

Pág 80-114

Aplicaciones y limitaciones de los ensayos para medir consistencia y propiedades reológicas del asfalto

Guillermo Thenoux Z.

Profesor. Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 6177, Santiago, Chile.

RESUMEN: el material asfalto tiene aplicaciones relativamente limitadas comparado con otros materiales de Ingeniería. Sin embargo, se requiere de una gran variedad de ensayos para poder establecer y controlar sus propiedades mecánicas. Existen muchas razones históricas para la existencia de esta variedad de ensayos; además de la complejidad propia del material. Muchos de estos ensayos son de naturaleza empírica y han sido la base de los conocimientos con que cuenta la tecnología del asfalto en el presente. El propósito de este trabajo es introducir al Ingeniero Civil a los conceptos básicos de reología del asfalto y revisar las aplicaciones y limitaciones de los ensayos que actualmente son usados para definir y especificar las propiedades de este material.

I. INTRODUCCION

El asfalto es un material cuyas propiedades mecánicas varían en un amplio rango dentro de sus límites de aplicación. Las propiedades del asfalto varían notoriamente con la temperatura, velocidad de aplicación de la carga, duración de las cargas, origen y métodos de refinación, y de su estado de envejecimiento.

La complejidad del material asfalto se debe principalmente a su naturaleza orgánica ya que sus propiedades físicas y mecánicas cubren un amplio rango de comportamientos, que varían desde un material elástico y frágil, hasta las de un líquido Newtoniano de variadas consistencias. En el tramo intermedio el material presenta características de un fluido no-Newtoniano, muchas veces referido como material visco-elástico.

Existen en el mundo, una gran variedad de ensayos para especificar las propiedades del asfalto. Muchos de estos ensayos son de carácter empírico y los resultados de estos ensayos deben ser interpretados con cautela porque corresponden a medidas relativas del material en condiciones muy específicas de carga, temperatura y otras que en muchos casos no permite la extrapolación de resultados a otras condiciones o a asfaltos de distinto origen.

La industria del asfalto ha sido lenta en moverse hacia la utilización de ensayos de carácter más "científico" y por ejemplo, sólo hasta el año 1973 las normas ASTM introdujeron los viscosímetros capilares que permitieron medir las propiedades del material en unidades de ingeniería.

Esta aplicación se considera tardía, pues los principios de los viscosímetros capilares se desarrollaron al inicio del siglo.

Probablemente no ha existido una real necesidad de contar con ensayos de orientación más "científica" o probablemente se debe a que, un requisito fundamental para la especificación y control del asfalto es que los ensayos sean relativamente sencillos. Cualquiera sea la razón se espera que esta tendencia cambie debido a razones tales como:

a) En estos últimos años ha existido una gran tendencia hacia esclarecer las propiedades químicas del asfalto y correlacionarlas con su comportamiento mecánico. Esto requiere mejorar el entendimiento de las propiedades mecánicas del asfalto por medio de ensayos más "científicos" y a la vez reconocer las limitaciones de los ensayos existentes de carácter empírico que tienden a producir conclusiones equívocas.

b) La nueva tecnología ha desarrollado instrumentos que permiten evaluar las propiedades Teológicas de materiales no-Newtonianos, como el asfalto y en muchos casos los ensayos resultan más simples que algunos de los actuales ensayos establecidos en especificaciones. De todos modos, no se espera que ensayos reológicos más exactos, puedan reemplazar algunos ensayos tradicionales, pero si se consideran fundamentales para suplementar los conocimientos presentes. Ejemplo de métodos más racionales de medición de propiedades en materiales no-Newtonianos son: viscómetros de platos deslizantes y viscómetros rotacionales.

En el presente trabajo se revisan y estudian los conceptos que deben ser aplicados en la interpretación de los actuales ensayos usados en especificaciones para caracterizar el material asfalto, de este modo, se desea establecer las limitaciones que pueda tener la extrapolación de resultados de los actuales ensayos descritos por las Normas ASTM, AASHTO y otras.

II. REOLOGIA DEL ASFALTO

2.1 Generalidades

Reología es definida como la ciencia de deformaciones y flujo de la materia (1). Reología estudia el comportamiento de aquellos materiales que por su naturaleza no obedecen las leyes de elasticidad de Hooke y las leyes de viscosidad de Newton.

Las propiedades del asfalto se desvían de ambos comportamientos ideales, mencionados en el párrafo anterior y en general se describe el comportamiento del asfalto como "visco-elástico", lo cual se refiere a las propiedades de flujo no-Newtoniano que el material exhibe dentro de un amplio rango de temperatura (aproximadamente, entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Las características no-Newtonianas que el material presenta se ve reflejada por el hecho que la viscosidad del

Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, Julio - Diciembre 1988

asfalto varía además con el estado de la carga (velocidad y tiempo de duración) y que la deformación tiene una componente elástica y otra componente plástica.

Este extraño comportamiento del asfalto crea una dificultad adicional para establecer y delimitar las propiedades de este material. En general las especificaciones establecen las características del asfalto de acuerdo a la "consistencia" que el material exhibe bajo condiciones muy particulares de temperatura y carga.

El rango de temperaturas usados en ensayos para especificaciones alrededor del mundo varía desde +135 °C hasta temperaturas bajo -10 °C. Este rango de temperaturas representa un rango de viscosidades requeridas durante la construcción del camino (mezclado, compactación) y durante su vida útil donde se encuentra expuesto a cargas y al continuo envejecimiento. El rango de viscosidades medidas puede variar entre 10^1 poise hasta 10^{11} poises (2).

La medición de las propiedades Teológicas del asfalto en el rango de viscosidades mencionado, se logra con el uso de variados instrumentos de ensayo estandarizado por diferentes países. Muchos de estos ensayos son de carácter empírico y sus resultados son difícil de correlacionar, interpretar y extrapolar. Algunas de las razones de estas dificultades se pueden explicar como sigue:

- a) Las muestras son preparadas en diferentes condiciones, diferentes formas y diferentes volúmenes. La estructura interna del material se modifica con la preparación de la muestra, lo que en definitiva introduce cambios en las muestras original de asfalto.
- b) Las muestras se someten a extrañas formas de flujo y carga que dificultan la interpretación de los resultados.
- c) Las propiedades no-Newtonianas del material son ignoradas particularmente en ensayos realizados a temperaturas bajo 60 °C. No se distingue entre deformación elástica y deformación plástica.
- b) Las medidas son hechas en unidades no "científicas", relativas a la propiedad que se requiere medir. Esto dificulta el desarrollo de fórmulas teóricas de diseño.
- c) Muchos ensayos operan en un estrecho rango de viscosidades y velocidad de carga.
- d) La sensibilidad de los aparatos de medición son bajas.

Las razones mencionadas constituyen además, un problema adicional para cuantificar otras dos propiedades de interés de este material. Estas propiedades son:

- a) Susceptibilidad térmica.
- b) Susceptibilidad de envejecimiento.

2.2 Tipos de comportamientos

2.2.1 Comportamiento elástico: módulo elástico - módulo de rigidez

El módulo elástico puede ser medido en la mayoría de los materiales sólidos, así como en líquidos de muy alta viscosidad y que exhiben un valor de deformación de falla. El asfalto a muy bajas temperaturas y/o cargas de corta duración (ej: cargas cíclicas) puede responder como un material elástico.

En la práctica, debido a las variaciones que presentan las propiedades mecánicas del asfalto con la temperatura y tiempo, no es posible determinar un único valor de módulo elástico del material. Para esto, Van der Poel (3,4,5) desarrolló el módulo de rigidez del asfalto el cual ha sido considerado equivalente al módulo elástico de materiales sólidos. Van der Poel introduce en el cálculo del módulo de rigidez variables tales como, velocidad de carga, temperatura de trabajo, consistencia y susceptibilidad térmica.

El módulo de rigidez del asfalto (S) se expresa en forma similar a la constante elástica (E), es decir:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

$$S = \sigma / \varepsilon(T, t) = \quad (2)$$

donde :

$\varepsilon(T, t)$ = deformación unitaria la cual es dependiente de la temperatura T y el tiempo t.

Solamente a temperaturas muy bajas y/o tiempos de carga muy cortos la influencia de las variables T y t son despreciables y S resulta similar a E. Para duraciones de carga mayor y/o altas temperaturas, el material responde más como un líquido viscoso. En estas condiciones se ha determinado que el módulo de rigidez del asfalto es proporcional a la viscosidad e inversamente proporcional a la duración de la carga, es decir:

$$S = 3 \quad (T) / t \quad (3)$$

El módulo de rigidez de Van der Poel no se deriva de las ecuaciones [2] y/o [3]. La ecuación [2] es solamente una forma matemática de expresar la relación existente entre σ , ε , t, T y S y la ecuación [3] es una correlación encontrada por Heukelom (2) en otro estudio separado.

La determinación del módulo de rigidez se logra con la ayuda del diagrama de la Figura N° 1, donde los datos de entrada corresponden a resultados obtenidos en ensayos de carácter empírico (Penetración y Anillo/Bola).

El empleo del módulo de rigidez determinado por el diagrama de Van der Poel, puede encontrar serias limitaciones cuando se usa en el mismo contexto que la constante elástica o módulo elástico E. Es decir, aunque ambos módulos se expresan en las mismas unidades, la relación que ambos módulos tienen con las tensiones y deformaciones unitarias son muy diferentes.

Tanto las deformaciones como las tensiones presentes en los ensayos requeridos para determinar el módulo de rigidez S del asfalto se desconocen completamente. No es así con la determinación del módulo elástico en otros materiales sólidos.

La relación teórica existente entre el módulo de rigidez del asfalto y el módulo elástico fue propuesta por Heukelom (2) como:

$$1 / S = 1 / E + t / 3 (T) + 1 / D$$

donde:

S = módulo de rigidez

E = módulo elástico

t = tiempo de aplicación de la carga

T = temperatura

= viscosidad

D = σ / ϵ_D

s = tensión unitaria

ϵ_D = deformación unitaria no instantánea **2.2.2 Comportamiento de un fluido Newtoniano**

El coeficiente de viscosidad de un fluido Newtoniano mide su resistencia a fluir y está expresado como:

$$= T / (dv / dy)$$

[5]

donde y de acuerdo a Figura N° 2a:

T = esfuerzo de corte unitario tangencial

$(dv/dy) = \gamma$ = gradiente de velocidad de corte

Un diagrama típico que muestra la relación entre T y γ para un material Newtoniano se muestra en la Figura 2b, en donde la viscosidad corresponde a la pendiente de la recta de la relación T v/s γ y es independiente del gradiente de velocidad de corte (en otras palabras independiente de la velocidad de carga). Aproximadamente se ha establecido que el asfalto se comporta como un

fluido Newtoniano a temperaturas sobre 60 °C. Es decir, por sobre esa temperatura la viscosidad del material solamente varía con los cambios de temperatura y no de $\dot{\gamma}$, Figura N° 2c. La temperatura exacta en la cual un asfalto en particular, comienza a comportarse como un fluido Newtoniano dependerá de factores tales como: tipo de asfalto, estado de envejecimiento. Factores que en definitiva están asociados a la estructura, forma y tamaño de las moléculas que componen el asfalto.

Es relativamente difícil determinar la temperatura exacta en la cual un asfalto comienza a comportarse como un fluido Newtoniano pero, se ha podido establecer como una buena indicación del punto de cambio, aquel indicado por la primera temperatura de transición mostrada por el asfalto medido en un Differential Scanning Calorimeter (4).

Puntos de transición mostrados por diferentes asfaltos indican que algunos asfaltos muestran temperaturas de transición en un rango entre 50 a 75 °C y no exactamente a 60 °C.

2.2.3 Comportamiento no-Newtoniano

Muchos materiales de interés, entre ellos el asfalto, muestran comportamientos más complejos que los de un fluido Newtoniano o un sólido elástico. Este comportamiento se ve reflejado por el tipo de relación que se presenta entre las variables τ y $\dot{\gamma}$ de la ecuación [5]. La Figura N°3, muestra los cuatro tipos principales de comportamiento no-Newtoniano.

Materiales termo-plásticos como el asfalto pueden comportarse de diferentes formas. El comportamiento comúnmente asociado al asfalto corresponde al viscoelástico, aunque algunos asfaltos derivados del carbón muestran comportamiento dilatante.

Comportamiento del tipo no-Newtoniano es característico en sistemas coloidales. El asfalto es considerado como un coloide, el cual su comportamiento mecánico, no sólo está relacionado con su composición química sino que además con la interacción entre partículas de la fase continua, tamaño y estructura de las partículas y capacidad de deformación de las partículas.

La relación entre τ y $\dot{\gamma}$ en comportamientos no-Newtonianos (Figura N° 3) indica que la viscosidad (pendiente de la curva) está relacionada no sólo con la temperatura sino que además con el gradiente de velocidad de corte, lo que en definitiva se relaciona con el tiempo de duración de la carga y magnitud de la carga (la viscosidad disminuye para valores grandes de $\dot{\gamma}$).

La Figura N° 4, tomada de referencia (6) muestra cuán sensitiva puede ser la viscosidad de un asfalto que presenta un comportamiento no-Newtoniano. Los asfaltos "A" y "B" de la Figura N°4, corresponden a asfaltos de comportamiento Newtoniano, es decir, la relación τ v/s $\dot{\gamma}$ (viscosidad) es constante. El asfalto "C" en la misma figura muestra un comportamiento no-Newtoniano en que la viscosidad varía con el gradiente de velocidad medido en el ensayo. La Figura N° 4, sugiere entonces que las mediciones de las propiedades reológicas del asfalto dentro del rango de comportamiento visco-elástico (aproximadamente 0 °C a 60 °C \pm 10 °C),

deben realizarse bajo condiciones conocidas de gradiente de velocidad de carga y. Para ésto, la Tabla N°1, indica cuales son los gradientes de velocidad de carga asociados con diferentes estados de carga en pavimentos.

Por lo tanto para medir las propiedades Teológicas de un material de comportamiento visco-elástico, se debe conocer bien las condiciones de deformación y especificar las condiciones de duración de la carga, magnitud de la carga y temperatura. De este modo el ensayo se puede realizar en condiciones equivalentes a las condiciones de trabajo del material y las situaciones de trabajo más críticas pueden ser analizadas.

III. MEDICION DE PROPIEDADES REOLOGICAS A TRAVES DE ENSAYOS DE CONSISTENCIA

La presente sección, entrega un resumen de los ensayos comúnmente usados en tecnología de asfalto para cuantificar su comportamiento reológico. Con ésto se espera aclarar cuáles son las ventajas y limitaciones de cada ensayo relativo a la interpretación y extrapolación que se le pueda dar a resultados obtenidos a través de los distintos métodos empleados en las mediciones.

3.1 Ensayo de penetración: (ASTM - D5, AASHTO - T49)

Este ensayo fue propuesto en 1889 (7). El ensayo estandarizado mide la consistencia del asfalto a través de la penetración de una aguja en una muestra de asfalto (Figura N° 5a) a una temperatura de 25 °C y un tiempo de 5 segundos. El mismo ensayo se efectúa a otras temperaturas (0, 4, 45 °C), pero bajo condiciones diferentes de carga/tiempo y en general no existe una buena correlación entre resultados a diferentes temperaturas y/o diferentes cargas.

El ensayo de penetración no sólo involucra las propiedades del asfalto en sí, pero además, la adhesión y relación entre el asfalto y la aguja de penetración. La penetración de la aguja no aplica un esfuerzo constante al asfalto, debido al cambio de volumen que experimenta la muestra mientras la parte cónica de la aguja se desplaza hacia el interior del asfalto. La parte cónica de la aguja ocurre hasta una penetración 64 y en ese punto se produce una discontinuidad lo que dificulta aún más la correlación del ensayo con otro tipo de mediciones (8).

Por ejemplo, muy aproximadamente se puede asociar extremos de penetración y observar las diferencias entre los gradientes de velocidad de carga que se aplican en un mismo ensayo (9).

$$\text{penetración } 10 \Rightarrow \gamma = 2 * 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$\text{penetración } 200 \Rightarrow \gamma = 3 * 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

Esto significa que, dentro de las variaciones naturales de los resultados en una muestra, un (10% de variación) en el ensayo de penetración puede entregar hasta un 85% de variación en la viscosidad asociada. Es decir, un rango de hasta $6 * 10^5$ poises (7).

3.2 Ensayo de ablandamiento de anillo y bola: (ASTM - D36, AASHTO - T53)

El ensayo de Anillo y Bola (Ring and Ball) fue propuesto como procedimiento estandar en 1915, El ensayo mide la temperatura a la cual una muestra cilíndrica de asfalto alcanza una deformación prefijada bajo la carga de una bola de acero (Figura N° 5b). El resultado se expresa en °C y las temperaturas resultantes, para diferentes asfaltos, varían en un amplio rango (aproximadamente 30 °C a 140 °C). La definición de punto de ablandamiento medido a través de este ensayo, es meramente arbitraria pues como se indicó previamente, el rango de temperatura en el cual el material no es líquido ni sólido es relativamente amplio para el asfalto. Saal (8) determinó que la temperatura del ensayo equivale, aproximadamente a una temperatura de equi-viscosidad igual a 10^4 centistokes.

Este valor de equi-viscosidad, permite medir en forma relativa la susceptibilidad del asfalto a cambio de temperatura. Asfaltos que presentan temperaturas de equi-viscosidades (temperatura Anillo/Bola) diferentes, pero similares valores de penetración, tendrán un comportamiento muy diferente en servicio. Para cuantificar la susceptibilidad del asfalto a cambios de temperatura se definió el valor "Índice de Penetración" o "Índice de Pfeiffer" como:

$$IP = [1951 - 500 \log(P) - 20AB] / [50 \log(P) - AB - 120,1]$$

[6]

donde

P = Penetración a 25 °C

AB = Resultados del ensayo Anillo-Bola (°C)

3.3 Ensayo de ductilidad: (ASTM - D113, AASHTO - T51)

El ensayo de ductilidad fue propuesto como procedimiento estándar en 1903 (9). El ensayo mide la deformación máxima que alcanza una muestra estandarizada al ser estirada a una velocidad constante. Las temperaturas de ensayo normalmente usadas alrededor del mundo son 25 °C, 7 °C, 4 °C (Figura N° 5c).

A pesar que el ensayo de ductilidad ha sido usado por muchos años en especificaciones, existen un número importante de investigadores que restan de toda utilidad al ensayo (8, 10, 11, 12, 13, 14 y 15). El ensayo no tiene validez científica de acuerdo a los autores mencionados en las

referencias. Las razones principales que se pueden dar a la existencia de argumentos contrarios al ensayo de ductilidad, se pueden resumir como sigue:

a) El ensayo se realiza a una temperatura de 25 °C, lo que indica que el material se ensaya a una temperatura correspondiente al rango en el cual el material se comporta como material viscoelástico. Tanto en los materiales elásticos como viscoelásticos, las propiedades que un material exhibe sometido a una fuerza de tracción constante está directamente relacionado con la magnitud total de la deformación que se aplica. El argumento que se presenta ante esta situación es: ¿Por qué medir la resistencia que el material opone a una fuerza de tracción para un estiramiento de 100 cm, cuando en la práctica las deformaciones que el material experimenta a 25 °C pueden ser 10^{-3} veces menor?

b) El concepto de ductilidad está directamente asociado a la capacidad de un material de absorber energía. La capacidad de absorber energía depende de la estructura interna (físico/química) del material que presenta en condiciones específicas de temperatura, esfuerzos e historia de los esfuerzos y además, depende de la estructura física externa del material, en otras palabras y en el caso del asfalto, del espesor de la película de material en la mezcla asfáltica.

Por esta última razón la ductilidad del asfalto medida a través del ensayo estándar no necesariamente reflejará el comportamiento dúctil del material en la mezcla asfáltica pudiendo incluso llevar a especificar equívocamente el material para cierto tipo de mezclas o rechazar el material cuando puede ser útil en mezclas asfálticas diferentes.

A pesar de las limitaciones mencionadas relativas a la aplicabilidad del ensayo de ductilidad, este ensayo aún constituye parte de las especificaciones AASHTO y otras agencias. Esto es debido a que, el ensayo de penetración es el único ensayo que se usa para especificar los requerimientos del material a bajas temperaturas (bajo 60 °C, rango viscoelástico) y como se expusiera en la sección 3.1, el ensayo de penetración no es un justo evaluador de las propiedades reológicas del material asfalto en el rango de temperaturas de comportamiento viscoelástico.

3.4 Viscómetros capilares

Los viscosímetros capilares miden la viscosidad de un líquido, determinando la velocidad de flujo del líquido a través de un tubo calibrado. El flujo del líquido se produce por presión hidrostática o por flujo forzado con presión o succión extrema.

Este tipo de instrumento ha sido ampliamente usado en el estudio de propiedades reológicas de fluidos Newtonianos. En general, se usa con fluidos de relativa baja viscosidad y usualmente la

diferencia de presión hidrostática sirve para mover el flujo. En líquidos de más alta viscosidad el flujo se produce con la aplicación de succión extrema.

La viscosidad del asfalto se mide con tubos capilares a dos temperaturas estándares; 60 °C Viscosidad Absoluta, ASTM-D2171, AASHTO -T202 (flujo forzado con succión externa) y 135 °C Viscosidad Cinemática, ASTM-D2170, AASHTO-T201 (presión hidrostática). Estas dos viscosidades se usan en las especificaciones AASHTO-M226 para especificar asfaltos controlados por su viscosidad.

Los viscosímetros capilares aplican bajos esfuerzos de corte; 10 a 150 dynas/cm² si se operan por gravedad y 10 - 500 dynas/cm² si se operan con presión externa. El mecanismo de flujo en el tubo capilar ha sido extensamente analizado por Van Wazer (10) y Whorlow (11), y eventualmente correcciones por errores de borde podrían ser aplicadas.

3.4.1 Viscosidad absoluta a 60 °C

La Figura N° 6a, muestra el tubo capilar empleado en este ensayo. La viscosidad a 60 °C representa la viscosidad a la máxima temperatura que un asfalto puede ser expuesto en condiciones de servicio.

El término "Viscosidad Absoluta", asume que el asfalto ensayado se comporta como material Newtoniano a 60 °C. Algunos asfaltos pueden mostrar comportamiento no-Newtoniano a esta temperatura (asfaltos envejecido, asfaltos con polímeros), esto produce una variación de los resultados debido a que el flujo tiene una componente de deformación elástica que distorsiona el flujo teórico asumido en el tubo capilar del ensayo. En la práctica estas variaciones pueden producir un rango mayor de lo previsto en las normas respecto de la variabilidad de los resultados.

La viscosidad del asfalto es relativamente alta a la temperatura de ensayo por lo que el flujo de la muestra en el tubo capilar se consigue aplicando una succión perfectamente controlada desde el exterior. Los resultados se expresan en unidad de viscosidad "Poises" (gr/cm seg).

3.4.2 Viscosidad cinemática a 135 °C

La Figura N° 6b, muestra el tubo capilar empleado en este ensayo. La viscosidad a 135 °C corresponde, aproximadamente a la temperatura de mezclado y colocación del asfalto.

La viscosidad del asfalto a 135 °C es relativamente alta por lo que el flujo de la muestra en el tubo capilar, se produce únicamente con la diferencia de presión hidrostática y la medida de viscosidad se realiza directamente en centiStoke. Para convertir a unidad de viscosidad no cinemática se requiere conocer la densidad del asfalto a 135 °C la que aproximadamente corresponde a 0,92 - 0,98 kg/cm³.

Las propiedades del asfalto a 135 °C son más influenciadas por la interacción polar entre las moléculas más que a otras propiedades físicas de la molécula o conjunto de moléculas. Por esta razón, la interpretación de resultados obtenidos a través de este ensayo no pueden ser extrapolados a regiones fuera del comportamiento Newtoniano, es decir, a propiedades que el asfalto presenta bajo temperaturas de 60 °C.

Ambos ensayos de capilaridad definidos, han permitido un número de logros en la metodología para controlar y especificar asfaltos. El primero de ellos es la definición del Índice de Susceptibilidad Térmica, VTS (Viscosity Temperature Sensitivity) como:

$$VTS = [\log \log (V_{135}) - \log \log (V_{60})] / [\log T_1 - \log T_2] \quad [7]$$

en que:

V_{135} = Viscosidad Cinemática (Poises)

V_{60} = Viscosidad Absoluta (Poises)

T_1 = Temperatura 60 °C, expresada en °K (333 °K)

T_2 = Temperatura 135 °C, expresada en °K (408 °K)

Con este índice se ha podido determinar en forma más exacta la susceptibilidad del asfalto a cambios de temperaturas, cuando el material se trabaja en el rango de comportamiento Newtoniano (Almacenamiento, Mezclado, Transporte, Colocación y Compactación).

El segundo logro ha sido la creación del diagrama BTDC (Bituminous Test Data Chart o Diagrama de Heukelom) (Figura N° 7). Este diagrama ha permitido correlacionar la viscosidad del material con su comportamiento a diferentes temperaturas y clasificar los asfaltos de acuerdo a un conjunto de propiedades más amplias.

Esta clasificación fue presentada en la Asociación Tecnológica de Pavimentos Asfálticos (AAPT) en **1983 (5)**. En dicha publicación se concluye que existen básicamente tres tipos de asfaltos de acuerdo a la relación que presenten los diferentes ensayos de consistencias al ser graficados en un diagrama BTDC. Estas relaciones se muestran en la Figura N° 7.

3.5 Viscómetros de orificio : ASTM - D88, AASHTO - T72

Este tipo de viscosímetro fue adaptado y propuesto como procedimiento estándar en 1921. El ensayo se muestra en la Figura N° 8. Este ensayo a recibido diferentes nombre en diferentes países, pero al ensayo en sí, es el mismo. Los nombre más conocidos que se emplean en el medio son los siguientes:

- Saybolt Furol y Saybolt universal en U.S.A.
- Redwood N° 1 y N° 2 en Gran Bretaña

- Engler en Alemania ,,
- Barbey en Francia

El concepto de diseño empleado en este tipo de viscosímetro, deriva de la ley de "Hagen-Poiseuille", la que establece que la viscosidad de un líquido es proporcional al flujo de descarga de un líquido mantenido a volumen constante.

Desafortunadamente el viscosímetro de orificio empleado en asfalto no cumple con las leyes de borde consideradas en la aplicación de ley de "Hagen-Poiseuille", ésto es:

- a) El largo del orificio de descarga debe ser diez veces mayor que el diámetro.
- b) La proporción entre el orificio de descarga y el volumen del contenedor produce importantes pérdidas de carga en el flujo.
- c) La variación de la fuerza hidrostática que empuja el líquido es importante, pues no se mantiene el volumen constante.

Debido a estas causas es que para convertir los resultados de viscosidad medidos en viscosímetros de orificio (seg), a unidades de viscosidad se deben emplear fórmulas y tablas de conversión y aún así la conversión resulta muy aproximada.

Las temperaturas de ensayo empleadas normalmente son 25 °C y 50 °C. A estas temperaturas el material presenta un comportamiento no-Newtoniano y el ensayo no tiene mucha validez para el caso de asfaltos puros (11). Es por ésto que, el ensayo de orificio se emplea para medir viscosidades de asfaltos emulsionados los que presentan viscosidades más bajas y comportamiento más cercano al comportamiento Newtoniano a temperaturas de 25 °C y 50 °C. La razón de emplear este tipo de ensayo en emulsiones y no tubos capilares, es debido que las partículas emulsionadas distorsionan el flujo en el interior del capilar lo que se traduce en una baja repetibilidad de los resultados.

3.6 Ensayos fraass

Este ensayo no ha sido estandarizado por la ASTM o AASHTO. El ensayo fue concebido por Fraass en 1937 (12) y paulatinamente fue incorporado como un ensayo estandar por la mayoría de los países de Europa y Europa Occidental. El procedimiento además ha sido estandarizado por el Instituto de Petróleo con la denominación IP-80/53.

El ensayo mide la temperatura de ruptura frágil del asfalto. Una película delgada de asfalto se coloca sobre una placa de acero estandarizada se enfría gradualmente y se flexa bajo condiciones específicas, hasta que la película se fractura al alcanzar la temperatura fragilidad (Figura N°9).

El ensayo es de carácter empírico y entrega sus resultados en grados centígrados. Sin embargo, las condiciones de deformación y carga están bien establecidas y esto ha permitido determinar el valor del módulo elástico del material cuando alcanza su punto de fragilidad (4). Por lo tanto, se puede considerar que la temperatura de fragilidad del asfalto medida a través del ensayo Fraass corresponde a la temperatura en la cual el asfalto alcanza su máximo módulo elásticos. El módulo elástico calculado bajo estas condiciones es $2,07 * 10^9 \text{ N/m}^2$ (4, 13). Este valor se acerca a los valores máximos extrapolados por Van der Poel (3), Heukelom (2), Gaw (14) y otros autores.

Es importante reconocer que el punto de fragilidad de un asfalto no necesariamente ocurre a bajas temperaturas y es así que asfaltos en servicio y envejecidos naturalmente en el pavimento, puede mostrar temperaturas de fragilidad de +10 ó +15 °C. Es decir, un asfalto envejecido puede comportarse frágil a temperaturas normales de servicio.

La temperatura de fragilidad del asfalto ha sido asociada por el autor (4) con la temperatura de transición. A la temperatura más baja de transmisión de estructura molecular del asfalto ha alcanzado su posición más compacta y la concentración de tensiones aumenta bajo cargas. Esto permite que, a dicha temperatura, el material no acepte deformaciones y que la fractura se propague a una velocidad cercana a la velocidad del sonido. Este tipo de fractura se conoce como fractura frágil (15).

El ensayo Fraass ha sido mejorado en los últimos años y en la opinión del autor los resultados son muy fiables. Las modificaciones más importantes han sido presentadas por los autores en las referencias (14 y 13). El ensayo además, puede medir el efecto de envejecimiento conjunto, de oxidación y cristalización que ningún otro ensayo estandar puede realizar.

3.7 Viscómetro de platos deslizantes: ASTM - D3570

Fue adaptado como un procedimiento estándar en 1977. Este ensayo permite determinar la viscosidad del asfalto en un amplio rango de temperaturas. El rango de viscosidades medidas con este instrumento varía entre 10^5 a 10^{10} poises y se pueden aplicar velocidades de corte entre 10^{-3} a 10^2 sec^{-1} . El ensayo produce una deformación laminar como se muestra en la Figura N°2a. Tanto el esfuerzo de corte como la velocidad de corte se puede medir, lo que permite determinar directamente la viscosidad en Poises.

El empleo de viscómetros de platos deslizantes ha permitido cuantificar el efecto relativo, de la radiación solar y el oxígeno en películas delgadas de asfalto (16), así mismo, ha sido empleado por numerosos investigadores para describir en forma más precisa las propiedades Teológicas del asfalto. Sin embargo, el ensayo ha presentado siempre una serie de inconvenientes lo que ha hecho que poco a poco su uso haya ido declinando. Entre los principales inconvenientes reconocidos por muchos investigadores, se destacan los siguientes:

- a) La preparación de la muestra trae consigo excesiva "manipulación del asfalto. Esto daña y cambia las propiedades originales de la muestra especialmente, debido a que la muestra se ensaya en forma de película delgada.
- b) La deformación máxima posible de aplicar es relativamente pequeña lo que dificulta la cuantificación del comportamiento no-Newtoniano versus comportamiento Newtoniano del asfalto.
- c) La ciencia y conocimientos de reología de materiales no ha sido de manejo común en la práctica de la ingeniería de caminos y ésto ha restringido la aplicación de este, el cual, se considera científicamente exacto.
- d) Medidas de viscosidad a altas temperaturas es difícil, particularmente en viscómetros de platos deslizantes del tipo vertical.
- e) El ensayo resulta largo y delicado.

Cabe hacer notar que la metodología empleada en el ensayo, corresponde en la teoría, a la definición más pura establecida para medir la viscosidad absoluta de un líquido y que los inconvenientes mencionados son más bien de aplicación, en contraste con otros ensayos de carácter empírico presentados en que los inconvenientes presentados son más bien de carácter fundamental.

3.8 Viscómetros rotacionales

Los viscómetros rotacionales constituyen hoy en día a método más conveniente para medir las propiedades de flujo de líquidos Newtonianos y no-Newtonianos. Los viscómetros rotacionales modernos permiten la medición continua de deformaciones de corte, las cuales quedan registradas gráficamente. Así mismo, al retirar la carga permiten registrar la recuperación elástica de materiales visco-elásticos.

Este tipo de instrumentos permite la medición de las propiedades del asfalto en un amplio rango de temperaturas y esfuerzos de corte. Varios tipos de geometrías se han empleado en el sistema rotatorio, de este tipo de instrumento para "almacenar" y ensayar la muestra. La Figura N° 10 muestra esquemáticamente varias de estas geometrías considerándose la más apta para asfalto, la del tipo "cono-plato".

El viscosímetro rotacional tipo "cono-plato" fue estandarizado por la ASTM en 1977. Desafortunadamente la norma ASTM no solo estandarizó el procedimiento sino que además el aparato de ensayo. El aparato descrito en el procedimiento estándar corresponde al empleado por Sisko (17) en 1964 el cual ha quedado obsoleto, como método exacto, para estudiar las propiedades del asfalto.

Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, Julio - Diciembre 1988

La medición de propiedades y viscosidad hechas con viscosímetros rotacionales no son dependientes del instrumento, como los otros ensayos de carácter empírico descritos en este trabajo, es así como hoy en día, existen una variedad de viscosímetros rotacionales comerciales que sobrepasan en todo aspecto al aparato originalmente especificado por el procedimiento estandar. Muchos de estos aparatos comerciales, originalmente ideados para otros materiales Newtonianos o no-Newtonianos, han sido adaptados por investigadores y empleados en diferentes estudios sobre el comportamiento reológico del asfalto.

La geometría del sistema rotatorio es tal, que permite establecer una relación directa entre el esfuerzo de corte aplicado, la velocidad de corte y la viscosidad del material. Esto permite obtener la curva de comportamiento reológico de la muestra ensayada en las condiciones de mayor interés. Un extenso estudio de este tipo de ensayo ha sido presentado por el autor en referencia (4).

Entre las ventajas más importantes de los viscosímetros rotacionales están:

- a) Se puede estudiar el comportamiento del asfalto en un amplio rango de temperaturas y esfuerzos.
- b) Ensayo es fácil, limpio y confiable.
- c) Requiere de poca cantidad de muestra.
- d) La medición de viscosidad en el rango de comportamiento Newtoniano es rápida.
- e) Permite relacionar la teoría con la práctica.
- f) Permite evaluar objetivamente la susceptibilidad del asfalto a cambio de temperatura.
- g) Permite entender mejor el envejecimiento del material.

IV. EMPLEO DE ENSAYOS DE LABORATORIO EN ESPECIFICACIONES DE CALIDAD

Los asfaltos que se comercializan en Chile y en otros países deben cumplir con diferentes especificaciones propuestas por agencias gubernamentales. En mayor o menor medida estas especificaciones resultan insuficientes para garantizar un número de propiedades muy deseables de controlar por el ingeniero que emplea este material en la construcción de caminos, como ejemplo:

- a) Estabilidad química frente a los diferentes agentes oxidantes y envejecedores; temperatura, oxígeno, radiación, sollicitaciones cíclicas y otros.
- b) Estabilidad frente a cambios de temperatura. Es decir, baja susceptibilidad térmica.
- c) Homogeneidad química entre las partidas de un mismo contrato.

Algunas de las razones que pueden explicar la actual deficiencia que presentan las especificaciones, se pueden resumir como sigue:

- a) Validez de los ensayos físicos empleados: Como ha quedado demostrado en el texto de la presente publicación en gran número de ensayos que se emplean no tienen respaldo teórico, son más bien de carácter empírico y en muchos casos no reflejan adecuadamente las características de comportamiento reológico y mecánico del material.
- b) El asfalto a diferencia de otros materiales de construcción, no es una aleación o composición de fases producido en la industria bajo controles físico/químicos que permitan, con diferentes grados de exigencias, garantizar una composición química. Es decir, la obtención de un producto de una calidad y propiedades controlada.
- c) El asfalto es un material residual producto de la destilación de petróleo crudo proveniente de los más variados yacimientos de alrededor del mundo.

Tanto estas dos últimas características, producto residual y variedad de orígenes, como su composición química estructurada de una infinita variedad de moléculas de hidrocarbóno hace pensar que los requerimientos de calidad exigidos al asfalto no se puede obtener con antelación a través de una determinada formulación química.

Cabe hacer notar que en la actualidad existen una variedad de ensayos químicos o físicos/químicos, algunos de los cuales han sido estandarizados por la ASTM. La totalidad de los ensayos estandarizados permiten identificar la presencia de variados compuestos genéricos los cuales han sido dificultosamente correlacionados con diferentes propiedades físicas del asfalto.

A pesar de que existe la posibilidad de introducir ensayos químicos de mayor o menor complejidad en el control de calidad del asfalto aún se puede mejorar las especificaciones del material en base a los actuales ensayos físicos descritos y de este modo tener un buen control de la homogeneidad del producto y no necesariamente de su composición química.

Para establecer los requerimientos del asfalto deseados por el ingeniero, se pueden ordenar los conceptos de la siguiente forma:

Primero: se debe de reconocer que el material de acuerdo a la etapa en que se encuentra (construcción o servicio) presenta dos comportamientos diferentes entre sí. Durante la etapa de construcción el material se trabaja en un rango de temperaturas en que su comportamiento es del tipo newtoniano (viscoso puro) con viscosidades relativas bajas. Durante la etapa de servicio el material trabaja en un rango de temperaturas y cargas en que su comportamiento es más bien del

Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, Julio - Diciembre 1988

tipo no-Newtoniano (visco-elástico). Por lo tanto parece recomendable en que las exigencias que se le impongan al material asfalto distingan bien sus aplicaciones.

Segundo: en la etapa de construcción se requieren que el asfalto presente viscosidades adecuadas que permitan su buen mezclado y óptima compactación a la menor temperatura posible.

Se requiere además conocer la susceptibilidad térmica del material a cambios de temperatura para poder determinar los rangos de temperaturas, para no salirse de los límites de viscosidad recomendados.

Los límites de viscosidad recomendado por el "Asphalt Institute MS-2" son:

- Compactación = 2.86 - 3.16 Poises

- Mezclado = 1.61 - 2.04 Poises

Para determinar las temperaturas de mezclado y compactación se requiere medir dos viscosidades del material dentro de la región Newtoniana. Para esto se pueden emplear los resultados de los ensayos:

- Viscosidad Absoluta a 60 °C

- Viscosidad Cinemática a 135 °C

Estos dos puntos se pueden marcar en un gráfico viscosidad temperatura como el de la Figura N° 11, que corresponde a una parte del gráfico BTDC descrito en la sección 3.4.2. En esta región de temperaturas (60 °C a 135 °C o más) la relación temperatura v/s viscosidad se asume lineal cuando ésta se grafica en una escala de doble logaritmo. La línea continua de la Figura N° 11, muestra el comportamiento típico de una viscosidad v/s temperatura de un asfalto. La línea continua cruza dos regiones indicadas con la letra "C" (compactación) y "M" (Mezclado). Se puede observar, que la pendiente de la recta determina el rango de temperatura que un determinado asfalto puede aceptar sin salirse de los límites de viscosidad recomendados para cada una de las etapas de construcción.

Tercero: en la etapa de construcción el ingeniero requiere de cierta homogeneidad del material. Es así como la línea continua de la Figura N° 11 puede desplazarse paralelamente hacia abajo o arriba indicando cambios importantes en la consistencia del material introduciendo en mayor o menor medida problema de mezclado y compactación. También, la línea continua puede rotar indicando variaciones en la susceptibilidad térmica del material (Figura N° 12), lo que también traerá complicaciones en la producción y colocación de la mezcla asfáltica.

Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, Julio - Diciembre 1988

Para poder controlar estos dos últimos fenómenos es imprescindible fijar cotas superiores e inferiores en los extremos de la recta de las Figuras N° 11 y 12. Vale decir podría establecerse valores máximos y mínimos a los ensayos; Viscosidad Absoluta a 60 °C y Viscosidad Cinemática a 135 °C. Otra manera de controlar las variaciones de susceptibilidad térmica es emplear índices de susceptibilidad térmica como el descrito en la sección 3.4.

Esto permitirá además controlar la homogeneidad del material. En la actualidad las normas chilenas sólo fijan su valor mínimo para la viscosidad Cinemática, dejando abierta la posibilidad de poder encontrar una gran variedad de tipos de asfaltos que cumplan con una misma especificación.

Cuarto: en la etapa de servicio se requiere que el asfalto cumpla aún con más requisitos que en la etapa de construcción. Es así como se debe pensar en ensayos que además de predecir la consistencia indiquen con un cierto grado de certeza el comportamiento mecánico debido a variaciones de velocidad de carga, susceptibilidad térmica y susceptibilidad de envejecimiento. Debido a las características de comportamiento no-Newtoniano que presenta el material asfalto en el amplio rango de temperatura de servicio, se puede concluir que ninguno de los actuales ensayos de especificación serían aptos para establecer especificaciones, que con cierto grado de certeza definan el material más óptimo para un indicado uso. Sin embargo, ensayos como el de penetración y ductibilidad han sido empleados por más de medio siglo permitiendo reunir suficientes datos como para poder fijar criterios dentro de márgenes ingenierilmente aceptables. La única forma de mejorar las especificaciones dentro del rango de temperatura de servicio es con el empleo de ensayos más exactos, como los descritos brevemente en las secciones 3.7 y 3.8.

La susceptibilidad térmica del asfalto en servicio ha sido históricamente medida con el empleo del Índice de Penetración (IP) descrito en la sección 3.2. Para controlar variaciones en la susceptibilidad térmica del asfalto es recomendable fijar los límites de variación del Índice de Susceptibilidad Térmica (IP) dentro de márgenes relativamente estrictos.

Para controlar susceptibilidad de envejecimiento normalmente se ha recurrido al ensayo de Homo de Película Delgada. A este respecto el autor propone el empleo de el ensayo Fraass con envejecimiento térmico descrito en referencias (4) y (13) el cual tiene el potencial de determinar si el asfalto una vez envejecido se comportará frágil o no a las temperaturas de servicio que esté expuesto.

Existe además, la posibilidad de adoptar las normas empleadas en los estados del Oeste de los Estados Unidos en que las especificaciones de calidad del asfalto se basan principalmente en los resultados de ensayos en muestras de asfaltos residuales. En este último caso el ensayo que se emplea para el envejecimiento de la muestra corresponde al ensayo de "Película Delgada en Horno Rotatorio" el cual, somete a la muestra a una exposición más severa de temperatura y oxígeno.

Quinto: en los cuatro puntos anteriores se han sugerido el uso de una gran variedad de ensayos y requisitos para garantizar con un cierto grado de certidumbre la calidad de un asfalto. Lo cierto que estos ensayos se pueden complementar aún más con ensayos tales como: Contenido de asfaltenos, ensayo de la mancha, adherencia y otros. Sin embargo, a quien corresponda determinar los niveles de control deseados para una determinada obra, deberá estudiar detenidamente las exigencias de las especificaciones y decidir en base a experiencia y conocimiento los requisitos de especificaciones que deba de cumplir el asfalto de modo que garanticen un buen comportamiento del material para las condiciones de construcción, clima y uso a las cuales estará sometido el material.

Lo que es claro, en opinión del autor, es que las actuales especificaciones empleadas en Chile son incompletas.

V. COMENTARIOS FINALES

El material asfalto presenta un amplio rango de comportamiento físico, dependiendo principalmente de su composición química, temperatura, estado y velocidad de cargas, y estado de envejecimiento.

Debido fundamentalmente a las características termoplásticas del material, es que el asfalto puede presentar un comportamiento de un sólido elástico en un extremo y en el otro extremo de un líquido Newtoniano. Esto ha significado que en la práctica se hayan introducido un sin número de ensayos de tipo empírico para cuantificar las propiedades del asfalto en forma relativa y no absoluta. Es así como en el largo plazo muchos de estos ensayos fueron aceptados como procedimientos estándares y paulatinamente se fueron encontrando correlaciones de estos ensayos con el comportamiento del material una vez en servicio.

La limitación fundamental de un ensayo de tipo empírico, es que el ensayo en sí es dependiente del tipo de instrumento y las condiciones específicas del procedimiento de ensayo. Es por ésto que este tipo de mediciones son más bien relativas y no absolutas. Así mismo, en muchos de estos ensayos se desconocen las condiciones de deformación y carga lo que dificulta la extrapolación de resultados a otros estados diferentes. En otras palabras se produce una situación bastante común con el asfalto en que dos muestras distintas pueden tener la misma penetración a 25 °C pero un comportamiento muy distinto a otras temperaturas o una vez envejecido.

En la práctica el ingeniero debe conocer las propiedades del asfalto en el rango completo de temperaturas de trabajo. Esto es, temperaturas de mezclado de 150 °C o más y temperaturas de servicio que en casos extremos puede ser -15 °C. Para ésto, el ingeniero no cuenta más que con la serie de ensayos de carácter empírico descritos. No obstante, existe la posibilidad de

Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, Julio - Diciembre 1988

acrecentar el conocimiento relativo al comportamiento de este material con el empleo de viscosímetros capilares y mejor aún con el empleo de viscosímetros de tipo rotacional.

Con ésto no se propone reemplazar los ensayos actualmente usados en especificaciones sino que complementar la información y poder hacer uso de conceptos teóricos de reología de materiales así como se ha hecho en otras áreas de la mecánica de materiales.

REFERENCIAS

1. Ferry, J. D., "Viscoelastic Properties of Polymers", John Wiley and Sons, London, 1961, pp. 5-12.
2. Heukelom, W., "An Improved Method of Characterizing Asphaltic Bitumens with the Aid of their Mechanical Properties", Proceeding, Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 42, 1973, pp. 67-98.
3. Van der Poel, C., "A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relations to Roudne Test Data", Journal Applied Chemistry, 4, 1954, pp. 221 - 236.
4. Thenoux, G., "Durability of Bituminous Binders", Master's Thesis, Department of Transportation and Highways Engineering, The University of Birmingham, England, 1983.
5. Bell, C. A., "Use of the Shell Bitumen Test Data Chart in Evaluation of Asphalt Data", Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 52, pp. 1-31, 1983.
6. Garre, G. and Laurent, D., "The Relationship between the Penetration and Viscosity of Bitumens", Shell Bitumen Reprint 16, 1963.
7. Traxler, R. N., "Rheology and Rheological Modifiers other than Elastomers". Bituminous Material, Ed. Hoiberg, Vol. 2 Interscience Publisher, pp. 143-211, 1955.
8. Saal, R. N., "A Study on the Significance of the Ductility Test for Bitumen", Journal Applied Chemistry, 5, pp. 663-675, 1955.
9. Bowen, H., "Asphalt Ductility Measurement", School of Mines Quarterly, Columbia University, Vol. 10 pp. 297-331, 1889.
10. Van Wazer, J. R. et. al., "Viscosity and Flow Measurement", Interscience Publisher, 1963.
11. Worlow, R. W., "Rheological Techniques", John Wiley and Sons, 1980.
12. Fraass, A., "Test Methods for Bitumen and Bituminous Mixtures with Specific Reference to Low Temperature", Bitumen, Hamburg, pp. 152-155, 1937.
13. Thenoux, G., Lees, G., Bell, C. A., "Laboratory Investigation of the Fraass Brittle Test", Proceedings Association of Asphalt Pavement Technologist, Vol. 54, pp. 529- 550, 1985.

Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, Julio - Diciembre 1988

14. Gaw, W. J., "Measurement and Prediction of Asphalt Stiffness and their use in Developing Specifications to Control Low Temperature Pavement Transverse Cracking", ASTM, Special Technical Publication, 628, pp. 57-67, 1977.
15. Biggs, W. D., "The Mechanical Behaviour of Engineering Materials", Pergamon Press, London, pp. 75-78, 1965.
16. Dickmson, E. J., et. al. "Physical Factors Affecting the Absorption of Oxygen by Thin Films of Bituminous Binders", Journal Applied Chemistry, 8, pp. 673-687, 1958.
17. Sisko, A. W., "Determination and Treatment of Asphalt Viscosity Data", Highway Research Record, Bituminous Materials and Mixes, 67, pp. 27-37, 1964.

Tabla 1: Condiciones de carga típica en caminos

Condiciones de Carga	Posible Defecto	Duración de Carga	Grad. Vell. De carga	Módulo de rigidez Relativo a 25 °C
Asentamiento	Grietas	1 mes	$3 \times E^{-7}$	$4.0 \times E^{-6}$
Carga Estática (Pesada)	Deformación	1 día	$2 \times E^{-5}$	$1.2 \times E^{-5}$
Carga Estática (Liviana)	Deformación	1 hora	$3 \times E^{-4}$	$3.0 \times E^{-4}$
Tráfico Lento - Efecto en la superficie	Ahuellamiento deformación	0.1 seg (10 km/hr)	$1 \times E^{+1}$	$3.3 \times E^{+0}$
Trafico rapido - Efecto en la superficie	Deform. Progresiva Grietas Desgaste	0.01 seg (100 km/hr)	$1 \times E^{+3}$	$2.3 \times E^{+1}$
Efecto en particulas de la superficie	Desgaste	0.01 seg (100 km/hr)	$1 \times E^{+3}$	

- Nota: La base 1 para la determinación del modulo de rigidez relativo, corresponde a la determinada, experimentalmente para un asfalto 100 pen a 25 °C, donde la velocidad de carga de la aguja de penetración se estima igual a 0.2 segundos.

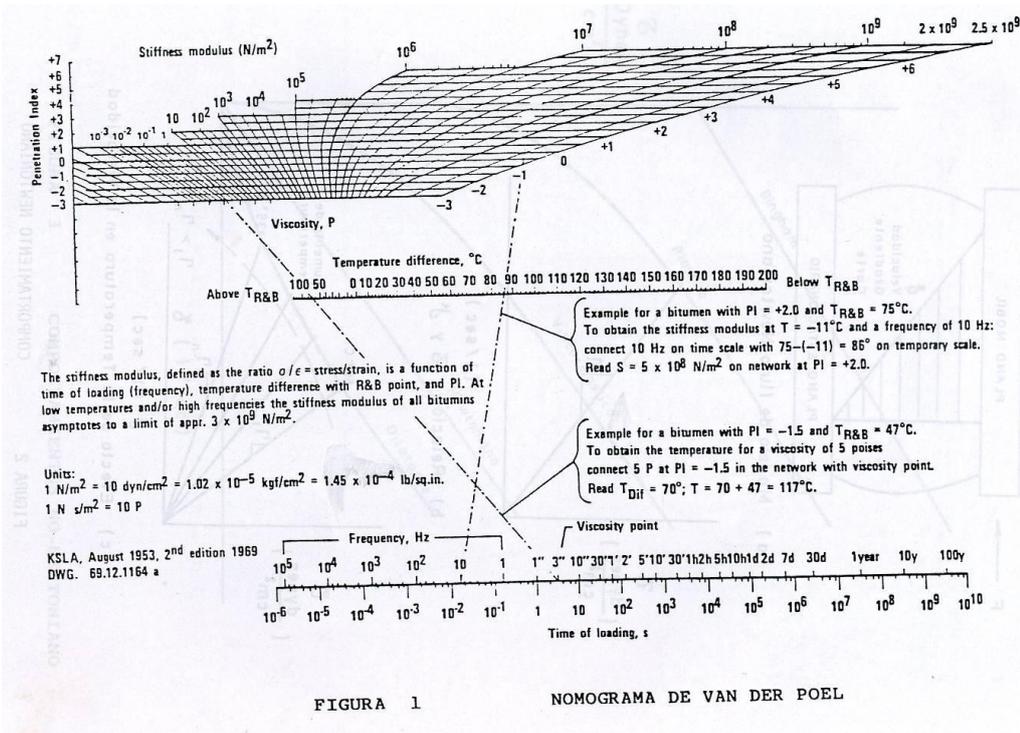
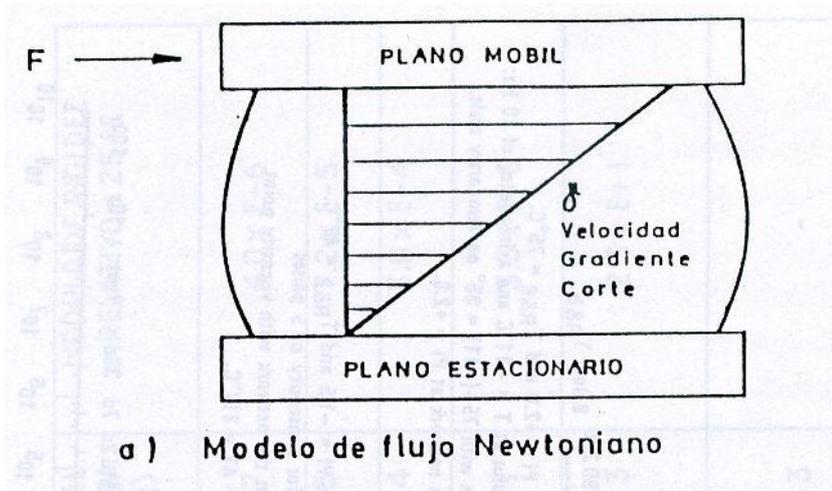


FIGURA 1 NOMOGRAMA DE VAN DER POEL

Figura 1 Nomograma de VAN DER POEL



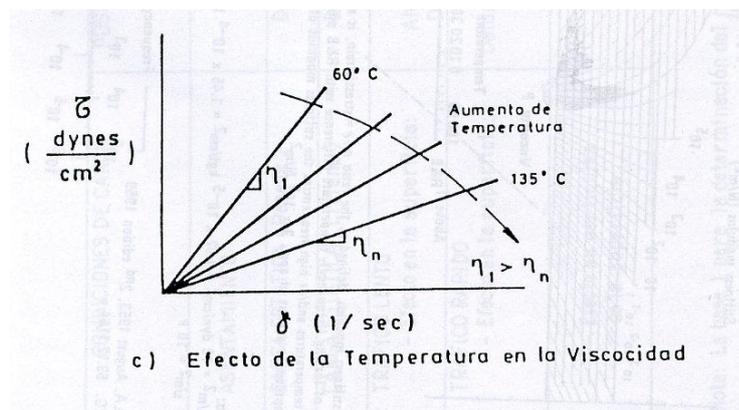
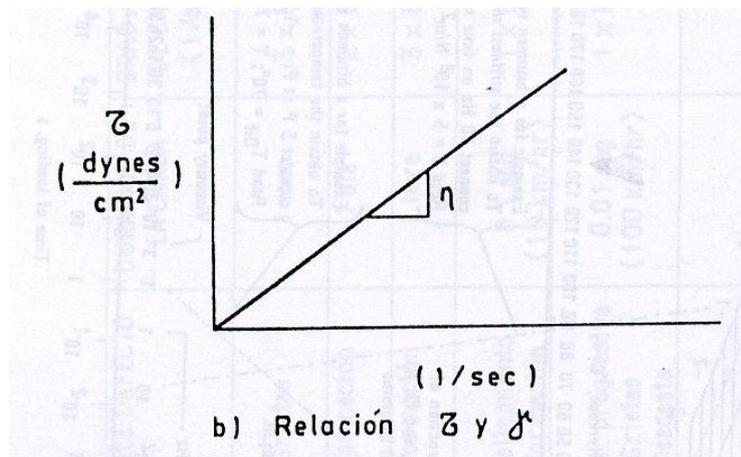


Figura 2 Comportamiento newtoniano

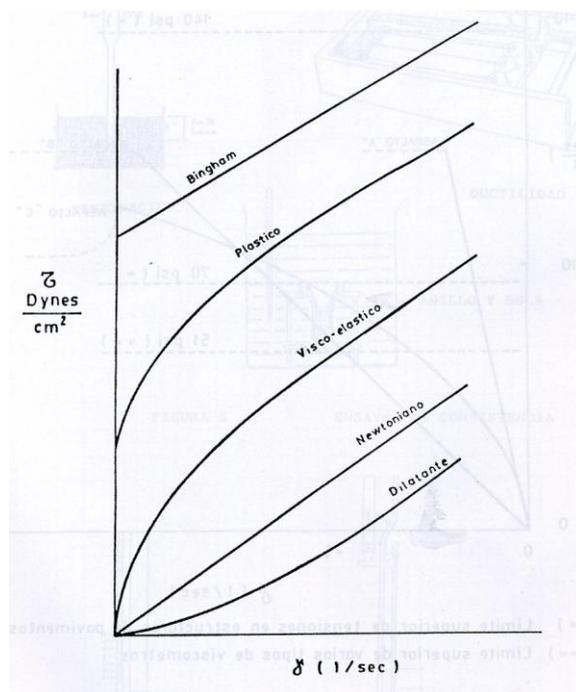


Figura 3 Comportamientos no-newtoniano

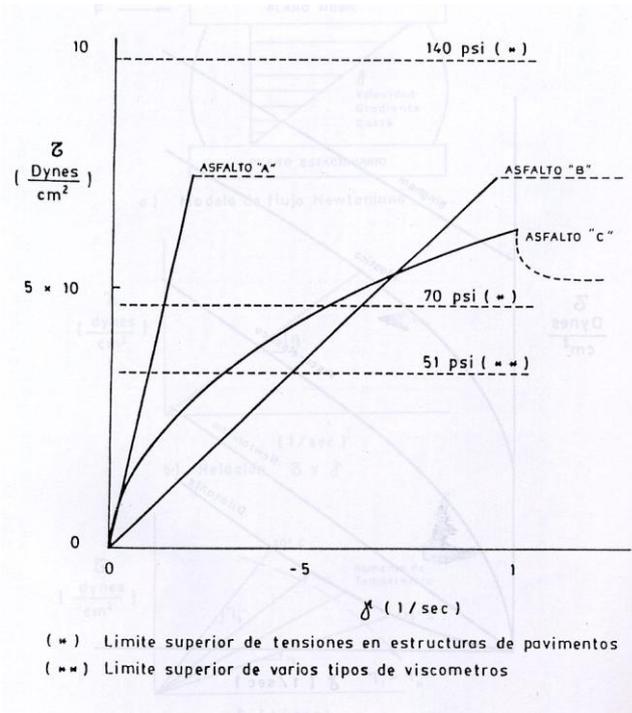


Figura 4 Variaciones de comportamiento del asfalto

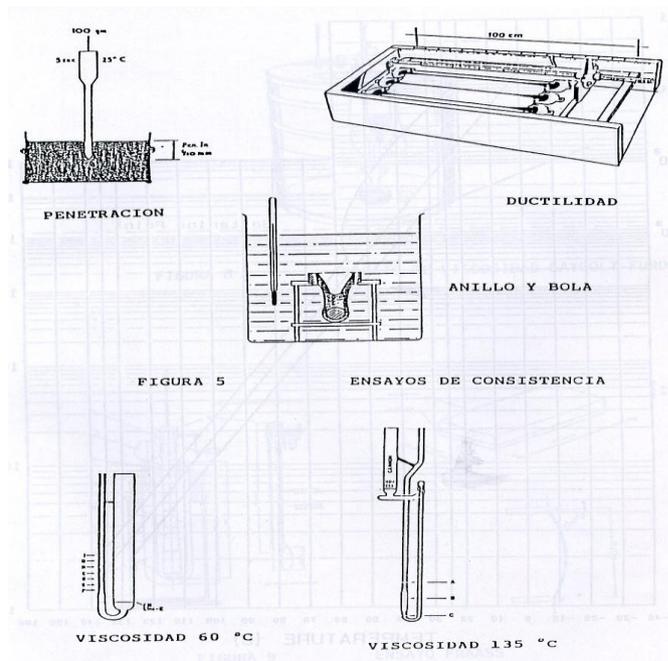


Figura 5 Ensayos de viscosidad capilar

Figura 6 Ensayos de Viscosidad Capilar

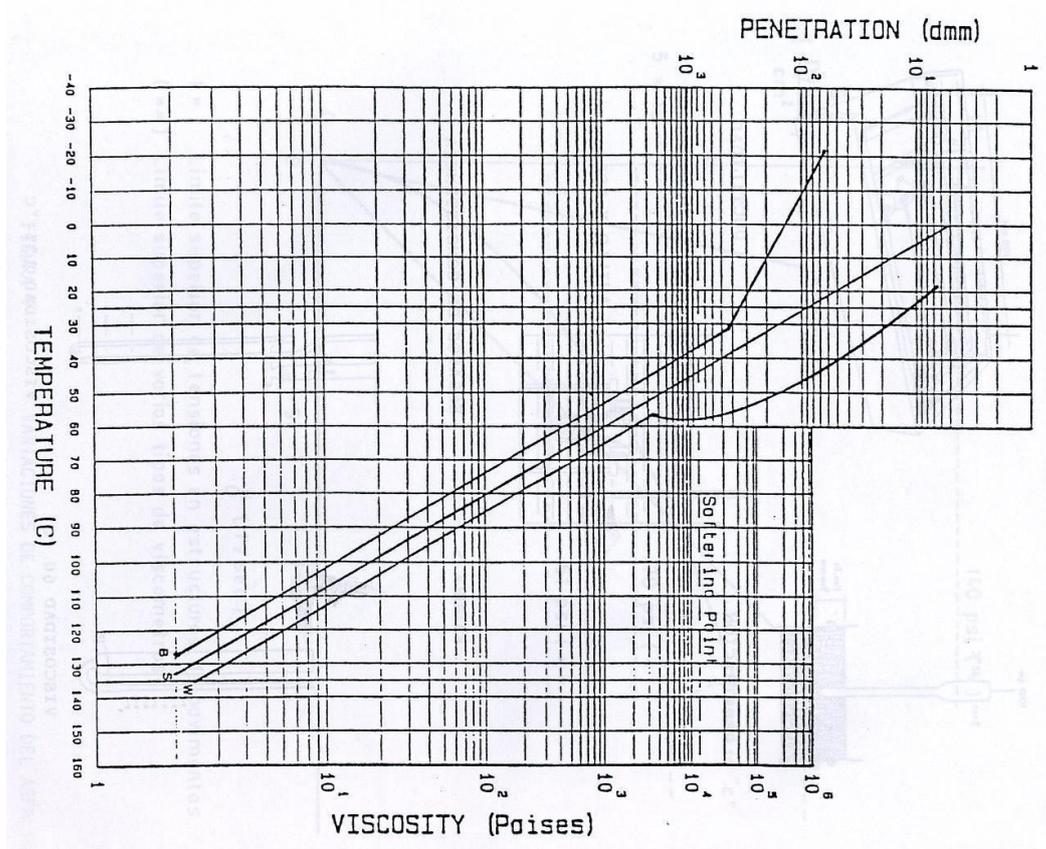


Figura 7 Diagrama de Heukelom

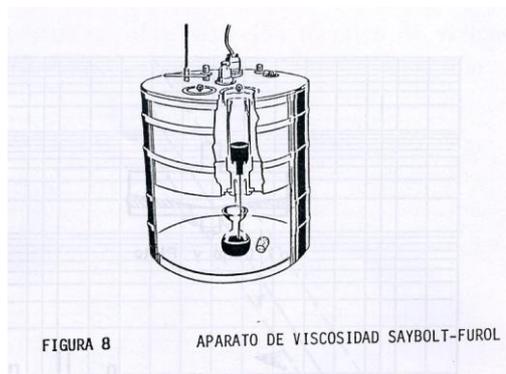


Figura 8 Aparato de viscosidad SAYBOLT-FUROL

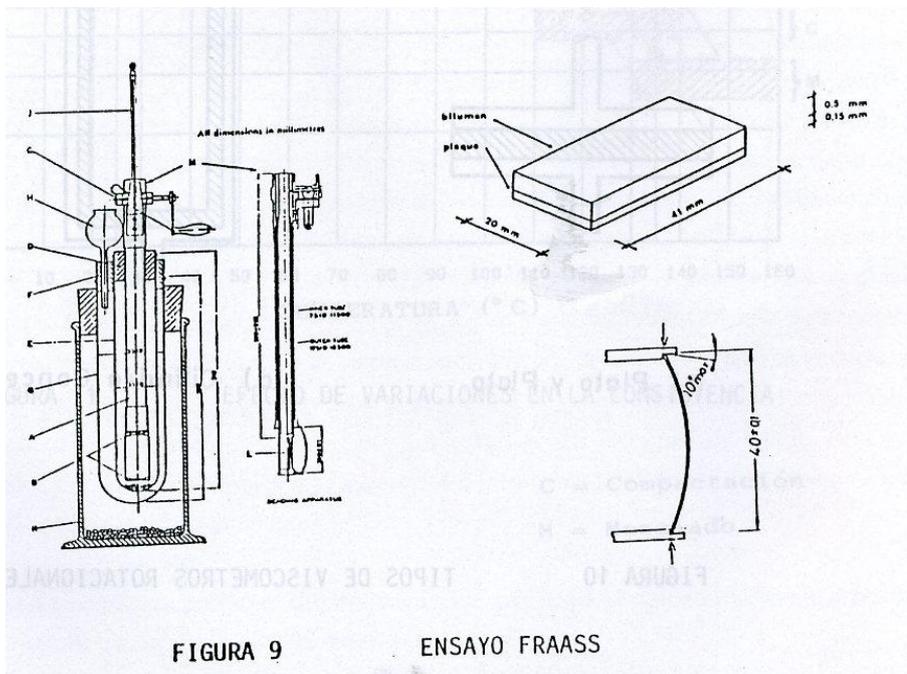


Figura 9 Ensayo FRAASS

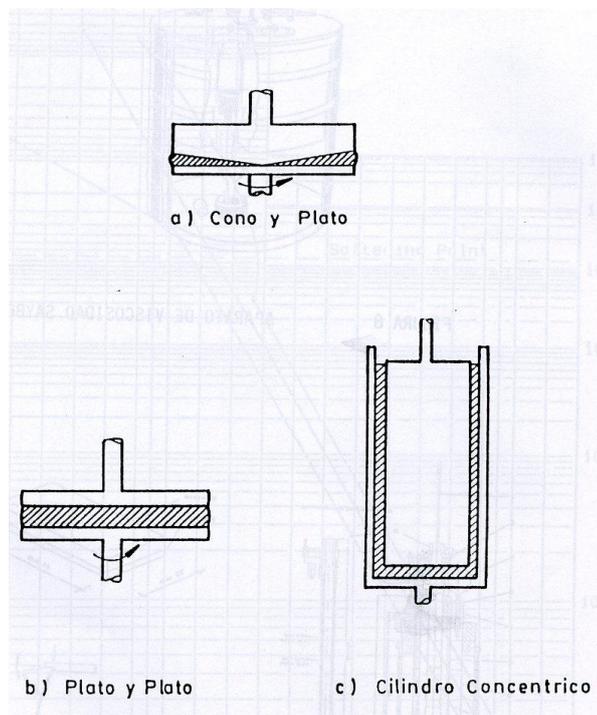
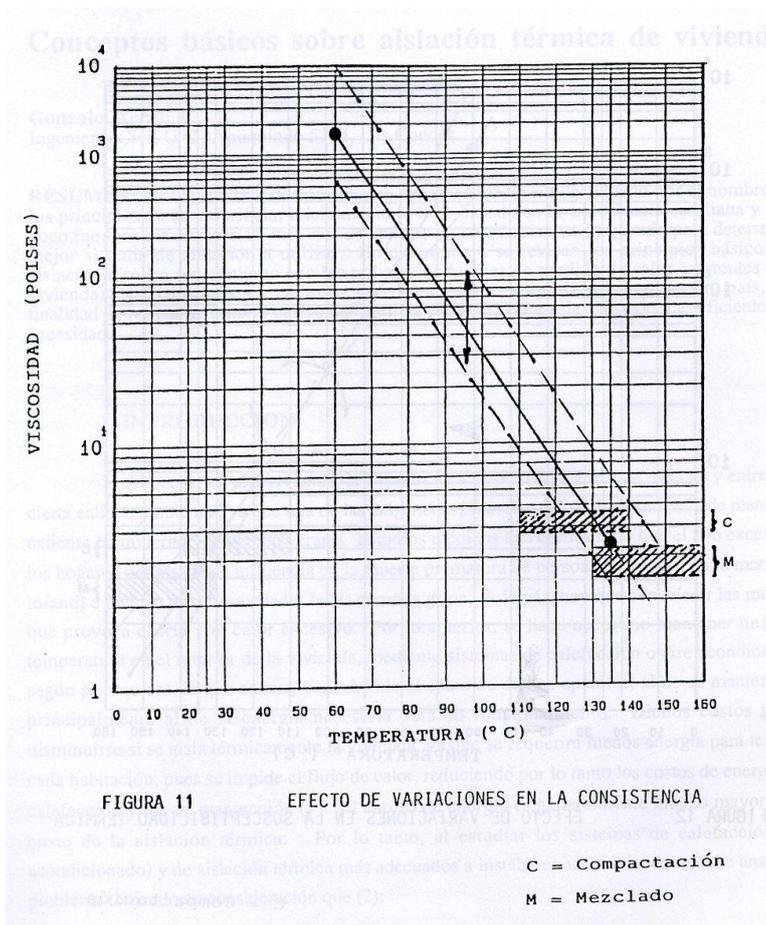


Figura 10 Tipos de viscometros rotacionales



C= Compactación

M= Mezclado

Figura 11 Efecto de variaciones en la consistencia

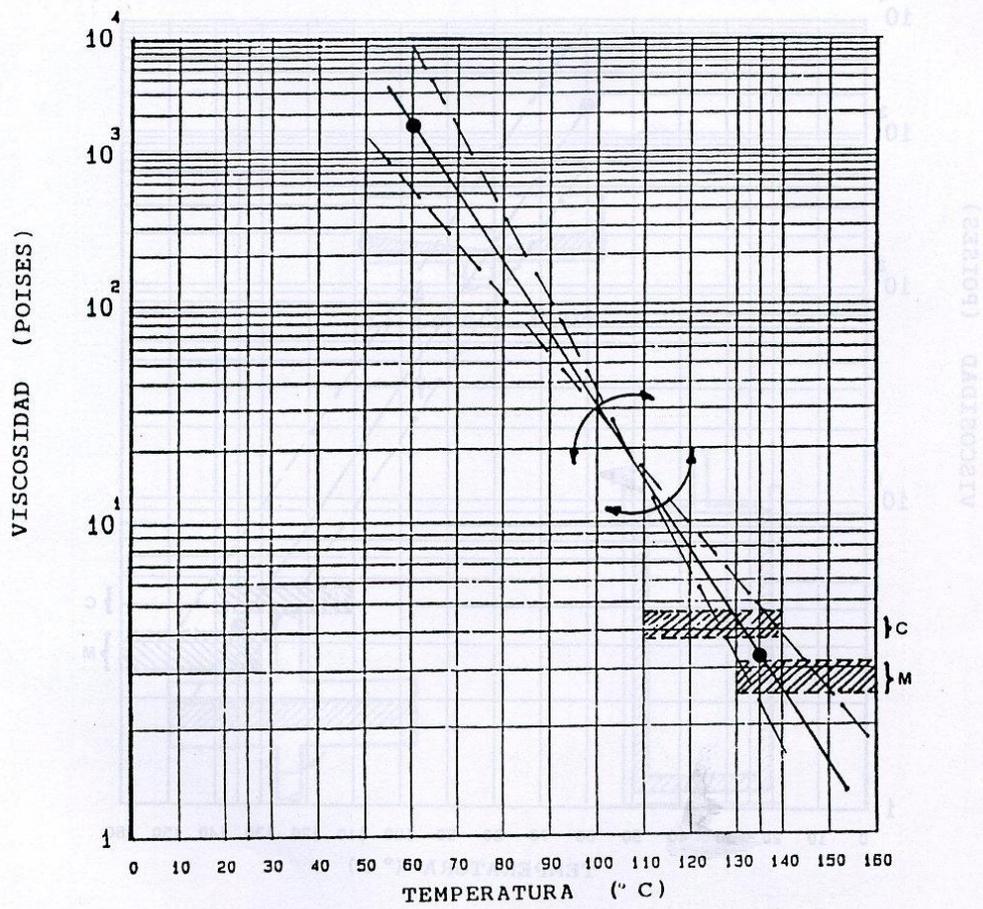


FIGURA 12 EFECTO DE VARIACIONES EN LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA

C = Compactación
M = Mezclado

C = Compactación
M = Mezclado

Figura 12 Efecto de variaciones en la susceptibilidad térmica