



CAPÍTULO 4.
DEFORMACIONES PLÁSTICAS
EN CAPAS DE RODADURA DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

4. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

4.1 Definición de deformación plástica.

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones plásticas se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas. Para esto se necesita que la mezcla esté elaborada con un cemento asfáltico consistente, lo más próximo posible a un sólido elástico también a temperaturas relativamente altas.

El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, la composición granulométrica y calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla.

La temperatura funcional del asfalto es de gran importancia, así como los gradientes de temperatura que en ocasiones pueden ser cambiados debido a la conductividad térmica de la mezcla, así como la brillantez o la reflectividad, por medio de la selección del agregado, lo que afecta a la deformabilidad de los pavimentos. La distribución lateral de la zona de rodadas está influenciada por la velocidad del tráfico, el ancho del carril y la profundidad de las roderas. Las velocidades bajas del tráfico, corresponden a frecuencias de carga más bajas, algo que contribuye directamente al desarrollo de roderas en las capas asfálticas.

La acumulación de deformaciones plásticas en una capa de concreto asfáltico pueden ser causadas por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tráfico.

4.2 Tipos de Deformaciones Plásticas (Roderas).

La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño, se llama permanente, porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos principales tipos de roderas: roderas por fallas en la subrasante y roderas por fallas en la capa de asfalto, ésta última, de gran interés, debido a que representa el tema principal de este trabajo.

Las deformaciones permanentes se pueden apreciar visiblemente como depresiones o canales a lo largo de la trayectoria por donde ruedan los vehículos en el pavimento. La



densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de roderas, potencialmente contribuye en menos de 5 mm, en la profundidad de la rodera. Otras causas que influyen en la producción de hundimientos en los pavimentos asfálticos son los espesores delgados de pavimento, pérdida de material en la superficie por donde ruedan los vehículos y deformaciones plásticas en la capa de asfalto.

4.2.1 Roderas por fallas en la subrasante.

Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. También puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.

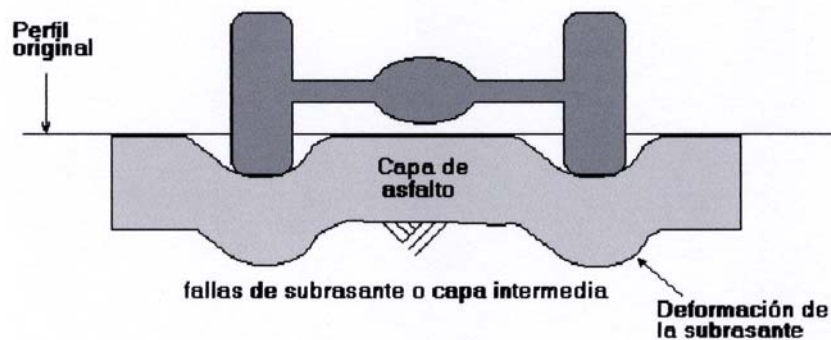


Figura No. 4.1. Roderas por fallas en la subrasante. Referencia, (28).

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo en la estructura del pavimento. Si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados. Los hundimientos por roderas tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm. hasta los 1000 mm., con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o sub-base) tiene deformaciones. Si la estructura del pavimento es lo suficientemente rígida a la deformación, ocurrirán fisuras por fatiga de un lado a otro en el ancho entero de la trayectoria de la llanta.

Algunas veces atravesando toda la sección del pavimento, parecería un tipo de falla por punzonamiento, con piezas quebradas empujadas hacia abajo. Algunas roderas tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

4.2.2 Roderas por fallas en la capa de asfalto.

Es el tipo de roderas que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas, una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con



una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las roderas pueden ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto.

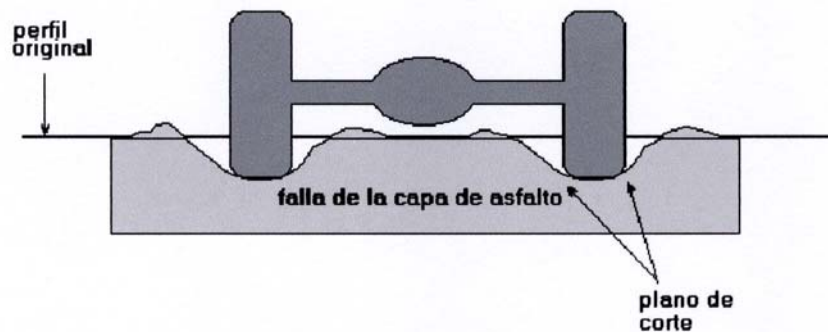


Figura No. 4.2. Roderas por fallas en la mezcla asfáltica. Referencia, (28).

Las roderas en una mezcla débil ocurren típicamente durante el verano, cuando el pavimento se encuentra sometido a temperaturas altas, esto podría sugerir que las roderas son causadas por el sol, pero es más correcto pensar, que es una combinación de la resistencia de los agregados pétreos y el ligante asfáltico empleado.

Las roderas como se ha dicho antes son la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento es no solamente utilizar asfaltos más duros, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Así cuando se aplique la carga el material podrá deformarse y volver a su posición original. Otra manera de prevenir los desplazamientos es seleccionar agregados que tengan un alto grado de fricción interna, que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que funcionan como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumula una deformación permanente.

4.3 Mecanismos de formación de roderas.

Cuando las roderas son causadas por deformaciones en la mezcla asfáltica, el material asfáltico es desplazado lateralmente a lo largo de la trayectoria de los vehículos en el plano de la mezcla, y la rodera se forma por depresión en el área de carga por donde rueda el neumático o los neumáticos, dejando crestas de mezcla en ambos lados a lo largo de la trayectoria de los vehículos. La superficie dentro de la trayectoria del neumático usualmente está lisa y rica en asfalto. El fondo de la rodera tal vez sea lisa y en forma de cuchara. Muchas veces una o más pequeñas crestas existen de la rodera entre los espacios de las llantas duales. Las roderas formadas por deformación tienden a cambiar gradualmente a lo largo de la carretera, por lo tanto el pavimento continúa proporcionando el servicio de rodadura a pesar de tener roderas.

La aparición de roderas como ya se mencionó es causada por la falta de resistencia ante las cargas generadas en la mezcla asfáltica, por la aplicación de cargas verticales en la superficie. En ocasiones la falta de resistencia puede ser causada por el desequilibrio entre el asfalto y la mezcla. Dicho desequilibrio puede ser causado por daños por humedad en la mezcla o debilitamiento del esqueleto mineral. Las roderas en los materiales del pavimento se desarrollan gradualmente con el incremento del número de aplicaciones de carga.

La importancia de utilizar materiales para la superficie de los pavimentos, con alta densidad, pueden minimizar el orden de magnitud de las deformaciones permanentes. Se ha mencionado en estudios de investigación que las roderas mayormente son causadas por flujos de deformación acompañadas de cambios de volumen en los materiales

A continuación se ilustra el efecto sobre una superficie de pavimento debido al número de pasadas de neumáticos en un ensayo de pista. Estos datos permiten hacer mediciones del promedio de la profundidad de la rodera como el volumen de material desplazado por debajo de las llantas y por encima de las zonas adyacentes a ellas. Con esta información, a través de la figura se pueden obtener dos conclusiones:

1. En el escenario inicial de tráfico, el incremento de las deformaciones irreversibles por debajo de los neumáticos es particularmente mayor que el incremento en las zonas por encima de la superficie. En esta fase inicial, la compactación debida al tráfico, tiene una mayor influencia en las roderas.
2. Después del escenario inicial, el volumen que disminuye por debajo de las llantas es aproximadamente igual que el volumen que se incrementa por los bordes en la parte superior del pavimento. Esto es un indicador de que mayormente la compactación se lleva a cabo bajo las solicitaciones del tráfico y de que las roderas son causadas primordialmente por desplazamiento con volumen constante. Esta fase se consideró en gran parte para representar el comportamiento de la deformación en el tiempo de vida del pavimento.

Hofstra y Klomp (1972) encontraron que la deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores.

Las roderas son causadas básicamente por flujo plástico, a mayor profundidad de la mezcla, existe una mayor resistencia al flujo plástico y también a mayor profundidad se reducen los niveles de tensión. La deformación plástica en una capa de pavimento, puede verse incrementada en la medida en que dicha capa es de menor espesor.

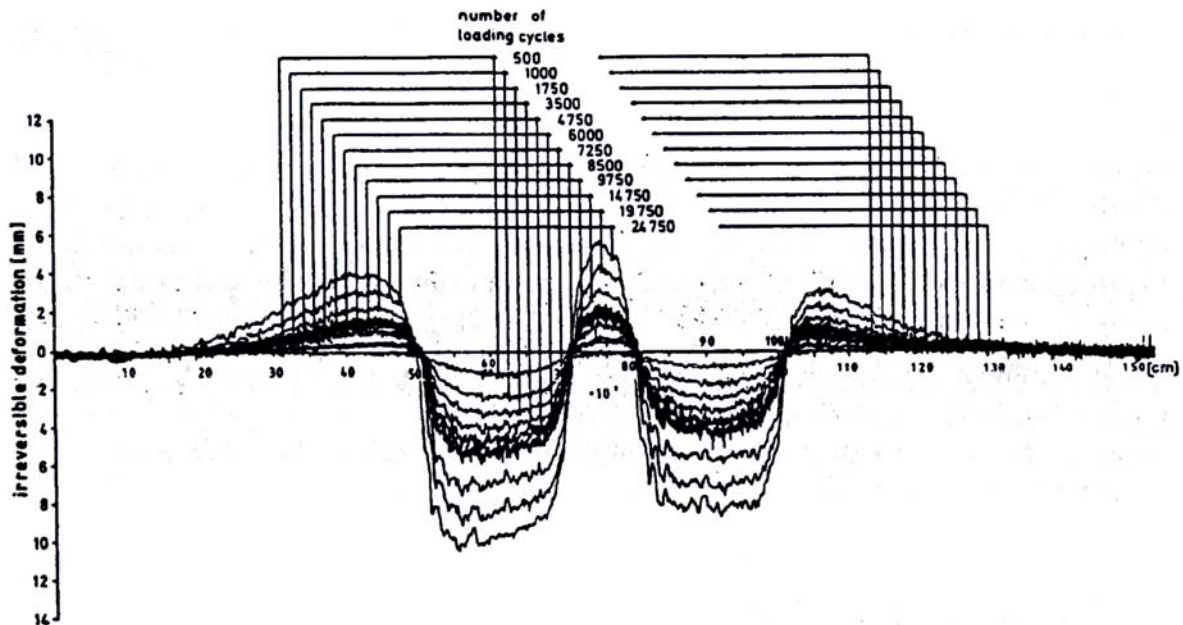


Figura No. 4.3. Mecanismo de acumulación de deformaciones irreversibles en la mezcla asfáltica. Referencia, (33).

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, que son los que deben soportar las cargas del tráfico y un ligante de naturaleza viscoelástica, que actúa como pegamento manteniendo unido el esqueleto mineral.

El ligante asfáltico no puede resistir las cargas del tráfico, pues debido a su naturaleza viscosa- elástica puede fluir en función de la carga y su tiempo de aplicación, sin embargo el ligante debe tener la suficiente cohesión para prevenir el desprendimiento de partículas y para resistir los esfuerzos de corte que se generan en los puntos de contacto entre agregados y que superan la fricción entre los mismos. Si el ligante no es capaz de sujetar las partículas en su sitio, estas pueden moverse compactando el esqueleto a una configuración más densa

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando.

- En Invierno, cuando las temperaturas son bajas, no existen deformaciones plásticas, porque la mezcla se comporta de manera elástica.
- En Otoño y Primavera, cuando hay regularmente temperaturas intermedias, la mezcla tiene gran parte de su comportamiento elástico y las deformaciones plásticas son mínimas
- En Verano, a altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan. Parte de estas deformaciones se dan en la

componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes o roderas.

A continuación se muestra en la siguiente figura el cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura de servicio.

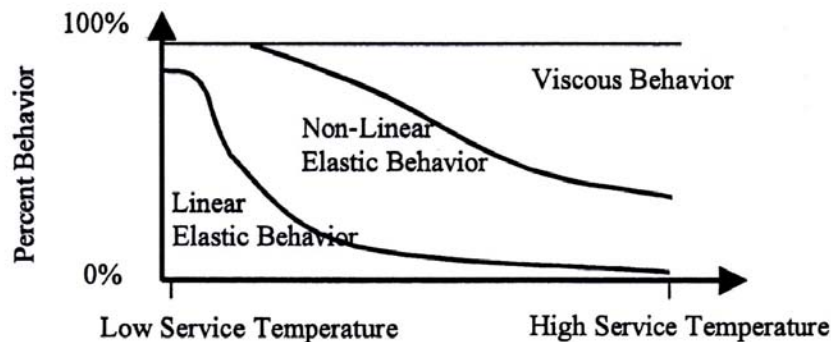


Figura No. 4.4. Cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura. Referencia, (29).

Normalmente la magnitud de las deformaciones permanentes es baja y no supone ningún problema, sin embargo si las deformaciones son muy altas o la mezcla tiene un comportamiento predominantemente viscoso las deformaciones permanentes pueden ser muy significativas.

4.3.1 Solicitaciones de cargas a un pavimento.

El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).
- Forma geométrica de cada sollicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- Velocidad de los vehículos y tiempo de sollicitación en un punto.
- Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc).
- Características de las capas del firme.

Las cargas de los vehículos al pavimento se transmiten a través de las ruedas, en los métodos de diseño mecanicistas es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, como se indica en la Figura 4.5, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta, deben ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos, la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de la llanta como presión de contacto, es estar por el lado de la seguridad. (Huang, 1993).

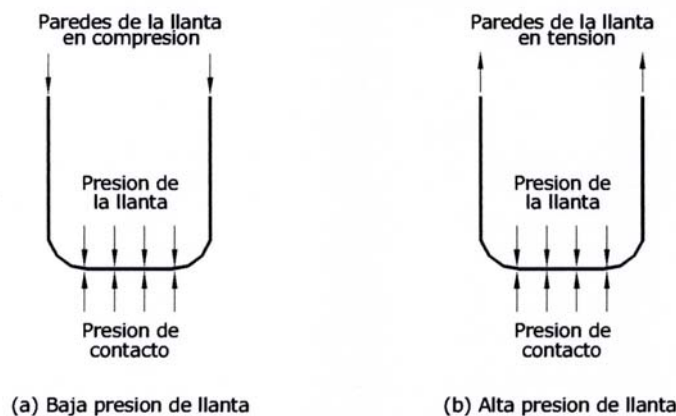


Figura No. 4.5. Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta. Referencia, (28).

Cuando se utiliza la teoría multicapas en el diseño de pavimentos flexibles, se asume que cada llanta tiene un área de contacto de forma circular, esta suposición es incorrecta, pero el error en el que se incurre no es significativo.

Otro aspecto que tenemos que considerar acerca del vehículo es la velocidad, si se utiliza la teoría viscoelástica para el diseño del pavimento, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga; si se utiliza la teoría elástica, debe seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo. (Huang, 1993).

Se ha supuesto en algunos casos que los esfuerzos aplicados por una llanta en movimiento se aproximan a una forma senoidal, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto al que se está haciendo referencia. Barksdale (1971) investigó sobre los tiempos de pulsación a diferentes profundidades bajo la superficie del pavimento, así como también a diferentes velocidades, observando cómo a mayor velocidad del vehículo, el tiempo de aplicación de la carga disminuye, también es evidente que simulando el esfuerzo vertical, con una onda triangular, los tiempos de aplicación aumenten. Así mismo se puede apreciar, que el tiempo de duración de la carga aumenta con la profundidad.

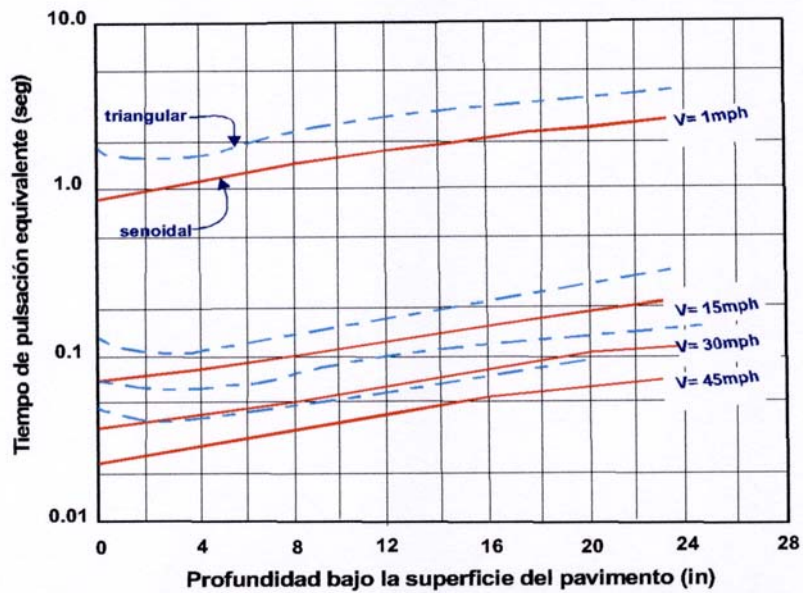


Figura No. 4.6. Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular (1 in. = 25.4 mm. y 1 mph = 1.6 km./hr.). Referencia, (28).

Macleán (1974) determinó el tiempo de carga simulándola con una onda cuadrada, sobre la cual sobrepuso los resultados obtenidos por Barksdale (carga triangular y una velocidad de 30 mph). Se puede ver que el tiempo de pulsación basado en una onda cuadrada es más pequeño que una triangular.

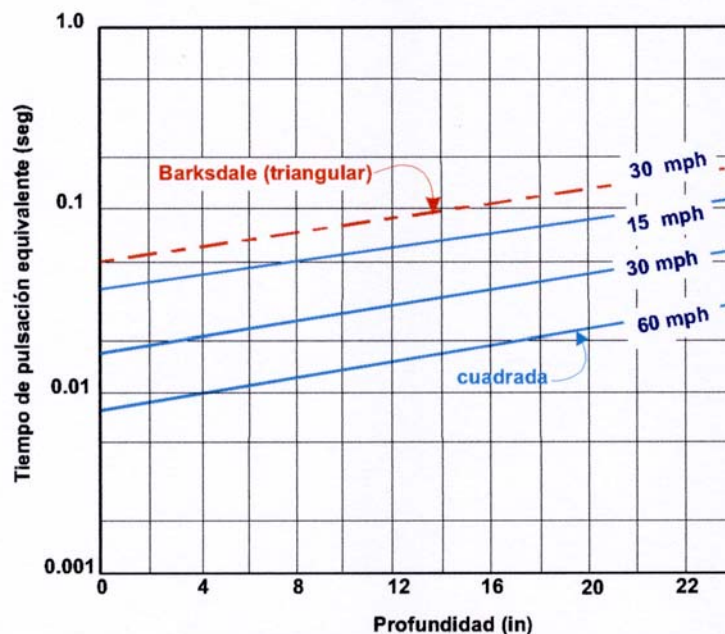


Figura No. 4.7. Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con onda tipo cuadrada. Referencia, (28).

En vista de que la velocidad del vehículo no es constante, se recomienda con fines de estandarización, la onda senoidal con tiempo de duración de 0.1 segundos de aplicación de carga y un periodo de reposo de 0.9 segundos (Huang, 1993).

4.3.2 Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento.

Normalmente el diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos se basan en la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y la manera en que se emplean las propiedades de los materiales.

Últimamente se han cambiado los procedimientos de diseño de los pavimentos y se ha pasado de los métodos empíricos a los métodos mecanicistas, basados en el acercamiento más racional durante su diseño (Monosmith, 1962). Las principales razones de este cambio son las condiciones cambiantes en la estructura del pavimento ante la sollicitación móvil de los vehículos cargados, ya que se experimentan dos tipos de esfuerzos: los estáticos por sobrecarga y los dinámicos causados por el movimiento vehicular. Otras consideraciones importantes son el desarrollo de nuevos materiales utilizados en la construcción, nuevas configuraciones de pavimentos y la disponibilidad de programas computacionales. Dentro de los métodos racionales se encuentran los procedimientos de diseño mecanicistas; su funcionamiento es estimado y basado en las propiedades mecánicas fundamentales de las capas de pavimento. (Zaman et al., 1993).

El acercamiento mecanicista en el diseño involucra el análisis teórico y el cálculo de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos, como resultado de las aplicaciones de carga originadas por las ruedas cargadas. Los materiales que constituyen las diferentes capas del firme, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico.

El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tráfico es muy complejo. Un elemento de pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian con el tiempo conforme la carga avanza. El esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales. (Lekarp et al., 1997).

En la siguiente figura se muestra una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual una carga se mueve a velocidad constante.

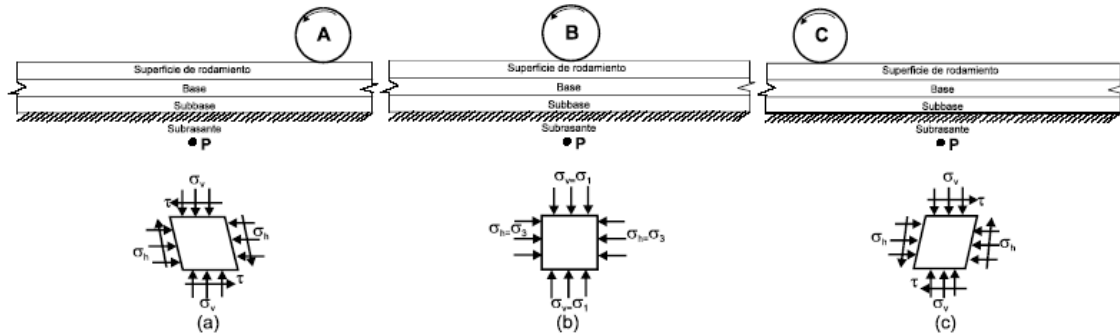


Figura No. 4.8. Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento. Referencia, (28).

El estado de esfuerzos experimentado en el punto P, debido a una carga en el punto A es, que actúan tanto los esfuerzos cortantes como los esfuerzos normales (ver (a)), cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales (ver (b)), en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que sólo se presentan esfuerzos normales, por último, la dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C, es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A (ver (c)).

4.3.3 Estado de esfuerzos que producen las cargas en función de su magnitud y tipología.

Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de neumático, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento, además de variar la forma de la huella, aparecen solicitaciones distintas a las verticales, que son las que existen cuando el vehículo está detenido o con movimiento uniforme: aparecen esfuerzos horizontales debido al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento. Cuando en la superficie de un pavimento se originan esfuerzos tangenciales, éstos deben ser resistidos por los 8 – 10 cm. superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores. Por ello, la forma práctica con la que se resuelven estos problemas, es proyectando capas de rodadura cuya resistencia al esfuerzo cortante sea suficientemente alta para garantizar que no se produzcan rupturas o deformaciones.

Los efectos dinámicos de los vehículos en movimiento se transforman en impactos y vibraciones en los que intervienen el estado superficial del pavimento y el tipo de suspensión del vehículo. En general, los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable, según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya

frecuencia varía como la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un 50 % superiores a los normales con carga estática. Este aumento de cargas refleja sobre el pavimento en forma de presión de contacto y/o incremento de la superficie de rodada.

En la figura que a continuación se muestra se puede distinguir que cuando la rueda cargada avanza, se producen pulsaciones de los esfuerzos verticales y horizontales, que son acompañados de una doble pulsación del esfuerzo cortante con una señal contraria en el plano horizontal y vertical; se muestra la relación entre esfuerzo y tiempo. Refiriéndonos a la figura anterior, se observa que a medida que el vehículo se va acercando al punto P, el esfuerzo cortante se incrementa hasta llegar a un máximo para luego decrecer hasta un valor de cero, en ese momento el esfuerzo vertical es máximo; luego se incrementa nuevamente, pero ahora con signo contrario hasta lograr un máximo negativo, para después decrecer y llegar a un cero; describiendo con este comportamiento una onda senoidal completa.

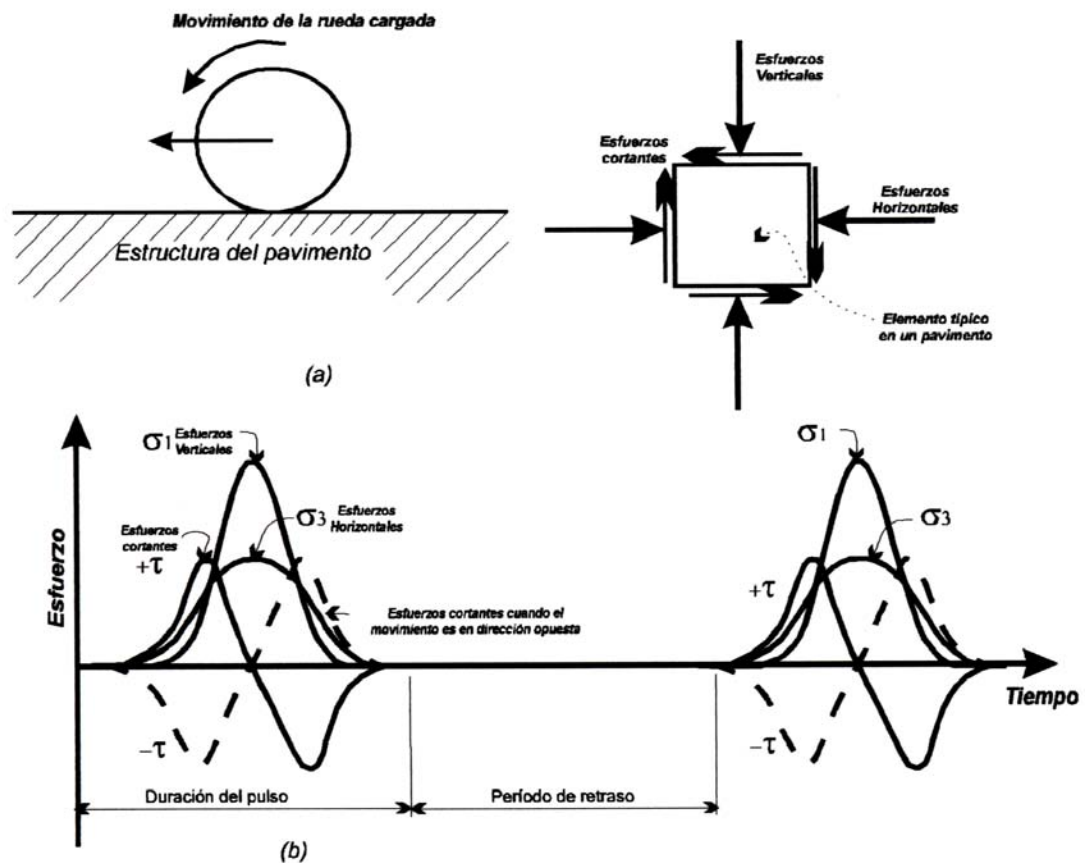


Figura No. 4.9. Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento de una rueda cargada. Referencia, (28).



Se puede apreciar el desarrollo de los esfuerzos verticales, horizontales y cortantes originados por las cargas del tráfico. El funcionamiento correcto del pavimento depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales.

El estado de esfuerzos descrito anteriormente se presenta en forma repetida cuando el paso de los vehículos se hace constante, este proceso depende de la acumulación de los ejes equivalentes

4.4 Factores intervienen en la formación de roderas.

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de las roderas o deformaciones plásticas permanentes de los pavimentos, los cuales se describirán a continuación. Cabe mencionar que se deben tener muy en cuenta estos factores al momento de realizar el proyecto de las mezclas asfálticas y la construcción de los pavimentos flexibles.

4.4.1 Granulometría de los agregados pétreos.

Existe suficiente evidencia que indica que las granulometrías densas son las deseables en la elaboración de las mezclas asfálticas debido a que mitigan los efectos de las roderas. Cuando las mezclas asfálticas densas o de granulometrías continuas, se compactan propiamente se logran mezclas con menor porcentaje de vacíos y con mayores puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta.

Brown y Pell (1974) concluyeron que las mezclas abiertas o de granulometría discontinua exhiben una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a las roderas a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas.

Elliot et al. (1991) revisaron en su estudio el efecto de la variación de la granulometría en la generación de roderas de un pavimento asfáltico. Utilizaron información de pruebas de fluencia para examinar los efectos de la vida relativa en términos del desarrollo de las roderas. Para llevar a cabo comparaciones se tomó como base una mezcla de trabajo que consiste en material que pasa la malla No. 4 y se retiene en la No. 10 de ASTM. La mezcla está compuesta de 18% de agregado granular, 37% de arena granular y 47% de arena fina. Estos porcentajes se utilizaron también para los demás variaciones de granulometrías (fina, granular, fina-granular, y granular-fina).

Los resultados mostraron que las granulometrías finas y granulares experimentaron profundidades de roderas de 7% a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y granular-fina, experimentaron profundidades de roderas de 13% a 19% mayores.

Harvey y Monismith (1993) analizaron el efecto de los tipos de agregado sobre la generación de deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Para dicho estudio se utilizaron dos tipos de agregados: granulometría con bajo contenido de finos (2.5%) y granulometría con contenido normal de finos (5.5%). La granulometría con contenido normal de finos tiene un tamaño máximo de agregados de 1". La granulometría con bajo

contenido de finos es esencialmente la misma, con la variación del 3% en el contenido de finos. El efecto significativo en la deformación cortante permanente generado por la reducción en el contenido de finos en un 3% resultó sorprendente. Para el contenido bajo de finos se obtuvo un número de repeticiones promedio de 66,476, mientras que para el contenido normal de finos se presentó un valor promedio de 13,886, con lo que existe una diferencia del 131%.

4.4.2 Forma, Tamaño y Textura de los agregados pétreos.

Para una buena resistencia a las roderas, la textura de la superficie del agregado juega un papel extremadamente importante. Particularmente en espesores gruesos de capas de asfalto y en climas calientes o en donde se requiera textura superficial rugosa. La forma de la partícula es muy importante.

Uge y Van de Loo (1974) concluyeron que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares son menos susceptibles a las deformaciones plásticas que las mezclas asfálticas elaboradas con materiales con caras lisas o de canto rodado procedentes de río, sin triturar. En este estudio el efecto de la trituración en la textura superficial no fue definido, debido a que es muy difícil separar los efectos de la textura superficial y los de la forma, debido a las caras de fractura.

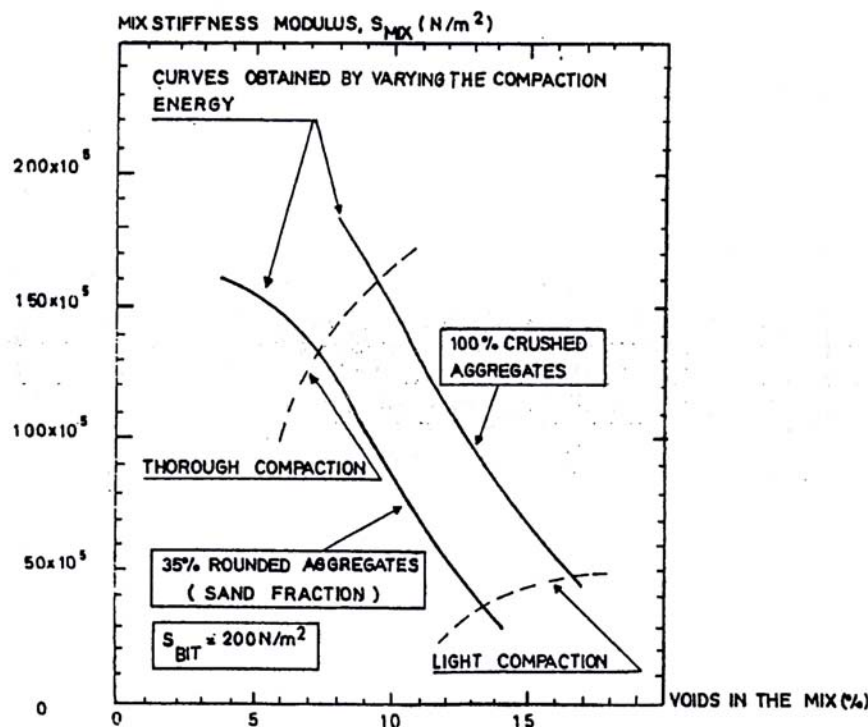


Figura No. 4.10. Efecto de la angularidad del agregado y contenido de vacíos en la rigidez a compresión de la mezcla. Referencia, (33).

Uge y Van de Loo (1974), usaron ensayos laboratorio de deformación creep y encontraron que para las mismas curvas granulométricas, las estabilidades mayores de las mezclas se

lograron con agregados pétreos procedentes de trituración y las que menos estabilidad presentaron fueron las que tenían agregados con caras más redondeadas.

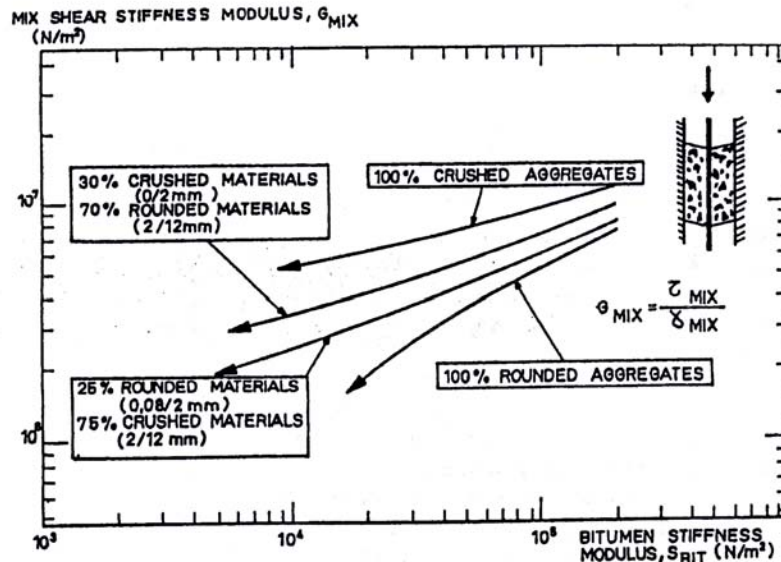


Figura No. 4.11. Efecto de la angularidad del agregado y el módulo de rigidez del asfalto, en la rigidez a compresión de la mezcla. Referencia, (33).

Una composición intermedia, la cual solo tiene la fracción de arena triturada, funciona o se comporta aún mejor que la que la formulación en la cual sólo el agregado grande fue triturado. Con esto se indica que el contacto entre partículas es más importante y significativo que el grado de trituración.

Cuando se aumentan las presiones de inflado de los neumáticos, las cargas axiales y las repeticiones de carga, se tiende a emplear mezclas asfálticas con piedras de mayor tamaño. Davis (1988) aportó que los pavimentos asfálticos elaborados con asfaltos suaves, granulometrías con tamaños de piedra de 1.5 pulgadas o mayores, y bajo porcentaje de vacíos, presentan una importante resistencia a las deformaciones plásticas o roderas.

Monismith et al. (1994) señalaron que un cambio en la forma, tamaño y textura superficial de los agregados, genera a su vez una variación en la resistencia a las roderas. Así pues, el cambio de una forma redondeada a una angular, incrementa la resistencia de los pavimentos a la generación de roderas. Lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.

El esqueleto mineral contribuye a la componente elástica del material; su forma y textura influye en las propiedades elásticas de las mezclas asfálticas, así como la compactación, ya que un esqueleto mineral bien compactado tiene un mayor comportamiento elástico.

4.4.3 Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la mezcla.

El polvo mineral junto con el ligante forman una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir un buen mastico son diversos:

- a) La relación Polvo Mineral / Asfalto de manera que cuanto más alta es ésta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.
- b) La Finura del Polvo Mineral y su afinidad por el agua. Estos dos factores están relacionados en muchos casos, pero también pueden ser bastante independientes. Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia conservada en ensayo de inmersión –compresión. Con éste ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos.

El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla puede deberse no solamente a la naturaleza del polvo mineral sino también a ciertas composiciones químicas de algunos asfaltos.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. Puede ser el contenido en los áridos procedente de la trituración de los mismos, un producto comercial de naturaleza pulverulenta como el cemento o la ceniza volante procedente de central térmica o un polvo en general calizo especialmente preparado para este fin.

El Polvo Mineral o Filler forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, además cumple con las siguientes funciones:

- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del asfalto o betún que de otra manera sería necesario para conseguir unos huecos en mezcla suficientemente bajos.
- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.
- Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

Las especificaciones suelen dar recomendaciones sobre si el polvo mineral de las mezclas asfálticas puede ser el propio de los agregados si es una calidad adecuada y suficiente a la requerida o debe ser necesariamente, en todo o en parte, de aportación; en cualquier caso,



sea cual sea, debe tratarse de un material no plástico. En otras unidades de obra diferentes de las mezclas, esta fracción no se suele considerar separadamente del resto del árido fino y, por supuesto, es de la misma naturaleza.

4.4.4 Tipo de Ligante Asfáltico.

Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas o a la formación de roderas, por eso se recomienda utilizar cementos asfálticos más duros (mayor viscosidad) en los climas cálidos para la construcción de pavimentos. (Monismith et al., 1985).

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añade a la mezcla aunque sea de similar penetración.

El punto de reblandecimiento puede valorar la aportación de los ligantes asfálticos convencionales a la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas, pero no es válido cuando se incluyen asfaltos modificados. Los asfaltos modificados tienen una baja susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

El empleo de asfaltos de baja penetración y asfaltos modificados disminuyen el riesgo de las deformaciones plásticas.

La componente elástica del ligante asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma, el ligante influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente.

Corté et al. (1994) realizaron una serie de pruebas en la pista circular del Laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC), en Francia, con el fin de determinar el efecto del tipo de asfalto en la formación de roderas, y para esto utilizaron tres tipos de asfalto, un convencional 60/70, un asfalto modificado con polímeros SBS y un asfalto multigrado Shell, también utilizaron una capa muy delgada de asfalto sobre un material de módulo alto (asfalto duro de grado 10/20). Los resultados mostraron que los asfaltos modificados con polímeros, multigrados y duros, mejoran la resistencia a las deformaciones plásticas de una capa de pavimento.

4.4.5 Contenido de Ligante Asfáltico.

El contenido de ligante asfáltico o cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir las deformaciones plásticas. El Método Marshall y Hveem son los dos métodos generalmente utilizados para seleccionar de manera preliminar el porcentaje de cemento asfáltico.



Monosmith et al., (1988) recomendaron que la mezcla asfáltica debe tener un contenido asfáltico semejante al contenido de vacíos de aproximadamente 4%. Para excluir los problemas de inestabilidad de las mezclas asfálticas, recomendaron el mínimo absoluto del 3% de vacíos en la mezcla. Este criterio debe necesariamente estar asociado con mezclas de adecuada estabilidad debido al empleo de agregados de alta calidad.

Mahboub y Little (1988) indicaron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla. Ellos propusieron que la reducción en contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, indicaron que el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el ligante asfáltico. Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y por otro lado se ajusta en gran medida la red de contenido de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas.

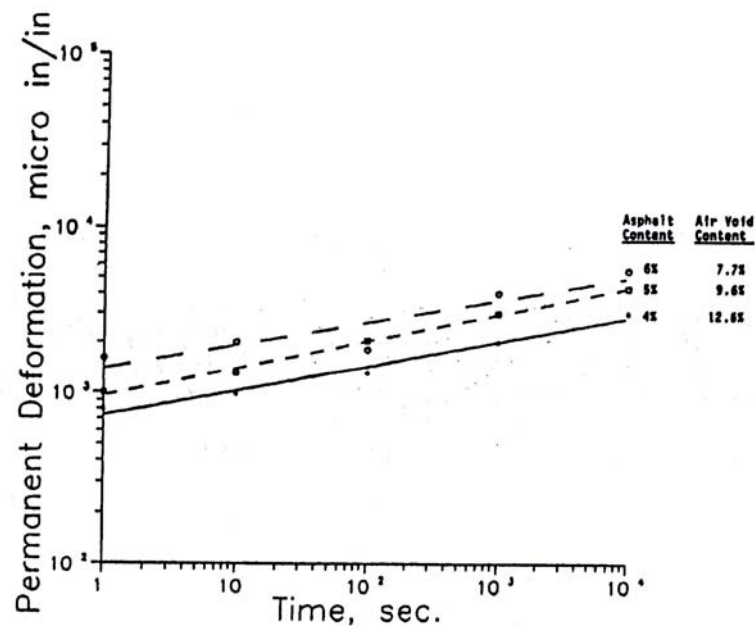
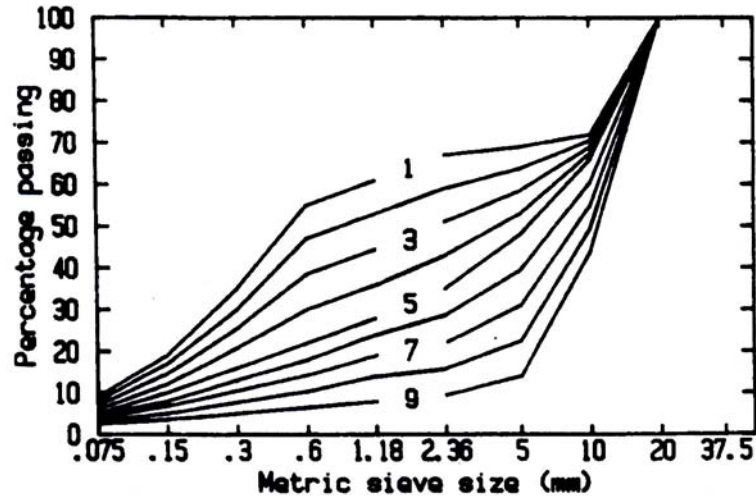


Figura No. 4.12. Efecto del contenido de asfalto en la generación de deformaciones plásticas permanentes. Referencia, (33).

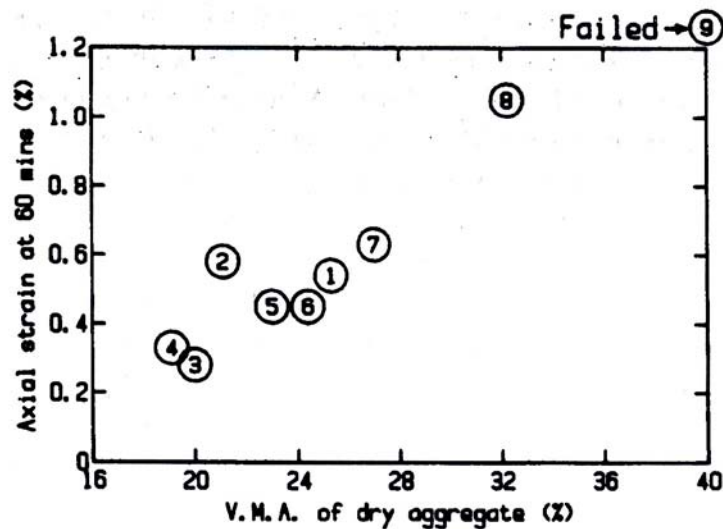
4.4.6 Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral.

Cooper, Brown and Pooley (1985) concluyeron que la buena resistencia a la deformación plástica de las mezclas requieren bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA) y que la granulometría deseada para mínimos contenidos de VMA puede ser determinada usando ensayos a agregados secos. Sin embargo se debe tener precaución que contenga la mezcla el mínimo contenido de vacíos teórico en el agregado mineral. Pudiera ser no

deseable que no hubiera suficientes vacíos en el agregado mineral, con esto se asegura que la cantidad de ligante asfáltico sea satisfactoria.



a. Grading curves



b. VMA of dry aggregate

Figura No. 4.13. Efecto del contenido de vacíos en el agregado mineral en la resistencia a las deformaciones plásticas por nueve tipos diferentes de mezclas. Referencia, (20).

Kandhal y Mallick (2001) observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) sobre el potencial de generación de roderas en las mezclas asfálticas, Utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA sobre mezclas que contienen distintos tipos de agregados (calizas, granitos, entre otras), y concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y

en el espesor de la capa de mezcla asfáltica causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas que contienen agregados de gran tamaño.

4.4.7 Contenido de Vacíos en la Mezcla Asfáltica.

Se ha mencionado que reduciendo en un cierto valor limitado el contenido de vacíos en la mezcla asfáltica, se incrementa la resistencia ante las roderas. En el campo, el porcentaje de vacíos aceptable en una mezcla (4.5%), es generalmente alcanzado con energía de compactación.

Uge y Van de Loo (1974) encontraron que los desplazamientos relativos de las partículas minerales ocurren cuando la mezcla asfáltica es manejada a altas temperaturas (durante la extensión y compactación de la mezcla) o en moderada temperatura, pero también bajo cargas prolongadas sucede de la misma naturaleza. Por consiguiente para minimizar la propensión ante las roderas, ellos recomendaron el uso de mezclas ásperas (que afecta en cierto modo a la trabajabilidad) y rodillos pesados para su compactación. Dicha combinación da como resultado un esqueleto mineral muy estable y un incremento en la fricción interna. Concluyeron que las mezclas ásperas son enormemente resistentes a las deformaciones plásticas después de compactarlas cuando se ha colocado la capa.

Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica. Se realizaron diversas pruebas de compresión axial con fluencia, y aunque las mezclas se comportaban de manera distinta significativamente, su módulo instantáneo era muy similar. Por último, las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas con altos contenidos de vacíos.

Linden y Van Der Heide (1987), enfatizaron la importancia de la compactación y concluyeron que el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad de las mezclas en el lugar, especialmente para diseños críticos (como por ejemplo un bajo contenido de asfalto pensado para aumentar la resistencia a las roderas). El buen diseño y producción de la mezcla aumenta la durabilidad y las propiedades mecánicas de las mezclas, sin dejar de lado su correcta compactación.

Se tiene que mencionar que la compactación es un factor crítico en la preparación de especímenes para evaluación en el laboratorio. Se debe tratar de simular y reproducir en la medida de lo posible, la compactación que se lleva a cabo en campo en condiciones reales.

En los casos el diseño de mezclas se deben incluir parámetros sobre los porcentajes mínimos y máximos aceptables referentes al contenido de vacíos tanto en la mezcla como en el agregado mineral para poder garantizar un funcionamiento adecuado del pavimento durante el periodo de servicio.



4.4.8 Cargas por Eje Equivalente de los vehículos y Presión de contacto de los neumáticos con el pavimento.

Las cargas de los vehículos se transmiten al pavimento por medio de los neumáticos, el área de contacto es muy importante, la presión de contacto, depende de la presión de inflado de los neumáticos, como se ha dicho, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta y la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas. Las presiones altas de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje de los vehículos, lo que conlleva a la formación de roderas son presiones altas de contacto sobre los pavimentos.

Monosmith et al (1994) realizaron un proyecto con el Strategic Highway Research Program (SHRP) en donde analizaron el efecto del estado de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones plásticas. Durante una serie de ensayos que tenía como fin observar el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo distintas condiciones, esto es, utilizando dos niveles de esfuerzo, uno alto y otro bajo, al final se determinó que un incremento en la presión de contacto de los neumáticos con el pavimento produce un decremento en la resistencia de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas.

4.4.9 Número de Repeticiones de carga.

Monosmith et al (1994) observaron que un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas, es decir, cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

Cada paso de los neumáticos por un punto sobre el pavimento, se puede considerar como un pulso de carga, si la mezcla asfáltica está a una temperatura relativamente alta, esta condición le permite comportarse de una manera viscoelastoplástica ante las sollicitaciones del tráfico, cada pulso de carga, se irá acumulando permanentemente lo que generará las roderas.

4.4.10 Empleo de modificadores asfálticos.

El empleo de modificadores asfálticos, en especial de los polímeros EVA, favorece de manera muy considerable el comportamiento de las mezclas, aumentan la resistencia a las altas temperaturas, lo que conduce a que las mezclas se comporten elásticamente, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico, evitando la formación de roderas.

Stephens (1982) indicó que las mezclas asfálticas con contenido de caucho tienen una baja resistencia estática a la fluencia comparadas con las mezclas convencionales, y esta diferencia es más pronunciada para altas temperaturas de prueba. Stephens también encontró que las mezclas con caucho fino reciclado tienen mejor resistencia que las mezclas con cauchos granulares. Sin embargo, los resultados de las pruebas de fluencia dinámica indican

que las mezclas modificadas tienen una mayor resistencia a la deformación plástica permanente que las mezclas convencionales. Estos estudios mostraron que bajo carga constante las mezclas modificadas se deforman más rápidamente que las mezclas convencionales, mientras que bajo carga repetida las mezclas modificadas se deforman menos que las convencionales.

Hanson et al. (1991) realizaron una evaluación y caracterización de pavimentos flexibles, elaborados con mezclas modificadas con caucho. Utilizando secciones de prueba, hicieron mediciones a lo largo de dos años para ver el comportamiento de las mezclas bajo deformación plástica permanente. En las pruebas de deformación plástica permanente realizadas sobre corazones extraídos en campo, se observó que las mezclas convencionales se deforman más rápido que las mezclas modificadas con el uso de caucho. Sin embargo, las probetas preparadas en el laboratorio indicaron que no existe una diferencia entre las mezclas convencionales y las modificadas, estadísticamente hablando.

Kroutz y M. Stroup - Gardiner (1992) realizaron estudios con el fin de observar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado. Utilizando pruebas de carga estática y de carga repetida, analizaron la respuesta a la deformación permanente de dichas mezclas. Las conclusiones indicaron que la adición del caucho reciclado genera mezclas que exhiben menos deformación permanente a altas temperaturas, comparadas con mezclas que no recibieron algún tipo de tratamiento.

Stuart (1993) analizó el efecto que presenta la utilización de modificadores sobre las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas. Realizó una comparación entre las propiedades de una mezcla que contenía asfalto AC-20 y otros asfaltos que contenían diferentes tipos de modificadores. La información obtenida sobre viscosidad y penetración de los ligantes indican que los tres modificadores químicos pueden ser más rígidos para temperaturas altas en el pavimento y más suaves para temperaturas más bajas que para el caso de los pavimentos que no incluyen modificadores asfálticos. Las deformaciones permanentes fueron medidas mediante pruebas de fluencia utilizadas para evaluar la susceptibilidad de las mezclas a las roderas. Los tres modificadores químicos presentaron resultados mostrando un decremento en las deformaciones con un promedio de 25%.

Kamel y Miller (1994) realizaron un estudio para observar el efecto de los modificadores sobre las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Emplearon tres tipos de asfaltos: uno convencional, uno modificado con polímeros, y un asfalto modificado sin el uso de polímeros llamado Premium. En términos de comportamiento, los asfaltos modificados mostraron una mayor resistencia a las roderas comparado con los valores obtenidos para un asfalto convencional. Al inicio de las pruebas, el comportamiento de los tres pavimentos fue excelente, empezando a observarse diferencias en el comportamiento con el cambio de ciclos de carga de 10,000 a 20,000 cuando el pavimento convencional empezó a mostrar deterioros en una forma acelerada. A medida que se aplicaron más cargas, el comportamiento de las mezclas modificadas con asfaltos fue notoriamente superior, y ambas mezclas modificadas tuvieron un comportamiento muy similar durante toda la prueba. Debido a las deformaciones excesivas presentadas en el pavimento convencional, la prueba se terminó después de los 300,000 ciclos de carga. Las pruebas para los otros dos

tipos de pavimentos (modificados) duraron hasta los 900,000 ciclos de carga. Se comparó el número de ciclos necesarios para causar una deformación permanente de 26 mm., en cada uno de los tres pavimentos y resultó muy evidente que los pavimentos modificados incrementaron significativamente la capacidad de carga de las secciones analizadas.

Monismith et al. (1994) comentaron que los modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperaturas crítica, reduciendo la susceptibilidad ante la formación de roderas. Asimismo, investigaron la influencia de los modificadores sobre las características de deformación plástica de mezclas definidas por la prueba de cortante simple con carga repetida.

Rebala y Estakhri (1995) observaron que mediante la incorporación de caucho al asfalto a temperaturas altas (vía húmeda) se producen mezclas asfálticas que inhiben el agrietamiento y pueden inhibir las roderas. Cuando se agrega el caucho como parte de la granulometría (vía seca) también se producen mezclas resistentes a la formación de roderas pero pueden tener efectos adversos en el agrietamiento. En el proceso de vía seca, el caucho existe como partículas separadas, dichas partículas en el asfalto normalmente intensificarán la propensión al agrietamiento pero podrán aumentar la resistencia a las roderas.

4.4.11 Temperatura medioambiental.

Es conocido el hecho de que la temperatura medioambiental elevada, reblandece el asfalto de las mezclas en los pavimentos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas, debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.

La temperatura medioambiental por lo tanto, es un factor que influye de una manera muy importante en las deformaciones plásticas de los pavimentos, porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica.

Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de roderas.

4.4.12 Agua.

El agua puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mezclas. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

Terrel et al. (1993) realizaron un estudio en la Universidad del Estado de Oregon en E.U.A., donde se demuestra que la propensión a las roderas de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de someterlas a la acción del agua. El incremento en las roderas que podrían ocurrir in situ pueden ser estimadas utilizando el procedimiento presentado por el programa SHRP.

4.5 Ensayos de laboratorio que permiten evaluar las deformaciones plásticas en las capas del pavimento asfáltico.

Los ensayos de laboratorio tienen la finalidad de tratar de reproducir al máximo posible, lo que le ocurre en un pavimento cuando se le aplican las cargas, se pueden evaluar deformaciones bajo condiciones de temperatura, humedad, esfuerzos y condiciones generales de los materiales y al final se puede obtener un dictamen en el que se puedan analizar las características y comparar con los requisitos o normas fijadas.

Estos ensayos ayudan a que los pavimentos puedan ser previamente analizados antes de su colocación, o bien después de su colocación, y existen unos ensayos más aproximados a la realidad que otros. A continuación se mencionarán detalladamente algunos de los tipos de ensayos que más se utilizan.

4.5.1 Tipologías de ensayos para evaluar las deformaciones plásticas.

Los ensayos de laboratorio que se utilizan principalmente para evaluar las deformaciones plásticas o roderas, se pueden dividir en 6 tipologías principales que son:

4.5.1.1 Ensayos Diametrales.

Este tipo de ensayos no aparecen como los más indicados ó adecuados para evaluar las deformaciones plásticas. Desde que se sabe que es un ensayo de tensión, no puede ser un buen predictor de las roderas.

	MÉTODO DE ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENSAYOS DIAMETRALES.	Diametral Estático (creep).	4 in. de diámetro X 2.5 in. de altura	El ensayo es fácil de desempeñar. El equipo está generalmente disponible en muchos laboratorios. El espécimen es fácil de fabricar.	El estado de tensión es no uniforme y la fuerza depende de la forma del espécimen. Tal vez sea inapropiado para estimar la deformación permanente.
	Diametral con Carga Repetida.	4 in. de diámetro X 2.5 in. de altura	El ensayo es fácil de desempeñar. El espécimen es fácil de fabricar.	A alta temperatura de carga existen cambios en la forma del espécimen y afecta el estado de esfuerzos y las medidas significativas del ensayo.
	Diametral con Módulo Dinámico.	4 in. de diámetro X 2.5 in. de altura	El espécimen es fácil de fabricar. Ensayo no destructivo.	
	Resistencia Diametral.	4 in. de diámetro X 2.5 in. de altura	El ensayo es fácil de desempeñar. El equipo está generalmente disponible en muchos laboratorios. El espécimen es fácil de fabricar. Tiempo de ensayo mínimo	Se encontró que sobreestimaba a las roderas. Para el ensayo dinámico el equipo es complejo.

Tabla No. 4.1. Ensayos Diametrales para evaluar las deformaciones plásticas.

4.5.1.2 Ensayos Uniaxiales.

Es un tipo de ensayo que puede ser potencialmente usado para predecir el funcionamiento de pavimentos, pero uno de los principales problemas que presenta este tipo de ensayo es la capacidad para predecir el funcionamiento debido a la carga y la temperatura que pueden ser usados en el ensayo. Se sabe que la temperatura y el esfuerzo aplicado en el laboratorio debe ser muy similar al que un pavimento presenta en condiciones reales, estos ensayos por otro lado no conducen a una falla inmediata de los especímenes.

	MÉTODO DE ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENSAYOS UNIAXIALES.	Uniaxial Estático (creep).	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	<p>El ensayo es fácil de desempeñar.</p> <p>El equipo está generalmente disponible en muchos laboratorios.</p> <p>Muy extendido y conocido.</p> <p>Información muy técnica.</p>	<p>Predice el funcionamiento, siendo cuestionable.</p> <p>Restringe la temperatura de ensayo y los niveles de carga, no simula condiciones reales.</p> <p>No simula el fenómeno dinámico real.</p> <p>Dificultad para obtener ratios 2:1 en el laboratorio.</p>
	Uniaxial con Carga Repetida.	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	Buenas simulaciones de las condiciones del tráfico.	<p>El equipo es muy complejo</p> <p>Restringe la temperatura de ensayo y los niveles de carga, no simula condiciones reales.</p> <p>Dificultad para obtener ratios 2:1 en el laboratorio.</p>
	Uniaxial con Módulo Dinámico.	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	Ensayo no destructivo.	<p>El equipo es muy complejo</p> <p>Dificultad para obtener ratios 2:1 en el laboratorio.</p>
	Resistencia Uniaxial.	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	<p>El ensayo es fácil de desempeñar.</p> <p>El equipo está generalmente disponible en muchos laboratorios.</p> <p>Tiempo de ensayo mínimo</p>	Capacidad para predecir la deformación permanente cuestionable

Tabla No. 4.2. Ensayos Uniaxiales para evaluar las deformaciones plásticas.

4.5.1.3 Ensayos Triaxiales.

La diferencia con los ensayos uniaxiales, es que este tipo de ensayo proporciona una presión de confinamiento, lo que aproxima más a las condiciones reales a los que está sometido un pavimento, proporciona una temperatura y presión similar a la del lugar, llevando a los especímenes a una falla a corto tiempo. Se tiene poca experiencia, pero se han realizado algunos ensayos sobre deformaciones plásticas sobre todo en triaxiales creep y triaxiales de carga repetida. Es complicado de realizar.

	MÉTODO DE ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENSAYOS TRIAXIALES.	Triaxial Estático (creep confinado).	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	Relativamente simple el ensayo y el equipo. Las temperaturas del ensayo y los niveles de carga simulan mejor las condiciones de campo que no confinado. Potencialmente económico.	Predice el funcionamiento, siendo cuestionable. Restringe la temperatura de ensayo y los niveles de carga, no simula condiciones reales. No simula el fenómeno dinámico real. Dificultad para obtener ratios 2:1 en el laboratorio.
	Triaxial con Carga Repetida.	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	Las temperaturas del ensayo y los niveles de carga simulan mejor las condiciones de campo que no confinado. Mejor expresión de las condiciones de tráfico.	El equipo es muy complejo Restringe la temperatura de ensayo y los niveles de carga, no simula condiciones reales. Dificultad para obtener ratios 2:1 en el laboratorio.
	Triaxial con Módulo Dinámico.	4 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	Proporciona una necesaria entrada para el análisis estructural Ensayo no destructivo.	En altas temperaturas es muy complejo el sistema de ensayo (medición de pequeñas deformaciones, es necesaria sensibilidad a altas temperaturas). Posiblemente menos problemas para estudiar, disposición de LVDT. El equipo es muy complejo y costoso. Requiere una cámara triaxial.
	Esfuerzo Triaxial.	4 in. ó 6 in. de diámetro X 8 in. de altura y otros.	Relativamente simple el ensayo y el equipo. Tiempo de ensayo mínimo	Capacidad para predecir la deformación permanente cuestionable. Requiere una cámara triaxial.

Tabla No. 4.3. Ensayos Triaxiales para evaluar las deformaciones plásticas.

4.5.1.4 Ensayos de Corte.

Este tipo de ensayo incluye al ensayo Superpave de corte SST, es muy complicado de llevar a cabo y muy costoso, no tiene mucha aceptación, debido a los modelos que utiliza para la predicción del comportamiento o funcionamiento. No es apropiado su uso en la predicción de roderas.

	MÉTODO DE ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENSAYOS DE CORTE.	SST Ensayo de Frecuencia de Barrido - Módulo de Corte Dinámico.	6 in. de diámetro X 2 in. de altura.	<p>La aplicación del esfuerzo de corte simula las cargas inducidas por el tráfico.</p> <p>AASHTO estandarizó el procedimiento disponible.</p> <p>El espécimen se prepara con la prueba SGC.</p> <p>La curva maestra podría dibujarse a diferentes temperaturas y frecuencias.</p> <p>Ensayo no destructivo.</p>	<p>El equipo es extremadamente costoso y de limitada disponibilidad.</p> <p>El ensayo es complejo y difícil de correr, usualmente se necesita entrenamiento especial.</p> <p>Las pruebas SCG se necesitan cortar y pegar después del ensayo.</p>
	SST Ensayo Repetido de Corte con altura constante.	6 in. de diámetro X 2 in. de altura.	<p>La aplicación del esfuerzo de corte simula las cargas inducidas por el tráfico.</p> <p>AASHTO estandarizó el procedimiento disponible.</p> <p>El espécimen se prepara con la prueba SGC.</p>	<p>El equipo es extremadamente costoso y de limitada disponibilidad.</p> <p>El ensayo es complejo y difícil de correr, usualmente se necesita entrenamiento especial.</p> <p>Las pruebas SCG se necesitan cortar y pegar después del ensayo.</p> <p>Alto COV de resultados del ensayo.</p> <p>Se requieren más de tres respuestas necesariamente.</p>
	Ensayo Triaxial de Esfuerzo de Corte.	6 in. de diámetro X 2 in. de altura.	Corto tiempo de ensayo.	<p>Mucho menos utilizado.</p> <p>Especimen confinado, más requerimientos y complejidad.</p>

Tabla No. 4.4. Ensayos de Corte para evaluar las deformaciones plásticas.



4.5.1.5 Ensayos Empíricos.

Son ensayos basados en la experiencia y en la correlación de resultados de laboratorio y sus predicciones en cuando a funcionamiento son muy limitadas, de ser empleados, en la mayoría requieren de otros ensayos de laboratorio adicionales.

	MÉTODO DE ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENSAYOS EMPÍRICOS.	Ensayo Marshall.	4 in. de diámetro X 2.5 in. de altura ó 6 in. de diámetro X 3.75 in. de altura.	Muy extendido, conocido, uso estandarizado para el diseño de mezclas. El procedimiento del ensayo está estandarizado. Fácil de implementar y el tiempo del ensayo es muy corto. El equipo mayormente se encuentra disponible en la mayoría de los laboratorios.	No es capaz de proporcionar una categoría o nivel de las deformaciones plásticas que se podrían producir en la mezcla. Proporciona pocos datos para indicar su relación con el funcionamiento.
	Ensayo Hveem.	4 in. de diámetro X 2.5 in. de altura	Desarrollado con muy buena base filosófica. Corto tiempo de ensayo. Criterios disponibles.	No tiene un uso tan extendido como el método Marshall. Necesita el compactador por amasado California. No es capaz de proporcionar una categoría o nivel de las deformaciones plásticas que se podrían producir en la mezcla.
	GTM	Mezcla asfáltica en caliente suelta.	Simula la acción de los rodillos durante la construcción. Los parámetros son generados durante la construcción. Criterios disponibles.	El equipo no se encuentra fácilmente a disposición y no es muy difundido. No es capaz de proporcionar una categoría o nivel de las deformaciones plásticas que se podrían producir en la mezcla.

Tabla No. 4.5. Ensayos Empíricos para evaluar las deformaciones plásticas.

4.5.1.6 Ensayos de Simulación.

Aparece como muy razonable su utilización en el campo de la predicción de las deformaciones plásticas, sus resultados son muy aproximados con el funcionamiento real del pavimento. Simulan muy bien lo que sucede realmente en un pavimento sometido a las cargas del tráfico. Existe suficiente información disponible para dar recomendaciones y adoptar criterios. Son los tipos de ensayos que más rápidamente se adoptaron para realizar este tipo de análisis.

	MÉTODO DE ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENSAYOS DE SIMULACIÓN.	Analizador de Pavimentos Asfálticos.	Cilíndrico 6 in. X 3.5 ó 4.5 in. ó viga.	Simula la acción del tráfico y condiciones de temperatura. Modificado y mejorado de GLWT. Simple para funcionar. Pueden ser ensayadas de 3 a 6 probetas al mismo tiempo. Usado extendidamente LWT en E.U.A. Criterios disponibles. Especímenes cilíndricos utilizados SGC.	Relativamente costoso.
	Wheel - Tracking de Hamburgo.	10.2 in. X 12.6 in. X 1.6 in.	Usada ampliamente en Alemania. Capaz de evaluar los daños producidos por la humedad. Se pueden ensayar dos probetas al mismo tiempo.	Bajo potencial de aceptación por parte de los E.U.A.
	Ensayo de Roderas Francés.	7.1 in. X 19.7 in. X 0.8 a 3.9 in.	Muy exitoso y usado en Francia. Dos losas de mezcla asfáltica en caliente pueden ensayarse al mismo tiempo.	No fue extendido ni utilizado en los E.U.A.
	PURWheel.	11.4 in. X 12.2 in. X 1.3, 2, 3 in.	El espécimen puede ser traído de campo o preparado en el laboratorio.	Necesita un compactador lineal. No existen experiencias disponibles.
	Modelo Móvil de Simulación de Carga.	47 in. X 9.5 in. X espesor.	El espécimen es traído a escala para llenar el simulador.	Se necesitan materiales extra. No es adecuado para usarlo por rutina. El estándar para la fabricación de especímenes necesita ser desarrollado.
	RLWT.	6 in. de diámetro y 4.5 in de altura.	Utiliza SGC para muestra. Muy relacionado con el APA rth deph.	No tiene usa extendido en los E.U.A. Muy pocos datos disponibles.
	Dispositivo Wessex.	6 in. de diámetro y 4.5 in de altura.	Pueden ser ensayados dos especímenes al mismo tiempo. Utiliza SGC para muestra.	No está extendido ni es bien conocido. Existen muy pocos datos disponibles.

Tabla No. 4.6. Ensayos de Simulación para evaluar las deformaciones plásticas.

Debido a que los ensayos de simulación son los más utilizados para valorar la resistencia de las mezclas ante las deformaciones plásticas. Se presenta una tabla en donde aparecen las características de distintos ensayos de pista de laboratorio y que son utilizados en diferentes países, adaptados a las condiciones de los mismos.

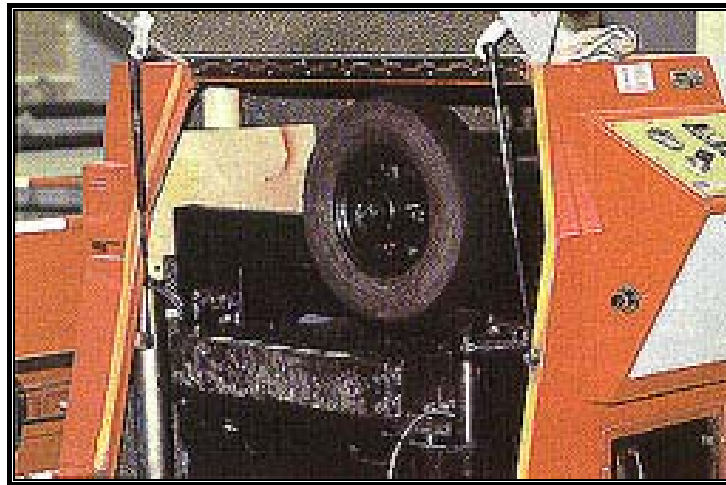
	LCPC	Hamburgo	Georgia	BS	NLT
Carga de la rueda (N)	5.000	705	700	520	_____
Presión sobre la probeta (kPa)	600	1.500	700	_____	900
Frecuencia de carga (Ciclos por minuto)	60	60	45	42	42
Mecanismo de carga	Neumático	Rueda de acero	Rueda de caucho	Rueda de caucho	Rueda de caucho
Medio del Ensayo	Aire	Agua	Aire	Aire	Aire
Masa de la probeta (kg)	20	10	5	Variable	Variable
Espesor de la probeta (mm)	100	80	75	35-55	51
Temperatura del Ensayo (grados cent)	60	50	40	45 , 60	60
Ciclos especificados	30.000	10.000	8.000	1.890	5.040
Máxima deformación permitida	10 mm.	4 mm.	7 mm.	_____	15 µm/min

Tabla No. 4.7. Propiedades de los diferentes ensayos de pista de laboratorio. Referencia, (67).

A continuación se muestran fotografías de algunos aparatos empleados para realizar Ensayos similares al de Pista de la Normativa Española NLT , para evaluar las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas.



Fotografía 4.1 Máquina de Ensayo de Hamburgo. Hamburg Wheel Tracking Device. Referencia, página web (11).



Fotografía 4.2 Máquina de Ensayo de Roderas Francés. LCPC. Referencia, página web (11).



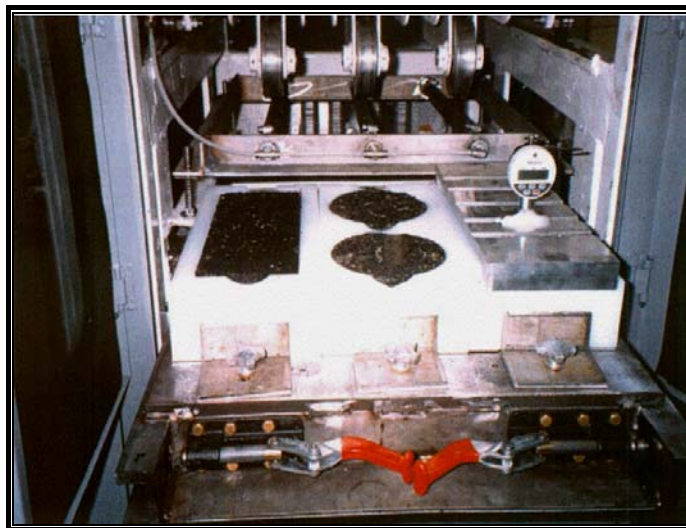
Fotografía 4.3 Máquina de Ensayo de Georgia. The Georgia Loaded – Wheel Tester. Referencia, página web (11).



Fotografía 4.4 Máquina de SST. Superpave. The Superpave Shear Tester (SST). Referencia, página web (11).



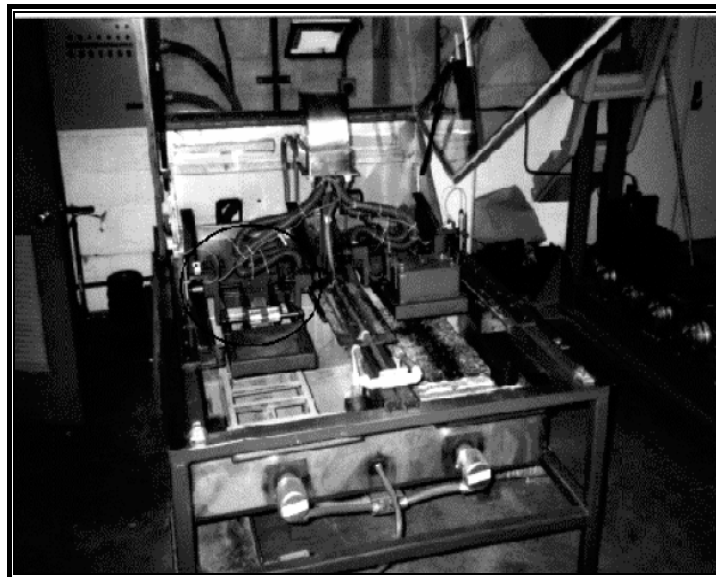
Fotografía 4.5 Máquina para realizar ensayos de deformaciones plásticas de la Universidad de Wyoming U.S.A. tipo GLWT. Referencia, página web (11).



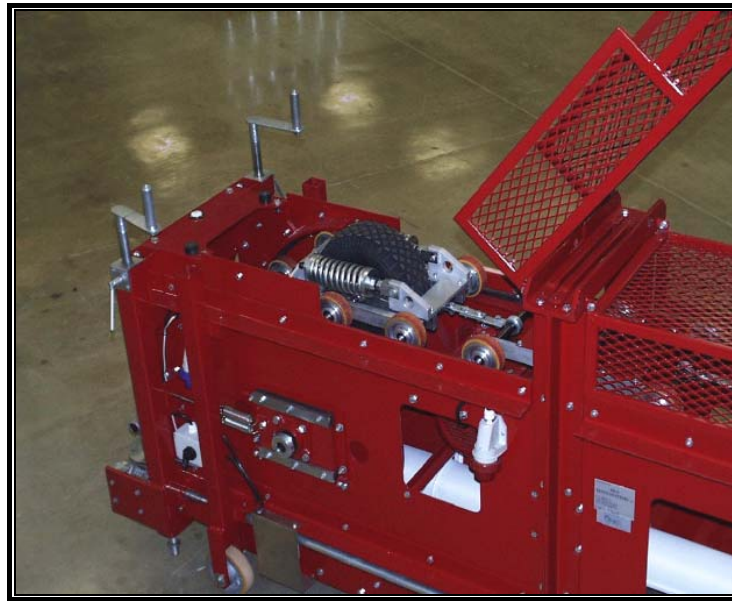
Fotografía 4.6 Asphalt Pavement Analyzer APA. Referencia, (19).



Fotografía 4.7 Superfos Construction Rut Testers. Referencia, (19).



Fotografía 4.8 Purdue University Laboratory Wheel Tracking Device. Referencia, (19).



Fotografía 4.9 Model Mobile Load Simulator. Referencia, (19).



Fotografía 4.10 Máquina de Pista NLT. Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.



4.6 Modelos matemáticos para la predicción de las deformaciones plásticas en las capas de mezcla asfáltica de pavimentos flexibles.

Para el desarrollo de un modelo ó método de predicción de profundidad de roderas adecuado, un paso muy importante es la determinación de los estados de esfuerzo de una sección de pavimento bajo la acción de las cargas, se debe utilizar un modelo matemático adecuado al sistema de pavimento, considerando una caracterización de las propiedades reales de los materiales con los cuales está constituido el pavimento.

Dentro de la extensa gama de modelos representativos del comportamiento ante las deformaciones plásticas o roderas de las mezclas asfálticas se pueden distinguir tres categorías generales:

1. Ecuaciones de regresión empíricas.
2. Leyes típicas de deformación plástica.
3. Ecuaciones funcionales basadas directamente en resultados de pruebas de laboratorio.

En todos los casos, las pruebas de laboratorio son ejecutadas para determinar los parámetros representativos.

En algunos de los modelos, el estado de tensiones está identificado como el esfuerzo de compresión axial (σ_1) y el esfuerzo horizontal (σ_2). Las roderas están relacionadas más cercanamente al esfuerzo cortante, el cual puede ser obtenido por ($\sigma_1 - \sigma_2$).

Celard (1977) enfatizó, basado en los resultados de pruebas dinámicas de fluencia, el efecto importante del esfuerzo cortante sobre el índice de deformación permanente, según las pruebas que él realizó, un aumento en el esfuerzo cortante de 0.1 a 0.25 MPa (con esfuerzo normal de 0.1 MPa) incrementa el índice de deformación permanente de 0.1 a 10 (un incremento del 100%). Por otra parte, variando el esfuerzo normal de 0.1 a 0.25 MPa (con un esfuerzo cortante constante de 0.1 MPa) no cambia significativamente el índice de deformación permanente.

Brown y Bell (1977) fueron muy cuidadosos en la duplicación apropiada de los estados de esfuerzos. Sugirieron en lo sucesivo, el empleo de las invariantes de tensión como el método más apropiado para representar correctamente el estado de tensión para caracterización de materiales. El uso de las invariantes de tensión es particularmente ventajoso en la zona de tensión de las capas inferiores de mezcla asfáltica y también para predecir las roderas para condiciones en donde el eje de simetría esté alejado de la aplicación de la carga. El enfoque es que las condiciones de tensión en un punto puede ser caracterizado por un esfuerzo normal, p , y el esfuerzo de corte octaedral, τ_{oct} .

$$p = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\tau_{oct} = (1/3) * ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{1/2}$$

Donde σ_1 , σ_2 , σ_3 son las tensiones principales existentes en el punto. Por simplicidad, q es la tensión de corte y puede ser definida de la siguiente manera:

$$q = (3/\sqrt{2}) * \tau_{oct}$$

Se muestran a continuación algunos de los modelos propuestos por diversos investigadores, para la predicción de la deformación plástica permanente en las capas asfálticas con su respectivo ensayo de laboratorio en el cual se basa dicho modelo.

Autor(es)	Ecuación de la deformación permanente plástica	Variables del modelo	Fundamento del modelo
Lai y Anderson (1973)	$\epsilon_{vp} = a (\sigma) t^b$	ϵ_{vp} = Deformación viscoplástica t = Tiempo $a(s) = b_1 s + b_2 s^2$ s = Esfuerzo de fluencia b, b_1, b_2 = Constantes de regresión	Ensayo de Fluencia Uniaxial
Van de Loo (1976)	$\epsilon_p = c \sigma N^a$	ϵ_p = Deformación axial permanente s = Nivel axial de esfuerzos (103.5 KPa) N = Número de aplicaciones de carga a, c = Constantes	Ensayo de Fluencia Axial
Kirwan, Snaith y Glynn (1977)	$\epsilon_n = A \Delta^b$	ϵ_n = Deformación axial permanente inducida después de un tiempo transcurrido N . A = Constante que está en función del material y del tiempo transcurrido. b = Constante para el material Δ = Esfuerzo a la compresión axial aplicado.	Ensayo Uniaxial de Compresión Dinámica
Monismith, Inkabi, Freeme, McLean (1977)	$\epsilon_z^p = \left[\delta (T) N^\alpha \bar{\sigma}^{-n-1} t \right]^* \left[\sigma_z - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$	ϵ_z^p = Deformación permanente vertical. $d(T)$ = Constante en función de la temperatura. a = Coeficiente determinado experimentalmente. N = Número de repeticiones de esfuerzos. $\bar{\sigma}$ = Esfuerzo equivalente definido como función de s_1, s_2, s_3 t = Tiempo de carga.	Ensayo de compresión Triaxial de Carga Repetida y considera la carga axial del tránsito y la distribución lateral
Meyer y Haas (1977)	$\epsilon_p = f(\sigma_1, \sigma_3, T, AV, N) \pm E$	ϵ_p = Deformación axial permanente s_1 = Esfuerzo vertical s_3 = Esfuerzo lateral T = Temperatura AV = Contenido de vacíos N = Número de aplicaciones de carga E = Error de estimación	Ensayos de Carga Triaxial repetida
Kenis (1977)	$\epsilon_p(N) = e \mu N^{-\alpha}$	$\epsilon_p(N)$ = Deformación permanente por pulso $a = 1 - S$ S = Pendiente de la línea en un trazo log - log de la deformación permanente contra N e = Deformación de la carga pico senoidal para un pulso de carga de duración $d = 0.1$ segundos $\mu = \frac{IS}{e}$ I = Intercepción	Ensayo de Carga Uniaxial Repetida.

Cuadro 4.1. Modelos matemáticos de predicción de deformaciones plásticas en las capas de mezcla asfáltica de un pavimento.

Autor(es)	Ecuación de la deformación permanente plástica	Variables del modelo	Fundamento del modelo
Francken (1977)	<p>Para Esfuerzos altos</p> $\epsilon_p(t) = A t^B + C (\exp D t - 1)$ <p>Para Esfuerzos bajos</p> $\epsilon_p(t) = A t^B$	$\epsilon_p(t)$ = Deformación permanente A, B, C, D = Parámetros $A = 115 (s_1 - s_3) / E^* $ $B = 0.182 + 0.294 (s_{VM} - s_{VL})$ s_{VM} = Esfuerzo máximo s_{VL} = Umbral de la falla plástica t = Tiempo s_1 = Esfuerzo vertical s_3 = Esfuerzo lateral $ E^* $ = Módulo	Ensayos Triaxiales Dinámicos
Huschek (1977)	$e_{irr} = c * \sigma t^A$ $e_{irr}(T, \Delta t_1, t) = \frac{\sigma \Delta t_1}{[\eta(T, t)]}$ $\eta(T, t) = \frac{t^{1-A}}{(c * A)}$	e_{irr} = Deformación permanente C = Constante A = Característica de consolidación s = Nivel de esfuerzos η = Viscosidad T = Temperatura. Δt_1 = Tiempo de carga	Ensayos de Fluencia Uniaxial y de fluencia con carga cíclica
Thrower (1977)	$e_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2\eta} \quad i \neq j$ $e_{ij} = \frac{\sigma_m}{3\chi} + \frac{(9\sigma_{ij} - \sigma_m)}{18\eta}$	e_{ij} = Índice de deformación s_{ij} = Estado de esfuerzos s_m = Esfuerzo isotrópico medio η = Coeficiente de velocidad cortante χ = Coeficiente de viscosidad volumétrica	Teoría de la Viscoelasticidad
Battiato et al. (1977)	$J(t) = J_1 t^a$ $u_{ik}^{perm} = \frac{1}{\eta_s} g_{ik}(y, z)$	J(t) = Función de relajación de fluencia t = Tiempo J ₁ = Parámetros de fluencia cortante a = Pendiente de la línea en un trazo log – log entre J(t) y el tiempo. u_{ik}^{perm} = Deformación permanente. η_s = Viscosidad cortante del elemento de Maxwell en series. $g_{ik}(y, z)$ = Función de tensor.	Ensayos de Fluencia Uniaxial
Celard (1977)	$\ln(\epsilon) = A + B * \ln(\sigma_{VM}) + C * \sigma_H + D * T$	e = Índice de deformación permanente s_{VM} = Esfuerzo de compresión vertical s_H = Esfuerzo de compresión horizontal A, B, C, D = Coeficientes T = Temperatura	Ensayos Dinámicos de Fluencia.

Cuadro 4.2. Modelos matemáticos de predicción de deformaciones plásticas en las capas de mezcla asfáltica de un pavimento.

Autor(es)	Ecuación de la deformación permanente plástica	Variables del modelo	Fundamento del modelo
Brown y Bell (1979)	$\epsilon_p = \left(\frac{q}{a}\right)^b (N)$	e_p = Deformación cortante permanente q = Esfuerzo desviador a, b = Constantes N = Número de aplicaciones de carga	Ensayos de Carga Axial Repetida
Verstraeten, Romani y Veverka (1977)	$\epsilon_p(t) = A \left(\frac{t}{10^3}\right)^B = \frac{C(\sigma_1 - \sigma_3)}{ E^* \left(\frac{t}{10^3}\right)^B}$	$e_p(t)$ = Deformación permanente en un tiempo t (en segundos) A = Coeficiente que depende de la composición de la mezcla y de las condiciones experimentales (esfuerzos, frecuencia, temperatura); éste caracteriza la susceptibilidad de la mezcla a la formación de roderas B = Coeficiente que varía entre 0.14 y 0.37 $C = f \left[\frac{V_b}{V_b - V_v} \right]$ /E*/ = Módulo de la mezcla s_1 = Amplitud del esfuerzo vertical s_3 = Esfuerzo lateral V_b = Volumen del asfalto V_v = Volumen de vacíos	Ensayos Triaxiales Dinámicos.
Uzan (1982)	$\epsilon_p(N) = \epsilon_r \mu N^{-\alpha}$	$e_p(N)$ = Deformación permanente para e_r = Deformación resiliente N = Número de repeticiones a, μ = Características del material basadas en los coeficientes de intercepción y pendiente	Ensayos de Carga Repetida
Tseng y Lytton (1986)	$\epsilon_a = e_0 \exp \left[-\left(\frac{\delta}{N}\right)^b \right]$	e_a = Deformación permanente N = Ciclos de carga e_0, b = Parámetros de regresión	Ensayos de Carga Repetida
Khedr (1986)	$\frac{\epsilon_p}{N} = A_a N^{-m}$	e_p = Deformación axial permanente N = Número de ciclos de carga A_a = Función de las propiedades del m = Parámetro del material.	Ensayos de Multi – Etapas Dinámicas.

Cuadro 4.3. Modelos matemáticos de predicción de deformaciones plásticas en las capas de mezcla asfáltica de un pavimento.

Autor(es)	Ecuación de la deformación permanente plástica	Variables del modelo	Fundamento del modelo
Mahboub y Little (1988)	$\frac{\epsilon_{vp}}{N} = a \sigma^b$	$\frac{\epsilon_{vp}}{N}$ = Deformación viscoplástica por ciclo acumulada. s = Esfuerzo cíclico pico. a, b = Parámetros de regresión. N = Número de repeticiones de carga	Ensayos de Fluencia Uniaxial
Leahy (1989)	$\epsilon_p = f(T, \sigma_d, N, \eta_{asp}, P'_{wasp})$	ϵ_p = Deformación plástica T = Temperatura s_d = Esfuerzo desviador V_{air} = Volumen de aire η_{asp} = Viscosidad del asfalto P'_{wasp} = Contenido efectivo de asfalto N = Número de repeticiones de carga	Ensayos Axiales de Carga Repetida y Fluencia

Cuadro 4.4. Modelos matemáticos de predicción de deformaciones plásticas en las capas de mezcla asfáltica de un pavimento.

4.7 Medidas de prevención de las deformaciones plásticas en las capas de rodadura de los pavimentos.

4.7.1 Recomendaciones relevantes para la prevención de deformaciones plásticas.

Se mencionan las recomendaciones más relevantes para prevenir las deformaciones plásticas y mejorar el desempeño y las prestaciones de mezclas asfálticas colocadas como la capa de rodadura en los pavimentos sometidos a condiciones severas de servicio.

1. Se recomienda que el agregado grueso con el cuál se pretende elaborar la mezcla asfáltica, presente suficientes caras de fractura para un mayor rozamiento interno entre las partículas y cumpla con los requisitos de resistencia a la abrasión para evitar que la granulometría inicial cambie cuando la mezcla soporte las cargas del tráfico.
2. Especificar los contenidos mínimos de agregado fino sin triturar en la elaboración de la mezcla, esto, en caso de que se tengan que utilizar. Del agregado fino triturado, se deben contemplar los mínimos de angularidad y también se debe cuidar que estén libres de sustancias plásticas.
3. Se debe hacer una correcta elección del tipo de ligante asfáltico de acuerdo a la zona estival donde será colocada la mezcla asfáltica, para evitar que la temperatura influya en gran medida en la deformabilidad de la mezcla, entre menos susceptible a la temperatura sea el ligante asfáltico, más resistente a la deformación plástica será la mezcla a altas

temperaturas. Se desean mayormente asfaltos que presenten una alta viscosidad y una baja susceptibilidad a la temperatura. Los contenidos óptimos de asfalto se deben respetar durante la fabricación de la mezcla en planta.

4. Una capa de rodadura construida con una mezcla asfáltica que contiene un asfalto de alta penetración y baja viscosidad, es muy susceptible a la formación de roderas.
5. El empleo de polímeros para la modificación de asfaltos (con los cuales posteriormente se fabricarán mezclas asfálticas), son decisivamente importantes debido a que los asfaltos mejoran de manera considerable sus propiedades como por ejemplo la susceptibilidad térmica; y se comportan como materiales mucho más elásticos dentro de la matriz de la mezcla, lo que evita que se acumulen las deformaciones permanentes en cada ciclo de carga. Los polímeros elastotermoplásticos: EVA (etileno-acetato de vinilo) son los que tienen la propiedad de minimizar de una manera más efectiva el daño por roderas, en los pavimentos.
6. Hay que cuidar durante la elaboración de las mezclas asfálticas, que tanto la granulometría como el ligante con los cuales se diseñó la mezcla, verdaderamente se cumplan a la hora de realizar la fabricación de la mezcla en la central. Es de gran importancia también verificar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla a la hora de la puesta en obra.
7. Utilizar durante el diseño de la mezcla una compactación con un esfuerzo similar como el que tendrá a la hora de su construcción y contemplar la compactación debida al tráfico que seguirá teniendo a lo largo de su vida de proyecto.
8. Utilizar los criterios mínimos y máximos acerca del contenido de vacíos en la mezcla, y asegurarlo tanto en el laboratorio en la compactación de los especímenes, como en la fase de construcción del pavimento.
9. Dentro de los parámetros volumétricos, en ocasiones se recomienda disminuir el contenido de asfalto de las mezclas, mediante el manejo de la granulometría del agregado y valores bajos en el contenido de vacíos.
10. Para mejorar el diseño de las mezclas asfálticas para carreteras de alto volumen de tránsito, se considera altamente recomendable realizar una verificación de los parámetros de diseño con muestras de mezcla asfáltica producida en planta, y actualizar la información de referencia, en base a dichos resultados. El control de densidad de la mezcla asfáltica debería ser realizado considerando los valores obtenidos con mezcla en planta.
11. Contemplar el contenido de vacíos en el agregado mineral, de acuerdo al peso específico de los agregados pétreos, cabe mencionar que estos parámetros se ajustan dependiendo la absorción del agregado.
12. El polvo mineral o filler empleado durante el diseño de la mezcla o su elaboración antes de la puesta en obra, debe de estar exento de partículas plásticas, también se deben tomar mucho en cuenta los límites tanto mínimos como máximos entorno a la relación filler-



asfalto según las especificaciones, para lograr un contenido asfáltico efectivo en la mezcla. Se debe realizar un mezclado de los materiales correcto en planta, para garantizar la uniformidad del filler en toda la mezcla.

13. La construcción capas de rodadura en los pavimentos con mezclas asfálticas densas que contengan agregados pétreos de gran tamaño máximo, (siguiendo los criterios mencionados anteriormente en relación a los agregados pétreos) ayudan a prevenir la formación de roderas, debido al rozamiento interno que presentan y a la alta resistencia que presentan.
14. Una compactación eficiente de la mezcla asfáltica, con el equipo de construcción adecuado, y a una temperatura dentro del rango aceptable de compactación, ayuda a prevenir de manera muy notoria la formación de roderas.
15. Evitar la segregación de la mezcla asfáltica durante el transporte y el extendido de la mezcla puede ser un factor favorable en la ganancia de estabilidad de la mezcla y la no deformabilidad de la misma.
16. La capa de rodadura puede mostrar incidencias como consecuencia de fallos en capas inferiores tales como: falta de capacidad portante local o generalizada, mal drenaje, zonas locales segregadas o con materiales degradados, agrietamientos o juntas que se han reflejado en la superficie, entre otros.

4.7.2 Empleo de la tecnología SUPERPAVE en el diseño de mezclas asfálticas.

Las nuevas tendencias en el diseño de mezclas asfálticas para pavimentos, son la utilización de los criterios y conceptos manejados por el Strategic Highway Research Program, SHRP, el cual ha desarrollado la tecnología SUPERPAVE, que significa Superior Performing Asphalt Pavements

Las mezclas asfálticas son diseñadas actualmente por medio de procedimientos empíricos de laboratorio, y esto requiere años de experiencia para correlacionar el comportamiento del pavimento con los trabajos de laboratorio.

SUPERPAVE, es el producto final de las investigaciones llevadas a cabo por el SHRP desde 1987, en donde se buscaba desarrollar un nuevo sistema para la especificación de materiales para pavimentos. Representa un sistema mejorado para especificar ligantes asfálticos, agregados minerales, diseño de mezclas y predicciones del comportamiento de la misma, el cual involucra procedimientos para la selección cuidadosa de materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos, como primer paso en la producción de una mezcla que se comportará adecuadamente.

En E.U.A., la Federal Highway Administration (FHWA), ha implementado las investigaciones desarrolladas por el SHRP en su proyecto SUPERPAVE.



Este sistema incluye:

- Asistencia a los ingenieros en la selección de materiales para las mezclas asfálticas.
- Especificaciones para los ligantes asfálticos y agregados pétreos.
- Sistema para el análisis, diseño y predicción del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.
- Sistema computarizado (software) de soporte.
- Equipos y procedimientos de ensayos de materiales.
- Criterios de diseño.

En la formulación de mezclas asfálticas el método SUPERPAVE está compuesto por tres niveles:

Nivel 1.

El primer nivel en el sistema SUPERPAVE, requiere el diseño volumétrico de la mezcla, lo cual involucra:

- a) Selección del tipo de asfalto.
- b) Selección de las propiedades de los agregados.
- c) Fabricación de los especímenes de ensayo.
- d) Selección del contenido de asfalto.

En este nivel se realizan una serie de ensayos diferentes a los ligantes asfálticos mayormente, con equipos sofisticados para determinar sus propiedades específicas, simulando los tres estados críticos del asfalto por medio de ensayos.

Primer estado: Representa al asfalto original, durante el transporte, almacenaje y manejo del mismo.

Segundo estado: Representa al asfalto durante la producción y colocación de la mezcla asfáltica. Este estado es simulado por el envejecimiento del asfalto en el horno de película delgada rodante (RTFO).

Tercer estado: Ocurre cuando el asfalto ha permanecido por un largo periodo de tiempo como parte de un pavimento asfáltico. Este estado es simulado en el vaso de envejecimiento a presión (PAV).

Con respecto a los agregados pétreos, el SUPERPAVE no ha desarrollado nuevos procedimientos, sino que ha refinado procedimientos existentes, con el fin de ajustarlos

dentro de su sistema. Dos tipos de propiedades son especificadas en el sistema, las propiedades concensadas y las propiedades de origen.

1. Las propiedades concensadas son las consideradas críticas, para alcanzar un alto comportamiento de la mezcla como por ejemplo:
 - Angularidad del agregado grueso.
 - Angularidad del agregado fino.
 - Partículas planas y alargadas.
 - Contenido de arcilla.
2. Las propiedades de origen, son aquellas que se utilizan regularmente para calificar la calidad de las fuentes del agregado como por ejemplo:
 - Dureza.
 - Sanidad.
 - Materiales frágiles y desmenuzables.

Con respecto a las características de graduación de los agregados pétreos, los investigadores del SHRP refinaron las ya utilizadas por muchas agencias en los E.U.A. El SUPERPAVE utiliza cartas de graduación elevadas al 0.45, con puntos de control y una zona restringida, para desarrollar una estructura en los agregados requerida en el diseño de mezclas asfálticas.

Las cartas de control tienen su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimos vacíos en el agregado mineral $P = 100 (d/D)^{0.5}$; Sin embargo a pesar de que con el uso de la ecuación de Fuller se obtienen mezclas de fácil compactación, éstas tienden a ser muy frágiles y a poseer pocos vacíos en el agregado, es por esta razón por la que se utilizan las cartas elevadas a 0.45. Una curva de máxima densidad (en el sistema SUPERPAVE), también puede ser dibujada por medio de una línea recta desde el tamaño máximo del agregado (el que pasa el 100% en una determinada malla) hasta el origen.

Para el uso de una granulometría en SUPERPAVE, esta debe pasar entre los puntos de control y evitar pasar a través de la zona restringida. Esta zona es usada para evitar mezclas que tienen una alta proporción de arena fina con respecto a la totalidad de arena y graduaciones que sigan la línea fina de 0.45, lo cual no proporciona adecuados vacíos en el agregado mineral.

El diseño de una estructura de los agregados asegurará que se desarrolle un resistente esqueleto de piedra, el cual mejorará de manera muy significativa la resistencia de la mezcla ante las deformaciones plásticas y alcanzará suficientes vacíos para la durabilidad de la mezcla.

Nivel 2.

Utiliza como punto de partida los análisis volumétricos del primer nivel, por lo que éste, juega un papel muy importante en el sistema de análisis y diseño SUPERPAVE.

Los ensayos establecidos para este nivel son:

- Ensayos de Corte (Superpave Shear Test, SST).
- Ensayos de Tracción Indirecta (Indirect, Tensile Test, IDT).

La serie de ensayos de este tipo, permite predecir el comportamiento de la mezcla.

Con respecto a las mezclas asfálticas existen dos características claves en el sistema SUPERPAVE que son: la compactación de laboratorio y los ensayos de comportamiento. El equipo de compactación posee incorporado un software que indica (durante el proceso de compactación), la altura del espécimen y el número de revoluciones corrientes, permitiendo de esta manera determinaciones de la densidad del espécimen durante su proceso de compactación.

La importancia y finalidad de los análisis volumétricos es la de poder estimar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla objeto del diseño, lo cual involucra:

- Estimación del contenido de vacíos de aire en la mezcla.
- Estimación del contenido de vacíos en el agregado mineral.
- Estimación del contenido de vacíos llenos de asfalto.
- Relación filler/asfalto.
- Estimación del contenido efectivo de asfalto en la mezcla.

Nivel 3.

Comprende la totalidad de los pasos del análisis del nivel 2. En este nivel 3, se realizan pruebas adicionales SST e IDT a una gran variedad de temperaturas. El análisis completo de una mezcla utiliza especímenes confinados SST, lo que ofrece una mayor confiabilidad en los resultados de los ensayos para predecir el comportamiento de la misma.

Como ya se mencionó la caracterización del diseño es mas completa y precisa que en el nivel 2: tomando varios intervalos de temperaturas dentro de un mismo año y utilizando los métodos teóricos de calculo de profundidad de rodera, introduciendo otros ensayos (carga uniaxial y carga isótropa) para un mejor conocimiento de las deformaciones plásticas permanentes. Asimismo, esta previsto, aunque con carácter optativo, la validación de los resultados con otros ensayos: deformación en pista, fatiga sobre probeta prismática en flexión, retracción térmica impedida, entre otros.



En conclusión, en el análisis de resultados de los ensayos de comportamiento de mezclas asfálticas utilizando la tecnología SUPERPAVE nos permiten estimar el comportamiento del pavimento durante su vida útil en términos de ejes equivalentes, ó bien estimar la cantidad de ejes equivalentes para alcanzar los niveles deseables de resistencia al desplazamiento, las grietas por fatiga o las grietas por baja temperatura en un pavimento.