

Índice

1. Movimiento de suelos	2
1.1. Generalidades	2
1.1.1. Límites de Atterberg	2
1.1.2. Clasificación de suelos HRB	2
1.2. Reconocimiento del terreno	2
1.2.1. Zanjas y calicatas	2
1.2.2. Sondeos	2
1.3. Compactación	3
1.3.1. Control de compactación	3
1.4. Valor soporte CBR	3
1.4.1. Correlación y valores orientativos	4
1.4.2. Módulo de reacción de la subrasante k	4
1.5. Suelos expansivos	4
1.5.1. Propiedades del suelo	5
1.5.2. Medidas de control	5
1.6. Congelamiento de pavimentos	5
1.6.1. Influencia sobre la estructura del suelo	6
1.6.2. Tratamiento de suelos susceptibles	6
1.7. Tecnología de áridos	6
1.7.1. Áridos naturales	6
1.7.2. Propiedades como elementos granulares	7
1.7.3. Propiedades como conjunto	7
1.7.4. Rock Quality Designation	7
1.8. Rendimiento de los equipos	7
2. Estabilizado granular	8
2.1. Los materiales	8
2.2. La dosificación	8
2.2.1. La granulometría	8
2.2.2. La resistencia mecánica	8
2.2.3. Construcción	8
3. Suelo cemento	9
3.1. Los materiales	9
3.2. Dosificación	9
3.3. Construcción	9
4. Bases estabilizadas con asfalto	9
5. Pavimentos flexibles	10
5.1. Método Shell	10
5.1.1. Parámetros de diseño	10
5.1.2. Cartas de diseño	10
5.2. Método AASHTO	10
6. Pavimentos asfálticos	11
6.1. El petróleo	11
6.2. Ligantes hidrocarbonados	11
6.2.1. Estructura coloidal	11

1. Movimiento de suelos

1.1. Generalidades

Lo primero que debemos estudiar son dos características del suelo: la granulometría y los límites de Atterberg. Además se deben conocer las características geotécnicas del suelo, tales como la densidad de suelo seco D_{ss} , humedad del suelo, límite líquido LL , límite plástico LP y el índice de plasticidad $IP = LL - LP$.

Conociendo las propiedades anteriores podemos encontrar si el material es granular, sea canto rodado, grava, arena gruesa o arena fina, o si es un material cohesivo, sea un limo o una arcilla.

1.1.1. Límites de Atterberg

Existen tres límites de Atterberg, que nos permiten clasificar el suelo cohesivo.

Límite plástico se realiza con la porción de suelo que pasa el tamiz N°40. Se define como el más bajo contenido de humedad con el que al ser moldeado en barritas cilíndricas de menor diámetro cada vez, comienza a agrietarse cuando las barritas tienen 3 mm.

Límite líquido es la menor humedad a partir de la cual el suelo se comporta como un líquido. Se define como el más bajo contenido de humedad para que las dos mitades de una pasta de suelo de 1 cm de espesor fluyan y se unan en una longitud de 12 mm en el fondo de la muesca que separa las dos mitades cuando la cápsula que la contiene es golpeada 25 veces desde una altura de 1 cm a dos golpes por segundo.

Límite de contracción es la humedad para la cual el suelo no se contrae cuando la humedad baja de ese punto.

1.1.2. Clasificación de suelos HRB

Es equivalente al método AASHTO, y cuenta con siete grupos principales, que van desde el A-1 al A-7. Este método se desarrolló para la construcción de caminos. Los grupos están agrupados por granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. También se puede obtener el índice de grupo con la siguiente fórmula:

$$IG = (F - 35) * (0,2 + 0,005 * (LL - 40)) + 0,01 * (F - 15) * (IP - 10).$$

Donde F es el porcentaje que pasa el tamiz N°200.

En general, podemos distinguir lo siguiente en cuanto a la calidad de los materiales para las tareas de caminos:

- **A-1 a A-3:** excelente a buen material para subrasante.
- **A-4 a A-7:** regular a pobre material para subrasante.

1.2. Reconocimiento del terreno

1.2.1. Zanjas y calicatas

Podemos dar como ejemplo las **calicatas, zanjas y pozos**. Son un sistema simple y efectivo que nos permite la observación *in situ* del terreno. Es un método válido para profundidades de hasta 5 m de profundidad. El método es ideal para terrenos duros y para arcillas expansivas, ya que permite la determinación del nivel freático con precisión. Este tipo de ejecución además requiere entibaciones para $h \geq 1.5$ m.

1.2.2. Sondeos

Por otro lado tenemos los **sondeos**, que son perforaciones de pequeño diámetro y de gran profundidad. Se pueden obtener por rotación, percusión o por presión.

Es un requisito un espaciamiento entre auscultaciones de 500 m para terraplenes y de 250 m para desmontes.

1.3. Compactación

La compactación consiste en la reducción del volumen del suelo mediante la aplicación de energía mecánica. Este tema requiere un punto especial de estudio mediante ensayos como el **Ensayo Proctor**, que nos permite la elaboración de un diagrama del que se pueden obtener los valores de la humedad óptima H_{opt} y la densidad Proctor máxima δ_{max} .

En este tema es importante el concepto de **valor soporte**, que será definitorio en la capacidad portante en el suelo como se ve en la imagen.

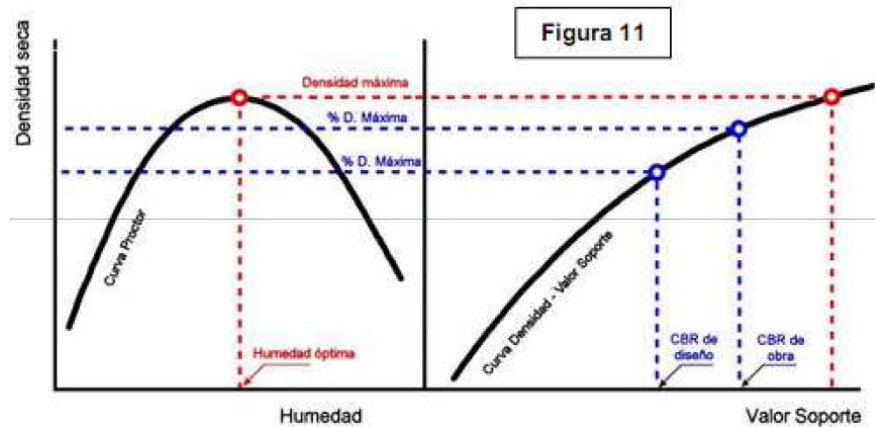


Figura 1: Relación entre Proctor y Valor Soporte

Esto muestra las grandes diferencias que pueden llegar a provocar pocos puntos de diferencia en la densidad deseada en la capacidad de soportar cargas del suelo.

1.3.1. Control de compactación

Algunos métodos para la verificación de la compactación de la compactación del suelo es con el *método del cono de arena*, que consiste en obtener el volumen de un suelo en el lugar gracias a la comparación con una arena de densidad conocida.

El ensayo se esquematiza en la imagen.

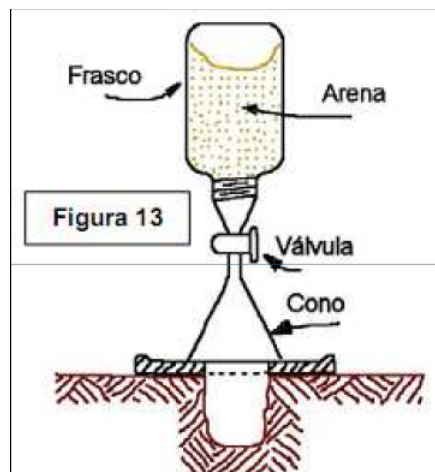


Figura 2: Cono de arena

Sin embargo, también existe otros **ensayos no destructivos**, como la medición directa o por retrodispersión.

1.4. Valor soporte CBR

El **CBR** de un suelo es la relación en % entre el esfuerzo necesario para penetrar un pistón de dimensiones dadas a una velocidad prefijada hasta una profundidad determinada en la muestra

del suelo analizado y la presión correspondiente para la penetración en una muestra patrón con características ideales. Su valor depende en gran manera de:

- Características físico químicas del suelo.
- Densidad seca.
- Forma de compactación.
- Humedad con el que fue compactado.
- Humedad al momento del ensayo.
- Sobrecarga aplicada en el momento del ensayo.

En principio, la **humedad de compactación** generará un cambio significativo en el valor de CBR, mientras que la **sobrecarga** aumenta el CBR en los suelos friccionales.

1.4.1. Correlación y valores orientativos

El valor del CBR nos permite hacer las siguiente correlaciones:

- Resistencia $kg/cm^2 \approx 100 * CBR$.
- Hinchamiento $\leq 2\%$ no presenta problemas.
- Se requieren ciertos valores para el paquete estructural:
 - Base: $CBR \geq 40\%$
 - Subbase: $CBR \geq 40\%$
 - Subrasante buena: $CBR \sim 8\%$
 - Subrasante regular: $1\% \leq CBR \leq 5\%$

1.4.2. Módulo de reacción de la subrasante k

El módulo de reacción de la subrasante se define como la **relación** entre la presión aplicada mediante un plato de sección dada, a la rasante y la penetración o deflexión resultante. Éste módulo mide la resistencia (o capacidad soporte) del material de subrasante a ser comprimido bajo la acción de las cargas transmitidas al suelo.

Para su determinación, la presión del plato debe ser **similar** a la utilizar en el pavimento en servicio. Además, el valor de k dependerá en gran medida del **diámetro del plato**.

1.5. Suelos expansivos

Los suelos expansivos son aquellos que pueden un cambio en su volumen cuando varia su humedad. La variación de frecuentes variaciones de humedad de los suelos de subrasante producen daños severos en los pavimentos que es denominado *daño silencioso*, y tiene un importante efecto económico.

Este tipo de suelos tiene deformaciones significativamente mas grandes que las elásticas, generando un movimiento desigual y causando daños tales como grietas o quiebres en los pavimentos. En general, el componente arcilloso que provoca esto es la **montmorillonita**, que es altamente expansiva.

Las partículas de arcilla tienen una carga neta negativa, por lo que el agua es atraída, y a medida que el agua es *adsorbida*, empuja partículas de arcilla causando el hinchamiento.

1.5.1. Propiedades del suelo

Las propiedades que pueden afectar esto son:

Mineralogía de la arcilla principalmente la montmorillonita, que genera grandes cambios de volúmenes.

Agua química del suelo

Succión del suelo más agua atraída cuando la succión es alta.

Plasticidad un alto valor de índice plástico genera más hinchamiento.

Estructura del suelo las arcillas dispersivas se expanden con la floculación del suelo.

Densidad seca una mayor densidad da a un mayor potencial de hinchamiento.

1.5.2. Medidas de control

Ciertas posibilidades para el control de esta problemática son las siguientes:

1. Relocalización del trazado.
2. Reemplazar el suelo expansivo por uno que no lo sea.
3. Modificar las propiedades expansivas del suelo mediante acciones físicas o químicas.

Físicas se puede inundar el suelo de manera que se produzca la expansión previa la construcción, o esclerificar, rastrear y agregar arena, o en todo caso agregar un revestimiento no expansivo.

Químicas estabilización mediante cal, inyecciones, etc.

4. Aislar el suelo de manera que no sufra modificaciones de humedad, tales como membranas asfálticas.

El siguiente esquema muestra una solución de impermeabilización de taludes con arcillas expansivas, como se ve en Figure 3, Figure 4 y Figure 5.

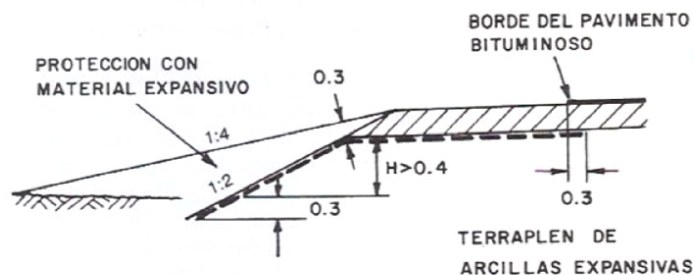


Figura 3: Impermeabilización de taludes en carretera

1.6. Congelamiento de pavimentos

Las heladas tienen dos efectos perjudiciales en los pavimentos:

1. Levantamiento del pavimento por la presión que origina el mayor espacio que ocupa el agua congelada.
2. Ablandamiento de la subrasante por el agua de deshielo.

La profundidad de penetración depende de la temperatura bajo el punto de congelamiento y del tiempo que la misma se mantiene, ya que la transmisión de calor no es instantánea, por lo que esto es un problema en lugares donde las bajas temperaturas se mantienen durante tiempos prolongados.

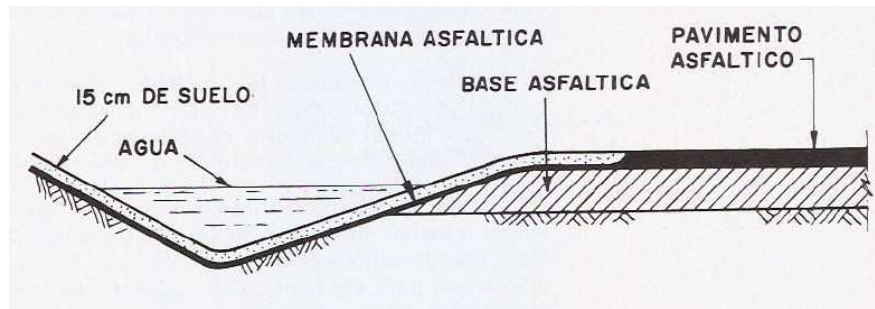


Figura 4: Impermeabilización de cunetas

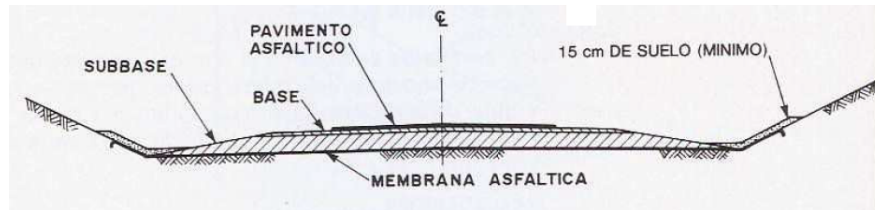


Figura 5: Impermeabilización de corte tipo

1.6.1. Influencia sobre la estructura del suelo

Se puede dar un proceso de congelación del agua, que mayor volumen en los espacios entre partículas, desplazando al aire y a las propias partículas en sí. Luego se da un efecto de **deshielo**, donde la mayor separación entre partículas queda de manifiesto, reduciendo la densidad del suelo y reduciendo el valor soporte del mismo.

Los suelos más susceptibles son los **suelos finos**, que tienen elevada capilaridad y baja cohesión, como los suelos limosos o limo-arenosos, mientras que las arenas y los suelos arcillosos resultan menos sensibles.

1.6.2. Tratamiento de suelos susceptibles

Existen varias soluciones para esta problemática, como:

1. Retirar el suelo susceptible a las heladas y reemplazarlo por uno no susceptible.
2. Ubicar y compactar el suelo no susceptible con un espesor tal que pueda evitar la congelación.
3. Retirar *bolsones* aislados de suelos susceptibles a las heladas para eliminar cambios abruptos.
4. Aumentar el espesor del pavimento para dar cuenta de la reducción de la capacidad portante durante el deshielo.
5. Estabilizar el suelo mediante la instalación de una barrera capilar, que pueden ser dos capas de geotextil.

1.7. Tecnología de áridos

Son **rocas** que sufren un proceso de tratamiento industrial para convertirla en un material granular que tiene una distribución granulométrica adecuada. Son materiales baratos y abundantes, y luego del agua, la materia prima más utilizada.

1.7.1. Áridos naturales

A este tipo de áridos los podemos dividir en dos tipos:

Áridos granulares (rodados) son aquellos que se obtienen de yacimientos naturales (arenos y graveras) y que se usan tras haber sufrido un lavado y clasificación. Esto quiere decir que *solo* se modifica su granulometría.

Áridos de machaqueo son aquellos que se producen en *canteras*. Tras arrancar los materiales de macizos rocosos, se someten a un proceso de trituración, molienda y clasificación.

1.7.2. Propiedades como elementos granulares

Podemos distinguir lo siguiente:

Propiedades físicas macroscópicas tales como la dimensión, forma, redondez, densidad, porosidad, permeabilidad, dureza, módulo elástico, conductividad térmica, etc.

Propiedades químicas tales como estabilidad mineral, presencia de sulfatos y sulfuros, cloruros, etc.

Propiedades mineralógicas composición textura, tamaño de grano, cristalinidad, etc.

1.7.3. Propiedades como conjunto

Composicionales pueden ser áridos monogénicos y poligénicos.

Distribución de tamaños husos granulométricos.

Forma índice de lajas y agujas.

En general, se evalúan **parámetros geométricos, parámetros hidrogeológicos y parámetros de material extraíble**.

1.7.4. Rock Quality Designation

Es un parámetro para medir la calidad de la roca, y depende de la longitud de los trozos testigos con una longitud mayor a 10 con respecto a la tirada total recuperada. La fórmula es la siguiente:

$$RQD = \frac{\sum x_i}{L} * 100.$$

Su valor variará de 0 a 100, donde 100 es excelente y 0 es muy malo.

1.8. Rendimiento de los equipos

Comentario 1 los trabajos requieren varios equipos trabajando de forma simultánea. El ideal es que todos los equipos trabajen eficazmente y con continuidad, pero esto no es fácil, por lo que los valores obtenidos no son necesariamente reales. Esto nos indica que los rendimientos calculados de forma individual no son valores reales, sino que es necesario encontrar rendimientos para grupos de equipos.

Comentario 2 la organización de un *kit* de equipo de máquinas es el objetivo del ingeniero. Esta situación irá variando durante el transcurso de la obra.

Comentario 3 las empresas tienen los equipos que tienen. Esto implica que nos tenemos que ajustar a los rendimientos de equipos disponibles.

[Clase 20210422](#)

2. Estabilizado granular

Clase 20210513

Un estabilizado granular es una mezcla bien graduada de gravas, arena y finos, donde los dos primeros se conforma un esqueleto granular firme, y el fino aporta cierta plasticidad, ya que permiten el llenado de los vacíos del esqueleto granular. Así se puede lograr una buena resistencia mecánica. Esto se fundamenta en la siguiente ecuación

$$\tau = c + \sigma' * tg(\phi).$$

Se consideran:

Fracción gruesa tiene un tamaño máximo de 1.º 2", y queda retenido en el tamiz N°10.

Fracción intermedia si es arena gruesa, se encuentra entre los tamices N°10 y N°40. Si es arena mediana o fina, entre N°40 a N°200.

Fracción fina son limos y arcillas, pasante de N°200.

Su capacidad de carga se estima en un Valor Soporte relativo tal que:

$$\begin{aligned} \text{Para una subbase} &\longrightarrow \text{VSR} \geq 40 \% \\ \text{Para una base} &\longrightarrow \text{VSR} \geq 80 \%. \end{aligned}$$

2.1. Los materiales

Se debe corroborar la idoneidad de los agregados. Se ve:

Árido grueso es preferentemente triturado, reconociendo su forma (lajosidad) y su resistencia a la fragmentación (ensayo Los Ángeles).

Árido intermedio se analiza su limpieza (ensayo Equivalente de arena).

A la misma mezcla se le debe reconocer su permeabilidad y realizarse ensayos de durabilidad. Esto es particularmente importante, por ejemplo, en capas drenantes.

2.2. La dosificación

2.2.1. La granulometría

Debe ser tal que asegure la alta fricción interna. La composición se realiza por tanteos, hasta obtener una mezcla dentro de la banda que se sugiere. Una vez definida la mezcla, se trata como un suelo.

2.2.2. La resistencia mecánica

Lo primero es realizar el ensayo Proctor (encontrar H_{op} y γ_{max}), y el Ensayo Valor Soporte Relativo. Si el VSR es menor al requerido, es necesario realizar una nueva dosificación granulométrica.

2.2.3. Construcción

El mezclado de los materiales se realiza preferentemente en planta. Su distribución es en el lugar, y se realiza con distribuidores mecánicos autopropulsados. Luego se compacta y se le hace un riego de imprimación.

Este tipo de solución tiene una muy buena respuesta, que además permite ser complementado con otro estabilizado, con cemento por ejemplo.

El mismo puede ser realizado en dos capas sucesivas del paquete estructural, pero con distinto grado de compactación.

3. Suelo cemento

El suelo cemento es una **estabilización química**, que resulta de la mezcla de suelo, cemento portland y agua en cantidades determinadas, que se compacta a alta densidad y curada.

Las principales propiedades que aporta son resistencia y durabilidad. Químicamente, su acción es diferente de acuerdo al tipo de suelo, según:

En suelos finos el agua y el cemento forman un hidrato de calcio, liberando iones de calcio, así, toma agua de la arcilla, disminuyendo la plasticidad y aumentando la resistencia y la durabilidad.

En limos, arenas y gravas en estos suelos, el cemento reacciona con los elementos silicosos de los suelos, actuando como ligante.

3.1. Los materiales

En general, se puede adoptar cualquier tipo de suelo, excepto en orgánicos o arcillas muy plásticas. Es particularmente apto para los suelos granulares, ya que: se pueden desmenuzar y mezclar fácilmente, y requieren menos cemento. La mezcla típica es:

Pasante N°200 \longrightarrow entre 5 % y 35 %

Pasante N°4 $\longrightarrow \geq 55$ %.

En cuanto el cemento, es generalmente el tipo Portland normal. Dependiendo el tipo de suelo variará su tenor en peso. Para suelos A-1-a normalmente es al rededor de 5 %, mientras que para un A-7 va del 11 % al 16 %.

3.2. Dosificación

Se deben alcanzar las exigencias con respecto a la compresión simple y al desgaste.

El suelo cemento se contrae al endurecer, lo que lo lleva a **fisurarse**. Esto depende del tenor de cemento, tipo de suelos, contenido de agua, grado de compactación y las condiciones de curado.

Para disminuir la fisuración hay que tener especial cuidado en el curado, y se recomienda trabajar con una humedad superior a la óptima.

3.3. Construcción

Se hace mediante el mezclado de los materiales, que se realiza en planta. Normalmente se utiliza una planta con un silo con suelo, un silo con cemento, un tanque del agua y un tornillo o equipo similar para el mezclado. En el tornillo se descarga el suelo y se agrega el agua necesaria con el cemento.

Luego, en el lugar se lo descarga, compacta y perfila.

El suelo cemento puede alcanzar resistencias considerables, y generalmente puede ir por debajo inmediatamente por debajo de las capas de rodamiento.

Su resistencia a la erosibilidad lo hace especialmente apto para colocar por debajo de las capas asfálticas o de hormigón.

4. Bases estabilizadas con asfalto

[Clase 20210520](#)

[Clase 20210520](#)

En suelos cohesivos, esta estabilización produce impermeabilización, formando una membrana que impide la penetración del agua. En suelos granulares además produce adhesión, aumentando la resistencia al corte y módulo elástico.

5. Pavimentos flexibles

Normalmente se pueden utilizar los métodos Porter o método Shell. El más preferido es el último, que permitió el avance de muchas cosas en cuanto a como se realizaban.

5.1. Método Shell

Este método asume que se encuentra una estructura bien diseñada, que se comporta elásticamente bajo acción de las cargas dinámicas.

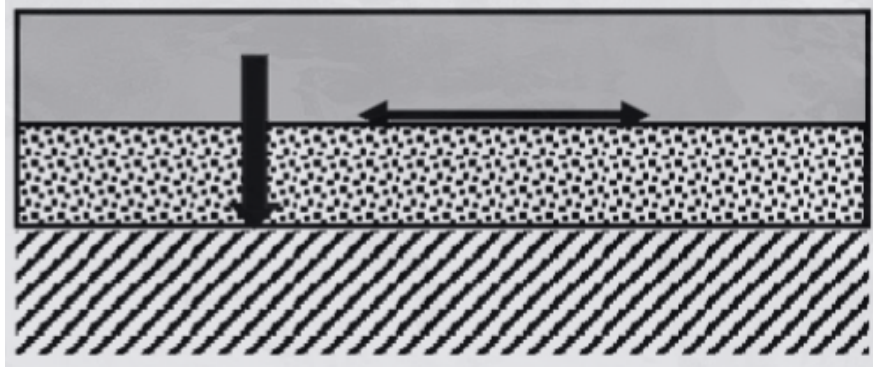


Figura 6: Esfuerzos críticos

Se deben considerar los siguientes **esfuerzos críticos**:

Excesiva deformación de la superficie por acumulación de pequeñas deformaciones permanentes en la estructura. En estructuras bien diseñadas, estas son primariamente dependientes de la compresión vertical en la superficie de la subrasante.

Rotura de la capa asfáltica por la flexión repetida de esta capa bajo las cargas del tráfico. El inicio de tales roturas es gobernada por la tracción en el borde inferior de la capa asfáltica.

5.1.1. Parámetros de diseño

Para la **subrasante** se considera el VSR o Valor Soporte Relativo, y en el **tránsito**, se considera un número N , que es la cantidad total de ejes equivalentes a 10tn que pasan por la trocha más cargada durante la vida útil. Es equivalente a:

$$N_{10t} = N_x * \left(\frac{x}{10}\right)^4.$$

5.1.2. Cartas de diseño

En X se da el espesor de la capa granular total, y en Y se da el espesor de la capa asfáltica. En la misma se encuentran dos curvas, que dan las cargas críticas que corresponden a un N en particular. Esto se ve en [Figure 7](#)

Lo que se busca que el punto se encuentre sobre las curvas mostradas, ya que menos no serán suficientes, y sobre la misma se estaría sobre dimensionando.

5.2. Método AASHTO

El método puede ser pensado como un equilibrio, donde por un lado se consideran todos los requerimientos a tener en cuenta, tales como la subrasante, tránsito, clima y serviciabilidad. En cuanto al tránsito, el método considera un N_{80KN} , que será aproximadamente $2,26N_{10t}$ del método Shell. En cuanto el clima, se tiene en cuenta un factor regional FR .

Por el otro lado, se requieren tener en cuenta ciertos índices, tales como coeficientes estructurales por unidad de espesor a_i y espesores e_i . Esto permite diseñar una carpeta que pueda cubrir las resistencias requeridas.

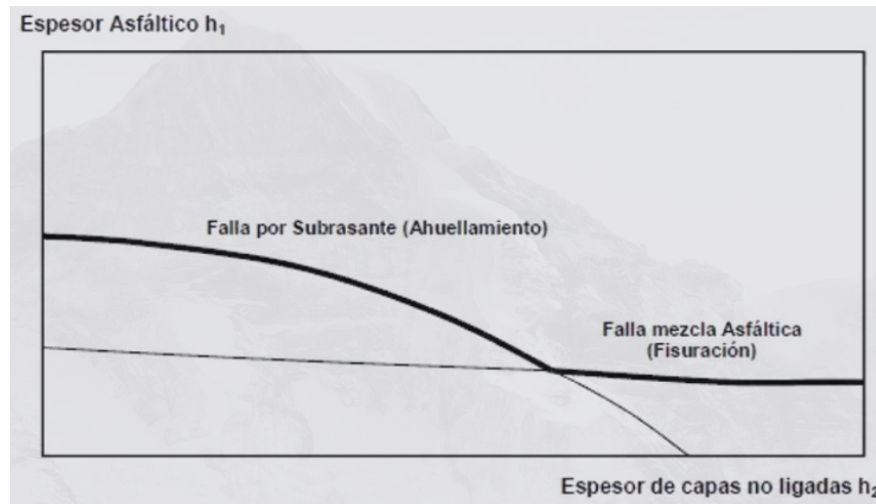


Figura 7: Carta Shell VSR

6. Pavimentos asfálticos

6.1. El petróleo

Es un componente elemental del asfalto, que se compone de de carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno.

6.2. Ligantes hidrocarbonados

Se pueden encontrar ligantes bituminosos, que son derivados del petróleo, tales como los betunes. Los mismos pueden ser betunes fluidificados, emulsiones bituminosas y ligantes bituminosos modificados.

Tienen como características lo siguiente:

1. Mezclas complejas de hidrocarburos.
2. Color negro o muy oscuro.
3. Materiales aglomerantes (adhesividad).
4. Carácter termo-plástico (Susceptibilidad térmica).
5. Pérdida de propiedades iniciales (envejecimiento).

6.2.1. Estructura coloidal

El asfalto cuenta con:

Asfáltenos son partículas sólidas bituminosas, que son de alta viscosidad, y proveen tanto elasticidad, resistencia y cohesión

Maltenos estos pueden dividirse entre resinas y aceites. Los primeros son muy sensibles a la temperatura, y son responsables de la viscoelasticidad. Se pueden transformar en asfáltenos mediante la oxidación. Los aceites aumentan la fluidez, y en la oxidación se transforman en resinas y asfáltenos.