

Criterios básicos para el dimensionado de firmes (I)

JOSÉ LAFFARGA OSTERET, DR. EN CIENCIAS QUIMICAS.
MANUEL OLIVARES SANTIAGO, DR. ARQUITECTO.

RESUMEN. El artículo aborda las técnicas ingenieriles y condiciones que deben cumplir los firmes. Un sencillo resumen del Pliego de Prescripciones técnicas Generales pretende simplificar la redacción de proyectos y obras.

SUMMARY. This article deals with engineering techniques and the conditions which road surfaces must meet. A simple summary of the document on General Technical Regulations attempts to simplify projects and construction site works.

INDICE GENERAL

0. Introducción 1. Concepto de firme 2. Factores de dimensionamiento 3. Explanada

0. INTRODUCCION

Los autores de este artículo pretenden, con el mismo, hacer asequibles a los arquitectos las técnicas ingenieriles sobre firmes y las diversas condiciones que deben cumplir cada una de sus diferentes capas, haciendo un resumen seleccionado de las mismas según lo establecido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG4), así como los criterios de dimensionamientos que se establecen en las Instrucciones 6.2-I.C. y 6.2-I.C., con el fin todo ello de ayudarles en la redacción de sus proyectos y obras de urbanización.

1. CONCEPTO DE FIRME

Un firme es la superestructura de una carretera y está compuesto por una superposición de capas que tienen como misión, la de amortiguar las cargas puntuales y dinámicas producidas por el tráfico.

La calidad de cada capa será inferior conforme

mayor sea su profundidad. Las diferentes capas que componen el firme son las siguientes:

- **Pavimento o capa de rodadura:** es la capa superior del firme, la cual debe resistir los esfuerzos producidos por el tráfico, proporcionando a su vez al firme una capa de rodadura adecuada.
- **Base:** es la capa que soporta al pavimento, siendo su función fundamentalmente resistente.
- **Sub-base:** es el cimientado del firme que complementa la función resistente de las capas superiores.
- **Explanada:** es la superficie del terreno convenientemente tratada y allanada sobre la que se asienta el firme.

Los firmes pueden clasificarse en:

a) **Flexibles**, los que se deforman bajo la acción de las cargas del tráfico recuperándose una vez que la carga ha desaparecido, su pavimento está constituido por materiales bituminosos.

b) **Rígidos**, los que no se dejan deformar, son aquellos cuyo pavimento es de hormigón.

c) **Semirrigidos**, firmes entre rígidos y flexibles, constituidos fundamentalmente por los adoquinados.

2. FACTORES DE DIMENSIONAMIENTO

Para dimensionar un firme hay que analizar dos aspectos fundamentales:

- Las características del terreno.
- Las características del tráfico.

Las características del terreno vendrán definidas, fundamentalmente, por su **Índice CBR**, y por su grado de compactación **Proctor**, y las características del tráfico vendrán determinadas por la **Intensidad Media Diaria de Vehículos pesados (IMDp)**.

Las **Instrucciones 6.1-I.C. y 6.2-I.C.** proponen un Catálogo de secciones de firme, del cual se escogerá una (o varias), atendiendo a los dos aspectos anteriormente citados. Como habrá diversas secciones que cumplirán las exigencias solicitadas, se escogerá la que resulte más económica según las disponibilidades de los diferentes materiales.

2.1 Índice CBR

Es un índice de la resistencia a esfuerzo cortante del terreno y se determina mediante el ensayo CBR (California Bearing Ratio), que es en definitiva, un ensayo de penetración a velocidad constante.

El índice CBR se obtiene determinando la carga que es necesario aplicar a un pistón circular de 19,35 cm² (3 pulgadas cuadradas), para introducirlo a una velocidad constante de 1,27 mm/min (1/20 pulgadas/min), en una muestra del terreno hasta unas profundidades (o penetraciones) de 2,54 mm (1/10 de pulgada) y 5,08 mm (2/10 pulgadas) La relación (expresada en tanto por ciento) de dicha carga, a la precisa para alcanzar la misma penetración en una muestra tipo o patrón de piedra machacada, se define como su índice CBR. Si el CBR para una penetración de 5,08 mm fuera mayor que el correspondiente para 2,54 mm, se deberá repetir el ensayo y se escogerá como índice

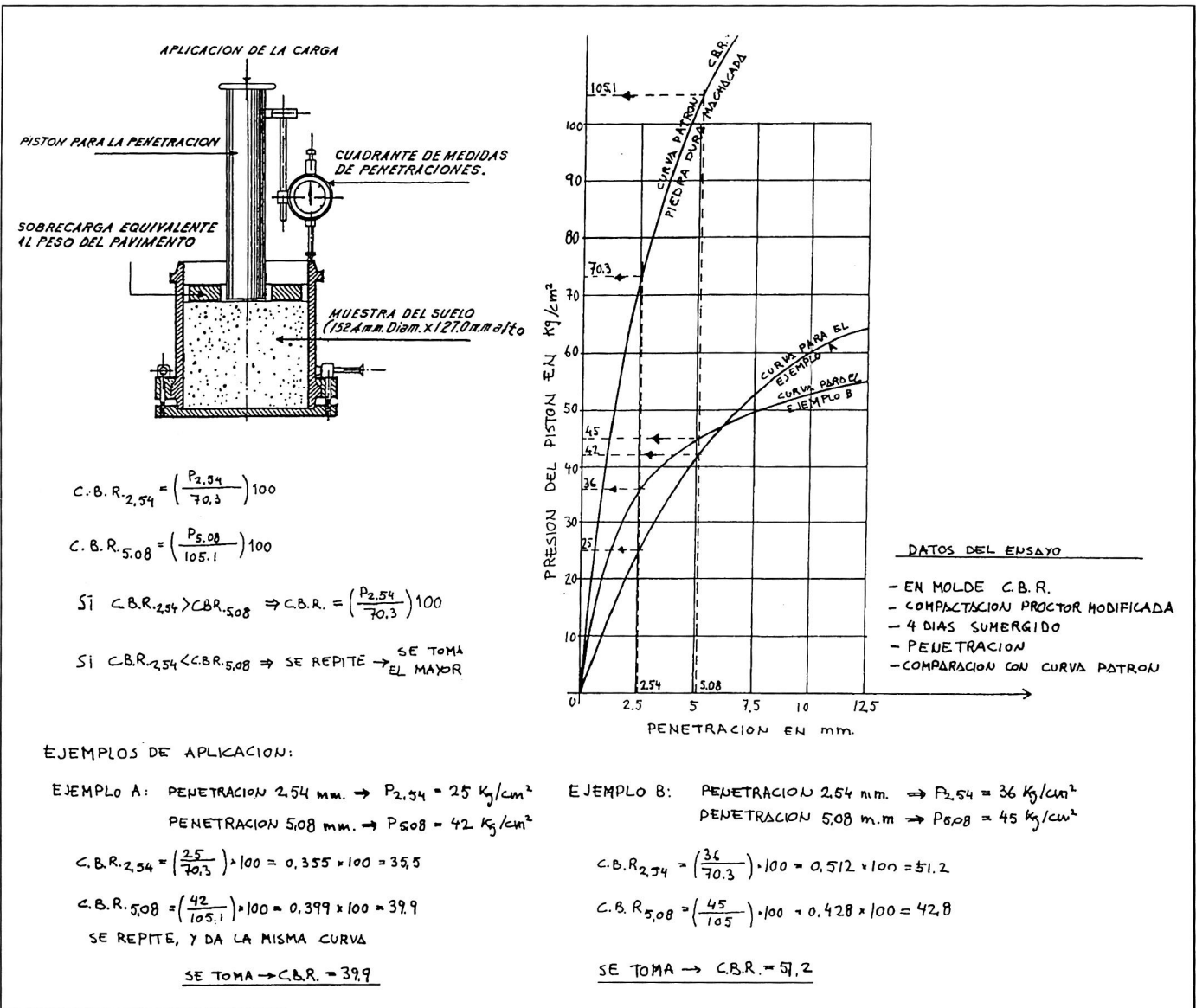


Figura 1

CBR del terreno el que dé mayor de los dos en este caso.

El ensayo se realiza colocando sobre la muestra una sobrecarga anular equivalente aproximadamente al espesor del firme que se espera obtener (figura 1).

2.2 Ensayo Proctor

Es un ensayo de compactación y se expresa como una relación de densidades.

Proceso: se toma una muestra y se seca totalmente, al aire o con estufa, y se va realizando el ensayo de compactación a la vez que se le va añadiendo agua repartida uniformemente por toda la masa. Vamos midiendo por un lado la densidad o compactación y por otro el grado de humedad de la muestra, comprobándose que la densidad aumenta a la vez que se le va añadiendo agua hasta llegar a un momento en que empieza a disminuir. En ese punto tenemos la máxima densidad que será la máxima compactación, denominada densidad 100% Proctor, estándar o modificado según las características del ensayo, y su grado de humedad se llama **humedad óptima Proctor**. Esta suele variar entre el 8 y el 12%.

Las diferencias entre el ensayo **Proctor estándar o normal (P.S.)** y el **Proctor modificado (P.M.)** son las que se expresan en la tabla de la figura 2.

En obra, el firme se compacta por medio de diferentes máquinas, muy conocidas: rodillos de pata de cabra, compactadores de neumáticos, rodillos lisos, etc. Esta maquinaria produce una compactación máxima del 95% P.S. o un 90% P.M. Si se compacta por medio de rodillos vibrantes pesados de neumáticos, se puede alcanzar e incluso sobrepasar el 95% P.M. Estos valores son los que hay que especificar en el Pliego de Condiciones, según la compactación o densidad necesaria.

2.3 Categorías de tráfico pesado

Considerando un período de servicio de 20 años (excepto en las secciones cuya numeración termine en 6 ó en 7 que será de 30 años), la Instrucción define cinco categorías de tráfico pesado en función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD_p) en el carril de proyecto y en el año de puesta en servicio, (figura 3).

Hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En calzadas de 2 carriles, por el exterior incide el 100% de los vehículos pesados.
- En calzadas de 3 carriles, por el exterior incide el 85% de los vehículos pesados, y por el intermedio el 15% restante.
- En autopistas y autovías será siempre T0 o T1.

- Cuando se justifique que los vehículos van sobrecargados y sobre todo cuando se esté cerca de los límites superiores, deberá subirse una categoría.

- En los carriles interiores, la categoría del tráfico no podrá ser inferior en más de una categoría a la del carril exterior.

3 EXPLANADA

Es la superficie del terreno convenientemente tratada y compactada sobre la que se asienta el firme.

Se consideran tres categorías de explanada, definidas fundamentalmente por su índice CBR.

E1 5 ≤ CBR < 10

E2 10 ≤ CBR < 20

E3 CBR ≥ 20

Hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) No se admitirán explanadas del tipo E1 para categorías de tráfico pesado T0 o T1.

b) Se unificarán las explanadas por su capacidad de soporte, de tal manera que no haya tramos diferenciados en menos de 500 metros.

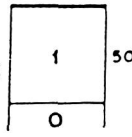
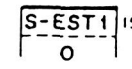
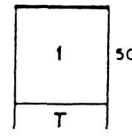
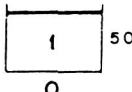
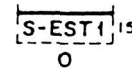
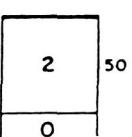
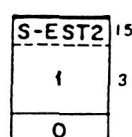
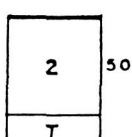
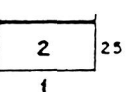
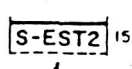
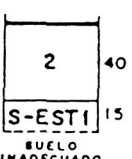
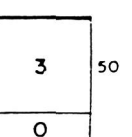
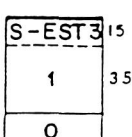
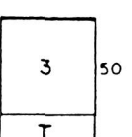
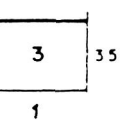
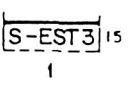
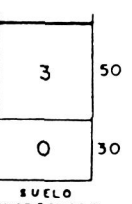
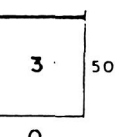
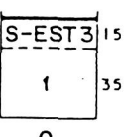
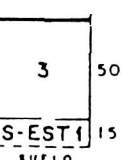
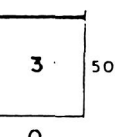
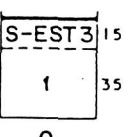
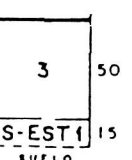
c) La superficie de la explanada, dependiendo

Diferencias entre el ensayo Proctor estándar y el Proctor modificado		
Proctor	Estándar	Modificado
Maza (kg)	2,49	4,50
Altura (cm)	30,5	45,7
Nº Capas	3	5
Espesor (cm)	4,0	2,5
Nº Golpes	55	55

Figura 2

Categoría de tráfico pesado	IMD _p
T0	IMD _p ≥ 2000
T1	2000 ≥ IMD _p ≥ 800
T2	800 > IMD _p ≥ 200
T3	200 > IMD _p ≥ 50
T4	50 > IMD _p

Figura 3

TERRAPLENES Y PEDRAPLENES				E 1
	DESMONTES			
TERRAPLENES Y PEDRAPLENES				
	DESMONTES			
TERRAPLENES Y PEDRAPLENES				
	DESMONTES			
TERRAPLENES Y PEDRAPLENES				
	DESMONTES			

Espesores mínimos en cm

Tabla III - CLASIFICACIÓN DE LA EXPLANADA

del suelo utilizado, deberá quedar por encima del nivel más alto previsible de la capa freática al menos en los centímetros que se indican:

Suelo seleccionado	60 cm
Suelo adecuado	80 cm
Suelo tolerable	100 cm

En la figura 4 se establece la clasificación de las explanadas con sus diferentes secciones según las características del suelo.

En la figura 5 se indican los materiales utilizables en las explanadas, los cuales se van a analizar a continuación.

3.1 Terraplenes

Extensión y compactación de suelos procedentes de las excavaciones, en zonas de extensión tal que permita el uso de maquinaria de elevado rendimiento.

Para su empleo en los terraplenes, los **suelos** se clasificarán en los siguientes tipos:

- **Suelos inadecuados**, son aquellos que no cumplen las condiciones mínimas exigidas a los suelos tolerables.
- **Suelos tolerables**, son aquellos que cumplen las siguientes condiciones:

- No contendrán más del 25 % de piedras > 15 cm.
 - Su LL < 40 o bien simultáneamente LL < 65 e IP > (0, 6LL - 9).
 - La densidad máx. corresp. al ensayo PN será $\geq 1,45 \text{ kg/dm}^3$
 - CBR > 3.
 - Contenido de materia orgánica < 2%.
 - **Suelos adecuados**, son los que cumplen las siguientes condiciones:
 - Tamaño máximo del árido = 10 cm.
 - Arido que pasa por el tamiz 0,080 UNE < 35% en peso.
 - LL < 40.
 - La densidad máxima correspondiente al ensayo PN será $\geq 1,75 \text{ kg/dm}^3$
 - CBR > 5 con hinchamiento < 2%.
 - Contenido de materia orgánica < 1%.
 - **Suelos seleccionados**, deberán cumplir las condiciones siguientes:
 - Tamaño máximo del árido = 8 cm.
 - Arido que pasa por el tamiz 0,080 UNE < 25% en peso.
 - LL < 30 e IP < 10 simultáneamente.
 - CBR > 10 y no presentará hinchamiento.
 - Exentos en materia orgánica
- Los valores anteriormente citados se han resumido en la figura 6.

MATERIALES UTILIZABLES EN LA EXPLANADAS			
Símbolo	Definición del material	Artículo correspondiente del PPTG	Prescripciones complementarias
0	Suelo tolerable	330 Terraplenes	
1	Suelo adecuado	330 Terraplenes	
2	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	
3	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	CBR ≥ 20
T	Material de la zona de transición en pedraplenes	331 Pedraplenes	
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ con cemento o cal	511 Suelos estabilizados "in situ" con cemento	CBR de la mezcla a los 7 días ≥ 5 , cemento o cal $\geq 2\%$
		510 Suelos estabilizados "in situ" con cal 330 Terraplenes	
S-EST 2	Suelo adecuado estabilizado in situ con cemento o cal	511 Suelos estabilizados "in situ" con cemento	CBR de la mezcla a los 7 días ≥ 10 , cemento o cal $\geq 3\%$
		510 Suelos estabilizados "in situ" con cal 330 Terraplenes	
S-EST 3	Suelo adecuado estabilizado in situ con cemento o cal	511 Suelos estabilizados "in situ" con cemento	Resistencia a compresión simple a los 7 días $\geq 1,5 \text{ Mpa}$.

Figura 5

3.2 Pedraplenes

Extensión y compactación de materiales pétreos idóneos, procedentes de excavaciones en rocas, siendo el área de trabajo suficiente para el empleo de maquinaria de alto rendimiento.

Para el empleo en pedraplenes las rocas pueden ser:

- **Rocas adecuadas**, siempre que sean sanas, compactas y resistentes, podrán utilizarse los materiales pétreos procedentes de las siguientes rocas, entre otras: los granitos, cuarcitas y mármoles, las calizas, los pórfidos, los basaltos y las areniscas.

- **Rocas inadecuadas**. No se podrán utilizar los materiales procedentes de las rocas siguientes: micacitas; anhidritas, yesos y rocas solubles; tobas calcáreas y caliches; tobas volcánicas y rocas volcánicas piroclásticas y todas aquellas rocas que puedan descomponerse bajo la acción meteorológica o la compactación.

- **Rocas que requieren un estudio especial**, que son las que la Instrucción no incluye en los dos apartados anteriores.

El material, una vez **compactado**, deberá cumplir las siguientes condiciones granulométricas:

- Tamaño máximo $\leq 2/3$ del espesor de tongada compactada.

- Material que pase por cedazo 25 UNE $< 30\%$ en peso.

- Material que pase por tamiz 0,080 UNE $< 10\%$ en peso.

- El contenido en peso de partículas con forma inadecuada será $< 30\%$.

Serán partículas de forma inadecuada aquellas en las que se verifique:

$$(L + G)/2 E \leq 3$$

donde:

L = longitud (separación máxima entre dos planos paralelos tangentes a la partícula).

E = espesor (separación mínima entre dos planos paralelos tangentes a la partícula).

G = grosor (diámetro del agujero circular mínimo que puede ser atravesado por la partícula).

3.3 Suelos estabilizados

Un suelo de arena y arcilla con una adecuada humedad puede aguantar el tráfico intenso, pero en cuanto varía la humedad, el polvo o el barro hacen el tráfico difícil o inviable. Para ello se creó la técnica de la "estabilización de suelos", realizándose vías de costo reducido, aceptables hasta ciertos límites de tráfico muy ligero. A su vez, estos suelos son unas bases o cimientos excelentes para pavimentos de superior calidad.

En definitiva, los suelos estabilizados son aquellos que han sido convenientemente tratados para que no acusen fuertemente los cambios de humedad.

Se recomienda que el espesor mínimo de la capa de suelo estabilizado sea de 15 a 20 cm. y que el perfil transversal tenga una sección parabólica con una pendiente del 4 %.

Existen diversas **técnicas de estabilización** de suelos: mezcla adecuada de áridos y arcilla, con cal, con cemento, con productos bituminosos, con sales higroscópicas.

A continuación se analizan cada uno de estos sistemas.

3.3.1 Mezcla adecuada de áridos y arcilla

Mezclando adecuadamente el material del suelo con arena y arcilla o con arena, grava y arcilla puede conseguirse la estabilización del mismo.

Para que la mezcla sea adecuada debe cumplir las siguientes condiciones:

- La mezcla debe pasar por el tamiz nº 60 (0,25 mm) de un 40 a un 60 %

- La cantidad de arcilla debe oscilar entre un 2 y un 25 % de la mezcla.

CONDICIONES	TIPO DE SUELO		
	Suelo tolerable	Suelo adecuado	Suelo seleccionado
Tamaño del árido	$> 15 \text{ cm} < 25 \%$	Máx = 10 cm Pasa 0,080 $< 35\%$	Máx = 8 cm Pasa 0,080 $< 25 \%$
Plasticidad (LL)	LL < 40 ó LL < 65 e IP $> (0,6LL-9)$	LL < 40	LL < 30 e IP < 10
Densidad en ensayo PN	$\geq 1,750 \text{ kg/dm}^3$	$\geq 1,750 \text{ kg/dm}^3$	-
C. B. R	> 3	> 5 (hincham. $< 2 \%$)	> 10 (sin hincham.)
Contenido de materia orgánica	$< 2 \%$	$< 1\%$	Exento

Figura 6

– El LL de los finos, material que pasa por el tamiz nº 40 (0,42 mm) debe ser inferior a 25.

– El IP deberá tener unos valores adecuados, y nunca superior a 12, dependiendo de la pluviometría de la zona y de que lleve o no tratamiento superficial.

La **ejecución de las obras** deberá seguir el siguiente proceso:

1. Escarificado del suelo natural.
2. Acopio y mezcla de los materiales con el procedente del escarificado.
3. Comprobación de las características de la mezcla.
4. Humedecimiento.
5. Distribución de la mezcla.
6. Apisonado y perfilado.

3.3.2 Suelos estabilizados "in situ" con cal

Se define como suelo estabilizado con cal la mezcla íntima convenientemente compactada, de suelo, cal y agua que se efectúa con el fin de modificar determinadas propiedades de los suelos.

El **material que estabilizar** deberá cumplir las siguientes condiciones:

- No tener materias orgánicas o vegetales en cantidades perjudiciales.
- Partículas ≤ 80 mm o a la mitad del espesor de la tongada compactada.
- El rechazo del tamiz 0,080 UNE $< 85\%$ en peso.

Se recomienda una dosificación mínima de cal del 5 % en peso de la mezcla total.

La cal se distribuirá de manera uniforme con maquinaria apropiada. Si previamente el terreno no ha sido debidamente disgregado, la mezcla se realizará mediante máquinas que permitan la disgregación del suelo hasta la profundidad que se haya especificado. Las operaciones de mezclado deberán continuarse hasta conseguir que la cal se haya mezclado homogéneamente con el suelo, lo que se reconocerá por el color uniforme de la mezcla.

La cal puede distribuirse en **polvo** o bien en forma de **lechada**. En el primer caso habrá que añadirle la cantidad de agua necesaria para alcanzar el grado de humedad requerido.

La compactación se iniciará longitudinalmente, empezando por el punto más bajo de las distintas bandas y se continuará hacia el borde más alto de la capa, solapándose en sus pasadas sucesivas.

La mezcla se mantendrá húmeda durante un periodo de cinco a siete días.

3.3.3 Suelos estabilizados "in situ" con cemento

Se denomina así a la mezcla, convenientemente compactada, de suelo, cemento, agua y eventualmente adiciones, a la cual se le exigen unas determinadas condiciones de insusceptibilidad al agua,

resistencia y durabilidad. Los materiales que estabilizar con cemento serán suelos, materiales locales o escorias que deberán cumplir las siguientes condiciones:

- No tener sustancias vegetales, orgánicas o de otro tipo que perjudiquen el fraguado.
- Tamaño máximo ≤ 80 mm y de la mitad del espesor de la tongada compactada.
- Elementos retenidos por tamiz 2 UNE $< 80\%$ en peso.
- Elementos que pasen por tamiz 0.080 UNE $\leq 50\%$ en peso.
- La fracción de suelo que pase por el tamiz 0,40 UNE tendrá un LL < 35 y un IP < 15 .

La dosificación de cemento deberá ser capaz de conferir al suelo estabilizado compactado una resistencia mínima a la compresión simple a los siete días de 20 kp/cm² en capas de firme y de 15 kp/cm² en explanadas.

La cantidad de cemento dependerá de la arcilla del suelo, ya que mientras más arcilla contenga, más cantidad de cemento se precisará para su estabilización. Aproximadamente se utilizarán alrededor de los 100 kg de cemento por m³ de suelo. El proceso que se sigue en la ejecución es el siguiente:

- **Escarificado** del suelo.
- **Mezcla** del material del suelo con el cemento.
- **Humedecimiento** de la mezcla.
- **Extendido** de la mezcla (antes de transcurrida 1/2 hora de su humedecimiento).
- **Compactación**. Deberá terminarse antes de transcurridas 4 horas de efectuada la mezcla y no durará más de 2 horas. La compactación mínima exigida será del 97 % Proctor Normal en capas de explanada y del 100 % Proctor Normal en capas de firme. Se ejecutará longitudinalmente empezando por el borde más bajo y solapándose las pasadas. La mezcla se mantendrá húmeda durante, por lo menos, los 7 días siguientes a su terminación.

3.3.4 Suelos estabilizados con productos bituminosos

Se define como suelo estabilizado con un producto bituminoso, la mezcla íntima convenientemente compactada, de suelo, agua, ligante bituminoso y eventualmente adiciones, cuyo fin es mejorar las características resistentes del suelo, disminuyendo su capacidad de absorción de agua y/o aumentando su cohesión por efecto de la incorporación del ligante bituminoso.

La fracción cernida por el tamiz 0,40 de UNE cumplirá las condiciones siguientes: LL < 35 e IP < 15

La dosificación del ligante bituminoso deberá ser capaz de conferir a la mezcla compactada suficiente cohesión o impermeabilidad, o ambas cosas, según el fin que se persiga con la estabilización.

La mezcla debe realizarse de tal forma, y a la velocidad precisa para conseguir un material homogéneo y exento de concentraciones de ligante.

3.3.5 Estabilización mediante sales higroscópicas

En ocasiones se emplean productos químicos para la estabilización de suelos. Las sales higroscópicas hacen que el pavimento se mantenga siempre ligeramente húmedo, actuando esta humedad de lubricante y consiguiendo que con el tiempo se vaya consolidando el terreno. El cloruro sódico (Cl Na) y el cloruro cálcico (Cl₂ Ca) son estos productos químicos más usados. Por otro lado, un 1% de estas sales aumenta la resistencia a las heladas de los suelos.

Las dosificaciones son:

Cl Na: 0,150 kg/m² y cm de espesor (deben contarse sólo los primeros 8 cm, ya que no penetra más profundamente).

Cl₂ Ca: 1,10–1,40 kg/m² independientemente del espesor (ya que los copos al absorber la humedad de la atmósfera penetran poco a poco en todo el espesor).

Observamos que las dosificaciones son similares para ambas sales, ya que si tenemos en cuenta que el Cl Na sólo profundiza 8 cm como máximo, la

proporción empleada sería de 1,2 kg/m² lo que está dentro del margen establecido para el Cl₂ Ca.

La distribución de las sales puede hacerse disuelta en el agua de riego, en copos, o en polvo, mezclado con el terreno cohesivo.

3.3.6 Suelos estabilizados determinados en la Instrucción

La Instrucción distingue, para su uso en las diferentes categorías de explanadas, tres categorías, a su vez, de suelos estabilizados:

S-EST 1: Suelo estabilizado "in situ" con cemento o con cal con una proporción mínima del material estabilizante del 2 % en peso y un CBR de la mezcla a los 7 días no inferior a 5.

S-EST 2: Suelo adecuado estabilizado "in situ" con cemento o con cal con una proporción mínima del material estabilizante del 3% y un CBR de la mezcla a los 7 días no menor de 10.

S-EST 3: Suelo adecuado estabilizado "in situ" con cemento con una resistencia a la compresión simple de la mezcla a los 7 días no inferior de 1,5 MPa.