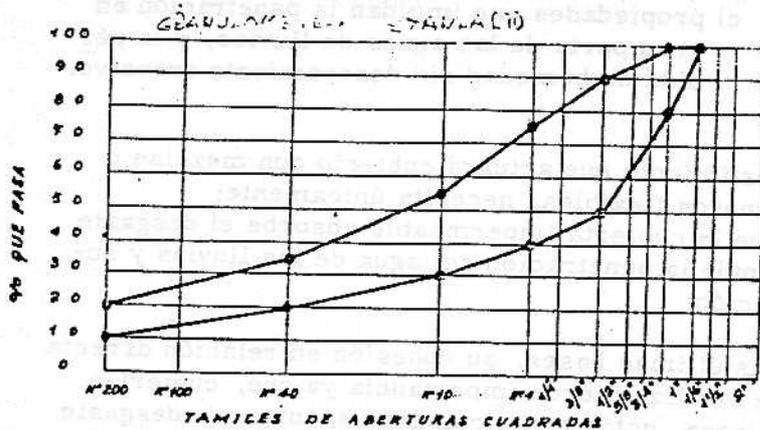


Fig. 4

Últimamente y con el fin de restringir el empleo de los materiales más finos, cosa que la experiencia ha demostrado conveniente, para el caso de usar una fórmula de gradación se ha recomendado la siguiente:

$$p = 100 \left(\frac{a}{A} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Estas curvas son del mismo tipo de las de Fuller, llamadas de máxima compacidad.

En rigor para cumplir con la especificación, bastará que la curva obtenida esté dentro del área de las curvas límites, siempre que cumpla las condiciones complementarias a que se ha hecho referencia. Como regla general será preferible una curva regular, aún cuando esté cercana a una de las límites, a cualquier otra que presente irregularidades o juegue entre ambos límites.

Entre un revestimiento estabilizado, del tipo que tratamos, que debe actuar como superficie de rodamiento, es decir expuesto directamente a las acciones climáticas y del tránsito, y otro que sirva de base ya sea a delgados tratamientos bituminosos o cubiertas de cierto espesor, existen diferencias en cuanto a las funciones que deben desempeñar, diferencias que influyen sobre las condiciones granulométricas y de plasticidad consideradas adecuadas en uno y otro caso.

En el caso del revestimiento que servirá como superficie de rodamiento, este deberá tener:

- a) estabilidad
- b) resistencia al efecto abrasivo del tránsito, es decir al desgaste.

- c) propiedades que impidan la penetración en gran parte de las aguas de lluvias, y la pérdida de humedad sin desecamiento excesivo.

El revestimiento que actuará cubierto con mezclas o tratamientos bituminosos flexibles, necesita únicamente:
a) estabilidad, ya que la cubierta impermeable absorbe el desgaste del tránsito e impide la penetración del agua de las lluvias y suprime la evaporación.

En estas últimas bases, su cohesión en relación directa con su contenido de arcilla, pierde importancia ya que, cubiertas por una capa bituminosa, están prácticamente exentas de desgaste y libres en cierta medida de las acciones climáticas. Un contenido alto de arcilla, o de una arcilla muy activa, puede ser contraproducente por las características expansivas de este material.

Las primeras especificaciones granulométricas de la administración General de Vialidad Nacional agrupó las distintas granulometrías en cuatro tipos que designa: grueso, standard, semifino y fino según sea el tamaño máximo del material empleado. Estas granulometrías van a continuación:

Tamiz	% que pasa			
	Grueso	Standard	Semifino	Fino
1 1/2"	100	-	-	-
1"	85-100	100	-	-
3/4"	65-95	80-100	-	-
1/2"	30-85	-	-	-
3/8"	-	50-90	100	-
Nº 4	25-70	40-75	75-95	-
Nº 10	20-50	30-55	55-85	100
Nº 40	15-30	20-35	35-60	50-70
Nº 100	-	-	25-45	30-45
Nº 200	7-15	10-20	20-35	20-35

Para espesores mayores de 12 cm.

Es claro que, cuando el aprovechamiento de materiales locales lo exija podrán introducirse otros tipos de gradaciones, ya que ello siempre es posible partiendo de un determinado tamaño máximo.

Podemos decir que el tipo standard de estabilización (tamaño máximo 1"), es de los que han tenido más aplicación en el país y en general hasta el presente los resultados han sido satisfactorios.

La A. A. S. H. O. (A. A. S. H. O. Highway Materials -Part I - Specifications) ha especificado bajo la designación M 147-57, las condiciones granulométricas y otras para superficies y bases, tendiendo a dar un carácter menos arcilloso a estas últimas.

La especificación se refiere a mezclas de diferentes materiales como piedra partida, grava, escoria, arena, arcilla, etc. libres de materia orgánica u otras impurezas. El material retenido en el tamiz 10 deberá ser durable (no desintegrarse en ciclos alternados de humedecimiento y secado y de congelación y deshielo) y tener una resistencia al desgaste, en el ensayo "Los Angeles" no menor que 50. Con carácter general se exigen las siguientes condiciones:

$$\frac{PT200}{PT40} \leq 2/3; L. L. \leq 25; I. P. \leq 6$$

En cuanto a granulometrías se especifican las siguientes:

Tamiz	% que pasa					
	A	B	C	D	E	F
2"	100	100	--	--	--	--
1"	--	75-95	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	--	--
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Todas estas granulometrías pueden ser usadas para base y subbases y únicamente las C, D, E y F para superficies de rodamiento. Cuando estas superficies de rodamiento deban mantenerse por varios años sin recubrimiento bituminoso o cualquier otro impermeabilizante, deberá especificarse un mínimo de 8% pasando en el tamiz Nº 200 con L. L. \leq 35 e I. P. entre 4 y 9.

2. - Condiciones de plasticidad: Así como la granulometría nos indicaba si la distribución de las partículas era adecuada para obtener una mayor estabilidad mecánica, el índice de plasticidad de la mezcla de materiales que componen el revestimiento, nos dirá si esa estabilidad será temporal o permanente ante la acción de la humedad. El índice de plasticidad está influenciado por la presencia

de una mayor o menor proporción de arcilla, de modo que la circunstancia de que un revestimiento esté o no cubierto por una capa bituminosa impermeable tendrá significación en los valores a adoptar para aquel.

Además de esta circunstancia, para fijar el índice de plasticidad deberá considerarse la cantidad de lluvia anual en la zona y la diferencia de altura entre la rasante y máximo nivel de la napa freática. De acuerdo con estos conceptos, los valores a adoptar son los siguientes:

ZONA	LLUVIA mm/año	INDICE DE PLASTICIDAD	
		Base	Superficie
Muy húmeda	> 1000	< 2	3 - 5
Humedad media	700-1000	2-4	5 - 8
Seca	< 700	4-6	8 - 12

Es conveniente hacer notar que después de un período de tendencia a adoptar muy bajos índices de plasticidad para las bases, lo que trajo inconvenientes para la conservación de las mismas antes de ser cubiertas con tratamientos bituminosos, se han adoptado índices más altos, dentro de los límites establecidos, lo que se traduce en una mayor facilidad para la compactación y conservación de esas bases. El criterio general es adoptar índices de plasticidad más bajos, cuanto mayores sean las posibilidades de acceso de la humedad, a estos revestimientos estabilizados.

3. - Otras condiciones relativas a calidad de los materiales constitutivos de la mezcla. Los materiales pétreos que constituyen las mezclas, deben tener granos duros y resistentes a la acción de los agentes climáticos.

Se suele exigir para los mismos un porcentaje máximo de desgaste (generalmente "Los Angeles" \leq 50).

Debe precaverse el empleo de materiales elásticos o esponjosos, que impedirían la obtención de densidades altas y permanentes, y otros con propiedades capilares perjudiciales, que traerían como consecuencia la expansión de la arcilla de la mezcla.

Todos estos inconvenientes son producidos por la presencia de micas, diatomeas y sustancias orgánicas, las que estarían denunciadas por valores altos del límite líquido, el que deberá ser inferior al que resulte de la relación:

$$L. L. \leq 1,6. L.P. + 14$$

Debe tenerse en cuenta que el límite líquido es indicador de las propiedades capilares de la mezcla y que la introducción del agua en el revestimiento puede ser la causa de su fracaso.

Estudio de las mezclas de materiales para un revestimiento estabilizado

7

La cantidad de materiales a que debe recurrirse para obtener una mezcla estabilizada, dentro de las condiciones establecidas, difícilmente pasa de cuatro y excepcionalmente de tres. El caso típico y más general es el que se cuente con tres materiales diferentes aptos para obtener la mezcla necesaria, a saber.

1) El suelo que vamos a estabilizar, que puede tener cantidades variables de agregados grueso, fino, limo y arcilla.

2) Un agregado grueso que también puede contener algo de agregado fino, limo y arcilla.

3) Un suelo cohesivo o ligante, mezcla de limo y arcilla y que igualmente puede contener agregados grueso y fino.

Se presenta entonces el problema de determinar las proporciones en que deben ser mezclados esos materiales, cuyas granulometrías y demás características conocemos por anticipado, para obtener el revestimiento estabilizado que se ha especificado.

Análíticamente el problema no tiene dificultades; siempre se podrá hallar un número de ecuaciones igual al número de incógnitas representadas por las proporciones de cada uno de los materiales intervinientes de acuerdo con los datos que impondremos a nuestra mezcla para cumplir con las condiciones de granulometría exigidas.

En el caso en que se cuente con tres materiales y se quiera obtener una granulometría tipo "standard", para saber en qué proporciones debe, en primer lugar, y conviene, después, mezclar estos tres materiales, se deberá hacer un tamizado de cada uno de ellos de acuerdo con las tres categorías de partículas siguientes:

Agregado grueso:	entre tamices 1" y N° 10
" fino	" " N° 10 y N° 200
Limo y arcilla	Abajo tamiz N° 200

Si llamamos material 1 al material pétreo, material 2 al suelo a estabilizar, y material 3 al suelo arcilloso, cada uno podrá tener cierta cantidad de agregado grueso, agregado fino y abajo tamiz 200.

Elegida entre las posibles, una granulometría para la mezcla final del revestimiento estabilizado, éste, a su vez, tendrá una cierta cantidad A. de agregado grueso, B. de agregado fino y C. de abajo tamiz 200.

El problema consiste entonces en encontrar las proporciones X de material 1; Y de material 2, y Z de material 3, que deben mezclarse para que la mezcla tenga A de agregado grueso, B de agregado fino y C de abajo tamiz 200.

El siguiente cuadro hace ver claramente el planteamiento del problema:

COMPONENTES	Composición unitaria de:			
	Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	Revestimien to estabiliza do
Agregado grueso P. T. 1 ^a - R. T. N° 10	a	b	c	A
Agregado fino P. T. N° 10 - R. T. N° 200	d	e	f	B
Suelo - P. T. N° 200	g	h	i	C
TOTALES	1,0	1,0	1,0	1,0
En el revestimiento esta- bilizado	X	Y	Z	

Las ecuaciones que se plantean respecto a las incógnitas X, Y, Z, son:

$$A = aX + bY + cZ$$

$$B = dX + eY + fZ$$

$$Z = 1 - (X + Y)$$

cuyas soluciones son:

$$Y = \frac{(d - f)(A - c) + (a - c)(f - B)}{(d - f)(b - c) - (a - c)(e - f)}$$

$$X = \frac{B - Y(e - f) - f}{d - f}$$

$$Z = 1 - (X + Y)$$

Para el caso de granulometría Standard de la Adm. Gral. de Vialidad Nacional :

Tamiz	% que pasa
1"	100
3/4"	80-100
3/8"	50-90
Nº 4	40-75
Nº 10	30-55
Nº 40	20-35
Nº 200	10-20

Las fracciones o categorías de partículas serán:

Fracción A. Lo que pasa el tamiz 10, deducido de 100, es decir 45 a 70%.

Fracción B. Lo que pasa al tamiz 10 menos lo que pasa el tamiz 200, o sea 20 a 35%.

Fracción C. Abajo tamiz 200, de 10 a 20%. Dentro de estos límites se fijarán los valores A, B y C que intervienen en las ecuaciones.

Las fracciones para los otros tipos de revestimientos estabilizados, pueden tomarse como a continuación se indica:

	Fracción	Tipo Revestimiento estabilizado	
		Semifino	Fino
A -	Agregado grueso	T 3/8" a T 10	T 10 a T 40
B -	Agregado fino	T 10 a T 200	T 40 a T 200
C -	Abajo tamiz 200	Pasa T 200	Pasa T 200

Este procedimiento analítico resulta engorroso, pues en la práctica deben calcularse varios sistemas de ecuaciones, hasta dar con el que cumplimente todas las exigencias especificadas. Entonces se prefiere recurrir a procedimientos gráficos de los cuales uno de los más conocidos se basa en la representación de mezclas y materiales primarios como puntos interiores de un triángulo equilátero. Sobre los lados de este triángulo se construyen escalas para medir ya sea proporciones de agregados y suelos o proporciones de materiales, siguiendo un sentido de rotación determinado. (Fig. 5)

Este método adelantaremos, tiene el inconveniente de considerar el cumplimiento de las condiciones granulométricas en tres tamices (p. e. : 1", Nº10 y 200 en el Standard) y en consecuencia puede suceder que satisfechas esas condiciones, no se satisfagan las que corresponden a otros tamices.

No obstante lo expuesto y a pesar de los numerosos métodos o simplificaciones gráficas que se han publicado en estos últimos años, el método gráfico de los triángulos equiláteros se sigue utilizando sobre todo cuando hay que resolver cuestiones relativas a la plasticidad y economía de las mezclas.

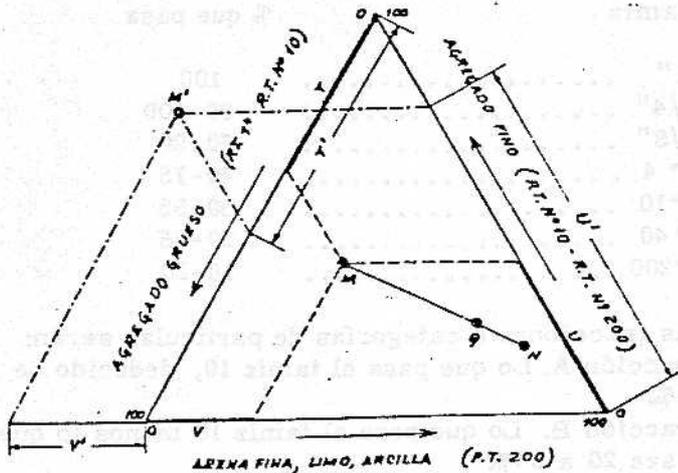


Fig. 5

Un punto interior tal como el M, determina tres valores: t, u, v que se obtienen trazando desde él paralelas a cada uno de los lados del triángulo, hasta que corten al siguiente, según el sentido de rotación elegido para dibujar las escalas.

Para todo punto interior se tiene:

$$t + u + v = 100$$

y recíprocamente, toda relación de este tipo puede ser representada por un punto del triángulo.

Esta representación es de carácter general, y admitiendo valores negativos y mayores de 100, puede llegarse a representar cualquier punto del plano; por ejemplo, para el punto M':

$$u' + t' - v' = 100$$

Es evidente que únicamente los puntos interiores del triángulo representan materiales de existencia real.

Por último, es muy fácil demostrar que los puntos de una recta tal como la M. N., siendo M y N los puntos representativos de dos materiales cualesquiera, son los únicos que representan las mezclas posibles de los materiales M y N. Así por ejemplo, el punto Q, representa un material mezcla de los M y N, interviniendo estos últimos en las siguientes proporciones:

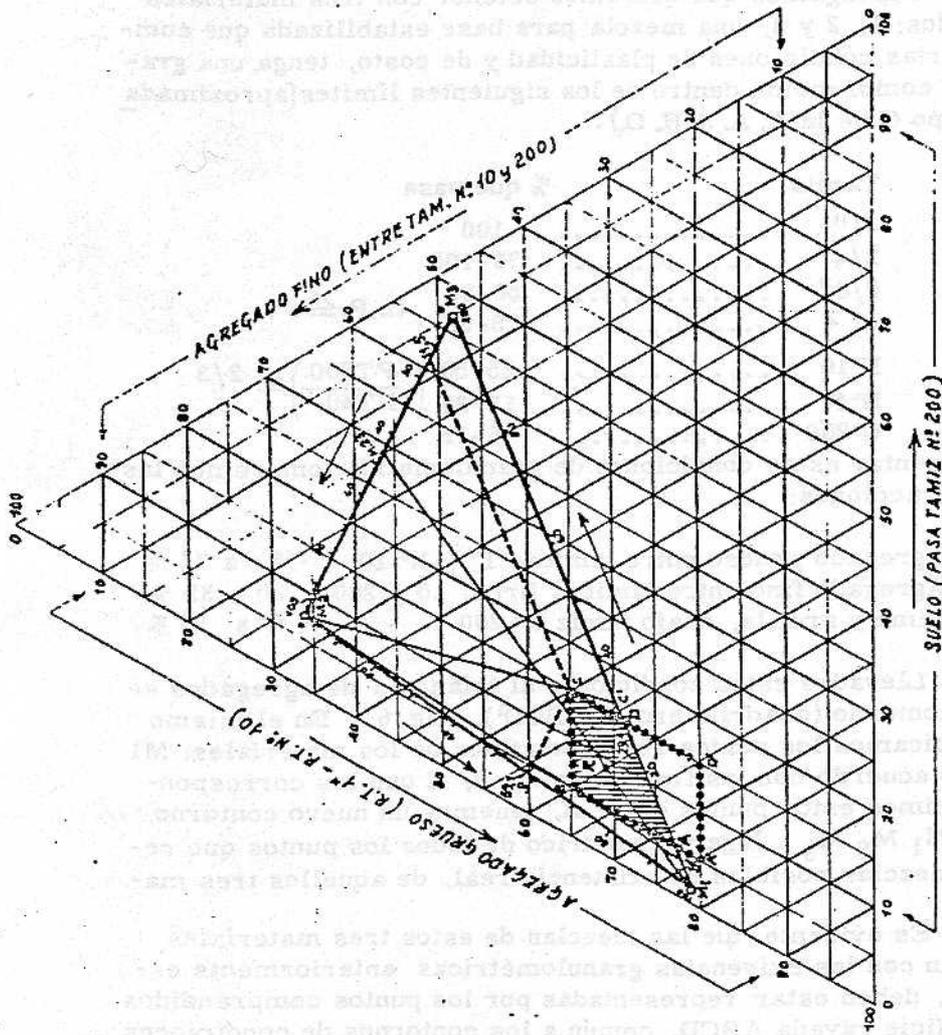


Fig. 6

1°) Uniendo el punto M_1 , con el R hasta cortar la recta $M_2 M_3$ en el punto M_{23} . La proporción de material 1 estará dada por la siguiente relación, expresada en porcentaje:

10

$$\% \text{ Mat. 1} = \frac{M_{23} R}{M_1 M_{23}} \cdot 100$$

pues hemos considerado la mezcla R compuesta de un porcentaje de material 1, ya hallado y

$$100 - 100 \left(\frac{M_{23} R}{M_1 M_{23}} \right) = 100 \left(1 - \frac{M_{23} R}{M_1 M_{23}} \right)$$

de una mezcla de los materiales 2 y 3, representada por el punto M_{23} . Los porcentajes de materiales 2 y 3 serán:

$$\% \text{ Mat 2} = 100 \left(1 - \frac{M_{23} R}{M_1 M_{23}} \right) \left(\frac{M_3 M_{23}}{M_2 M_3} \right)$$

$$\% \text{ Mat 3} = 100 \left(1 - \frac{M_{23} R}{M_1 M_{23}} \right) \left(\frac{M_2 M_{23}}{M_2 M_3} \right)$$

2°) Considerando aisladamente el triángulo $M_1 M_2 M_3$ y construyendo en sus lados escalas para medir porcentajes como se indica en la figura 7, eligiendo un sentido de rotación.

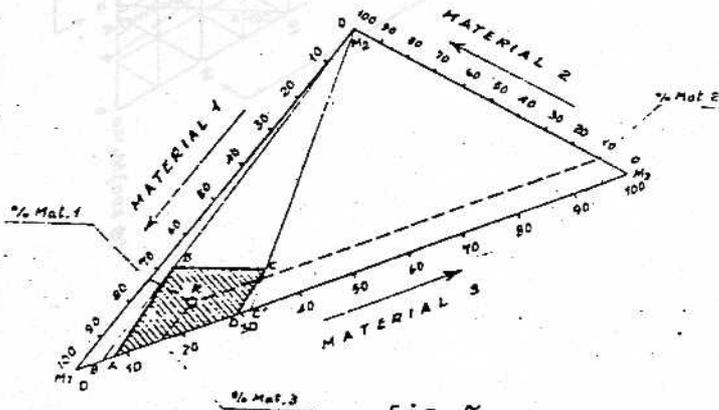


Fig. 7

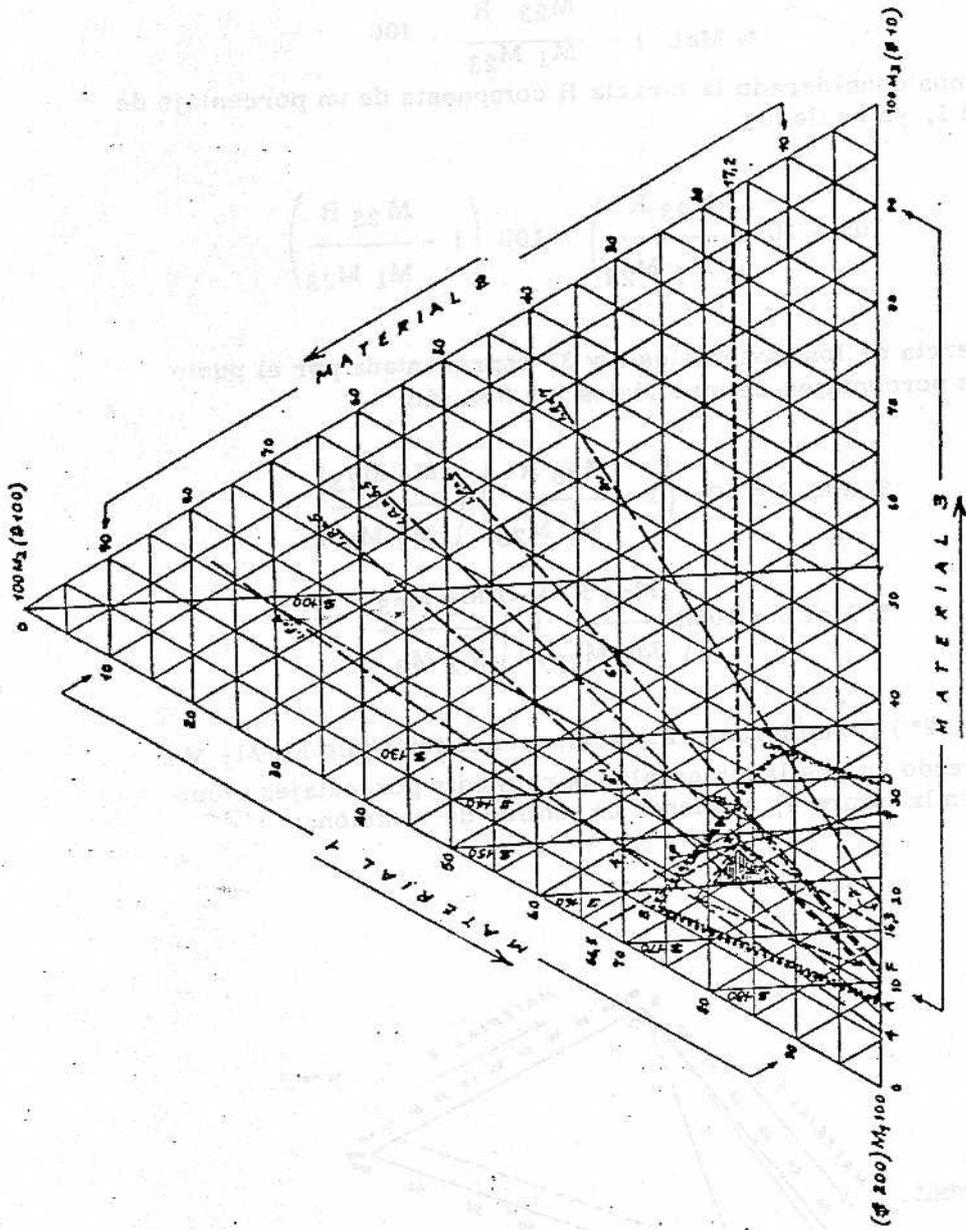


Fig. 8

En la práctica el triángulo de materiales de la figura anterior se transforma en un nuevo triángulo equilátero por razones de comodidad (fig. 8). El contorno de granulometría ABCD se transforma en el de materiales similar y el primitivo triángulo de granulometría lo es ahora de materiales.

El pasaje del triángulo de granulometría al de materiales es muy sencillo, conservándose las propiedades de proporcionalidad y paralelismo.

Por cualquiera de los procedimientos que hemos visto para la mezcla representada por el punto R, podemos obtener los porcentajes de materiales que corresponden a cualquier punto en el triángulo de granulometría para su posterior representación en el de materiales.

Condiciones de Plasticidad

Las soluciones posibles desde el punto de vista granulométrico comprendidas en el contorno ABCD, pueden no serlo al considerar las exigencias de plasticidad.

En efecto todas las mezclas posibles de los materiales 1, 2 y 3 que lleguen a cumplimentar las condiciones de granulometría, pueden dar lugar a la obtención de índices de plasticidad inadecuados, para el fin que se utilizarán esas mezclas.

Es necesario entonces hacer determinaciones en laboratorio, de los índices de plasticidad de mezclas del contorno, anotar esos valores en el gráfico en correspondencia con el punto que representa la mezcla ensayada, y trazar luego las líneas de igual índice de plasticidad hasta tener bien representada la tendencia general que las mismas siguen, dentro de la zona que interesa.

Este sistema es laborioso por los numerosos ensayos que deben realizarse por lo que se prefiere para determinar en forma aproximada el índice de plasticidad, la utilización de un procedimiento analítico, aplicando una fórmula que dá resultados admisibles, mientras no se trate de mezclas muy plásticas.

Si llamamos X, Y y Z a los porcentajes de los materiales 1, 2 y 3 en la mezcla:

F1, F2 y F3, a los porcentajes de finos (mat. que P. T. 40) de los mismos materiales, y

I₁, I₂ y I₃ los índices de plasticidad, se tiene que el índice de plasticidad de la mezcla será:

$$I = \frac{I_1 F_1 X + I_2 F_2 Y + I_3 F_3 Z}{XF_1 + YF_2 + ZF_3}$$

y sabiendo que $Z = 1 - X - Y$ reemplazando en la fórmula anterior se llega a la expresión siguiente:

$$Y = \frac{F_1 (I_1 - I) - F_3 (I_3 - I)}{F_3 (I_3 - I) - F_2 (I_2 - I)} X + \frac{F_3 (I_3 - I)}{F_3 (I_3 - I) - F_2 (I_2 - I)}$$

expresión que es de la forma

$$Y = m X + n \text{ representativa de una recta y donde}$$

$m = f_1 (I)$ y $n = f_2 (I)$ de modo que tanto el coeficiente angular m como el término independiente n , variarán al variar I , índice de plasticidad de la mezcla.

Dando valores enteros al índice de plasticidad I , se obtendrá una familia de rectas cada una de las cuales corresponderá a un determinado valor de ese índice.

Estas rectas no serán paralelas, ni concurrentes en general, en la figura se han representado para valores de I comprendidos entre 1 y 8

Costo de las mezclas:

En cuanto a la economía de la mezcla, es fácil considerarla igualmente en el gráfico.

Sean P_1 , P_2 y P_3 los costos en pesos de una tonelada de cada uno de los tres materiales, una vez colocados en el camino, es decir que en estos costos están incluidos, los gastos de extracción en cantera, acondicionamiento del material, carga, transporte, descarga y su distribución a lo largo del camino de acuerdo con su proporción dentro de la mezcla. Como antes X , Y y Z son las proporciones en que entran los tres materiales; el costo de una tonelada de mezcla extendida en el camino será:

$C = XP_1 + YP_2 + ZP_3$ y como $Z = 1 - X - Y$ se llega a la expresión:

$$Y = \frac{C - P_3}{P_2 - P_3} - X \cdot \frac{P_1 - P_3}{P_2 - P_3} \text{ que es la ecuación de una recta}$$

de coeficiente angular constante; haciendo variar el costo C de la mezcla, tendremos una serie de rectas paralelas de igual costo que son las dibujadas en el gráfico de materiales con una orientación casi normal a la base del triángulo que corresponde al material 3.

Limitaciones

Teniendo representadas todas las condiciones en el triángulo de materiales, podemos efectuar las limitaciones que correspondan, a fin de obtener el mejor revestimiento estabilizado tanto desde el punto de vista técnico como del económico.

Distingueremos tres zonas:

Zona límite Dentro de la cual cualquier punto nos representa una solución o mezcla que cumple las condiciones de granulometría y plasticidad, Corresponde a la superficie encerrada en el contorno ABEF, determinada por la línea de plasticidad 6, (condición $IP \leq 6$), y los límites de granulometría, en este caso particular. Cuando la especificación fije dos límites para el índice de plasticidad, uno superior y otro inferior, puede suceder que esta zona quede limitada en parte por las líneas que corresponden a esos índices plásticos.

Zona de seguridad En el trabajo de campaña ocurren invariablemente ligeras variaciones en la composición y plasticidad de los materiales; existen pequeñas incorrecciones en la medición volumétrica de los materiales y cuando se utiliza el suelo de la subrasante como uno de ellos, pueden existir pequeñas diferencias entre las cantidades movidas en uno u otro tramo de camino. Todas estas pequeñas incorrecciones pueden hacer, en el caso que se eligiese una de las líneas del contorno de la zona límite, como línea de trabajo, que alguna mezcla resultase defectuosa por granulometría o por plasticidad.

Es conveniente entonces limitar la zona límite por líneas internas que determinan una superficie que llamamos zona de seguridad, dentro de la cual se puede elegir una mezcla con poco riesgo de que resulte defectuosa por los motivos expuestos.

El margen de seguridad, es decir, la separación entre el contorno de la zona límite y el contorno de la zona de seguridad, depende de varias causas, entre ellas: la homogeneidad de los materiales usados, la frecuencia y exactitud de los ensayos efectuados, la exactitud en la medición de los materiales y en los procedimientos de construcción.

Al comienzo de cada obra, se puede investigar que correlación existe entre el laboratorio, sus elementos y su opera-

dor de laboratorio con la gente de campaña, mediciones y exactitud en el cumplimiento de las reglas de trabajo. Resumiendo a términos simples, consiste en comprobar que granulometría y plasticidad se consiguen en el camino, cuando el laboratorio ha ordenado ciertas proporciones para obtener tal granulometría y tal plasticidad.

En el caso de la figura se ha tomado un 2% con respecto al contorno límite de granulometría y medio punto en el que corresponde a plasticidad.

Zona de Trabajo Dentro de la zona de seguridad hay combinaciones de materiales de mayor o menor costo; conviene elegir por razones obvias aquellas que resulten mas económicas. De acuerdo con esto conviene moverse sobre la línea de menor costo que corte al contorno de seguridad, y limitar una nueva superficie con otra línea de costo ligeramente superior a la anterior, a los fines de obtener una zona llamada de trabajo con cierto margen para adoptar soluciones. En el caso particular de la figura, la zona de trabajo ha quedado limitada por la recta de costo de \$ 160,00 - la tonelada.

Se tratará de evitar, la adopción de soluciones de igual costo con plasticidades muy diferentes, con el objeto de no tener dentro de un mismo tramo de camino, secciones con distinta reacción del revestimiento estabilizado a la acción de la humedad.

La construcción de este tipo de diagramas para los diferentes materiales que puedan ser tomados en consideración permitirá discutir completamente el aspecto económico de la obra y dar en el estudio, la importancia debida a cada uno de los componentes como integrantes del costo de la mezcla.

Correcciones de mezclas defectuosas

En el momento en que la mezcla se encuentra ya preparada se toman muestras y se efectúan los ensayos de granulometría y plasticidad; puede resultar entonces que éstas o algunas de ellas, no cumplan con la especificación. Llamaremos entonces, "mezcla defectuosa" a aquella que tiene granulometría y/o plasticidad defectuosas; "mezcla ineconómica" a la que satisface las condiciones de plasticidad y granulometría y cae fuera de la zona de trabajo; "punto real" al que representa en el triángulo de materiales, la mezcla obtenida; "punto de trabajo" al que representa la composición que deseamos y debemos obtener, que estará siempre en la zona de trabajo o en último caso dentro de la zona límite; "punto corrector" al que representa la mezcla que debemos agregar a la del punto real, para obtener la del punto de trabajo.

Mostrado por el análisis que una mezcla es defectuosa, se sabe en que sentido debe hacerse la corrección, pero, del punto de vista práctico es inadmisibles por lo costoso, y a veces imposible, efectuar un zarandeo en el camino que elimine materiales inconvenientes. Se puede sí, extraer una cierta porción de mezcla preparada tal como ella se encuentra y agregar una mezcla correctora, compuesta de modo, e incluida en tal cantidad, que el conjunto cumpla la especificación.

13

Supongamos tener un punto real como el P en el diagrama de materiales que, representa una mezcla defectuosa por granulometría aunque correcta por plasticidad, y también económica.

Su corrección presupone la elección del punto de trabajo es decir del que representa la mezcla corregida.

Este deberá quedar dentro de la zona de trabajo, aún cuando para el caso de correcciones, en que se procederá con riguroso control a la agregación de los materiales, puede ser corrido por razones de conveniencia a la zona comprendida entre los contornos de seguridad, y límite. Elijamos el punto R de trabajo; en tal caso el punto corrector se encontrará en la prolongación de la recta PR entre R y el extremo Q.

Cualquiera de los puntos del segmento RQ puede ser corrector del P y solamente ellos pueden serlo de acuerdo con el principio fundamental del cálculo gráfico de proporciones.

Desde el punto de vista del costo de la mezcla corregida todos estos puntos son equivalentes pues darán siempre el costo que corresponde al punto R., pero existe una diferencia en cuanto a la cantidad de mezcla defectuosa que es necesario extraer, para sustituirla por la cantidad igual de mezcla correctora, de manera que no se altere el espesor calculado para el revestimiento estabilizado.

La mezcla defectuosa extraída será transportada a un lugar del camino donde no se hayan distribuido materiales para poder a su vez corregirla.

Esto implica la carga, transporte y descarga del material defectuoso, y al mismo tiempo evita las mismas operaciones para la cantidad correspondiente de materiales que salen de los yacimientos.

Parecería que hay compensación en los costos de movimientos de materiales, pero no es así, porque se trata de cantidades pequeñas, lo que produce aumento en los costos unitarios de transporte.

Es conveniente por tal razón que esos volúmenes pequeños que son movidos fuera del régimen general, sean tan reducidos como sea posible. Para lograr esto el punto corrector más indicado es el Q, pues la proporción en que interviene la mezcla que representa es la mínima y está dada por la relación

$$\frac{\overline{PR}}{\overline{QP}} \cdot 100 \text{ en porcentaje}$$

Es conveniente eliminar la parte que corresponde de mezcla defectuosa, antes de incorporar la correctora, en lugar de agregar directamente ésta y retirar una cantidad igual de mezcla corregida, una vez mezclados los materiales.

El primer método supone dos correcciones, una en el lugar del trabajo y otra en el punto del destino de la cantidad de material defectuoso retirado; en el segundo método se hace una sola corrección, pero se recomienda el otro, salvo que la proporción de mezcla correctora sea muy pequeña, pues la operación de volver a mezclar el total de materiales, se hace muy dificultosa y onerosa. En general conviene, entonces, efectuar la corrección sobre la cantidad necesaria para lograr el espesor proyectado, separando previamente lo que se va a transportar y realizando en la sección de destino, de esta última parte, la corrección similar.

En el caso de cualquier mezcla incorrecta por cualquier causa, se procedería en la misma forma ya expuesta.

Caso de dos materiales

El caso de dos materiales, muy común en la práctica, es una simplificación del más general que se ha tratado. El triángulo de materiales se reduce a una recta, que es la que une el punto representativo de los dos. El punto que representa la mezcla elegida debe estar sobre esa recta y caer dentro del contorno de granulometría, representado en el triángulo de agregados. Esto impone la condición de que la recta de materiales corte a ese contorno para que sea posible realizar la estabilización con los materiales dados. La zona de proporción de materiales se transforma igualmente en una recta y sobre ella tomamos tantas partes iguales como partes iguales tomemos sobre la recta de materiales en el segmento comprendido dentro del contorno de granulometría; numeradas estas partes correlativamente, tendremos el pasaje de un punto de granulometría a un punto de composición de materiales y viceversa.

Sobre la recta de proporción de materiales indicamos los índices de plasticidad que corresponden a varios de sus puntos, ya sea por ensayos de laboratorio, ya sea por el procedimiento analítico aproximado explicado.

La zona límite dentro de la recta de materiales quedará determinada por los puntos correspondientes a límites de granulometría y límites de plasticidad. En sus extremos tomaremos el margen de seguridad que estimamos prudente para tener la zona de seguridad.

14

Sobre este misma recta indicaremos los puntos de costos de materiales, y la parte dentro de la zona de seguridad correspondiente a los costos menores, será la zona de trabajo.

Los problemas de elección de materiales y corrección de mezclas se desarrollan con conceptos y procedimientos análogos a los explicados para el caso de tres materiales.

Ejemplo numérico de cálculo de materiales para base estabilizada

Corresponde a los gráficos expuestos en las figuras 6, 7 y 8.

Tamiz	% que pasa (material y especific.)			
	Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	Especificación
1"	100	100	-	100
3/4"	78	97	-	70 - 100
3/8"	49,5	90	-	50 - 80
N° 4	27,3	88	100	35 - 65
N° 10	22	74	95	25 - 50
N° 40	5	40	72,9	15 - 30
N° 200	1	7	46	5 - 15
Ind. Plast.	0	2	9	≤ 6
Costos	\$ 200/Tn	\$ 100/Tn	\$ 10/Tn	-

Condiciones granulométricas

Cálculo de los tres materiales para los puntos A, B, C y D; vértices del cuadrilátero que representa las posibles soluciones:

Punto A:

$$\% M_1 = \frac{M_{3A}}{M_3 M_1} \cdot 100 = \underline{90,9}$$

$$\% M_2 = \dots \dots \dots = \underline{0}$$

$$\% M_3 = \frac{M1A}{M1 M3} \cdot 100 = \underline{9,1}$$

Punto B:

$$\% M_2 = \frac{BB'}{M_2 B'} \cdot 100 = \underline{26,4}$$

$$(\% M_{13})_B = \frac{M_2 B}{M_2 B'} \cdot 100 \text{ (mezcla de los materiales 1 y 3, representada por el punto B')}$$

$$\% M_1 = \frac{M_3 B'}{M_3 M_1} \cdot \frac{M_2 B}{M_2 B'} \cdot 100 = \frac{M_3 B'}{M_3 M_1} (\% M_{13})_B = \underline{68,4}$$

$$\% M_3 = \frac{M_1 B'}{M_1 M_3} (\% M_{13})_B = \underline{5,2}$$

Punto C:

$$\% M_2 = \frac{C C'}{M_2 C'} \cdot 100 = \underline{11,5}$$

$$\% M_1 = \frac{M_3 C'}{M_3 M_1} \cdot \frac{M_2 C}{M_2 C'} \cdot 100 = \frac{M_3 C'}{M_3 M_1} (\% M_{13})_C = \underline{59,1}$$

$$\% M_3 = \frac{M_1 C'}{M_1 M_3} (\% M_{13})_C = \underline{29,4}$$

Punto D:

$$\% M_1 = \frac{M_3 D}{M_3 M_1} \cdot 100 = \underline{69,2}$$

$$\% M_2 = \dots \dots \dots = \underline{0}$$

$$\% M_3 = \frac{M_1 D}{M_1 M_3} \cdot 100 = \underline{30,8}$$

Con estas proporciones de materiales se pasa al triángulo de materiales y se ubican las mezclas que corresponden a los vértices, A, B, C y D, del cuadrilátero que limita las soluciones posibles desde el punto de vista granulométrico. Es mejor proceder íntegramente con el método gráfico, dividiendo los lados del triángulo M1 M2 M3, en partes iguales para medir porcentajes, eligiendo un sentido de rotación.

Condiciones de plasticidad: (L P. < 6)

la fórmula a emplear será:

$$I_{mezcla} = \frac{X F_1 I_1 + Y F_2 I_2 + Z F_3 I_3}{X F_1 + Y F_2 + Z F_3}$$

- F 1 = P. T. 40 M1 = 5% I₁ = 0
- F 2 = P. T. 40 M2 = 40% I₂ = 2
- F 3 = P. T. 40 M3 = 72,9 % I₃ = 9

Conviene calcular índices de plasticidad enteros para mezclas, por ejemplo, situadas sobre la base del triángulo de materiales, es decir mezclas con un % $M_2 = 0$

15

$$X + Z = 100 \quad X = \% M_1 \quad Z = \% M_3$$

$$Y = \% M_2 = 0$$

$$I = \frac{Z \times 72,9 \times 9}{X \times 5 + Z \times 72,9}$$

reemplazando $Z = 100 - X$, tenemos:

$$5XI - (I - 9) 72,9 X = 100 \times 72,9 (9 - I)$$

$$X = \frac{100 \times 72,9 (9 - I)}{5 \cdot I + 72,9 (9 - I)}$$

Dando valores enteros a I: 4, 5, 6, y 7 se hallan los valores de X o proporción de M_1 , de la mezcla, siendo el % de $M_3 = 100 - X = Z$

$$I = 4 \quad \begin{cases} M_1 = 94,8 \% \\ M_2 = 0 \% \\ M_3 = 5,2 \% \end{cases} \quad I = 5 \quad \begin{cases} M_1 = 92,1 \% \\ M_2 = 0 \% \\ M_3 = 7,9 \% \end{cases}$$

$$I = 6 \quad \begin{cases} M_1 = 87,9 \% \\ M_2 = 0 \% \\ M_3 = 12,1 \% \end{cases} \quad I = 7 \quad \begin{cases} M_1 = 80,6 \% \\ M_2 = 0 \% \\ M_3 = 19,4 \% \end{cases}$$

Quedan determinados así sobre la línea del material 1-3 los puntos 4, 5, 6, y 7 arranque de las líneas de los I. P. correspondientes.

Para ubicar otros puntos de las rectas de plasticidad trabajaremos sobre la horizontal que corresponde a un porcentaje de M_2 , por ejemplo:

$$M_2 = 30\% = \text{constante}$$

$$Y = 30\% \quad X + 30 + Z = 100 \quad Z = 70 - X$$

$$I = \frac{30 \times 40 \times 2 + (70 - X) 72,9 \times 9}{5X + 30 \times 40 + (70 - X) 72,9}$$

$$X = \frac{30 \times 40 (2 - I) + 70 \times 72,9 (9 - I)}{5 I + 72,9 (9 - I)}$$

Dando valores a I de 4, 5, 6, y 7 se obtiene:

$$\begin{array}{l}
 I = 4 \quad \left\{ \begin{array}{l} M_1 = 60,1 \% \\ M_2 = 30 \% \\ M_3 = 9,9 \% \end{array} \right. \quad I = 5 \quad \left\{ \begin{array}{l} M_1 = 53,1 \% \\ M_2 = 30 \% \\ M_3 = 16,9 \% \end{array} \right. \\
 I = 6 \quad \left\{ \begin{array}{l} M_1 = 41,6 \% \\ M_2 = 30 \% \\ M_3 = 28,4 \% \end{array} \right. \quad I = 7 \quad \left\{ \begin{array}{l} M_1 = 23,3 \% \\ M_2 = 30 \% \\ M_3 = 46,7 \% \end{array} \right.
 \end{array}$$

Se determinan así los puntos 4', 5', 6' y 7' que unidos con los anteriores nos dan las rectas de plasticidad 4, 5, 6 y 7.

Igualmente se hallaron otras líneas de plasticidad.

Líneas o rectas de igual costo:

Para 100 %	M ₁	la mezcla cuesta	\$ 200/Tn.
Para " "	M ₂	" "	\$ 100/Tn.
Para " "	M ₃	" "	\$ 10/Tn.

Dividiendo la base del triángulo en \$ 200 - \$ 10 = 19 partes iguales se obtienen puntos que representan mezclas cuyos costos son de 10, 20, 30, ... \$ 200/Tn. Uniendo el punto de 100% de M₂ = \$ 100 Tn. con el punto hallado de \$ 100/Tn. se tiene la dirección de las rectas de costo. Trazar las restas restantes, que son paralelas a aquellas, es un asunto fácil.

Tenemos entonces en el gráfico:

- Zona límite : - - - - -
- Zona de seguridad: - - - - -
- Zona de trabajo: rayada

Punto más económico: Punto R (M₁= 66, 5%; M₂= 17, 2%; M₃= 16, 3%)

Tenemos pues la granulometría de los materiales, y podemos hacer un cuadro que nos dará la de la mezcla.

Tamiz	Material 1		Material 2		Material 3		Mezcla
	% pasa	% mezcla	% pasa	% mezcla	% pasa	% mezcla	% pasa
1"	100	66,5	100	17,2	100	16,3	100
3/4"	78	51,9	97	16,7	100	16,3	84,0
3/8"	49,5	32,9	90	15,5	100	16,3	64,7
Nº 4	27,3	18,1	88	15,1	100	16,3	49,5
Nº 10	22	14,6	74	12,7	95	15,5	42,8
Nº 40	5	3,3	40	6,9	72,9	11,9	23,1
Nº 200	1	0,7	7	1,2	46	7,5	9,4



Esta granulometría y sus límites están representados en la figura 9.

Costo: $0,665 \times \$ 200 + 0,172 \times \$ 100 + 0,163 \times \$ 10 = \$ 151,80/\text{Tn.}$

Contralor de finos

$$\frac{P. T. 200}{P. T. 40} = \frac{9,4}{23,1} = 0,41 < 0,66$$

(PROYECTO)

El proyecto de revestimientos estabilizados granulométricamente presenta varios aspectos importantes, tales como:

1º) El carácter del revestimiento, es decir, si actuará como base cubierta o como superficie de rodamiento.

2º) La forma a dar a la sección transversal

- 3°) El espesor a dar al revestimiento o los espesores de los distintos revestimientos en caso de que se distribuyan las cargas sobre varias capas.

En cuanto al primer punto, ya vimos las diferencias entre una base y una superficie de rodamiento y las condiciones que debemos considerar en un proyecto.

La sección transversal más adecuada para caminos, ya que el empleo de las bases estabilizadas en calles no es en general aconsejable, es la compuesta por dos rectas inclinadas, unidas en el centro mediante un arco de curva de no más de 2 m. de extensión.

La inclinación transversal de las rectas no será inferior al 2 % para facilitar el desagüe pluvial, si el revestimiento ha sido cubierto con un tratamiento o cubierta asfáltica, susceptible al agua. Tratándose de una superficie de rodamiento la pendiente transversal será por lo menos del 3%.

El espesor a dar al revestimiento es lógicamente una función de las cargas que transitan por el camino y su frecuencia, y calidad de los materiales constituyentes. El estudio de la determinación de los espesores, nos llevará a exponer todo lo considerado hasta el presente con respecto a los espesores de los pavimentos flexibles, sin haberse llegado a conclusiones terminantes.

Se puede emplear, entre otros, el método del Valor Soporte de California (método del C. B. R. - California Bearing Ratio) como el de más simple y universal aplicación para el diseño de pavimentos flexibles.

CONSTRUCCION DE LA BASE O REVESTIMIENTO ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE

Comprende las siguientes operaciones que se enumeran a continuación: (Procedimiento que utiliza preponderantemente la moto niveladora)

- 1 - Preparación de la subrasante
- 2 - Acopio de materiales
- 3 - Mezclado de los materiales
- 4 - Humedecimiento
- 5 - Distribución
- 6 - Construcción de banquetas
- 7 - Compactación inicial
- 8 - Perfilado
- 9 - Compactación final
- 10 - Obtención de lisura
- 11 - Conservación preventiva

Algunas de estas operaciones son complementarias de o se realizan simultáneamente con la construcción propiamente dicha de la base o revestimiento estabilizado. 17

Vamos a analizar cada una de estas operaciones.

1° - Preparación de la subrasante La subrasante deberá acondicionarse, teniendo presente los perfiles indicados en los planos, cumpliendo las exigencias establecidas, ya sea en sentido transversal como longitudinal y debiendo conservar su lisura y perfil correctos durante la construcción del pavimento.

Donde sea necesario y para lograr la obtención de un perfil correcto, la subrasante será escarificada superficialmente hasta una profundidad no menor de 5 cm. y el material producto de esta operación será conformado adecuadamente.

Si se observaran ablandamientos o formación de irregularidades en la superficie, deberán retirarse los materiales recondicionando la subrasante en perfil, lisura y compactación. La no corrección de estos defectos haría que los mismos se reflejaran en la construcción de la base, pudiendo ser corregidos a expensas de la uniformidad en su espesor, lo que es inconveniente.

2° - Acopio de los materiales Los materiales serán en general depositados en forma de caballetes, ya sea efectuando su distribución con equipos mecánicos o volcando directamente con camiones y a medida que el acopio se vaya ejecutando, la uniformidad del volumen será obtenida por obreros encargados de dicha tarea.

Los materiales se acopiarán sobre tramos mínimos de subrasante aprobada de 500 metros, debiendo estar los terraplenes sin sobreelevaciones en la zona de banquetas, para asegurar en caso necesario el escurrimiento de las aguas pluviales. Con la misma finalidad se efectuarán drenes en el caballete de material acopiado a distancias aproximadas de 30 metros.

Si se transportase al camino más de un material, debiendo ser mezclados para la obtención de la granulometría especificada, se dispondrán en forma superpuesta, con lo cual se facilita dicha operación.

Si el suelo cohesivo es pulverizado antes de ser depositado en el camino, será colocado intercalándolo entre los agregados. Si se coloca el suelo cohesivo inferiormente en el caballete, al estar en contacto con la subrasante puede apelmazarse ofreciendo luego dificultades en el mezclado.

Cuando el suelo cohesivo deba colocarse superiormente en el caballete, por tratarse de una mezcla de dos materiales, el

ritmo de las operaciones, deberá ser llevado en forma tal, que el mezclado sea prontamente ejecutado, no dando tiempo a que se produzca la pérdida de finos por acción del viento.

Cálculo de la distancia de distribución

Supongamos una base estabilizada de 12 cm. de espesor y 6,45 m. de ancho, a construirse con una mezcla de tres materiales interviniendo en la siguiente proporción de acuerdo con el proyecto preparado de antemano:

- Material N° 1..... 35 %
- Material N° 2..... 60 %
- Material N° 3. (suelo cohes.) 5 %

y sea la densidad Proctor a obtener con la mezcla compactada de 2070 kg/m³. A fin de tener en consideración las pérdidas de materiales que se producen en la operación de perfilado, así como también la posible mayor densificación a obtener en la construcción, se deben efectuar los cálculos de las cantidades de materiales, incrementando en un 5% a 10%, las estrictamente necesarias o considerando que la base tiene un centímetro más de espesor que el especificado. Tomando este último criterio, el peso por metro lineal de la base será:

$$P = 0,13 \text{ m} \times 6,45 \text{ m} \times 2070 \text{ Kg/cm}^3 = 1736 \text{ Kg/m.}$$

Para cada uno de los materiales, se tendrá de acuerdo a su proporción:

- Material N° 1 1736 Kg/m x 0,35 = 608 Kg/m
- " N° 2 1736 Kg/m x 0,60 = 1042 Kg/m
- " N° 3 1736 Kg/m x 0,05 = 87 Kg/m

Los ensayos de densidad aparente de cada uno de estos materiales dieron los siguientes valores:

- Material N° 1 1320 Kg/m³
- " N° 2 1450 Kg/m³
- " N° 3 1000 Kg/m³

Las distancias de distribución, o sean los metros lineales de calzada, que se pueden cubrir con un metro cúbico de cada material, se calculan así:

$$\begin{aligned} \text{Material N° 1} & \quad \frac{1320 \text{ Kg/m}^3}{608 \text{ Kg/m}} = 2,17 \text{ m/m}^3 \\ \text{" " 2} & \quad \frac{1450 \text{ Kg/m}^3}{1042 \text{ Kg m}} = 1,39 \text{ m/m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Material N}^\circ 3 \quad \frac{1000 \text{ Kg/m}^3}{87 \text{ Kg/m}} = 11,49 \text{ m/m}^3$$

Los camiones a utilizar distribuirán sus contenidos en las distancias que les correspondan de acuerdo con sus capacidades. Cabe señalar que las operaciones de distribución de los materiales deberán efectuarse con la mayor uniformidad pues el no cumplimiento de este requisito, traerá como consecuencia una mezcla defectuosa con los consiguientes mayores movimientos de equipo para su corrección. Es conveniente que el acopio de materiales se efectúe sobre la banquina, pues ello permite dirigir el tránsito sobre la subrasante en forma uniforme. -

La centralización del caballete da lugar a que el tránsito incida en forma permanente en las zonas laterales del mismo, produciendo la deformación de la subrasante y por otra parte en caso de lluvia, la concentración de la humedad en la parte inferior del caballete, produce la consiguiente pérdida de la estabilidad de la subrasante.

Los acopios deben comenzarse en los puntos del camino más alejados de las canteras o yacimientos de materiales, disponiéndose de este modo todo el ancho de la calzada para el tránsito de los camiones.

3° - Mezclado de los materiales Los materiales componentes de la base estabilizada serán mezclados en forma íntima y uniforme. Con tal objeto podrá utilizarse cualquier equipo o método que se juzgue conveniente, siempre que se obtenga definitivamente un producto que cumpla las condiciones especificadas.

Deberá cuidarse de no incorporar durante las operaciones de mezclado, material proveniente de la subrasante o banquetas. El tiempo de mezclado es función de la humedad propia del caballete, demorando más la operación cuanto mayor sea aquélla.

Quando se utilice para la ejecución del mezclado, motoniveladora o niveladora con tractor, la operación se efectuará llevando el material acopiado en una de las banquetas, mediante una serie de cortes con la cuchilla de la máquina, a la otra banquina y luego con el mismo procedimiento al centro de la calzada.

En las zonas lluviosas, donde pueden producirse debajo del caballete ablandamientos de la subrasante, se llevará el material del centro de la calzada a la banquina de origen.

Para determinar si el mezclado es correcto se harán controles de granulometría de muestras extraídas de cada lado de una misma sección del caballete. Es criterio adoptado, el de considerar aceptable una mezcla, cuando las muestras parciales analiza-

das con dicho objeto, respondiendo a la granulometría especificada no acusen diferencias mayores del 4% en el porcentaje del material librado en el tamiz N° 200 (0,074 mm.).

La granulometría de una muestra extraída, como comúnmente se hace, por cuarteo, sólo da idea de la proporción en que participa cada material y no garantiza la uniformidad del mezclado.

4° -Humedecimiento (Fig. 10) Es condición indispensable que el caballete de materiales mezclados esté bien alineado y su sección transversal de forma geométrica bien regular para que las capas de mezcla a humedecer resulten de espesores uniformes. De otro modo, se obtendrían capas de espesores y anchos variables, que al serles aplicadas cantidades equivalentes de agua, daría lugar a la desuniformidad de la humedad de la mezcla. Se conocerán las características de los camiones regadores en cuanto a su capacidad y tiempo de descarga.

El agua deberá aplicarse con rigurosa uniformidad. Si la humedad por causas climáticas o riegos excesivos estuviese fuera de la óptima (ensayo Proctor) admitida, se efectuará un movimiento del caballete hasta reducirla al límite necesario considerando pérdidas por evaporación; en caso de faltar humedad se efectuarán riegos adicionales durante el proceso de distribución.

Generalmente el riego de los camiones regadores se efectúa por acción gravitatoria y colmada la capacidad del tanque regador, se obtienen riegos máximos por unidad de superficie, siendo constante la velocidad, debido a la mayor presión que origina el volumen total de agua, los que van disminuyendo, proporcionalmente a la pérdida de carga.

Los camiones regadores deberán haber adquirido previamente a la iniciación de los riegos la velocidad de régimen. No comenzarán la marcha partiendo del origen del caballete, pues además de la causa señalada anteriormente, una menor velocidad inicial, originaría una aplicación de humedad aún mayor por unidad de superficie.

Es aconsejable que la velocidad de los camiones durante las operaciones de riego se mantenga superior a 6 m/h, y que los riegos sean iniciados alternadamente en ambos extremos del caballete, de manera de compensar las diferencias de intensidad debidas a las causas señaladas anteriormente. Por último no son aconsejables velocidades excesivas en los riegos, pues cuanto más superficiales sean éstos, mayores serán las pérdidas por evaporación.

Cálculo de la cantidad de agua a aplicar Una vez aprobado el caballete se extraerá una muestra para determinar la humedad natural del material, que tendremos en cuenta para el cálculo de la cantidad de

agua a aplicar. También se determinará el porcentaje de agua perdida por evaporación (sol, viento, temperatura ambiente), que oscilará dentro de ciertos límites de acuerdo con las condiciones climáticas que rigen anualmente.

Supongamos haber obtenido los siguientes valores:

Humedad óptima Proctor	9 %
Pérdidas (estimadas)	3 %
suma	12 %
Humedad que contiene el material	2 %
Humedad faltante a agregar	10 %

Densidad aparente de la mezcla de materiales:

Al estado suelto	1580 Kg/m ³
peso por m. 1 de la mezcla	1736 Kg/m

Cantidad de agua por m. 1 = 1736 kg/m x 0,10 = 173,6 l/m
Conociendo el peso por m. 1 de la mezcla y la densidad aparente de la misma calcularemos su volumen por metro lineal.

$$V = \frac{1736 \text{ Kg/m}}{1580 \text{ Kg/m}^3} = 1,099 \text{ m}^3/\text{m}.$$

El volumen de cada capa por metro lineal tomando como espesor el máximo admisible de 5 cm para una buena uniformidad de humedad y un largo de la barra de riego del camión de 2,20 m, sería:

$$0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 2,20 \text{ m (ancho de riego)} = 0,110 \text{ m}^3/\text{m}.$$

Dividiendo el volumen total por metro lineal del material de base, por el volumen resultante para el espesor de capa fijado obtendremos 10 capas a distribuir.

$$\frac{1,099 \text{ m}^3/\text{m}}{0,110 \text{ m}^3/\text{m}} = \sim 10 \text{ capas, es decir que el hume-}$$

decimiento del caballete deberá ser efectuado en un número de capas igual o mayor de diez. Supongamos disponer en obra de dos camiones regadores de las siguientes características:

<u>N°</u>	<u>Capacidad</u>	<u>tiempo de descarga</u>
1	4000 litros	7 min
2	3000 "	6 min

Dispondremos de los camiones en la siguiente forma:

Camión N° 1	4000 litros
" " 2	3000 "
" " 1	4000 "
	<hr/>
	11.000 litros

Cantidad de agua por capa y por metro lineal:

$$\frac{173,6 \text{ l/m}}{10 \text{ capas}} = 17,36 \text{ l/m capa}$$

longitud de caballete a regar:

$$\frac{11.000 \text{ l}}{17,36 \text{ l/m capa}} = 635 \text{ m. en cada capa,}$$

en esta forma supeditamos la longitud del caballete a regar, a la capacidad de los camiones regadores de que disponemos, humedeciendo en capas de 5 cm. de espesor.

También se puede establecer la longitud de caballete a regar y fijar por tanteos, de acuerdo con la capacidad de los camiones regadores, el número de capas a regar y su espesor (igual o menor de 5 cm).

De acuerdo con los datos consignados anteriormente los camiones efectuan su descarga en 6 y 7 min. respectivamente. A fin de que los mismos efectuen la operación de riego con una velocidad conveniente, dispondremos que la descarga de los tanques se realice en un viaje completo (ida y vuelta) duplo de la longitud del caballete.

Las velocidades así determinadas serán:

$$\frac{635 \text{ m} \times 2 \times 60 \text{ min/h}}{7 \text{ min} \times 1000 \text{ m/km}} = 10,9 \text{ Km/h Camión N° 1}$$

$$\frac{635 \text{ m} \times 2 \times 60 \text{ min/h}}{6 \text{ min} \times 1000 \text{ m/km}} = 12,7 \text{ Km/h Camión N° 2}$$

Proceso de ejecución (fig. 10) El humedecimiento se realiza mediante la intervención de una motoniveladora o un tractor con niveladora pesada, y camiones regadores. (fig. 10). La motoniveladora con pequeños cortes distribuye capas de 5 cm. de espesor máximo y del ancho de la barra de riego, (2,2m) del camión regador. Es conveniente cuando la subrasante no está

PROCESO DE HUMEDECIMIENTO DEL MATERIAL PARA LA BASE ESTABILIZADA

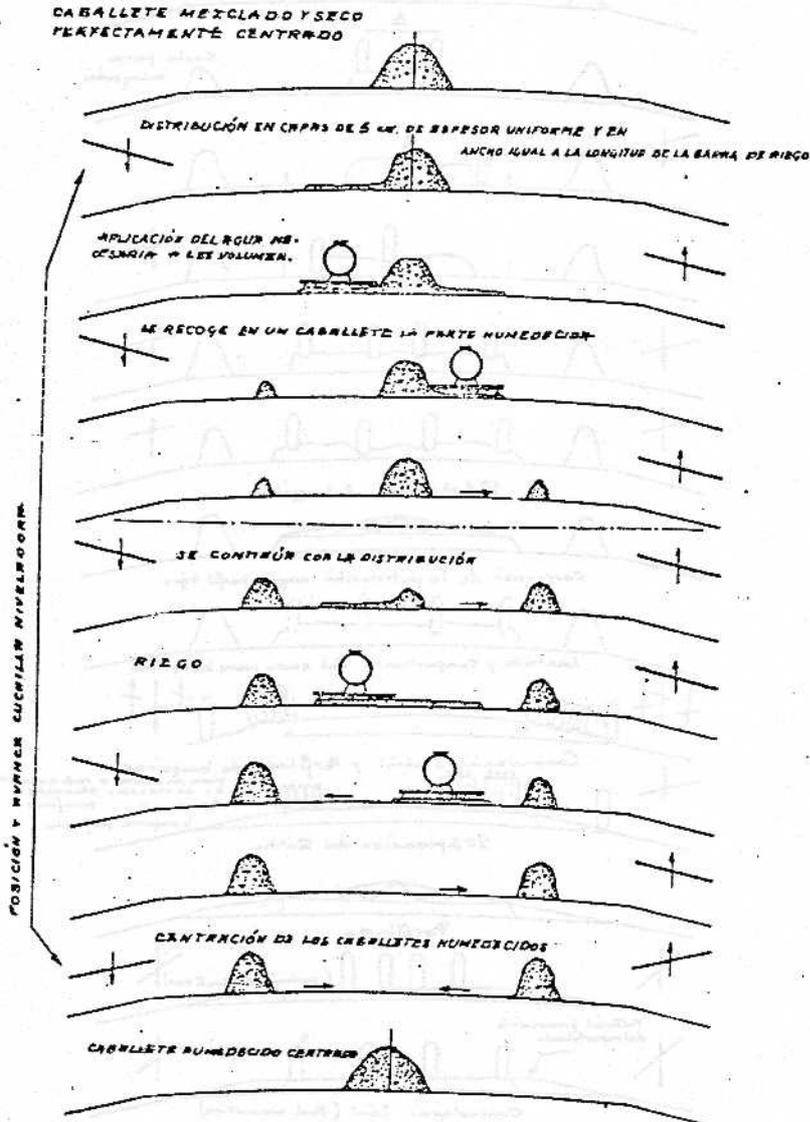


Fig. 10

PROCESO DE EJECUCION DE LAS BASES ESTABILIZADAS GRANULARES

Mezcla en camino

Distribución (motoniveladora de 7 a 11 msv).

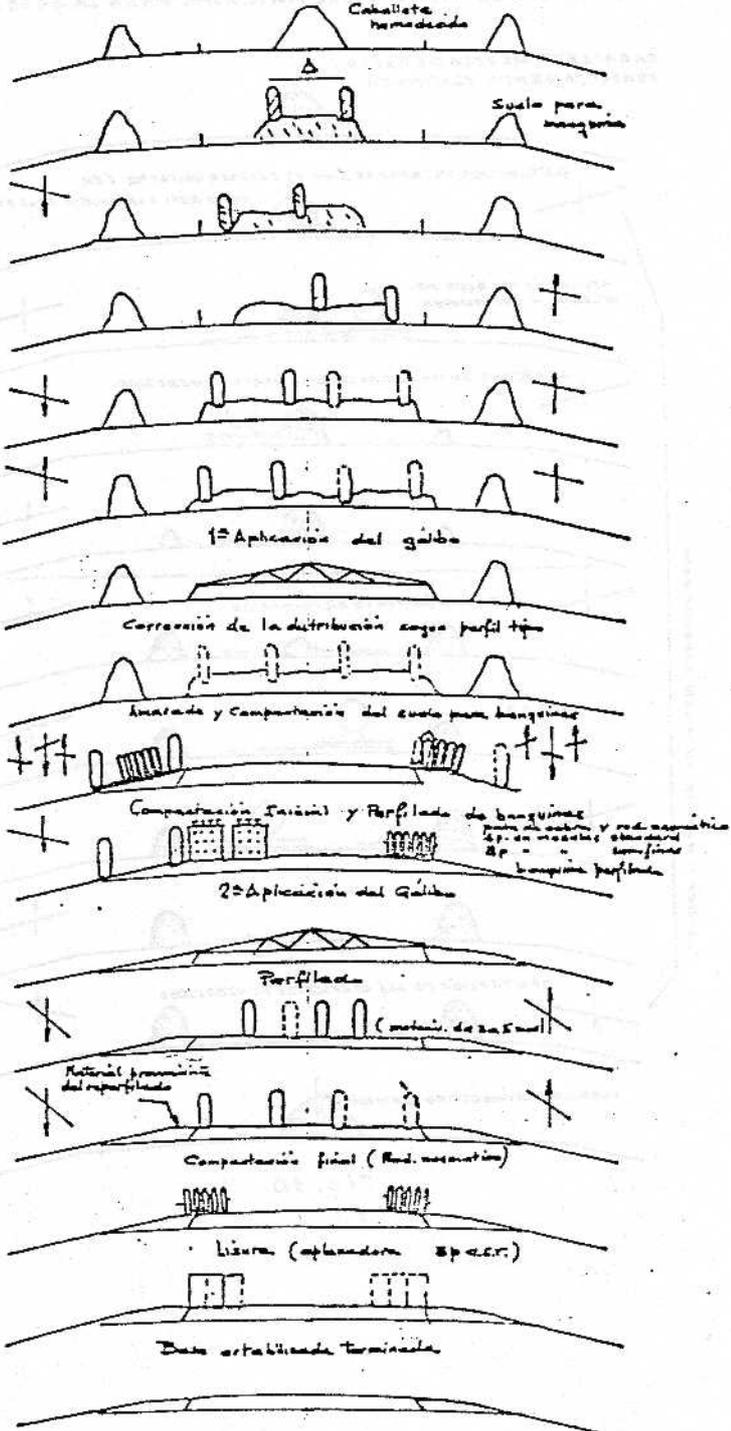


Fig. 11.

superficialmente en condiciones de humedad adecuada, efectuar riegos adicionales livianos a fin de evitar por parte de ésta, la absorción del agua aplicada a la mezcla estabilizada. Centrado el caballete la motoniveladora efectúa cortes sucesivos de mezcla, que luego de humedecida es llevada a las banquetas, y una vez realizada esta operación con la totalidad del material, se lo lleva nuevamente y en la misma forma al centro de la calzada. Esta operación produce en principio una distribución de humedades y es aconsejable ejecutarla en las últimas horas de la tarde, a fin de que el material en reposo durante la noche, uniforme totalmente la misma.

Por otro lado con esta norma, se produce el mínimo posible de pérdidas por evaporación .

Cuando el caballete ha sido alineado en una de las banquetas por ser una zona de abundantes precipitaciones pluviales, se procederá de igual manera efectuando los cortes, riegos y centración de caballete. Teniendo presente que al llevar el material de la banqueta al centro de la calzada se efectúa un menor movimiento, que en la forma señalada anteriormente, se procederá a verificar si la humedad está distribuida regularmente, admitiendo ciertas tolerancias, considerando que al permanecer el material en reposo, se uniformará. En caso contrario deberán efectuarse nuevos movimientos, para el cumplimiento de esta exigencia, dejando el caballete centrado.

5° - Distribución (Fig.11) Teniendo el caballete perfectamente centrado en el eje de la calzada y uniformada su humedad, se comienza a distribuir, previa ejecución de los controles de práctica a fin de conocer las condiciones de trabajo del mismo.

Se inicia la distribución con motoniveladora, agregando si es necesario y de acuerdo con las condiciones climáticas de la zona, riegos superficiales para compensar las pérdidas por evaporación.

En las operaciones de distribución y perfilado, el material debe ser llevado siempre hacia el exterior de la calzada. No es justificable el procedimiento seguido por algunos motoniveladoristas de recoger el material, llevándola hacia el centro, originándose por esta causa un mayor número de movimientos, segregación del material, y formación de estratos. Esta forma de ejecución revela falta de experiencia pues ocasiona un encarecimiento de mano de obra, y una deficiente terminación.

Efectuada la distribución se controlará su uniformidad mediante la aplicación del galibo y midiendo los espesores del material suelto (fig. 12)

Durante la primera aplicación del galibo se dejará en el centro de la calzada, en un metro veinte (1,20) aproximadamen-



Fig. 12

te de ancho, (variable dependiente del ancho de base de sustentación del caballete centrado humedecido), una luz que oscilará de 1 cm a 2 cm (se calcula prácticamente por aproximación) para compensar la mayor densificación adquirida por el material durante las horas de estacionamiento. Es de hacer notar, que en las condiciones óptimas de humedad y por acción de su propio peso, el material ubicado en el centro de la calzada se compacta naturalmente, y no experimentando posteriormente ningún movimiento que altere sus condiciones de densificación deberá tenerse en cuenta esta circunstancia, previendo una diferencia de asentamiento entre el mismo, y el material que se distribuye hacia los bordes, que adquiere un estado de "semi-esponjamiento".

Si del control efectuado se determina que los defectos localizados están fuera de la tolerancia, se ejecutará su corrección con la motoniveladora, con movimientos del material de las zonas en exceso a las en defecto, sin incrementar el ancho de distribución obtenido, concordante con el especificado para la base.

Deberá cuidarse de efectuar el menor número posible de movimientos, pues su aumento traería aparejado la segregación del material.

Los empalmes de base se ejecutarán escarificando con la motoniveladora unos pocos metros de la base contigua ya construida, a fin de obtener zonas de transición aceptable.

6° - Construcción de banquetas Efectuada la distribución la motoniveladora arrimará el suelo (acopiado y humedecido previamente), para la construcción de banquetas, compactándolo simultáneamente con los bordes del estabilizado mediante rodillo pata de cabra y neumático múltiple. Una vez afirmadas las banquetas se proseguirá con la compactación de la base.

7° - Compactación inicial La compactación inicial de la base se efectuará (partiendo de los bordes hacia el centro en forma uniforme), mediante el equipo pata de cabra, cuyo número máximo de pasadas oscilará de acuerdo al tipo de mezcla en un número de 4 (cuatro) en las standard, y 8 (ocho) en las "semi-finas". En las mezclas standard cuando la granulometría obtenida tiende ha-

cia el límite inferior especificado, es decir, a un mayor tamaño, el número de pasadas será aumentado hasta no producir segregación. Simultáneamente actuará en "tandem" el rodillo neumático, a fin de obtener un trabajo más efectivo y una superficie menos irregular. 22

Iniciada la compactación, se efectuará el perfilado de banquetas, con la motoniveladora tendiendo a la obtención de un plano de identificación con la base estabilizada.

8° - Perfilado Ya cumplida la primera etapa de densificación se aplicará el galibo aproximadamente cada 25 metros, anotando las irregularidades observadas, que se corregirán con la motoniveladora.

El producto del perfilado no intervendrá como material de base, sino que se utilizará como recubrimiento superficial de banquetas.

Para la obtención de un buen perfilado se deberá tener un grado de humedad adecuado, para lo cual se efectuarán previamente ligeros riegos superficiales.

Durante el perfilado la cuchilla de la motoniveladora deberá actuar al sesgo, con la máxima inclinación posible, (supeditada a que el material producido no sea pisado por las ruedas traseras) procurando con ello evitar el arrastre de las partículas gruesas que producirían surcos longitudinales en detrimento de la lisura de la base.

9° - Compactación Final Se proseguirá con la compactación mediante rodillo neumático. El número de horas de pasadas, se determinará para cada tipo de base, tomando muestras progresivas hasta lograr la compactación deseada, y se establecerá en consecuencia el número necesario a adoptar en la prosecución de los tramos. -

Conocido el número de horas de rodillo necesario, la inspección no permitirá la distribución de nuevos caballetes, hasta tanto, no tenga la seguridad de que con los equipos de compactación disponibles y de acuerdo al número de horas que deban actuar los mismos por Km, se pueda lograr la densidad especificada en las secciones distribuidas.

10° - Lisura Efectuados los controles de densidad de práctica, y habiendo cumplido dichas exigencias con el fin de obtener lisura en la base, como última etapa constructiva intervendrá la aplanadora, con un número mínimo de 5 (cinco) pasadas con superposición de ruedas. Las mismas deberán efectuarse partiendo de los bordes hacia el centro en forma uniforme.

Si se considera necesario se ejecutarán riegos superficiales para la obtención de un trabajo más eficiente. Una vez finaliza-

da esta última etapa constructiva, se mantendrá clausurada la base, durante un tiempo mínimo de 24 horas.

11° - Conservación Preventiva Transcurridas las 24 horas de finalizada la base estabilizada, será sometida a conservación por un período no inferior a 5 días. Consistirá en la ejecución de riegos diarios, que se regularán de modo que la humedad de los 5 cm. superiores, no exceda del 60% del contenido óptimo, y en las operaciones de cilindrados, bacheos etc. a fin de mantener el perfil, lisura y compactación de la misma.

Se la someterá a tránsito dirigido en forma racional el cual podrá ser el normal de la ruta o el creado artificialmente por la empresa por medio de su equipo, optando con preferencia por este último.

Se deberá abrir al tránsito normal la base estabilizada cuando no sea posible habilitar un desvío para el mismo.

Previa verificación de los controles estipulados y en un plazo no menor de 5 días, la base deberá ser imprimada, dependiendo la urgencia en la ejecución de esta etapa constructiva, de la mayor o menor intensidad del tránsito de la zona, agentes atmosféricos (lluvias, vientos), que pueden variar las condiciones de aceptabilidad originaria de la base.

Cuando cumplidas las exigencias de terminación superficial de la base, se produzcan por la acción del tránsito segregaciones de material, o por los agentes atmosféricos pérdidas de lisura, se podrá restituir el perfil correcto mediante la ejecución de riegos livianos que humedezcan la base en un espesor mínimo de tres centímetros y la de un cilindrado intenso. De este modo se fijará el material flotante por penetración en la base firme, y se restituirá el perfil correcto en lisura y bombo. -

