

CAPITULO I

INTRODUCCION

Tarija es un departamento privilegiado en lo que se refiere a recursos naturales e hidrocarburíferos. En la actualidad Tarija está experimentando un desarrollo acelerado en varios aspectos, principalmente en la infraestructura caminera.

En la actualidad se construyen caminos y carreteras de todos los tipos, con recursos provenientes de regalías e IDH principalmente, específicamente en lo que se refiere a la construcción de caminos municipales, éstos están teniendo un desarrollo acelerado en nuestra región.

Este tipo de caminos son de fundamental importancia para el desarrollo de nuestros pueblos. Son la base sobre la que los pobladores pueden mejorar su calidad de vida, accediendo no sólo a centros de salud y educación, sino a los mercados donde pueden ofrecer sus productos, por la facilidad de su traslado, a través de los caminos municipales.

Son el desarrollo para nuestros pueblos, sin embargo las especificaciones técnicas para la construcción de estos caminos son menores. Es decir que para la construcción de éstos, las exigencias y el control de calidad que se realiza a los mismos, tiene falencias. En la misma metodología que se utiliza, se obvian algunos detalles.

Estos caminos al poco tiempo de ser construidos ya comienzan a presentar fallas como deformaciones, fisuras y otros problemas, que perjudica el tránsito normal de

los usuarios ocasionando una molestia en los mismos, aparte de que el mantenimiento que tienen estos caminos es esporádico o en muchos casos no se realiza.

La situación problemática, parte fundamentalmente de la necesidad de optimizar la construcción de las explanaciones en caminos municipales, de manera que se pueda tener una vida útil en este tipo de caminos más larga, a través de la identificación de parámetros y detalles constructivos más importantes, y una posterior propuesta de recomendaciones que estará referida específicamente a esta categoría de caminos.

1.1. JUSTIFICACION

Los caminos son un factor importante en el desarrollo de nuestros pueblos, por lo tanto estos deben encontrarse en buenas condiciones de funcionamiento.

Hoy en día la rápida evolución de las actividades económicas van generando un incremento considerable en el volumen de tráfico, paralelamente las cargas impartidas por los vehículos comerciales van en aumento, esto se traduce en el requerimiento de contar con caminos de mejor calidad. Para tal efecto los ingenieros viales deben enfrentar el reto de proporcionar una infraestructura vial eficaz y durable.

La infraestructura de un camino municipal comprende las obras necesarias para conseguir una explanada definitiva, incluye por tanto las explanaciones, muros de contención, elementos de drenaje tales como cunetas, drenes subterráneos y obras de desagüe, así como también otras obras accesorias.

Las explanaciones son obras de remodelación del terreno natural que es preciso realizar a lo largo de la traza para conseguir la explanación o subrazante prevista y

definida en los planos de planta, perfil longitudinal y secciones transversales, es la parte fundamental en la construcción de los caminos municipales, por que en gran parte de estos factores depende la vida útil de el camino, además de la incidencia que tienen en el presupuesto total de la obra.

Las explanaciones deben cumplir tres condiciones fundamentales a lo largo de la vida útil de la obra: estabilidad volumétrica, resistencia mecánica e inalterabilidad frente a agentes externos (principalmente los factores climáticos).

Por tanto para la construcción de las explanaciones de los caminos municipales, se debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas, que están en función del tipo de camino que se quiere construir.

Las exigencias o el control de calidad en lo que se refiere a la construcción de las explanaciones de caminos municipales, es menor en relación a otro tipo de caminos como los interprovinciales e interdepartamentales. Lo que ocasiona que nuestros caminos municipales tengan ciertas deficiencias y una vida útil muy corta debido a que se producen deformaciones en las explanaciones y por ende también en la capa de rodadura, provocando en muchos casos cortes en el tránsito vehicular y también peatonal.

La solución a esta problemática nos lleva a tener como objetivo el realizar un “estudio de la construcción de las explanaciones en caminos municipales”, para posteriormente brindar recomendaciones prácticas que vayan a favorecer la construcción de los mismos.

La idea principal es que con este trabajo se pueda aportar de manera fundamental al área de la ingeniería en nuestro medio y su desarrollo debido a que al optimizarse la construcción de las explanaciones de caminos municipales, se optimizaran los recursos económicos y se brindará mayor seguridad y confiabilidad para los usuarios y permitirá ejecutar nuevos proyectos en beneficio de la sociedad.

El estudio servirá para establecer recomendaciones específicas sobre la construcción de las explanaciones en caminos municipales aplicadas a nuestro medio. Permitirá determinar en el proceso constructivo que factores son los más importantes y que detalles no se toman en cuenta, o se obvian en ejecución.

Este trabajo contemplará una aplicación práctica en un tramo caminero determinado, de donde se extraerá conclusiones particulares referentes al proceso constructivo.

Así mismo se establecerá una propuesta de recomendaciones para la optimización de la construcción de explanaciones de caminos municipales.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL:

El objetivo principal de este trabajo es el de brindar una propuesta de recomendaciones para la optimización de la construcción de explanaciones en el tramo de análisis, mediante un estudio profundizado, que pretende identificar que parámetros y detalles constructivos son más importantes tomar en cuenta durante su ejecución.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el estudio de las explanaciones, a través primeramente de la revisión de libros, tesis, revistas y de Internet, para posteriormente interiorizarse o tener una idea clara sobre las explanaciones en los caminos municipales.
- Realizar el estudio de las características de las obras de tierra y problemas geotécnicos que pueden presentarse (terraplenes y desmontes), también con la revisión de la información existente sobre estos particulares.
- Realizar el estudio del control de calidad y metodología que se debe realizar en la construcción de explanaciones, mediante el análisis teórico de la bibliografía referida a los procesos de ejecución.
- Realizar el estudio de las características de los caminos municipales (características geométricas y estructurales).
- Realizar el análisis de la maquinaria utilizada en la construcción de las explanaciones en este camino, y la determinación si la misma es la óptima.
- Establecer una propuesta de recomendaciones sobre la construcción de explanaciones en el tramo estudiado, para optimizar su diseño.

1.3. ALCANCE

En el presente trabajo se realizará un estudio de la construcción de explanaciones en caminos municipales, específicamente se realizará un estudio a diferentes terraplenes ubicados en diferentes puntos a lo largo de un tramo determinado.

Se estudiará las propiedades mecánicas de los terraplenes, materiales involucrados, así como también la metodología utilizada para la construcción de los mismos.

Este estudio contemplará, los ensayos de suelos necesarios en laboratorio, para verificar ciertas características mecánicas de los materiales presentes en estos terraplenes, entre estos ensayos se realizará su clasificación en los sistemas ASTM y AASHTO, se realizará también los ensayos de compactación (Proctor Modificado T-180) y CBR, además de la densidad in situ, para determinar las cualidades de los suelos en este tipo de obras, como así también su calidad de la obra concluida.

Se estudiará la metodología de construcción de los diferentes terraplenes en estudio, control de calidad, y posteriormente identificar las falencias en estos aspectos.

En lo que se refiere al tema central del trabajo, una vez que se haya realizado el estudio teórico de las explanaciones en caminos municipales, además de la obtención de resultados de los ensayos de laboratorio requeridos para establecer las cualidades de estos materiales, se realizará un análisis que permitirá establecer las condiciones de funcionamiento de los terraplenes en estudio, para determinar si cumplen con las condiciones mínimas establecidas.

Una vez realizado todo el estudio de la construcción de explanaciones en el camino, lo que se pretende es elaborar una propuesta de recomendaciones que tengan como objetivo la optimización de este tipo de obras, que vayan a mejorar la calidad de los mismos y también la vida útil que tienen éstos.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS

2.1. CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EN FUNCION DE SU GRANULOMETRIA.-

Los **suelos granulares** provienen de la alteración física de las rocas. Esta alteración está en el origen de la forma de sus partículas (redondeada o angulosa). Contienen una proporción reducida de finos, por lo que la plasticidad es nula o muy baja, no tienen una cohesión apreciable y, por tanto, la resistencia es debida únicamente al rozamiento interno. Sus propiedades derivan fundamentalmente de la granulometría. La naturaleza de las partículas en estos suelos es variable; predominan las partículas de naturaleza silíceas o calizas, pero también pueden ser de origen volcánico.

Las arenas de los ríos son generalmente redondeadas, en tanto que los materiales granulares de tipo residual presentan una mayor angulosidad de sus partículas. Su composición mineralógica influye en el proceso erosivo, en la forma de las partículas y en su alterabilidad que puedan tener estos suelos.

Estos suelos son permeables si contienen pocas partículas finas y no experimentan cambios de volumen al variar su humedad. Estos suelos si contienen partículas de forma regular y especialmente si son angulosas, presentan una elevada resistencia a la deformación y baja compresibilidad, por lo que son materiales adecuados para utilizar en las explanaciones.

Entre los **suelos finos o de grano fino**, se puede diferenciar claramente los limos y las arcillas. Los **limos** son suelos finos formados por partículas normalmente entre 0.060 y 0.002 mm que no llegan a presentar plasticidad elevada, aunque sí suelen ser algo plásticos. En seco, los terrones pueden ser desmenuzados con los dedos.

Estos suelos limosos pueden ser muy susceptibles a la helada en el sentido de sufrir hinchamientos considerables si están sometidos a bajas temperaturas en régimen prolongado y tienen posibilidad de absorber agua. Son poco permeables, la influencia de la humedad afecta directamente en su deformabilidad, compresibilidad e hinchamiento o retracción.

Las **arcillas** están constituidas por partículas muy pequeñas, en su mayoría coloidales, el tamaño de sus partículas es inferior a 0.002 mm. Presentan en consecuencia, una gran capacidad de absorber agua, lo que se traduce en variaciones de volumen producidas por la variación de la humedad. Los suelos cohesivos se hinchan y se contraen, pudiendo presentar una pérdida de capacidad resistente.

Por su impermeabilidad, absorbe lentamente la humedad, pasando a un estado plástico en el que la arcilla puede resultar muy pegajosa, cohesiva, lo cual permite su fácil moldeado sin agrietamiento ni disgregación. Su consistencia y resistencia a la deformación dependen tanto de la naturaleza de la arcilla como de su humedad. Debido a su alto contenido de humedad en estado natural su resistencia al esfuerzo cortante puede ser muy baja y la capacidad de soporte muy reducida.

Por su estructura generalmente laminar, las arcillas pueden absorber cantidades importantes de agua variando su densidad, propiedades mecánicas y sufrir un hinchamiento.

En estado seco, un terrón de arcilla es casi imposible de desmenuzarse con los dedos.

CUADRO N° II-1

Granulometría	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Limos	0,002 - 0,06 mm
Arenas	0,06 - 2 mm
Gravas	2 mm - 6 cm
Cantos Rodados	6 - 25 cm
Bloques	> 25 cm

Denominación de los suelos según el tamaño de sus partículas

Fuente: **Ingeniería de Carreteras Vol. II**, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

2.2. IDENTIFICACIÓN DE SUELOS Y ROCAS EN CAMPO

Los suelos y rocas pueden identificarse y clasificarse aproximadamente en el campo, con ensayos sencillos y rápidos que permiten escoger los ensayos de laboratorio posteriores, fijar el tipo, calidad y cantidad de la toma de muestras para ensayos y sobre todo realizar una descripción del terreno que en algunos casos es tan importante como los propios ensayos.

Los utensilios que deben llevarse a un reconocimiento de campo son muy simples, como reglilla graduada, navaja, papel, vasos de plástico transparente y en caso de examinar rocas, martillo y agua oxigenada. En los suelos se debe estimar la granulometría, resistencia a rotura, aspecto, corte con navaja, plasticidad, dilatancia y olor, mientras que en la roca debe examinarse la fractura, textura, aspecto, color, y comportamiento a la inmersión en agua oxigenada.

Los métodos seguidos se describen a continuación.

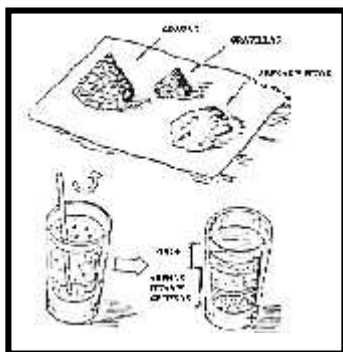
FIG. II-1



2.2.1. Apreciación de su granulometría

Mediante una inspección detallada del suelo se determinarán los porcentajes aproximados de las fracciones de suelo separadas entre si por los tamaños 25 mm, 5 mm y 0.05 mm. Para apreciar los porcentajes se desmenuzará el suelo sobre un papel o superficie limpia separándolo en estos tamaños. Generalmente pueden retirarse bien las fracciones de más de 25 mm y de 25 a 5 mm pero para el resto conviene desleír el suelo en un vaso de agua, agitarlo, esperar a que se sedimente y apreciar así los porcentajes de suelo. Los tamaños superiores a 25 mm se consideran gravas. Los comprendidos entre 25 y 5 mm gravillas, los de 5 mm a 0.05 (límite de apreciación visual) se consideran arenas y los inferiores a 0.05 mm, material fino, o sea limos y/o arcillas.

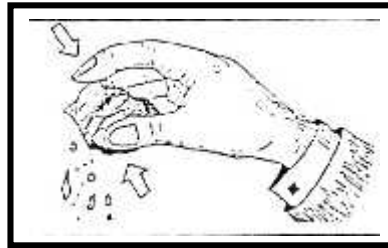
FIG. II-2



2.2.2. **Apreciación de la resistencia a la rotura.**

Se realiza con una muestra seca de suelo a la que se han retirado los elementos gruesos, mayores de 5 mm. Esta muestra se trata de romper con los dedos apreciando su resistencia al desmenuzamiento y su rugosidad o aspereza.

FIG. II-3

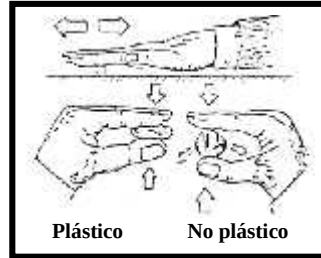


2.2.3. **Apreciación de la plasticidad.**

Consiste en formar cilindros de 3 mm de diámetro rodando con la mano una pequeña masa de suelo fino húmedo sobre una superficie plana. Una vez formado el cilindro se hace una bola y se vuelve a empezar la operación hasta que llegue un momento que el cilindro se rompa. La humedad de ese suelo es el límite plástico. En ese momento se reúne en una bola el material que ha alcanzado el límite plástico y se aprecia si ésta se mantiene coherente o se deshace. Hay plasticidad alta cuando se forman fácilmente los cilindros y las bolas moldeadas con ellos se deforman sin romperse; cuando los cilindros se forman con dificultad y las bolas amasadas con ellos se rompen al deformarse, se dice que la plasticidad de ese suelo es baja.

Los suelos de baja plasticidad forman cilindros quebradizos y no se pueden amasar bolas con ellos por debajo del límite plástico. Suelos no plásticos son los que no permiten formar cilindros.

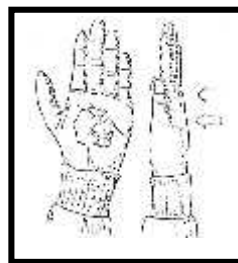
FIG. II-4



2.2.4. Apreciación de la dilatancia.

El ensayo consiste en formar muestras con diversos grados de humedad con suelos finos (inferiores a 5 mm). Estas muestras se colocan en la palma de la mano y se golpea ésta lateralmente produciendo una vibración. Algunos tipos de suelos se comportan en este ensayo afluyendo el agua a la superficie de la muestra, que queda brillante; al apretarla con los dedos desaparece el agua quedando mate. Repitiendo este ensayo llega un momento en que la muestra se pulveriza. Cuando esto ocurre tras una serie corta de vibraciones y reamasados se dice que hay una reacción rápida de dilatancia. Cuando la serie es larga, la reacción es lenta y cuando no se aprecian cambios entre los sucesivos ensayos se dice que no hay reacción de dilatancia.

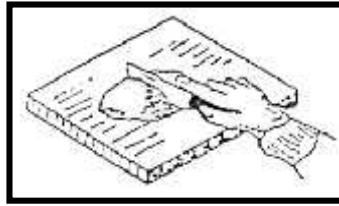
FIG. II-5



2.2.5. Apreciación de comportamiento al corte con navaja.

Se efectúa un corte de muestras de suelo con diversas humedades, describiendo si el corte es limpio y liso, o si aprecian rugosidades, si es fácil o difícil y si la superficie cortada tiene brillo o es mate.

FIG. II-6



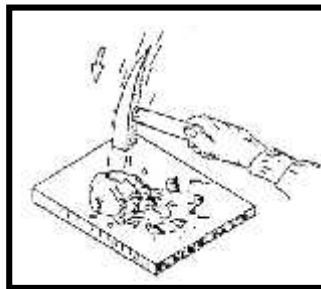
2.2.6. Olor

Los suelos con materia orgánica tienen un olor característico, como a tierra vegetal o estiércol, que se hace más intenso cuando se calienta el suelo.

2.2.7. Apreciación de la fractura de rocas.

Se golpean las rocas con el martillo de geólogo o entre sí, hasta romperlas, apreciando su resistencia, fractura granular o lisa, brillo, partículas rotas, desmenuzamiento, etc.

FIG. II-7

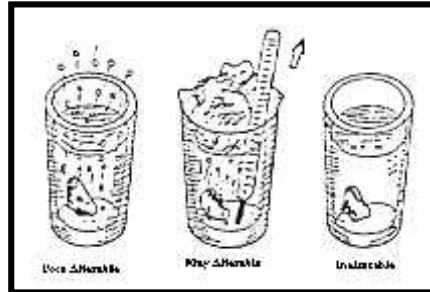


2.2.8. Apreciación de la alterabilidad de rocas

Se introduce una piedra en agua oxigenada y se observa si se desmenuza o no rápidamente, si el agua cambia de olor en un determinado tiempo o si se producen

burbujas o algún tipo de otra reacción. El ensayo debería durar uno o dos días, pero en cuatro o cinco horas se obtienen la mayoría de las conclusiones.

FIG. II-8



2.3. CLASIFICACION DE SUELOS

2.3.1. CLASIFICACION DE SUELOS POR EL TAMAÑO DE SUS PARTICULAS

Los suelos en general están constituidos por una mezcla de partículas sólidas inorgánicas, cuyos intersticios o huecos están ocupados por aire y agua en proporciones variables. Puede contener también materia orgánica, desde cantidades muy pequeñas hasta un porcentaje muy elevado, como en el caso de las turbas y otros suelos orgánicos.

La granulometría o gradación de las partículas de un suelo tiene por su tamaño una gran influencia en las propiedades del mismo. El análisis granulométrico es necesario para la identificación de un suelo y permite establecer una clasificación primaria según el tamaño de sus partículas: grava, arena, arcilla, limo, etc.

CUADRO N° II-2

AASHTO		Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Fina				Coloides								
	Bolos	Grava			Arena		Limo	Arcilla										
USCS		Gruesa	Fina	g	Media	Fina												
	Bolos	Grava				Arena	FINOS (Limos o arcillas)											
ASTM					g	Media	Fina											
	Bolos	Grava			Arena		Limo	Arcilla										
DIN 4022 BS 1377		Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina								
	Bolos	Grava			Arena		Limo	Arcilla										
		76.2	3 in	25.4	1 in	19.1	3/4 in	9.52	3/8 in	4.76	Nº 4	2.00	Nº 10	0.42	Nº 40	0.074	Nº 200	
		Tamaño de las partículas en mm.																
		Tamices ASTM																

AASHTO = American Association of state Highway and Transportation Officials

USCS = Unified Soil Classification System (Corps of engineers, U.S. Army – Bureau of Reclamation)

ASTM = American Society for Testing Materials

DIN = Deutsche Industrie – Norm

BS = British Standard

Clasificación de suelos por el tamaño de sus partículas

Fuente: **Explicaciones y Drenaje** (Carlos Kraemer, Segunda edición – Madrid 1992)

Para denominar a un suelo primeramente va el nombre de la fracción predominante, según el tamaño de las partículas gruesas, **gravas y arenas**, o las de las partículas finas, **limos y arcillas**. No existe un acuerdo total entre las diferentes entidades de normalización sobre los límites exactos de cada fracción.

Las partículas de arena son visibles sin necesidad de ayuda ocular, lo que no sucede con los limos, los cuales tienen además más cohesión en estado seco y una pequeña plasticidad en estado húmedo. Las arcillas por el pequeño tamaño de sus partículas, suelen tener ya propiedades coloidales.

Las gravas y arenas constituyen los llamados **suelos granulares** o de grano grueso, en tanto que limos y arcillas son **suelos finos** o de grano fino.

Los **suelos orgánicos** forman un grupo aparte.

2.3.2. METODOS DE ANALISIS GRANULOMETRICO

El propósito del análisis mecánico o análisis granulométrico es determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo, fijar el porcentaje de su peso total y la cantidad de granos de distintos tamaños que contiene.

El método más directo para separar un suelo en fracciones de distinto tamaño consiste en hacerlo pasar a través de un juego de tamices.

El estudio se realiza en el laboratorio mediante ensayos de **tamizado** y de **sedimentación**, los ensayos de tamizado se utilizan para obtener la granulometría de los suelos granulares o de las partículas gruesas de cualquier suelo, en tanto que con limos y arcillas han de realizarse ensayos de sedimentación.

2.3.2.1. TAMIZADO

a) Análisis sin lavado

Para los ensayos de tamizado sin lavado se emplea una serie normalizada de tamices, de abertura decreciente, a través de los cuales se hace pasar una cantidad determinada de suelo de peso en seco P .

El material retenido en cada tamiz de abertura d_i se seca y se pesa. De esta forma se pueden calcular el porcentaje en peso respecto al total que pasa por cada tamiz, que da lugar a la curva granulométrica.

$$100 \frac{(P_i)_{pasa}}{P} = 100 \frac{(P_{i-1})_{pasa} - (P_i)_{retenido}}{P} = f(d_i)$$

Empezando con un tamiz de abertura d_1 tal que todo el material pase por él.

$$(P_1)_{pasa} = P$$

La curva granulométrica así definida se representa en un gráfico llevando en abscisas el diámetro de las partículas en mm (luz de malla del tamiz) y en ordenadas el porcentaje de partículas de diámetro menor que el indicado (% que pasa del total). Para poner de manifiesto la composición de las fracciones finas, la escala de abscisas es logarítmica. Existen varias series normalizadas de tamices.

Una de las series más utilizadas en el mundo es la ASTM americana. Los tamices de la serie gruesa se designan según su luz de malla en pulgadas, en tanto que los números de la serie fina coinciden con los de malla por pulgada (así el tamiz n° 40 indica 40 mallas por pulgada cuadrada).

No suelen emplearse todos los tamices de cada serie, sino que se eligen los necesarios o los más importantes.

Cuando los ensayos se realizan únicamente a efectos de identificación y clasificación de los suelos, se utilizan solamente dos o tres tamices.

El tamiz n° 200 (0.074 mm) marca prácticamente el límite de las posibilidades de tamizado. Resulta incluso cada vez más pesada y hasta dudosa la separación real de las partículas de limo y arcilla.

b) Análisis con lavado

Este método se utiliza para el agregado fino solamente, para lo cual se sigue el procedimiento siguiente:

Del material que pasa el tamiz N° 10, se toma una muestra de 500 a 600 grs, se pone la muestra en un recipiente con agua y se deja remojar hasta que todo el material se haya desintegrado. Esto requiere de 2 a 12 horas, se vacía el contenido del recipiente sobre el tamiz N° 200 cuidadosamente y con ayuda de agua, se lava lo mejor posible la muestra, para que todos los finos pasen por el tamiz.

El material retenido en el tamiz N° 200 se pasa a un recipiente, se debe tener cuidado de pasar todo el material retenido al recipiente.

Este recipiente con el material se coloca en el horno durante 24 horas. Una vez que el material esta seco, se procede a tamizarlo, tomando los datos de los pesos retenidos.

2.3.3. CLASIFICACION A.S.T.M.

Las propiedades utilizadas por la clasificación ASTM son la granulometría para los suelos granulares (gravas y las arenas), y la plasticidad para los finos (limos y arcillas). También se utiliza el contenido de materia orgánica para la clasificación de los materiales finos.

Los suelos se clasifican con dos letras. La primera de ellas es la inicial de la palabra inglesa que designa el tipo de suelo, mientras que la segunda es un adjetivo

calificativo, referida en algunos casos a características de la curva granulométrica, en otros a la cantidad de finos y en otros a la plasticidad de éstos.

Letras utilizadas en la clasificación ASTM.			
Primera letra	Palabra	Segunda letra	Palabra
G	Grava ("Gravel")	W	Bien graduado ("Well graded")
S	Arena ("Sand")	P	Mal graduado ("Poorly graded")
M	Limo ("Mo", en sueco)	M	Limoso ("Mo", en sueco)
C	Arcilla ("Clay")	C	Arcilloso ("Clayey")
O	Orgánico ("Organic")	L	Baja plasticidad ("Low plasticity")
PT	Turba ("Peat")	H	Alta plasticidad ("High plasticity")

Fuente: **Ingeniería de Carreteras Vol. II**, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

Inicialmente se tienen suelos granulares o finos, según se distribuye el material que pasa el tamiz de $3'' = 75 \text{ mm}$; el suelo es **fino** cuando más del 50% pasa el tamiz n° 200, si no, es **granular**.

a) Los **suelos granulares** se designan con estos símbolos

Prefijos

G	Grava	El 50% o más es retenido en el tamiz n° 4
S	Arena	Sí más del 50% pasa el tamiz n° 4

Sufijos

W	Bien graduado	P	Mal graduado	Depende del C_u y C_c
M	Limoso	C	Arcilloso	Depende de W_L y el IP

Fuente: **Explicaciones y Drenaje** (Carlos Kraemer, Segunda edición – Madrid 1992)

Si menos del 5% pasa el tamiz n° 200, los sufijos son W o P, según los valores de C_u y C_c . Si más del 12% pasa el tamiz n° 200, los sufijos son M o C, dependiendo de W_L e IP . Si el porcentaje de finos está entre el 5% y el 12%, se utilizan sufijos dobles (clase intermedia).

b) Los suelos finos se designan con estos símbolos.

Prefijos

M	Limo
C	Arcilla
O	Orgánico

Sufijos

L	Baja plasticidad ($W_L < 50\%$)	En la carta de plasticidad separados por la línea B.
H	Alta plasticidad ($W_L > 50\%$)	

Fuente: **Explicaciones y Drenaje** (Carlos Kraemer, Segunda edición – Madrid 1992)

Esta clasificación está basada sólo en los límites de Atterberg para la fracción que pasa el tamiz n° 40, y se obtiene a partir de la llamada CARTA DE PLASTICIDAD así:

Sobre la línea A: “arcillas inorgánicas”.

Debajo de la línea A: “limos y arcillas orgánicas”.

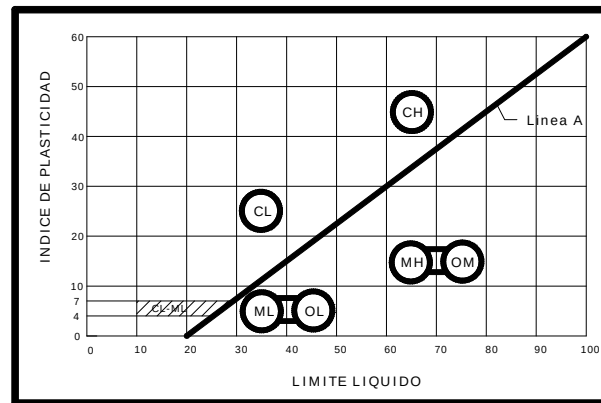
La clasificación de los finos se realiza mediante el Gráfico de Casagrande, en la que se representan el **LL** en el eje de abscisas y el **IP** en el de ordenadas, interviniendo la denominada línea A, que es una función de ambos índices.

La ecuación de la línea A es:

$$IP = 0.73 (LL - 20)$$

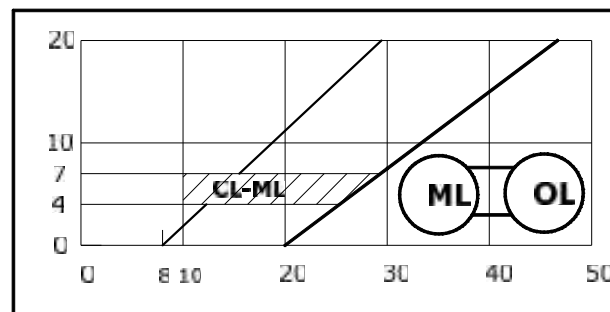
CUADRO N° II-3

Carta de plasticidad según ASTM



Fuente: Corps of Engineers, U.S. Army

La línea B: $LL = 50$ separa H (alta plasticidad) de L (baja plasticidad)



Detalle de clasificación en la zona de $LL < 30$ y el $IP < 10$

Fuente: Corps of Engineers, U.S. Army

Otra de las características en la carta de plasticidad para decir cuándo es GM, GC, SM o SC, se establece mediante los siguientes parámetros:

$\left(\begin{array}{l} \text{GM} \Rightarrow \text{Debajo de la línea A o } IP < 4 \\ \text{GC} \Rightarrow \text{Sobre la línea A o } IP > 7 \end{array} \right)$	Sobre la línea A con
	$4 < IP < 7 \Rightarrow$ Doble símbolo
$\left(\begin{array}{l} \text{SM} \Rightarrow \text{Debajo de la línea A o } IP < 4 \\ \text{SC} \Rightarrow \text{Sobre la línea A o } IP > 7 \end{array} \right)$	En la zona sombreada con
	$4 \leq IP \leq 7 \Rightarrow$ Doble símbolo

CUADRO N° II-4
Características y uso de suelos según ASTM.

Grupo	VALORACIÓN ATRIBUTOS				APTITUDES SEGÚN USOS	
GW	+++	++	+++	+++	Mantos de presas, terraplenes.	
GP	++	+++	++	+++	Mantos de presas	
GM	++	-	++	+++	Cimentaciones con flujo de agua	
GC	++	--	+	++	Núcleos de presas, revestimientos de canales	
SW	+++	++	+++	+++	Terraplenes y cimentación con poco flujo	
SP	m	++	++	++	Diques y terraplenes de suave talud	
SM	m	-	++	+	Cimentación con flujo, presas homogéneas	
SC	++	--	+	+	Revestimiento de canales, capas de pavimento	
ML	m	-	M	m	Inaceptable en pavimentos, licuable	
CL	+	--	M	m	Revestimiento de canales, pero es erodable	
OL	m	-	--	m	No recomendable, máximo si hay agua	
MH	--	-	-	---	Inaceptable en cimentaciones o bases (hinchable)	
CH	--	--	--	---	Inaceptable en cimentaciones (hinchable)	
OH	--	--	--	---	Inaceptable en cimentaciones o terraplenes	
CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES	Facilidad de tratamiento en obra	Permeabilidad	Resistencia al corte	Compresibilidad	Sobresaliente	+++
					Muy alto	++
					Alto	+
					Moderado	m
					Deficiente	-
					Bajo	--
					Muy bajo	---

Fuente: **Internet, Clasificación de Suelos, Norma ASTM**

Los limos no se diferencian de las arcillas por su tamaño de partículas, como en clasificaciones más simples, sino por su plasticidad, siendo la línea A la frontera entre ambos.

En esta clasificación, los suelos se dividen en tres grandes grupos:

- **Suelos de grano grueso**, constituidos por gravas y arenas con menos de 50% de finos que pasan por el tamiz n° 200 ASTM (0.074 mm).

Se establecen varios subgrupos en función de la granulometría del suelo y de la plasticidad de la fracción que pasa por el tamiz n° 40 (0.42 mm).

- **Suelos de grano fino**, constituidos por los suelos con 50% o más de finos. Se trata de suelos arcillosos y limosos. Sobre el gráfico de Casagrande se establecen unas zonas que corresponden a diferentes subgrupos, de forma que los suelos son finalmente clasificados en función de la relación entre

su límite líquido y su índice de plasticidad y según que contengan o no materia orgánica.

- **Suelos de estructura orgánica**, constituidos fundamentalmente por materia orgánica fibrosa, como las turbas. Estos suelos son además fácilmente identificables por su color marrón oscuro y su olor a materia en descomposición.

CUADRO N° II-5
Propiedades de los suelos clasificados según la ASTM

Clasificación		Símbolos del grupo		Valor como explanada sin acción de la helada	Sensibilidad a la helada	Compresibilidad e hinchamiento	Capacidad de drenaje	d max. P.M. (Kg/dm3)	CBR	Módulo de reacción K (MN/m3)
GRAVAS		GW		Excelente	Nula a muy Ligera	Casi nulos	Excelente	2,0 - 2,3	40 - 80	80 - 140
		GP		Bueno a excelente	Nula a muy Ligera	Casi nulos	Excelente	1,8 - 2,3	30 - 60	80 - 140
		GM	d	Bueno a excelente	Ligera a media	Muy ligeros	Aceptable a mala	2,0 - 2,4	40 - 60	80 - 140
			u	Bueno	Ligera a media	Ligeros	Mala a impermeable	1,9 - 2,2	20 - 30	50 - 140
		GC		Bueno	Ligera a media	Ligeros	Mala a impermeable	2,1 - 2,4	20 - 40	50 - 140
ARENAS		SW		Bueno	Nula a muy Ligera	Casi nulos	Excelente	1,8 - 2,1	20 - 40	50 - 100
		SP		Aceptable a bueno	Nula a muy Ligera	Casi nulos	Excelente	1,7 - 2,2	10 - 40	40 - 100
		SM	d	Aceptable a bueno	Ligera a alta	Muy ligeros	Aceptable a mala	1,9 - 2,2	15 - 40	40 - 100
			u	Aceptable	Ligera a alta	Ligeros a medios	Mala a impermeable	1,6 - 2,1	10 - 20	20 - 80
		SC		Malo a aceptable	Ligera a alta	Ligeros a medios	Mala a impermeable	1,6 - 2,2	5 - 20	20 - 80
LIMOS Y ARCILLAS	LL ≤ 50	ML		Malo a aceptable	Media a muy alta	Ligeros a medios	Aceptable a mala	1,4 - 2,1	≤ 15	20 - 50
		CL		Malo a aceptable	Media a alta	Medios	Impermeable	1,4 - 2,1	≤ 15	10 - 40
		OL		Malo	Media a alta	Medios a altos	Mala	1,4 - 1,7	≤ 5	10 - 20
	LL > 50	MH		Malo	Media a muy alta	Altos	Aceptable a mala	1,3 - 1,7	≤ 10	10 -20
		CH		Malo a aceptable	Media	Altos	Impermeable	1,4 - 1,9	≤ 15	10 - 40
		OH		Malo a muy malo	Media	Altos	Impermeable	1,3 - 1,8	≤ 5	5 - 20
SUELOS ORGÁNICOS		PT		Inaceptable	Ligera	Muy altos	Aceptable a mala			

d = $LL \leq 25$ IP ≤ 6

u = Restantes casos

Fuente: **Ingeniería de Carreteras Vol. II**, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

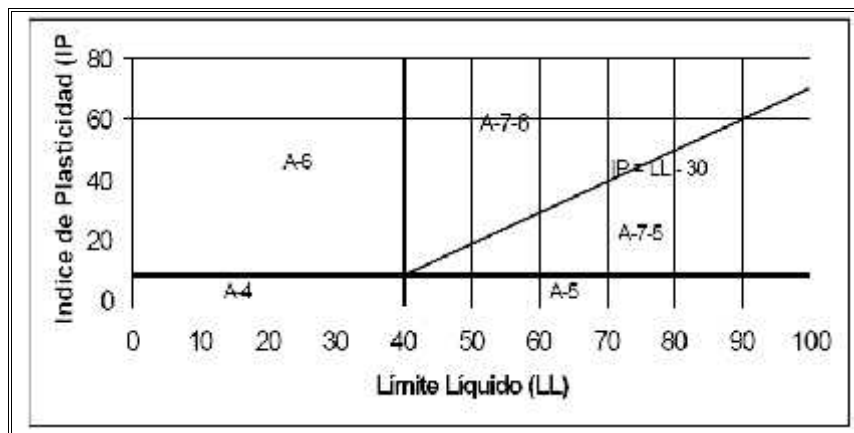
2.3.4. CLASIFICACION A.A.S.H.T.O.

La clasificación AASHTO no pretende identificar el suelo según su naturaleza (grava, arena, arcilla, limo), sino simplemente señalar qué tipos de suelos son más útiles para la construcción de infraestructuras. Así se diferencian siete grupos de suelos, designados como A-1, A-2, A-3, hasta el A-7. Para la clasificación es suficiente realizar un análisis granulométrico y los límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz nº 40.

Los grupos A-1, A-2 y A-3 corresponden a los suelos granulares, con un máximo de 35% pasando por el tamiz nº 200. Se trata de gravas, arenas y zahorras (mezclas de grava y arena) cuyo comportamiento en explanadas suele ser bueno a excelente, excepto los suelos A-2-6 y A-2-7 que por su elevada plasticidad se comportan como los suelos arcillosos, siempre que el porcentaje de finos supere un 15% - 20%. Para clasificar en la práctica a un suelo, se parte de la primera columna de la tabla hasta encontrar un grupo o subgrupo en el que encajen las características definidas por los ensayos. El grupo A-3 aparece antes que el A-2 por esta razón y no por que los suelos que lo constituyen tengan mejores propiedades.

Los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 comprenden a los suelos limo-arcillosos, con más de un 35% de material pasando por el tamiz nº 200. Para su clasificación se atiende únicamente al límite líquido y al índice de plasticidad, según las zonas definidas en el gráfico de plasticidad de la fig. (Los subgrupos del grupo A-2 se definen también por el mismo procedimiento). El comportamiento de estos suelos en explanadas puede calificarse en general de regular a malo.

CUADRO N° II-6
Carta de plasticidad según AASHTO



Fuente: **Explicaciones y Drenaje** (Carlos Kraemer, Segunda edición – Madrid 1992)

Los distintos grupos admiten suelos con porcentaje de finos y plasticidad muy diferentes, por lo que resulta conveniente una evaluación dentro de cada grupo. Para ello se utiliza el **índice de grupo** definido por la siguiente expresión:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

IG: Índice de grupo

F: Proporción de finos (Pasa por el tamiz N° 200)

LL: Límite líquido

IP: Índice de plasticidad

Este índice toma valores entre 0 y 20 (o más), correspondiendo los menores valores a los mejores suelos. La clasificación contiene algunas indicaciones basadas en el valor del índice de grupo, pero son unas precisiones de un interés práctico menor.

El índice de grupo IG, se escribe entre paréntesis a continuación de los símbolos del grupo o subgrupo a que pertenece el suelo, como por ejemplo A-7-6 (16), lo que significa que es un suelo del sub-grupo A-7-6 con índice de grupo 16.

Sobre el índice de grupo pueden hacerse las siguientes observaciones:

- En términos generales, cuando mayor es el IG de un suelo, peor son sus cualidades como explanada o capa de asiento del firme. Así, por ejemplo, los suelos que pertenecen a los grupos A-1, A-3, A-2-4 Y A-2-5 tienen un $IG = 0$ y pueden calificarse de buenos, en tanto que un índice de grupo de 20 o mayor corresponde a un suelo de muy mala calidad, en condiciones medias de drenaje y compactación.
- Los valores críticos del límite líquido y del índice de plasticidad son respectivamente de 40 y 10.

El índice de grupo anteriormente no podía ser superior a 20. Actualmente puede tomar cualquier valor positivo. Si saliera negativo se expresará como cero (0).

CUADRO N° II-7
Características de suelos según AASHTO

Grupo Suelos	Permeabilidad	Elasticidad	Cambio de volumen	Capilaridad	Base de pavimentos	Sub Bases	Terraplenes	Valoración Escala
A - 1	--	---	--	-	++	++	++	+++ Sobresaliente
A - 2	-	++	+	m	-	m	+	++ Muy alto
A - 3	+	-	--	-	+	+	+	+ Alto
A - 4	-	+	+ -	+++	-	-	+ -	m Moderado
A - 5	-	m	++	+++	---	-	--	- Deficiente
A - 6	---	-	++	++	--	--	-	-- Bajo
A - 7	--	m	++	++	--	--	--	--- Muy bajo

Fuente: Internet, Clasificación de Suelos, Norma AASHTO

CUADRO N° II-8
SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO

Clasificación	Materiales granulares						Materiales limoso arcilloso				
general	(35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						(más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
Grupo:	A-1		A-3					A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx				- - 36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 41 mín (2)	
Índice de plasticidad	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	11 mín	11 mín	
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Fuente: **Ingeniería de Carreteras Vol. II**, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

2.4. COMPACTACION DE SUELOS: MEDIDA DE LA HUMEDAD Y DE LA DENSIDAD

2.4.1. INTRODUCCIÓN

En los caminos municipales, las explanadas formadas por cortes y terraplenes, deben tener estabilidad volumétrica, resistencia mecánica e inalterabilidad frente a agentes externos para que el camino presente al usuario unas condiciones de rodadura satisfactorias, cómodas y seguras. Hay que tener en cuenta que los suelos de aportación, los materiales granulares y las diferentes mezclas de áridos con ligantes o conglomerantes utilizados en la explanada, han de resistir no solo a una consolidación bajo su peso propio, sino también a la acción repetida de las cargas del tráfico. En general, y a pesar de las medidas de drenaje, habrá que contar también con eventuales aumentos de la humedad de estos materiales durante las épocas de lluvia, lo que implica una disminución de su resistencia a la deformación y la posibilidad de cambios de volumen en determinados suelos.

2.4.1.1. DEFINICIÓN

La compactación es un tratamiento eficaz y económico de reforzamiento de los suelos y otros materiales para que resistan las solicitaciones indicadas con deformaciones admisibles. Los materiales se extienden en tongadas o capas de espesor uniforme y se compactan o densifican mediante varias pasadas de máquinas pesadas llamadas compactadores.

Es necesario distinguir claramente entre **consolidación** y **compactación**.

La **consolidación** es un proceso lento (del orden de meses o de años), debido normalmente a la acción del peso propio y de las sobrecargas, en que la densificación tiene lugar por la expulsión de aire y eventualmente de agua de los poros. En cambio en la **compactación** la densificación se obtiene rápidamente, por lo que no puede tener lugar una pérdida de humedad, sino sólo una disminución de los huecos de aire del suelo y un acercamiento de sus partículas provocado por la energía de compactación.

2.4.2. OBJETIVOS

Para que el camino ofrezca al usuario unas condiciones de rodadura adecuadas, todas las obras de la infraestructura deben ser construidas de forma que se alcance su estabilidad volumétrica y una suficiente resistencia frente a las acciones. Estas acciones son:

- El peso propio de los rellenos, que tiende a consolidarse.
- Las cargas de tráfico.
- El agua filtrada que, a través de la variación de la humedad a lo largo del tiempo, puede causar variaciones de resistencia y de volumen.
- Otro agentes climáticos (tales como una eventual inundación o la congelación del terreno que se puede producir en climas muy fríos)

Para lograr la estabilidad volumétrica pueden aplicarse diversos tratamientos, pero el que se adopta de forma generalizada, por su reducido costo y su efectividad, es la compactación. Constituye un tratamiento eficaz y económico de mejora de los suelos y de otros materiales para que resistan las solicitaciones indicadas en las especificaciones técnicas para este tipo de caminos.

El objetivo de la compactación es que los materiales que forman la infraestructura no experimenten asientos irregulares por efecto de las acciones mencionadas. La compactación exige la aplicación de una energía mecánica a cada unidad de volumen del material. Para poder comunicar esta energía, los materiales se extienden en tongadas o capas de espesor uniforme y se compactan mediante varias pasadas de máquinas compactadoras.

La aplicación de un proceso de compactación debe resolver los problemas tecnológicos que aparecen en cada una de sus tres fases, que son las siguientes:

- Selección de los materiales más adecuados, atendiendo a sus propiedades resistentes una vez compactados. Estimación de su compactabilidad y establecimiento de unos criterios cuantitativos para decidir si la compactación ha sido suficiente.
- Selección de la maquinaria más adecuada para su compactación, teniendo en cuenta su rendimiento con dichos materiales y factores económicos tales como su costo, disponibilidad, maniobrabilidad, versatilidad, etc. Fijación del proceso de compactación y en particular, el espesor de las tongadas o capas, el número necesario de pasadas y la humedad óptima de compactación.
- Control de la compactación o rechazo de la obra ejecutada.

2.4.3. ESTRUCTURA DE UN SUELO

2.4.3.1. Componentes de un suelo

Los suelos en general están constituidos por partículas sólidas, entre las que quedan huecos o poros rellenos de aire y de agua. En el caso general son pues sistemas de tres fases: sólida líquida y gaseosa. En condiciones límite de suelos totalmente secos

o saturados de agua, las fases se reducen a dos, pero no es frecuente encontrar en la naturaleza suelos en este estado, ni suelen ser en general utilizables en explanaciones de carreteras.

Diversos procesos, tales como los de humedecimiento, desecación, consolidación o compactación de un suelo, modifican el volumen relativo ocupado por cada fase. Al mismo tiempo varían también muchas de sus características, tales como su resistencia a la deformación, su permeabilidad, su capacidad de hinchamiento o retracción, etc.

2.4.3.2. El diagrama densidad-humedad

El diagrama de las fases de un suelo es útil para aclarar las definiciones que siguen y para establecer las relaciones más importantes entre ellas. Esquemáticamente, las fases del suelo se han representado separadas y con alturas proporcionales al volumen relativo que ocupan.

Durante el proceso de compactación las partículas del suelo se mueven y reorientan con una disposición cada vez más compacta, más densa. **la densidad seca** del suelo constituye por ello un buen índice para evaluar la eficacia del proceso seguido, pero, teniendo en cuenta el diferente comportamiento de los distintos suelos, suele utilizarse un índice relativo llamado **grado de compactación** o porcentaje alcanzado respecto a una densidad patrón, obtenida con cada suelo en un ensayo normalizado de compactación.

La obtención de una densidad seca adecuada es un medio de comprobación de la compactación, cuya finalidad es la de dotar al suelo de capacidad resistente, indeformabilidad e inalterabilidad.

En suelos granulares basta con la obtención de una alta densidad seca para lograr resistencia e indeformabilidad, pero en suelos con finos es imprescindible la comprobación de la densidad y la humedad, que deben estar comprendidas entre límites adecuados establecidos en las solicitudes. En caso de suelos con áridos o finos evolutivos se requiere además limitar la porosidad para evitar alteraciones con el tiempo.

2.4.4. FACTORES QUE AFECTAN AL PROCESO DE COMPACTACION

La densidad seca alcanzada depende fundamentalmente de la humedad del suelo durante la compactación, del tipo y energía de compactación y del tipo de suelo (granulometría, plasticidad, forma de las partículas, composición mineralógica).

Otros factores son: el espesor de la capa compactada, el número de pasadas por el compactador, las condiciones atmosféricas, el tipo de las capas subyacentes y la compacidad de éstas.

2.4.4.1. Humedad de compactación

Si se toman varias muestras de un cierto suelo, se les añaden diferentes cantidades de agua, y se procede a continuación a compactar cada una de las muestras siguiendo un método normalizado de compactación como el ensayo Proctor, se podrá comprobar que la densidad seca alcanzada depende en cada caso de la humedad de compactación. Al aumentar la humedad, la resistencia del suelo disminuye, el agua tiene un efecto lubricante, que facilita el deslizamiento y giro de las partículas entre sí y su agrupamiento en estructuras más compactas. El resultado es una densidad seca más elevada.

Para una cierta humedad óptima se alcanza en general, para cada tipo de suelo y de compactación, una densidad seca máxima.

Con humedades crecientes superiores a la óptima, se observa un decrecimiento de la densidad seca; la disminución de huecos de aire es ya insignificante y la curva humedad-densidad seca es casi paralela a la curva de saturación del suelo. Ello se debe a que el agua ocupa una parte importante de los huecos entre partículas y a que una parte del esfuerzo de compactación se traduce en un aumento de las presiones intersticiales por lo que las tensiones intergranulares o efectivas son realmente menores.

2.4.4.2. Energía de compactación

Para proceder a la compactación, se transmite al material una energía determinada. El efecto de la energía varía según el mecanismo de transmisión (tipo de compactación) y la magnitud de la energía comunicada. Cada tipo de compactación dará lugar en general a una diferente relación humedad-densidad seca para cada clase de suelo. Este hecho implica la existencia de compactadores basados en distintos principios de funcionamiento y su diferente eficacia según el suelo de que se trate. Así por ejemplo un suelo granular alcanza mayores densidades secas con una compactación de tipo vibratorio, en tanto que un suelo fino cohesivo se compacta mejor mediante compresión parcial con amasado, como la que realizan los rodillos de patas de cabra o de neumáticos. En el caso de suelos arcillosos, el método de compactación puede afectar a la estructura del suelo y por tanto a sus propiedades.

En cualquier caso sin embargo, un aumento de la energía de compactación por unidad de volumen conduce a un incremento de la densidad seca máxima y a una disminución de la correspondiente humedad óptima de compactación.

La eficacia es sin embargo mayor con humedades bajas y llega a ser prácticamente nula cuando el suelo está muy húmedo.

Este hecho tiene una aplicación directa en obra. Para un espesor dado de la tongada y con un suelo que tiene una humedad excesiva, prácticamente no puede conseguirse un aumento de la densidad seca incrementando el número de pasadas de los compactadores, que equivale al número de golpes del ensayo anterior. Por otra parte se comprende que cuanto mayor sea la energía suministrada por el compactador, menor será la humedad óptima que deberá tener para conseguir la máxima densidad seca.

Es importante destacar también que los máximos de las curvas de compactación suelen alinearse sobre una curva casi paralela a la de saturación, con un porcentaje de huecos de aire pequeño que varía para cada tipo de suelo.

2.4.4.3. Tipo de suelo

El comportamiento de un suelo sometido a compactación depende del tipo de suelo (granular o cohesivo), las curvas de compactación, y en particular la densidad seca máxima y la humedad óptima, dependen del tipo de suelo.

Los mayores valores de las densidades secas máximas, asociados a humedades óptimas bajas, corresponden a los suelos granulares bien graduados con pocos finos, de naturaleza poco plástica. Estos suelos tienen curvas picudas; lo que indica su sensibilidad a la humedad de compactación. Una pequeña cantidad de finos que pasen por el tamiz nº 200 (ASTM) permite alcanzar mayores densidades, pero a partir de un cierto porcentaje los valores bajan.

Los suelos arcillosos muy plásticos, las arenas uniformes, ciertos suelos limosos y los suelos finos orgánicos; son suelos todos ellos difíciles de compactar.

CUADRO N° II-9

Clasificación AASHTO	Ensayo Proctor	
	Densidad seca máxima (kg/dm ³)	Humedad óptima (%)
A - 1	1.85 - 2.25	7' - 15
A - 2	1.75 - 2.15	9' - 18
A - 3	1.75 - 1.85	9' - 15
A - 4	1.50 - 2.10	10' - 20
A - 5	1.35 - 1.60	20 - 35
A - 6	1.50 - 1.90	10' - 30
A - 7 - 5	1.35 - 1.60	20' - 35
A - 7 - 6	1.45 - 1.85	15 - 30

(Características generales de compactación de los distintos tipos de suelos)

Fuente: **Ingeniería de Carreteras Vol. II**, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

2.4.5. EL ENSAYO DE APISONADO PROCTOR EN LABORATORIO

Hasta hace no mucho tiempo atrás, los terraplenes no se compactaban o sólo se hacía de forma rudimentaria, admitiéndose como inevitable su asentamiento. El ingeniero R. R. Proctor inició en 1929 una serie de estudios sobre la compactación de suelos y su aplicación a la construcción de presas de tierra en California. Sus trabajos, publicados en 1933, pusieron en evidencia la relación humedad-densidad seca y también la influencia de la energía de compactación. A él se debe la propuesta de un ensayo normalizado de laboratorio, en el que se alcanzan unas densidades secas máximas y unas humedades óptimas del mismo orden de las obtenidas en obra con maquinaria normal. Este ensayo, llamado Proctor normal o simplemente ensayo Proctor, es utilizado con pequeñas variaciones de detalle en todo el mundo.

El aumento de las cargas por rueda de los vehículos aconsejó posteriormente la utilización de maquinaria pesada de compactación y la aplicación del ensayo al control de la compactación de materiales granulares elaborados. El Corps of Engineers de la U.S. Army propuso un ensayo Proctor modificado en el que se aplica una mayor energía de compactación por unidad de volumen, obteniéndose así unas densidades secas máximas más elevadas y unas humedades óptimas menores que el ensayo normal.

2.4.5.1. Proctor normal

En el ensayo Proctor normal se utiliza un molde metálico de 1000 cm^3 de capacidad de collar y base rígida. El molde, con el collar colocado, se llena en tres tongadas y se apisona dando 25 golpes uniformemente distribuidos por capa, con una masa de 2.5 kg y una altura de caída libre de 305 mm. La compactación puede ser manual o mecánica. Una vez compacta la última capa se quita el collar y se enrasa perfectamente el molde.

Un detalle muy importante es que, debido al tamaño del molde, el suelo ensayado no debe contener partículas demasiado grandes. Para conseguir una buena compactación, no influida por unas pocas partículas grandes, se ensaya la parte del suelo que pasa por el tamiz de 20 mm. La densidad máxima Proctor es una densidad de referencia con la que habrá que comparar las densidades que se obtengan in situ, por lo que el valor obtenido en laboratorio debe ser representativo. Por ello cuando el tamiz de 20 mm retiene mas de un 30 % del suelo o existen gravas, bolos o fragmentos de roca en mayor cantidad que los elementos de menor tamaño (menores de 5 mm), la densidad Proctor no constituye un buen elemento de comparación y debe sustituirse por otros ensayos que midan directamente la capacidad resistente y la deformabilidad del suelo (ensayos de carga con placa, deflectómetros, etc.)

Cada ensayo comprende la compactación de varias porciones del suelo con diferentes humedades. De cada molde se obtiene la densidad húmeda y la humedad del suelo, con lo que puede dibujarse un punto de la curva humedad-densidad seca. Son suficientes en general cuatro o cinco operaciones para trazar la curva y determinar la densidad máxima Proctor y la humedad óptima correspondiente.

El suelo se seca normalmente al aire, después de la compactación se obtiene la densidad húmeda y la humedad del suelo, con lo que puede dibujarse un punto de la curva humedad-densidad seca. A continuación se procede a desagregar el suelo, a aumentar su humedad y a compactar de nuevo. Este proceso se repite hasta que el suelo esté ya muy húmedo, pudiéndose así ya trazar la curva y determinar la densidad máxima Proctor y la humedad óptima correspondiente. Cuando el suelo contiene partículas que se desmenuzan fácilmente o bien una arcilla muy plástica, conviene utilizar muestras nuevas para cada humedad. Las curvas Proctor obtenidas con muestras reutilizadas tienen máximos de la densidad algo superior a las que se obtendrían con muestras nuevas.

El ensayo puede realizarse también con el molde de 2320 cm³ del ensayo Proctor modificado. Para mantener la misma energía por unidad de volumen se dará en este caso 56 golpes con la masa de 2.5 kg.

CUADRO N° II-10

Comparación de los resultados obtenidos con los ensayos Proctor normal y modificado

Tipo de suelo	Densidad seca máxima (Kg/dm ³)		Diferencia (Kg/dm ³)	Humedad óptima (%)		Diferencia (%)
	Normal	Modificado		Normal	Modificado	
Arcilla muy plástica	1.55	1.87	+ 0.32	28	18	-10
Arcilla limosa	1.66	1.94	+ 0.28	21	12	-9
Arcilla arenosa	1.84	2.05	+ 0.21	14	11	-3
Arena	1.94	2.08	+ 0.14	11	9	-2
Gravas y arenas bien graduadas	2.06	2.19	+ 0.13	9	8	-1

Fuente: **TRL** (Transport Research Laboratory) Británico

2.4.5.2. Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado se realiza con un procedimiento muy similar al Proctor normal, pero con un molde más grande y una energía de compactación mayor por unidad de volumen. El molde empleado tiene una capacidad de 2320 cm^3 (152.5 mm de diámetro interior y 127 mm de altura); puede también emplearse el molde utilizado para el ensayo CBR, con un disco espaciador en su fondo, se llena el molde en cinco tongadas, con 56 golpes por tongada de una maza de 4.54 kg y 457 mm de altura de caída. La energía de compactación por unidad de volumen es en este ensayo es 4.5 veces la del ensayo normal.

No hay que perder de vista, que la densidad Proctor es una densidad de referencia, con la que habrá que comparar las densidades que se obtengan in situ, y como tal parámetro de referencia debe ser representativo. Por ello cuando abundan en el suelo las partículas gruesas (mayores de 20 mm) o existen gravas, bolos o fragmentos de roca en mayor cantidad que los elementos de pequeño tamaño (menores de 5 mm), la densidad Proctor no constituye un buen elemento de comparación y debe sustituirse por otros ensayos que midan directamente la capacidad resistente y la deformabilidad del suelo.

2.4.6. MEDIDA DE LA HUMEDAD

El método más preciso para determinar la humedad de un suelo es por secado hasta peso constante en un horno regulado a $105^\circ - 110^\circ \text{ C}$.

Por diferencia entre los pesos inicial y final de la muestra se obtiene el contenido de agua, que se expresa como porcentaje del peso de suelo seco. El tiempo necesario de

secado puede llegar hasta las 24 horas y depende de la cantidad y naturaleza del suelo. Un suelo granular se deseca antes que un suelo cohesivo. Por otra parte algunos suelos pueden requerir temperaturas más bajas de secado (oxidación de materia orgánica presente, pérdida de agua combinada en suelos yesosos).

En obra es frecuente emplear también otros métodos más rápidos cuya precisión, en general menor, está relacionada con el tipo de suelo y el procedimiento operativo. Para acelerar el secado del suelo puede seguirse el método del alcohol, que se vierte sobre el suelo, procediéndose seguidamente a su mezcla e ignición. Las operaciones se repiten hasta conseguir la evaporación de toda el agua contenida en el suelo. Conviene evitar que el suelo se caliente excesivamente y no debe emplearse con suelos que contengan una cantidad importante de arcilla, yeso o materia orgánica.

2.4.7. MEDIDA DE LA DENSIDAD IN SITU

Existen diferentes métodos para obtener la densidad in situ. La mayoría de ellos consisten en excavar un hoyo más o menos cilíndrico en el suelo y determinar la masa del material extraído y el volumen que ocupaba. Todos ellos son aplicables tanto a suelos naturales como a suelos compactados.

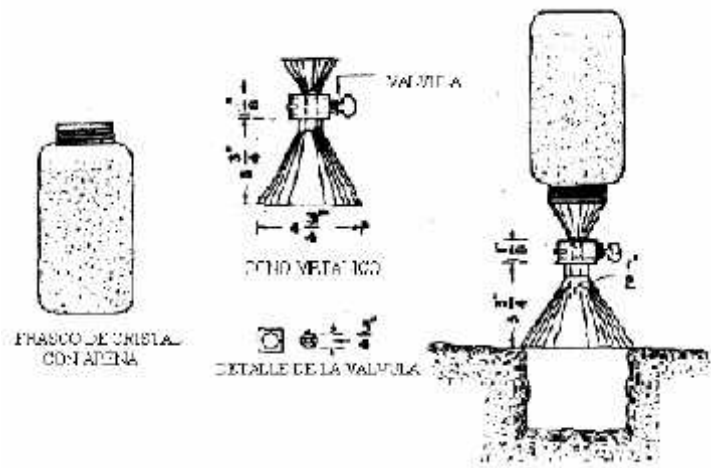
2.4.7.1. Descripción del ensayo

El método de la arena utiliza arena natural, muy uniforme y seca, cuya densidad aparente se conoce por calibrado previo. Con ella se llena un recipiente hasta una válvula de cierre.

Una vez excavado el hoyo con las precauciones necesarias para recoger todo el material excavado, se centra sobre él el recipiente en posición invertida y se abre la válvula. La arena ocupará por gravedad el volumen del hoyo y un embudo de transición. Pesando el recipiente antes y después del ensayo, se puede estimar el volumen del hoyo y el del embudo, que se conoce.

El hoyo puede tener 10 – 12 cm de diámetro y 12 - 18 cm de profundidad. Cuando se trate de zahorras o de suelos con un porcentaje apreciable de partículas gruesas será necesario practicar un hoyo más grande.

FIG. II-9



CAPITULO III

ANALISIS DE PROBLEMAS GEOTECNICOS

3.1. ESTUDIOS Y RECONOCIMIENTOS GEOLOGICOS Y GEOTECNICOS

3.1.1. OBJETIVOS

Los diferentes estudios geológicos y geotécnicos dentro los caminos municipales tienen como un fin, el de reconocer los materiales existentes en la traza de la carretera, además de brindar toda la información del entorno natural (topografía, suelo, vegetación, etc.), correspondiente para la planificación de los trabajos a realizar.

Si se expresan los objetivos por cada tipo de obra, los trabajos deben permitir analizar con precisión las siguientes cuestiones:

Cortes:

- Excavabilidad de los materiales.
- Uso de los materiales excavados y su eventual tratamiento.
- Estabilidad del desmonte e inclinación del talud.
- Calidad de la explanada en los fondos de desmonte.
- Presencia de nivel freático.

Rellenos:

- Asiento previsible en el terraplén
- Estabilidad del relleno e inclinación del talud.
- Formación y capacidad de soporte de la explanada y cimiento del firme.

Estructuras:

- Tipo de cimentación (directa o profunda).
- Asientos esperables.

Canteras y préstamos:

- Calidad de los materiales existentes.
- Cantidad de material que es posible extraer a un precio razonable.
- Distancia media, máxima y mínima en la traza.

3.1.2. METODOLOGIA

Los estudios geológicos y geotécnicos siguen normalmente una secuencia ordenada y abarcan desde el estudio más o menos preciso de los terrenos atravesados por las trazas posibles o definitivas hasta los estudios específicos en zonas localizadas, tales como cimentaciones de obras de fábrica, taludes de gran altura, terraplenes sobre suelos compresibles, etc. Por tanto pueden distinguirse los siguientes estudios:

3.1.2.1. Estudios previos o informativos

Los estudios previos o informativos de terrenos tienen por objeto recoger la información básica sobre los suelos, yacimientos granulares y rocas que posiblemente puedan ser utilizados en la construcción de la explanada del camino.

El estudio se realiza, en el campo, en general, por cuadrantes, cubriendo la zona de interés, tanto para las posibles alternativas de trazado como para la búsqueda de canteras y yacimientos granulares próximos a la traza. En algunos casos, las carreteras discurren muy cerca de otras infraestructuras o construcciones, donde pueden existir estudios anteriores realizados en la zona del terreno.

El empleo de esta información acorta los plazos y reduce la necesidad de reconocimientos, por lo que es aconsejable realizar un esfuerzo inicial dedicado a recopilarla. El estudio previo debe comprender los siguientes aspectos:

Geología de la zona

- Morfología (topografía, movimientos del terreno, taludes naturales, vegetación, capa vegetal, etc.).
- Estratigrafía y litología (buzamientos, mineralogía, alteraciones, etc.).
- Tectónica (sinclinales, anticlinales, diaclasamiento, intrusiones, etc.)
- Hidrología y drenaje (ríos, arroyos, capas freáticas, manantiales, etc.)

Características geotécnicas generales

- Clasificación cualitativa de suelos, materiales granulares y rocas
- Evaluación del terreno como cimiento de explanadas y de obras de fábrica.
- Problemas geotécnicos de la zona (de drenaje, estabilidad de taludes y movimientos del terreno, capacidad de soporte).

3.1.2.2. Estudio de materiales: préstamos, yacimientos granulares y canteras

Estos estudios están dirigidos a obtener ciertos datos básicos (morfología, estratigrafía, litología, hidrología y drenaje, etc.) a partir de información existente, la cual es muy importante al momento de planificar el proyecto de construcción de los caminos municipales.

La información se la obtiene en:

- Fotoplanos obtenidos a partir de fotografías aéreas, en que se delimiten e identifiquen aproximadamente los diferentes tipos de terrenos y se recojan datos generales sobre tectónica, condiciones de drenaje, deslizamientos observados, canteras de explotación, etc.

Con los datos que se pueda obtener a partir de esta información, se realizará un análisis indicando una descripción de los aspectos relacionados con la geología y geotecnia de la zona.

Este análisis debe comprender:

- Descripción y características de los grupos litológicos.
- Excavabilidad de terrenos o ripabilidad de rocas.
- Descripción y cortes de canteras y yacimientos granulares, con estimación de volúmenes.

Una vez que se haya realizado el análisis de la información previa existente, se procederá a establecer las conclusiones sobre los diferentes aspectos estudiados, del análisis se extraerá una idea de los materiales que se encuentran en la traza, es aconsejable hacer un recorrido previo a la traza, que luego debe detallarse en el campo.

3.1.3. RECONOCIMIENTO GEOLOGICO Y GEOTECNICO

Una vez recopilada toda la información previa existente, ésta debe analizarse para obtener los datos relevantes para el estudio de que se trate. Del análisis se extraerá una idea de los materiales que se encontrarán en la traza.

Es aconsejable realizar un recorrido previo de la traza del camino, que luego debe detallarse en campo.

También conviene examinar el estado y comportamiento de algunas obras existentes, tales como caminos y canales, así como investigar todos los cortes que haya en el terreno de la zona como zanjas, pozos, trincheras, excavaciones, etc.

3.1.3.1. Fotogeología

La fotogeología o interpretación geológica de fotografías aéreas es el primer reconocimiento que se realiza tras una primera visita de campo. Su examen estereoscópico por un especialista permite extraer datos acerca de la geomorfología, el relieve, diferenciar los tipos de terrenos y rocas y, en muchos casos identificarlos, así como apreciar la red natural de desagüe de las aguas superficiales, cultivos existentes, el aprovechamiento de las superficies, etc.

Estos datos serán útiles no solo para la elaboración de los estudios de geología y geotecnia, sino también para otras partes del proyecto, tales como los estudios de hidrología y de expropiaciones. Con ello se obtiene una visión de conjunto muy útil y se limitan los trabajos geológicos de campo a las prospecciones necesarias de comprobación y de análisis de puntos dudosos que se hayan observado.

3.1.3.2. Inventarios

Los inventarios de campo o reconocimiento de campo (relación detallada de aspectos relevantes identificables visualmente), son una fuente de información valiosa por ser a la vez detallada y objetiva, que completa y rectifica, si es necesario, las conclusiones alcanzadas.

Entre los principales aspectos que se inventarían están los taludes y las laderas existentes, los puntos de agua (con indicación del caudal y de la época del año en que se realiza el inventario), los vertederos o puntos con rellenos situados en la traza y en sus proximidades y las obras de drenaje existentes en el entorno.

3.1.3.3. Calicatas

Las calicatas son unas excavaciones que se realizan a lo largo de la traza del camino, cuyo objetivo es reconocer los primeros horizontes del terreno.

Dadas las características del equipo que se emplea, no suelen alcanzar más de 3 a 4 m de profundidad. Esta profundidad ha de ser menor en caso de encontrar roca de calidad media o dura.

Las dimensiones habituales de una calicata son de dos metros de longitud por uno de ancho y de tres a cuatro metros de profundidad. El número de éstas en el caso de caminos municipales sólo será el necesario, es decir no se necesita un estudio a detalle.

En las calicatas se toman muestras de todos los horizontes representativos, en su ejecución deben extremarse los cuidados para evitar contaminaciones de unos horizontes con otros. Dichas muestras son alteradas en cuanto se refiere a resistencia y humedad. Debe recogerse uno o varios sacos, con un peso de 20 a 30 kg por saco, para poder realizar los ensayos de identificación y comportamiento completos, incluyendo los ensayos proctor y CBR.

3.1.3.4. Ensayos de penetración

Un ensayo de penetración es un reconocimiento de campo que consiste en la hincada de una punta metálica de diámetro normalizado en el terreno. En esta operación se registran los golpes que es preciso dar para avanzar cada tramo de 20 cm. estos

golpeos son el resultado del reconocimiento. Lógicamente, el reconocimiento termina si se encuentra un material en el que no es posible avanzar con un rendimiento mínimo. En este momento se dice que hay **rechazo**. Es aconsejable definir en la petición de reconocimientos lo que debe considerarse rechazo en el reconocimiento de campo.

La desventaja más señalada de los ensayos de penetración es que no se averigua la naturaleza del suelo, sino únicamente su resistencia a la penetración. La interpretación de los resultados es distinta según la naturaleza de los suelos, por lo que es precisa reconocerla por otros medios.

3.1.4. ENSAYOS

Una vez que ya se tengan las muestras obtenidas por los reconocimientos, es necesario proceder a realizar los diversos ensayos, que pueden clasificarse en **ensayos de identificación** y **ensayos de evaluación del comportamiento**.

Los **ensayos de identificación** son fundamentalmente los de análisis granulométrico y límites de Atterberg para utilizar las clasificaciones AASHTO y ASTM. También tiene interés la determinación de la humedad natural (problemas de compactación, estabilidad de taludes, etc.).

Los **ensayos de caracterización del comportamiento** son los de compactación, como el proctor (normal o modificado) y los de capacidad de soporte del material compactado (como el CBR).

Para determinar si los materiales son utilizables en terraplenes y en suma para el proyecto de las explanaciones de los caminos municipales, será necesario realizar ensayos de compactación y de capacidad de soporte de los suelos afectados. Suelen ser ensayos proctor (normales o modificados), y ensayos C.B.R.

3.1.5. ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS Y DE DRENAJE

De la lluvia que cae sobre la superficie de la tierra, una parte escurre inmediatamente, reuniéndose en corrientes de agua, otra parte se evapora y el resto se infiltra en el terreno.

Los aspectos hidrológicos que se deben destacar en un estudio de drenajes son la precipitación y el escurrimiento de las aguas por encima y por debajo de la superficie terrestre.

Cuando el agua de escurrimiento o de infiltración afecta a la zona por donde está la traza del camino, ésta puede ocasionar serios problemas si no se dispone de los elementos necesarios para reducirla o desviarla. Numerosos factores deben hacerse intervenir en el estudio de los drenajes, cualquiera sea el tipo de camino o carretera, entre los que se pueden mencionar la topografía, la hidrología y la geología de la zona. Debido a peculiaridades en las características de los factores en estos estudios, los métodos de diseño y los coeficientes que se utilizan en las fórmulas pueden variar mucho de un sitio a otro.

El conocimiento del régimen de las aguas superficiales y subterráneas es fundamental para resolver la mayoría de los problemas geotécnicos que se presentan en el proyecto y construcción de un camino municipal, por su marcada influencia en las propiedades

de los suelos afectados, tales como la resistencia al esfuerzo cortante y capacidad de soporte, cambios de volumen, manejabilidad, etc. Su estudio es básico para el proyecto de las explanaciones, taludes, y sobre todo, para fijar las medidas necesarias de desagüe superficial y drenaje subterráneo.

El análisis fotogeológico permite fijar inicialmente la red natural de desagüe y, con un reconocimiento de campo, la delimitación de las zonas con problemas hidrológicos. La observación de la vegetación existente es muy útil, pues está relacionada con el tipo de suelo y su humedad. En zonas áridas se obtiene también una buena indicación de la salinidad del suelo.

Para el dimensionamiento de las obras de desagüe superficial es necesario determinar los caudales máximos previsibles durante un periodo de retorno prefijado, de duración igual al tiempo de concentración en la cuenca considerada. Se utilizan, en lo posible, los datos meteorológicos disponibles que se completan con aforos y observaciones de causas existentes.

Para la disposición correcta del drenaje subterráneo se requiere conocer la procedencia y curso de las aguas subterráneas, las formaciones del terreno y la sección transversal de la carretera.

Se recomienda que el diámetro de las alcantarillas para caminos municipales sean mayores a 1 metro (>1 m).

3.1.6. FUENTES DE LOS MATERIALES

Las fuentes de materiales están constituidas por las canteras y yacimientos granulares, de donde se extraen los materiales a utilizar en la capa de rodadura del camino, o para mejorar la subrazante en caso de que el suelo tenga características malas para su conformación, y los préstamos necesarios para la formación de terraplenes, cuando el volumen de materiales es insuficiente.

La prospección general de estos yacimientos se inicia ya con los estudios previos de terrenos. En esta primera fase sólo se trata de su localización, encuadre litológico y geotécnico, y una estimación del recubrimiento y volumen explotable, así como de la calidad del material y de las condiciones de explotación.

Posteriormente, y una vez seleccionados los yacimientos, se procede a los sondeos, estudios geológicos y ensayos geotécnicos necesarios para juzgar su idoneidad o calidad de los materiales. Aparte de estudiar la uniformidad del yacimiento, dibujar croquis de posibles accesos, cortes, etc. Han de realizarse ensayos de evaluación con muestras representativas del material.

La procedencia de los materiales tienen que estar claramente especificada en el proyecto, indicando cantidades, calidades, métodos de explotación y distancias de transporte para evitar posteriores indefiniciones de precios y sobre todo modificaciones en los plazos y calidades de los materiales.

3.2. PROBLEMAS GEOTECNICOS

3.2.1. INTRODUCCION

Toda construcción de un camino municipal comprende dos partes fundamentales: la **infraestructura** y la **capa de rodadura**.

La infraestructura engloba todos los trabajos u obras necesarias para conseguir una explanada definitiva o una superficie de apoyo adecuada para la capa de rodadura. Incluye por tanto, las explanaciones (cortes y rellenos), muros, drenajes y otras obras accesorias.

La capa de rodadura está compuesta por material granular, que se coloca a lo largo y ancho de la calzada, en zonas donde se requiera su uso, este material debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas.

Una buena ejecución en la construcción de estos dos aspectos fundamentales de un camino como lo es la infraestructura y la capa de rodadura, brindará al usuario seguridad y comodidad al momento de transitar por el mismo.

3.2.2. PARTES DE LOS CAMINOS CON PROBLEMAS GEOTECNICOS

3.2.2.1. TERRAPLENES

Consiste en la extensión y compactación de suelos procedentes de las excavaciones o préstamos en zonas de extensión tal que permita la utilización de maquinaria pesada,

con el objetivo de crear una plataforma que reúna las condiciones especificadas en el proyecto.

Su ejecución comprende las operaciones siguientes:

- Preparación de la superficie de apoyo del relleno tipo terraplén.
- Extensión de una tongada.
- Humectación o desecación de una tongada.
- Compactación de una tongada.

FIG. III-1



Las tres últimas operaciones se reiterarán cuantas veces sea necesario.

Por consideraciones económicas se forman con suelos apropiados procedentes de la excavación de desmontes del mismo camino, de préstamos situados en las proximidades. A veces sin embargo, los suelos disponibles tienen una plasticidad y una humedad naturales elevadas o bien tienen características evolutivas. En estos casos se requiere de un estudio especial para establecer un sistema adecuado de excavación, extendido y compactación, intercalación de capas de refuerzo, empleo de geotextiles, drenajes especiales, estabilizaciones.

En todo caso, se utilizarán materiales que permitan cumplir las condiciones básicas siguientes:

- Puesta en obra en condiciones aceptables.
- Estabilidad satisfactoria de la obra.
- Deformaciones tolerables, para las condiciones de servicio que se definan en el proyecto.

Bajo la acción de su propio peso, las cargas del tráfico y las condiciones climáticas, el material de los terraplenes tiende a consolidarse, dando lugar a un asiento de los mismos. La tolerancia de estos asientos debe ser sólo de algunos centímetros. Caso contrario los terraplenes sufrirían deformaciones grandes con el consiguiente deterioro de la capa de rodadura del camino y su intransitabilidad por el mismo.

Por ello es necesaria la compactación enérgica y sistemática de los terraplenes, que se realiza por capas de espesor relativamente uniforme. Se reducen así los huecos del suelo y aumenta la resistencia a la deformación, especialmente en condiciones adversas de humedad. Los suelos compactados deben ser suficientemente estables en las condiciones a que van a estar sometidos, y además no deben ser difíciles de compactar.

Por otra parte si el terreno natural de cimentación está constituido por suelos susceptibles de una consolidación importante bajo el peso del terraplén (arcillas blandas, turba), pueden producirse también asientos considerables. En este caso deberá estudiarse la eventual eliminación y sustitución de la capa blanda, la posibilidad de acelerar el proceso de consolidación para que tenga lugar en su mayor parte durante el periodo de construcción mediante drenajes y estabilizaciones

profundas o bien la aplicación de otros métodos que aseguren la estabilidad de la obra, como uso de geotextiles, geomembranas u otros métodos especiales.

En zonas de capa freática somera, el terraplén supone un alejamiento de las cargas del tráfico y por tanto una reducción de las tensiones que se provocan en los suelos parcialmente saturados. En este sentido los terraplenes suelen tener menos problemas de drenaje que los desmontes. Pero no hay que olvidar que constituyen en cierto modo unas presas de intercepción de aguas de escorrentía que es necesario encauzar y desaguar, evitando su acción sobre el pie del terraplén. A veces pueden ser también necesarios drenes profundos o pantallas subterráneas drenantes para proteger el terraplén o su cimiento de corriente subterráneas.

CUADRO N° III-1

Tamaño característico de la partícula del material (cm)	Denominación del relleno
0 a 10	Terraplén
10 a 60	Pedraplén

Fuente: **Ingeniería de Carreteras Vol. II**, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

3.2.2.2. CORTES

Consiste en el conjunto de operaciones para excavar y nivelar las zonas donde ha de asentarse el camino. Estas obras de excavación tienen como objetivo establecer el nivel o cota subrazante sobre la que se apoyará la capa de rodadura del camino municipal.

FIG. III-2



Es necesario un reconocimiento geotécnico para estimar las características y espesores de las capas de suelos y rocas afectados por la excavación así como las condiciones hidrológicas de la zona.

Las condiciones pueden ser muy variables a lo largo de la traza, y así los taludes pueden tener inclinaciones muy grandes en determinados tipos de rocas inalteradas, o ser relativamente suaves con suelos cohesivos. Como en el caso de los terraplenes y por los mismos motivos, suele darse a los taludes de desmontes de altura pequeña o media una inclinación inferior a la crítica por razones de estabilidad. Aún así pueden producirse corrimientos relacionados con corrientes subterráneas que fluyen hacia los taludes.

La naturaleza de los materiales encontrados (rocas, suelos) determina por otra parte el procedimiento de excavación y su costo, así como su posible utilización en la formación de terraplenes. Los materiales extraídos de los desmontes, deben analizarse en laboratorio para su utilización en la formación de terraplenes. Es preciso clasificar estos materiales según sus características y estimar el volumen de materiales aprovechables, completando los volúmenes restantes con materiales de préstamo.

3.2.3. PROBLEMAS GEOTECNICOS EN TERRAPLENES Y CORTES

Antes de tratar de las propiedades de los suelos y de las rocas que más interesan al proyecto y a la construcción de caminos municipales, conviene examinar las características técnicas que deben presentar las explanaciones y algunos problemas geotécnicos típicos a resolver.

En principio, los terraplenes y cortes o desmontes deben proyectarse y construirse de forma que cumplan tres condiciones fundamentales a lo largo de la vida útil de la obra: **estabilidad volumétrica, resistencia mecánica e inalterabilidad frente a agentes externos.**

Una ejecución buena de las explanaciones debe prever los posibles problemas geotécnicos, de forma que se evite su aparición o, al menos, que tengan un tratamiento preventivo adecuado en tiempo y recursos.

Los principales problemas geotécnicos de las explanaciones pueden clasificarse en:

- Los producidos por las características del terreno natural.
- Los derivados de una construcción defectuosa o inadecuada.
- Los provocados por la acción del agua sobre la infraestructura o sobre sus inmediaciones.

Si el terreno natural de cimentación está constituido por suelos susceptibles de una consolidación importante bajo el peso del terraplén (arcillas blandas, turba), pueden producirse asientos considerables.

Cabe distinguir los asientos del terreno que constituye el cimiento de los rellenos o de las estructuras. Debido a una construcción defectuosa o inadecuada, pueden producirse asientos excesivos o irregulares en los rellenos, asientos diferenciales entre los rellenos y las estructuras y deslizamientos en los desmontes y rellenos.

También el efecto del agua puede producir erosiones y socavaciones, ya sea en la propia obra o en sus inmediaciones, el aterramiento de drenajes superficiales o subterráneos y el arrastre de finos (con los consecuentes hundimientos súbitos por reducciones de volumen) en algunos suelos.

En cualquier caso, todos los materiales empleados en las explanaciones tienen una cierta heterogeneidad. Los suelos y las presentan variaciones de un lote a otro. Por ello se debe tener un especial cuidado en el análisis de los materiales para que posteriormente a la construcción de las explanaciones, no se tenga problemas de asentamientos y deformaciones de las obras de tierra.

El comportamiento de una explanada está muy ligado a las características de los suelos, por otro lado, las explanaciones deben distribuir las cargas de tráfico a fin de que no se produzcan deformaciones permanentes, que se reflejarían inevitablemente en la superficie de rodadura.

Los taludes deben ser estables, sin que se produzcan deslizamientos o una erosión excesiva, para lo cual deberán estudiarse las pendientes más adecuadas a cada tipo de suelo y protegerlos con plantaciones, bermas, mallas u otros métodos.

La producción de asientos diferidos importantes en terraplenes está asociada a:

- Contenido de arcilla importante (consolidación secundaria)
- Suelos colapsables
- Pedraplenes contruidos con materiales evolutivos (lutitas)

En estos casos, los asientos en los terraplenes son aumentados por la acción de agentes externos (meteorización, ciclos de humectación). La complejidad de las propiedades mecánicas de los suelos y la heterogeneidad derivada de su estratificación hacen que el asentamiento de obras de tierra en los caminos municipales muchas veces sea inevitable.

Si un relleno se coloca en estado suelto, o no es drenado en forma adecuada sus propiedades cambian con cada estación, y durante el curso de cada año pasa por estados de saturación parcial o total, alternados con estados de drenaje o desecación parcial, todos estos procesos causan cambios cíclicos en el valor del empuje.

La consolidación de las zonas arcillosas, como bien se sabe, las arcillas cuando tienen cierta humedad, éstas son susceptibles de cambios de forma y de volumen, esta característica de las arcillas llega en su momento a ser un problema, cuando se trata de construir las explanaciones.

Cuando en la traza de la carretera se encuentra zonas de turbas o arcillas blandas, pues en estos casos el terraplén sufre de un asentamiento bastante grande, lo que origina una serie de fallas o deformaciones del camino.

Los deslizamientos en taludes naturales pueden originarse como consecuencia de distintas perturbaciones externas, como ser la socavación del pie de un talud existente o la ejecución de una excavación con paredes no apuntaladas, pero a veces ocurre también sin provocación externa alguna en laderas que han permanecido estables durante muchos años.

Las roturas en este tipo de taludes se originan como consecuencia de un aumento temporario en la presión del agua de los poros. Si bien los deslizamientos pueden ocurrir como consecuencia de fenómenos diversos, casi todos presentan características generales similares, pues la rotura va precedida de la formación de grietas en la región superior del talud o más allá de su cresta.

A su vez las arcillas que contienen capas o bolsones de arena acuífera pueden reaccionar a una alteración de su equilibrio, provocándose un deslizamiento, los depósitos con esta clase de propiedades constituyen los que se denominan terrenos difíciles. Se debe tratar dentro de lo posible evitar que los desmontes atraviesen terrenos difíciles.

En síntesis los problemas geotécnicos con los que se encuentra en la construcción de las explanaciones son diversos, en los que se puede nombrar a los siguientes:

- Zonas pantanosas y zonas de inundación
- Zonas de turbas o de arcillas muy compresibles
- Zonas de nivel freático muy superficial
- Zonas de rocas alteradas
- Desprendimiento de rocas

- Zonas inundables
- Zonas de suelos solubles o agresivos, como los yesíferos o salinos
- Caminos en la proximidad de ríos y arroyos
- Zonas de gran penetración de las heladas
- Laderas inestables (conformadas por materiales susceptibles a deslizarse)

CAPITULO IV

PROCESO CONSTRUCTIVO EN EXPLANACIONES, APLICADOS A CAMINOS MUNICIPALES

4.1. CARACTERISTICAS DE LOS CAMINOS MUNICIPALES

4.1.1. Generalidades.

Los caminos municipales tienen características diferentes dependiendo de la región en donde se localizan. En general, se ubican en una topografía ondulada o accidentada, en algunos casos en terrenos planos, suelos arenosos, con gravas o hasta muy pedregosos la temperatura es variable durante el año.

En la traza de este tipo de caminos se encuentra diferentes tipos de rocas, materiales aluviales y coluviales con suelos finos, la vegetación es escasa, la temperatura variable y la temporada de lluvias estacional durante el año es bastante intensa.

4.1.2. Características principales

Estos caminos no pavimentados son normalmente contruidos de terracería, con los cuales se propone comunicar a muchas comunidades y zonas aisladas de nuestro departamento. También se espera que sean transitables en todo tiempo, aunque sus especificaciones sean muy modestas. Se pretende construir caminos de bajo costo para lograr mayor distribución de los recursos presupuestarios, es por ello que un aspecto muy importante del trabajo a realizar es el de mantener los caminos en estado

de transitabilidad continuo, para que de esta manera puedan comunicarse y así disminuir las distancias del recorrido.

Estos caminos municipales o vecinales caen en la categoría IV del Servicio Nacional de Caminos, estos corresponden a la mínima categoría de la clasificación en las que se encuentran todos aquellos caminos que presentarían en su habilitación tránsito (TMDA) menores de 200 vehículos.

4.1.3. Características Geométricas

Las características técnicas geométricas que se pueden presentar en un camino municipal son muy diversas, lo que demandaría un conjunto específico de patrones para cada uno, es por eso que para el diseño de caminos municipales se toma en cuenta los parámetros de diseño según la Norma para el Diseño Geométrico de Carreteras del Servicio Nacional de Caminos, el cual clasifica los caminos en diferentes categorías, como el camino es no pavimentado cae en la Categoría IV la que corresponde a la mínima categoría de la clasificación, las cuales se construyen para satisfacer vinculaciones donde el tráfico aun no se ha desarrollado lo suficiente y estos se construyen de terracería o de tierra estabilizada.

El diseño geométrico implica la correlación de los elementos físicos de la carretera tales como los alineamientos, pendientes, distancias de visibilidad, peralte, ancho de carril, condiciones de seguridad, etc.

4.1.3.1. Alineamiento Horizontal

El alineamiento horizontal deberá permitir la circulación ininterrumpida de los vehículos, tratando de conservar la misma velocidad directriz en la mayor longitud de carretera que sea posible.

El alineamiento caminero se hará tan directo como sea conveniente adecuándose a las condiciones del relieve y minimizando dentro de lo razonable el número de cambios de dirección, el trazado en planta de un tramo carretero está compuesto de la adecuada sucesión de rectas (tangentes), curvas circulares y curvas de transición.

En general, el relieve del terreno es el elemento de control del radio de las curvas horizontales y el de la velocidad directriz. La velocidad directriz, a su vez controla la distancia de visibilidad.

Los radios mínimos, calculados bajo el criterio de seguridad ante el deslizamiento transversal del vehículo están dados en función a la velocidad directriz, a la fricción transversal y al peralte máximo aceptable.

En el alineamiento horizontal desarrollado para una velocidad directriz determinada, debe evitarse el empleo de curvas con radio mínimo. En general se deberá tratar de usar curvas de radio amplio, reservándose el empleo de radios mínimos para las condiciones más críticas.

Se restringirá en lo posible el empleo de tangentes excesivamente largas, con el fin de evitar el encandilamiento nocturno prolongado.

Al término de tangentes largas, donde es muy probable que las velocidades de aproximación de los vehículos sea mayor que la velocidad directriz, las curvas horizontales tendrán radios de curvatura razonablemente amplios.

Deberá evitarse pasar bruscamente de una zona de curvas de grandes radios a otra de radios marcadamente menores. Deberá pasarse en forma gradual, intercalando entre una zona y otra, curvas de radio de valor decreciente, antes de alcanzar el radio mínimo.

4.1.3.2. Velocidad de diseño

La selección de la velocidad de diseño será una consecuencia de un análisis técnico de las alternativas de trazado y que deberán tener muy cuenta la topografía del terreno. En topografía plana o llana, el trazado puede aceptar velocidades altas; pero en terrenos muy accidentados será muy costoso mantener una velocidad alta de diseño, porque habría que realizar obras muy costosas para mantener un trazo seguro. Lo que solo podría justificarse si los volúmenes de la demanda de tránsito fueran muy altos.

La velocidad de diseño está igualmente relacionada con el ancho de los carriles de circulación y por ende, con la sección transversal por adoptarse, es también la que establecerá las exigencias de distancias de visibilidad en la circulación y consecuentemente de la seguridad de los usuarios del camino a lo largo del trazado.

CUADRO N° IV-1

CATEGORIA DEL CAMINO	TOPOGRAFIA	VELOCIDAD DE DISEÑO O DIRECTRIZ (Km/h)
IV - B	Llana	60
	Ondulada	40
	Montañosa	30
	Muy Montañosa	20

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

TOPOGRAFIA	VELOCIDAD DE DISEÑO O DIRECTRIZ (Km/h)
Plano y lomerío	50
Montañoso	40
Escarpado	30

Fuente: Dirección General de Caminos Rurales, México

4.1.3.3. Peralte

Se define al peralte al cambio de nivel que sufre la calzada de la carretera con respecto al eje o con respecto a los carriles interno o externo transversalmente, que permitirá equilibrar a una fuerza denominada fuerza centrífuga que se origina en el movimiento de una trayectoria circular de una carretera cuyo efecto es el deslizamiento o el vuelco del vehículo.

También se denomina sobreelevación al peralte, y según la Dirección General de Caminos Rurales, México, en las curvas horizontales se recomienda que la sobreelevación tenga como máximo el 10%.

Los valores máximos para el peralte se indican en el siguiente cuadro.

CUADRO N° IV-2

Peralte Máximo – e máx. (%)

CATEGORIA DEL CAMINO	TOPOGRAFIA	PERALTE MAXIMO emax%	
		deseable	absoluto
IV - B	Llana	8	10
	Ondulada	10	10
	Montañosa	10	10
	Muy Montañosa	10	10

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

4.1.3.4. Radios de Curvatura mínimos

Uno de los factores más importantes de diseño es la determinación de los radios de curvatura permisibles para el enlace de las tangentes o rectas. Este radio de curvatura debe establecerse en función de la correlación con el resto de los factores de diseño y con el análisis económico que este representa.

CUADRO N° IV-3

Radios mínimos de curvas circulares horizontales

Peralte máx.	Radios de Curvatura Mínimos (m)			
	Velocidad (km/h)			
	30	40	50	60
6%	30	55	90	135
8%	25	50	80	125
10%	25	45	75	115

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

La Dirección General de Caminos Rurales, México, recomienda que los grados de curvatura máximos, según la topografía, sean los siguientes:

TOPOGRAFIA	VELOCIDAD DE DISEÑO O DIRECTRIZ (Km/h)	GRADO DE CURVATURA MAXIMO
Plano y lomerío	50	17°
Montañoso	40	30°
Escarpado	30	62°

Fuente: Dirección General de Caminos Rurales, México

4.1.3.5. Pendientes máximas

Uno de los factores que intervienen directamente en el diseño de caminos es la pendiente longitudinal cuya definición de su valor para cada proyecto depende necesariamente de las consideraciones técnicas y operativas, que correspondan la categoría de la carretera que se va a diseñar. Conociendo que la pendiente influirá directamente en el costo de construcción y en la capacidad de la circulación se hace necesario encontrar un equilibrio de tal manera que los costos de construcción no sean elevados, no se aumente en forma abundante el costo de operación, y que la pendiente no sea un factor de reducción de la capacidad, atendiendo a las consideraciones generales anteriores en el cuadro se presenta rangos de pendientes máximas.

CUADRO N° IV-4
Pendientes máximas en función
de las categorías de diseño

CATEGORIA DEL CAMINO	CALZADA Y CARRILES	TOPOGRAFIA	VELOCIDAD DE DISEÑO O DIRECTRIZ (Km/hora)	PENDIENTE MAX. EN RECTAS (1000 m.s.n.m.)	
				% deseable	% admisible
IV - B	Calzada simple Dos carriles	Llana	60	7	8
		Ondulada	40	8	9
		Montañosa	30	9	10
		Muy Montañosa	20	10	10

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

TOPOGRAFIA	VELOCIDAD DE DISEÑO O DIRECTRIZ (Km/h)	PENDIENTE GOBERNADORA %	PENDIENTE MAXIMA %
Plano y lomerío	50	4	6
Montañoso	40	5	8
Escarpado	30	8	12

Fuente: Dirección General de Caminos Rurales, México

Se hacer notar que la pendiente de 12%, no se utiliza en distancias mayores a 60 m, y su empleo deberá restringirse en el diseño de los caminos municipales.

4.1.3.6. Calzada

Se define como calzada a la superficie de la vía sobre la que transitan los vehículos, puede estar compuesta por una calzada simple o por dos carriles de circulación.

En el cuadro se indica los valores apropiados del ancho de la calzada para tramos rectos o de acuerdo a su topografía, para cada velocidad directriz en relación al tráfico previsto

El ancho de corona, según la Dirección General de Caminos Rurales, México, y el PDCR II recomiendan que el ancho de corona sea de 4 m.

CUADRO N° IV-5
Ancho de Carriles de Circulación y Anchos de Bermas

CATEGORIA DEL CAMINO	VOLUMEN TRAFICO DIA (T.P.D.)	CALZADA Y CARRILES	TOPOGRAFIA	VELOCIDAD DE DISEÑO O DIRECTRIZ (Km/hora)	ANCHO DE CARRIL (m)	ANCHO DE BERMA (m)
IV - B	<200		Llana	60	3.35 - 3.00	3.00 – 0. 50
		Calzada Simple	Ondulada	40	3,00	3.00 – 0. 50
		Dos carriles	Montañosa	30	2,75	3.00 – 0. 50
			Muy Montañosa	20	2,75	3.00 – 0. 50

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

4.1.3.7. Pendiente Transversal

En los tramos en recta la sección transversal de la calzada presentará pendientes transversales (bombeo) desde el centro hacia cada uno de los bordes, para facilitar el drenaje superficial y evitar el empozamiento del agua.

La pendiente transversal es aquella que permite desalojar en un corto tiempo, el agua que cae sobre la corona del camino.

CUADRO N° IV-6
Pendiente transversal de la Calzada (%)

TIPO DE CALZADA	PENDIENTE TRANSVERSAL	
	ZONA HUMEDA	ZONA SECA
Calzadas no pavimentadas	4 - 3,0	3,5 - 3,0

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

TIPO DE CALZADA	PENDIENTE TRANSVERSAL
Calzadas no pavimentadas	3 - 5

Fuente: Dirección General de Caminos Rurales, México

4.1.4. Características Estructurales

Los caminos no pavimentados departamentales tienen características diferentes dependiendo de la región en donde se localizan. En general, se ubican en una topografía ondulada o accidentada, solo algunos casos en terreno plano.

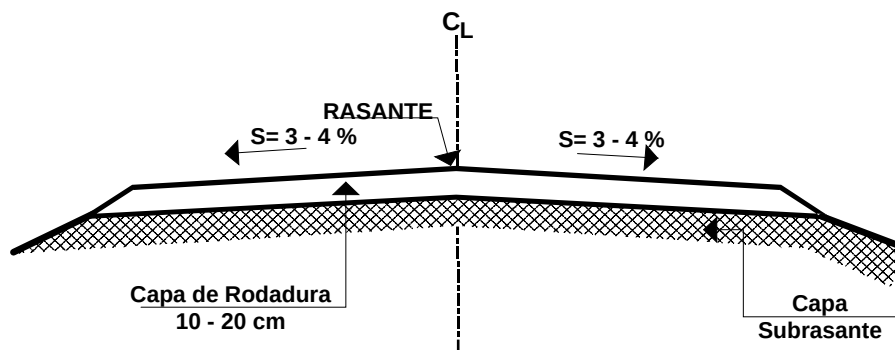
Una vía no pavimentada es un camino con una capa de rodadura conformada por una estructura de agregados pétreos o material granular. En general, los materiales de afirmado o simplemente “afirmados”, pueden ser de dos tipos, según las características del material pétreo:

- i)** Caminos cuya capa de rodadura está constituida por agregados pétreos naturales provenientes de canteras o de excedentes de excavaciones (gravas, cantos rodados, etc.) y donde los materiales que la componen se ajustan a determinadas especificaciones técnicas en relación con su tamaño, su composición granulométrica, su resistencia y su calidad de finos.

- ii)** Caminos cuya capa de rodadura está constituida por agregados pétreos naturales provenientes de canteras previamente conocidas o de excedentes de excavaciones (gravas, cantos rodados, etc.) y donde los materiales que la componen se ajustan a determinadas especificaciones sólo en relación con su tamaño.

En general, el espesor de la capa de afirmado varía entre 10 centímetros y 20 centímetros.

FIG. IV-1



Fuente: PDCR II (Programa de Desarrollo de Caminos Rurales)

4.1.4.1. Capa Subrasante

Es la capa de terreno de un camino, que resulta del movimiento de obras de tierra a lo largo de la traza del camino, que soporta la estructura de firme y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

Las características de estos suelos como son la granulometría, sensibilidad al agua, son algunos de los factores que determinan el alcance de las mejoras a realizar.

La capa subrasante para el camino municipal en estudio deberá tener como mínimo aceptable, los siguientes parámetros:

- Grado de compactación del 90% respecto de la máxima Proctor en laboratorio.
- CBR entre 3 – 9 %.

4.1.4.2. Capa de rodadura

El tipo de capa de rodadura puede ser granular o estabilizada, la capa de rodadura granular esta constituida por materiales como la piedra triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural.

Como elemento de referencia solamente, se presenta el cuadro, que correlaciona el espesor recomendado para el revestimiento, en función del porcentaje de vehículos pesados que transitan en determinado camino rural.

CUADRO N° IV-7

Espesores mínimos sugeridos para capas de revestimiento

Volumen Estimado de Vehículos Pesados (TPD)	Condición de Soporte del Sub - Lecho (CBR)	Espesor Mínimo Sugerido (cm)
0 a 5	Bajo	16,5
	Mediano	14,0
	Alto	11,5
5 a 10	Bajo	21,5
	Mediano	18,0
	Alto	14,0
10 a 25	Bajo	29,0
	Mediano	23,0
	Alto	18,0
25 a 50	Bajo	37,0
	Mediano	29,0
	Alto	21,5

Observaciones: Soporte Bajo: CBR $\leq$ 3 %, Soporte Mediano: 3 < CBR $\leq$ 10 %, Soporte Alto: CBR > 10 %

Fuente: South Dakota Local Transportation Agency

En los caminos municipales no pavimentados o rurales que se construyen en la ciudad de Tarija o en las diferentes localidades, el material a usarse en la conformación de la capa de rodadura es de ripio compactado que consiste en una mezcla bien graduada de agregados naturales con granos duros y durables o de

fragmentos de agregados granulares mezclados con arena fina, arcilla, polvo de piedra u otro material similar de liga o relleno, producido por fuentes probadas que produzcan una mezcla uniforme que cumpla con los requisitos de las especificaciones técnicas, en cuanto debe mantener una nivelación constante del suelo y que tenga la propiedad de compactarse en una capa de ripio estable y densa. El material deberá estar libre de productos vegetales, lodo o excesiva cantidad de arcilla u otras sustancias extrañas perjudiciales.

La resistencia de las partículas gruesas para que el revestimiento sea capaz de resistir la abrasión se requiere que las partículas gruesas sean duras, se deben preferir los materiales que tengan una pérdida en la prueba de Los Ángeles de no más de 50 %.

El material sin cribar puede usarse siempre que llene los requisitos especificados, el material de yacimiento o de una cantera cercana, deberá cumplir con los siguientes requerimientos de la granulometría:

CUADRO N° IV-8

N° DE TAMIZ		% QUE PASA EN PESO
N°	3"	100.00
N°	2"	95.00
N°	4	30-70
N°	200	5-20

Fuente: Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (S.N.C.)

Este material deberá tener un CBR $\geq 30\%$ y un coeficiente de esponjamiento menor al 2%, en probetas sumergidas en agua durante 4 horas según ensayo AASHTO T-180.

4.1.5. Recomendaciones de Diseño: Por el (PDCR II).

- Los caminos vecinales serán diseñados **para una sola** vía
- Deberá proveerse facilidades adecuadas para cruces de vehículos que dependerán de la distancia de visibilidad.

CUADRO N° IV-9

ITEM	REFERENCIA	LIMITES
1	Cargas	AASHTO HS 20
2	Ancho mínimo de la plataforma	3 a 4 m. (anchos mayores deben estar debidamente justificados)
3	Curvas Horizontales (radio Mínimo)	12 m
4	Bombeo de calzada o lomo de pez	> 3% y <5%
5	pendiente Longitudinal	< 10% hasta 12% en long. < 200 m
6	Capa de rodadura	<= 15 cm.

Pendientes típicas de terraplenes

CUADRO N° IV-10

Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (USC)	Talud sin Agua <u>Subterránea</u> H : V	Talud con Agua <u>Subterránea</u> H : V
Roca Madre Dura y angular	1.5: 1	1.5: 1
Grava de Buena graduación (GW)	1.5: 1	1.8: 1
Gravas uniformes(GP) Arenas de Buena graduación (SW)	1.5: 1	2: 1
Grava limosa (GM); Gravas arcillosas (GC); Arenas uniformes (SP)	1.8: 1	3: 1
Arenas limosas (SM), Arenas arcillosas(SC)	1.75: 1 ó más plano	3: 1
Limos, arenas muy finas (ML); Arcilla de baja plasticidad (CL)	2: 1 ó más plan	4: 1

Parámetros referenciales para el diseño de Alcantarillas:

CUADRO N° IV-11

ITEM	REFERENCIA	LIMITES
1	Desnivel mínimo para la tubería	> 2 % y < 15 %
2	Tipos de drenajes	Alcantarillas de sección similar a un diámetro de >1000 mm
3	Aluviones con recurrencia probable, sin carga estática a la entrada	10 años
4	Aluviones con recurrencia probable, utilizando la carga disponible a la entrada.	50 años

Parámetros referenciales para cortes en suelos (cortes hasta 10 – 15 m de altura).

CUADRO N° IV-12

DESCRIPCIÓN USC	Nivel de Agua Freática Bajo (debajo de la excavación) H : V	Nivel de Agua Freática Alta (Filtración o Áreas Inestables) H : V
Grava arenosa (GW, GP)	1 ½ : 1	3 : 1
Arena, granos angulares bien graduados (SW)	1 ½ : 1	3 : 1
Grava limosa (GM); arena uniforme (SP)	2 : 1	4 : 1
Arena limosa (SM); Arena arcillosa (SC)	1 : 1	3 : 1
Arcilla con I.P. bajo (CL), a 3 m de altura	¾ : 1	3 : 1
Limo arcillo arenoso (ML), A 15 m de altura	1 : 1	4 : 1

Parámetros referenciales para el diseño de puentes vehiculares

CUADRO N° IV-13

ITEM	REFERENCIA	LIMITES
1	Vehículo de Diseño	AASHTO HS - 20
2	Ancho de calzada	4 m
3	Vías	Una sola vía
4	Periodo de retorno para el cálculo hidráulico (puentes con un tramo mayor a 20 m)	50 a 100 años

Especificaciones técnicas de diseño (recomendadas por el PDCR II)

Para caminos rurales las especificaciones técnicas de diseño que se recomiendan son las siguientes:

CUADRO N° IV-14

ITEM	REFERENCIA	LIMITES
1	Ancho de rodadura	3 a 4 m
2	Sobre ancho (switch)	3 m. cada 300 ó 500 m. ubicados en puntos visibles
3	Velocidad promedia	18 - 30 Km./h
4	Pendiente longitudinal máxima	≤ 15 %, mayor del 15 % con carrileras
5	Bombeo mínimo	2 a 6 %
6	Peralte en curva	10 % máximo
7	Cortes máximos	7 m
8	Relleno máximo	5 m
9	Derecho de vía	6 a 8 m.
10	Diámetro mínimo alcantarillas	30" pulgadas
11	Distancia máxima de separación alcantarillas	250 m.

4.2. CONSTRUCCION DE EXPLANACIONES: OPERACIONES PREVIAS

4.2. 1. INTRODUCCION

La construcción de las explanaciones constituye la fase previa (y a veces crítica) sobre la que se apoyará la capa de rodadura de los caminos municipales. Las variaciones en las explanaciones dependen tanto de las características y propiedades físico-mecánicas que puedan presentar los suelos a lo largo de la traza, y de la adaptación del equipo que se pueda tener y el plan de obra elegido.

Es por estas razones que antes de empezar con la ejecución de cualquier tipo de obra de tierra en la construcción del camino, es necesario un estudio geológico-técnico previo, adecuado a las condiciones específicas requeridas en la obra. Sobre los estudios realizados es preciso definir una estrategia o plan de trabajo que permita afrontar las diferentes tareas u obras que darán inicio a la construcción de las explanaciones.

4.2.2. OPERACIONES PREVIAS A LAS EXPLANACIONES

El objetivo de las operaciones previas está encaminado a despejar de obstáculos toda la parte a lo largo de la traza del camino. Dado el gran rendimiento de los modernos equipos de movimiento de tierras con los que se cuenta en la actualidad, estos trabajos pueden optimizarse, de tal manera que se minimice el plazo de ejecución de los trabajos de movimiento de tierras.

4.2.2.1. DESMONTE

El desmonte consiste en eliminar la vegetación existente de la zona que ocupará el camino.

Se realiza en una faja que abarca hasta un metro (1 m) fuera de los cerros de los cortes y terraplenes. Comprende la ejecución de una o varias de las operaciones que siguen:

4.2.2.1.1. Tala: Corte de árboles y arbustos

Este trabajo consiste en la eliminación física de los obstáculos que interfieren con la actuación de los equipos de explanaciones.

Cuando se corten árboles de cierto tamaño se promueve que los vecinos del lugar retiren y aprovechen esa madera, si legalmente les pertenece. Cuando se requiera se recabará el permiso de las autoridades forestales de acuerdo a las disposiciones vigentes.

Muy especialmente se cuida que no queden árboles en los cerros de los cortes, para evitar futuros derrumbes propiciados por el humedecimiento del terreno.

4.2.2.1.2. Desbroce

El desbroce trata de la retirada del resto de la cobertura vegetal no eliminada durante la tala: árboles pequeños, arbustos, hierba, cultivos, maleza, etc.

Este material no tiene aprovechamiento directo, especialmente los arbolitos y arbustos, y debe separarse de los suelos reutilizables; pero sí puede y debe utilizarse como tierra vegetal para protección de taludes, lo cual tiene la ventaja de que las especies conservadas en la tierra vegetal son autóctonas y prenderán más fácilmente, pero si las necesidades de protección de taludes no son determinantes o están ya suficientemente cubiertas, puede suprimirse el desbroce bajo los terraplenes altos (más de 5 metros), si el espesor de la capa vegetal no hace temer asientos en el terraplén una vez finalizada la fase de construcción.

Esta medida puede ser beneficiosa, ya que la capa vegetal puede constituir un buen asiento para la primera tongada del terraplén, y facilitar el acceso a la maquinaria en zonas de nivel freático somero. En el caso de capas vegetales de gran espesor y terraplenes altos puede reforzarse la superficie de la capa vegetal con geomallas.

4.2.2.1.3. Desenraíce

Extracción de troncos y tocones

Arbolado por encima de un diámetro (troncos del orden de 10 cm de diámetro). Si el árbol se encuentra dentro de la futura plataforma y sus raíces están a menos de 50 cm de la futura explanada, no sólo debe eliminarse el vuelo, sino también el tocón; en los demás casos basta con cortar el árbol a ras del terreno. El hueco dejado por el tocón debe rellenarse con suelos adecuados y compactados por tongadas.

En lo posible debe tratarse de conservar la mayor cantidad de especies vegetales que no afecten a la funcionalidad del camino, para no afectar el equilibrio natural de la zona.

La pista de acceso por el eje interesa en terreno accidentado y/o boscoso, precisamente para facilitar las operaciones de despeje y la construcción de las obras de desagüe superficial, y su razante coincide aproximadamente con la del camino terminado. Es innecesaria en obras de ensanche o refuerzo de caminos existentes, ya que éstos cumplen dicha función.

Una vez despejados un cierto número de desmontes, es conveniente iniciar cuanto antes la pista de acceso a la coronación de su talud, con lo que se estará estableciendo una calicata que proporcionará información sobre la naturaleza y estado del terreno.

Estas pistas de acceso van evolucionando al ir progresando las explanaciones, y su influencia sobre la velocidad y rendimiento de los transportes de materiales (entre estos los suelos reutilizados) es muy grande, los caminos de obra deben permitir que la maquinaria pesada trabaje sin dificultades.

El mantenimiento adecuado de acceso es muy importante para los rendimientos de la maquinaria, sobre todo en las zonas de desmontes altos en roca, donde el acceso de volquetas y palas cargadoras debe ser fácil y seguro. Otro aspecto muy necesario a tener en cuenta son los caminos de acceso entre zonas de préstamos, carreteras y graveras, y la propia obra, sobre todo si la distancia es grande (mayor a 1 km).

4.2.2.3. Drenaje y desagüe

La protección de las explanaciones en todo momento contra los daños que pueden producir las precipitaciones atmosféricas debe ser la preocupación primordial de los encargados de la construcción.

Los sistemas de drenaje superficial y drenaje subterráneo, se deben establecer desde un primer momento, de manera que las explanaciones se beneficien con estos trabajos.

Los dispositivos de desagüe superficial (colectores, obras de desagüe) y sobre todo el drenaje subterráneo son muy sensibles a las colmataciones que en la fase de construcción se ven facilitadas por la remoción del terreno que favorece los arrastres. Estos elementos pueden también ser vulnerables por el paso de la maquinaria de obra, generalmente muy pesada. Por estas razones hay que buscar una salida a las aguas retenidas, de manera que no afecte las obras de tierra que se están ejecutando.

4.2.3. CONDICIONANTES EXTERNOS

No todas las obras de explanación son iguales, aún el terreno tenga igualdad. Existen factores exteriores a éste que pueden llegar a condicionar el desarrollo de los trabajos.

Un condicionante externo de gran importancia es el tiempo atmosférico. En épocas de lluvia, los trabajos de explanación se paralizan, no sólo durante la lluvia, sino también en el periodo inmediatamente posterior a ella, la mayoría de los suelos, especialmente los limosos y arcillosos, se reblandecen de forma que pueden dificultar el paso de la maquinaria y al ser su humedad superior a la óptima no pueden ponerse en obra para formar terraplenes. Después de una precipitación debe procederse a un oreo del terreno, facilitado por su escarificado con gradas de discos y aún más por la presencia de viento. Si una tongada que ha sido escarificada y vuelve a llover, ésta queda inutilizada y la inmediatamente inferior. Otro método de desecación, más caro pero que a veces compensa con tal de no paralizar un equipo de maquinaria, es la estabilización con cemento o con cal en suelos con arcillas o limos, estos productos absorben gran cantidad de agua.

4.2.4. ARRANQUE, CARGA Y TRANSPORTE

Los diferentes métodos de excavación que se tiene en la construcción de los caminos municipales, son los siguientes:

- Excavación en roca con explosivos
- Excavación en roca mediante escarificado
- Excavación en terrenos mixtos mediante escarificación
- Excavación en tierras

Dentro de estas categorías el precio se suele diferenciar según que la excavación sea en desmontes, zonas de préstamos, zanjas o cimientos.

Por estas razones los sondeos y prospecciones que se realizan al terreno, deben permitir clasificar los diferentes tipos de suelos que se encuentran a lo largo de la traza, para de esta manera establecer los precios, previo a la ejecución de estas obras, estas acciones evitarán posteriores problemas.

4.2.4.1. Excavación con explosivos

En la construcción de las explanaciones de los caminos municipales, la excavación con explosivos es una operación que optimiza el tiempo o plazo para los desmontes, es una técnica que dependiendo del tipo de terreno puede llegar a ser muy favorable.

La excavación con explosivos es siempre una operación riesgosa, que debe ser confiada a especialistas para que resulte económica, los productos de la voladura deben quedar troceados a tamaños manejables para los equipos de carga y transporte. La situación de los barrenos y la carga de explosivo que cada uno debe llevar, son objeto de técnicas especializadas, basadas sobre todo en experiencias anteriores similares.

4.2.4.2. Escarificado

Si a lo largo de la traza del camino, se encuentra roca muy fisurada o es blanda, los explosivos no suelen tener un rendimiento aceptable. En estos casos el arranque suele ser posible por medio de un “ripper”, es decir un escarificador profundo (de un solo diente), arrastrado por un tractor pesado y potente, la habilidad del operador juega un papel muy importante.

FIG. IV-3



4.2.4.3. Arranque y carga con maquinaria ordinaria

En las excavaciones que se hace en tierra, el arranque puede hacerse por el siguiente procedimiento:

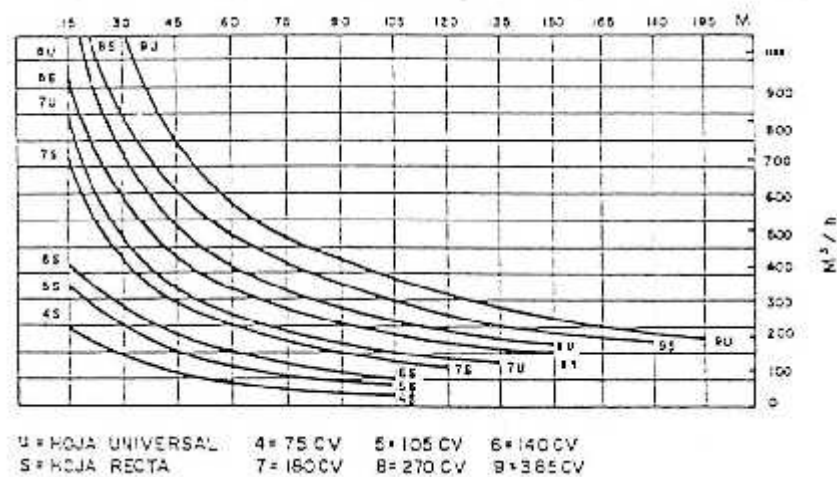
- Mediante una explanadora (“bulldozer”), si la distancia de transporte es muy corta como para que el rendimiento sea aceptable, o como paso previo a la carga con pala cargadora (para mejorar el rendimiento de ésta haciendo que cargue el material suelto).

El arranque es una operación “horizontal”, en la que se van excavando sucesivas tongadas de terreno.

La hoja explanadora debe tener una forma ligeramente cóncava, si la distancia de transporte excede de los 7 metros, el material empieza a salirse por los lados, formando unos caballones.

Los tractores bulldozers usados en arranque y excavación pueden ser de orugas o neumáticos. En ambos casos los rendimientos bajan mucho a partir de los 100-150 metros.

CUADRO N° IV-15



PRODUCCION ESTIMADA DE TRACTORES DE ORUGA

Fuente: Explanaciones y Drenaje, Carlos Kraemer, segunda edición Madrid 1992

Cuando la distancia de transporte excede de unos 50 metros, el rendimiento de la explanadora baja rápidamente.

Dado que la pala cargadora sólo trabaja con buen rendimiento cuando el material está suelto, es muy frecuente que una explanadora le vaya arrancando y apilando el material, que luego debe ser transportado por una flota de camiones dimensionada de modo que la pala no pare nunca y siempre haya al menos una volqueta esperando. Las palas cargadoras mayormente utilizadas son las de neumáticos por su mayor movilidad, aunque las de orugas también se utilizan, sobre todo en terrenos húmedos.

La pala excavadora hidráulica de orugas con cazo de gran dimensión se usa con ventaja en grandes explotaciones o zonas de préstamos cuyo material tiene cierta cohesión, ya que no necesitan bulldozers para arrancar la tierra y puede moverse en terrenos húmedos o irregulares.

Con el aumento progresivo de las distancias de transporte es frecuente que en una misma obra, si es del tamaño suficiente, coexistan los equipos de traillas con los de pala y volquetas.

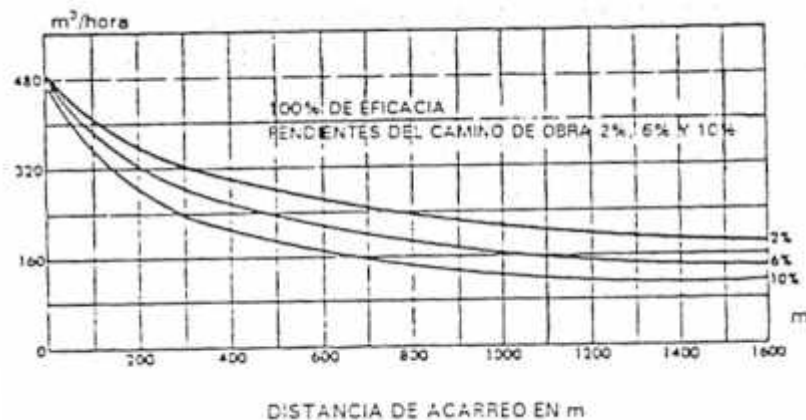


GRÁFICO DE PRODUCCIÓN

Fuente: Explanaciones y Drenaje, Carlos Kraemer, segunda edición Madrid 1992

4.2.4.4. Transporte

El elemento específico del transporte es la volqueta, que son utilizadas para transportar los áridos o los materiales con los que se construirá las diferentes obras de tierra.

Dependiendo del tamaño de las obras de tierra, que necesariamente se tienen que realizar en la construcción de las explanaciones de los caminos municipales, la capacidad de las volquetas varía, es decir que se debe contar con volquetas de buena capacidad de carga (12 m^3) cuando el movimiento de tierras es también importante, o consiguientemente para optimizar el plazo de transporte de materiales.

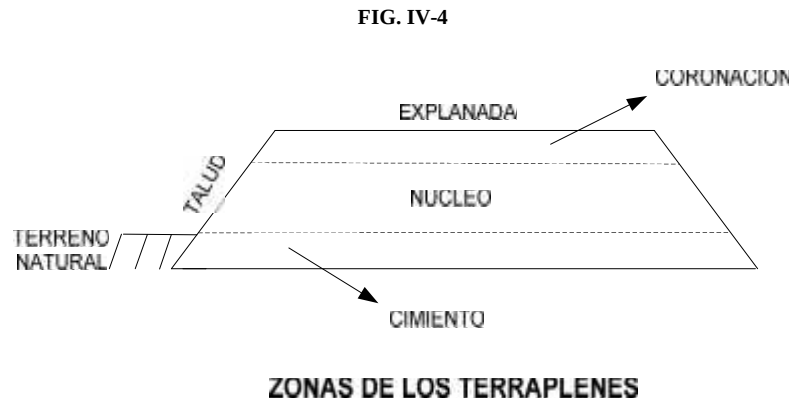


4.3. CONSTRUCCION DE TERRAPLENES

4.3.1. ORIGEN DE LOS TERRAPLENES

Un terraplén tiene un origen funcional relacionado con la diferencia de cotas entre la razante de la carretera y el terreno natural. En algunas ocasiones sin embargo la razante no se eleva sobre el terreno por razones estrictamente geométricas del perfil longitudinal. Así por ejemplo, con terrenos inundables, cuando la capa freática es

muy somera o el suelo natural es poco resistente, puede ser conveniente proteger la carretera o aminorar las solicitaciones de tráfico al nivel del terreno natural mediante la formación de un terraplén de poca altura.



Fuente: Explanaciones y Drenaje, Carlos Kraemer, segunda edición Madrid 1992

El cimiento está situado por debajo de la superficie original del terreno. Se trata de una zona vaciada durante el desbroce, es decir, durante la remoción y retirada de árboles, plantas, tierra vegetal, escombros, basura y otros materiales indeseables que podrían ser causa de asientos diferenciales. La caja así formada se rellena con suelos de aportación para formar un cimiento uniforme del terraplén. En este sentido, cuando no sea necesario un desbroce previo, será incluso conveniente proceder, al menos, a un escarificado y compactación homogénea de la superficie del terreno.

El núcleo constituye el cuerpo del terraplén propiamente dicho y está comprendido entre el cimiento y la coronación.

La coronación está formada por la parte superior del terraplén y su superficie constituye la explanada sobre la que se asienta la capa de rodadura de la calzada. Por ser la zona más próxima a las cargas del tráfico, las exigencias impuestas a la calidad de los suelos utilizados en su formación y el grado de compactación de los mismos

suelen ser más estrictos que el resto del terraplén. Los taludes limitan lateralmente el terraplén con una sección transversal de inclinación uniforme o variable.

4.3.2. METODOLOGIA DE CONSTRUCCION DE LOS TERRAPLENES

En primer lugar hay que preparar la superficie de asiento del terraplén, procediendo al desbroce, a la excavación y retirada de los materiales inadecuados y a la escarificación de área afectada. Cuando se trata de excavación en roca, las voladuras deberán hacerse de forma que se mantenga una cierta uniformidad geométrica y que se evite el lanzamiento del material fuera del área de excavación. También se procederá a la captación y conducción de aguas superficiales y al drenaje profundo en los puntos necesarios.

Si el terreno natural tiene una gran inclinación (superior a los 30°) conviene escalonar previamente la superficie para evitar el desplazamiento del terraplén.

La construcción del terraplén tiene lugar por tongadas o capas de espesor relativamente uniforme, con una determinada secuencia.

4.3.2.1. Excavación, transporte y extensión del suelo

Los suelos proceden de cortes de la traza o de préstamos próximos al lugar de empleo y deben reunir las características que se especifican. Para estas operaciones se utilizan la maquinaria y los métodos usuales en movimientos de tierras. El espesor máximo de las tongadas viene limitado por la maquinaria de compactación que se emplee, el tipo de suelo y el grado mínimo de compactación que se desee alcanzar, variado así en la

práctica desde los 0,15 m hasta los 0,60 – 0,80 m cuando se utiliza compactadores pesados y suelos granulares fácilmente compactables.

Antes de extender una tongada es necesario comprobar que la tongada ha sido compactada adecuadamente y que no se encuentra encharcada o saturada de agua. Es frecuente dar una pequeña pendiente transversal para evacuar las aguas de lluvias caídas durante la ejecución.

Los trabajos deben interrumpirse con temperaturas ambiente bajas (inferiores a 2° C), suelos helados, y cuando se produzca una lluvia de moderada a intensa.

4.3.2.2. Humectación o desecación del suelo

Una vez extendida la tongada se procede, si es necesario, a su humectación con un camión cisterna para que el suelo alcance una humedad próxima a la de compactación, función del suelo y del proceso elegido. En tongadas de gran espesor es muy difícil conseguir una adecuada distribución del agua y por tanto una homogeneidad aceptable del grado de compactación.

En ocasiones sin embargo, la humedad natural del suelo es excesiva, lo cual puede constituir un impedimento para alcanzar la densidad prevista por más que se aumente la energía de compactación. Cuando este caso se deba a precipitaciones atmosféricas puede ser suficiente esperar a su desecación natural o acelerada mediante escarificación. Si se trata en cambio de suelos finos limosos arcillosos con humedades próximas al límite plástico no podrá contarse con su desecación por oreo y habrá que prescindir de ellos o proceder a su mezcla con cal, escorias o cenizas volantes. Con este tratamiento se consigue una modificación granulométrica aparente por formación

de grumos y un aumento de la humedad óptima de compactación, que se aproxime a la natural del suelo.

Las estabilizaciones son sin embargo tratamientos costosos para ser utilizados en el núcleo de los terraplenes, por lo que suelen reservarse para la explanada.

4.3.2.3. Compactación de las tongadas

La compactación del terraplén tiene lugar generalmente en toda su anchura. Las tongadas se compactan mediante varias pasadas de máquinas compactadoras de diferente tipo.

El objeto de la compactación es alcanzar una densidad seca mínima que confiera una cierta estabilidad al suelo compactado. Para tener en cuenta la distinta compactabilidad de los suelos suele exigirse una densidad en términos relativos. Así el pliego de prescripciones técnicas deberá especificar la densidad mínima que debe tener el núcleo del terraplén respecto de la densidad máxima con el mismo suelo en el ensayo Proctor.

En la coronación las exigencias de la densidad es mayor, por lo que se debe tener especial cuidado en el control de calidad del terraplén en esta parte.

Los valores exigidos para la densidad in situ aumentan hacia la coronación del terraplén; así las normas alemanas establecen diferentes densidades mínimas según la cota y el tipo de terreno:

CUADRO N° IV-16

Profundidad desde la coronación (m)	Suelos gruesos D _{OPN} (%)	Suelos finos D _{OPN} (%)
0 - 0.20	100 - 103	97 - 100
0.20 - 0.50	100	97 - 100
más de 0.50	95 - 97	95 - 97

Fuente: Ingeniería de Carreteras Vol. II, Pardillo, Rocci, Mc Graw Hill España 2004

Para el camino objeto de este estudio, el valor mínimo exigido para la **densidad in situ** hacia la coronación del terraplén es de **90 %**.

Naturalmente existen diferencias entre la compactación en obra y la compactación obtenida en el laboratorio. Para un suelo dado que tenga una cierta humedad, la densidad obtenida dependerá de las características del compactador empleado (principio de compactación, peso, dimensiones, etc.), del espesor de la tongada compactada y del número de pasadas o veces que el compactador pasa por un punto de la superficie de la tongada. También pueden influir otras características como la frecuencia que el compactador realiza las pasadas, amplitud, y características comunes a todo tipo de rodillos como la velocidad y tipo de tracción.

En cada caso será necesario determinar el espesor máximo de la tongada y el número mínimo de pasadas necesario para alcanzar la densidad exigida.

La humedad óptima determinada en el laboratorio sólo puede considerarse como un valor aproximado del óptimo de obra. Mientras que los suelos secos pueden regarse hasta alcanzar una humedad aceptable, los suelos con humedades naturales elevadas pueden ser de difícil compactación. Esto se refiere particularmente a los suelos cohesivos con humedades naturales próximas al límite plástico. En este caso puede producirse una deformación recuperable que obligue a una compactación gradual

empezando con algunas pasadas de máquinas ligeras, el aplazamiento de la compactación e incluso al rechazo del material.

El trabajo de los equipos de compactación debe organizarse de forma que ésta sea lo más uniforme posible, es decir que todos los puntos de la tongada reciban el mismo número de pasadas por el compactador.

4.3.3. LOS SUELOS COMO MATERIALES DE CONSTRUCCION DE TERRAPLENES

Los suelos necesarios para formar los terraplenes se obtienen de los desmontes de la traza o de zonas de préstamos.

Los mejores suelos serán aquellos que son fáciles de compactar y que una vez compactados son resistentes a la deformación, poco sensibles a los cambios de humedad, especialmente en lo referente a los cambios de volumen, o a la helada en áreas sometidas a muy bajas temperaturas. Por ello son preferibles los suelos granulares de granulometría continua, con un porcentaje adecuado de finos poco plásticos y sin piedras de gran tamaño. Las arenas uniformes sin finos son difíciles de compactar.

Los suelos de grano fino o materiales limo – arcillosos pueden ser utilizados, salvo que se trate de arcillas muy plásticas o de limos muy compresibles de elevado límite líquido, aunque sobre este tipo de suelos se debe mejorar las coronaciones. Con frecuencia estos suelos de grano fino, de reducida resistencia, tienen también unas humedades naturales excesivas que dificultan o imposibilitan su puesta en obra.

Son suelos inadecuados para su empleo en terraplenes los suelos orgánicos o con materia orgánica (hojas, hierba, raíces, desechos orgánicos y otros materiales putrescibles). Por ello no se empleará la capa de tierra vegetal, tampoco es conveniente emplear escombros y vaciados heterogéneos que pueden dar lugar a asientos diferenciales grandes.

Es necesario adoptar algunas precauciones con suelos que contengan una cantidad apreciable de sulfatos, si estos han de estar en contacto con materiales tratados con cemento, como es el caso de los terrenos yesíferos en los que hay que evitar que las aguas en contacto con el terreno lleguen a las capas de cunetas, tuberías y otros elementos de hormigón.

La especificación AASHTO M 57-64 (1974) sobre el empleo de suelos en carreteras considera 3 casos:

- ▶ **Terraplenes de 15 o más metros de altura.** Se utilizarán suelos A-1, A-2-4, A-2-5 o A-3, debiéndose alcanzar una densidad no inferior al 95% de la máxima Proctor. En caso de que no se disponga de estos materiales y haya que usar suelos de otro grupo, será necesario dedicar una atención especial tanto al proyecto como a la construcción del terraplén.
- ▶ **Terraplenes de menos de 15 metros de altura.** En principio la especificación es la misma de antes. En este caso pueden sin embargo emplearse otros suelos prestando sólo una atención especial a la compactación para conseguir una densidad mayor que la indicada.
- ▶ **Explanadas.** Bajo éste término puede englobarse lo que se ha denominado anteriormente coronación del terraplén. Se prescriben los suelos A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3 con una densidad mínima del 100% Proctor, aún cuando en defecto de estos suelos granulares pueda usarse otros siempre que la

densidad alcanzada sea como mínimo del 95% Proctor y la humedad sea al menos del 95% de la humedad óptima.

4.3.4. MAQUINARIA DE COMPACTACION DE SUELOS Y SU EMPLEO

Las primeras máquinas empleadas para la compactación de los suelos fueron los apisonadores de rodillos lisos, utilizados en la compactación de firmes. Posteriormente empezaron a construirse máquinas más eficaces y mejor adaptadas a la compactación de los terraplenes. En la actualidad se dispone de una gama muy amplia de compactadores de diferente tipo. En general un suelo podrá compactarse con cualquier máquina de cierto peso que incida sobre él, pero el rendimiento y el grado de compactación que se alcancen dependerán de una elección acertada.

Las máquinas utilizadas suelen compactar por uno de los principios siguientes o por una combinación de ellos:

- ▶ Presión estática, sin o con un cierto amasado del suelo
- ▶ Impacto dinámico

4.3.4.1. Compactación por presión estática

Apisonadoras de rodillos lisos

Se tratan en general de máquinas automotrices lastrable, con un peso máximo total comprendido frecuentemente entre 10 y 15 tn. Según el número y disposición de los rodillos, las máquinas pueden ser:

- Compactador de rodillo liso.
- Tándem o de rodillos en serie.



Compactador de rodillo liso



Compactador Tándem

Las características de estos rodillos dependen de su peso por cm de llanta metálica, así como del ancho y diámetro de los rodillos. Aún cuando pueden compactar con un rendimiento escaso tanto suelos granulares como suelos cohesivos con una humedad adecuada, en tongadas de 10 - 20 cm. y 4 – 8 pasadas, hoy se emplean sobre todo en la construcción de firmes y en el alisado o planchado final de capas ya compactadas por otras máquinas.

Rodillos de patas de cabra

Los rodillos pueden ser remolcados por un tractor o autopropulsados, los cuales son de mayor rendimiento. La superficie del cilindro metálico está erizada de unas protuberancias en forma de troncos de pirámide (“patas de cabra”) que al girar el cilindro, se hincan en el terreno por la elevada presión de contacto, la compactación tiene lugar de abajo arriba, con un amasado del suelo: al comienzo las patas se hincan en la tongada en casi toda su longitud, compactando la parte inferior de la misma; durante las siguientes pasadas, la creciente resistencia al esfuerzo cortante del suelo soporta cada vez más el peso del rodillo, cuyas patas penetran menos. Cuando las huellas son del orden de 1/5 del espesor de la tongada puede pasarse a la extensión de la tongada siguiente o a la compactación final con un rodillo liso.

Estas máquinas se utilizan únicamente para la compactación de suelos cohesivos con cierta humedad, no siendo apropiadas para los suelos granulares, por lo que su utilización en caminos no es frecuente salvo en zonas donde se encuentren estos suelos, como fondos de desmonte o cimientos de terraplén.



Compactador de patas de cabra

Compactadores de neumáticos

Consisten básicamente en un chasis capaz de ser lastrado y varias ruedas dispuestas normalmente en una o dos filas, que constituyen el elemento compactador. Las ruedas suelen tener un sistema de suspensión deformable o elástico, que permite unos movimientos relativos apreciables entre las mismas ruedas entre éstas y el chasis, aproximándose en algunas máquinas a una condición isostática obtenida por medios mecánicos o hidráulicos. El suelo se somete así a una compactación relativamente uniforme y a una acción muy eficaz de amasado.

Estos compactadores pueden emplearse, como los rodillos vibratorios para compactar una gama muy amplia de suelos, bases, y subbases en firmes, así como capas de aglomerado bituminoso y tratamientos superficiales. Esta versatilidad, unida a su adaptabilidad al material a compactar y también a su facilidad de desplazamiento dentro y fuera de la obra.

Para que la compactación sea efectiva no es conveniente que las tongadas tengan un espesor superior a 1.5 – 2 veces el radio del área de contacto, por lo que suelen ser de 20 a 40 cm. Estos compactadores son particularmente eficaces con los suelos algo cohesivos, ya sean zahorras y arenas con finos limo-arcillosos o bien suelos de grano fino de plasticidad moderada.



Compactador de neumáticos

4.3.4.2. Compactación por impacto dinámico

Pisones automáticos

Como en el caso de los pisones de mano, la compactación se produce por el impacto de una masa que cae sobre la superficie a compactar. Funcionan con aire comprimido o con un motor de explosión.

Por su bajo rendimiento, estas máquinas se emplean hoy solamente en obras pequeñas o para compactar áreas reducidas o de difícil acceso (zanjas, rellenos próximos a muros, estribos, etc.). En términos generales y para tongadas de unos 15 – 20 cm. pueden ser necesarias 4 – 6 pasadas.



Pisón



Compactadora de plancha vibradora

4.3.5. CONTROL DE CALIDAD

En la ejecución de los terraplenes son objeto de control, los **suelos utilizados, la extensión, la compactación y la geometría.**

El control de los materiales tiene por objeto comprobar que el material a utilizar cumple las prescripciones exigidas, tanto en el lugar de origen como en el de empleo: de este modo queda asegurado que no ha habido alteraciones en las operaciones de extracción, carga, transporte y descarga. Este control es fundamentalmente visual y se complementa con toma de muestras representativas para realizar ensayos de identificación. En el propio terraplén se requiere una vigilancia para desechar los materiales inadecuados y ensayar los sospechosos.

El control de la extensión se basa principalmente en la inspección visual del espesor y anchura de las tongadas, así como en la temperatura ambiente mínima y estado de la capa anterior. El control de la compactación suele hacerse mediante el control de la densidad seca y de la humedad.

Sobre las distintas tongadas de los terraplenes (y de las explanadas en desmonte, sometidas a una compactación previa a la puesta en obra de la coronación o, en el mejor de los casos, del firme) se determina puntualmente la densidad seca alcanzada in situ después del proceso de compactación. Dicha densidad suele expresarse en porcentaje de una densidad de referencia, normalmente la máxima alcanzada en el ensayo de apisonado Proctor. Las prescripciones técnicas especifican un valor mínimo.

El control de la humedad se realiza en los suelos con porcentajes de arcilla que puedan influir en la capacidad de soporte y el de la porosidad en suelos o rocas evolutivos.

También en el control de procedimiento, debe fijarse el espesor máximo de la tongada compactada y el número mínimo de pasadas en función de las características del suelo y el tipo del compactador; en este caso basta con vigilar el proceso de compactación.

Por último el control geométrico tiene por objeto comprobar que la superficie resultante del terraplén terminado se atiene a los planos del proyecto. Se comprueban las cotas de replanteo del eje (con mira cada 20 metros más los puntos singulares colocando estacas niveladas), así como la anchura de la calzada y pendiente transversal.

4.3.6. TERMINACION Y REFINO

Las operaciones de refino de las tongadas de un terraplén se reducen a las mínimas indispensables para que la geometría del mismo se ajuste suficientemente a lo previsto: de todas formas, siempre existen unas creces constructivas (del orden de un 1 m a cada lado en las obras bien llevadas), que luego deben ser recordadas o acondicionadas en una fase de refino final de los taludes. El objeto principal de estas creces, además de ahorrar tiempo entre tongada y tongada, es el de servir de contención lateral a la compactación.

Por otro lado en la explanada, tanto en desmonte como en terraplén, deben observarse unas tolerancias más estrictas: si la explanada esta alta, o bien se altera la razante, si

la explanada esta baja, la diferencia de espesor debe ser compensada a base de materiales seleccionados.

Por ello la fase final de las explanaciones (a veces después de puesto en obra el firme, por lo que se refiere a los taludes) requiere un refino general de la explanación, en que la forma geométrica dada por los planos se suaviza. Ello se puede llevar a cabo por medio de motoniveladoras o retroexcavadoras.

4.3.7. TERRAPLENES SOBRE SUELOS BLANDOS

Un caso especial lo constituyen los terraplenes sobre suelos blandos o muy compresibles como lo son las zonas de turbas, arcillas y limos, etc. La solución más segura consiste en la eliminación de estos materiales y la cimentación del terraplén sobre el terreno firme. La excavación y sustitución de los suelos blandos por otros adecuados puede justificarse económicamente siempre que el espesor no sea excesivo (inferior a 5-6 m) y el nivel freático no imponga grandes dificultades a la excavación.

Con la difusión de los geotextiles, han aparecido nuevas técnicas de terraplenes sobre los suelos blandos, consistentes en extender una capa de geotextil muy resistente a tracción y sobre ella extender capas granulares que se empotran en el terreno, limitadas por el geotextil, hasta conseguir un perfil de equilibrio entre la presión del terraplén y la resistencia al desplazamiento del suelo blando. Estos geotextiles pueden estar reforzados con geomallas.

La construcción de terraplenes sobre suelos blandos, sin eliminar el terreno base, requiere estudios muy detallados desde el punto de vista geológico y sobre todo

geotécnico en general la determinación de parámetros relacionados con la deformabilidad y capacidad de soporte del terreno, deben priorizarse.

4.3.8. PROTECION CONTRA LA EROSION

Frecuentemente durante la primera época de vida de la obra, la erosión del terreno por la lluvia (y en menor grado por el viento) puede socavar estructuras, colmatar dispositivos de drenaje, dañar los taludes y los terrenos y cauces colindantes. Dada la gran extensión superficial de las obras de caminos, y la alteración en la escorrentía normal de las aguas que aquellas producen, esta erosión presenta un gran impacto ecológico como económico.

El establecimiento de una cubierta vegetal en las cunetas y zanjas de desagüe no revestidas, así como en los taludes y superficies adyacentes perturbadas por las explanaciones, desempeña un papel predominante en la resistencia a la erosión causada por el agua. No hay que olvidar que el proceso empieza desde los primeros momentos de la construcción de la explanación y, si no se toman medidas adecuadas tanto durante ésta como con la obra terminada, puede pasar varios años hasta que se vuelva a alcanzar una situación de equilibrio.

Los factores naturales que afectan la velocidad e intensidad de la erosión producida, y que deben ser tenidos en cuenta para tomar las medidas oportunas son los siguientes:

- ▶ Escorrentía superficial, o caudal en cada punto de la superficie.
- ▶ Naturaleza del terreno: los terrenos arcillosos son mucho menos susceptibles que los arenosos.

Entre las medidas que pueden adoptarse para reducir la erosión superficial y sus efectos, sobre todo durante la construcción de las obras, pueden citarse las siguientes:

- ▶ El establecimiento de cunetas de guarda en la coronación de los desmontes, concentrando la escorrentía superficial en unas bajantes adecuadamente protegidas, provistas de los elementos disipadores de energía necesarios.
- ▶ El escalonamiento de los taludes y el establecimiento de bermas horizontales en los mismos, lo que contribuye a disminuir la velocidad del agua que escurre por los taludes.
- ▶ El revestimiento de los taludes, técnicas especiales.
- ▶ El establecimiento de pequeñas presas en las cunetas, obteniendo un perfil longitudinal escalonado: requieren una limpieza periódica del sedimento depositado tras ellas, y una protección de sus costados y fondo para evitar su socavación.

Además de las medidas anteriores, la solución definitiva consiste frecuentemente en el establecimiento de una capa vegetal plantada con especies herbáceas en lo posible originarias del lugar.

4.4. CAPACIDAD DE SOPORTE DE LAS EXPLANADAS

4.4.1. EL ENSAYO C.B.R.

El ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio) mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la ASTM denomina a este ensayo, simplemente como “Relación de soporte” y esta normado con el número ASTM D 1883-73.

Los factores principales que intervienen en la capacidad de soporte son los siguientes:

- La resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que lo constituyen, que depende a su vez de la densidad alcanzada y de su humedad de puesta en obra.
- La humedad existente en cada momento. Los suelos saturados tienen una capacidad de soporte inferior a los suelos no saturados, por lo que en general a mayor humedad el suelo presenta una menor capacidad de soporte.

4.4.2. DESCRIPCION DEL ENSAYO

Se tamiza el material por el tamiz de 20 mm. Si más del 90 % del material pasa, se realiza el ensayo con este suelo. Si la proporción pasante es menor, se separa el material retenido y se sustituye por una cantidad igual de material de la fracción comprendida entre los tamices de 5 y de 20 mm obtenida tamizando otra fracción de la muestra. En los casos en los que la proporción pasante por el tamiz de 20 mm es reducido (menos del 70 %), este ensayo no es representativo del comportamiento del suelo en obra.

Se emplea el mismo molde del ensayo Proctor modificado (un molde cilíndrico de 152.4 mm de diámetro interior y de 177.8 mm de altura). La muestra de suelo se compacta con la humedad y la energía de compactación deseada.

Las muestras se colocan sumergidas en agua durante 4 días, colocando la muestra sobre una placa perforada y sobrecargándola con una presión que representa el peso de las capas de firme que existan encima de las del suelo que se ensaya. Si el suelo es un material granular limpio, pueden admitirse tiempos de inmersión menores para considerar que el suelo está saturado, llegándose incluso a no sumergir la probeta. Este procedimiento suele denominarse CBR inmediato para distinguirlo del ensayo normalizado.

Durante la inmersión se mide el hinchamiento vertical que pueda experimentar el suelo, leyendo al menos al principio y al final de la inmersión y preferiblemente cada día. El hinchamiento se expresa como una proporción de la altura de la muestra. Acabado este periodo, se coloca la muestra en la prensa, provista de un pistón cilíndrico de 49.6 mm de diámetro (3 pulgadas cuadradas de sección) y se aplica la carga necesaria para producir una penetración a una velocidad constante de 0.127 mm por minuto (0.05 pulgadas/min). Se anotan las cargas y presiones ejercidas cada 0.063 mm (0.025 pulgadas) hasta llegar a 12.70 mm (0.5 pulgadas). A continuación se elabora el índice CBR comparando la presión ejercida por el pistón para penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas (0.54 y 1.08 mm respectivamente) con las de la muestra tipo, cuyos valores son conocidos (6.90 y 10.35 MPa). Realizados ambos cocientes, se toma como el índice CBR de la muestra mediante la siguiente condición:

- Si la diferencia entre los valores del CBR para 0.1 y 0.2, es $<$ al 20 %, se toma el valor para 0.1 pulgadas como resultado del CBR.

- Si la diferencia entre los valores del CBR para 0.1 y 0.2, es > al 20 %, se toma el valor para 0.2 pulgadas como resultado del CBR.

El número CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria en Kilos/cm² (libras por pulgadas cuadrada, (psi)) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de 19.4 centímetros cuadrados) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturada, en ecuación, esto se expresa:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100$$

Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la ecuación son:

CUADRO N° IV-17
Valores de Carga Unitaria

Penetración		Carga unitaria patrón		
mm	Pulgada	Mpa	Kg/cm ²	psi
2,54	0,1	6,90	70,00	1000
5,08	0,2	10,30	105,00	1500
7,62	0,3	13,10	133,00	1900
10,16	0,4	15,80	162,00	2300
12,7	0,5	17,90	183,00	2600

Fuente: Internet, Mecánica de Suelos, CBR (MHTML)

El ensayo de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y subrasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas, la siguiente tabla da una clasificación típica:

CUADRO N° IV-18
Clasificación de suelos para Infraestructura

CBR	Clasificación general	usos	Sistema de Clasificación	
			Unificado	AASHTO
0 - 3	muy pobre	subrasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3 - 7	pobre a regular	subrasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7 - 20	regular	sub-base	OL,CL,ML,SC	A2,A4,A6,A7
			SM,SP	
20 - 50	bueno	base,subbase	GM,GC,W,SM	A1b,A2-5,A3
			SP,GP	A2-6
> 50	excelente	base	GW,GM	A1-a,A2-4,A3

Fuente: Internet, Mecánica de Suelos, CBR (MHTML)

Con el resultado del CBR se puede clasificar el suelo de acuerdo al siguiente cuadro.

CUADRO N° IV-19
Clasificación del suelo de acuerdo al CBR

CBR	CLASIFICACION
0 - 5	Subrasante muy mala
5 – 10	Subrasante mala
10 – 20	Subrasante regular a buena
20 – 30	Subrasante muy buena
30 – 50	Subbase buena
50 – 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

Fuente: Internet, Mecánica de Suelos, CBR (MHTML)



Denominación o calificación de la subrasante, según su valor de CBR.

4.5. APLICACION PRACTICA EN TRAMOS DE CAMINOS MUNICIPALES

4.5.1. UBICACION

La zona de estudio, se encuentra ubicada al Este de la capital del departamento de Tarija, a 48 Km. de distancia de nuestra ciudad, las diferentes comunidades dentro del tramo de estudio (Carlazo – Canchones – Papachacra), se encuentran ubicadas dentro de la jurisdicción de la subprefectura de la provincia Cercado.

FIG. IV-5



4.5.2. CARACTERISTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

El Proyecto de Mejoramiento del Camino municipal o vecinal “Canchones – Carlazo – Papachacra”, prevé el mejoramiento del camino desde la comunidad de Canchones hasta la comunidad de Papachacra.

Se pretende con ello implementar una infraestructura vial urbana que permita un transporte eficiente, tanto en la rapidez como en economía, como así también brinde condiciones de seguridad y comodidad tanto al tráfico de vehículos como al de los peatones.

La Ubicación Geográfica de la zona del proyecto nos muestra una topografía accidentada, con vegetación muy escasa, donde se evidencia diferentes tipos de suelos, blandos, semiblandos y duros.

FOTOGRAFIA N° 1



FOTOGRAFIA N° 2



Lenguajes que habla la población

Se constata que toda la población actual de las comunidades beneficiarias, es de habla española, aunque se observa una pequeña proporción de familias de habla Quechua.

Principales actividades económicas

Las principales actividades que se desarrollan y de las cuales dependen las familias de las comunidades beneficiarias con el Proyecto, son la agricultura y la ganadería. Es de hacer notar que la mayoría de las familias practican simultáneamente las dos

actividades. Sin embargo, la actividad más importante es la agricultura, ya que es la actividad principal que las familias desempeñan para subsistir diariamente. La ganadería, no deja de ser importante, por que su producción es destinada mayormente a la venta o al trueque y por los subproductos que se producen.

Entre los principales productos que se cultivan en estas Comunidades se tiene el maíz, papa, entre otros. Por otra parte, entre los principales tipos de ganado que se produce en el área de influencia del proyecto, se tiene, bovino, porcino, caprino, ovino, etc.

Horarios y actividades.

Los horarios para realizar las actividades, no están definidos, puesto que para desarrollar la agricultura y la ganadería se requiere una gran cantidad de tiempo de dedicación y esto lleva a que el hombre tiene que estar en cualquier horario y cualquier día sea feriado o no en las labores diarias de atención en todo el proceso de producción.

Servicios básicos existentes.

Contar con los servicios básicos en cualquier comunidad, es de vital importancia. Los servicios con que debe contar la población son el agua potable, energía eléctrica, salud, educación y otros. Sin embargo, no todas las comunidades son atendidas por el gobierno central y/o municipal, debido a muchos factores tales como falta de recursos financieros, descuido de las autoridades centrales, entre otros factores.

Servicio de agua potable

En cuanto a los servicios de agua potable en el área de influencia del Proyecto, se puede evidenciar que no todos cuentan con este servicio, es decir que solo una parte de todas las familias cuentan con este servicio.

Todas las familias que no cuentan con este servicio tan indispensable, se ven obligadas a consumir agua del río en la mayoría de los casos, de acequia, y de vertiente.

Servicio de Alcantarillado

En ninguna de las comunidades beneficiarias con el proyecto existe el servicio de alcantarillado por red de drenaje.

Todas estas familias que no tienen la oportunidad de contar con un sistema de eliminación de excretas, se ven obligadas a hacer sus necesidades en campo abierto, lo que se convierte en un foco de contaminación y por tanto a una mayor exposición de enfermedades y parásitos, poniendo en riesgo la sanidad de las mismas familias, de los animales domésticos y el medio ambiente (agua de los ríos y aire).

Servicios de Electricidad

Con relación a los Servicios de Electricidad en el área de influencia del proyecto, se puede indicar que no cuentan con este servicio todavía, aunque se debe mencionar que ya se está realizando el tendido eléctrico hacia estas comunidades.

Generalmente, todas estas familias que no cuentan con energía eléctrica, para tener alumbrado en su casa y hacer funcionar algunos artefactos, utilizan los siguientes insumos: Kerosén, velas, pilas, gas, baterías y otros insumos que al final de cuentas les resulta antieconómicos y riesgosos para su salud.

Servicio de Educación

Con relación a las Comunidades Beneficiarias con el proyecto, se puede indicar que se cuenta con una escuela en la comunidad de Papachacra, la misma que recibe a los estudiantes de las comunidades vecinas, el estado del establecimiento se encuentra entre bueno y regular.

También se debe indicar que ninguna de las Comunidades beneficiarias con el proyecto cuentan con servicios de educación secundaria, aspecto que dificulta en gran medida la continuidad de la formación educativa de los jóvenes de estas Comunidades, provocando mayores índices de migración tanto temporal como definitiva y aumentando los niveles de pobreza.

4.5.3. METODOLOGIA DEL ESTUDIO

La metodología que se siguió en el presente trabajo, se dividió en dos partes muy importantes:

- ▶ **Trabajo de campo**
- ▶ **Trabajo de gabinete**

4.5.3.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consiste principalmente en la observación visual de las características de la zona de estudio e identificación de los diferentes terraplenes a lo largo del recorrido del camino, para posteriormente seleccionar los terraplenes, en los que se realizará el estudio planteado. Además de recoger la información básica sobre el terreno, este estudio establecerá la topografía, taludes naturales, vegetación, capa vegetal, y toda la información sobre los suelos para su posterior análisis en laboratorio.

También en campo se realizará, el control de densidades, para una verificación de las características referentes a la compactación, este ensayo servirá para analizar las condiciones de funcionamiento de los terraplenes. Es decir el análisis servirá para determinar si las condiciones mecánicas, cumplen con las especificaciones mínimas establecidas en los términos de referencia.

4.5.3.1.1. Selección de Muestras.

La toma de muestras para el análisis respectivo en laboratorio, parte primeramente de la identificación y selección de los diferentes terraplenes a ser estudiados. Para posteriormente realizar la toma de muestras, que sean representativas, es decir que la muestra tomada nos muestre el o los materiales que conforman dicha muestra, para de esta manera obtener resultados reales. Esta toma de muestras se la realizará a través de calicatas, a partir de una profundidad de por lo menos 0.6 m, de donde se extraerán las muestras para su posterior análisis en laboratorio

FOTOGRAFIA N° 3

Terraplén N° 1, ubicado en la progresiva 6+220, en el tramo Canchones- Papachacra

FOTOGRAFIA N° 4

Terraplén N° 1, ubicado en la progresiva 6+220, en el tramo Canchones- Papachacra

FOTOGRAFIA N° 5

Toma de muestra N° 1, ubicado en la progresiva 6+220, tramo Canchones-Papachacra

FOTOGRAFIA N° 6

Terraplén N° 2, ubicado en la progresiva 3+560, en el tramo Carlazo – Canchones

FOTOGRAFIA N° 7

Terraplén N° 2, ubicado en la progresiva 3+560, en el tramo Carlazo – Canchones

FOTOGRAFIA N° 8

Toma de muestra N° 2, ubicado en la progresiva 3+560, tramo Carlazo – Canchones

FOTOGRAFIA N° 9

Terraplén N° 3, ubicado en la progresiva 0+020, en el tramo Carlazo – Canchones

FOTOGRAFIA N° 10

Toma de muestra N° 3, en la progresiva 0+020, en el tramo Carlazo – Canchones

4.5.3.1.2. Análisis de las muestras en laboratorio

El análisis de las diferentes muestras se las realizará en un laboratorio de suelos, en el que se realizarán los siguientes ensayos:

- ✓ Clasificación de los suelos (clasificación ASTM, AASHTO).
 - ▶ Granulometría
 - ▶ Límites de Atterberg.
- ✓ Compactación de suelos, medida de la humedad óptima y la densidad máxima (ensayo Proctor Modificado T-180).
- ✓ Ensayo CBR

4.5.3.2. Trabajo de gabinete

Este aspecto contemplará el análisis profundo de todos los ensayos realizados en el laboratorio, en este trabajo de gabinete se realizará todas la observaciones y cálculos que correspondan para obtener los resultados de los diferentes ensayos.

Los cálculos de los diferentes ensayos realizados en laboratorio, se muestran en las distintas planillas específicas para cada uno de los mismos. Este detalle es el que se muestra a continuación:

4.5.4. RESULTADOS

- Las muestras de los terraplenes “A”, “B” y “C”, de acuerdo al estudio realizado, tienen la siguiente clasificación:

CUADRO N° IV-20
CLASIFICACIÓN DE SUELOS

N° Muestra	Clasificación ASTM	Clasificación AASHTO
Muestra “A”	SP	A – 2 – 6 (0)
Muestra “B”	GM	A – 1b (0)
Muestra “C”	SC	A – 6 (3)

- El ensayo de compactación (Proctor T-180) realizado en laboratorio, con las muestras extraídas de los diferentes terraplenes de estudio, es el que se muestra a continuación:

CUADRO N° IV-21
PROCTOR T-180

N° Muestra	Densidad Máxima (grs/cm ³)	Contenido de Humedad Óptima (CHO %)
Muestra “A”	2.082	10.0
Muestra “B”	2.149	6.5
Muestra “C”	1.872	13.65

- El grado de compactación realizado en los terraplenes, mediante el método de la arena, se presenta en el siguiente cuadro:

CUADRO N° IV-22
GRADO DE COMPACTACION

N° Muestra	Densidad Máxima en Lab. (grs/cm ³)	Densidad Máxima en Campo. (grs/cm ³)	Grado de Compactación (%)
Muestra “A”	2.082	1.961	94.2
Muestra “B”	2.149	2.036	94.73
Muestra “C”	1.872	1.704	91.01

- Los resultados referentes al CBR, para las diferentes muestras con las que se procedió a realizar el ensayo de Soporte de California en laboratorio, se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO N° IV-23
CBR

N° Muestra	CBR al 95 % de la Densidad Máxima Proctor
Muestra "A"	9.44
Muestra "B"	15.40
Muestra "C"	7.00

En síntesis, la metodología que se siguió en lo que se refiere al estudio del presente trabajo, es el que se detalla a continuación:

- ▶ Recopilación de información (topografía, taludes naturales o laderas, suelos, vegetación, etc.).
- ▶ Toma de muestras de campo para su posterior análisis en laboratorio.
 - ✓ Clasificación de los suelos (clasificación ASTM, AASHTO).
 - Granulometría
 - Límites de Atterberg.
 - ✓ Compactación de suelos, medida de la humedad óptima y la densidad máxima (ensayo Proctor).
 - ✓ Densidad in situ
 - ✓ Ensayo CBR
- ▶ Resultados obtenidos.
- ▶ Análisis de los resultados obtenidos.

- ▀ Análisis de la maquinaria utilizada en campo durante la ejecución de las explanaciones, por parte de la empresa contratista.
- ▀ Análisis sobre el control de calidad realizado en la construcción de las explanaciones del camino, por parte de la empresa contratista.
- ▀ Conclusiones.
- ▀ Elaboración de una propuesta de recomendaciones producto del estudio.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.-

- El estudio ha permitido disponer de las herramientas necesarias, como para poder realizar un análisis sobre la construcción de las explanaciones en el tramo de estudio, y determinar algunos aspectos a ser optimizados, ó los puntos en los que se debe realizar un mejor control de calidad.
- Se pudo comprender la metodología seguida en la ejecución de la construcción de las explanaciones, observar materiales involucrados, distinguir causas probables que originen fallas en el funcionamiento de los terraplenes en los puntos de estudio, para luego de ello establecer medidas de mitigación a estos problemas, y permitir una mayor confiabilidad en el tránsito de los usuarios.
- La calidad de los materiales presentes en los diferentes terraplenes según la clasificación ASTM y AASHTO, de acuerdo al estudio realizado se detalla en el siguiente cuadro:

Nº Muestra	Clasificación ASTM	Clasificación AASHTO
Muestra "A"	SP	A – 2 – 6 (0)
Muestra "B"	GM	A – 1b (0)
Muestra "C"	SC	A – 6 (3)

De acuerdo al cuadro, los materiales presentes en las muestras “A” y “C”, son susceptibles a cambios de volumen importantes, al variar su humedad, por ser materiales con una plasticidad elevada, y como consecuencia, los mismos no serían los idóneos para la conformación de los terraplenes. Ya que los materiales deben brindar a los terraplenes, 3 condiciones muy importantes: Estabilidad volumétrica, resistencia mecánica e inalterabilidad frente a agentes externos.

Por el contrario el material presente en el terraplén “B”, es un material excelente para la conformación de explanaciones, según recomendaciones de la norma AASHTO, por lo que no se tendría ningún problema en lo que se refiere a la conformación de terraplenes con este material.

Las propiedades de los diferentes tipos de suelos se muestran en los cuadros siguientes de acuerdo a la norma AASHTO:

Características de suelos según AASHTO

Grupo Suelos	Permeabilidad	Elasticidad	Cambio de volumen	Capilaridad	Base de pavimentos	Sub Bases	Terraplenes	Valoración Escala	
A - 1	--	---	--	-	++	++	++	+++	Sobresaliente
A - 2	-	++	+	m	-	m	+	++	Muy alto
A - 3	+	-	--	-	+	+	+	+	Alto
A - 4	-	+	+-	+++	-	-	+-	m	Moderado
A - 5	-	m	++	+++	---	-	--	-	Deficiente
A - 6	---	-	++	++	--	--	-	--	Bajo
A - 7	--	m	++	++	--	--	--	---	Muy bajo

- En cuanto a la asignación de la maquinaria y Equipo, la empresa Contratista dispuso del siguiente equipo para los diferentes trabajos que se tuvieron que ejecutar:

- ✓ 8 Volquetas (12 m³)
- ✓ 2 Camiones Aguateros.
- ✓ 2 Motoniveladoras.
- ✓ 3 Cargadoras Frontales.
- ✓ 3 Tractores D7 G.

Analizando la maquinaria utilizada en la construcción de terraplenes por parte de la empresa contratista, se puede evidenciar que para la compactación de los mismos, se utilizó un tractor D7G, que es una máquina pesada, con la que se puede construir este tipo de obras, pero que desde un punto de vista técnico esta maquinaria no es la adecuada para la conformación de terraplenes, por que no es una máquina para este objetivo, su rendimiento no es el mismo al de un compactador, que sí tiene características muy apropiadas para la conformación de terraplenes.

- El control de densidades en obra, no es el más adecuado, por que sólo se ha realizado el control en la coronación de los terraplenes, y no así en las diferentes zonas de los mismos. De acuerdo a metodologías y técnicas de construcción, se recomienda realizar un control de densidades por cada capa o tongada.

- El grado de compactación de los diferentes terraplenes, presentan las características siguientes de acuerdo al estudio realizado:

GRADO DE COMPACTACION

Nº Muestra	Densidad Máxima en Lab. (grs/cm ³)	Densidad Máxima en Campo. (grs./cm ³)	Grado de Compactación (%)
Muestra "A"	2.082	1.961	94.2
Muestra "B"	2.149	2.036	94.73
Muestra "C"	1.872	1.704	91.01

El grado de compactación admisible a lo largo de la traza del camino en estudio, es del 90% respecto de la máxima Proctor en laboratorio. Los valores obtenidos mediante laboratorio, como se puede observar en el cuadro, están dentro de los parámetros mínimos establecidos en las especificaciones técnicas, en consecuencia los terraplenes tienen las condiciones de funcionamiento mínimas aceptables requeridas por las solicitudes.

- Los resultados referentes al CBR, para las diferentes muestras con las que se procedió a realizar el ensayo de Soporte de California en laboratorio, se muestra en el siguiente cuadro:

CBR

Nº Muestra	CBR al 95 % de la Densidad Máxima Proctor
Muestra "A"	9.39
Muestra "B"	15.40
Muestra "C"	5.36

El requerimiento mínimo aceptable sobre la capacidad portante de los suelos o materiales utilizados en la conformación de terraplenes en el tramo de estudio, está en

un rango de 3-9 %. Analizando los resultados obtenidos en laboratorio, con las muestras en estudio, los materiales utilizados, cumplen con las solicitudes mínimas, es decir que la capacidad de soporte de estos terraplenes, está dentro de los requerimientos.

Si bien los terraplenes estudiados cumplen con las exigencias mecánicas mínimas establecidas dentro de las especificaciones técnicas para su construcción, es necesario una mejora de sus características mecánicas, para garantizar de que los mismos van a tener un funcionamiento permanente, especialmente en época de lluvias.

RECOMENDACIONES.-

Es un hecho de que este camino necesita mejorar sus condiciones, para que el mismo tenga un funcionamiento permanente, y no se vea afectado cada vez que comienza la época de lluvias, y tenga que cortarse el tránsito normal de los vehículos por estas zonas, que hoy en día es una necesidad fundamental para los pobladores. Además de que el mantenimiento que se realiza, es esporádico o sencillamente no se lo hace, lo que implica que necesariamente este tramo caminero tiene que mejorar en los aspectos referentes a sus explanaciones.

- Como medidas preventivas y/o correctivas de las características mecánicas de los terraplenes estudiados, se sugiere realizar una estabilización mecánica en el caso de los terraplenes susceptibles de sufrir cambios importantes de volumen al variar su humedad, o como alternativa el aumento de la compactación respecto de la máxima Proctor obtenida en laboratorio. La utilización de maquinaria adecuada para la conformación y compactación de los materiales involucrados en la construcción de terraplenes, debe ser la premisa, que deberá estar en función a los materiales. También realizar un mejor control de densidades en las diferentes zonas de los terraplenes, para aumentar la calidad de la obra. La aplicación de estas medidas puede ser una buena alternativa en la optimización de la construcción de explanaciones en el tramo estudiado.
- ➡ La estabilización mecánica, es un proceso de mezcla de dos o más suelos de diferentes características, con el objetivo de mejorar su resistencia, su durabilidad y su sensibilidad al agua. Esta alternativa puede ser una buena opción, ya que en las proximidades se encuentran suelos de mejor calidad (granulares), que aumentarían las características mecánicas en los terraplenes de estudio. También el control de calidad de los mismos debe ser más estricto.

- ➡ El aumento de la compactación respecto de la máxima Proctor, también puede ser una buena alternativa para mejorar las características mecánicas de los terraplenes, en los puntos donde se encuentran materiales susceptibles de sufrir cambios importantes por la variación de su humedad. La sugerencia es alcanzar un 95 % - 97 %, para darle mejor calidad a dichos terraplenes.
- ➡ El uso de maquinaria adecuada para la conformación y sobre todo para la compactación de los terraplenes debe ser la premisa, su elección o selección de la misma, deberá estar en función a los materiales, para de esta manera lograr una compactación enérgica y efectiva, logrando una mejora importante de las características mecánicas de los terraplenes.
- ➡ El control de densidades, dentro lo que es la conformación de los terraplenes, siempre debe acompañar a la compactación, para de esta manera garantizar que el trabajo final cumplirá con las especificaciones, si bien este control no se pide por cada capa o tongada, este control puede realizarse cada 2 o 3 capas. Esta medida puede ser muy importante al momento de tener la seguridad de que la obra estará enmarcada dentro los términos de referencia.