

CAPÍTULO 2

EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

2.1 Introducción

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Hasta 1965 sólo se utilizaba para determinar la resistencia a tracción indirecta, pero desde entonces se ha ido profundizando en su estudio llegando a ser un ensayo con grandes perspectivas de futuro. Estados Unidos destaca como pionero en el avance de su estudio en la década de los 90, donde se realizan un gran número de investigaciones, muchas de ellas quedan recogidas en el 4º Internacional Symposium de la RILEM [4].

Actualmente es un ensayo ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción de las mezclas bituminosas, además es un procedimiento muy simple y está especificado en la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas” [5].

2.2 Descripción del ensayo

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura (figura 2.1).

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral [6].

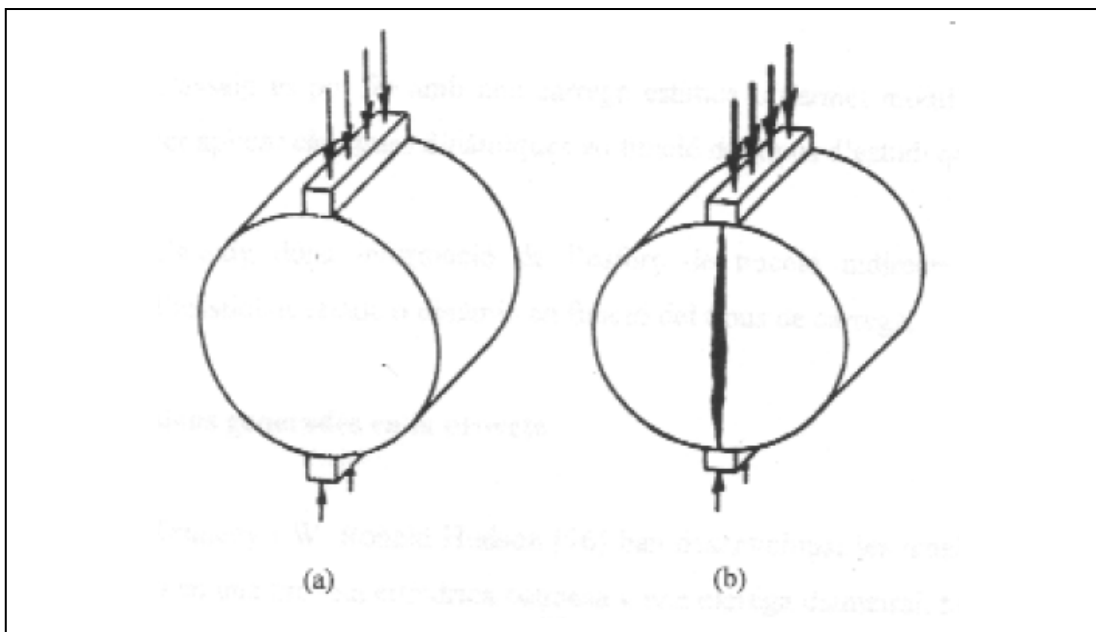


Figura 2.1- (a) Configuración de la carga y (b) rotura del ensayo de tracción indirecta [7]

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo. Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

Por la norma la velocidad de desplazamiento del sistema durante la carga será uniforme e igual a 50,8 mm/min, igual a la empleada por la prensa en el ensayo Marshall.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de 25 ± 1 °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas.

Como se ha comentado anteriormente, la principal ventaja del método es la sencillez de su metodología. Este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan. El Departamento de carreteras del Estado de Texas impulsó unos estudios dirigidos por Tomas Kennedy [7] de la Universidad de Austin en los cuales presentó las principales ventajas del ensayo:

- Es un ensayo relativamente sencillo.
- Presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere [8] en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 10% en comparación con el de Marshall que pueden ser del 15-20%.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.

El ensayo de tracción indirecta no sólo da información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también nos informa sobre propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas.

2.3 Distribución teórica de tensiones

La solución teórica de la distribución de tensiones dentro de una probeta cilíndrica está basada en el análisis de un material de comportamiento elástico y lineal.

Cuando una probeta cilíndrica es sometida a compresión diametral desarrolla un estado de tensiones bidimensional en su interior. La carga aplicada a lo largo de dos generatrices diametralmente opuestas describe planos principales de tensiones, uno horizontal y otro vertical. Particularmente en el plano vertical se produce una tensión variable de compresión y una tensión teóricamente uniforme de tracción.

El análisis de rotura de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas sometidas a compresión diametral demuestra que la fisura inicial ocurre cuando la tensión horizontal de tracción desarrollada en el plano vertical de carga alcanza el valor de la resistencia a tracción del material [2].

Tomas W. Kennedy y W. Ronald Hudson [9] desarrollaron las tensiones teóricas que se dan en una probeta cilíndrica sometida a una carga diametral, tal y como sucede en el ensayo de tracción indirecta. Esta distribución teórica de tensiones a lo largo de los ejes horizontales y verticales para una carga concentrada se muestran en la figura 2.2.

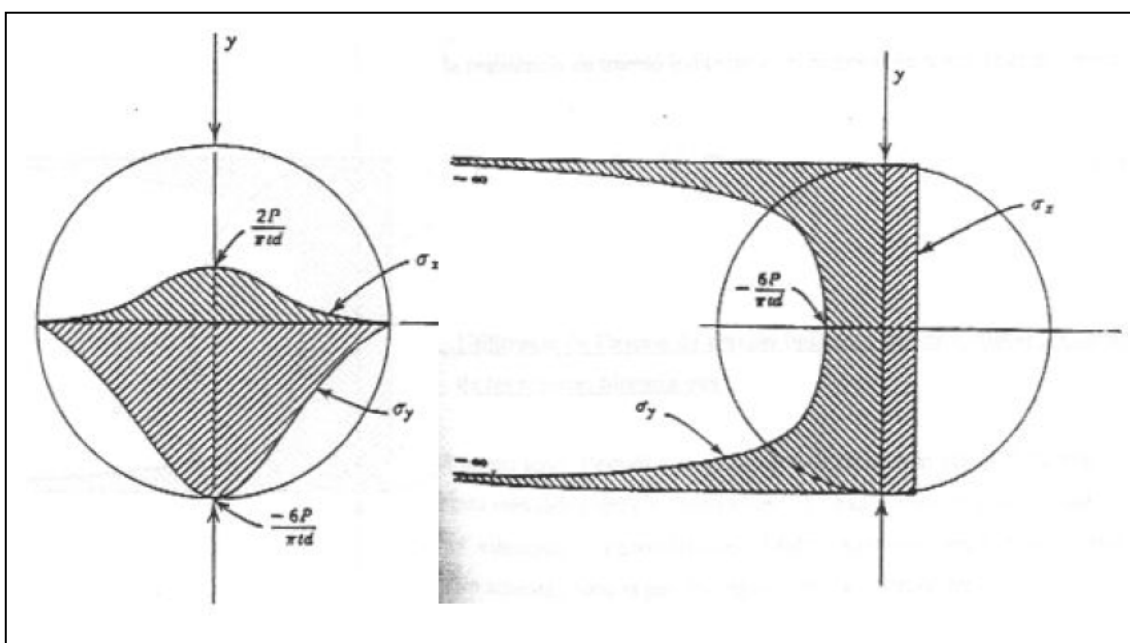


Figura 2.2- Distribución de tensiones teórica sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta [10]

Distribución de tensiones en el diámetro horizontal

En la distribución de tensiones en el diámetro horizontal, se puede observar que en el centro de la probeta el esfuerzo de compresión vertical es 3 veces superior al de tracción horizontal.

Las tensiones producidas en el diámetro horizontal son las siguientes:

Tensión horizontal:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} \cdot \left[\frac{d^2 - 4 \cdot x^2}{d^2 + 4 \cdot x^2} \right]^2 \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Tensión vertical:

$$\sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} \cdot \left[\frac{4 \cdot d^2}{(d^2 + 4 \cdot x^2)} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Tensiones tangenciales:

$$\tau_{xy} = 0 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

- P , es la carga total aplicada (N)
- t , es la altura de la probeta (mm±0,1mm)
- d , es el diámetro de la probeta (mm±0,1mm)
- x, y , son las coordenadas respecto al centro de la probeta.

Distribución de tensiones en el diámetro vertical

En la zona central de la probeta, se produce un estado biaxial de tensiones, donde la tensión vertical de compresión es 3 veces superior a la de tracción horizontal generada.

Así mismo se puede ver como los máximos de tensión vertical se localizan en los puntos de aplicación de la carga vertical. Por este motivo se puede pensar que la rotura se puede iniciar en estos puntos por agotamiento a compresión, pero realmente estas tensiones son pequeñas debido a que en la práctica la carga aplicada se distribuye en un área finita definida por una pieza metálica de contacto entre la prensa y la probeta. Cabe mencionar que tanto el tipo de carga como la anchura de esta pieza metálica tienen una gran influencia en la distribución de tensiones de la probeta real.

Las tensiones en el diámetro vertical, a lo largo del eje de carga, son las siguientes:

Tensión horizontal:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} = cte. \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Tensión vertical:

$$\sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t} \cdot \left[\frac{2}{d - 2 \cdot y} + \frac{2}{d + 2 \cdot y} - \frac{1}{d} \right] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Tensiones tangenciales:

$$\tau_{xy} = 0 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde:

- P , es la carga total aplicada (N)
- t , es la altura de la probeta (mm±0,1mm)
- d , es el diámetro de la probeta (mm±0,1mm)
- x, y , son las coordenadas respecto al centro de la probeta.

Tensión de rotura

Las ecuaciones descritas anteriormente son válidas para un sólido elástico lineal idealizado. Aunque la mayoría de los materiales no son elásticos, los valores de tensión horizontal se aproximan suficientemente a los reales. El fallo inicial se produce por rotura a tracción de acuerdo con la ecuación 2.4, por lo tanto, la resistencia a tracción indirecta en el momento de la rotura viene dada por la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{2 \cdot P_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot t \cdot d} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde:

- S_t es la resistencia a la rotura por tracción indirecta.
- $P_{m\acute{a}x}$, es la carga máxima o carga de rotura
- t , es el espesor de la probeta
- d , es el diámetro de la probeta
- x, y , son las coordenadas respecto al centro de la probeta.

De acuerdo a estas condiciones de carga lineal, la probeta fallaría alrededor de los puntos de carga debido a tensiones de compresión y no en la porción central de las muestras debido a tensiones de tracción. No obstante, estas tensiones de compresión se reducen considerablemente distribuyendo la carga a lo largo de una placa de carga, que no sólo reduce las tensiones de compresión vertical sino que cambia las tensiones horizontales a lo largo del diámetro vertical de tracción a compresión cerca de los puntos de aplicación, quedando entonces una distribución de tensiones tal y como se observa en la figura 2.3.

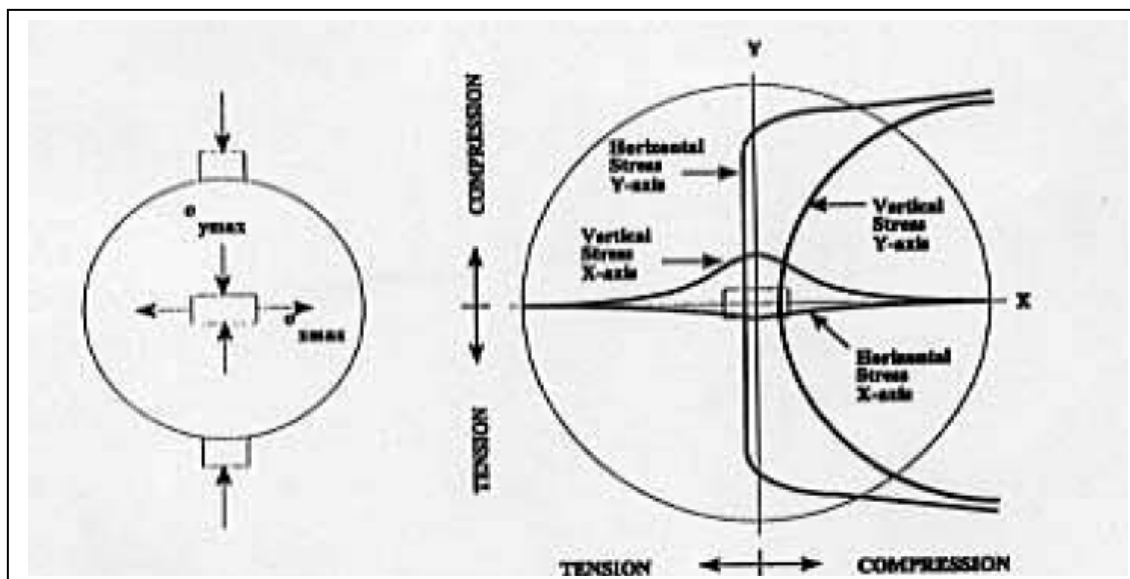


Figura 2.3- Distribución de tensiones en probeta sometida a una carga aplicada sobre placa de carga de apoyo curvo [9]

2.4 Normas de ensayo

Como se ha comentado anteriormente, el ensayo a tracción indirecta está normalizado según la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas” [5].

En dicha norma se indica el procedimiento para determinar la resistencia a tracción indirecta de mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio o provenientes de testigos extraídos del pavimento. Obtenemos un parámetro que caracteriza a la mezcla bituminosa, a la vez que optimiza el contenido de ligante, la cohesión de la mezcla y su resistencia al esfuerzo cortante.

Este ensayo puede utilizarse para el proyecto y también para el control de calidad de las mezclas bituminosas durante su fabricación o durante la puesta en obra [5].

2.5 Situación actual

Si consideramos que el ensayo de tracción indirecta simula el estado de tensión en la posición más baja de la capa de mezclas asfálticas, esto lo convierte en una herramienta interesante para utilizarla como un ensayo clave en el estudio de las mezclas bituminosas. Con el valor añadido que es un ensayo simple y práctico y los resultados de la prueba no se ven afectados por las condiciones superficiales de la probeta. Así mismo se ha visto en el apartado 2.3 que la rotura se produce en una zona de tensiones constante, lo que implica una baja dispersión en los resultados.

Roque i Ruth [11] demostraron que el módulo a temperaturas inferiores a 30°C suponiendo un comportamiento elástico de la capa, calculado utilizando una

galga extensométrica en la zona de tensiones constante mediante el ensayo de tracción indirecta, da una excelente predicción de la tensión y la deflexión del pavimento en servicio. Este hecho demuestra que el valor del módulo obtenido con el ensayo de tracción indirecta es un buen estimador del módulo de la capa del pavimento.

El hecho de trabajar en laboratorio tiene el inconveniente de que las probetas fabricadas no son totalmente representativas de la capa de la carretera. Para investigar la representatividad del ensayo sobre testigos extraídos 'in situ', Said Safwat [12] dirigió un estudio con 20 testigos extraídos de 13 secciones de carreteras de nueva construcción. Los ensayos consistían en determinar el espesor de la capa, el porcentaje de huecos, la granulometría de la muestra, el tipo y porcentaje de betún, el módulo de rigidez (resiliente) y la tensión de fatiga, mediante el ensayo de tracción indirecta. Las conclusiones que extrajeron fueron que:

- Existen muchas variaciones en la composición de la mezcla de la capa base colocada en obra, lo que provoca variaciones importantes en las características de la mezcla (módulo de rigidez y fatiga).
- El ensayo de tracción indirecta es relativamente sencillo y rápido de realizar con probetas cilíndricas extraídas del pavimento, con pocas dispersiones en los resultados y muy apto para realizar controles rutinarios.

La línea seguida en todos estos estudios parece la correcta y la administración federal de carreteras de los EEUU (FHWA ⁽¹⁾) ha invertido en esta dirección de estudio [13] con los siguientes objetivos:

- Seleccionar un ensayo y un método de pruebas simples que permitan al ingeniero determinar las características fundamentales para el diseño estructural de los pavimentos.
- Una vez seleccionado, se busca una fácil repetibilidad del ensayo, para que los resultados nos permitan determinar unos valores fiables de las características mecánicas que buscamos (módulo de rigidez, coeficiente de Poisson, fatiga,...).

La investigación realizada por Baladi y encargada por la FHWA busca estos objetivos con la ayuda del ensayo de tracción indirecta. Aunque una revisión extensa de la literatura de los diferentes ensayos determinó que los resultados del ensayo a tracción indirecta eran los más prometedores, tenían el problema de que había gran dispersión [13].

Para solucionar esta falta de constancia Baladi y el equipo de la universidad de Michigan diseñaron un nuevo instrumento adaptable al ensayo de tracción indirecta, con las siguientes características:

⁽¹⁾ Federal Highway Administration

- La deformación de la probeta ensayada se puede medir en 3 direcciones utilizando uno o dos sensores en cada dirección.
- El aparato de medida se puede utilizar con diferentes sistemas de carga: hidráulico o triaxial, con un sistema de guía para evitar posibles rotaciones y oscilaciones.
- Facilita la alineación en cualquier tipo de prensa y la utilización de sensores LVTD⁽¹⁾.

A partir de los resultados de los ensayos y los análisis analíticos y estadísticos, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Con el nuevo aparato de tracción indirecta los resultados son constantes, razonables y se pueden reproducir exactamente para cualquier combinación de variables.
- La dispersión de resultados entre las probetas ensayadas con la misma dosificación y condiciones de ensayo da valores inferiores al 7%.
- La temperatura de ensayo y el porcentaje de huecos en la mezcla son las variables que tienen más influencia en las características resilientes de la mezcla.

En el trabajo de investigación realizado conjuntamente por la Universidad Carleton (Ottawa) y la Universidad Al-Azhar (El Cairo) [14], se demuestra que los criterios convencionales de diseño no proveen un indicador confiable para la selección de la mezcla más eficiente y que el uso de un criterio que incluya la Tracción Indirecta de la mezcla ofrecería un método de diseño más confiable. Basado en los resultados de ensayos de laboratorio se demuestra también que este ensayo detecta la influencia del tipo de betún en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas.

Con la tesis doctoral realizada por Adriana Martínez [15] sobre la elaboración de una propuesta de asegurar de la calidad de ejecución de las mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta, se vuelve a dar otro paso adelante en la aplicación del ensayo a tracción indirecta. El estudio busca asegurar la calidad de ejecución de las mezclas bituminosas a través del estudio de las variables que tienen una mayor influencia en el comportamiento mecánico de las mezclas. Para ello se evaluaron en cada caso la resistencia a tracción indirecta, densidad, porcentaje de huecos y deformación. Así mismo se analizaron los valores de resistencia a tracción indirecta de testigos extraídos en diferentes obras con el objetivo de correlacionar este parámetro con la densidad obtenida. Este trabajo permite establecer un criterio de control de calidad que permite verificar las características resistentes de las mezclas bituminosas colocadas en obra y compactadas y asegurar que responden a las especificaciones de proyecto. En la tesis se demuestra una correlación entre la

⁽¹⁾ Linear Variable differential Transducer

compactación y la resistencia a tracción de las mezclas evaluadas en laboratorio y obra, siendo la tracción indirecta un parámetro más sensible que el nivel de compactación para detectar cambios en las variables estudiadas.

De la ponencia realizada por Rosana G. Marcozzi [2], se extraen las siguientes conclusiones:

- El análisis de probetas realizadas con la mezcla de áridos y betún elaborado en laboratorio y el análisis de probetas realizadas con las muestras de obra muestran que el ensayo de tracción indirecta es muy útil para caracterizar el comportamiento de una mezcla al variar el tipo de ligante con el que fue realizada, mostrando resistencias a la tracción sumamente diferentes.
- Las resistencias a la tracción obtenidas de testigos de 100 mm de diámetro muestran menor dispersión cuando la temperatura de ensayo es menor.

2.6 Variables de estudio

Algunos investigadores han publicado los resultados obtenidos con este ensayo evaluando algunas variables que pueden influir en las propiedades de las mezclas bituminosas. A continuación resumimos los más importantes en consonancia con nuestro estudio.

Temperatura del ensayo.

Tesoriere, Marino y Canale [8] han estudiado mezclas bituminosas con áridos calcáreos triturados, con un 4% de betún B-80/100, ensayándolas a diferentes temperaturas. Las conclusiones de su estudio fueron que el valor de la resistencia varía de forma lineal en un rango de temperaturas que varía entre los 10 y 25°C, evidenciando el predominio de la componente elástica, mientras que a temperaturas superiores a los 30°C la función adquiere una tendencia parabólica prevaleciendo la componente viscosa y con mayores dispersiones en los resultados.

Temperatura de ensayo y tipo de ligante.

Prithvi Kandhal [16] ha estudiado seis betunes de diferente procedencia, con penetraciones variables entre 42 y 80, utilizados en una mezcla de tipo densa para la construcción de un firme de prueba. Se determinaron las propiedades de los ligantes a las temperaturas usadas para conducir el ensayo de tracción indirecta sobre las probetas Marshall: 4, 15.6, 25 y 60°C.

El proyecto permitió verificar que, dentro del rango de temperaturas analizado, la resistencia a tracción mostró excelente correlación con la temperatura del ensayo y la penetración del betún, aumentando cuando la temperatura o la penetración bajaba con una tendencia recta en ejes de resistencia y penetración logarítmicos.