

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los estudios de pavimentos cualquiera sea el tipo es muy importante para nuestro país y en particular para nuestra región ya que estamos en una etapa de franco desarrollo en el área vial y cualquier profundización en el tema viene a contribuir los conocimientos de este tema.

Aunque la ejecución de pavimentos rígidos de alto rendimiento no sea frecuente en nuestro país este estudio nos permitirá conocer todas las características técnicas de este tipo de ejecución de pavimentos.

Dentro de la construcción de carreteras es importante tener alternativas para poder comparar en los aspectos técnico y económicos, por lo tanto este estudio mostrará las posibilidades de constituirse en una alternativa aplicable en nuestro medio a partir de las ventajas de rendimiento y control de calidad que se puede efectuar en su ejecución, demostrada por su vida útil; asimismo la vulnerabilidad que puedan tener este tipo de pavimentos.

ANTECEDENTES.-

Este estudio nos permitirá conocer la metodología en el control de pavimentos rígidos de alto rendimiento con el uso de pavimentadoras de hormigón, que hayan tenido un avance en el fundamento de principios de concepción de este tipo de ejecución de pavimentos y que permitan la optimización de su ejecución, relacionar con el periodo de vida útil y la vulnerabilidad que tienen este tipo de pavimentos en su ejecución.

Este estudio también posibilitará el estudio de las nuevas tecnologías de ejecución en este tipo de pavimentos y el análisis de las posibilidades que se tienen en nuestro medio de la apropiación de estas tecnologías para ser aplicadas en proyectos de nuestro medio.

La afirmación de que un pavimento tiene un periodo de vida útil puede prestar a un buen diseño garantizado en ese periodo para el servicio.

Sin embargo, analizaremos qué grado de precisión se alcanza en la ejecución con pavimentadoras y cuál es su vulnerabilidad para comprobar cuán confiable es la ejecución de un pavimento rígido, sustentado por el comportamiento comparativo de muchos kilómetros en otros países más desarrollados.

Este estudio nos permitirá establecer hasta qué punto es posible su aplicabilidad en nuestro medio.

OBJETIVO GENERAL.-

Realizar el estudio sobre el control de calidad de los pavimentos rígidos de alto rendimiento con el uso de pavimentadoras a partir de sus parámetros de control, la vulnerabilidad de su ejecución respecto a la confiabilidad y seguridad de que cumpla la vida útil en condiciones de servicio favorables, su metodología y su proceso de ejecución; a partir de ello establecer la posible aplicabilidad de la metodología de control, en nuestro medio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-

Entre los objetivos específicos tenemos:

- Estudiar las características generales de los pavimentos rígidos y las particularidades.
- Estudiar las propiedades y características de los pavimentos rígidos en general.
- Realizar un análisis sobre el periodo de vida útil de los pavimentos rígidos.
- Analizar la influencia del periodo de vida útil de los pavimentos rígidos a partir de la ejecución con metodologías de alto rendimiento.
- Establecer las particularidades de la ejecución de pavimentos rígidos basados en alto rendimiento.
- Determinar el proceso de ejecución de los pavimentos rígidos y su influencia en el periodo de vida útil cuando se utiliza una metodología de alto rendimiento.
- Establecer el proceso de control de calidad en pavimentos rígidos de alto rendimiento.

- Ver la aplicabilidad en un tramo de ejecución de pavimento rígido como es el de Campo Pajoso – Caraparí entre las progresivas 0+000 y 2+400.
- Evaluar los resultados obtenidos en el control de calidad.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

ALCANCE.-

El estudio del control de calidad en los pavimentos rígidos de alto rendimiento utilizando pavimentadoras es un ámbito temático para lo cual necesariamente se empezarán a definir los objetivos que se tienen, y el alcance de este estudio, pretendiendo cumplir con los objetivos propuestos y que el estudio sirva como un documento de consulta a todos los interesados en esta temática. Asimismo, se planteará la metodología de encarar este estudio.

Para estudiar el control de calidad en pavimentos rígidos ejecutados con pavimentadoras de alto rendimiento, es importante analizar primeramente las características de los pavimentos rígidos en general, es decir a que tipo de esfuerzos están sometidos y como contribuyen cada una de las capas que la conforman, además de sus características y especificaciones para los materiales y conformación de dichas capas, incluyendo las juntas y sus diferentes tipos cuyo elemento en los pavimentos rígidos es fundamental.

Como nuestro propósito apunta al estudio del control de calidad de los pavimentos rígidos de alto rendimiento, se hace necesario estudiar los diferentes factores que

inciden en este control de calidad, con el propósito de estudiar los fundamentos de su ejecución, sus ventajas y desventajas, su aplicabilidad y su forma de aplicación, para realizar una valoración de todo este tipo de factores en el periodo de vida útil que tienen los pavimentos rígidos.

La parte esencial de nuestro estudio es aquel que está ligado al tema en sí, por ello le damos particular atención al estudio pormenorizado de los pavimentos rígidos y su control de calidad, particularmente orientado a la ejecución de este tipo de pavimentos con pavimentadoras, sus fundamentos teóricos y prácticos, un análisis de su metodología, su comportamiento esperado considerando las diferentes condiciones de ejecución, la metodología del control de calidad, los elementos de equipo, personal y medios que intervienen en este, cómo deben analizarse los resultados y su coherencia para valorarlos y la forma de ejecución que tiene este tipo de pavimentos considerando el equipo o la metodología en obra para la ejecución.

UBICACIÓN DEL PROYECTO.-

A todo estudio para que este completo es necesario experimentar en una aplicación práctica con condiciones reales y mejor si éstos son de tramos de la región ya que uno de los objetivos del presente estudio es establecer el grado de aplicabilidad que tiene este tipo de pavimentos, por ello se eligió el tramo Campo Pajoso - Caraparí en la que se tiene un proyecto de pavimento rígido ejecutado con pavimentadora.

Se establecerán las características del tramo elegido sus condiciones de parámetros de ejecución, la metodología, los factores del control de calidad en su ejecución en sus diferentes etapas, sus costos y la valoración de su aplicabilidad pudiendo esta representarnos un referente para otros tramos de condiciones similares. Finalmente, expondremos en el estudio nuestras conclusiones y recomendaciones a partir de todo lo estudiado y de la aplicación práctica realizada.

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS GENERALES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

1.1.- DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS.-

Pavimento es la capa o conjunto de capas comprendida (s) entre la subrasante y la superficie de rodamiento de una obra vial, cuya finalidad es proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente al tránsito de vehículos, al intemperismo producido por los agentes naturales y a cualquier otro agente perjudicial. Estructuralmente un pavimento tiene la función de transmitir adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que ésta no se deforme de manera perjudicial.

Entre las principales funciones que desempeñan los pavimentos son el aislamiento y la ornamentación, pero al mismo tiempo deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos y la compresión de los elementos que se apoyan. Además, muchos pavimentos tienen que ser inmunes a la acción de agentes químicos, como agua, aceites, sales o ácidos, a las agresiones de seres vivos e incluso a la propia luz solar.

Un pavimento está formado por diversas capas de mejor calidad y mayor costo cuanto más cercanas se encuentran a la superficie de rodamiento; ello es, principalmente, por la mayor intensidad de los esfuerzos que les son transmitidos.

Para cumplir sus funciones, un pavimento debe satisfacer dos condiciones básicas:

1) Ofrecer una buena y resistente superficie de rodamiento, con la rugosidad necesaria para garantizar buena fricción con la llanta de los vehículos y con el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos.

2) Debe poseer la resistencia apropiada y las características mecánicas convenientes para soportar las cargas impuestas por el tránsito sin falla y con deformaciones que no sean permanentes y que garanticen un tráfico en buenas condiciones.

Las características de resistencia y deformabilidad se satisfacen con una capa de material que se encargue de distribuir los esfuerzos de tal modo que a la subrasante lleguen en niveles tolerables, que no produzcan falla, ni asentamientos u otras deformaciones perjudiciales.

Esta capa debe estar formada por materiales friccionantes que son los más adecuados para llenar esta función estructural; esta capa es la base en pavimentos flexibles.

La losa de concreto en pavimentos rígidos cumple la misma función estructural. La capacidad de carga de los materiales friccionantes es baja en la superficie por falta de confinamiento, razón por la que se requiere que sobre la base exista una capa de material cohesivo y con resistencia a la tensión; en pavimentos flexibles ésta es la carpeta asfáltica que tiene además que cubrir las condiciones de buena superficie de rodamiento.

En los pavimentos rígidos la misma losa de concreto llena esta necesidad, por sus características de cohesión.

1.2.- TIPOS DE PAVIMENTOS.-

En general los pavimentos se dividen en dos tipos: los pavimentos rígidos de concreto hidráulico y los pavimentos flexibles o de asfalto.

La diferencia estructural entre ellos estriba en que los pavimentos flexibles presentan muy poca resistencia a la flexión.

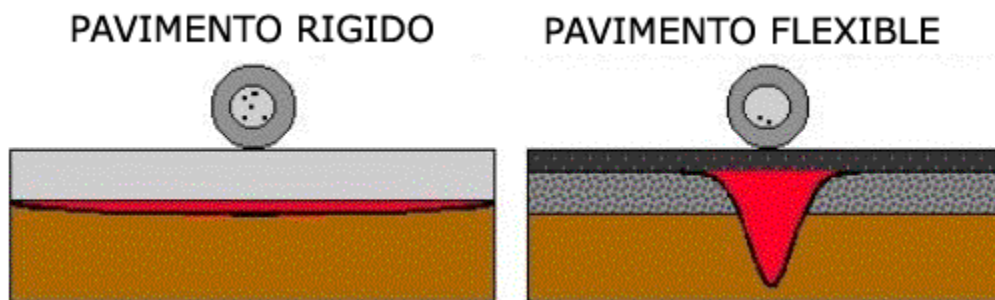


FIGURA 1

En el pavimento rígido, el hormigón absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento, mientras que en el pavimento flexible este esfuerzo es transmitido hacia las capas inferiores.

1.2.1.- PAVIMENTOS FLEXIBLES.-

Los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa obtenida del asfalto o petróleo, y de los productos de la hulla, apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, mezcla de agregado grueso o fino (piedra machacada, grava y arena), denominadas base y sub-base; la calidad de esas capas es descendente hacia abajo.

Esta mezcla es compacta, lo bastante plástica para absorber grandes golpes y soportar un elevado volumen de tráfico pesado.

1.2.2.- PAVIMENTOS RÍGIDOS.-

Los pavimentos rígidos están formados por una losa de concreto hidráulico (mezcla de cemento Pórtland y agregado fino y grueso), con recubrimiento bituminoso o sin él, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado (grava y arena).

El espesor del pavimento puede variar de 15 a 45 cm, dependiendo del volumen de tráfico que deba soportar.

Los concretos usados son de resistencia relativamente alta, generalmente comprendida entre 210 kg/cm² y 350 kg /cm² a los 28 días.

En general, se usa concreto simple y ocasionalmente, reforzado. Las losas de concreto simple son de dimensiones pequeñas, del orden de 4 metros a 8 metros; estas dimensiones aumentan al usar algún refuerzo y llegan a los 100 metros en concretos presforzados. Los espesores usados para las losas son del mismo orden usando o no refuerzo.

Cuando este pavimento se construye en forma adecuada y se controlan las exigencias de calidad tienen larga vida y un costo de mantenimiento relativamente bajo.

1.3.- FACTORES DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS.-

Los factores que, independientemente del método y calidad del diseño de un pavimento, afectan en forma predominante a éste, pueden considerarse comprendidos en los siguientes tres grupos:

a) Características de los materiales que constituyen la capa subrasante

Los materiales que constituyen la terracería y la capa subrasante de un camino juegan un papel fundamental en el comportamiento y espesor requerido de un pavimento flexible e influyen poco en el espesor de la losa, pero bastante en su comportamiento, en un pavimento rígido.

Por ello la determinación de las características del suelo que formará la terracería y la capa subrasante, en su caso, es vital.

El fin se logra aplicando los principios y métodos de trabajo usuales en la Mecánica de Suelos y es precisamente en este sentido en el que el estudio de los pavimentos es importante, no sólo en lo que se refiere a terracería y subrasante, sino también a sub-base y base, cuyas propiedades mecánicas e hidráulicas definen en buena parte un problema de pavimentación.

b) El clima

El principal factor climático que afecta los pavimentos suele ser la precipitación pluvial, ya por su acción directa o por elevación de las aguas freáticas.

Frecuentemente, el que proyecta se ve obligado al diseño y construcción de estructuras adicionales de drenaje, aparte del drenaje normal que nunca podrá faltar en la obra vial o al empleo de diseños especiales para el pavimento.

Las heladas, en los climas rigurosos y en suelos susceptibles, pueden ser fuente de un gran número de problemas en pavimentos.

La temperatura y sus variaciones abruptas afectan los diseños, sobre todo en losas de concreto, pues inducen esfuerzos muy importantes en tales estructuras.

c) El tráfico

El tráfico produce las cargas a que el pavimento va a estar sujeto. Respecto al diseño de los pavimentos, interesa conocer la magnitud de esas cargas, las presiones de inflado de las llantas, así como su área de contacto, su disposición y arreglo en el vehículo, la frecuencia y número de repeticiones de las cargas y las velocidades de aplicación.

1.3.1.- FACTORES DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.-

Diversos son los factores que deben analizarse para obtener el diseño de pavimentos rígidos al más bajo costo anual posible, son cuatro factores que deben tomarse en cuenta y son los siguientes:

a) Tráfico considerado de las cargas por eje o rueda, y su frecuencia

El volumen y el carácter del tránsito fijan el ancho del pavimento, mientras que el peso y la frecuencia de las cargas de los ejes o de las ruedas de los vehículos determinan el espesor y otras características del diseño estructural.

Vida útil para el diseño

Conociendo las condiciones del tránsito, el pavimento de hormigón puede ser diseñado para la vida de servicio que se desee. Debe establecerse el volumen y peso del tránsito futuro previsible.

Para calles de tránsito general y otras con cargas pesadas, el tránsito futuro tiene considerable influencia en su diseño. Para calles residenciales y otras municipales de tránsito liviano, la variación de este tránsito suelen ser de poca importancia. Se acostumbra a tomar vidas útiles del pavimento comprendido entre 30 y 50 años.

b) Valor Soporte de la Subrasante

Para asegurar el comportamiento satisfactorio del pavimento de hormigón, es necesario que el suelo de la subrasante posea características y densidad uniformes, es decir, soporte uniforme. Este soporte viene representado por el valor del módulo de reacción k de la subrasante.

La inmensa mayoría de los pavimentos de concreto se diseñan con base en las ecuaciones de Westergaard, que usan el valor del módulo de reacción de la

subrasante, k , obtenido en una prueba de placa, realizada sobre dicha subrasante. Este valor de k esta dado en Kg/cm^3 ; representa la presión necesaria en Kg/cm^2 que debe aplicarse sobre un área circular (cuyo diámetro estará comprendido entre 15 y 76 cm.) para producir un hundimiento de 1,27 centímetros.

El espesor de la sub-base de los pavimentos rígidos no es objeto de cálculo, sino de receta establecida por costumbre. Nunca se construyen de menos de 10 cm. y probablemente 15 cm. es una buena dimensión mínima.

Si se proyectan espesores menores, las inevitables irregularidades en la construcción podrían hacer que en algún lugar el espesor de la sub-base resultara excesivamente pequeño.

c) Resistencia y calidad del hormigón a emplear

La elección de materiales y su dosificación para elaborar hormigones tiene por fin obtener, durabilidad satisfactoria para las condiciones de servicio prevista y resistencia a la flexión deseada.

Considerando que las tensiones críticas en el pavimento de hormigón son las de flexión, se utiliza para su diseño este tipo de resistencia, expresada por su módulo de rotura σ_f .

Para condiciones promedio, el hormigón que posee un módulo de rotura comprendido entre 45 y 55 kg/cm^2 a los 28 días, resulta económicamente más conveniente.

La cantidad de agua de la mezcla y su consolidación tienen la influencia crítica sobre la durabilidad del hormigón endurecido. Para un determinado y adecuado contenido de cemento, la menor cantidad de agua que produzca un hormigón plástico, trabajable y fácilmente consolidable, permitirá obtener la mayor durabilidad del hormigón endurecido.

1.4.-MÉTODOS DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS.-

En la actualidad existen diversos métodos para realizar el dimensionamiento de los pavimentos rígidos, los cuales realizan un proceso de cálculo un tanto complicado, que requieren un conocimiento previo de las cargas por eje, también se requiere determinar el valor de k además de una serie de parámetros, cuya elección del valor más adecuado es muy subjetiva. Un ejemplo de estos es el método de la PCA y el método de la AASHTO.

Existen también otros métodos que han sido creados en varios países europeos, que tienden a simplificar el dimensionamiento, basados en general en la utilización solo de dos variables, el volumen de vehículos pesados y la categoría de la subrasante.

Entre estos métodos tenemos los elaborados por Gran Bretaña, Francia, España y otros países Europeos.

Por otra parte para facilitar aun más el trabajo de diseño, en la actualidad se puede prescindir del manejo de las teorías que conducen a las fórmulas de diseño y aún de éstas mismas, pues existen ábacos y gráficos que proporcionan directamente el espesor en términos de variables de diseño, como por ejemplo los ábacos que se

muestran en el (Anexo I), ábaco1-I y ábaco 2-I. Es tos gráficos utilizan como únicas variables los valores de carga por eje (simple ó tandém), y el del módulo de reacción.

1.4.1.- MÉTODO AASTHO.-

El procedimiento incluido en la Guía AASHTO determina el espesor **D** de un pavimento de hormigón para que éste pueda soportar el paso de un numero W18 de ejes equivalentes de 18 kilo libras (8,2 t) sin que se produzca una disminución en el índice superior a un cierto valor **Δ PSI**. Dicho índice de servicio **PSI** es un valor que se calcula a partir de una serie de medidas en el pavimento (regularidad superficial, agrietamiento, baches), y que se ha comprobado que tiene una buena correspondencia con la calificación subjetiva que dan al mismo los usuarios. La fórmula que relaciona las tres variables anteriores es la siguiente:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_o + 7,35 \times \log_{10} (D + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^{-7}}{(D + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 p_t) \times \log_{10} \left[\frac{S_c * C_d \left[D^{0,75} - 1,132 \right]}{215,63 * J \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}} \right]} \right]$$

En donde:

- **W₁₈**: Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 t, a lo largo del periodo de proyecto.

- **Z_R :** Fractil de la ley normal asociado al nivel de fiabilidad con el que se desea proyectar el pavimento.
- **S_o :** Desviación estándar que combina por una parte la desviación estándar media de los errores de predicción del tráfico durante el periodo de proyecto, y por otra la desviación estándar de los errores en la predicción del comportamiento del pavimento (expresado en ejes de 8.2 t) al alcanzar un determinado índice de servicio terminal.
- **D :** Espesor del pavimento de hormigón (en pulgadas).
- **ΔPSI :** Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.
- **P_o :** Índice de servicio inicial.
- **P_t :** Índice de servicio final.
- **S_c :** Resistencia media del hormigón (en psi, libras por pulgada cuadrada) a flexo tracción a los 28 días (método de carga en los tercios de luz).
- **C_d :** Coeficiente de drenaje.
- **J :** Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas.
- **E_c :** Módulo de elasticidad del hormigón, en psi.
- **K :** Módulo de reacción o de balasto (en psi, libras por pulgada cúbica) de la superficie (base, sub-base o subrasante) en la que se apoya el pavimento de hormigón.

Para facilitar la utilización de la fórmula anterior se ha preparado el nomograma representado en el ábaco 3-I (Anexo I). En lo que se refiere a dichas variables, puede hacerse sobre las mismas las siguientes consideraciones:

El W_{18} es el número o la cantidad de ejes simples equivalentes de 8.2 t, que circulan por el tramo en estudio a lo largo del período de proyecto. Es obvio que no circularán

solo ejes de 8.2 t, entonces el método AASHTO requiere la transformación a ejes simples equivalentes al valor indicado anteriormente de los ejes de diferentes pesos que circularán sobre el pavimento a lo largo del periodo de proyecto.

Para ello la AASHTO en su Guía ha incluido una serie de tablas con factores de conversión, las cuales dependen de varios parámetros: clase de pavimento (flexible o rígido), tipo de eje (simple, tandém, tridem), índice de servicio final y, en el caso de pavimentos rígidos, espesor del pavimento.

Para estos últimos se han preparado nueve tablas, combinando cada uno de los tres tipos de ejes con tres valores del índice de servicio final: 2,0; 2,5 y 3,0. En general, los factores de las tablas se ajustan aproximadamente a la ley:

$$N_1 = \left(\frac{P_1}{18} \right)^4$$

En lo que se refiere al periodo de proyecto, se indica que en general, éste debe ser superior a 20 años, a fin de poder evaluar mejor las distintas alternativas a largo plazo.

Se recomienda incluso que el periodo de análisis incluya al menos una rehabilitación.

Según el tipo de carretera se sugieren periodos de proyecto indicados en la siguiente Tabla 1.

TABLA 1
PERIODOS DE PROYECTO A ADOPTAR EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CARRETERA

TIPO DE CARRETERA	PERIODO DE PROYECTO (años)
Urbana de tráfico elevado	30 – 50
Interurbana de tráfico elevado	20 – 50
Pavimentada de baja intensidad de tráfico	15 – 25
De baja intensidad de tráfico pavimentada con zahorra.	10 – 20

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

El tráfico a tener en cuenta es el que utiliza el carril de proyecto. Se admite que en general, en cada dirección circula el 50% del tráfico total (aunque en ocasiones puede variar entre el 30% y el 70%) y que, dependiendo del número de carriles en cada dirección, puede suponerse que sobre el carril de proyecto circulan los porcentajes de tráfico en dicha dirección que figuran en la Tabla 2.

TABLA 2
DISTRIBUCIÓN DEL TRÁFICO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CARRILES

NUMERO DE CARRILES EN CADA DIRECCIÓN	PORCENTAJE DE EJES SIMPLES EQUIVALENTES DE 18 kips EN EL CARRIL DE PROYECTO
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 – 75

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Parámetro Z_R

Si se supone que para un determinado conjunto de variables definiendo un pavimento (espesores de las capas, características de los materiales que las componen, condiciones de drenaje.) el tráfico que puede soportar el mismo a lo largo de un determinado periodo de proyecto sigue una ley de distribución normal, con una media M_t y una desviación típica S_0 , mediante la tabla de dicha distribución se puede obtener el valor Z_R asociado a un nivel de fiabilidad R , de forma que haya una probabilidad igual a $1-R/100$ de que el tráfico realmente soportado sea inferior al valor $N-Z*S_0$.

Por ejemplo, para un nivel de fiabilidad R del 95%, Z_R es igual 1,96; valor que se incrementa a 2,58 si $R=99\%$.

Desviación estándar S_0

Tal y como se ha indicado en el párrafo anterior, representa la desviación estándar conjunta que engloba por una parte la desviación estándar de la ley de predicción del tráfico en el periodo de proyecto, y por otra la desviación estándar de la ley de predicción del comportamiento del pavimento, es decir, del número de ejes que puede soportar el pavimento hasta que su índice de servicio descienda por debajo de un determinado valor p_t . La Guía de la AASHTO recomienda adoptar para S_0 valores comprendidos dentro de los siguientes intervalos:

- pavimentos rígidos: 0.3 - 0.4;
- pavimentos flexibles: 0.4 - 0.5

Por otra parte en la guía se sugiere los niveles de fiabilidad indicados en la Tabla 3, de acuerdo con el tipo de carretera de que se trate.

TABLA 3
NIVELES DE FIABILIDAD A ADOPTAR EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CARRETERA

TIPO DE CARRETERA	NIVEL DE FIABILIDAD	
	URBANA	INTER URBANA
Autopistas y carreteras importantes	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Principales	50 – 80	50 – 80

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Índice de servicio final p_t y variación ΔPSI en el índice de servicio.

La selección del índice de servicio final p_t debe basarse en el índice más bajo que pueda ser tolerado antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o una reconstrucción.

Se sugiere para el mismo un valor de 2.5 o incluso superior para las carreteras de mayor tráfico y de 2.0 para tráficos menos importantes.

En cuanto al índice de servicio inicial p_0 , que a su vez interviene para determinar la variación $\Delta PSI = (p_0 - p_t)$, éste depende de la calidad de la construcción.

En los pavimentos del ensayo AASHTO, p_0 alcanzó un valor medio de 4,5 en las soluciones rígidas, y de 4,2 en las flexibles.

Coeficiente de drenaje C_d .

El valor del mismo depende de dos parámetros: la calidad del drenaje, que viene determinada por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento, y el porcentaje de tiempo a lo largo del año durante el cual el pavimento esta expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación, dicho porcentaje depende de la precipitación media anual, y de las condiciones de drenaje, la Guía define cinco calidades de drenaje, de acuerdo con la Tabla 4.

TABLA 4
CALIDADES DE DRENAJE

CALIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN EVACUAR
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	(el agua no se evacua)

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Combinando las variables anteriormente indicadas, se recomienda adoptar para C_d los valores indicados en la Tabla 5.

TABLA 5
VALORES DEL COEFICIENTE DE DRENAJE C_D

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD PROXIMOS A LA SATURACIÓN			
	MENOS DEL 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	MAS DEL 25 %
Excelente	1,25 – 1,20	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10
Bueno	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00
Mediano	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90
Malo	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80
Muy malo	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80 – 0,70	0,70

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Coefficiente de transmisión de cargas J.

Este factor se introduce para tener en cuenta la capacidad del pavimento de hormigón para transmitir las cargas a través de la discontinuidad (juntas o grietas). Su valor depende de varios factores:

- El tipo de pavimento (en masa, armado con juntas, con armadura continua);
- La existencia o no de dispositivos de transmisión de cargas (pasadores en los pavimentos con juntas, armaduras en los armados continuos);
- El tipo de arcén (de hormigón cosido al pavimento o flexible).

En función de estos parámetros, la Tabla 6 contiene los valores del coeficiente J

TABLA 6
VALORES DEL COEFICIENTE J DE TRANSMISIÓN DE CARGAS

BERMA	FLEXIBLE		DE HORMIGON	
DISPOSITIVOS DE TRANSMISION DE CARGAS	SI	NO	SI	NO
Junta sencilla y Junta reforzada	3,2	3,8 – 4,4	2,5 – 3,1	3,6 – 4,2
Armado continuo	2,9 – 3,2		2,3 – 2,9	

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

De cada intervalo de variación se recomienda adoptar los valores más altos cuanto menor sea el módulo de balasto, mas elevado el coeficiente de dilatación térmica del hormigón y más amplias las variaciones de temperatura.

Por el contrario, en los casos de carreteras de poco tráfico, soportando un número reducido de camiones, puede irse a los valores más bajos de J. Puesto que entonces habrá menos pérdida del efecto de engranaje entre los áridos.

Módulo de elasticidad E_c del hormigón

Se recomienda determinarlo de acuerdo con el procedimiento descrito en las normas, o en su defecto, correlacionarlo con otras características del material, como puede ser su resistencia a compresión.

Por ejemplo el valor que puede adoptar es de $2.82 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$.

Factor de pérdida de soporte LS.

Este parámetro viene a indicar la potencial pérdida de apoyo de las losas debida bien a la erosionabilidad de la sub-base o bien a asentamientos diferenciales de la subrasante; y aunque no aparece de forma explícita en la fórmula de diseño para la obtención del espesor, si interviene de forma indirecta a través de una reducción del módulo de reacción efectivo k de la superficie en que se apoyan las losas. En la tabla 7 se indican los valores de LS recomendados para distintos tipos de bases y sub-bases.

TABLA 7

VALORES DEL FACTOR DE PÉRDIDA DE SOPORTE LS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE BASE O SUB-BASE.

TIPO DE BASE O SUB-BASE	FACTOR DE PÉRDIDA DE SOPORTE LS
Bases granulares tratadas con cemento (E:70.000 a 140.000 kp/cm ²)	0,0 a 1,0
Sub-bases tratadas con cemento (E:35.000 a 70.000 kp/cm ²)	0,0 a 1,0
Bases asfálticas (E:25.000 a 70.000 kp/cm ²)	0,0 a 1,0
Sub-bases estabilizadas con asfalto (E:3.000 a 20.000 kp/cm ²)	0,0 a 1,0
Estabilizaciones con cal (E:1.500 a 10.000 kp/cm ²)	1,0 a 3,0
Materiales granulares sin tratar (E:1.000 a 3.000 kp/cm ²)	1,0 a 3,0
Suelos finos y subrasantes naturales (E:200 a 3.000 kp/cm ²)	2,0 a 3,0

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

En el caso de que, aún utilizándose sub-bases no erosionables, pudiesen producirse en la subrasante asientos diferenciales (por ej. Por la existencia de arcillas expansivas o por excesivo hinchamiento durante la época de heladas) deberán adoptarse para LS valores comprendidos entre 2,0 y 3,0.

**Módulo de reacción k de la superficie en la que se apoya el pavimento
(o módulo efectivo de la subrasante).**

El soporte que presta la superficie de apoyo al pavimento se expresa con el valor del módulo de reacción k , cuyos valores para el diseño de pavimentos están indicados en la Tabla 8.

TABLA 8
VALORES DEL MODULO “K”

“K”	TIPO DE SUELO	COMPORTAMIENTO
2.8 kg/cm³	limo arcilla	satisfactorio
5.5 kg/cm³	arenoso	bueno
8.3 kg/cm³	grava arenosa	excelente

Estos valores de k dependen de varios factores:

- El módulo resiliente de la subrasante
- El espesor de la sub-base
- El módulo de elasticidad de la sub-base

Para la determinación del módulo de elasticidad de la sub-base pueden utilizarse una serie de correlaciones con otros parámetros:

- En el caso de bases o sub-bases granulares, el índice CBR, el valor R utilizado en California o el resultado del ensayo triaxial de Texas. Se recomienda, no obstante, que el método de elasticidad de una sub-base granular no sea más de cuatro veces superior al de la subrasante sobre la que apoya.
- En el caso de bases tratadas con cemento, la resistencia a compresión a los 7 días.
- En el caso de una base asfáltica, la estabilidad Marshall.

Dado que el valor del módulo resiliente de la subrasante puede variar a lo largo del año, para determinar el valor del módulo k hay que realizar un proceso iterativo:

- Se divide el año en intervalos homogéneos dentro de los cuales el coeficiente de variación del módulo resiliente no sea superior a 0,15. En el caso de bases y sub-bases granulares no hay que olvidar que su módulo de elasticidad puede variar asimismo a lo largo del año.
- Utilizando el ábaco 4-I (Ver anexos I), en el que intervienen como variables de entrada el módulo resiliente de la subrasante, el espesor de la sub-base y el coeficiente de elasticidad de la misma, se obtiene el módulo de reacción compuesto de la subrasante.

- En el caso de que bajo la subrasante haya un estrato de roca a una profundidad menor de 3 m, el módulo de reacción compuesto obtenida en el paso anterior se corrige utilizando las curvas del ábaco 5-I (Ver anexo I).
- Se adopta un valor inicial arbitrario para el espesor de la losa.
- Con ayuda del ábaco 6-I (Ver anexo I) se obtiene lo que se denomina deterioro relativo U_r para el espesor de la losa supuesto y los distintos valores de k .
- Se calcula la media de los diferentes valores U , entrando de nuevo en el ábaco 3-I se obtiene el valor medio del coeficiente k para el mismo espesor.
- Finalmente se corrige el valor de k en función de la pérdida de soporte LS de la sub-base, con la ayuda del ábaco 7-I (Ver anexo I).

Determinación del espesor (D) del pavimento.

Una vez definidos los valores de los distintos parámetros, entrando con los mismos en la ecuación general del método AASHTO o bien en el ábaco 3-I (Ver anexo I) se obtiene el espesor de losa necesario. El valor deducido debe redondearse a la media pulgada más próxima.

1.4.2.- MÉTODO DE LA ASOCIACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

(PCA).-

A continuación se describen los lineamientos generales del método Portland Cement Association (PCA).

Factores de diseño:**a) Resistencia a la flexión del concreto**

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas.

El alabeo de pavimentos de concreto, bajo las cargas del tráfico, provoca esfuerzos tanto de compresión como de flexión. Sin embargo, la proporción de los esfuerzos a compresión contra la resistencia a la compresión del concreto, es mínima como para influir en el diseño de espesor de la losa. En cambio la relación de los esfuerzos a flexión contra la resistencia es mucho más alta y frecuentemente excede valores de 0.5. Por este motivo los esfuerzos y la resistencia a la flexión son los empleados para el diseño de espesores. La resistencia a la flexión del concreto es determinada por la prueba del módulo de ruptura, realizada en vigas de 6 x 6 x 30 pulgadas.

El módulo de ruptura puede encontrarse aplicando la carga en cantiliver, punto medio ó en 3 puntos. Una diferencia importante en estos métodos de prueba es que al aplicar la carga en 3 puntos se obtiene la mínima resistencia del tercio medio de la viga de prueba, mientras que los otros dos métodos muestran la resistencia en un solo punto.

El valor determinado por el método de aplicación de carga de 3 puntos es el empleado en este método de diseño. La prueba del módulo de ruptura es comúnmente realizada a los 7, 14, 28 y 90 días.

Los resultados a los 7 y 14 días son comparados contra especificaciones de control de calidad y para determinar cuando puede ser abierto al tránsito un pavimento.

Los resultados a los 28 días se han usado, generalmente, para el diseño de espesores de autopistas y calles; mientras que los resultados 90 días son usados para el diseño de aeropistas, esto es debido a que se presentan muy pocas repeticiones de esfuerzos durante los primeros 28 ó 90 días del pavimento, comparado contra los millones de repeticiones de esfuerzos que ocurrirán posteriormente.

Sabemos que el concreto continúa ganando resistencia con el paso del tiempo, como lo muestra la fig. 2. Esta ganancia de resistencia es mostrada en la curva que representa valores de módulo de ruptura (MR) promedios para varias series de pruebas de laboratorio, pruebas de vigas curadas en campo y secciones de concreto tomadas de pavimentos en servicio.

FIGURA 2



En este procedimiento de diseño los efectos de las variaciones en la resistencia del concreto, de punto a punto del pavimento, y el incremento de resistencia con el paso del tiempo, están incorporados en las gráficas y tablas de diseño. El diseñador no aplica directamente estos efectos, sino que simplemente ingresa el valor de la resistencia promedio a los 28 días.

b) Terreno de apoyo o base

El soporte dado a los pavimentos de concreto por la sub-base, es el segundo factor en el diseño de espesores. El terreno de apoyo está definido en términos del módulo de reacción de la subrasante de Westergard (k).

Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada (un plato de 30" de diámetro) dividido entre la deformación en pulgadas que provoca dicha carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi/in) ó más comúnmente, por libras por pulgada cúbica (pci).

Dado que la prueba de placa toma tiempo y dinero, los valores de k son usualmente estimados mediante una correlación de pruebas más simples como la del CBR (Valor Relativo de Soporte).

El resultado es válido porque no se requiere una exacta determinación del valor k ; ya que variaciones normales de este no afectan significativamente los requerimientos del espesor del pavimento.

La relación mostrada en la fig. 3 es correcta para estos propósitos. La prueba de caminos AASHTO comprobó, convincentemente, que la reducción de pérdida de terreno de soporte durante los periodos de descongelamiento no tiene efecto en el espesor requerido de los pavimentos de concreto.

Esto es cierto porque los pocos periodos en que los valores k son bajos durante el descongelamiento de la primavera se compensan con los largos periodos en que se congelan y los valores de k son mucho mayores que los asumidos para el diseño.

El contar con una sub-base permite incrementar el valor k del suelo que deberá usarse en el diseño de espesor.

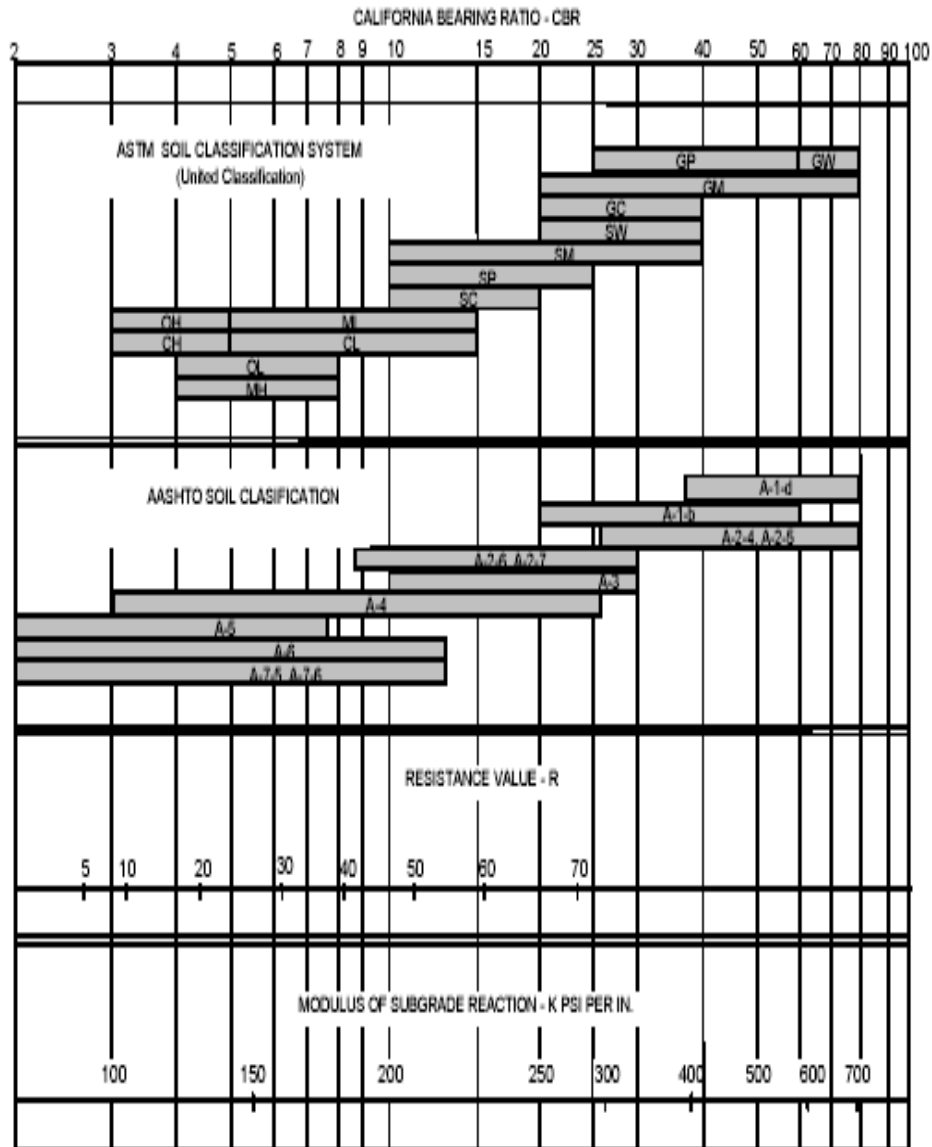


FIGURA 3

Si la base es de material granular no tratada o mejorada, el incremento puede no ser muy significativo, como se aprecia en los valores presentados en la Tabla 9.

TABLA 9
INCREMENTO DEL VALOR “K” SEGÚN EL ESPESOR DE UNA BASE
GRANULAR

“K” del Suelo (psi)	Espesor de la sub-base			
	4”	6”	9”	12”
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Los valores mostrados en la Tabla 9 están basados en el análisis de Burmister de un sistema de dos capas y cargado en pruebas de placa, hechas para determinar los valores k del conjunto suelo-sub-base, en losas de prueba completas.

Las bases mejoradas o tratadas con cemento aportan mayor capacidad de carga y su comportamiento a largo plazo es mucho mejor y son muy empleadas para pavimentos de concreto con tráfico pesado. Se construyen con materiales regulares como los tipos de suelos AASHTO A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3, el contenido de cemento es determinado mediante las pruebas de Congelación-Descongelación y Mojado-Secado y el criterio de pérdidas admisibles de la PCA.

Los valores de diseño del módulo de sub-reacción (k) para bases cementadas que cumplen con este criterio se muestran en la Tabla 10.

TABLA 10
INCREMENTO DEL VALOR “K” SEGÚN EL ESPESOR DE UNA BASE
GRANULAR CEMENTADA

“K” del Suelo (psi)	Espesor de la sub-base			
	4”	6”	9”	12”
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	

c) Periodo de diseño

En término de período diseño es algunas veces considerado sinónimo de período de análisis de tráfico. Dado que el tráfico muy probablemente no puede ser supuesto con precisión por un período muy largo, el período de diseño de 20 años es el comúnmente empleado en el procedimiento diseño de pavimentos. El periodo diseño seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuantos años y por ende para cuantos camiones deberá servir el pavimento.

d) Número de repeticiones esperadas para cada eje

Toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas, durante todo el periodo de diseño, de cada tipo de

eje. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito, como lo es el tránsito promedio diario anual (TPDA), el porcentaje que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el periodo de diseño.

Repeticiones esperadas

$$Re = TPDA * \%Te * FS * FC * Pd * FCA * 365$$

Donde: TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual.

%Te = % del TPDA para cada tipo de eje

FS = Factor de sentido

FC = Factor de carril

Pd = Periodo de diseño

FCA = Factor de Crecimiento Anual

365 = Días de un año

Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)

El TPDA puede obtenerse de aforos especializados o de algún organismo relacionado con el transporte, ya sea municipal, estatal o federal. Lo importante es que se especifique la composición de este tráfico, es decir que se detalle el tráfico por tipo de vehículo, para que de esta manera se pueda identificar los tipos y pesos de los ejes que van a circular sobre pavimento.

El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente el tráfico pesado,

es decir que se desprecie todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de cuatro llantas, debido a que el tráfico ligero no influye demasiado en el diseño de espesores.

Factor de crecimiento anual (FCA)

Para conocer el factor de crecimiento anual se requiere únicamente el período de diseño, en años, y la tasa de crecimiento anual.

TABLA 11
FACTORES DE CRECIMIENTO ANUAL SEGÚN LA TASA DE
CRECIMIENTO

FACTORES DE CRECIMIENTO		
Tasa de Crecimiento Anual del Tráfico %	Factor de Crecimiento Anual para 20 años	Factor de Crecimiento Anual para 40 años
1.0	1.1	1.2
1.5	1.2	1.3
2.0	1.2	1.5
2.5	1.3	1.6
3.0	1.3	1.8
3.5	1.4	2.0
4.0	1.5	2.2
4.5	1.6	2.4
5.0	1.6	2.7
5.5	1.7	2.9
6.0	1.8	3.2

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Con la ayuda de la Tabla 11 podemos calcularlo de manera rápida, ya que presenta relaciones entre tasas de crecimiento anual y factores de crecimiento anual para periodos de diseño de 20 y 40 años.

Si se desea obtener el factor de crecimiento anual del tráfico (FCA) de manera más exacta, se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{(1+g)^n - 1}{(g) * (n)}$$

Donde:

FC = Factor de crecimiento Anual

n = Vida útil en años

g = Tasa de Crecimiento Anual

El factor de proyección se multiplica por el TPDA presente, para obtener el TPDA de diseño representando el valor promedio para el periodo.

Factor de sentido

El factor de sentido se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para vialidades en doble sentido se utiliza un factor de 0.5 y para vialidades en un solo sentido un factor de 1.0.

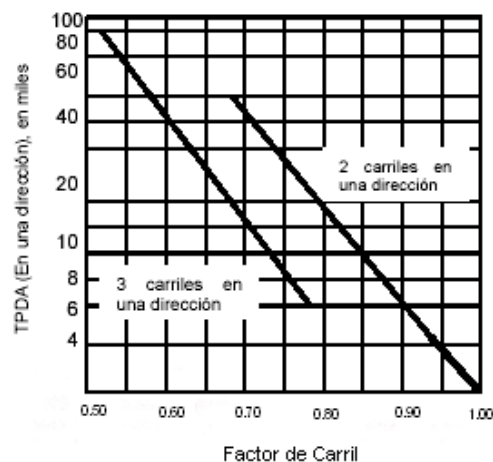
En el caso de vialidades de doble sentido, generalmente se asume que el tránsito (en sus diferentes tipos y pesos) viaja en igual cantidad para cada dirección (FS=0.5). Sin

embargo esto puede no aplicarse en algunos casos especiales en que muchos de los camiones viajan cargados en una dirección y regresan vacíos, si éste es el caso, se deberá hacer el ajuste apropiado y tomar en cuenta el sentido con mayor tráfico.

Factor de carril

Después de ser afectado el tráfico por el factor de sentido, también debemos analizar el número de carriles por sentido mediante el factor de carril. Este factor da el porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el de más tráfico. Para esto, la PCA recomienda emplear la fig. 4, en donde este factor depende del número de carriles por sentido o dirección del tráfico y del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.

FIGURA 4



a) Factor de seguridad carga

Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir ya que se conoce cuantas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje.

Los factores de seguridad de carga recomendados son:

- 1,3 Casos especiales con muy altos volúmenes de tráfico pesado y ningún mantenimiento.
- 1,2 Para Autopistas o vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tráfico y altos volúmenes de tráfico pesado.
- 1,1 Autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado.
- 1,0 Caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado.

Procedimiento de diseño.-

El método es empleado una vez que ya tenemos los datos del tráfico esperado, como el tránsito diario promedio anual y la composición vehicular del tráfico.

Con esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el periodo de diseño. El método presenta un formato empleado para resolver el diseño de pavimentos, el cual requiere de conocer algunos factores de diseño:

- Tipo de junta y acotamiento.
- Resistencia a la flexión del concreto (MR) a 28 días.
- El valor del módulo de reacción “K” del terreno de apoyo.
- Factor de seguridad de la carga (LSF).
- Número de repeticiones esperadas durante el periodo de diseño para cada tipo y peso de eje.

El método considera dos criterios de diseño:

- Fatiga
- Erosión

El análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento), influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas tienen o no pasajuntas) y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas.

El análisis por erosión (para controlar la erosión del terreno de soporte, bombeo y diferencia de elevación de las juntas), influye principalmente en el diseño de pavimentos con tráfico de mediano a pesado, con transferencia de carga por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Para pavimentos que tienen una mezcla normal de pesos de ejes, las cargas en los ejes sencillos son usualmente más severas en el análisis por fatiga y las cargas en ejes tandém son más severas en el análisis por erosión.

El diseño del espesor se calcula por tanteos con ayuda del formato de diseño de espesores por el método de la PCA.

1.5.- ESFUERZOS EN EL PAVIMENTO RÍGIDO.-

El pavimento de hormigón como consecuencia de su rigidez y elevado módulo de elasticidad, tiene considerable resistencia a la flexión denominada también de viga y alta capacidad para distribuir las cargas sobre un área de suelo relativamente amplia.

Las presiones sobre el suelo o material debajo del pavimento, son muy pequeñas por la distribución de las cargas sobre una amplia superficie. Por ello la resistencia a la flexión es el factor más importante en la determinación del espesor necesario de la losa y se deduce en consecuencia que los pavimentos de hormigón no requieren subrasantes resistentes.

Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a los esfuerzos siguientes:

- Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- Esfuerzos directos de compresión y cortamiento causados por las cargas de las ruedas.
- Esfuerzos de compresión y tensión, que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.
- Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.
- Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

Las tensiones producidas por el tráfico y por el gradiente de temperatura, son de mayor importancia que las restantes.

La acción de estos esfuerzos ya sea aislada o conjunta es la que origina un estado de tensiones en la losa. Para disminuir las producidas por las variaciones de temperatura, humedad y retracción del fraguado, el pavimento se divide en losas, por juntas debidamente dispuestas para que las tensiones producidas sean admisibles en la práctica.

Cuando no se toman en cuenta los esfuerzos de tensión generados en la base de la losa se puede generar el agrietamiento de las losas como resultado de la resistencia por fricción que se genera en la interfase losa-capa de apoyo.

Los esfuerzos en pavimentos rígidos se analizan en la losa de concreto y provienen de varios efectos:

1) Por efecto de las cargas

Estos esfuerzos son, en general, de los más importantes que pueden producirse. Como quiera que la resistencia a la compresión es importante, los esfuerzos de tensión producidos en la flexión de la losa, son los críticos. Para su cálculo se utilizan fórmulas originalmente obtenidas por Westergaard. Estas fórmulas están sujetas a la hipótesis de que la losa está formada por un material elástico homogéneo e isótropo; que los esfuerzos de interacción entre ella y el suelo soporte son verticales y proporcionales a las deflexiones de la propia losa y que ésta es horizontal y de espesor constante.

La segunda hipótesis implica continuidad entre losa y apoyo. Westergaard estudió tres condiciones de carga: en esquina, en el borde y en el centro de la losa.

Para la carga en esquina, la tensión máxima se produce en el plano bisector y el lecho superior de la losa.

La carga en el borde produce la tensión máxima en el lecho inferior y en la dirección paralela al borde de la losa. Cuando la carga obra en el centro, el esfuerzo máximo actúa en el lecho inferior y es, teóricamente el mismo en cualquier dirección.

2) Esfuerzos por temperatura

Estos esfuerzos pueden llegar a significar en la losa incluso más que los debidos a las cargas. Son principalmente de dos tipos: los de alabeo, que se producen cuando un lecho de la losa y el otro están a temperatura diferente, estableciéndose por ende flujo de calor transversalmente a la losa y los provocados por la restricción impuesta por el suelo de apoyo cuando la losa, calentada o enfriada uniformemente, trata de expandirse o contraerse.

Los esfuerzos de alabeo se producen cuando la temperatura ambiente sufre una alteración más o menos brusca, por ejemplo cuando una noche fría sigue a un día cálido.

Además, existen otros esfuerzos posibles en la losa de concreto, tales como los de fraguado inicial, los causados por cambios de humedad en el concreto o los de infiltración, debidos al acunamiento de agregados y materias extrañas en las grietas que puedan formarse en la losa, pero en general estos esfuerzos son de pequeña magnitud y no suelen tomarse en cuenta en los análisis.

Debe notarse que la condición crítica para el diseño de la losa no se obtendrá calculando todos los esfuerzos mencionados y sumándolos. Esto sería, sin duda una condición excesivamente conservadora. Por ejemplo en un día caluroso tras noche fría habría una combinación de esfuerzos por carga, más esfuerzos por alabeo, pero la

losa contraída en la noche, tenderá a expandirse en el día, por lo que la reacción de la restricción en el suelo soporte será de compresión; por lo tanto, ahora:

$$\sigma_{\text{crit}} = \sigma_{\text{cargas}} + \sigma_{\text{alabeo}} - \sigma_{\text{restricción}}$$

1.6.- ANALISIS DE COMPORTAMIENTO DE CAPAS DE APOYO.

Es de suma importancia, prestar atención especial a la preparación del terreno natural y al diseño y construcción de las subrasantes y sub-bases, para lograr la capacidad estructural y la comodidad de la marcha de vehículos en todos los tipos de pavimentos.

En el caso de pavimentos de concreto los requisitos pueden variar considerablemente dependiendo del tipo de suelo de la subrasante, de las condiciones ambientales y de la cantidad de tráfico pesado. Cualquiera que sea el caso, el objetivo deberá ser el poder obtener una condición de apoyo uniforme para el pavimento durante toda la vida útil de éste.

Debido a su rigidez, bajo un pavimento de hormigón no es imprescindible en principio un cimiento de elevada capacidad de soporte. Las presiones verticales bajo la losa son muy pequeñas: las máximas, medidas en diferentes condiciones de apoyo, no suelen superar los 0,035 Mpa con una carga interior de 65 KN sobre la losa de 20 cm, aunque son algo mayores en los bordes y en las esquinas.

Recíprocamente, la capacidad de soporte de la subrasante (o en general de la base de apoyo) tiene una influencia solo moderada en las máximas tracciones que provocan

las cargas en la losa. Los cálculos de Westergaard (1926) ya expresaban sus valores en la forma:

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{h^2} f\left(\frac{l}{a}\right)$$

Siendo:

P = Magnitud de la carga

h = Espesor de la losa

a = Radio de la huella circular producida por la carga

l = Radio de rigidez relativa de la losa

Este último viene dado a su vez por la expresión:

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K}}$$

Siendo:

K = Coeficiente de balasto (representa la deformabilidad o capacidad de soporte del apoyo y supone la proporcionalidad entre las presiones aplicadas p y los asientos d producidos: $K = p/d$).

E = Módulo de Young del hormigón.

ν = Coeficiente de Poisson del hormigón.

Dada la pequeña influencia de K , antiguamente el hormigón se vertía directamente sobre la subrasante, a menudo arcillosa y sin drenaje; aún se continúa con esta práctica en caminos agrícolas y forestales y otras vías de baja intensidad de tráfico.

Pero el aumento de las cargas y el de la intensidad del tráfico pesado hicieron necesaria la construcción de bases (y eventualmente sub-bases) para evitar el descalce de las losas por erosión del apoyo y para obtener una adecuada plataforma de trabajo.

En los países de clima frío existe, además la necesidad de proteger de la penetración de la helada a los suelos susceptibles a ésta.

Por tanto, se le pide a la subrasante, o en general a la capa de apoyo del pavimento, que sea uniforme en su capacidad de soporte y estable en el tiempo bajo la acción del tráfico y de los agentes atmosféricos.

Los métodos teóricos utilizados para el análisis de los pavimentos rígidos suelen suponer que las losas se hallan apoyadas en toda su extensión sobre una superficie continua y uniforme.

Este apoyo se traduce en un reparto muy grande de las cargas que circulan sobre el pavimento, de forma que las tensiones que originan dichas cargas son muy reducidas en comparación con las que se obtendrían si se considerara una sustentación parcial de las losas.

Sin embargo, en la práctica estas condiciones de sustentación continua de la cara inferior de las losas se dan en pocas ocasiones, produciendo de esta manera que la losa de hormigón tenga un mal funcionamiento estructural.

Los dos factores distorsionantes del comportamiento estructural del pavimento son: la falta de apoyo de las losas por el combado de estas, producido por las diferencias térmicas y la presencia de humedad, el otro factor se refiere a la deficiente transferencia de cargas en la zona donde se hallan las juntas, que es la que origina el defecto más frecuentemente observado en los pavimentos de hormigón sin pasadores sometidos a tráficos elevados: el escalonamiento de las losas.

Supóngase un pavimento en el que por una serie de causas el agua se haya acumulado debajo de las losas, y que debido a la existencia de gradientes térmicos o de humedad las losas se hallen curvadas bordes arriba.

Las ruedas como se ve en la Fig. 5, al avanzar hacia una junta, hará flectar progresivamente la losa cargada, desplazando el agua acumulada hacia la otra losa, con una velocidad relativamente lenta que no permite el arrastre de finos que puedan encontrarse debajo del pavimento por degradaciones de la base o de la berma, etc.

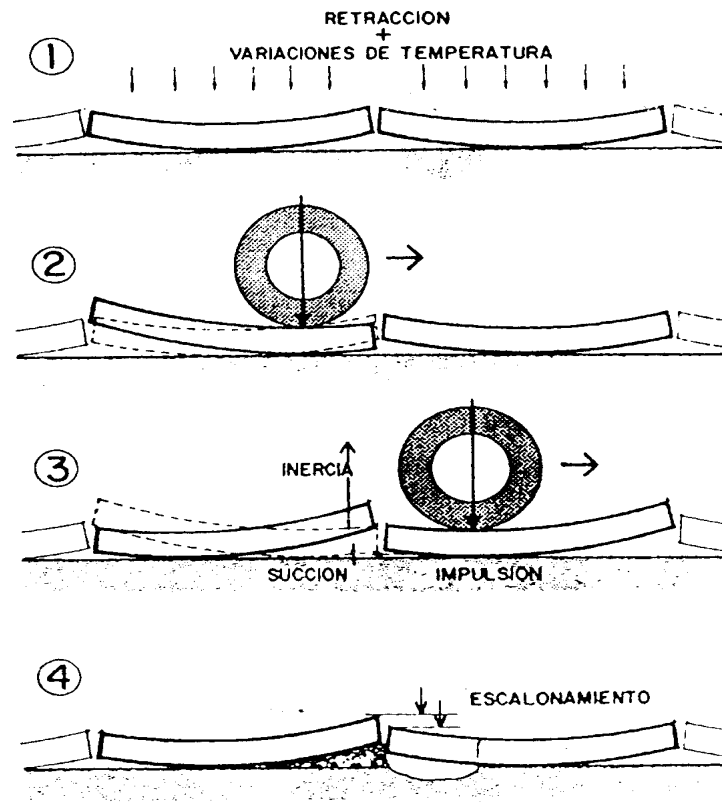
Si la transferencia de cargas entre las dos losas no es muy eficiente, al pasar la rueda a la losa siguiente se producirá un descenso brusco de ésta última, desplazando el agua hacia la losa anterior a una velocidad que, dependiendo de la magnitud de la carga y la brusquedad del choque, puede ser suficiente para provocar el arrastre de los finos.

Esta acción se ve incrementada por el levantamiento y la succión de la losa anterior al dejar de ser pisada por la rueda.

Los finos desplazados no pueden luego retornar a su posición primitiva por la poca velocidad del agua en sentido contrario, según se ha indicado, y por ello se termina

creando debajo de la primera losa un cordón de finos que es el causante del escalonamiento o desnivelación permanente.

FIGURA 5



Por tanto, para que se produzca el escalonamiento hace falta la presencia simultánea de los siguientes factores:

Agua debajo de las losas, que generalmente procede de las juntas no selladas o mal selladas, de los bordes longitudinales del pavimento o de las bermas.

Finos debajo de las losas, procedentes de la erosión de la base o de la berma o que han ascendido de las capas inferiores por bombeo.

Elevado tráfico pesado, que provoque deflexiones de intensidad y frecuencia suficientes para originar una eventual erosión, en las condiciones de transferencia de carga en las juntas sin pasadores.

De hecho, el escalonamiento es un fenómeno exclusivo de los pavimentos sometidos a tráficos medios y altos; la mayoría de los pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico se disponen directamente sobre una caja abierta en la explanada, sin que se observen en los mismos fenómenos de escalonamiento.

Las principales fuentes de finos bajo las losas son la base y la berma, sobre todo cuando se utilizan en los mismos materiales granulares sin tratar, o con un insuficiente contenido de conglomerante si están estabilizados.

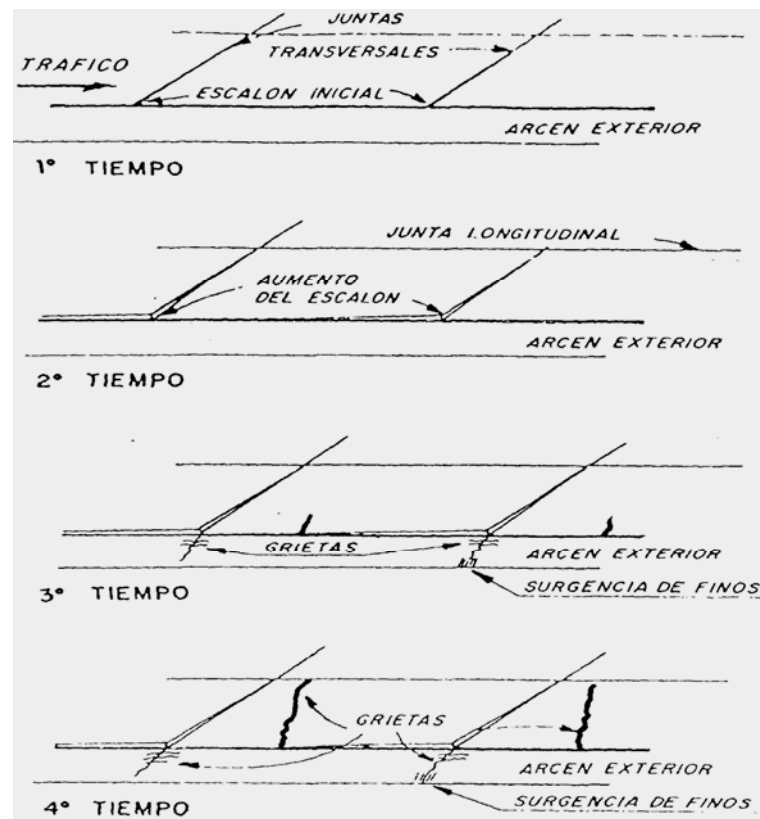
Se ha comprobado que en lo que se refiere a la resistencia, a la erosión de los materiales estabilizados, existe un umbral crítico de dicho contenido, por debajo del cual la erosionabilidad aumenta notablemente, mientras que por encima del mismo las diferencias son poco apreciables.

De todo lo anterior se deduce que el escalonamiento de las losas se traduce en no sólo en una disminución del confort de rodadura, sino también en una distorsión de las condiciones de apoyo de dichas losas:

En la losa anterior, el cordón de finos origina una sustentación discontinua. En la losa posterior, se forma una cavidad bajo la losa por erosión y arrastre de finos.

A continuación en la Fig. 6 pueden verse las etapas típicas en las que se desarrolla el deterioro por escalonamiento de un pavimento de hormigón situado sobre una base poco resistente a la erosión y adyacente a una berma granular recubierto por una capa de mezcla bituminosa, solución muy utilizada hace algunos años.

FIGURA 6



Un pavimento de este tipo con un escalonamiento severo suele presentar de forma generalizada fisuras y baches en la berma, en una banda longitudinal próxima al borde exterior del pavimento.

Por otra parte, los impactos producidos en las losas por los vehículos suelen traducirse en la aparición de una grieta transversal a 1-1,5 m. de la junta, en sentido aguas abajo del tráfico. La falta de apoyo uniforme de las losas puede originar además un agrietamiento adicional progresivo.

La forma del escalón da una idea del origen de los finos, Fig. 7. En una calzada de dos carriles por sentido, si dicho escalonamiento se nota en el borde exterior, desapareciendo al ir acercándose al centro de la calzada, casi con toda seguridad la causa misma está en la berma. Por el contrario, un escalonamiento debido a una base erosionable se acusa en todo el ancho de la junta, si bien puede que sea más acusado junto al borde exterior.

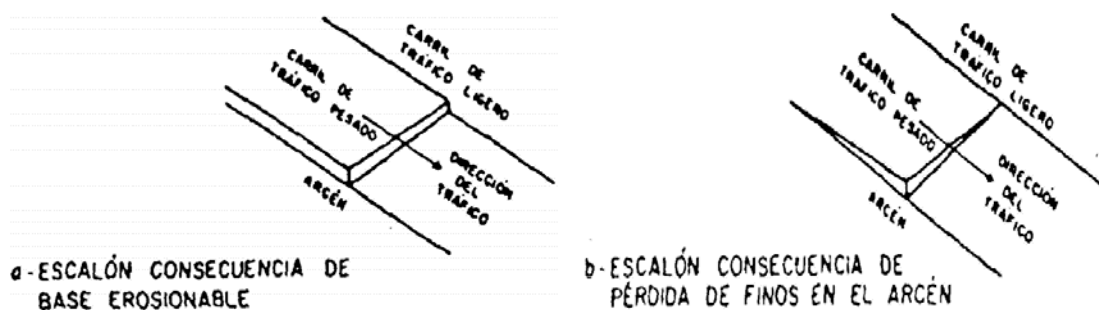


FIGURA 7

En consecuencia, para evitar o disminuir el escalonamiento se puede actuar en varios frentes:

- **Eliminando fuentes productoras de finos**, con la utilización de materiales no erosionables en la base y en la berma;

- ***Disminuyendo la entrada de agua bajo el pavimento***, mediante un sellado eficaz de las juntas y minimizando el tiempo en que dicha agua permanece bajo el pavimento mediante un drenaje, bien a través de la base o bien lateralmente por la berma;
- ***Aumentando la transferencia de carga en las juntas***, mediante la instalación de pasadores en las mismas o bien procurando disminuir su abertura, para lo cual son posibles varias medidas: utilización de losas de corta longitud, empleo de áridos calizos y de cementos de baja retracción, etc.;
- ***Disminuyendo el efecto nocivo de los vehículos*** a través de la deflexiones que provocan a su paso.

Además de acortar la longitud de las losas, se puede dar a éstas un sobreancho que aleje las cargas del borde, utilizar losas gruesas y disponer bermas de hormigón.

Estos últimos, además de colaborar estructuralmente con el pavimento, presentan una serie de ventajas adicionales, como son la de estar constituidas de un material erosionable, y permitir la posibilidad de un sellado eficaz entre el pavimento y la berma.

Dependiendo de las circunstancias especiales de cada obra (tráfico, clima), las diferentes medidas enumeradas anteriormente pueden ser o no adoptadas después de realizar un análisis que englobe su eficacia, economía y necesidad, a fin de escoger una alternativa adecuada.

CAPÍTULO II

PROCESO DE EJECUCIÓN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE ALTO RENDIMIENTO

2.1.- INTRODUCCIÓN

Los pavimentos de concreto tienen varias ventajas en cuanto a su proceso de ejecución con respecto a los pavimentos flexibles. Entre estas ventajas podemos mencionar las siguientes:

- Se terminan en una pasada, ya que la colocación es directa y la losa no requiere compactación.
- Se concluyen los trabajos más rápido; se dispone de plantas premezcladoras en casi cualquier lado.
- Facilidad de construcción; pueden colocarse de una manera simple.
- Pueden colocarse en climas fríos o calientes.

La correcta ejecución de pavimentos determina la durabilidad del mismo.

El procedimiento y las técnicas de construcción para pavimentos con concreto marcan las exigencias y problemáticas que intervienen en su correcta elaboración, así como la superficie donde se va a colocar el concreto, las herramientas y equipos necesarios.

Los buenos procedimientos de construcción son esenciales para todo pavimento de concreto, ya sea para una autopista como para una calle vecinal. Los mismos principios se aplican por igual, desde una obra de pavimentación al 100% de

compactación con equipo mecánico hasta una obra pequeña desarrollada por autoconstrucción con implementos manuales.

Es bueno recordar que una calle pavimentada correctamente con concreto tiene la gran ventaja de que prácticamente no tiene mantenimiento, una vez construida se puede olvidar de éste.

2.2.-ETAPAS EN EL PROCESO DE EJECUCIÓN.-

En la fabricación de un pavimento de hormigón pueden distinguirse las siguientes etapas:

- Acciones previas
- Excavación a nivel de la subrasante
- Construcción de la capa sub-base
- Preparación y puesta en obra de la losa de hormigón
- Proceso constructivo de juntas
- Proceso de curado del hormigón
- Puesta en servicio del pavimento terminado

2.2.1.- ACCIONES PREVIAS.-

En esta parte se incluyen todas las actividades que deben haberse realizado o al menos comenzado antes de empezar la ejecución propiamente dicha del pavimento de hormigón.

Son pasos importantes que se deben tomar en cuenta, la información obtenida de estas acciones previas y su observancia evitará problemas futuros, permitiendo así desarrollar correctamente el inicio y la terminación de los trabajos de pavimentación.

- **Planificación general.-** La primera actividad que debe realizarse antes de comenzar la ejecución de ninguna otra es una planificación general de la obra, cuya finalidad principal, de gran importancia, es poder evitar interrupciones y situaciones irreversibles durante la construcción que conllevaran simultáneamente a una falta de calidad y a un encarecimiento en la obra.
- **Alineamiento.-** Verificar el alineamiento del carril que se va a pavimentar, el hacer esta verificación determinará el trazo y las dimensiones además nos ayudarán a obtener las cantidades de materiales y equipo necesario para su pavimentación.
- **Levantamiento topográfico.-** Se deberá efectuar un levantamiento de la topografía del lugar obteniendo la información necesaria de todo lo largo y ancho de la carretera a pavimentar.

Esta información cotejada con la información obtenida del alineamiento deberá ser vertida en un plano o croquis con el que se podrá planificar toda la obra.

En el caso de que se implemente una planta cerca de la obra se tomará en cuenta los siguientes puntos:

- **Localización de materiales y la ejecución de ensayos previos.-** La elección de un yacimiento adecuado y el proyecto de la instalación que produzca los agregados al ritmo requerido y con la calidad necesaria o bien la elección del

suministrador, sientan las bases para una buena ejecución. Los ensayos previos tanto para la selección de los agregados, cemento y aditivos, como para el estudio de las dosificaciones, son simultáneas en esta fase. Dichos ensayos, junto con los condicionantes económicos y los plazos para obtener las resistencias a partir del tipo de cemento que se vaya a utilizar, permiten fijar la formula de trabajo del hormigón.

- **Acopio y abastecimiento de materiales.-** Es otra de las operaciones que debe empezar con anterioridad a la fabricación del hormigón, aunque luego prosiga a lo largo de la misma. Debido a los altos rendimientos de la pavimentación, los consumos de agregados, cemento, etc., son muy importantes. Por esta razón, conviene tener acopiado, antes de iniciar la ejecución propiamente dicha del pavimento. Un porcentaje importante de volumen total de agregados que dependiendo de la seguridad del suministro, es normal que supere el 50 % del total.
- **Montaje y la prueba de la planta de ejecución del hormigón.-** Con todas sus instalaciones anexas, bomba y mangueras para limpieza de camiones, suministro de agua, dispositivos para dosificación de aditivos, silos de almacenamiento de cemento, etc., es otra actividad que debe estar terminada con antelación al comienzo de la puesta en obra del pavimento. Además debe ponerse a punto en la zona de arranque de los trabajos todos los elementos mecánicos para el comienzo de la pavimentación, comprobando su correcto funcionamiento.

2.2.2.- EXCAVACIÓN A NIVEL DE LA SUBRASANTE.-

En obras urbanas es frecuente tener que remover fragmentos de cimentaciones antiguas, etc. En caso de que el tramo sea virgen, será necesario retirar fragmentos de roca, raíces de árboles de gran tamaño, si es que existen, etc.

Con la nivelación se ha determinado que materiales o porciones de terreno se deben excavar y de acuerdo con las características de éste se sabrá si son apropiados para usarse como material de relleno o si deben ser retirados de la zona de trabajo.

Después de la compactación de la capa subrasante la superficie debe ser nivelada, de manera que la superficie tenga la forma y medidas topográficas indicadas en el proyecto (tanto en el plano vertical como en el horizontal).

El material de excavación o corte demasiado arcilloso es preferible no usarlo como relleno o como parte de la estructura de soporte del pavimento, ya que entre las propiedades de las arcillas se cuenta las que son expansivas y esto provocaría alguna infiltración de agua, agrietamientos en el pavimento. El material arcilloso que se encuentre en forma natural, que no sea relleno y se encuentre por debajo de la estructura de soporte (sub-base) podrá dejarse siempre y cuando sea usado el material apropiado para la sub-base.

– **Rellenos y compactación.-**

Los rellenos sirven para dar el nivel apropiado de proyecto, sobre el cual se apoyará la estructura de sustentación del pavimento. Sus características dependerán del tipo de suelo del lugar.

Los rellenos se deben construir con materiales de aceptable calidad, apropiados para compactarlos, de modo que cumplan con lo especificado en el proyecto. Realizar en forma correcta los rellenos, evita que existan asentamientos irregulares y que los pavimentos se rompan cuando se abren al tráfico, dando lugar a los baches.

2.2.3.- CONSTRUCCIÓN CAPA SUB BASE.-

El material deberá cumplir con los requisitos mínimos de calidad. Durante la colocación y esparcido del material que constituye esta capa se deben evitar inclusiones de materiales extraños. Las capas compactadas deberán ser de 10 a 20 cm. Se evitarán al máximo zonas locales o bolsas de materiales plásticos, así como de compactaciones notoriamente irregulares.

Se procurará utilizar siempre el equipo adecuado, de acuerdo con el tipo de suelos, volúmenes de los mismos por colocar, espesor de sus capas, etc. Las cantidades de agua serán las indicadas por las pruebas de laboratorio; en campo se aplicarán los riegos necesarios para dar la humedad óptima de proyecto. Cuando se aplique el líquido, se tendrá cuidado que no provocar encharcamientos, también se evitará la infiltración de agua dentro de la capa subrasante y subyacente, pues esto tiende a reblandecerlas.

Las pasadas del equipo se iniciarán desde las orillas, con avances hacia el centro. Se deberán usar traslapes mínimamente de 30 cm., se considerará que la compactación es satisfactoria cuando se logre la densidad especificada.

La superficie terminada debe estar lisa, y paralela a la rasante de proyecto, libre de depresiones, mismas que no deberán ser mayores a 2 cm, no importa que el nivel exigido en los planos sea mayor o menor.

Los espesores y grados de compactación logrados se determinarán de manera rutinaria. Las irregularidades en la superficie se corregirán mediante escarificación y

remoción de material, en el caso de sobre elevaciones, agregado de material, perfilado y su correspondiente compactación.

- **Mezcla:** Los materiales podrán mezclarse en el sitio directamente o en planta. En este último caso los materiales se mezclan de manera homogénea, incluida la cantidad de agua de proyecto. Posteriormente la mezcla se transporta al sitio de colocación y se esparce en un periodo mínimo.

El mezclado en el sitio se inicia disponiendo los proporcionamientos de materiales para lograr la distribución granulométrica. Se inicia el mezclado mediante motoniveladoras, arados de discos, rastras agrícolas, o cualquier equipo apropiado hasta conseguir un mezclado homogéneo.

El agua se aplicará con carros aguateros, de manera uniforme, antes del mezclado, y conforme éste último avance, para lograr las humedades demandadas por el laboratorio.

- **Distribución y compactación:** La distribución en la geometría de la vialidad se ejecuta empleando motoniveladoras, esparcidores mecánicos o equipo similar. El material que se distribuya previo a la compactación, deberá estar libre de bolsas de materiales finos o francamente gruesos. En ningún caso se colocará material de sub-base sobre un material arcilloso, o en zonas reblandecidas.

Los materiales que constituyan esta capa deberán tener la humedad óptima o la más próxima a ella. En caso de que en campo se sobrepase el contenido de agua recomendado por el laboratorio, entonces se procederá a su aireación, para corregir el problema. En caso de sequedad se aplicarán riegos y mezclados adicionales.

Se continuará con las pasadas de rodillos hasta lograr una compactación uniforme, regular y con la densidad especificada.

Normalmente, la capa sub-base deberá alcanzar un grado de compactación del 95% respecto a las pruebas AASHTO T-180 (pisón de 4.5 Kg y alturas de caída 45.7 cm) en un ancho superior al del pavimento.

La elección del tipo de compactador, número y velocidad de las pasadas dependerá de varios factores, a saber, del tipo de material por colocar, de la humedad óptima, los espesores y la disponibilidad de equipo, etc.

Las irregularidades de perfilamiento vertical se corregirán por medio de escarificado, adición de material aprobado por la residencia de obra y su correspondiente compactación.

2.2.4.- PREPARACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE LA LOSA.-

Una vez preparada la capa sub base, el constructor puede proceder al colocado del hormigón, existen dos métodos de construcción: Con formas fijas y con pavimentadora deslizante. Este último es más comúnmente usado para carreteras y aeropuertos, el primero para calles, intersecciones, etc.

La pavimentadora deslizante no requiere encofrados, la máquina extiende, compacta y termina el hormigón en una sola pasada, la pavimentación con encofrados requiere un equipo que coloque y nivele los encofrados a través del perímetro del pavimento, los encofrados mantienen el hormigón en su lugar hasta que éste alcanza una resistencia mínima.

Generalmente los equipos deslizantes tienen mayores rendimientos y se prefieren en carreteras por su acabado muy plano y por que permiten el uso de hormigones más secos.

2.2.4.1.- FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN.

La fabricación del hormigón se la puede realizar de la siguiente manera:

- **En obra:** una vez determinada la dosificación más conveniente para preparar la masa de hormigón, hay que medir los materiales. El agua se mide en volumen; el cemento y los agregados en peso; si bien estos últimos pueden dosificarse también en volumen para obras de poca importancia. En tal caso, deben utilizarse recipientes de medida de poca sección y mucha altura, para minimizar los errores que se cometen en el enrase.

El hormigón debe amasarse en hormigonera, siendo conveniente por razones de homogeneidad, verter los materiales en el orden siguiente:

- ♦ Una parte de la dosis de agua (aproximadamente la mitad)
- ♦ El cemento y la arena simultáneamente
- ♦ El agregado grueso
- ♦ El resto del agua

La duración del amasado debe ser la necesaria para conseguir una mezcla íntima y homogénea de los distintos componentes, debiendo resultar el agregado bien cubierto de la pasta de cemento. Ello requiere en general un tiempo de amasado del orden del minuto y medio; como mínimo, un minuto más tantas veces quince segundos como fracciones de 400 lt. en exceso sobre 750 lt. tenga de capacidad la hormigonera.

- **En Planta:** una modalidad de elaboración de hormigón muy difundida es la del llamado “hormigón elaborado”. Se denomina así al hormigón fabricado en planta central para entregar en obra en estado plástico, de acuerdo a una especificación previamente convenida entre la empresa elaboradora y el usuario.

Las ventajas del hormigón elaborado son diversas, las más importantes son:

- Permite aprovechar las ventajas propias del sistema industrial de producción, logradas gracias al control de calidad. Esto permite obtener hormigones uniformes y con garantía de resistencia.
- Reduce notablemente los requerimientos de equipo y mano de obra y disminuye el manipuleo de materiales en obra y, por lo tanto, los requerimientos de espacio.

2.2.4.2.- TRANSPORTE DEL HORMIGÓN.-

Para el caso en que la obra de pavimentado sea bastante extensa, y haya sido necesario el montaje de una planta de fabricación del hormigón, el procedimiento para su transporte podría ser por camiones comunes, teniendo cuidado que las distancias no sean muy grandes, y además el hormigón este debidamente protegido para evitar pérdidas de agua por evaporación.

El transporte con camiones amasadores solo es admisible, en general, para obras pequeñas, en las que no se precisen rendimientos grandes, debido, entre otras razones, a la lentitud de descarga del hormigón.

En nuestro medio se ha visto que el transporte desde la hormigonera hasta el lugar de colocación, puede hacerse por múltiples procedimientos, para el caso en que las distancias sean cortas se puede citar que se usa carretillas, baldes, canaletas, cintas transportadoras, tuberías, etc., para distancias mas largas se puede usar camiones y lo que se esta utilizando últimamente son camiones amasadores (mixers). Cualquiera que sea la forma de transporte, deben cumplirse las condiciones siguientes:

- ◆ No debe transcurrir mucho tiempo entre el amasado y la puesta en obra del hormigón. Generalmente dicho intervalo no será superior de una hora cuando se empleen cementos Pórtland corrientes.
- ◆ Durante el transporte no deben segregarse los áridos gruesos, lo que provocaría en el hormigón pérdidas de homogeneidad y resistencia. La resistencia y choques favorecen siempre la segregación, por lo que a veces será necesario prever una suspensión especial en los vehículos de transporte.
- ◆ Debe evitarse, en lo posible, que el hormigón se seque durante el transporte.
- ◆ Como característica de la masa del principio al final de cada descarga de la amasadora, no es conveniente dividir una misma amasada en distintos recipientes para su transporte.
- ◆ Si al llegar al lugar de la colocación el hormigón acusa un principio de fraguado, la masa debe desecharse y no ser puesto en obra.

2.2.4.3.- PUESTA EN OBRA DEL HORMIGÓN.

En esta etapa se explicará como se realiza el vertido, colocación y compactación del hormigón en nuestro medio.

- **Vertido y colocación.-** El vertido y la colocación del hormigón deben efectuarse de manera que no se produzca la disgregación de la mezcla. El peligro de disgregación es mayor, en general, cuanto más grueso es el agregado y más discontinua su granulometría, siendo sus consecuencias peores cuanto menor es la sección del elemento que se hormigona.

Se tienen las siguientes recomendaciones:

- a) El vertido no debe efectuarse desde gran altura (uno o dos metros como máximo en caída libre), procurando que su dirección sea vertical y evitando desplazamiento horizontal de la masa.
 - b) La colocación se efectuará por capas de espesor inferior al que permita una buena compactación de la masa.
 - c) No se arrojará el hormigón con pala a gran distancia, ni se distribuirá con rastrillos para no disgregarlo.
 - d) En pavimentos de hormigón armados y, en general, cuando las condiciones de colocación son difíciles, puede ser convenientes, para evitar cangrejas y falta de adherencia con las armaduras, colocar primero una capa de dos o tres centímetros del mismo hormigón pero exento del agregado grueso, vertiendo inmediatamente después el hormigón corriente.
 - e) En el hormigonado de pavimentos, en sectores que tengan una cierta inclinación, el hormigón fresco tiene tendencia a correr o deslizarse hacia abajo, especialmente bajo el efecto de la vibración.
- **Compactación.-** Para que el hormigón resulte compacto debe emplearse el medio de consolidación más adecuado a su consistencia, de manera que se eliminen los

huecos y se obtenga un completo cerrado de la masa, sin que llegue a producirse segregación.

La compactación resulta más difícil cuando el hormigón encuentra un obstáculo para que sus granos alcancen la ordenación que corresponde a su máxima compacidad. Por esa causa, el proceso de consolidación debe prolongarse junto a los fondos y paramentos de los encofrados y especialmente en los vértices.

Los medios de compactación normalmente empleados en hormigón armado son: el picado con barra, el apisonado y el vibrado, aparte de otros métodos especiales como los de inyección, compactación por vacío y por centrifugación.

- a) La compactación por picado se efectúa por medio de una barra metálica que se introduce en la masa de hormigón repetidas veces, de modo que atraviese la capa a consolidar y penetre en la inferior. Este método se emplea con hormigones de consistencia blanda y fluida.
 - b) La compactación por apisonado se efectúa mediante golpeteo repetido con un pisón adecuado de diversas formas.
- **Uso de maquinaria sofisticada para la puesta en obra del hormigón.-** En otros países, la construcción moderna de pavimentos de hormigón para carreteras y aeropuertos se caracteriza por el predominio casi exclusivo de las pavimentadoras de encofrados deslizantes. Los equipos entre encofrados fijos han quedado prácticamente relegados en la mayoría de los países que cuentan con una buena economía a obras en las que en general no se requieren unos elevados ritmos de ejecución, como pueden ser los pavimentos secundarios o las superficies para usos industriales.

2.2.4.4.- TERMINACIÓN.

Una vez extendido el hormigón, además de algunos posibles retoques artesanales para quitar imperfecciones localizadas, y que hay que tratar de reducir al mínimo, es preciso dotar al mismo de una terminación superficial que garantice la obtención de unas adecuadas cualidades antideslizantes.

A este respecto hay que mencionar que una de las ventajas que presentan los pavimentos de hormigón es la facilidad con la que pueden dárseles una gran variedad de acabados superficiales. Entre éstos pueden mencionarse los siguientes:

- Textura transversal
- Textura longitudinal
- Denudado
- Engravillado
- Engravillado más denudado
- Hormigones porosos

A los anteriores habría que añadir una cantidad de tratamientos que es posible aplicar sobre el hormigón endurecido, y que suelen reservarse para pavimentos ya en servicio (fresado con discos de diamante, tratamientos con morteros de resina epoxi, etc.)

Las texturas generadas por estos tratamientos presentan características muy diferentes y en consecuencia también lo son sus propiedades antideslizantes y de generación de ruido. En este sentido, las dos soluciones que mejor resuelven el compromiso entre

estas dos cualidades aparentemente contradictorias (elevado rozamiento y bajo nivel de ruido de rodadura) son las texturas de tipo longitudinal y las de agregado expuesto mediante denudado.

2.2.5.- PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE JUNTAS.

La última operación que sufre un pavimento de hormigón consiste en la ejecución de las juntas transversales de contracción si las hay así como el eventual sellado de las mismas.

La necesidad de construir juntas en los pavimentos de hormigón es obvia, ya que de no hacerlo se presentarían grietas a intervalos bastante regulares debido a la contracción y dilatación del concreto.

Las juntas son, generalmente, puntos débiles de la superficie de rodamiento en los cuales pueden presentarse desperfectos al aumentar los pesos de los vehículos; pueden también, desportillarse por el efecto de elementos extraños en las mismas, tales como piedras, etc., provocando, además, un aumento en los gastos de conservación, por lo que es conveniente tener mucho cuidado en su proyecto y construcción.

Con la disposición de juntas se provocan las fisuras en la secuencia deseada, compatible con las características del hormigón. La inducción de la fisura se hace reduciendo la sección transversal del pavimento en un 25% como mínimo, y preferiblemente en un 33%.

En los pavimentos rígidos las juntas pueden dividirse en cuatro grupos principales:

- **Juntas de contracción.**

Las juntas de contracción se disponen para aliviar los esfuerzos de tensión producidos por la contracción del hormigón.

- **Juntas de expansión.**

Las juntas de expansión se disponen para permitir que las losas de hormigón se expandan una contra otra sin expandirse.

- **Juntas de construcción.**

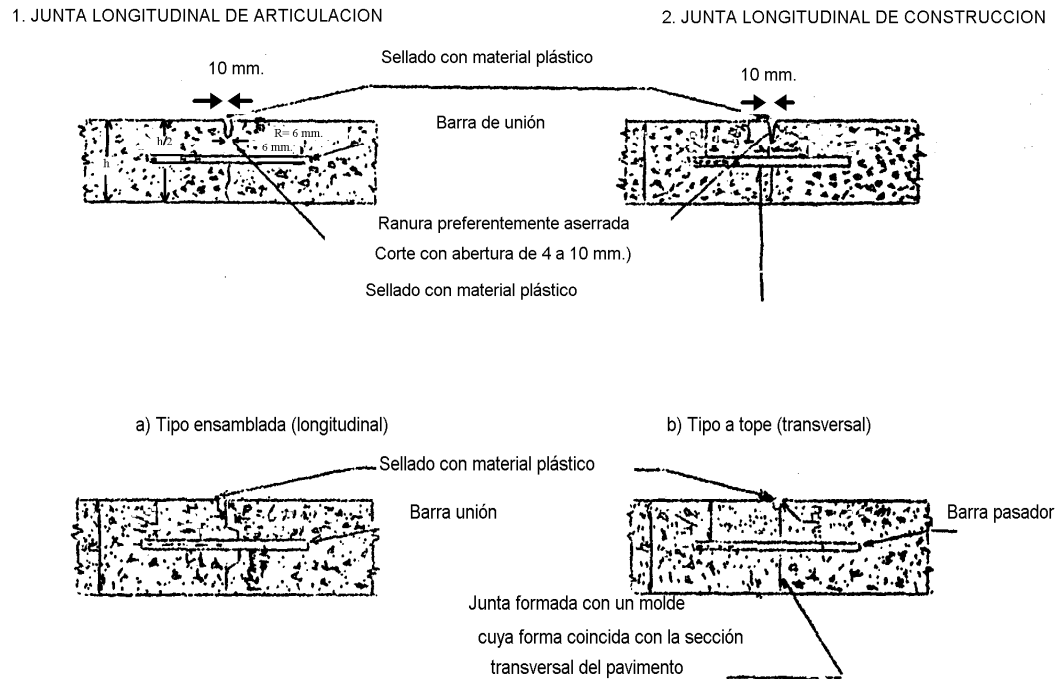
Las juntas de construcción corresponden a las interrupciones de las operaciones de colado y deben garantizar la continuidad estructural.

- **Juntas de alabeo o articulación.**

Las juntas de alabeo o juntas articuladas tienen por misión evitar los agrietamientos a lo largo del eje central de los pavimentos o en las líneas de unión de las diferentes hileras de losas que se producirían al elevarse sus bordes cuando la losa es cargada.

Las juntas suelen denominarse longitudinales o transversales, según en el sentido en que estén dirigidas dentro de la carretera.

FIGURA 8
DETALLE DE JUNTAS TRASVERSALES Y LONGITUDINALES
CON SUS PASADORES



A. Juntas longitudinales.

Las juntas longitudinales son aquellas que se construyen paralelas al eje del camino con el fin de permitir los movimientos relativos de las diversas losas. En los caminos, la cantidad de juntas longitudinales depende del ancho de calzada de los mismos, escogiéndose, muy común mente, en forma tal que ellas dividan a la calzada en el número de las vías necesarias para la circulación, como se muestra en la Fig. 9.

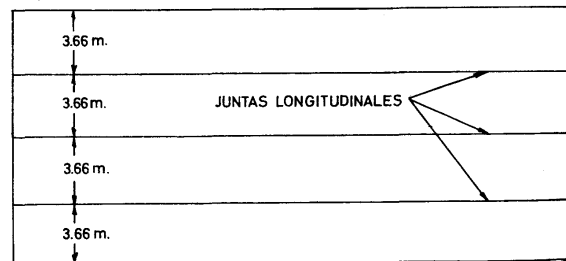
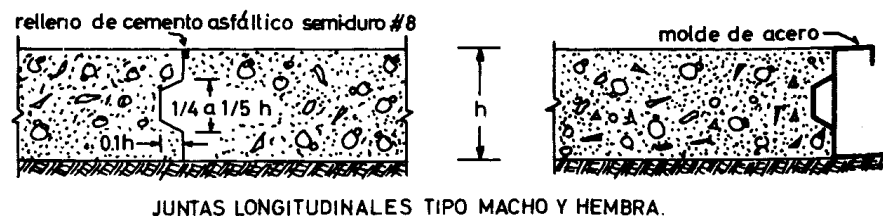


FIGURA 9

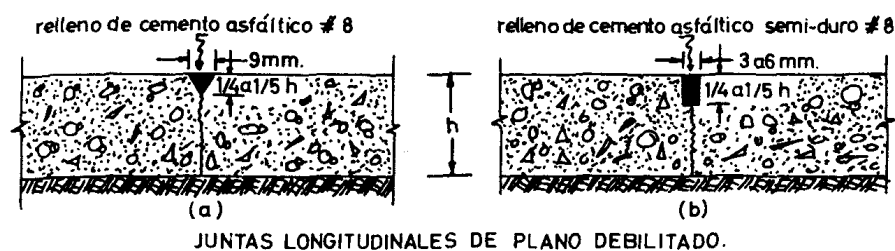
Aunque las juntas longitudinales pueden ser proyectadas y construidas de diferente manera, es muy común que se emplee el tipo macho y hembra que se muestra a continuación en la fig. 10.

FIGURA 10



Sin embargo en muchas ocasiones conviene pavimentar en una sola operación la anchura correspondiente a dos carriles, dividiéndola en seguida mediante una junta longitudinal de ranura del tipo similar a alguno de los que se muestra a continuación en la fig. 11.

FIGURA 11



Las dos juntas longitudinales anteriores (a) y (b) presentan una diferencia en la forma de llevar a cabo su construcción.

El tipo (a) se construye con una piedra de carborundum que se introduce una vez fraguado el hormigón. El tipo (b) se construye ya sea mediante una piedra carborundum como en el inciso (a) o bien mediante un listón de madera que se introduce inmediatamente después del vaciado o colocado del concreto. Estas juntas se llaman juntas de plano debilitado.

Cuando las juntas longitudinales son de construcción, deben efectuarse, en todos los casos, del tipo macho y hembra. Para ello se provee al molde lateral de una saliente trapecial para que se efectúe el moldeo de la forma indicada.

Generalmente se prefiere que los moldes sean metálicos, pero en el caso de ser de madera deben acoplarse para evitar las adherencias y aumentos de volumen por la humedad.

B. Juntas transversales.

Las juntas transversales en los pavimentos rígidos tienen por objeto evitar el agrietamiento debido al esfuerzo que se provoca por la contracción y alabeo de las losas.

Las juntas transversales de contracción usadas para evitar los esfuerzos debidos a la disminución de volumen, se construyen de manera análoga a las juntas de tipo de plano debilitado, o se emplean las llamadas juntas de contracción sumergidas.

Para determinar el espaciamiento L de las juntas transversales de contracción se hace el razonamiento siguiente:

La contracción o dilatación de una losa entre dos juntas transversales se ve, en parte, coartada por la fricción entre la losa y el terreno provocando con ello esfuerzos que pueden ser perjudiciales en las primeras horas de vaciado del concreto. Para una contracción de una losa, el máximo esfuerzo de tensión se producirá en la sección media y tendrá, en toneladas por metro cuadrado el siguiente valor.

$$S_2 = \frac{a * h * \frac{L}{2} * f * \gamma}{a * h} = \frac{L * \gamma * f}{2}$$

En la que:

L = Longitud de la losa en metros.

f = Coeficiente de fricción entre el suelo y el concreto, y varía de 0.5 a 2.5, usualmente 2.

γ = Peso volumétrico del concreto en tn/m^3 .

a = Ancho de la losa en metros.

h = Espesor de la losa en metros.

De lo anterior se deduce de inmediato la necesidad que se tiene de que la subrasante o la base sobre la cual se coloquen las losas de hormigón, sea lo más liso posible a efecto de no producir un anclaje perjudicial de las losas con el suelo. Cuando las losas se colocan sobre las bases granulares, parece ser que un riego de impregnación excedido ofrece una buena protección a las mismas y evita el fuerte anclaje del concreto a ellas. A continuación en base a la experiencia de otros países se dan los siguientes datos en la Tabla 12, estos valores que pueden en parte controlar las grietas de contracción considerando la calidad del agregado pétreo:

TABLA 12

TIPO DE AGREGADO	SEPARACIÓN MÁXIMA ENTRE JUNTAS
Granito triturado	7,40 m
Gravas calizas	6,00 m
Gravas silicosas	4,50 m
Escorias de alto horno	3,00 m

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Como se dijo anteriormente, las juntas pueden ser proyectadas y construidas de diferente manera, éstas se pueden crear tanto en fresco, como mediante el aserrado del hormigón endurecido.

Más adelante nos referimos como las juntas también pueden contar con la presencia de dispositivos especiales como son los pasadores, en caso de haber juntas transversales sin pasadores, es frecuente realizar éstas con un esviaje de $1/6$, orientado de tal manera que los vehículos al circular pisen la junta antes con la rueda izquierda que con la derecha. En cuanto a la separación de las mismas, en pavimentos de carreteras y autopistas puede estar comprendida entre 3,5 y 4,5 m aproximadamente, siendo también usual que no sea constante, sino que oscile entre los límites anteriores. Por el contrario, las juntas con pasadores se suelen disponer normales al eje de la calzada, con una separación fija de del orden de 5 m. En aeropuertos y otros tipos de superficies donde se utilizan pavimentos de mayor espesor, las distancias anteriores suelen aumentarse.

Cualquiera que fuere el procedimiento constructivo de las juntas, la profundidad de la ranura debe ser por lo menos igual a $\frac{1}{4}$ del espesor total de la losa.

La necesidad de sellar o no las juntas dependen de muchos factores, siendo uno de los más importantes la pluviometría de la zona. Se dispone de una gran variedad de productos de sellado, que en esencia pueden dividirse en productos aplicados en caliente o en frío y en perfiles preformados. Existen grandes diferencias tanto en su precio como en su durabilidad, por lo que en cada obra debería hacerse un balance entre los costes de instalación y de reposición de las distintas soluciones.

Es importante también analizar que el material que se utiliza de relleno no deje bordes, por ejemplo el mastique asfáltico, que prácticamente esta cayendo en desuso

debido a lo molesto que resulta este tipo de relleno por la irregularidad en la superficie y por la serie de brincos que provocan en el tránsito.

2.2.5.1.- DISPOSITIVOS ESPECIALES EN JUNTAS.

Con el propósito de mantener unidas las losas de hormigón, o con el fin de transmitir cargas verticales de una losa a otra, se emplean dispositivos especiales llamados pasadores y pasa-juntas.

Estos dispositivos se hacen de dos maneras, según el fin que con ella se persiga:

- a) Si su objeto es el de mantener con ellos unidas las losas, soportarán nada más cargas axiales. En este caso el esfuerzo máximo de tensión a que las barras pasadores pueden estar sometidas será igual al esfuerzo necesario para la fricción entre el pavimento y la sub-rasante o la base, en la distancia comprendida entre la junta y el bordo libre, del pavimento en el caso de que los pasadores se coloquen en las juntas longitudinales; si los pasadores se colocan en las juntas transversales, la distancia a considerar será entonces aquella que separa a dichas juntas dividida entre dos ($L/2$).

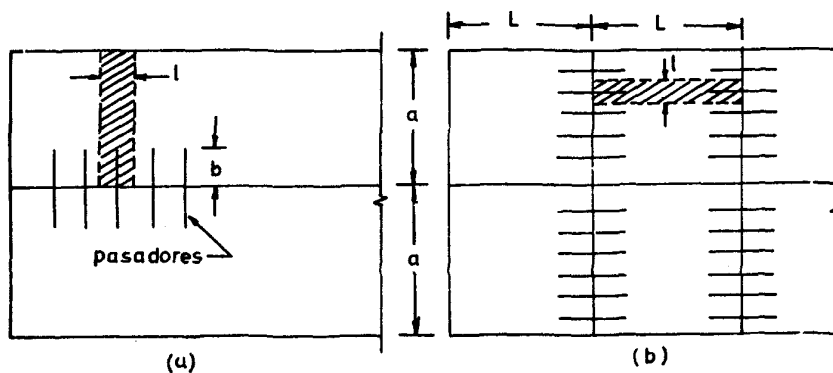


FIGURA 12

Es muy común emplear como pasadores varillas corrugadas redondas de 5/8" de diámetro.

La separación entre pasadores en el caso de que se coloquen en las juntas longitudinales como se puede ver la fig. 12 (a) se obtendrá de la igualdad.

$$l * a * h * \gamma * f = \frac{\pi * d^2}{4} * f_s$$

De donde, la separación entre pasadores será:

$$l = \frac{\pi * d^2 * f_s}{4 * a * h * \gamma * f}$$

l = Separación entre pasadores, en cm.

d = Diámetro, en cm de la varilla usada como pasador.

f_s = Esfuerzo de trabajo a tensión, en kg/cm^2 , del acero empleado como pasador.

a = Distancia en cm, de la junta al bordo del pavimento (fig. 12 (a))

h = Espesor, en cm de las losas.

γ = Peso volumétrico del concreto en kg/cm^3

f = Coeficiente de fricción del concreto con la subrasante o con la base (usualmente es 2).

La longitud de las barras pasadores que se emplean para mantener las losas unidas, dependerá de su adherencia con el concreto. La longitud b como se puede ver en la fig. 12 (a) se puede calcular con la formula siguiente:

$$p * b * u = \frac{\pi * d^2}{4} * f_s$$

Donde:

p = Perímetro en cm

b = Longitud de la barra en cm

u = Esfuerzo admisible de adherencia entre la barra y el concreto en
kg/cm²

d = Diámetro en cm

En el caso de que se empleen los pasadores en las juntas transversales, el procedimiento que se sigue es el mismo, nada más que ahora la longitud de la franja l, en vez de ser a, es L/2 como se ve en la fig. 12 (b).

Es prudente recalcar que, los pasadores que se emplean para mantener unidas a las losas deben ser varillas corrugadas que se adhieran bien al concreto.

Una vez calculada la longitud de la barra y la separación entre estas, que por cierto la separación no debe ser mayor a 75 cm, se procede a determinar el espacio entre una barra de unión extrema y la junta. Basándose en la experiencia esta última debe ser la mitad de la separación entre barras. Las barras se ubican en la mitad del espesor total de la losa.

Si el objeto de los pasa-juntas es el de transmitir cargas de una losa a otra, permitiendo que las losas puedan abrir y cerrar, pero manteniendo las losas a la misma altura, ellas deben formarse con varillas lisas redondas en las que un extremo de cada varilla debe estar engrasado o pintado para evitar su adherencia al concreto

(Ver fig. 8). Experiencias han demostrado que la longitud de las varillas pasa-juntas debe estar comprendida entre 30 y 40 cm de tal manera que penetren de 15 a 20 cm en cada una de las losas.

Es aconsejable que la separación entre barras no sea superior a 45 cm ni inferior a 20 cm; la separación entre una barra pasador extrema y el borde libre del pavimento, estará comprendida entre 22,5 y 10 cm, estas barras son ubicadas en la mitad del espesor de la losa.

2.2.6.- PROCESO DE CURADO DEL HORMIGÓN.

El objeto del curado del concreto es el de facilitar el desarrollo de la hidratación de cemento, así como el de reducir los efectos nocivos de las contracciones producidas por las condiciones ambientales (temperatura, viento, humedad, etc.), las cuales promueven fisuramientos aleatorios.

El concreto fresco gana resistencia más rápidamente durante las primeras semanas, pero continúa más lentamente por un período indefinido. El diseño estructural se basa generalmente en la resistencia a los 28 días, de la cual cerca del 70% se logra al final de la primera semana después de la colocación. La resistencia final del concreto depende en forma importante de las condiciones de humedad y temperatura durante este periodo inicial.

El concreto debe protegerse de la pérdida de humedad al menos por 7 días, y en trabajos más delicados, hasta 14 días.

El desarrollo de la resistencia de un hormigón está relacionado con el producto de la temperatura de curado ($^{\circ}\text{C}$) y el tiempo (t). Este producto recibe el nombre de “factor de madurez”.

Es deseable que el curado en obra se asemeje lo más posible al curado normal al que se someten las probetas en laboratorio, donde éstas se colocan a una temperatura entre 17 y 23 $^{\circ}\text{C}$, sumergidas en agua tranquila saturada de cal, enterradas en arena húmeda o colocadas en una cámara con una humedad relativa igual o superior a 90%.

Es de vital importancia controlar las temperaturas en las mezclas, así como la de tomar medidas que contrarresten los efectos del viento excesivo y de la humedad del aire. Existen diferentes formas de curar los pavimentos recién colocados:

- Método húmedo: por medio de aspersión o rociado de agua, arpilleras húmedas, arena húmeda, etc.
- Método de membranas: mediante la aplicación de compuestos para el curado (polietileno saturado, etc.)

Sin importar cuál sea el tipo que se utilice, el primer requisito para llevar a cabo el curado es que se aplique con oportunidad. Siempre se busca que se pueda iniciar en las etapas más tempranas posibles de la colocación del concreto, y toda vez que no se dañe la superficie.

2.2.7.- PUESTA EN SERVICIO DEL PAVIMENTO TERMINADO.

La esperada apertura al tráfico se debe efectuar por etapas, pues es necesario que el concreto alcance toda su resistencia para evitar daños severos a los pavimentos. Los

accesos a los pavimentos se deben bloquear con barricadas cuando los trabajos de acabado han finalizado y no se debe permitir el paso, excepto a quienes van a realizar alguna operación necesaria, como la aplicación de alguna membrana o cualquier otro material de curado. Respetando la siguiente recomendación los daños se minimizan o se eliminan: después de los tres primeros días, los pavimentos pueden ser abiertos al tránsito peatonal; después de 15 días, los pavimentos pueden ser abiertos el tránsito de vehículos ligeros como bicicletas, motocicletas y automóviles pequeños. Por último al tránsito pesado podrá ser abierto después de que el pavimento cumpla un mes de edad. En los climas fríos el periodo de apertura se debe extender más allá del mencionado, tantos días como la temperatura haya estado por debajo del punto de congelación.

Si se usa cemento de resistencia rápida, el intervalo de tiempo entre el acabado y la puesta en servicio se puede reducir a la mitad. También cuando se usa cemento puzolánico de resistencia tardía, los periodos de apertura recomendados se duplicarán.

- **Mantenimiento:** Cuando la construcción de los pavimentos a concluido y se han empleado en forma conveniente las buenas técnicas, el trabajo de mantenimiento se reduce a sólo limpiarlos, aunque en forma eventual, se pueden suscitar reparaciones por un sin número de eventos.
- **Limpieza:** La limpieza de la superficie del pavimento de concreto se debe efectuar mediante un barrido normal con escoba, rociándola previamente con agua para evitar que el polvo se levante. Nunca se debe lavar a chorro abierto de manguera ni a cubetazos de agua. Esto es absolutamente innecesario pues se desperdicia el agua que es más indispensable en otras aplicaciones.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN LA EJECUCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE ALTO RENDIMIENTO

3.1.- GENERALIDADES.-

En todas las industrias existen organismos de control, más o menos desarrollados, a fin de asegurar que se cumplan las especificaciones en cuanto a las características medibles de elementos fabricados, cuyo cometido consiste en verificar que la producción se mantenga dentro de determinados ámbitos preestablecidos de tolerancia, en lo referente a los valores de dichas características que se pueden medir.

El control de calidad es un conjunto de actividades destinado a verificar la condición del producto terminado y en base a los resultados obtenidos, aceptar o rechazar el producto.

En términos generales el término calidad está asociado a las necesidades y satisfacción del cliente y usuario; pero cuando se trata del proyecto y ejecución de las obras viales, la calidad supone una serie de elementos interrelacionados que conducen a pensar en un sistema de “control de calidad”. Esto significa que realizar alguna actividad con calidad no es una tarea fácil ya que intervienen varios factores y recursos.

Un sistema de control de calidad ideal debe contemplar y armonizar los objetivos, intereses, expectativas y demandas de los organismos estatales, el proyectista, el consultor y el usuario de la obra terminada. El presente trabajo se enfoca específicamente en el control de calidad en la ejecución de pavimentos rígidos.

3.1.1.- OBJETIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN PAVIMENTOS

RÍGIDOS.-

El control de calidad de cualquier obra consiste en verificar el cumplimiento de las hipótesis y las bases de diseño y proyecto, así como las especificaciones de materiales y procedimientos. Esta verificación se hace a través de mediciones, muestreos y ensayos de laboratorio.

La calidad de pavimentos rígidos depende de numerosos parámetros. Las condiciones de proyecto, construcción y durabilidad de las obras hacen necesario que productos como el hormigón sea completamente homogéneo y que propiedades tales como la resistencia cumplan con ciertos límites preestablecidos en las especificaciones. Para lograr este objetivo se debe estar en condiciones de actuar sobre los parámetros que condicionan las propiedades mencionadas y se debe establecer un control de calidad en toda la obra; pero este control debe adecuarse a las condiciones particulares de cada obra, analizando en cada caso:

- Infraestructura de control
- Organización de la faena
- Organización de la inspección técnica de la obra
- Propiedades que se desean controlar

Consecuentemente con los niveles de control, se realiza el análisis de las siguientes fases:

- Control de materiales que llegan elaborados a la obra

- Control de materiales que se elaboran en obra
- Control de la ejecución
- Control de la terminación de la obra.

3.1.2.- JUSTIFICACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD.-

Existen diversas razones de peso para justificar el control de calidad durante la ejecución de pavimentos:

La construcción de las vialidades es una inversión importante, de parte de los ciudadanos de una comunidad. Es decir, que el servicio que presentan los trabajos realizados a los usuarios, responda a las expectativas técnico-económicas que llevaron a su instrumentación.

La institución contratante debe conocer en que condiciones recibe la obra y si el precio que está pagando por cada trabajo es adecuado a la calidad resultante cuando los trabajos son realizados por administración directa, valen los mismos conceptos siendo la propia empresa que los lleva a cabo, el primer interesado en lograr un buen resultado.

3.2.- ORGANIZACIÓN PARA EL CONTROL DE CALIDAD.-

La fig. 13 "Organización del Control de Calidad", muestra en forma esquemática el ordenamiento de las actividades del Supervisor y su relación con el control de calidad, durante la ejecución.

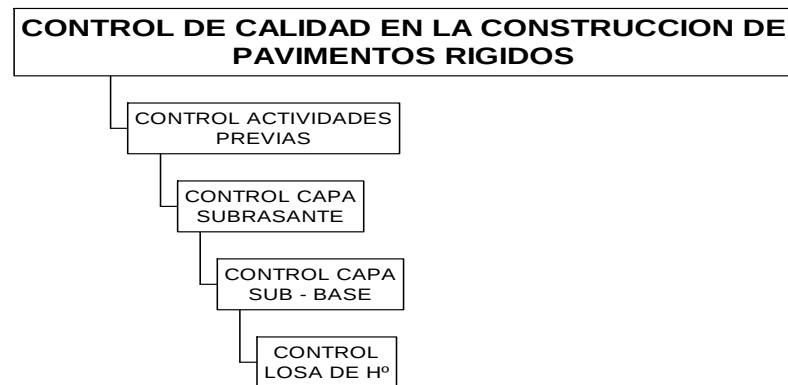


FIGURA 13

3.2.1.- ENCARGADO DEL CONTROL.-

El control de calidad recae principalmente en el Supervisor de los trabajos. El papel del Supervisor es el controlar, revisar, observar y registrar las actividades en ejecución. Son funciones básicas del Supervisor:

- Garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas y las reglas del buen arte, para el diseño y ejecución de los trabajos.
- Efectuar la medición y valorizar los trabajos apropiados para su pago, y llevar un control de la marcha de los mismos.
- Registrar la información recopilada durante la etapa de ejecución, que será de utilidad en el futuro para establecer la eficiencia y productividad de los procedimientos.
- Mantener una relación fluida entre el contratista y el cliente, a manera de asegurar la mejor operación y eficiencia de los trabajos, para la comunidad.

La mayoría de las actividades requieren, un control permanente del Supervisor y con este criterio, se elaboran las especificaciones técnicas. Esto implica una permanencia física en el lugar de trabajo, contrariamente a la práctica de limitar su participación en las instancias iniciales -para delimitar las áreas a reparar- y finales, para comprobar la calidad final, efectuar la medición y preparar la evaluación.

Algunos principios básicos en los que se apoya el esquema de control permanente o integrado son:

- El control de calidad antes y durante la ejecución permite corregir sobre la marcha prácticas inapropiadas, evitando que se prolonguen las obras por reparar trabajos defectuosos inspeccionados a destiempo.
- Muchas etapas del proceso constructivo pueden vigilarse por simple observación, resultando más sencillo y económico que un intenso muestreo y ensayos finales que puedan poner en evidencia dichos aspectos. Un ejemplo característico es el control de compactación, para el cual puede establecerse un número mínimo de pasadas de rodillo que asegure un nivel de compactación adecuado, en vez de tener que efectuar ensayos de densidad.
- Habiendo seguido las etapas constructivas, el Supervisor podrá eventualmente interpretar las anomalías que puedan hallar en algunos resultados, que de otra manera resultarían siendo interrogantes. Esto es esencial en el desarrollo de "experiencia".
- El control durante la ejecución y su aprobación por parte del Supervisor, facilita la aceptación definitiva del producto al concluir los trabajos. El control posterior a la ejecución del trabajo deja como alternativa la no aceptación de lo construido, que no beneficia ni al contratista ni al cliente, originando conflictos.

- El control integrado o continuo, armoniza los recursos del contratista con los del Supervisor, permitiendo comprobar la real aplicación de las exigencias. El Supervisor se orienta a asegurar la calidad de la obra y no a comprobar la mala calidad.

El Supervisor no puede cambiar, revocar o suspender los requisitos de las especificaciones, tampoco debe forzar al contratista a la aplicación de métodos rígidos, sino darle la posibilidad de acceder a nuevos procesos, que al fin se traducirán en adelantos de la técnica y en beneficios económicos, aunque siempre salvaguardando los requerimientos de calidad definidos en las especificaciones.

El Supervisor tampoco debe caer en el riesgo de convertirse en Director de los Trabajos, tarea que recae sobre el Ingeniero a cargo de la obra, por parte del contratista.

El control de calidad comprende tanto materiales, equipos y procesos constructivos, siendo necesario establecer los parámetros relevantes de cada actividad o etapa.

3.2.2.- INSTRUMENTOS DE CONTROL

Las especificaciones y normas para el diseño y construcción de una carretera si bien están orientadas a incrementar su calidad, es imprescindible disponer de un sistema que permita conducir el proceso de control de calidad de la manera más apropiada.

La inspección de los trabajos, el muestreo de materiales y las pruebas de laboratorio son procedimientos de control de calidad, destinados a hacer cumplir las especificaciones técnicas.

Es a través de éstas que se establecen:

- Los parámetros que definen el nivel de calidad.
- Los procedimientos y equipos para lograrlo.
- Los ensayos y su interpretación para comprobarlo.

El Supervisor cuenta con instrumentos legales y físicos para llevar a cabo con éxito sus funciones.

Los instrumentos legales están constituidos por los documentos de licitación y las especificaciones técnicas, éstos componen la documentación del contrato, en la que debe existir una definición precisa de los trabajos, con especificaciones concisas y actualizadas y un medio flexible, apto para conducir con éxito los trabajos de cada una de las actividades de construcción de pavimentos.

Los instrumentos físicos están constituidos por el laboratorio de materiales y los equipos de medición, actuando en forma armonizada con el Supervisor. Se espera de éste, preparación técnica, experiencia de obra, sentido común y ecuanimidad.

3.2.3.- ETAPAS EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO

Llamamos proceso constructivo al conjunto de actividades que secuencialmente permiten el desarrollo de una obra determinada hasta su total conclusión.

De esta manera, la construcción propiamente dicha es el producto de una serie de actividades las cuales pueden ser agrupadas en tres etapas fundamentales: concepción, ejecución y aplicación.

- **Concepción.-** Esta etapa es la correspondiente a la concepción de la obra, en la que básicamente participan el propietario y el proyectista, el primero plantea las necesidades y requerimientos en tanto que el segundo las posibles soluciones.
- **Ejecución.-** Esta etapa corresponde a la construcción de la obra, en la que intervienen la selección de los materiales y la misma ejecución de la obra como actividades secuenciales.
- **Aplicación.-** Es la actividad en la que intervienen dos actividades que debieran ser simultáneas: el uso y el mantenimiento.

3.2.4.- REQUERIMIENTO EN EL PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD

En obras viales una vez superada la necesidad de “Cantidad”, surge el interés por la “Calidad” de las mismas, hecho que deriva en un control más o menos organizado correspondiente al proceso constructivo.

Los elementos que se consideran importantes dentro de la ejecución del control de calidad (cuando no determinantes), son el factor humano y el procedimiento de muestreo.

- **Factor Humano.-** Las principales fallas en la construcción en general se deben al factor humano, que en el futuro deberá ser objeto de mayor atención, al tener una importancia capital en el resultado final del proceso constructivo.

- **Muestreo.-** El criterio de muestreo tradicional señala el muestreo como la toma de las partes “representativas” del conjunto, donde el muestreo lo realiza el inspector con determinada experiencia y criterio como para escoger la muestra que represente la calidad media del total del conjunto.

Las técnicas modernas del control de calidad establecen un muestreo aleatorio, que no es otra cosa que un procedimiento objetivo en el que una muestra es tomada al azar por cualquier persona sin que ésta necesite una preparación para el efecto.

En el presente estudio se realizó el muestreo de acuerdo a las especificaciones técnicas del proyecto, obteniendo de este modo datos representativos de la zona en estudio.

- **Tamaño de la muestra.-** Se debe plantear una metodología para la obtención de datos, que debe ser adoptada de manera que el muestreo no sea excesivo a fin de evitar incrementos importantes que afecten la economía del proyecto y asimismo sea el suficiente como para orientar la toma de decisiones en el menor tiempo posible en la consiguiente aceptación o rechazo del lote.

3.2.4.1.- TERMINOS ESTADISTICOS DE CONTROL DE CALIDAD

Se enunciará de una manera simple y concreta los términos estadísticos a emplear en la elaboración del control de calidad propuesto.

- **Medidas de Valor Central.-** La medida de valor central más representativa es “la media” y es el número más simple y más útil, asociado a un conjunto de datos.

Se define como el promedio aritmético de todos los datos de la muestra; así para: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ que son todos los valores observados en una muestra de tamaño “n” obtenida de una población, $\bar{X}$ la media se determina por:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- **Medidas de Dispersión.**– El concepto de dispersión de los datos está en correspondencia con la tendencia de éstos a extenderse alrededor de un valor medio, entre los elementos más empleados citamos a continuación:

- a) **Varianza:** Es una medida de dispersión mucho más satisfactoria, se presenta como un concepto análogo al momento de inercia, debido a que relaciona el cuadrado de distancias desde un centro de gravedad (que no es otra cosa que la media). La expresión que la define es:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$$

- b) **Desviación Estándar:** La expresión matemática es análoga al radio de rotación de una sección estructural, y resulta ser la raíz cuadrada positiva de la varianza (σ^2); tanto la varianza (σ^2) como la desviación estándar (σ) depende de la forma y no de la dimensión, así, la adición de una constante a todos los valores observados alteraría la media pero no la desviación estándar.

La desviación estándar (σ) cuanto más pequeña es su magnitud, los datos se concentran más alrededor de la media, hecho que denota una mínima dispersión de los resultados.

La siguiente relación nos permite calcular la desviación estándar de una serie de datos:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

- **Errores:** Asociado al concepto de las medidas de dispersión se encuentra el concepto del “error” que está inmerso en toda medida experimental, siendo la determinación de su magnitud fundamental para evaluar la validez del valor medido.

La siguiente relación define el error en su valor absoluto determinado en la obtención de los resultados que comprende la variable X_1 :

$$\delta X_1 = |X - X_1|$$

Donde X_1 es el valor medido y X es el valor real generalmente desconocido; así la siguiente relación permite, a partir de una serie de medidas, estimar la magnitud del error de acuerdo con los valores extremos, que en la práctica estadística se constituyen en los límites superior e inferior.

- **Cartas de Control:** El apunte gráfico de las pruebas de control tiene el propósito principal de mostrar las tendencias de los resultados (en unidades de variable u otras dimensiones), respecto a los valores límites especificados máximo y mínimo, los cuales representados por líneas, dividen el gráfico en dos áreas: el área de productos aceptables y el área de productos defectuosos.

Una carta de control incluye los “límites de control” superior e inferior, los cuales definen una banda con la inclusión de los límites especificados. El exigir que el producto se enmarque entre los “límites de control”, equivale a exigir una mayor precisión en el proceso de producción. Sin embargo el producto resultante entre las líneas de control y los límites de tolerancia especificados (área denominada de corrección).

Los límites de control superior e inferior deben ser calculados por los procedimientos estadísticos recomendados según el método de control adoptado de manera de no desvirtuar el proceso en sí, sin embargo, algunos autores adoptan la determinación de estos límites por medio de resultados previamente obtenidos en alguna experiencia anterior.

El principal propósito de la elaboración de cartas de control estadísticas es el diferenciar las variaciones de carácter sistemático (inevitables) del proceso en estudio, de aquellos de carácter accidental (que podrían evitarse). Esto permite determinar cuando el proceso está fuera de control y conlleva al planteamiento de medidas correctivas en algún punto del proceso de producción.

3.2.5.- NIVELES DE CONTROL.-

Una gran variedad de materiales y equipos influye en la calidad del producto final según características propias, de manera que algunos actúan en forma decisiva, mientras que otros cumplen una labor simplemente complementaria.

El nivel de control es el grado de control a ejercer sobre un determinado elemento de la producción en relación a su influencia con la calidad del resultado final.

Los niveles de control deberán adecuarse a los objetivos planteados para la ejecución de un determinado proyecto debiendo ser concordantes con lo especificado para la construcción de manera que sirvan de garantía para alcanzar el nivel de calidad esperado.

La esencia del control de calidad en pavimentos rígidos, es la utilización de los resultados y de pruebas en relación con las materias primas, la planta, el concreto fresco y el concreto endurecido, con el objeto de mantener y regular la calidad de la producción de acuerdo con los requisitos especificados y en una forma económica.

3.2.6.- FORMAS DE CONTROL.-

El control propiamente dicho y los niveles que debe alcanzar se circunscriben a dos formas de control, aunque diferentes pero complementarias entre sí.

- **El control de producción**

Es un control interno, llevado a cabo por la misma persona o entidad responsable, de una determinada actividad, está orientado bajo la premisa de optimizar los procedimientos de producción, así como verificar la eficacia de los materiales, para asegurar de esta manera el empleo de materiales aptos y mecanismos óptimos.

- **El control de recepción**

Es un control externo, llevado a cabo por una persona o institución (supervisión) que recibe el producto resultante de la actividad desarrollada por el contratista. Este control permite la aprobación o rechazo de las obras de acuerdo con las especificaciones establecidas.

Aplicado el control en cualquiera de sus formas, su eficacia es función directa del nivel de control que se emplee y básicamente depende de los siguientes aspectos:

- El grado de independencia entre el control y el proceso controlado.
- Frecuencia y extensión (intensidad y alcance), del control a efectuar.
- El criterio de aceptación y acciones a tomar en caso de no cumplimiento de los requisitos mínimos para una buena calidad.

Estos tres elementos permiten clasificar los niveles de control en tres: control reducido, control normal y control intenso.

- **Control reducido**

Es el nivel de control que se aplica sobre los elementos, cuya influencia en la calidad del producto final es mínima pese a ser su presencia imprescindible en el proceso, por lo general estos elementos son intrínsecos a los ítems correspondientes o son simplemente de carácter contractual.

Ejm:

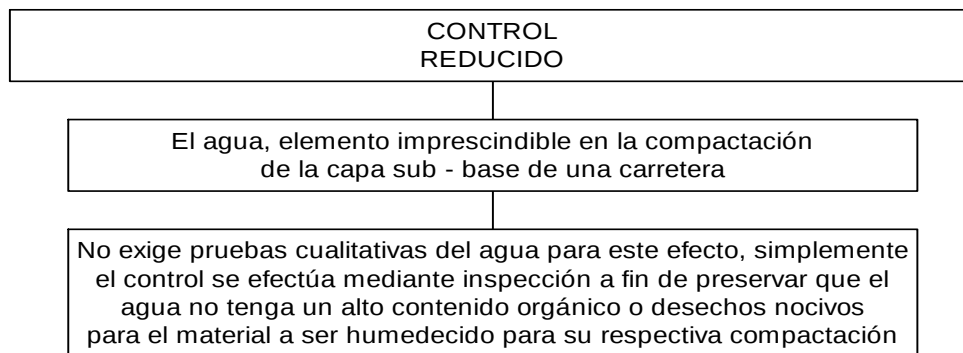


FIGURA 14

- **Control normal**

Este nivel de control es el que se aplica sobre aquellos elementos que son básicos para la elaboración del producto final, y tiene por objeto determinar si el material, equipo o procedimiento es aceptable para poder alcanzar la calidad deseada de acuerdo con los criterios y especificaciones previamente establecidas.

Ejm:

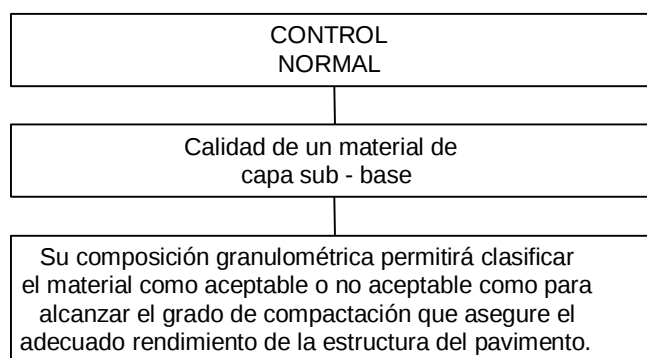


FIGURA 15

- **Control intenso**

Es el nivel de control a aplicar sobre elementos decisivos para la calidad del producto final y que permite clasificarlos en aceptables o rechazables para la producción propiamente dicha. Este control tiende a eliminar en grado extremo la falla del elemento construido, que de producirse constituye un elemento de alto riesgo para la seguridad y la vida humana, además de ocasionar pérdidas económicas de consideración.

Ejm:

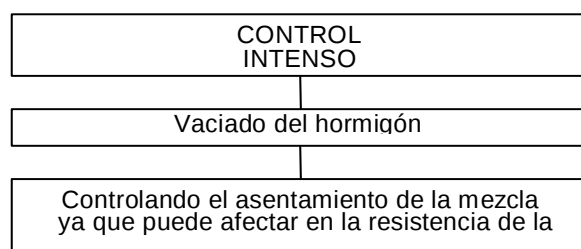


FIGURA 16

3.2.7.- NIVEL DE CONFIANZA

Asociado al concepto de nivel de control se encuentra el nivel de confianza, que puede definirse como el factor que permite establecer el grado de riesgo a la probabilidad de acierto al que se somete el resultado final de un proceso productivo en su aceptación o rechazo.

Se presentan dos tipos de riesgo:

- **Riesgo del productor:** Que está en directa relación con la probabilidad de rechazar un producto aceptable que cumpla con los requisitos establecidos por las especificaciones.
- **Riesgo del receptor:** Que corresponde a la probabilidad de rechazar un producto inaceptable que no cumpla con los requisitos de producción.

El nivel de confianza estará definido por el factor de riesgo del receptor puesto que una alta probabilidad de rechazo aumenta la seguridad de que aceptarán solamente productos de alta calidad, sin embargo deberá ser manejado criteriosamente debido a que podría determinar un incremento innecesario en los costos de producción.

La siguiente Tabla 13 presenta una relación entre los niveles de control descritos y los niveles de confianza a aplicar.

TABLA 13

NIVEL	REDUCIDO	NORMAL	INTENSO
Grado de independencia entre control y proceso	Independencia entre control y proceso, no es ningún requisito	Puede existir interdependencia en algunos puntos del proceso	Totalmente independiente a objeto de buscar un 100% en la calidad
Frecuencia y extensión	Los controles son esporádicos breves y por simple inspección	Control sistemático, no permanente. Se cumple un plan de muestreos para analizar el producto.	El control es permanente y se aplica en todas las etapas y componentes del proceso
Criterio de aceptación y acciones a seguir	Verifica el cumplimiento de requerimientos contractuales. Instruir ejecución acorde con especificaciones y la “buena ejecución”	Plantea tolerancias en función a lo especificado. Controlar puntos importantes para determinar fallas y corregirlas en su origen	Se aplican las exigencias del proyecto con mayor rigidez. Exigir estricto cumplimiento a los requerimientos de calidad del proyecto.
Comentarios adicionales	Es la forma de control más económica. No requiere de personal especializado	Requiere personal relativamente preparado para el control	Los costos de control son elevados al requerir equipo y personal altamente capacitados
Nivel de confianza	0.80 – 0.90	0.90 – 0.95	0.95 – 0.995

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

3.2.8.- FRECUENCIAS DE CONTROL EN LA EJECUCIÓN.

El control de ejecución de los trabajos se basa en un conjunto de tareas de control, las que se repiten con cierta frecuencia. Sin entrar en los detalles propios de cada actividad o trabajos, las frecuencias con que se realizan estas tareas de inspección se pueden dividir en:

a) Inspección Única.

Ciertas actividades requieren una sola inspección en circunstancias normales. Por ejemplo, la revisión del equipo del contratista, cuando llega por primera vez al sitio, a menos que el equipo no funcione apropiadamente o que una unidad haya sido reemplazada, normalmente no hay necesidad de revisar otra vez.

b) Inspección en Punto Crítico.

Una inspección de punto crítico, es esencialmente la que se lleva a cabo sólo una vez y que debe ser realizada en un momento específico en la secuencia de ejecución, antes que se lleve a cabo la siguiente etapa de ésta. Un ejemplo es la inspección de moldes y disposición de barras de acero, antes del colado del concreto.

En las especificaciones técnicas se indican algunas situaciones que, para continuar requieren de la aprobación del Supervisor. Es necesario que el contratista de aviso anticipado para que el Supervisor proceda a efectuar la inspección del punto crítico; la falta de aviso puede considerarse como una infracción seria de las especificaciones, por parte del contratista.

c) Inspecciones Intermitentes del Sitio.

Muchas de las actividades pueden ser inspeccionadas y controladas adecuadamente a través de inspecciones casuales o regulares de los sitios donde se realizan, a medida que avanza el trabajo.

d) Control Continuo.

Debido a su naturaleza inherente, crítica o variable, algunas operaciones requieren la presencia plena del Supervisor. La colocación del concreto por ejemplo en la cual, la inspección permanente es justificada.

3.2.9.- ELEMENTOS DEL CONTROL DE CALIDAD.-

- **Control Tecnológico.-** El control tecnológico de calidad, es el que se ejerce en relación con las propiedades constitutivas de los materiales (Granulometría, límites de consistencia) y a las características mecánicas del producto (densidad máxima – humedad óptima y control de compactación) a lo largo de todo el proceso de ejecución.

Este elemento del control de calidad es el que define las características esenciales de durabilidad y seguridad de la obra, otorgando de acuerdo con criterios previamente establecidos, las alternativas de decisión para la respectiva aceptación o rechazo del ítem ejecutado.

De esta manera, el control tecnológico estará orientado fundamentalmente a verificar los elementos básicos para garantizar un buen desempeño de los materiales.

Los procedimientos estadísticos se prestan a facilitar tanto el procedimiento del control, como el análisis de los resultados.

Los niveles de control en los que se desarrollan los procedimientos de control tecnológico corresponden a un nivel normal e intenso.

- **Control Geométrico.-** Es el control complementario al control tecnológico y es el que se aplica sobre las características físico – geométricas del producto durante su conformación y en el acabado final del mismo a fin de garantizar la seguridad y funcionalidad.

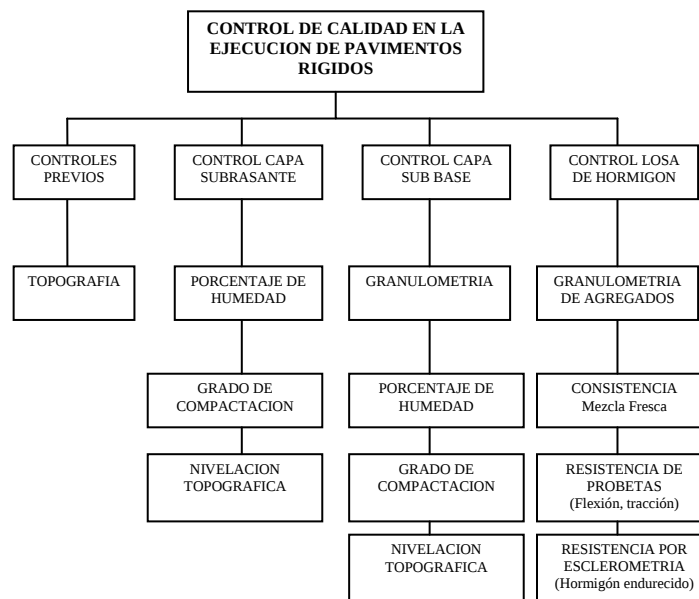
El control geométrico de acuerdo a lo especificado, determina la aprobación o rechazo de un lote de obra ejecutada.

Este control a efectuarse a niveles normal e intenso, se refiere básicamente a dos características:

- Espesor de la capa
- Nivel de acabado y tolerancias

A continuación será descrita la metodología recomendada para el control de calidad de los ítems más importantes en la conformación de los pavimentos rígidos, el objetivo principal es el de obtener un criterio de control de calidad sencillo y simple.

FIGURA 17



3.3.- CONTROL DE ACTIVIDADES PREVIAS:

– Trabajos de Topografía.-

Los trabajos previos para el control de la Topografía son los siguientes:

- Inventario de parámetros de casas, carpetas asfálticas existentes, así como la descripción de su estado actual y su localización, incluyendo una breve descripción de los cruces con otras vías.
- Levantamiento de niveles existentes indicando niveles de todo tipo de registros y elementos fijos que sirvan de puntos de referencia.
- Debe recopilarse cualquier información de trabajos de topografía en planta o perfiles longitudinales y secciones transversales. Estas mediciones deben hacerse antes y después de la ejecución de los trabajos para garantizar la cubicación exacta de los volúmenes de acuerdo con el proyecto.

– Control Geométrico.-

Para tener un mayor control de los niveles del proyecto, es decir de cada una de las capas que conforman el pavimento; es preciso realizar un levantamiento previo de la zona a pavimentar, en condiciones naturales, para poder compararlas con las cotas del diseño, y usarlas como parámetro para establecer el control geométrico de todo el proyecto. El control geométrico en la conformación de una estructura de pavimento rígido fundamentalmente está referido a los siguientes parámetros:

- Espesor de capa considerando las tolerancias especificadas.
- Diferencias de nivel de acabado.

El control geométrico queda establecido por las especificaciones técnicas en cuanto a límites y tolerancias. La determinación de las cotas de acabado, de todas las capas que conforman el paquete estructural se deben realizar de la siguiente manera:

La toma de niveles será al menos cada 20 metros lineales tanto al lado izquierdo, derecho y eje en forma alternada, de acuerdo a las especificaciones técnicas establecidas para cada caso.

El control de verificación de las cotas de campo con respecto a las cotas de diseño para todas las capas, tiene una secuencia análoga; esto es tomando como referencia las especificaciones de tolerancia de cada una de ellas y comparando que las diferencias de cotas respectivas (de diseño y campo) ingresen dentro de los niveles esperados.

Para ello es preciso construir una tabla con el fin de determinar si los elementos en exceso y en defecto encontrados en ambos casos, se pueda comparar con las tolerancias exigidas por las especificaciones técnicas del proyecto, para cada caso de no ingresar la totalidad de los valores registrados, denotar la cantidad de ellos que se encuentran fuera de control.

3.4.- CONTROL CAPA SUBRASANTE:

Para realizar el control de calidad en la capa subrasante se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

– Requisitos de las capas de apoyo.-

Las capas de apoyo del pavimento de concreto podrán ser los suelos naturales o terreno natural, siempre y cuando éstos sean de buena calidad. Si no cumpliera con los requisitos de calidad se debe construir una capa de transición o de sub-base, a fin de que cumpla una función estructural, y de esta manera los espesores de losa requeridos se reduzcan. Esta capa, al ser de tipo granular servirá también para drenar

el agua que tiende a acumularse en la parte inferior de la losa de concreto, ya sea por lluvia o por elevaciones del nivel freático del terreno. En casos especiales será necesario realizar la estabilización adicional a la capa sub-base. Particularmente en casos en que el terreno natural sea excesivamente deformable.

– **Verificación del material del terreno natural:**

Es recomendable realizar una verificación del material que constituye el terreno natural para poder comparar los resultados con los datos que se usaron para el diseño del pavimento, a modo de garantizar el diseño y asegurar un buen comportamiento durante su vida útil.

Entre las prácticas que se recomiendan para su evaluación destacan las siguientes:

Extracción de muestras para determinar las características de resistencia y deformación. La secuencia de los ensayos son los siguientes:

- Humedad natural
- Granulometría
- Límite líquido
- Límite plástico
- Índice de plasticidad
- Clasificación de suelos.
- Ensayos Proctor modificado
- CBR de laboratorio, con una frecuencia tal, que equivalga por lo menos, a la ejecución de un ensayo de CBR, por cada 100 ml de la longitud total de calzada contratada en el estudio, por cada tipo de material de subrasante y de las capas granulares de los pavimentos existentes.

Las especificaciones AASHTO M57-80 (1990), especifican que los materiales no cohesivos clasificados como A-1 (gravas), A-2 (arenas) ó A-3 (limos), pueden ser usados como subrasantes cuando estén disponibles, debiendo compactarse al 95% de su capacidad máxima AASTHO T-180.

Los materiales cohesivos clasificados como A-4 (limos), A-5, A-6 ó A-7 (arcillas), pueden ser usados compactados a la profundidad especificada en el estudio de suelos, al 90% como mínimo de su densidad máxima AASHTO T-99.

– **Tramos en cortes**

Si a nivel de la subrasante es necesaria la sustitución de los suelos en cortes, a menos que exista una indicación contraria del ingeniero, el material será compactado como mín. al 95% de la densidad máxima seca dado por el ensayo AASTHO T-180.

– **Tramos en terraplenes**

En las capas superiores la compactación será como mínimo el 95% de la densidad máxima seca dada por el ensayo AASTHO T-180, por debajo de 60 cm de profundidad el grado de compactación requerido con relación al mismo ensayo será del 90%, para suelos con IP mayor a 6 y 95% para suelos con IP menor a 6.

Los sectores que no hubieran alcanzado las condiciones mínimas de compactación deberán ser escarificadas, homogeneizados, llevadas a la humedad adecuada y nuevamente compactados de acuerdo con las densidades exigidas.

La subrasante es de vital importancia para evitar muchas causas de fallas en los pavimentos, por esto debe ponerse especial cuidado en su compactación.

En la subrasante las actividades en las que se realiza el control de calidad, de los cuales depende su aceptación o rechazo son:

- **Control Tecnológico de la capa subrasante.-** El control tecnológico en la conformación de la subrasante deberá constar principalmente de los elementos que se especifican a continuación:
- **Densidad Máxima y Humedad Óptima.-** El control de la densidad máxima obtenida a óptima humedad, representa el problema típico en la ejecución de una obra vial. Con el cálculo de la densidad máxima determinada en laboratorio a una humedad óptima, se podrá evitar discusiones innecesarias a diferentes criterios entre supervisor y contratista y a su vez se ahorra tiempo y dinero, al organizar el número de pruebas (proctor) de referencia para establecer rangos de control correspondientes a las densidades en campo. El control a ejercer sobre la humedad óptima está basado en las especificaciones técnicas establecidas por el proyecto, la cual no deberá variar en $\pm 2\%$ del límite superior e inferior.
- **Secuencia de control:**
 1. Determinar el Nivel de Control a emplear (Control Normal).
 2. Determinar el Nivel de Confianza a Emplear $R=95\%$.
 3. Identificar el tamaño de la muestra, “n” de acuerdo a las pruebas obtenidas en campo para su respectivo procesamiento.
 4. Elaboración de las cartas de control de acuerdo a las muestras obtenidas en campo, para determinar luego los límites de control, superior e inferior, y verificar si las humedades obtenidas en campo se encuentran bajo control de acuerdo al rango definido por las especificaciones técnicas del proyecto.

- **Control de Compactación.-** El control de la compactación en el avance de la obra vial para la conformación de la capa subrasante, establece la regularidad de la ejecución. El desarrollo de esta parte en pavimentos corresponde a un nivel de control normal, dado que el control efectuado es sistemático basándose en un plan de muestreo y apoyado en la inspección tradicional del proceso.

Este control podrá efectuarse mediante:

1. Pruebas destructivas en la capa subrasante a saber, obtención de pesos volumétricos secos máximos en campo, por ejemplo mediante el cono de arena.
2. Pruebas no destructivas, por ejemplo el densímetro nuclear. Este método tiene la ventaja de que no se requiere esperar la determinación de los contenidos de agua de las muestras recuperadas como requisito para la obtención del resultado de la compactación del sitio en cuestión. Ello reduce substancialmente el tiempo requerido para la definición de la calidad de compactación de la capa recién tendida, pudiéndose así tomar medidas correctivas de manera oportuna.

– **Secuencia de control:**

1. Determinar el Nivel de Control a emplear (Control Normal).
2. Determinar el Nivel de Confianza a Emplear $R=95\%$.
3. Identificar el tamaño de la muestra, “n” de acuerdo a las pruebas obtenidas en campo para su respectivo procesamiento.
4. Elaboración de las cartas de control de calidad de todos los datos recabados en campo, con la finalidad de depurar los datos malos provenientes de errores accidentales y sistemáticos a un nivel del 95% de confianza, determinando el conjunto de datos que se encuentran bajo control estadístico.

3.5.- CONTROL CAPA SUB BASE.-

Para la conformación de la capa sub-base de un pavimento rígido, se plantea un nivel de control normal basado en las especificaciones técnicas.

- **Control Tecnológico de la capa Sub-base.** -En la conformación de la sub-base las actividades en las que se realiza el control de calidad, de los cuales depende su aceptación o rechazo son:
- **Granulometría.**- Este factor permitirá establecer, si el material analizado es apto o no para su empleo como capa sub-base.

El procedimiento estadístico para el análisis de la granulometría, será función de la disponibilidad del equipo y personal, también del número de pruebas que se puedan realizar con el fin de analizar los materiales producidos para la conformación de una estructura de pavimento rígido.

La granulometría de los materiales preferentemente deberá ser analizada en dos etapas:

- **Etapla preliminar.**- en esta etapa se definen los límites de control mediante un procedimiento estadístico derivado de las muestras obtenidas en banco. Este estudio permite a su vez definir posibles correcciones en la fórmula de dosificación adoptada en el caso de una mezcla de materiales en forma previa a la conformación de la capa sub-base.
- **Etapla constructiva.**- es la etapa en la que el control de granulometría se lo efectúa sobre el material producido en intervalos previamente establecidos,

(podrá ser por longitud de plataforma o por máxima producción diaria), bajo los parámetros definidos en la etapa preliminar.

Debido a que los recursos, disponibilidad de equipo y material; podrían hacer que la etapa preliminar forme parte de la etapa constructiva en la producción inicial de materiales y en la respectiva colocación en obra.

– **Límites de control.-** Para la determinación de los límites de control se toma fundamentalmente como puntos de partida los valores de tolerancia establecidos por las especificaciones correspondientes a objeto de determinar los límites estadísticos para el correspondiente control de calidad.

– **Secuencia de control.-**

1. Determinar el nivel de control a emplear (Control Normal)
2. Establecer el nivel de confianza a emplear $R = 95\%$
3. De acuerdo con el tamaño de la muestra “n” obtenida, se deberán definir las tolerancias tanto inferiores como superiores.

Normalmente en el control granulométrico, el término “rechazo” no implica el cambio de materiales, salvo en casos en que las fallas granulométricas se presentan en tres o más tamices, hecho que afectaría de la estabilidad de la capa a construir.

El rechazar una muestra por su composición granulométrica implica la corrección en la dosificación de agregados a fin de uniformizar la producción para la obtención de un material acorde con los requerimientos especificados.

Una vez obtenida la muestra, y analizada según las reglas anteriormente indicadas se procederá a la elaboración de las cartas de control para las muestras a fin de apreciar de manera objetiva, si la producción del tamaño del grano analizado es o no satisfactoria y definir en consecuencia las correcciones necesarias.

Finalmente establecer conclusiones enfatizando la aceptación o rechazo y así emitir las sugerencias pertinentes.

En forma complementaria y siguiendo los requerimientos establecidos; los datos de la fracción que pasa el tamiz N° 200 serán analizados como “atributos” del material, que serán determinados para cada muestra a fin de poder corregir la dosificación en caso de presentarse un exceso de material fino.

De la misma manera, los límites de consistencia serán considerados como “atributos” los cuales definirán a la fracción que pasa el tamiz N° 40 plásticos o no plásticos para la correspondiente aprobación o rechazo.

- **Densidad Máxima y Humedad Óptima.-** El control de la densidad máxima obtenida a la humedad óptima para una capa sub-base, al igual que en la capa subrasante representa el problema típico en la ejecución de una obra vial.

Con el cálculo de la densidad máxima determinada en laboratorio a una humedad óptima, se podrá aplicar el criterio de análisis de comparación de las humedades obtenidas en campo con respecto a la humedad de referencia determinada en laboratorio, las cuales están basadas en las especificaciones técnicas del proyecto, donde la humedad obtenida en campo no deberá variar en $\pm 2\%$ del límite superior e inferior. La siguiente secuencia detalla los pasos a seguir con el propósito de establecer el control:

– **Secuencia de control.-**

1. Determinar el nivel de control a emplear (Control Normal)
2. Determinar el nivel de confianza a emplear $R = 95\%$
3. Identificar el tamaño de la muestra “n” de acuerdo a las pruebas obtenidas en campo para su respectivo procesamiento.
4. Elaboración de las cartas de control de acuerdo a la muestra obtenida en campo, para determinar luego los límites de control, superior e inferior, y verificar si las humedades obtenidas en campo se encuentran bajo control de acuerdo al rango definido por las especificaciones técnicas.

- **Control de Compactación.-** El control de compactación será ejecutado de acuerdo con el proctor de referencia obtenido en laboratorio, para la determinación de las densidades correspondientes en campo.

Los procedimientos de control de compactación para un nivel de control normal es el siguiente:

1. Determinar el nivel de control a emplear (Control Normal).
2. Determinar el nivel de confianza a emplear $R = 95\%$.
3. Identificar el tamaño de la muestra “n” de acuerdo a las pruebas obtenidas en campo para su respectivo procesamiento.
4. Elaboración de las cartas de control de acuerdo a la muestra obtenida en campo, para depurar datos malos provenientes de errores a un nivel del 95% de confianza, determinando de esta manera el conjunto de datos que se encuentran bajo control estadístico.

Además de acuerdo con las normas AASHTO debe cumplir las siguientes características:

TABLA 14

Limite liquido (LL)	25 %	Máx.
Índice de plasticidad (IP)	6 %	Máx.
Poder de soporte (CBR)	40 %	Min.
Desgaste de los Ángeles	60 %	Máx.
Finos que pasa malla N° 200	15 %	Máx.
Tamaño máximo menos a 1/3 del espesor de la capa		

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Las especificaciones permiten utilizar como material de Sub-Base cualquiera de los materiales que cumpla con las granulometrías mostradas en la Tabla 15.

TABLA 15

TAMAÑO DE LA MALLA	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO			
	GRADACION			
	Tipo “A”	Tipo “B”	Tipo “C”	Tipo “D”
3”	100		-----	-----
2”	-----	100	-----	-----
1½”	-----	90-100	100	-----
1”	-----	-----	-----	-----
¾”	-----	60-90	-----	100
N° 4	30-70	30-70	30-70	40-80
N° 200	0-15	0-15	0-15	5-20

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

3.6.- CONTROL LOSA DE HORMIGÓN

Las pruebas de control de calidad para el concreto se efectúan para garantizar y comprobar que éste cumple con los requerimientos de las especificaciones deseadas.

En los concretos las actividades en las que se realiza el control de calidad, de los cuales depende su aceptación o rechazo son:

- **Granulometría:** del material con el cual se está conformando el hormigón, se toman muestras según especificaciones, si en esas granulometrías todos los puntos entran dentro de las especificaciones se acepta, si del total de puntos de la granulometría 2 o menos puntos se salen de las especificaciones se acepta pero se sanciona económicamente en un porcentaje de 5% por cada punto que no entra en especificaciones al costo unitario del ítem tanto en arenas como en gravas.
- **Control de resistencia a compresión.-** Se toma un muestreo de probetas de la mezcla de vaciado en una cantidad según especificaciones, en caso en que mas del 75% de las muestras sean aceptadas del total con resistencias iguales o mayores a la especificada, el porcentaje de muestras que falta su aceptación si no es la diferencia en mas del 10% se acepta pero se sanciona económicamente al ítem en el mismo porcentaje que falta para llegar a las especificaciones en el volúmen que representa la muestra.

Cuando se considera no satisfactorio las muestras de probetas, se debe realizar un muestreo de resistencias a compresión de estructuras terminadas con esclerómetro, se toma un muestreo de 30 muestras como mínimo por estructura de superficie concluida, en caso de que más del 75% de las muestras están aceptadas del total de la

superficie con resistencias iguales o mayores a la especificada, el porcentaje de muestras que falta su aceptación si no es la diferencia en más del 5% se acepta pero se sanciona económicamente al ítem en el mismo porcentaje que falta para llegar a las especificaciones al porcentaje de superficie que representa la muestra.

3.6.1.- CONTROL DE RESISTENCIAS.-

Se hablará con cierto detalle del control de la resistencia del hormigón, porque como es lógico es un tema de gran importancia y que puede tener repercusiones económicas considerables en una obra de pavimentación.

El control de resistencias se lo hace mediante ensayos. Para que dicho control sea lo más preciso posible es aconsejable dividir los ensayos en tres grupos que son:

- ❶ Ensayos previos (con la mezcla de prueba)
- ❷ Ensayos característicos.
- ❸ Ensayos de control en obra.

– Ensayos previos.-

Los ensayos previos se realizarán en laboratorio con la muestra de prueba, para verificar, que la dosificación calculada, cumpla con las resistencias que se necesitan obtener en obra como se exige en el proyecto. Se debe tratar de crear dosificaciones que cumplan las exigencias, con holgura, especialmente en cuanto a sus resistencias.

Ello por que las resistencias que se obtienen en el laboratorio son siempre superiores a las que luego se obtienen obra, por lo que una dosificación se puede considerar

aceptable cuando en laboratorio se alcanzan resistencias del orden de un 20 % ó 30 % superiores a las exigidas en proyecto.

– **Ensayos característicos.**

Una vez realizados estos ensayos previos en laboratorio hay que realizar en obra los denominados ensayos característicos; es decir, que con las dosificaciones que se ha estimado en laboratorio, se puede pasar a realizar un tramo de ensayo, del que se saca testigos para controlar si las resistencias son las correctas, además de verificar el buen funcionamiento del equipo que se utiliza para el amasado del hormigón y la construcción del pavimento

– **Ensayos de control en obra.**

Una vez que se tiene aprobado el tramo de ensayo, y ya con la obra en marcha, hay que realizar unos ensayos de control obligatorios que son los que sirven de información para verificar si las resistencias requeridas por el proyecto están siendo cumplidas. Dada la gran cadencia de colocación de hormigón, el hacer los controles a posteriori es prácticamente inútil para introducir correcciones en obra.

3.6.2.- ENSAYOS STANDARD EN HORMIGÓN.

A continuación se indicara la serie de ensayos Standard que se realiza para el control de calidad y resistencia del hormigón, los cuales se pueden hacer algunos en laboratorio y otros en obra.

La ejecución de ensayos en distintas etapas del proceso de construcción de la losa de hormigón se puede agrupar de la siguiente forma:

- Estudio previo de los materiales y de las mezclas de hormigón
- Determinación de las propiedades de la mezcla fresca.
- Control de calidad del hormigón elaborado en base a ensayos mecánicos sobre mezclas endurecidas.
- Verificación de estructuras ejecutadas.

Los ensayos son los siguientes:

- 1) Determinación de la consistencia del hormigón de cemento basándose en el asentamiento.
- 2) Determinación de peso unitario, rendimiento y porcentaje de vacíos del hormigón de cemento.
- 3) Preparación y curado de especímenes en el laboratorio para los ensayos de compresión y de flexión.
- 4) Preparado y curado de especímenes en el terreno para los ensayos en de compresión y flexión.
- 5) Determinación de la resistencia a la compresión de cilindro de hormigón.
- 6) Determinación de la resistencia del hormigón a la flexión.

De preferencia el control de resistencias con base en las resistencias a la flexión se realizará mediante vigas ensayadas con cargas a los tercios medios. Este control se llevará a cabo conjuntamente con la fabricación y los ensayos de cilindros para obtener las resistencias a la compresión.

Estas pruebas son llevadas a cabo de dos formas: en la obra y en un laboratorio y se realizan en el concreto fresco y en el endurecido.

– **Propiedades de la mezcla fresca:**

Durante la ejecución de la obra se verificará periódicamente la trabajabilidad, la movilidad, la relación pasta cementicia-agregado y el contenido de aire de la mezcla fresca.

Para la consistencia, una vez establecida ésta para el grado de hormigón, el control se efectúa mediante el cono de Abrahams por lo menos dos veces al día. Con el objeto de tomar en cuenta los efectos del transporte, el ensayo se debe realizar en el lugar mismo de la colocación y no a la salida de la hormigonera.

Un valor alto de revenimiento señala a un concreto húmedo o fluido. La prueba de revenimiento deberá iniciarse dentro de los siguientes 5 minutos a la obtención de la muestra y la prueba se deberá completar en 2 1/2 minutos, debido a que el concreto pierde revenimiento con el tiempo.

– **Mezcla de concreto:**

El control de calidad del concreto incluye los siguientes procedimientos:

- Muestreo y pruebas al azar, para determinar la resistencia en cilindros de prueba en forma continua.
- Análisis sistemático de los resultados de los cilindros de prueba para verificar o evaluar la calidad real existente.

- Revisión de los proporcionamientos a la luz del análisis para mantener la calidad al nivel requerido.

Los materiales y/o productos empleados en estos trabajos deben cumplir con:

- Las recomendaciones específicas para cada material.
- El proyecto.
- Las especificaciones particulares.
- Las recomendaciones del fabricante, en lo que se refiere a su utilización.

– **Cemento.-**

El control del cemento generalmente lo realizan las empresas productoras que se rigen a la normatividad internacional y nacional. Para proyectos comunes, también se realizan análisis químicos en laboratorio. Siempre y cuando no se indique lo contrario, se empleará cemento Pórtland disponible en el país o (Clase I – ASTM).

Para cualquier proyecto se debe presentar un certificado de calidad del cemento (preferentemente de fabricación nacional) a ser utilizado, emitido por el fabricante o un laboratorio especializado, además de la fecha de fabricación. Las muestras de hormigón preparadas con este cemento, serán convenientemente especificadas, fraguadas y almacenadas para su posterior ensayo.

Con el objeto de conseguir información de la resistencia del cemento, se aceptarán ensayos de acuerdo a norma. Los trabajos de hormigonado podrán comenzar después de que los ensayos hayan dado resultados satisfactorios.

Los ensayos de hormigón estarán en función a la clase de hormigón que se deberá preparar y a la resistencia y características que se requieran, de igual manera para los agregados, agua y aditivos.

- **Agregados.-** Los agregados utilizados deben cumplir con las normas de elaboración del concreto: de agregado fino y agregado grueso. Para controlar la calidad de los agregados, es conveniente realizar visitas a los bancos de préstamo, para conocer la disposición de los agregados antes de que sean transportados a los lugares de almacenamiento o a la obra. Esto es para evitar variaciones en las calidades de los materiales extraídos. Los agregados necesarios para la elaboración del hormigón (arena y grava), deberán cumplir los requisitos de las normas bolivianas CHB-87. Las características indicadas a continuación para los agregados son las más comunes y de mayor utilización dentro del campo de la construcción de pavimentos rígidos.

- **Arena.-** La arena será limpia, de buena calidad y sin materiales extraños como pizarras, arcilla, barros, hojas, yesos u otras materias similares. El módulo de fineza debe estar comprendido entre 2.5 y 3.0. Materiales que pasan la malla N° 200 (0.074 mm) 3% máximo. Las arenas deben cumplir con la siguiente granulometría:

TABLA 16

Tamiz N°	% que pasa
4	95 – 100
8	75 – 95
16	55 – 85
30	30 – 62
50	5 – 26
100	3 – 7

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

- **Grava.-** El agregado grueso o grava consistirá en materiales clasificados, o en piedras trituradas, grava triturada. El agregado debe estar constituido por partículas sólidas, durables y limpias, los agregados de cualquier grupo de tamaño no deben contener más del 8% en peso de piezas planas o alargadas.

Una partícula plana o alargada es la que tiene una proporción que excede 5 en 1 entre la dimensiones máximas y mínimas, de un prisma rectangular circunscrito. No se permitirá el uso de grava con una película de limo recubriendo su superficie y/o que contenga material pétreo descompuesto.

Las partículas individuales de grava serán sólidas y resistentes de un peso específico igual o mayor a 2.600 Kg/m^3 , evitando el uso de formas laminares.

El tamaño de la grava deberá tener una buena graduación desde el tamaño máximo especificado, hasta el tamiz N° 4 donde deberá quedar retenido el 100%.

Los límites aceptables de sustancias perjudiciales en los agregados gruesos serán en peso:

TABLA 17

Terrones de arcilla	0.25%
Partículas blandas	5.00%
Finos que pasen el tamiz N° 200	5.00%
Salas solubles, partículas cubiertas por partículas superficiales	5.00%
Desgaste de Los Ángeles máximo	40.00%

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

La granulometría recomendada para la grava es la siguiente:

TABLA 18

Tamiz N°	% que pasa
2 ½"	100
2"	95 – 100
1"	35 – 100
½"	10 – 30
N°4	3 - 5

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

El material no deberá contener sustancias que puedan actuar desfavorablemente con los álcalis del cemento en presencia del agua.

- Agua.-

El agua que se utilice en la elaboración del concreto debe estar libre de impurezas, aceite, etc., siempre que sea posible deberá usarse agua potable, con un PH entre 4 y 7. El grado de pureza del agua para el preparado del hormigón deberá ser de buena calidad, no contener sustancias corrosivas, ni que contaminen al cemento, ni influyan en ningún proceso para la obtención de un buen hormigón.

La cantidad de agua deberá ser medida cuidadosamente para el hormigón fresco, bastante como para obtener hormigones trabajables y mínima para la obtención de hormigones compactos. Para hormigones ya endurecidos, el agua debe ser abundante y de buena calidad por su acción prolongada.

De igual manera ocurre para el amasado y curado del hormigón, toda agua de calidad dudosa, debe ser sometida a análisis previos en un laboratorio legalmente autorizado.

- **Aditivos para el Concreto.-**

Los aditivos que se utilicen deben ser de fabricación reciente, y antes de su empleo deben ser sometidos a pruebas de laboratorio que permitan una verificación cualitativa del comportamiento del concreto que se utilice. Los aditivos deben cumplir con las normas para la elaboración del concreto.

- **Material de Relleno de Juntas.-**

El movimiento esperado de la junta debe ser el factor determinante para la selección del material de sello. Por ejemplo es de esperarse que se tenga poco movimiento en las juntas transversales de contracción con separaciones cortas entre si.

El relleno de las juntas se hace con alguno de los siguientes materiales: resina epóxica, silicón, poliuretano o similar, aplicados en frío. Todos estos materiales deben cumplir con las especificaciones y normas. Lo más recomendable para el sellado de juntas es el asfalto mezclado con cal.

- **Material de Curado.-**

Los materiales de curado son el agua permanente o productos químicos. Estos productos debe ser un líquido reflejante de rayos solares llamado antisol, de pigmentación blanca o clara de buena calidad y de marca reconocida.

El análisis de los resultados de los lotes, deben cumplir con los requerimientos de las normas usuales, siempre y cuando fueran omitidas las condiciones particulares de estas especificaciones.

El curado en contacto con el agua permanente, lo ideal es que esté inundado los 28 días; pero cuando resulta complicado se recomienda los primeros 7 días inundarlo con cercos de tierra y luego se puede colocar antisol hasta los 28 días.

3.6.3.- APLICACIONES DE LA EVALUACIÓN ESTADISTICA

Una correcta aplicación de evaluación estadística de los resultados de resistencia del hormigón constituye una valiosa herramienta de apoyo para:

- Especificar la resistencia del proyecto.
 - Estimar la resistencia de dosificación.
 - Controlar el proceso de fabricación del hormigón.
 - Controlar el proceso de ensayo.
 - Recepción de las obras.
- **Especificación de la resistencia del proyecto (fp):** Para aplicar la evaluación estadística y para evitar errores de interpretación, se debe especificar:
- La resistencia característica del proyecto y el nivel de confianza, según los criterios de cálculo y coeficientes de seguridad considerados.
 - El plan de muestreo, es decir, el número de muestras por período, por volumen de hormigón colocado, lote, etc.
 - Condiciones de ensayos, o sea, el tipo de probeta, edad de ensayo, etc.

- Criterio de aceptación, es decir, es necesario indicar las condiciones que debe cumplir para recibir las obras de hormigón, y se deben indicar, además, los pasos a seguir en caso de no incumplimiento.

Se recomienda para el caso de pavimentos de hormigón un nivel de confianza del 80%. En cuanto a la frecuencia para el control de pavimentos se recomienda tomar por lo menos dos muestras por día de hormigonado, para ensayos a la compresión y/o flexo tracción. Las probetas testigos se extraen cada 700 m² de pavimento elaborado, y un criterio de aceptación basado en la resistencia característica de la obra y en una escala de multa en caso de incumplimiento, y ha definido sector homogéneo; es decir:

- Áridos, y componentes en general, sin variar de procedencia.
- Que se emplee una sola dosificación.
- Que se use la misma planta hormigonera.
- Que se use el mismo tren pavimentador.
- Que se use el mismo sistema de curado.

Un criterio de aceptación para el hormigón es que la resistencia característica de la obra f_c , debe ser mayor o igual a la del proyecto f_p : $f_c \geq f_p$ y que el promedio de cualquier grupo de tres muestras consecutivas deberá ser igual o superior a f_p .

- **Estimación de Resistencia de Dosificación:** La dosificación del hormigón se basa en la resistencia media requerida llamada Resistencia de Dosificación, f_d . Para este efecto se toma en cuenta la resistencia característica de proyecto, f_p , el nivel de confianza, y las posibles variaciones del proceso productivo del

hormigón , representados por una desviación normal supuesta, S_{sup} , a través de la siguiente fórmula:

$$f_d = f_p + t \cdot S_{sup}$$

Donde:

f_d = Resistencia de Dosificación

f_p = Resistencia Característica del proyecto

t = Es el coeficiente de Student dependiente del nivel de confianza y del número de resultados.

S_{sup} = Desviación normal supuesta.

Además aplicando los criterios de aceptación de ACI:

a) En que el promedio de tres resultados consecutivos debe ser mayor que:

$$f_d = f_p + 1.34 S_{sup}$$

b) En que ningún resultado individual sea menor que $f_p - 40 \text{ kg/cm}^2$ ($f_d = f_p - 40 + 2.33 S_{sup}$) entonces, se debe elegir el f_d más alto.

El S_{sup} se puede tomar en base a controles de hormigones similares fabricados con el mismo contratista y con el mismo equipo. Cuando no existan datos previos se puede aplicar un S_{sup} de 50 Kg/cm^2 en obras menores y de 40 Kg/cm^2 en aquellas que se aplica control. Una vez que el avance de la obra lo permita se puede calcular f_d con la información obtenida.

- **Control en el proceso de fabricación:** Primero debe disponerse de un registro de resultados, donde quede constancia de la fecha de extracción de la muestra, el lugar de colocación, la dosificación empleada y los resultados de resistencias a

distintas edades, tales como 7, 28 o 90 días. Resulta útil llevar los resultados a gráficos de control. Sobre la base de los resultados registrados es conveniente calcular en forma periódica f_m , f_c y S , para ir efectuando oportunamente las medidas correctivas tendientes a disminuir su variabilidad y garantizar un hormigón uniforme.

El ACI relaciona la desviación estándar normal S , con el grado de control considerando más de 30 resultados y f_p mayor que 200 kg/cm^2 .

TABLA 19

S (kg/cm²)	Grado de Control
<30	Excelente
30 – 35	Muy bueno
35 - 40	Bueno
40 - 50	Aceptable
>50	Pobre

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

- **Control del proceso de ensayo:** Los procedimientos de muestreo, confección y curado de probetas, pueden ocasionar variabilidad en los resultados. A fin de detectar el grado en que éstos inciden en la variabilidad total, es recomendable calcular el coeficiente de variación del ensayo. Para éste cálculo se requieren los valores de ensayo de cada una de las probetas gemelas. Luego se calcula el rango promedio R , de 10 o más muestras consecutivas.

La desviación normal del ensayo S_t , se calcula de acuerdo con la fórmula:

$$S_t = 0.8865 \quad R$$

en que el valor 0.8865 es una constante correspondiente a dos probetas gemelas. Si se trata de un trío debe aplicarse una constante igual a 0.5907.

El coeficiente de variación de ensayo, V_t , se calcula de acuerdo con la fórmula:

$$V_t = \frac{S_t}{f_m}$$

El ACI relaciona el grado de control de los ensayos con su coeficiente de variación para hormigones de prueba en laboratorios y control en terreno, como se indica a continuación:

TABLA 20

Laboratorio (V_t)	Terreno (V_t)	Grado de Control de ensayo
< 2	< 3	Excelente
2 – 3	3 – 4	Muy bueno
3 – 4	4 – 5	Bueno
4 – 5	5 – 6	Aceptable
> 5	> 6	Pobre

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

- **Recepción de las obras:** Para las recepciones de las obras interesa verificar si los lotes de hormigón de la obra cumplen con los criterios de aceptación establecidos

en las especificaciones, para lo cual se deben efectuar los ensayos y cálculos necesarios para la comparación correspondiente.

3.6.4.- CONTROL DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

En el control de calidad de la losa de hormigón se pueden distinguir cuatro fases diferentes:

1. Recepción del concreto:

Cuando el concreto llega a la obra se debe pedir remisión al operador de la unidad, para verificar que todos los datos del producto corresponden a lo solicitado.

2. Control de los componentes del hormigón:

Consisten en verificar que los materiales utilizados y la secuencia constructiva sean los adecuados y los prescritos en el proyecto. Con estas actividades se pueden detectar las anomalías y tomar las medidas correctivas oportunamente.

Dentro de este tipo de control de calidad se incluyen todos los estudios previos necesarios para optimizar la calidad de los materiales: estudios de agregados en los diferentes bancos de préstamo, así como su posible variación; estudios preliminares de dosificación de mezclas, empleándose los componentes del concreto, así como los aditivos a ser empleados en la obra particular.

Estas actividades son tendientes a optimizar técnica y económicamente los requerimientos de proyecto y especificaciones.

En esta fase hay que realizar los ensayos correspondientes, tanto en origen como en el lugar de fabricación, para garantizar que los componentes del hormigón cumplen las especificaciones.

3. Control de la fabricación del hormigón:

El control de calidad del concreto involucra la obtención de muestras directamente de los camiones transportadores de las mezclas, previamente a la salida de las plantas de mezclado. Las técnicas de muestreo, preparación y manejo de muestras deben hacerse de acuerdo con la norma vigente.

En la central de fabricación hay que controlar, en primer lugar, el buen funcionamiento de sus diversos elementos, poniendo especial atención a la calibración de los sistemas de dosificación de los distintos componentes.

Periódicamente (al menos dos veces al día), se deben preparar con el hormigón fabricado unas probetas prismáticas para su ensayo a flexotracción. Además se deben realizar comprobaciones de la granulometría y, en su caso, de la proporción de aire incluido en el hormigón.

- Resistencias a la compresión: se fabrican cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, a edades de 3, 7 y 28 días.
- Resistencias a la flexión: normalmente se aplican al caso de carreteras y vialidades urbanas de primer orden (vías primarias y colectoras, periféricos, etc.). Cada muestra deberá estar compuesta de varias vigas.

Es necesario resaltar que en vías primarias y en el caso de las carreteras rige la resistencia a la flexión en términos del módulo de ruptura, más que la resistencia a la compresión.

- Criterios de resistencia.-

Es común establecer resistencias mínimas que deberán cumplir los especímenes individuales, así como una resistencia característica; ambas se deberán cumplir simultáneamente, tanto en compresión como en flexión. Asimismo, se deberá establecer un criterio de resistencia mínima individual, la cual deberá ser igual a la resistencia de diseño menos una cantidad que refleje el producto de una desviación estándar promedio y un coeficiente que represente a las condiciones de trabajo esperadas, esto es, porcentajes de resistencias individuales defectuosas. Como criterio normativo simplista se puede adoptar que la mínima aceptable se igual a la resistencia de diseño menos 50 kg/cm².

Otro criterio de control de resistencias exige que el promedio de la resistencia a la flexión de cada cinco especímenes consecutivos deberá ser igual o mayor que la resistencia especificada a los 28 días.

Asociado y complementario a lo anterior en cuanto a requerimientos de resistencia, lo es que cuando menos cuatro de un grupo de cinco especímenes consecutivos tengan una resistencia igual o mayor que el 90% de la resistencia fijada en el proyecto también a la edad de 28 días.

El requerimiento de aceptación común en cuanto a que la resistencia a los 28 días de que cuatro de los cinco especímenes ha de ser mayor que el valor especificado de M_r ,

en ocasiones se contrapone con el criterio según el cual el promedio de resistencias de cinco especímenes consecutivos debe ser igual o mayor al especificado.

- **Muestreo en concretos:**

En el caso de pavimentos urbanos se pueden hacer los siguientes muestreos como mínimo:

- 1 muestra por cada 100 metros cuadrados
- 1 muestra por cada dos turnos de trabajo de colocación de concreto
- Un mínimo de ocho muestras

Se ha de elegir la que represente una mayor frecuencia. En obras pequeñas se puede adoptar el criterio de un número de muestras, pues no se pueden adoptar los dos primeros criterios. En estas circunstancias se deben tomar las muestras distribuidas en los diferentes turnos programados, aunque sea a veces necesario tomar varias muestras de una misma etapa de colocación, seleccionando al azar las secciones de colado.

Siempre se llevará el control estricto del área a que corresponde el número de muestras dado.

4. Control de la puesta en obra:

En el proceso de puesta en obra es fundamental controlar la temperatura y humedad relativa del ambiente: debe suspenderse el hormigonado con lluvia intensa o cuando

la temperatura ambiente sea de 2 °C. En general, hay que evitar el endurecimiento prematuro, la desecación rápida de la superficie y el congelamiento del hormigón fresco.

Hay que controlar el proceso de puesta en obra para que se ajuste en todas sus fases y detalles a las especificaciones y a las normas de buena práctica.

5. Control de la unidad terminada:

Terminada la puesta en obra, se deben controlar los siguientes puntos:

- Regularidad superficial. Si no se cumplen las especificaciones suele ser debido a alteraciones en el ritmo de extensión. Si el índice de irregularidad es superior al límite fijado hay que frezar las zonas altas.
- Textura superficial. Se debe medir la profundidad media con el ensayo del círculo de arena.
- Espesor. El espesor del pavimento no debe ser inferior en ningún punto al previsto en los planos, por lo que el espesor medio tiene que ser necesariamente algo superior.
- Resistencia a flexotracción. En el caso de que la resistencia característica (estimada a partir de los resultados obtenidos en las probetas preparadas en el proceso de fabricación del hormigón) fuese inferior a la exigida, hay que proceder a la extracción de testigos cilíndricos para su ensayo a tracción indirecta. Según los resultados obtenidos, se aceptará el lote en cuestión, se aplicarán las

penalizaciones que pudieran estar estipuladas o se procederá a la demolición y reconstrucción de las losas afectadas.

- Integridad de las losas. Las losas no deben presentar grietas. Sin embargo, no deben considerarse como tales las pequeñas fisuras ocasionales de retracción plástica, de corta longitud y que manifiestamente no afecten más que a la superficie de las losas. Dependiendo de la gravedad de cada caso, habrá que sellar o grapar las grietas o bien demoler y reconstruir total o parcialmente la losa. La eventual reconstrucción parcial no debe suponer, de todos modos, que queden losas con menos de 1.5 m de lado.

- **Controles espesores:**

Con el fin de minimizar los problemas de fallas en los pavimentos de concreto, siempre se tratará de cumplir con los espesores mínimos que marca el proyecto. En el caso de carreteras la uniformidad de espesores se puede lograr con relativa facilidad colocando las marcas o hilos de nivel en las orillas de la sección por colocar, mismas que servirán de apoyo a los sensores de extremo con que cuentan las pavimentadoras de cimbra deslizante.

En el caso de pavimentos urbanos o residenciales, previo al recibo de la capa de sub-base ya terminada, y con los moldes metálicos (en el caso que se les utilice) ya instalados a su nivel, bastará verificar los espesores mediante el uso de una cuerda extendida transversalmente al eje del trazo sobre el paño superior de las cimbras o moldes en varios de sus puntos.

Es común obtener núcleos del pavimento ya terminado, a separaciones del orden de 300 metros en un mismo carril, o alternados en carriles adyacentes.

Un criterio general de aceptación sería que todos los núcleos tuviesen un espesor mínimo o superior al indicado en el proyecto, con una tolerancia del 5%.

En las bases del contrato se deben estipular claramente las políticas de sanciones referentes a deficiencias en los espesores.

- Tolerancias en la rugosidad superficial

Todas las irregularidades que excedan las tolerancias en sobre elevaciones que demande el proyecto deberán ser removidas mediante fresado o métodos abrasivos equivalentes.

Siempre se tratará de utilizar un equipo que garantice un tendido uniforme sin depresiones apreciables, de forma tal que los índices de perfil de preferencia igual o menor a los 12 cm/km.

Adicionalmente se recomienda que todos los puntos altos de la superficie resultante no sobrepasen de 8 milímetros respecto al perfil exigido en el proyecto.

Todas estas excedencias se deberán devastar hasta que mediante una prueba de perfilógrafo, aceptada por la entidad responsable del proyecto, se demuestre que las desviaciones están por debajo de tal tolerancia.

Si por razones de planicidad (estar por debajo de los 12 cm/km) se requiere fresado adicional, éste se deberá realizar en franjas paralelas al eje del trazo, en longitudes cercanas a los 200 metros.

TABLA 21

REGULARIDAD SUPERFICIAL	
Tipo de Vialidad	Tolerancia
Autopistas y Troncales	± 6 mm
Vialidades Colectoras y carreteras de primer orden	± 8 mm
Vialidades Urbanas del tipo local, callejones, etc.	± 12 mm

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASHTO, 1993

Es necesario aclarar que una vez que se haya realizado el fresado, se deben restablecer las condiciones del macro texturizado, esto es el ranurado transversal o longitudinal, según corresponda, y siempre de acuerdo con lo contemplado en las especificaciones del proyecto.

Esto es relativamente fácil de conseguir ya que los equipos actuales conforme realizan el debastado, su conjunto de discos abrasivos, normalmente de diamante, también van dejando los surcos o ranurado que proporciona el texturizado requerido.

3.6.5.- ACEPTACIÓN DE LOS TRABAJOS

Un cabal cumplimiento de lo dispuesto en el proyecto y especificación de materiales, así como un seguimiento acucioso a través de un control de calidad de los materiales

y procesos constructivos hará que se minimicen los riesgos de la obra, los costos asociados a corrección de anomalías, y que haya una reducción de los trabajos de muestreo verificadorio por medio de extracción de núcleos.

El trabajo de pavimentación con losas de concreto debe de aceptarse, siempre y cuando cumpla con lo siguiente:

- Cualquier detalle incorrecto o mal ejecutado debe ser corregido.
- Cualquier reparación debe ser sometida nuevamente a la supervisión para su verificación.

Los trabajos de pavimentación con losas de concreto deben ser aceptados si las reparaciones efectuadas cumplen con lo dispuesto en las normas. En caso contrario el trabajo de pavimento con losas de concreto se rechaza.

3.7.- CONTROL DEL EQUIPO

3.7.1.- EQUIPO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAPAS DEL PAVIMENTO

A continuación se detalla los equipos que se utilizan para las diferentes actividades en la conformación de las capas de un pavimento:

- **Escarificación:** Para estas actividades se emplean motoniveladoras, para suelos muy duros estas deben estar equipadas con barra escarificadora, normalmente de 11 dientes, como se muestra en las figuras 6-III y Fig. 7-III.

Cuando se tenga remover roca, se aconseja el empleo de “rippers”.



FIGURA 18



FIGURA 19

- **Extracción:** Esta parte de la preparación de la superficie se puede realizar mediante cargadores frontales, bulldozer o motoconformadoras. Cuando los volúmenes por tratar son pequeños, se pueden emplear tractores agrícolas complementados con cargador frontal.
- **Transporte:** La movilización de suelo recortado, o bien los volúmenes hacia el sitio de trabajo, por ejemplo de rellenos de importación de bancos, se podrá realizar mediante volquetas. En obras pequeñas es conveniente contar con un tractor para mover equipo menor, materiales, moldes, equipos, etc., dentro del área de trabajo.



FIGURA 20



FIGURA 21

- **Mezclado, homogeneización y distribución:** Normalmente, se utilizan motoconformadoras para realizar el mezclado y la uniformización, incluido el extendido de materiales en las cajas ya preparadas.

En ocasiones, y dependiendo de si se utilizan sustancias estabilizadoras (cemento, cal, aditivos, etc.) podrán emplearse equipos especiales, o tractores con rastras agrícolas, para preparar el mezclado en el sitio.

- **Equipo de riego:** Para éstas actividades es frecuente el empleo de pipas o contenedores montados en camiones o provistos de dispositivos y bombas especiales para distribuir en forma controlada y homogénea el agua a todo el ancho del camino o calle.

FIGURA 22



- **Equipo de compactación:** El equipo de compactación se escogerá en función de los tipos de suelos por compactar y de las exigencias del proyecto.

FIGURA 23

A continuación se enumera algunos requisitos básicos adicionales que los equipos de compactación deberán cumplir:

- Los compactadores vibratorios deberán contar con mecanismos que le permitan controlar las velocidades.
- En caso de que se utilicen equipos con llantas neumáticas, estos podrán ser lastrados. Si son de remolque, los tractores deberán contar con llantas neumáticas.
- Los equipos vibratorios pesados (5 toneladas) pueden ser empleados en la gran mayoría de los casos. También los pata de cabra con forma trapezoidal o modificada podrán ser utilizados.

- De preferencia las frecuencias y amplitudes de los rodillos vibratorios deberán ser regulables. La frecuencia de este equipo va normalmente de 1500 a 2500 ciclos/minuto. En suelos granulares se recomiendan amplitudes bajas combinadas con frecuencias altas. En los suelos plásticos es exactamente al revés.

En trabajos pequeños es recomendable contar con un rodillo vibratorio de doble tambor, con un peso estático de 1 ton o mayor.

3.7.2.- EQUIPO PARA CONSTRUCCIÓN LOSA DE HORMIGÓN

- Equipo Mayor:

El equipo para el transporte debe impedir la segregación del concreto. El transporte del concreto puede efectuarse con carretillas manuales con ruedas de hule, u otro equipo que garantice la homogeneidad y las características físicas de la mezcla preparada en el lugar.

No se permite la compactación manual. La supervisión debe dar el visto bueno a los vibradores (gasolina o eléctricos) en cuanto al tamaño y el tipo. La frecuencia de vibración mínima debe ser de 4000 r.p.m. y la "cabeza" debe tener un diámetro de 35 a 40 mm y una compactación mínima o igual al espesor de la losa que va a ser vibrada.

El equipo de transporte debe ser tal que permita la descarga directa en los moldes donde serán construidas las losas.

FIGURA 24

- Equipo Menor:

La herramientas más utilizadas en la elaboración de losas de concreto son las
Siguietes:

- Regla vibratoria para compactación del concreto.
- Regla para dar el acabado.
- Regla para nivelar.
- Cinta de tela.
- Volteador.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD EN LA EJECUCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE ALTO RENDIMIENTO EN EL TRAMO CAMPO PAJOSO CARAPARÍ PROGRESIVAS 0+000 A 2+400.

4.1.- UBICACIÓN DEL TRAMO

El Diseño del Tramo Asfaltado Campo Pajoso – Caraparí, fue elaborado sobre la base del Manual y Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SNC, 1990) de manera que ofrezca condiciones de seguridad, comodidad y economía a los usuarios. El Tramo Campo Pajoso – Caraparí, con una longitud aproximada de 20.13 km, se inicia 12 km al norte de la ciudad de Yacuiba, en la localidad de Campo Pajoso, y termina en la población de Caraparí.

TRAMO	PROGRESIVAS
Campo Pajoso – Caraparí	De 0+000 a 20+000

Las zonas que atraviesa la carretera son en general de topografía montañosa, con presencia de serranías de dirección norte-sur. El eje del diseño atraviesa los valles existentes entre dichas serranías.

Como resultado de lo indicado, una gran parte del trazado se encuentra en terreno plano, ondulado y montañoso. El detalle de sectores topográficos es el siguiente:

TRAMO	TOPOGRAFÍA	
Campo Pajoso – Caraparí	Plana	De 0+000 a 2+400
	Ondulada	De 2+400 a 5+260
		De 17+000 a 20+000
	Montañosa	De 5+260 a 17+000

El Tramo Asfaltado Campo Pajoso – Caraparí, de acuerdo a nomenclatura adoptada por el SEDECA, corresponde a la Ruta Fundamental F29 de la Red Vial del Departamento de Tarija; es una vía de vinculación entre dos corredores de exportación constituidos por las Rutas Fundamentales F9 (Corredor Internacional Santa Cruz – Buenos Aires), y la Ruta F1 (Corredor Internacional Desaguadero – La Paz – Oruro – Potosí – Tarija – Bermejo), a través de otro corredor internacional transversal a los dos primeros (Hito Br-94 – Villamontes – Tarija – Iquique).

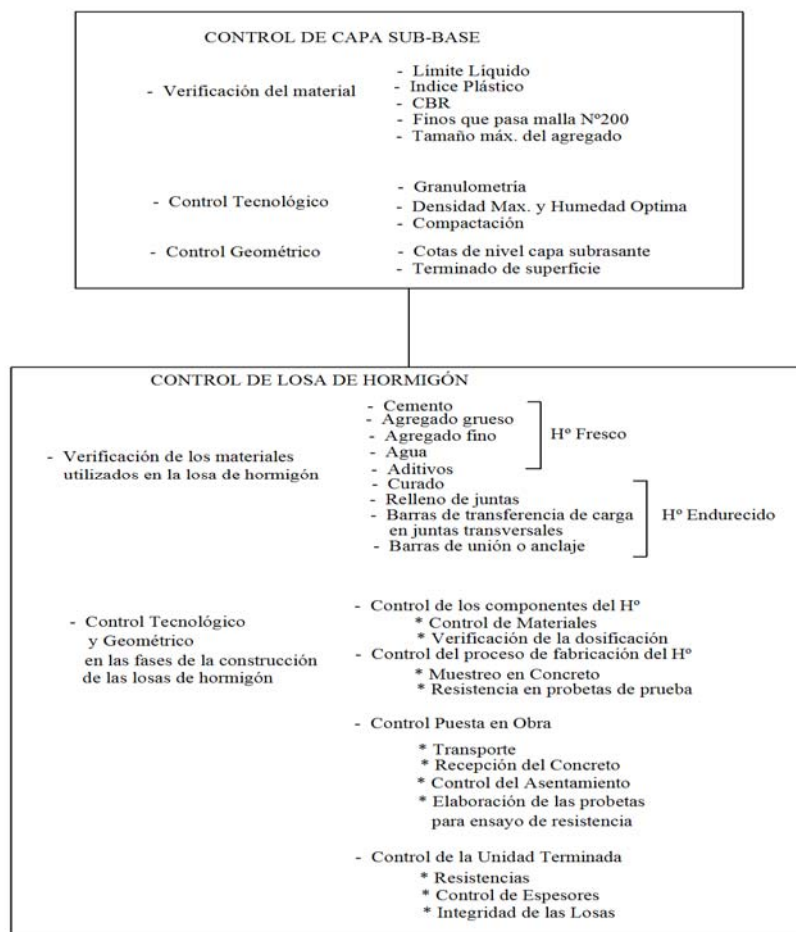
La categoría asignada corresponde a la **Categoría II**. Esta conclusión fue establecida con los resultados del Estudio de Tráfico Vehicular, realizado en noviembre de 2001 mediante aforos complementados con encuestas de origen y destino, que proporcionaron los datos necesarios para realizar las proyecciones del crecimiento del tráfico vehicular.

Los datos de base estadística para las proyecciones fueron obtenidos de la Estadística Vial 1998, publicada por el SNC, y de planillas de aforo vehicular realizadas por el SEDECA para los años 1997 y 1998.

4.2.- ORGANIZACIÓN PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN EL TRAMO.-

A continuación se plantea la organización para el control de calidad, la cual está orientada a establecer el control tecnológico y geométrico, propuesto para el control de calidad en la ejecución de un pavimento rígido de alto rendimiento. Cabe aclarar que la aplicación se efectúa sobre datos reales realizados en cada uno de los ítems del Proyecto Carretera Campo Pajoso – Caraparí Km 0+000 a 2+400.

FIGURA 25



4.2.1.- CONTROL DE ACTIVIDADES PREVIAS EN EL TRAMO

1) TRABAJOS DE TOPOGRAFÍA

En primera instancia el control topográfico comprendió el estacado, partiendo de un punto fijo de referencia o BM y considerando las mismas progresivas del proyecto, se procedió a anotar en lugar visible las progresivas a lo largo del tramo. De igual manera se realizó el levantamiento de algunos puntos de referencia como por ejemplo la ubicación de obras de arte que cruzan transversalmente en el tramo.

2) TRABAJOS DE MOVIMIENTO DE TIERRAS.-

Luego de realizado el control topográfico del terreno natural se procedió a controlar las herramientas y equipo necesario para efectivizar el movimiento de tierras de acuerdo a las secciones transversales de proyecto, tomando en cuenta que el transporte de las excedentes de corte se transporten al buzón indicado, fuera del área de construcción circundante a la Obra para que no perjudique el desarrollo de los demás items. También como una forma de control durante el movimiento de tierras verificando que el equipo tenga las precauciones correspondientes debido a las dificultades de maniobra en algunas zonas, de modo que no se tenga problemas posteriores.

3) TRABAJOS CAPA SUBRASANTE: EN EL TRAMO.-

Una vez realizado el movimiento de tierras completando los cortes y terraplenes respectivos para llegar a la sección de diseño, se ejecutó la conformación de la capa

subrasante, cuyos ensayos de control se basaron en la geometría y en la compactación.

El material utilizado para la conformación de la capa subrasante fue la del terreno natural cuyos resultados de los ensayos de Humedad Natural, Índice de plasticidad, y el Proctor para realizar la compactación, fueron aceptados.

Una vez establecido el tipo de material existente se procedió a la evaluación de la humedad óptima con respecto a la humedad obtenida en campo de acuerdo a los límites de control indicado en las especificaciones técnicas del proyecto.

Los ensayos realizados de densidad máxima mediante AASHTO T-180-D y su respectiva humedad, con respecto a la densidad de campo se encuentran tabulados para el mencionado tramo en estudio.

Tomando en cuenta el nivel de control y el nivel de confianza se procedió a la obtención de muestras de densidad de la subrasante mediante el procedimiento del “cono de arena”, en las mismas progresivas planteadas para el proyecto que son cada 100 metros.

Por lo tanto el número de densidades obtenidas en campo, tomados en forma alternada al eje, izquierda y derecha, fueron de 48.

Obtenido el grado de compactación de las muestras del tramo en estudio, se comparó con el porcentaje de control adoptado según especificaciones del proyecto como mínimo al 90%, con respecto a la densidad máxima obtenida en laboratorio.

El control geométrico de acuerdo a lo expuesto en el procedimiento está basado en las tolerancias admisibles de diferencias de acabado de las capas que conforman el pavimento. El procedimiento práctico de los datos recabados en campo para esta capa es tabulado y controlado.

4.2.2.- CONTROL DE ACTIVIDADES PROPIAS DEL PAVIMENTO.-

1) CONTROL CAPA SUB BASE EN EL TRAMO.-

El control de calidad de agregados de la capa sub-base fue objeto de una serie de análisis conjuntos con el fin de llegar a establecer un control adecuado al avance de la obra, de manera que satisfaga los requerimientos establecidos por las especificaciones.

El material dispuesto sobre la capa subrasante para la conformación de la capa sub-base fue del banco de Km 13+000. Luego de realizar los ensayos correspondientes de granulometría y límites de Atterberg se pudo afirmar que el material cumple con las especificaciones.

2) CONTROL DE GRANULOMETRÍA DE LA SUB BASE

La granulometría empleada para la conformación de la capa sub-base corresponde al Tipo “B”. Los materiales a ser empleados en la sub-base la cual deberá presentar un índice de soporte de California (CBR) igual o mayor a 30%.

Para la determinación de la aceptación o rechazo de los materiales, se tiene:

- Nivel de control Normal
- Nivel de confianza 95%

- Número de muestras 24

Las especificaciones que debe cumplir el material, para realizar este acometido procede de la experimentación, que consiste en tomar muestras al azar del material producido cada 100 metros lineales en plataforma y determinar la correspondiente granulometría.

Los valores procesados son tabulados en los formularios correspondientes del resumen tecnológico de materiales para capa sub-base.

Obtenidos los límites estadísticos de control se observa que el valor medio de la Granulometría del lote analizado está comprendido entre en el intervalo estimado, por lo tanto la aprobación se justifica.

3) CONTROL DE DENSIDAD MAXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA.-

Para la capa Sub-Base también se elaboraron cartas de control de calidad de las distintas humedades obtenidas en campo, con respecto a las humedades determinadas en laboratorio, de una manera sistemática los resultados recabados y analizados para tal fin, de acuerdo a las tolerancias de $\pm 2\%$ establecidas por las especificaciones técnicas.

4) CONTROL DE DENSIDADES DE COMPACTACION.-

El control de compactación de esta capa resulta ser el que finalmente establece la regularidad de la ejecución de la capa sub-base.

Manteniendo el nivel de control normal y el nivel de confianza 95% se procede a la obtención de muestras de densidad mediante el procedimiento del cono de arena, en lugares determinados por las especificaciones técnicas del proyecto. El número de densidades obtenidas en campo fueron 24 tratándose de datos obtenidos en forma alternada cada 100 metros lineales, lado izquierdo, derecho y eje.

Obtenido el grado de compactación de las muestras del tramo en estudio, se compara con el porcentaje de control mínimo especificado 95%, respecto a la densidad máxima obtenida en laboratorio y según el resultado se aprueba o rechaza el lote en estudio.

5) CONTROL GEOMETRICO DE CAPA SUB BASE.-

El control geométrico de la capa sub-base está basado en las tolerancias admisibles de diferencias de acabado de las capas que conforman el pavimento. El procedimiento práctico de los datos recabados en campo para la primera etapa se encuentra tabulado en la tabla de anexos.

4.2.3.- CONTROL LOSA DE HORMIGÓN EN EL TRAMO.-

Para completar la aplicación del “Procedimiento de control de calidad” se procedió al control de la conformación de la losa de hormigón. El análisis en todo su conjunto es uno de los aspectos que se debe tener muy en cuenta, tanto en su composición granulométrica como en la mezcla ya elaborada, debido a que esta actividad constituye la fisonomía de la carretera y su buena ejecución garantizará su durabilidad en el tiempo.

El nivel de control para esta actividad se definió como normal con un nivel de confianza del 95%, tomando en cuenta que la producción del hormigón es ejecutada en una planta de dosificación continua que permite relativa uniformidad en la granulometría del agregado y el cemento de acuerdo con la dosificación aplicada.

1) CONTROL DEL ASENTAMIENTO.-

El valor del asentamiento fue determinado en obra efectuado en el momento del vaciado del hormigón. Los resultados obtenidos de cada camión distribuidor se indican en el sector de anexos.

2) CONTROL DE RESISTENCIAS.-

El control de resistencias de probetas a compresión se realizaron en obra, en el momento de descarga del mixer se tomaron una o dos probetas de control de acuerdo al detalle mostrado en la parte de anexos.

3) CONTROL DE ESPESORES.-

El control de espesores para la losa de hormigón consistió en medir la altura de las losas de acuerdo al detalle indicado en la parte de anexos.

4.3.- CONTROL DEL EQUIPO

4.3.1.- EQUIPO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAPAS DEL PAVIMENTO

La construcción de las capas de pavimento esta orientado a establecer la base sobre la que se colocará la losa del pavimento rígido, estas capas son la subrasante y la capa sub base.

La capa subrasante tiene en su ejecución las siguientes etapas:

- Conformación de la subrasante
- Compactación de la subrasante
- Conformación de la Sub base
- Compactación de la Sub base

Para la conformación y compactación de las capas subrasante y sub base se requiere el siguiente equipo:

- Motoniveladora
- Carro Aguatero
- Compactador vibratorio

El control de calidad de la ejecución de estas actividades en base al equipo disponible es el siguiente:

- a) La motoniveladora en el proceso de conformación de la subrasante debe realizar por lo menos 4 maniobras en la plataforma de manera que consigan la conformación adecuada y en la sección de diseño en este proceso se deben conseguir dos aspectos fundamentales la geometría de la sección transversal y la homogeneidad de la mezcla, la cantidad de maniobras y el tiempo estarán por encima de otros factores ya que de ello depende la calidad del pavimento.

FIGURA 26

- b) El carro aguatero está comprometido a otorgar al material de la subrasante la humedad necesaria para llegar a la humedad óptima en este afán se deben realizar el número de pasadas necesarias para alcanzar la humedad en todo el ancho de la plataforma.

FIGURA 27

- c) El compactador es el encargado de darle la densidad requerida al material de la subrasante para ello tendrá que utilizar el número de pasadas necesarios de manera que se logre el grado de compactación requerido.

FIGURA 28



FIGURA 29



4.3.2.- EQUIPO PARA LA CONSTRUCCIÓN LOSA DE HORMIGÓN

En la construcción de la losa de hormigón considerando un alto rendimiento está orientado a la ejecución de la losa con una pavimentadora de hormigón especialmente diseñado para ese trabajo, sin embargo la ejecución de la losa tiene un proceso secuencial que requiere mucho cuidado y control de cada uno de los pasos de ejecución para finalmente lograr como resultado un pavimento rígido de alta calidad.

El equipo y herramienta que se utiliza está en relación con las diferentes actividades que se realizan para cumplir con el objetivo de construir la losa del pavimento rígido. Las actividades en una forma secuencial son las siguientes:

- Preparación de los materiales

FIGURA 30



- Preparación del Hormigón en Planta

FIGURA 31



- Puesta a punto de la Pavimentadora de Hormigón

FIGURA 32



- Instalación de formaletas y canastillos con pasajuntas transversales

FIGURA 33



FIGURA 34



- Preparado de las guías

FIGURA 35



FIGURA 36



- Vaciado y Extendido del hormigón

FIGURA 37



FIGURA 38



- Terminado de la losa de hormigón

FIGURA 39



FIGURA 40



- Texturizado de la losa de hormigón

FIGURA 41



FIGURA 42



- Curado de la losa de hormigón

FIGURA 43



FIGURA 44



- Aserrado de Juntas

FIGURA 45



FIGURA 46



- Sellado de Juntas

FIGURA 47



FIGURA 48



4.3.3.- NIVELES DE RENDIMIENTO.-

Uno de los factores más importantes en la ejecución de pavimentos rígidos en los últimos tiempos es sin duda el RENDIMIENTO, tanto es así que en las últimas décadas los fabricantes de equipo para pavimentos han apostado a invertir mucho dinero en la fabricación de equipos especialmente diseñados, como las PAVIMENTADORAS DE HORMIGÓN, con el objetivo principal de lograr un ALTO RENDIMIENTO en la ejecución de los pavimentos.

En nuestro país la ejecución de obras con este procedimiento ha tenido dos dificultades muy notorias que son:

- a) El alto costo inicial de las pavimentadoras de hormigón.
- b) La falta de continuidad en este tipo de obras.

Pese a las anteriores dificultades los productores de cemento en el país como COBOCE, SOBOCE y FANCESA han apostado a invertir en equipo de ALTO RENDIMIENTO y cuentan en la actualidad con el equipo necesario para ejecutar cualquier tipo de obra de pavimento rígido utilizando pavimentadoras de hormigón.

Dos de los objetivos a los que va orientado la utilización de estos equipos es:

- a) Aumentar el rendimiento para reducir el tiempo de ejecución.
- b) Disminuir los costos para hacer más competitivo al pavimento rígido.

FIGURA 49

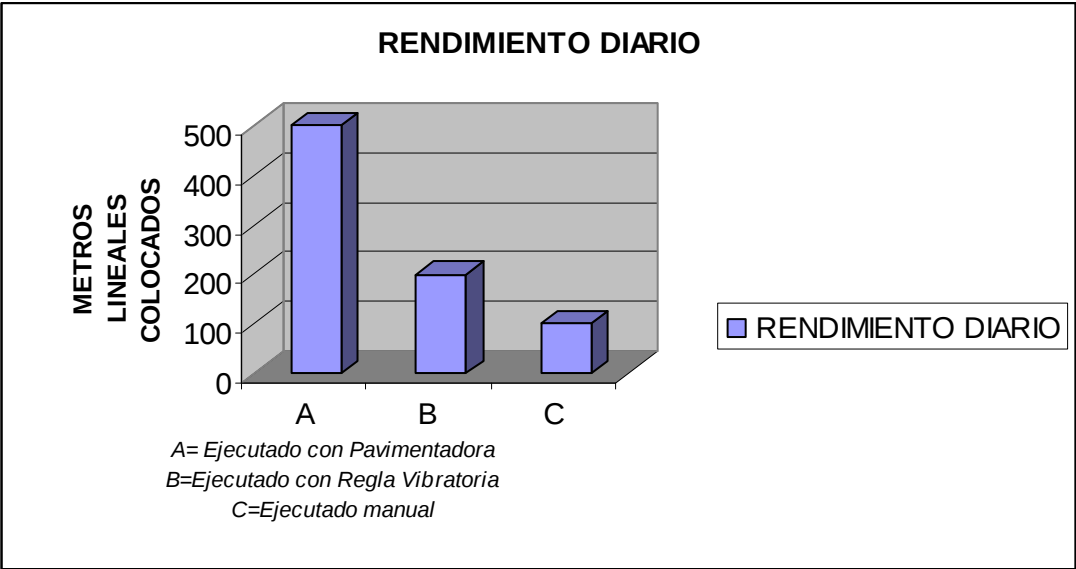
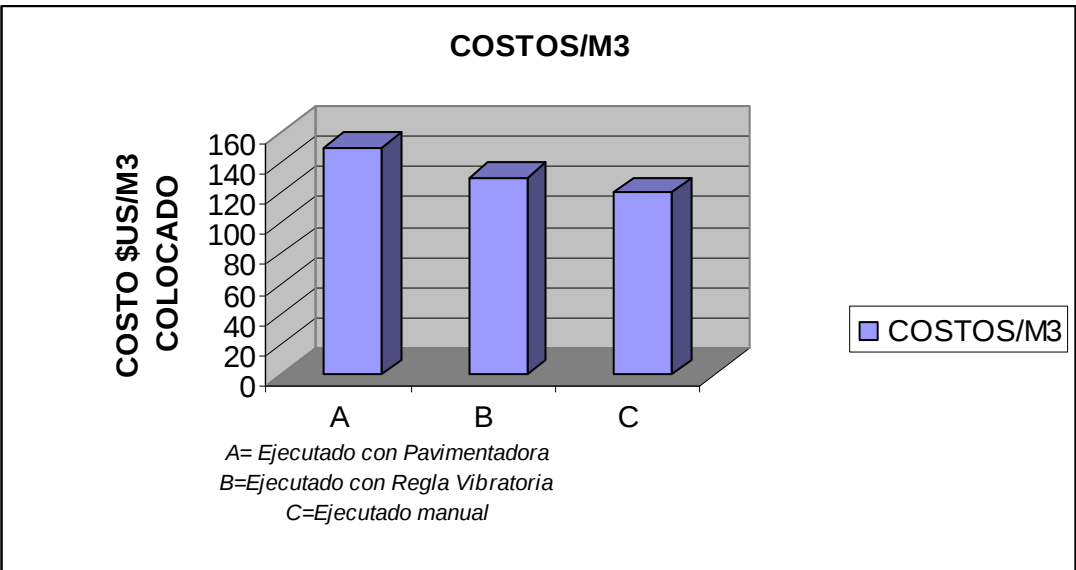


FIGURA 50



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Una vez realizado este trabajo, se puede llegar a una serie de conclusiones y recomendaciones sobre lo que significa el **CONTROL DE CALIDAD EN LA EJECUCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE ALTO RENDIMIENTO**.

- Según el planteamiento de la ejecución del control de calidad y la respectiva aplicación práctica, muestran hasta que punto han sido logrados los objetivos propuestos y cuál es su nivel de aplicabilidad en función de la realidad constructiva de las obras viales.
- El procedimiento de control de Calidad planteado pretende desechar todas aquellas características irrelevantes que no inciden con la calidad, mecanismo efectivo, porque establece un mínimo de variables para su control respectivo.
- Los procedimientos de control de calidad serán recomendados para su aplicación sobre los datos recolectados. Una vez establecidas las reglas del control de calidad planteados, se eliminan de alguna manera las acciones de carácter subjetivo, orientándose al carácter más bien objetivo que encauzan el control según los parámetros, que previamente se han establecido, y que rigen el procedimiento de control, ya que se basan en normas y reglas de control ya establecidas, de acuerdo a la experiencia recabada en varias obras.

- Pese a haber alcanzado los objetivos propuestos, corresponde aclarar que el control no es una receta, sino que es una secuencia de planes de control en obras viales en estricto seguimiento de las especificaciones contractuales y de acuerdo con las circunstancias prevalecientes, siempre bajo un “criterio ingenieril” de los niveles de calidad exigidos para así poder efectuar los niveles de control adecuados y reales, de manera que la exigencia no sea tan elevada que encarezca la obra o por el contrario sea tan baja que resulte una obra de pésima calidad.
- Los ensayos de control en cada caso son establecidos por las especificaciones adoptadas contractualmente y no son motivo de análisis ni cuestionamiento alguno, toda vez que el presente trabajo está orientado al estudio del control de calidad de una manera concreta a un tramo de la carretera Campo Pajoso – Caraparí, donde se utilizó un sistema de ejecución de alto rendimiento, dado por el hecho que los procedimientos propios de laboratorio han sido adecuadamente seleccionados por las especificaciones y correctamente ejecutados.
- Durante el desarrollo del presente trabajo se enfatizó en el control que se debe hacer sobre todo a la ejecución del pavimento rígido en si tomando como parte de ella a la capa sub base y la losa de hormigón.
- Como se pudo evidenciar, el control resulta un instrumento fundamental que permite apreciar objetivamente “hacia dónde va” la producción al mostrar la tendencia dentro de los límites de control o quedar fuera de control, aspecto que confirma un diagnóstico bastante real de la situación de un determinado proceso de la producción (sea producción de materiales, compactación, etc.)

- El análisis de la cantidad de datos en el control de todo el proceso permite apreciar que los resultados de las características estudiadas se ajustan a una curva de distribución normal o al menos aproximada, la cual presenta aplicaciones sencillas y prácticas.
- El procedimiento de control de calidad planteado, está aplicado a un proyecto que contempla en sus especificaciones contractuales “un control de calidad” aspecto digno de resaltar que los procedimientos desarrollados en este trabajo han sido de gran beneficio para la obra en sí. Sin embargo no se desechan las fuentes de error que podrían estar capitalizadas en el factor humano o en los errores cometidos sistemáticamente en la ejecución de los ensayos, o en la calibración, estado del material y equipos empleados, etc.
- Se concluye además que es muy importante el control de calidad en obras viales porque se observa que a la carencia de éstas, los proyectos no llegan a cumplir la vida útil para los que fueron diseñados.
- Corresponde también establecer que la aplicación efectuada (está basada en datos reales), obtenidos en la conformación del pavimento rígido en el Proyecto de la Carretera Campo Pajoso - Caraparí, no comprometen de ninguna manera los procedimientos ni criterios de control empleados por el equipo de la supervisión de obras del mencionado proyecto.

5.2.- RECOMENDACIONES

Por lo expuesto en el presente trabajo, consideramos un “aporte” muy importante en el de haber conjuncionado aspectos y definiciones diversas, extractando de la bibliografía consultada lo más sobresaliente relacionado con el tema de control de calidad y haberlos adecuado a la formulación de un procedimiento de control de calidad, en base a criterios, que de alguna manera podría formar parte de un plan de control adecuado en futuras obras.

A manera de aporte se establecen algunas recomendaciones para trabajos de esta naturaleza, la cual recurrimos al planteamiento de un esquema básico de control de calidad de acuerdo con los pasos que se indican a continuación:

- Primera acción que se debe tomar para la obtención de una buena calidad en una obra vial, es la planificación, donde debe definirse el objetivo.
- Se debe definir los niveles de control, con la respectiva adopción del nivel de confianza.
- Se deben establecer claramente y con suficiente anticipación los siguientes tres puntos fundamentales:
 1. Tablas de muestreo que deben estar orientadas a un muestreo sistemático y que permitan una interpretación rápida y sencilla de los resultados.
 2. Criterios de aceptación que deben estar basados en las reglas del control supuesto, que permitan establecer sin ambigüedades la aceptabilidad de los trabajos.

3. Acciones a tomar en caso de rechazo deberán estar claramente definidas toda vez que de éstas resultarán las correcciones para la mejora del producto, o en su defecto llevar a niveles críticos la calidad del producto.
- En el caso de no cumplimiento de algunos de los resultados con respecto a las actividades de ejecución que no cumplen las especificaciones, se recomienda, sancionar o castigar o tomar alguna medida para que este tipo de controles sean realmente aplicados.
 - El costo del control de calidad puede ser insignificante en relación a lo que se podría ahorrar si se cumpliera a cabalidad, pues se vería reflejado en obras bien construidas.