

T31: SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA DE LIGANTES BASADA EN EL DESEMPEÑO REAL

Versión revisada y actualizada para biblioteca técnica (febrero 2026). Manuscrito derivado de una versión presentada en 2008 (Venezuela). Esta versión no incorpora nuevos ensayos; se actualizan redacción y referencias. Las figuras se mantienen y serán insertadas por el autor.

Autor:
Héctor Rioja V.

Universidad Diego Portales
Avenida Ejército Libertador 441, piso 3 Santiago Chile
hriojav@asfaltotecnica.cl

Resumen

La caracterización tradicional de ligantes asfálticos, basada en penetración y/o viscosidad, incluye un parámetro denominado IP (índice de Pfeiffer o penetration index, PI) que permite describir la variación de la consistencia del ligante con la temperatura (susceptibilidad térmica). Una aplicación práctica es estimar la penetración a distintas temperaturas dentro del intervalo de servicio. La ecuación más difundida para el cálculo de IP se basa en experiencias realizadas en 1936 por Pfeiffer y Van Doormaal, e incluye una constante empírica asociada al punto de ablandamiento y a la penetración de asfaltos normales. En la práctica, para los asfaltos analizados en esa época, se observó que la penetración medida a la temperatura del punto de ablandamiento era aproximadamente 800 [0,1 mm; 100g; 5s]. Sin embargo, la literatura clásica reporta que esta aproximación puede no cumplirse para todos los ligantes (Huet, 1958; McLeod, 1968), lo que puede inducir valores de IP no representativos. Este trabajo resume ensayos de laboratorio realizados en Chile orientados a verificar dicha simplificación para ligantes comercializados localmente, y discute las implicancias teórico - prácticas de su utilización. Se concluye que el uso de la ecuación simplificada no es válido de manera general para todos los asfaltos del mercado vial, y se sugieren ecuaciones alternativas para obtener un IP más consistente con el desempeño observado.

1.0 Introducción

La selección de agregados y ligantes para la construcción de un camino es una tarea que a simple vista parece fácil, pero en la práctica no resulta nada sencilla. Es muy frecuente tener que enfrentar complejidades tales como: costo, escasez o calidades inadecuadas para las exigencias proyectadas. Otros problemas están relacionados con el lugar donde se ejecuta la obra, ya que la zona geográfica determinará condiciones climáticas específicas, como, por ejemplo, fríos extremos o altas temperaturas. Aún en condiciones de climas templados es posible encontrar fuertes diferencias de temperatura entre el día y la noche o entre las diferentes estaciones del año. Existen muchas otras consideraciones que se deben realizar al momento de diseñar la mezcla asfáltica.

Resulta muy frecuente que los países implementen especificaciones para los agregados, ligantes y mezclas asfálticas. Estas exigencias o normas son construidas basadas en prácticas internacionales que son modificadas de acuerdo a las experiencias locales. De esta manera se busca disminuir las probabilidades de fracaso que normalmente se traducen en pérdidas económicas. En general, no es tarea fácil ni breve cambiar una especificación de materiales de construcción. El Ministerio de Obras Públicas (MOP), es la institución estatal encargada de velar por la correcta ejecución de caminos en Chile y es también la institución que redacta y exige el cumplimiento de normas. En la práctica, la actualización de especificaciones y criterios técnicos suele requerir procesos formales, validaciones y tiempos de implementación. Por ello, es importante que los indicadores simplificados (como el IP calculado a partir de $Pen@25^{\circ}C$ y punto de ablandamiento) se usen con trazabilidad, declarando explícitamente los supuestos adoptados.

Complemento 2026: Antecedentes bibliográficos y vigencia del supuesto $Pen=800$

El supuesto de penetración ≈ 800 a la temperatura del punto de ablandamiento se asocia al desarrollo del índice de penetración (PI) propuesto por Pfeiffer y Van Doormaal (1936). Esta simplificación facilita el cálculo del IP a partir de ensayos empíricos habituales (penetración y punto de ablandamiento), pero implica asumir un comportamiento uniforme que puede no cumplirse en ligantes provenientes de distintas fuentes o procesos.

Huet (1958) y trabajos posteriores reportan discrepancias entre la penetración real en el punto de ablandamiento y el valor 800. McLeod (1968) muestra, para un conjunto de asfaltos comerciales, que la penetración en el punto de ablandamiento puede variar ampliamente, junto con la viscosidad asociada, lo que refuerza la necesidad de verificar la validez de la simplificación en cada mercado o familia de ligantes.

En paralelo, la caracterización por desempeño mediante el sistema PG (AASHTO M 320) emplea ensayos reológicos (por ejemplo, DSR y BBR) y reduce la dependencia de índices empíricos. No obstante, en contextos donde aún se especifica por penetración/viscosidad, o donde se requiere trazabilidad histórica de datos, el análisis de susceptibilidad térmica mediante IP sigue siendo una herramienta útil siempre que se controle su base experimental.

Durante el proceso de concesión y construcción de las principales rutas interurbanas chilenas, en su gran mayoría las empresas constructoras respetaron estrictamente las especificaciones constructivas vigentes, pero varios de estos caminos concesionados sufrieron algún tipo de falla una vez puestos en servicio, llamando especialmente la atención la aparición de extensas manchas semejantes a las exudaciones sobre la superficie de muchos de ellos. Problemas surgidos en una concesión vial cercana a la ciudad de Santiago de Chile, alertaron a los especialistas del área vial. Uno de los tramos de esta obra presentó el fenómeno ya mencionado. En este caso, se contaba con abundante información técnica respecto de la calidad de los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica, como asimismo importantes

detalles de diseño de la misma. Los ensayos realizados al pavimento asfáltico mostraban que esta cumplía estrictamente las especificaciones exigidas por el MOP en esa época, especialmente aquellas referidas al porcentaje de aire que en este caso era de alrededor de un 4 % en el diseño Marshall (laboratorio) y entre un 4 y un 5,9 % (mínimo 98 % de compactación) en el pavimento puesto en servicio. Muchos estudios se realizaron para tratar de averiguar la o las posibles causas que estaban dando origen a estas deficiencias, pero sin llegar a ninguna conclusión definitiva (Esta nota se enfoca en la validez del supuesto $Pen=800$ y sus implicancias; no pretende atribuir causalidad de falla). Este trabajo resume una serie de investigaciones respecto del ligante cuyo objetivo fue la confirmación de las simplificaciones realizadas por Pfeiffer y Van Doormaal en su ecuación original. Además, se incluye una discusión de las implicaciones teórico – prácticas que derivan de su correcta utilización. Una de las conclusiones más reveladoras de este estudio es que el uso de la ecuación “original” para la determinación del IP no es válida para todos los asfaltos comercializados en el mercado vial, además se sugieren ecuaciones alternativas para la obtención del valor de IP.

2.0 Especificaciones de Materiales

La generalidad de las obras viales, incluyendo las obras concesionadas que se construyen en Chile son controladas por el MOP (excepto los caminos privados). Parte de la estrategia de control e inspección de esta institución se sustenta en el uso de un compendio de especificaciones conocido como Manual de Carreteras. Estos manuales (son alrededor de 10), abordan diversos temas tales como: diseño geométrico, diseño estructural, control en obra, etc. En términos muy simplificados estas especificaciones pueden resumirse de la siguiente manera:

2.1 Agregados

La geografía chilena permite contar con una gran variedad de áridos, en su mayoría de gran calidad gracias a la Cordillera de los Andes y los ríos que de ella fluyen. Las especificaciones más utilizadas para agregados gruesos utilizados en la fabricación de mezclas asfálticas se muestran en la tabla N°1 (ref. 1).

Tabla N°1 Exigencias para agregados gruesos.

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Desgaste Los Angeles (máx)	25% (1)	35%	35%	30%	8.202.11 (LNV 75)
Desintegración en Sulfato de Sodio (máx.)	12%	12%	12%	12%	8.202.17 (LNV 74)
Partículas Chancadas (mín.)	90%	70%	60%	90%	8.202.6 (LNV 3)
Partículas Lajeadas (máx.)	10%	15%	15%	10%	8.202.6 (LNV 3)
Adherencia Método Estático (mín.)	95%	95%	95%	95%	8.302.29 (LNV 9)
Adherencia Método Dinámico (mín.) (2)	95%	95%	95%	95%	8.302.31 (LNV 44)

1) El Proyecto podrá especificar otro valor de desgaste de Los Angeles, debidamente justificado, el cual no podrá superar el 35%.

2) La adherencia dinámica sólo se exigirá en áreas con precipitación media anual superior a 350 mm. Si no cumplen los áridos con esta exigencia, se podrán utilizar previa incorporación de un aditivo que mejore la adherencia en obra.

2.2 Ligantes

Hasta el año 2005 en Chile los asfaltos se clasificaban por penetración exclusivamente, pero a partir del año 2006 se cambió a clasificación por viscosidad medida a 60°C, ver tabla N°2 (ref. 2). Probablemente esta corrección es consecuencia de una serie de fallas detectadas sobre las superficies de las capas de rodadura de los pavimentos asfálticos que fueron comentadas en la introducción de este texto.

Tabla N°2 Clasificación de ligantes por su viscosidad.

Ensayes	Grado de Viscosidad	
	CA 24	CA 14
Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Mayor o igual a 2400	Mayor o igual a 1400 y menor a 2400
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Ensayo de la Mancha (% Xilol)	Máx. 30%	Máx. 30%
Solubilidad en tricloroetileno, %	Mín. 99	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	Mín. 232	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	Informar	Informar
Índice de Penetración	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0
Película Delgada Rotatoria:		
- Pérdida por Calentamiento (%)	Máx. 0.8	Máx. 0.8
- Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Informar	Informar
- Ductilidad	Mín. 100	Mín. 100
Índice de Durabilidad	Máx. 3.5	Máx. 3.5

Adicionalmente, a las especificaciones de viscosidad se incluyó dos notas que indican lo siguiente:

- 1- Ningún proyecto podrá tener una exigencia de viscosidad absoluta original para el ligante asfáltico, diferente al valor mínimo indicado en la especificación.
- 2- Ningún proyecto podrá tener especificación adicional por penetración.

2.3 Mezclas Asfálticas

Las especificaciones para mezclas asfálticas utilizadas en Chile tradicionalmente se basaban en normas norteamericanas, pero en los últimos años han sufrido modificaciones debido a la influencia ejercida por constructoras europeas (ver tablas N°3 y N°4). La compactación de probetas Marshall se realiza por el método tradicional de golpe sin amasado utilizando la mayoría de las veces equipos automáticos (sólo en terreno aún es posible encontrar equipos manuales). Durante muchos años el porcentaje de huecos en la mezcla (para capas de rodadura) se fijó en el rango 3 – 5 %, pero en consideración a ciertas fallas superficiales detectadas en los pavimentos, se aceptó la sugerencia de técnicos europeos que cambiaban estas especificaciones a los rangos mostrados en la tabla N°3, de 4 a un 6 % de huecos de aire para capas de rodadura (ref. 1).

Tabla N°3 Exigencias para mezclas asfálticas en caliente

TIPO DE MEZCLA ASFALTICA	ESTABILIDAD (N)	FLUENCIA (0,25 mm)		HUECOS EN LA MEZCLA (%)	
	Mín.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Rodadura	9.000	8	16	4,0	6,0
Intermedia	8.000	8	16	3,0	8,0
Base Gruesa	6.000	8	16	5,0	10,0
Superficie Fina	4.000	8	16	3,0	8,0

Tabla N°4 Exigencias para vacíos en el agregado mineral.

TAMAÑO NOMINAL (mm)	MINIMO DE VACIOS (VAM) (%)
25	13,0
20	14,0
12,5	15,0
10	16,0
5	18,0
2,5	21,0
1,25	23,5

3.0 Pavimento Asfáltico - Falla de Origen Desconocido

Aproximadamente a partir del año 1995 en Chile se inicia una etapa de modernización y fuerte crecimiento de infraestructura vial. La concesión de las principales rutas interurbanas del país atrae a grandes consorcios del área vial. El arribo de constructoras provenientes de Alemania, Suecia, Italia o España generó fuertes cambios en el ámbito de la administración y gestión de la construcción entre otros. En el área de la técnica y específicamente del control de calidad de mezclas asfálticas se incorporaron nuevos ensayos como es el caso de la prueba de ahuellamiento (también llamadas roderas) utilizada para comprobar los diseños de mezclas asfálticas y evitar el riesgo de deformación (ver fotografía N°1). El equipo para realizar este ensayo es la Máquina Wheel Tracking. Este dispositivo fue traído al país por la empresa española Ferrovial, la fotografía N°2 muestra un modelo construido íntegramente en Chile.



Fotografía N°1 Ahuellamiento en un camino del norte de Chile.

Durante la puesta en servicio de un corto tramo de una de las principales rutas de acceso a la capital, se detectó un fenómeno que visualmente se asemejaba mucho a una exudación de asfalto (asfalto puro libre sobre la superficie del pavimento), pero que al ser inspeccionada con detenimiento mostraba una diferencia fundamental, presencia de agregados finos en su composición, además de cierto aspecto que sugería un posible reacomodo de partículas de mayor tamaño. A simple vista esta deficiencia se detectaba

fácilmente debido al brillo acentuado que mostraba a la luz del día (ver fotografía N°3 y fotografía N°4). Este fenómeno es acompañado de una fuerte reducción de la macrotextura superficial, (mancha de arena bajo 0,6 [mm], ver ref.1). Como consecuencia de lo anterior, estos pavimentos representaban un notable riesgo de accidente por falta de fricción entre pavimento – neumático. Tal situación inevitablemente obligaba a reparar o demoler la zona de pavimento afectada (aproximadamente 5 km en 2 pistas). Para determinar la posible o posibles causas de esta deficiencia se realizaron una serie de ensayos a la mezcla compactada en terreno.



Fotografía N°2 Máquina Wheel Tracking construida en Chile.



Fotografía N°3 Pseudo exudaciones en el acceso sur a Santiago.



Fotografía N°4 Aspecto visual pseudo exudaciones.

Los ensayos realizados al aglomerado asfáltico de superficie se concentraron principalmente en las propiedades volumétricas, vacíos del agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (Va), ya que los contenidos de ligante determinados a la mezcla de terreno

y controles de planta se encontraban dentro del rango $\pm 0,3 \%$ que son los límites normales para capas de rodadura (ver tabla N°5).

Tabla N°5 Parámetros volumétricos.

Parámetro	Valor Diseño	Rango en terreno
Vacíos de aire Va %	4	4 – 6
Vacíos agregado Mineral VAM %	14	14 – 15,7

Los datos presentados se han simplificado al máximo, el objetivo es mostrar que al menos desde un punto de vista tradicional esta mezcla asfáltica no presentaba condiciones volumétricas que indiquen que el fenómeno que se observaba era una “exudación de asfalto”. En consideración a que con las herramientas y tecnologías tradicionales de caracterización y control de ligantes tampoco se detectó algún problema, se iniciaron algunos programas de investigación para estudiar el comportamiento y la caracterización del bitumen. Los resultados de una de esas investigaciones se muestran a continuación.

4.0 Estudios Realizados a Ligantes Comercializados en el Mercado Chileno

Las especificaciones tradicionales para el ligante utilizadas en Chile desde el año 1995 y hasta el año 2005 se basaban en la penetración del bitumen. Un resumen de las exigencias de consistencia se muestra en la tabla N°6 (ensayos al cemento original).

Tabla N°6 Resumen de las exigencias de consistencia.

Parámetro	Rango		Observación
Penetración (25°C, 0,1 mm, 100 g, 5 s)	A: 60 -80	B: 80 -100	Elección según clima.
Ductilidad (25°C, 5 cm/mín, cm)	Min 100		Sin observaciones.
IP	-1 < IP < +1		Determinación gráfica.

El Índice Pfeiffer se incluye tanto en las especificaciones por penetración como por viscosidad. En consideración a la importancia de este parámetro se realizó una revisión de las ecuaciones que permiten su cálculo.

4.1 Susceptibilidad Térmica de Ligantes Asfálticos

El concepto susceptibilidad térmica aplicado a betunes asfálticos tiene relación con el cambio de consistencia respecto de las variaciones de temperatura. Para ilustrar esta idea se considerará que la “dureza” del asfalto tiene un comportamiento lineal en un gráfico consistencia v/s temperatura (ver figura N°1).

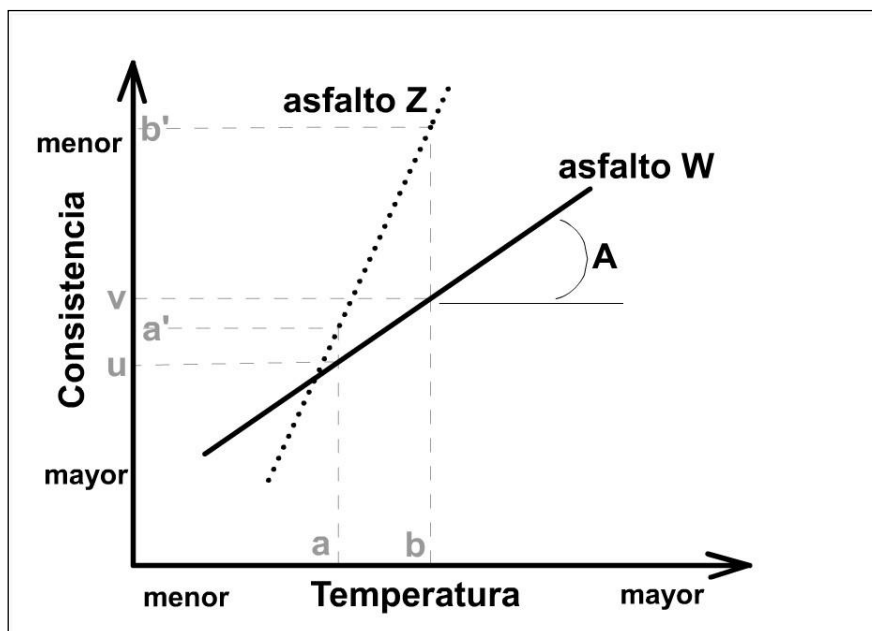


Figura N°1 Concepto susceptibilidad térmica.

En este esquema se puede apreciar como el asfalto Z pierde más consistencia que W, para una misma diferencia de temperatura. Cuando la temperatura aumenta desde a hasta b la consistencia de Z se reduce desde a' a b', en cambio, para la misma diferencia de temperatura (a – b) el asfalto W reduce su consistencia desde u hasta v. Esto podría describirse técnicamente diciendo que “El ligante Z es más susceptible térmicamente que el ligante W”.

Un parámetro indicador de la susceptibilidad térmica es la pendiente de la recta. A mayor pendiente mayor sensibilidad respecto de los cambios de temperatura. De acuerdo esto, una manera muy simple de caracterizar asfaltos respecto de su susceptibilidad térmica es el uso de la pendiente de la recta.

Estudios realizados por J. Ph Pfeiffer y P.M. Van Doormaal en Europa en el año 1936 muestran que muchos de los asfaltos por ellos estudiados tienen un comportamiento lineal cuando se grafica el logaritmo (base 10) de la penetración del asfalto versus la temperatura (más tarde estos asfaltos fueron llamados S por Heukelom) (ref. 3). La expresión matemática que da cuenta de este comportamiento es la siguiente:

$$\text{Log}(\text{pen}) = A * T + C \quad (i)$$

Donde:

A= Susceptibilidad térmica del ligante (pendiente de la recta)

T= Temperatura (°C)

C= Intercepto

Si A es la pendiente de la recta entonces es posible expresar su ecuación de la siguiente manera:

$$A = \frac{\text{Log} \cdot \text{pen} \cdot a \cdot T1 - \text{Log} \cdot \text{pen} \cdot a \cdot T2}{T1 - T2} \quad (\text{ii})$$

Para los asfaltos normales el valor de A puede moverse entre un amplio espectro de valores, por tal motivo Pfeiffer y Van Doormaal prefirieron desarrollar una expresión más fácil de usar. Esta expresión es la siguiente:

$$\frac{1}{50} * \frac{20 - IP}{10 + IP} = A \quad (\text{iii})$$

Que puede adoptar la forma:

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (\text{iv})$$

De (iii) es posible observar que si IP es igual a +20, entonces la susceptibilidad térmica es independiente de la temperatura. Por el contrario, si IP es igual a -10, entonces la susceptibilidad térmica es infinita. Para asfaltos reales y normales (sin modificación) los valores de IP se sitúan en el rango -3 (altamente susceptibles con la temperatura) y aproximadamente +7 (los menos susceptibles de todos) (ref. 4). Los mismos investigadores encontraron que realizando el ensayo de penetración con una masa de 100 [g], durante 5 [segundos] a una temperatura igual al valor de la temperatura del punto de ablandamiento (ASTM D36/D36M), la penetración medida era de 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s], esto se cumplió para todos los asfaltos que ellos ensayaron. Reemplazando T2 en la ecuación (ii) por la temperatura del punto de ablandamiento y la penetración a T2 por 800 se obtiene la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\text{Log} \cdot \text{pen} \cdot a \cdot T1 - \text{Log} \cdot 800}{T1 - T_{p.a.}} \quad (\text{v})$$

Esta expresión es probablemente la más usada para determinar la susceptibilidad térmica de asfaltos en Sudamérica y también está incluida en la zona central superior del nomograma de Heukelom. Una prueba de ello es que el valor de penetración de 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s] está prefijado. Luego de este análisis es válido preguntarse si efectivamente el valor de penetración a la temperatura del punto de ablandamiento es efectivamente 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s].

4.2 Valor de la Penetración a la Temperatura del punto de Ablandamiento

Para confirmar si el valor de penetración medido a la temperatura del punto de ablandamiento es 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s] se midieron penetraciones a distintas temperaturas a diferentes asfaltos comercializados en el mercado chileno. De estas muestras se seleccionó una a la que se llamará asfalto K (ver tabla N°7), estos resultados se llevaron a un gráfico Log penetración v/s temperatura. La recta obtenida fue extrapolada hasta interceptar con el valor de la temperatura del punto de ablandamiento,

de esta manera se encontró el valor de penetración a esa temperatura (ver gráfico N°1). Los resultados obtenidos revelaron que para los asfaltos ensayados (comercializados para el área vial), ninguna de las muestras testeadas tenía un valor de penetración de 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s] (IP teórico) al valor de la temperatura de ablandamiento. El ligante estudiado (asfalto K) tiene una temperatura de punto de ablandamiento de 50 [°C]. De acuerdo a los resultados obtenidos el valor real de penetración de este bitumen a esa temperatura es de 2300 [0,1 mm, 100 g, 5 s], es decir, 2,9 veces el valor teóricamente esperado.

Tabla N°7 Ensayos de penetración a distintas temperaturas.

Temperatura (°C)	Pen. (0,1 mm, 100g, 5s)	Log Pen. (0,1 mm, 100g, 5s)
15,5	13,5	1,130
16,8	16,8	1,225
18,1	20	1,301
23	50	1,699
23,8	52	1,716
24,9	65	1,813
26,3	74	1,869
31,5	169	2,228
32,6	172	2,236
35,5	232,5	2,366

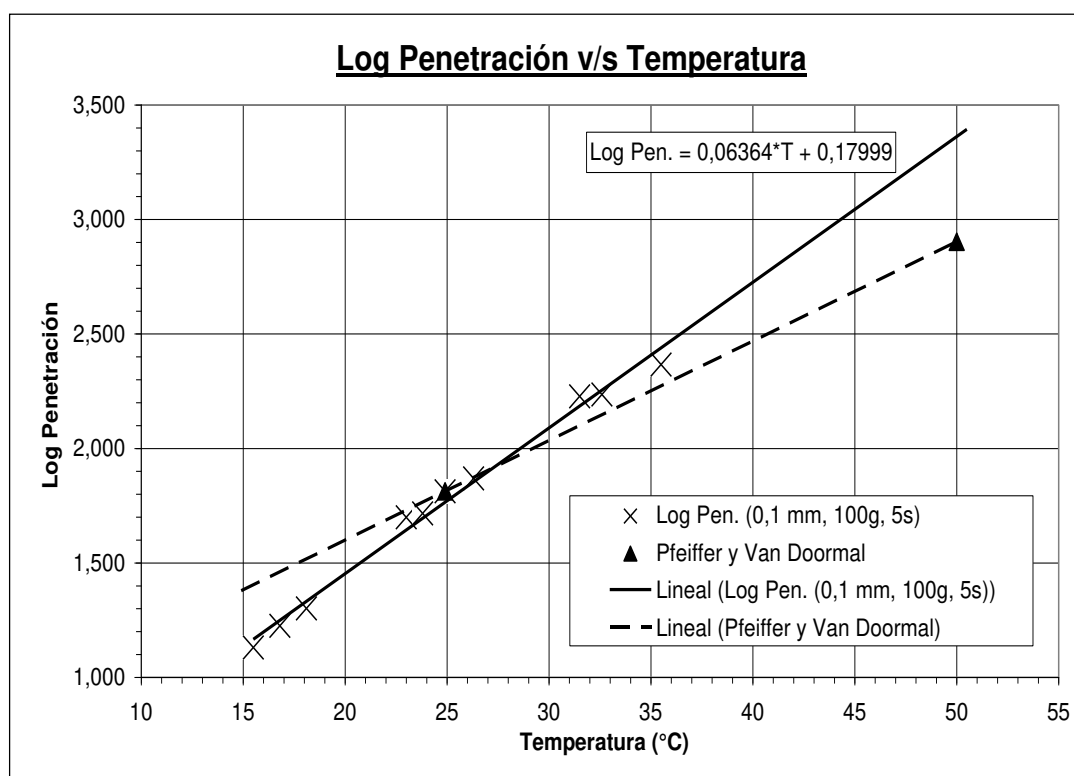


Gráfico N°1 Pendiente real v/s pendiente teórica.

En resumen, la muestra analizada (asfalto K), tiene una temperatura de punto de ablandamiento de 50 °C. A esta temperatura la penetración teórica esperada es de 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s], pero la penetración real de este ligante determinada por extrapolación es 2300 [0,1 mm, 100 g, 5 s]. Resultados similares fueron encontrados por J. Huet en el año 1958 (ref. 4).

5.0 Construyendo Especificaciones Basadas en la Consistencia

Uno de los principales problemas que se enfrenta al especificar un asfalto normal desde el punto de vista de la consistencia es lograr que esta sea adecuada a altas y bajas temperaturas. La figura N°2 muestra que el comportamiento de un asfalto real (tipo S) será definido por una línea recta con una cierta pendiente (susceptibilidad térmica), luego un elemento básico para caracterizar adecuadamente un ligante es considerar que se debe usar al menos dos puntos para definir su consistencia (por ejemplo, A y B en la figura N°2). El uso de la ecuación original de Pfeiffer y Van Doormaal, equivale a identificar el asfalto por sólo un punto ya que el otro punto está predefinido por la temperatura del punto de ablandamiento y su respectiva penetración que está fija en 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s]. Para solucionar este problema es necesario determinar el IP real del bitumen. Varias alternativas pueden ser consideradas entre las cuales podemos destacar:

- Definir la pendiente A en la ecuación (v) por dos penetraciones en lugar de usar una penetración y el punto de ablandamiento.
- Otra alternativa es utilizar la penetración a 25 [°C] y la viscosidad a 60 [°C].

Una consecuencia importante del uso del IP real es que, dependiendo de la susceptibilidad térmica del asfalto seleccionado, un asfalto con penetración 80 [25°C, 0,1 mm, 100 g, 5 s] podría tener un desempeño superior al de un ligante 62 [25°C, 0,1 mm, 100 g, 5 s] a temperaturas consideradas altas (50 [°C] en el pavimento).

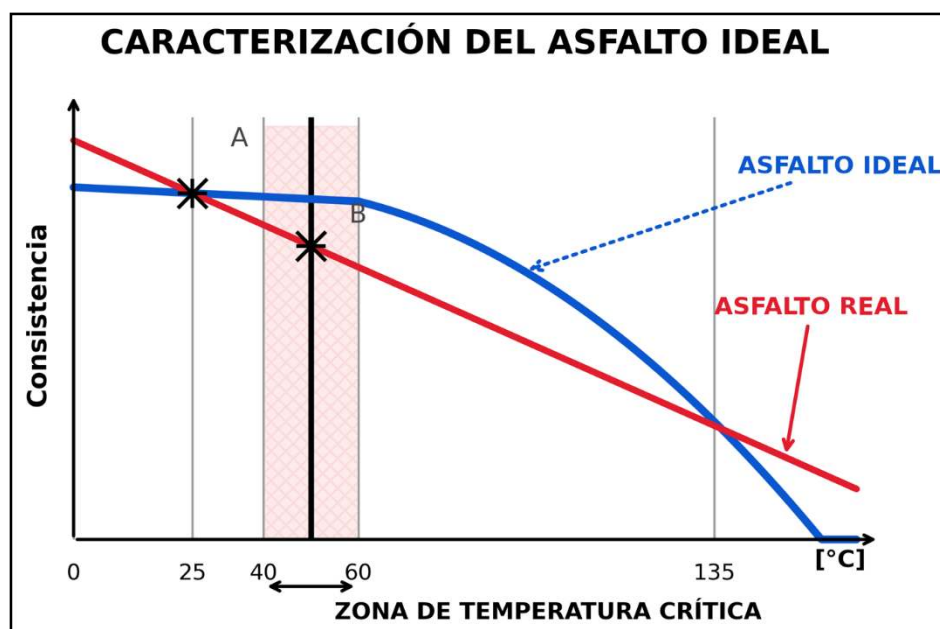


Figura N°2 Caracterización del asfalto ideal.

Para aclarar esta idea se usará un ejemplo:

Supongamos dos asfaltos tipo S con las siguientes características:

- Asfalto Y de penetración 62 [25°C, 0,1 mm, 100 g, 5 s], IP= -0,9.
- Asfalto Z de penetración 80 [25°C, 0,1 mm, 100 g, 5 s], IP= +0,12.

A una temperatura de 50 [°C] el asfalto Y tendrá una penetración de 880 [0,1 mm, 100 g, 5 s] mientras que el asfalto Z tendrá una penetración de 770 [0,1 mm, 100 g, 5 s].

Se considera que el uso del IP real para caracterizar ligantes admite seleccionar asfaltos de manera más rigurosa, permitiendo incluso usar asfaltos que tradicionalmente son considerados blandos, como, por ejemplo, asfaltos 80-100 [25°C, 0,1 mm, 100 g, 5 s] para ser utilizados en condiciones de temperatura crítica (ver figura N°2).

Complemento 2026: Relación con especificaciones por desempeño (PG) y alcance del IP

Aun cuando este manuscrito se apoya en ensayos empíricos (penetración, punto de ablandamiento y viscosidad), hoy la especificación por desempeño para ligantes asfálticos se basa en el sistema PG y en métodos reológicos desarrollados a partir de SHRP, incluyendo ensayos como DSR y BBR (por ejemplo, AASHTO M 320; Warren et al., 1994).

En ese marco, el IP puede interpretarse como un descriptor complementario (comparabilidad histórica, control de producción, aproximaciones rápidas), pero no reemplaza la verificación reológica cuando el objetivo es predecir rutting, fatiga o fisuración térmica. Por lo anterior, se recomienda reportar explícitamente si el IP fue calculado con la simplificación $Pen=800$ o con determinación experimental, tal como se discute en este trabajo.

6.0 Conclusiones.

- 6.1** La caracterización tradicional de ligantes basadas en el IP teórico no puede ser considerada general.
- 6.2** La utilización del IP real para caracterizar ligantes es preferible al uso del IP tradicional definido por la penetración a 25 [°C] y la temperatura del punto de ablandamiento.
- 6.3** La determinación del IP real puede realizarse de muchas maneras, entre las cuales está utilizar dos penetraciones para definir la pendiente de la recta.
- 6.4** El uso del nomograma de Heukelom para determinar el IP mediante el procedimiento tradicional significa aceptar que a la temperatura del punto de ablandamiento la penetración del ligante tiene un valor fijo de 800 [0,1 mm, 100 g, 5 s].
- 6.5** El uso del IP real para caracterizar ligantes permite utilizar asfaltos que tradicionalmente son considerados blandos a 25 [°C] en condiciones de temperatura alta de pavimento (50 – 60 [°C]).

Referencias

1. Manual de Carreteras de Chile Volumen N°5 (2003) "Especificaciones Técnicas Generales de Construcción".
2. Manual de Carreteras de Chile Complemento 1 Volumen N°8 (2005) "Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control".
3. W. Heukelom (1973), "An Improved Method of Characterizing Asphaltic Bitumens with the Aid of Their Mechanical Properties", Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologist, vol 42, pp 67-99.
4. J. Huet (1958), "Etude de la Susceptibilité Thermique de la Viscosité des Bitumes" Rapport de Recherche n°50, Centre de Recherches Routieres, Bruxelles.
5. Pfeiffer, J. Ph. y Van Doormaal, P. M. (1936). "The Rheological Properties of Asphaltic Bitumen". Journal of the Institute of Petroleum Technologists, Vol. 22.
6. McLeod, N. W. (1968). "Reduction in Transverse Pavement Cracking by Use of Softer Asphalt Cements". Highway Research Board Summer Meeting, Denver, Colorado, 12-13 August 1968 (Canadian Technical Asphalt Association, 1968).
7. AASHTO (2015). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. AASHTO M 320-10 (2015).
8. Warren, R. S.; McGennis, R. B.; Bahia, H. U. (1994). Superpave Asphalt Binder Test Methods: An Illustrated Overview. Report FHWA-SA-94-068. Federal Highway Administration (National Asphalt Training Center).
9. ASTM International. ASTM D5/D5M, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.
10. ASTM International. ASTM D36/D36M, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).