

CORRECCIÓN POR TEMPERATURA DE LAS DEFLEXIONES LACROIX

Autores: Oscar Hugo Giovanon*, Marta Beatriz Pagola** y José Tamara Naranjo***

Laboratorio Vial IMAE
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Berutti y Riobamba, 2000 Rosario, Argentina
0341 4808538 interno 136
* ogiovanon@gmail.com
** pagola@fceia.unr.edu.ar
***ing_tamara@hotmail.com

RESUMEN

A diferencia de lo aplicado en las mediciones de deflexiones realizadas con regla Benkelman o Equipos por Impacto, no se aplica en Argentina factores de corrección para los valores obtenidos con los equipos tipo Lacroix.

Para realizar mediciones de deflexión está indicado que el entorno de temperaturas se encuentre entre + 5 °C y + 30 °C, tanto para mezclas asfálticas como para tratamientos. Esta temperatura indicada, es la temperatura medida en el agua colocada en un orificio realizado en el pavimento de 4 cm de profundidad.

Esa restricción en las temperaturas asociada a la inexistencia de factores de corrección por temperatura, limita la operatividad de los equipos a la situación climática, dificulta las determinaciones de sectores homogéneos y crea incertidumbres en el seguimiento del comportamiento de los tramos a nivel red.

En el presente trabajo se evalúan los efectos de la temperatura en las mediciones de los equipos Lacroix existentes en Argentina, tanto de origen inglés como en los de origen francés. Esta valoración se realiza sobre estructuras en servicio de diferentes características y mediante la simulación de las mediciones con el programa BakViDe.

Se proponen finalmente ecuaciones de corrección aplicables a diferentes tipos estructurales.

1. INTRODUCCIÓN

La medida de las deflexiones dentro del ámbito de las técnicas no destructivas de evaluación y rehabilitación de calzadas cobra gran importancia a partir de los años 50, donde las mediciones se basaron en el uso de la viga Benkelman y equipos estacionarios. El interés en torno al tema ha sido relevante, lo que claramente se ve reflejado en diferentes estudios y pruebas, dirigidas a la evolución ingenieril de los equipos y métodos de auscultación de estos, en los que se involucra y analiza todo el conjunto de factores que inciden en los resultados obtenidos. Se debe destacar la importancia que tuvo the Washo Road Test (1954), en el impulso de la auscultación de las carreteras, como mecanismo para prevenir el comportamiento de las estructuras y generar mecanismos de gestión.

Por su parte. Crespo y Ruiz (2001), en su publicación “Evaluación estructural de firmes de carreteras. El área del cuenco de deflexiones. El módulo de la explanada”, aseguran que la determinación del estado resistente estructural del firme de una carretera constituye una de las materias técnicas más interesantes y complejas de la ingeniería de carreteras. De igual manera definen que el firme es una estructura constituida por varias capas y materiales (multicapa) que al ser sometida a una determinada sollicitación, normalmente una carga ortogonal al firme que produce un estado de tensiones y deformaciones, se desplaza en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas (del orden de centésimas o milésimas de milímetro). Este desplazamiento vertical se conoce con el nombre de deflexión.

El IMAE (2006), en la XXXIV reunión del asfalto “La auscultación de pavimentos en la Argentina. Su evolución y estado actual”, en lo referente a la medición de deflexiones hace un recorrido desde los inicios en la Argentina, que fue casi simultáneo con la evolución mundial hacia los años 60, basándose en modelos de referentes internacionales como los de EE.UU y Canadá, pero que posteriormente esos métodos han sido adaptados y reglamentados de acuerdo a las características y necesidades de la red vial del país (normas VNE28-77 y VNE65-83) e incluso agregando algunos desarrollos propios como la regla Benkelman doble, diseñada para medir el cuenco de la deformada. En (2009) en la publicación “modelización estructural con deflectometría Lacroix”, se menciona que para lograr una adecuada representatividad en las deflexiones, se requiere realizar un gran número de mediciones a lo largo de la traza, en este sentido la medición deflectométrica consiste en un indicador global de la estructura adecuado para realizar un muestreo exhaustivo de la totalidad del tramo a estudiar.

Simonin et al (2015), Performance of Deflection Measurement Equipment and Data Interpretation in France, en el “International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering” en Alemania, definen que la deflexión representa el desplazamiento vertical del pavimento bajo una carga conocida y es uno de los principales parámetros utilizados para la evaluación estructural de pavimentos y el retro-cálculo de los módulos de las capas del firme.

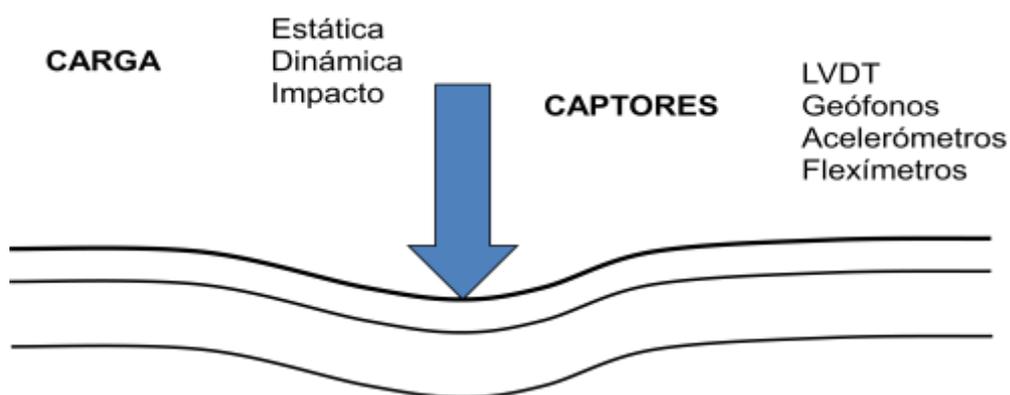


Figura 1. Esquema medición deflexiones

Para efectuar la medición de las deflexiones existen varios equipos que operan bajo diferentes principios pudiendo clasificarse en los siguientes grupos: de carga estática o cuasi estática, carga vibratoria sinusoidal, carga por impacto y por efecto Doppler.

- **De carga estática o cuasi estática.** miden la deflexión máxima bajo una carga estática o de movimiento muy lento y en este grupo se destacan: la regla Benkelman, el deflectógrafo Lacroix y el curviámetro.
- **De carga vibratoria sinusoidal.** Consiste en la aplicación de una precarga estática y una vibración sinusoidal al firme mediante el uso de una fuerza dinámica, con objeto de asegurar que no exista separación de la zona de contacto con el

pavimento. La fuerza variable entre máximo y mínimo no será superior al doble de la carga estática.

- **De carga por impacto.** un peso se levanta a una altura dada por encima del firme y se deja caer en un sistema de amortiguación. Este sistema, transfiere la carga al pavimento a lo largo de aproximadamente 30 microsegundos (dependiendo de las preferencias del fabricante y la configuración). El pulso de carga generado permite simular, con buena aproximación, el efecto dinámico del paso de un semieje. Se denominan genéricamente FWD por sus siglas en inglés Falling Weight Deflectometer.
- **Carga dinámica, sensores Doppler** fue desarrollado en Dinamarca y mide las deflexiones a una velocidad aproximada de 80 km/h, utilizando los principios del efecto Doppler para el cálculo de los desplazamientos. Consistente en el aumento o disminución de la longitud de onda recibida, dependiendo si el objeto de referencia, en este caso la superficie del pavimento se acerca o se aleja.

2. ANTECEDENTES DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS DEFLEXIONES

Cabe destacar la importancia que tiene la temperatura al momento medir las deflexiones sobre pavimentos flexibles, los cuales al tener en su composición materiales bituminosos, ven influenciadas en buena manera sus características elásticas ante los cambios térmicos, lo que conlleva a la pérdida o aumento de su rigidez en relación a la variación de la temperatura a lo largo del año y durante el día. La relación rigidez-temperatura en los pavimentos flexibles es inversa dado que a mayor temperatura menor rigidez y viceversa. Numerosos estudios y métodos empíricos y/o teóricos, han sido desarrollados en todo el mundo con la intención de determinar los parámetros de corrección de las deflexiones por temperatura. A continuación se muestran algunos de estos análisis y sus resultados.

- En el TRRL laboratory report 935 “Measurement of pavement deflections in tropical and sub-tropical climates” elaborado por Smithand y Jones (1980) se hace referencia a las técnicas adoptadas por el laboratorio para realizar la auscultación deflectométrica con regla Benkelman en países que presentan condiciones tropicales, basándose en mediciones de la temperatura y la deflexión en determinados puntos, durante el transcurso del día. La temperatura fue tomada a 4 cm, 7 cm y 11 cm dependiendo el espesor de la capa que se analizaba. Adoptaron la temperatura estándar para la corrección de deflexiones medidas en condiciones del clima ya referenciado, en 35 °C medidos a 4 cm de la superficie del pavimento.

En cuanto a los factores derivados del ambiente en los países tropicales, el estudio menciona los factores que son determinantes ante la variación de las medidas de deflexión sobre las capas bituminosas son: el cambio de la radiación solar sobre la regla Benkelman, la lluvia y los efectos por temperatura. Destaca que durante el año se presentan muchos días en los que las temperaturas de carretera aumentan de forma continua durante la

mañana y la tarde, seguido de un período en que la temperatura de la superficie puede permanecer constante o comenzar a disminuir; en esta etapa el gradiente de temperatura en el pavimento es significativamente diferente de cuando la temperatura de todo el pavimento aumenta, lo que define cuatro etapas en cuanto a la relación deflecto-temperatura. La primera etapa está relacionada con las primeras horas de la mañana, donde el pavimento presenta las menores temperaturas y por lo tanto tiene mayor rigidez, por lo que las deflexiones medidas serán menores. La segunda fase ocurre cuando la temperatura del pavimento empieza a subir y de esta manera se puede obtener una relación directa de la temperatura y la deflexión medida. En cuanto a la tercera fase, hacen alusión al material bituminoso y la posibilidad de deformación plástica del mismo en el centro de las ruedas duales, relacionado a un mayor aumento de la temperatura en las capas asfálticas, evitando la toma de datos coherentes. En la última etapa, la deflexión puede seguir aumentando sin incremento de la temperatura de la superficie, debido a que la masa de material asfáltico continúa con temperaturas altas.

El estudio determina que no se puede establecer una guía general sobre la magnitud de la corrección de la deflexión para pavimentos en climas tropicales y subtropicales, ya que la misma depende, en gran manera, de las características de las capas asfálticas que componen el camino. Además destacan la baja influencia que tiene la temperatura cuando las capas asfálticas son delgadas.

- La “Guide for design of pavement structures” (1993) de la AASHTO, describe el método de corrección por temperatura de deflexiones medidas con FWD, determinando el factor de corrección que debe ser aplicado a la deflexión medida en campo, a un entorno de temperaturas entre 30 °F y 120 °F (0 °C y 50 °C), basándose en los siguientes parámetros.
 - La temperatura de referencia se establece en 68 °F (20 °C).
 - La medición de la temperatura se puede hacer midiendo directamente la temperatura interna del pavimento, o estimándola a partir de la temperatura superficial del mismo y de la temperatura ambiente.
 - Los factores de ajuste de las deflexiones están en función de la temperatura, la composición del firme y el espesor total de las capas asfálticas. Se elaboraron dos gráficas, uno para pavimentos flexibles con base granular y otro para pavimentos semirígidos con base tratada con cemento (ver Figuras 2 y 3).

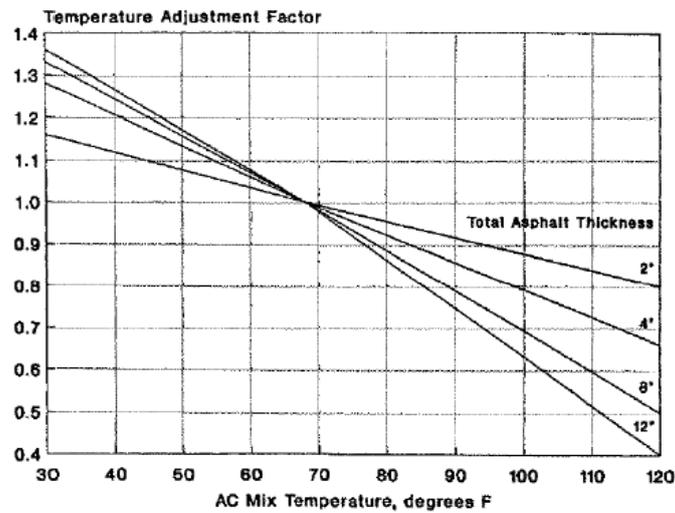


Figura 2. Coeficiente de ajuste por temperatura. Pavimentos flexibles con base granular
(Fuente: *Guide for design of pavement structures AASHTO, 1993*)

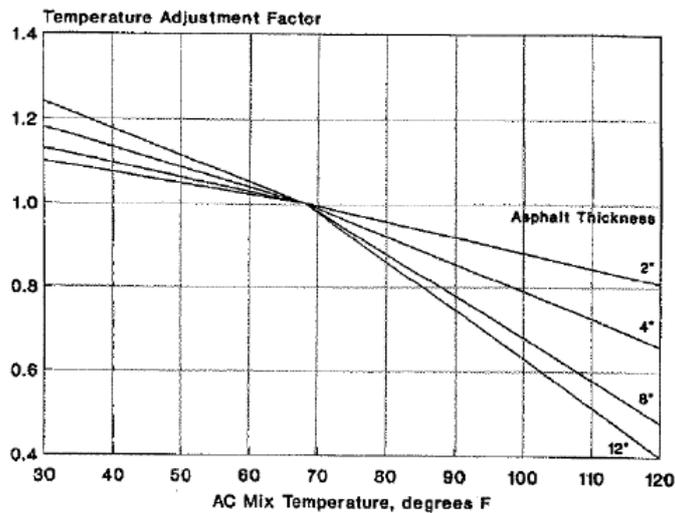
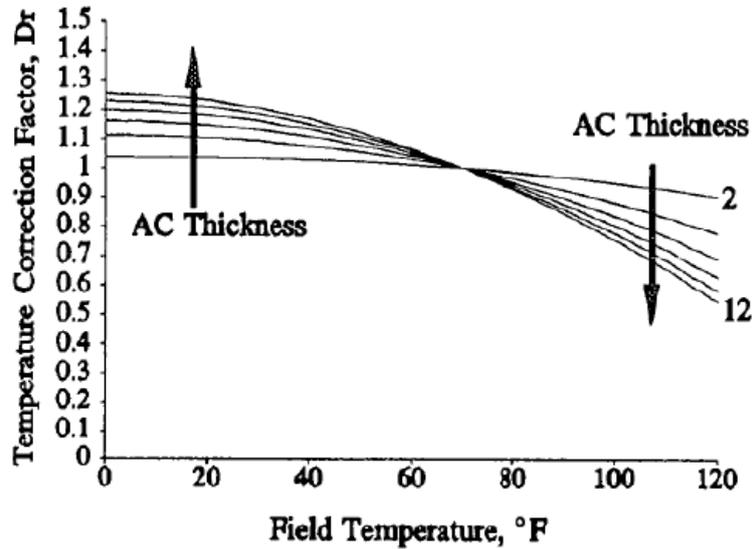


Figura 3. Coeficiente de ajuste por temperatura. Pavimentos semirrígidos con base tratada con cemento
(Fuente: *Guide for design of pavement structures AASHTO, 1993*)

- En el documento SHRP-P-654 (1993), se indica el procedimiento para corregir la deflexión máxima por temperatura en mediciones con FWD. La temperatura adoptada para la corrección es la tomada como promedio en el medio espesor de la capa asfáltica.

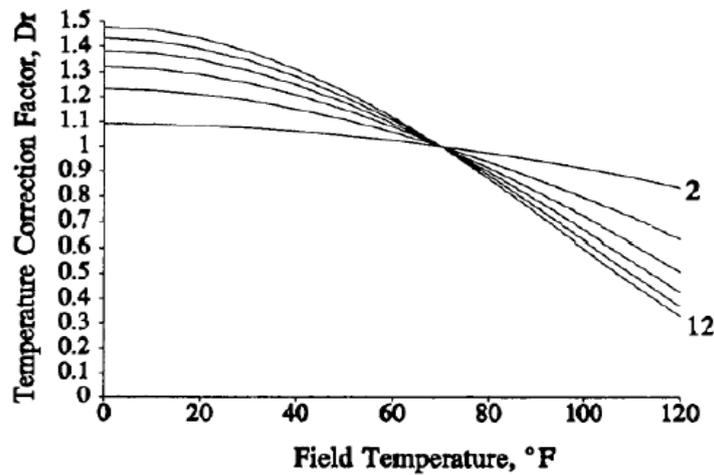
Basados en análisis de sensibilidad se comparó la incidencia que tenían, el espesor de las capas asfálticas, los módulos de las capas inferiores y los coeficientes de Poisson sobre el coeficiente de corrección, determinando que el espesor de las capas bituminosas y el módulo de la subrasante influían de manera importante, mientras que los módulos de las capas granulares no tenían influencia considerable.

De acuerdo a la rigidez de la subrasante y las diferentes variables tenidas en cuenta por la ecuación utilizada para los análisis multicapa, este informe recoge los factores de corrección en la Figura 4 y Figura 5, para subrasantes débiles y fuertes respectivamente.



Flexible Pavements - Weak Subgrade

Figura 4. Coeficiente de corrección para firmes flexibles sobre subrasante de 70MPa
(Fuente: "procedure for temperature correction of maximum deflections" Report SHRP-P-654, 1993)



Flexible Pavements - Strong Subgrade

Figura 5. Coeficiente de corrección para firmes flexibles sobre subrasante de 140MPa
(Fuente: "procedure for temperature correction of maximum deflections" Report SHRP-P-654, 1993)

- En el report FHWA-RD-98-085 "Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement" (2000), se utilizaron datos de las deflexiones medidas con el FWD y las correspondientes temperaturas medidas en el marco del programa seasonal monitoring program SMP, desarrollado por la FHWA dentro del Long Term Pavement Performance LTPP, para monitorear la influencia de las condiciones climatológicas en los firmes.

Se trabajó con el modelo de predicción de temperatura BELLS, presentado por Baltzer et al, en “the Fourth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields” (1994) y utilizó variaciones del mismo para desarrollar modelos de regresión empíricos para predecir la temperatura interna del pavimento, utilizando la temperatura de superficie medida con infrarrojo, la hora del día cuando la auscultación fue hecha y la temperatura media del aire del día anterior.

En cuanto a la corrección por temperatura de las deflexiones, concluyeron que no se puede obtener una correlación igual con respecto a la influencia de la temperatura en las deflexiones para todos los pavimentos, ya que esto depende esencialmente, del espesor y la rigidez de las mezclas bituminosas y en menor medida de las capas inferiores de la estructura.

Basados en lo anterior plantea un factor de ajuste por temperatura que depende de la aplicación de un parámetro relacionado a la forma del cuenco de la deformación, determinado con la temperatura de ensayo, la temperatura de referencia (20 °C) y de la deflexión registrada a 36” (915mm) del punto de aplicación de la carga. Este factor de ajuste considera parámetros correspondientes a la ubicación geográfica del sitio de medición.

En la Figura 6 se muestra como ejemplo, el factor de corrección por temperatura utilizando las ecuaciones desarrolladas para diferentes espesores de mezclas bituminosas, para una deflexión medida a 36” (915mm) de 100 µm y una latitud 40°.

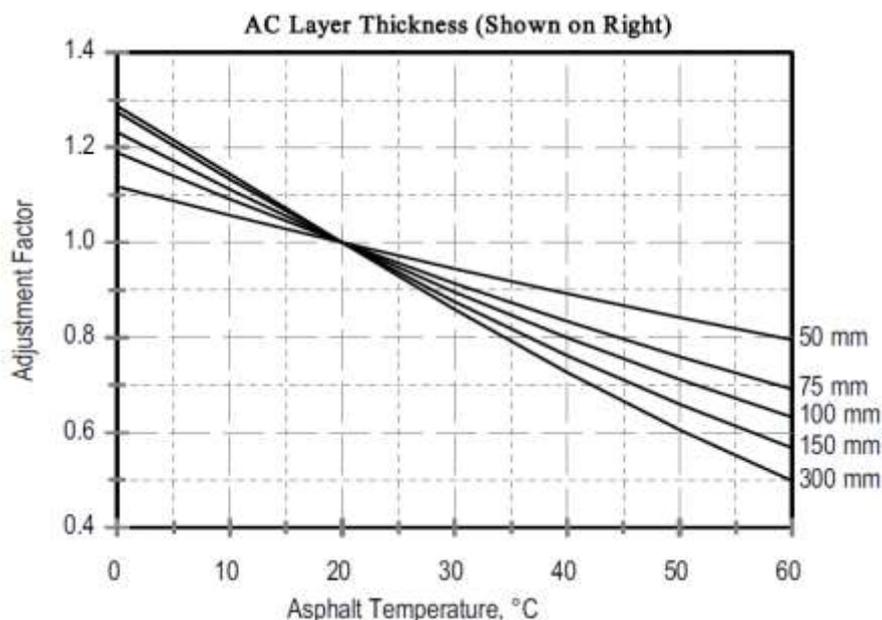


Figura 6. Factor de ajuste por temperatura FWD para defl36 = 100 µm y latitud 40°
(Fuente: Lukane et al, 2000)

- La Norma española 6.3 – IC Rehabilitación de firmes, anexo 3 “Guía para el estudio de las deflexiones en pavimento bituminosos” (Ministerio de Fomento 2003), determina la necesidad de equiparar las deflexiones medidas con diferentes equipos, a una deflexión

patrón determinada por la regla Benkelman, corrección que se establece a partir de estudios comparativos.

Dicho anexo, recomienda realizar las mediciones en la temporada de máxima humedad, ya que es la época donde el firme se encuentra más débil estructuralmente, de no ser posible cumplir con esto, las auscultaciones deflectométricas deberán ser afectadas por un factor de corrección que se determina en función del tipo de explanada con las condiciones de drenaje y el periodo de humedad.

En lo correspondiente a la temperatura, indica que no se aplica corrección si las mezclas bituminosas evaluadas se encuentran a temperatura igual a 20 °C, por ser esta la temperatura patrón de referencia. De igual manera plantea que no se debe aplicar el coeficiente de corrección por temperatura C_t , si las capas ligadas no superan los 10 cm.

La norma NTL 356 (CEDEX 1988), detalla el procedimiento para implementar el C_t , cuya aplicación depende del estado de fisuración del pavimento, siendo que en una capa fisurada el efecto de la temperatura en las deflexiones es menor, y en el caso de que esta estuviese totalmente fisurada es nulo.

La Figura 7, muestra gráficamente la aplicación del coeficiente C_t está determinado en función de la temperatura del pavimento, por tres expresiones analíticas que el anexo 3 establece en la Tabla 1.

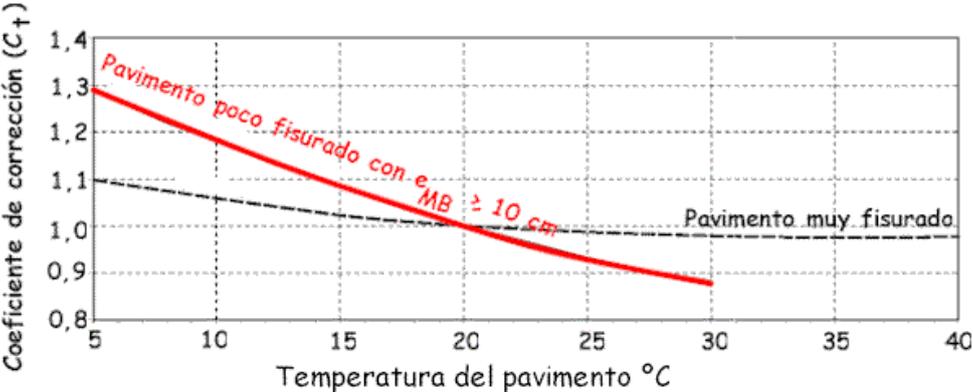


Figura 7. Coeficiente corrector por temperatura
(Fuente: anexo 3, norma 6.3-IC2003)

Pavimentos poco fisurada y espesor asfáltico ≥ 10 cm	Pavimentos muy fisurados	Pavimentos con espesor asfáltico < 10 cm, o totalmente fisurados
$C_t = 200 / (3 T + 140)$	$C_t = (2 T + 160) / (3 T + 140)$	$C_t = 1$

Tabla1. Coeficiente corrector de la temperatura C_t
(Fuente: anexo 3, norma 6.3-IC2003)

La norma establece el límite inferior de la temperatura a la que debe realizarse el ensayo, en 5 °C, esto para evitar hacerlo con una calzada helada que invalide las mediciones. En cuanto a las temperaturas máximas, las estipula de acuerdo al grosor de la capa bituminosa, en virtud de esto si el espesor es inferior a 10 cm, la temperatura no podrá exceder los 40 °C y si es mayor a 10 cm, el tope se fija en 30 °C.

- La Highways Agency de Inglaterra (2008), se refiere en su publicación DMRB Volume 7 Section 3 Part 2, en el capítulo 4, al ensayo de deflexiones y al uso del deflectógrafo Lacroix para tal fin. Con relación a la influencia de la temperatura en la toma de las mediciones define que la deflexión de pavimentos bituminosos varía con la temperatura y la susceptibilidad al cambio depende del espesor, la edad y el estado de las capas bituminosas.

Se definen cuatro categorías de relevamiento que determinan las condiciones necesarias para las auscultaciones deflectométricas según sea el objetivo de las mismas. Estas categorías están directamente relacionadas con los rangos establecidos para la temperatura de ensayo del pavimento. Las categorías indicadas son:

Categoría 1A: aplicables para definir detalles en el esquema de mantenimiento, identificar causas de daño o cambios en el uso de la vía por incrementos del tránsito. Esta categoría representa las mejores condiciones para las auscultaciones deflectométricas, brindando un mayor grado de confianza en los resultados. Se recomienda realizar las auscultaciones a los pavimentos dentro de esta categoría.

Categoría 1B: se debe utilizar cuando una auscultación que está dirigida a realizarse dentro de las condiciones de la categoría 1A, no puede llevarse a cabo por cambios inesperados en la temperatura. Comprende el mismo periodo de auscultación de la categoría 1A, pero extiende los límites superior e inferior de las temperaturas del pavimento permitidas, mediante la inclusión de la banda 2. Sólo se permite un 10% dentro del propósito de la categoría 1A.

Categoría 2: para estimación de las tareas de mantenimiento, permite la utilización de los dos rangos de temperatura e incluye la primera quincena de septiembre, excluida de la categoría 1 porque después de un verano cálido y seco, la resequedad de la sub-base puede dar lugar a medición de deflexiones que no reflejan el verdadero estado del pavimento.

Categoría 3: gestión a nivel red, comprende los ensayos realizados durante los meses de verano por lo que no es recomendable llevar a cabo auscultaciones durante este periodo.

La temperatura utilizada en el análisis se corresponde con la temperatura de los 4 cm superiores de las capas asfálticas; luego en función del espesor de capas asfálticas es que se definen las bandas o entornos de temperatura en que pueden ser efectuadas las mediciones para cumplir con los requisitos de cada categoría de relevamiento. Figura 8.

Según estas categorías de relevamiento y las temperaturas del pavimento asociadas, en la zona objeto del estudio las mediciones pueden realizarse en los siguientes meses del año indicados en la Figura 9. Las mediciones son válidas en los entornos sombreados para la categoría 1A, y en las siguientes categorías se amplía el período como se indica.

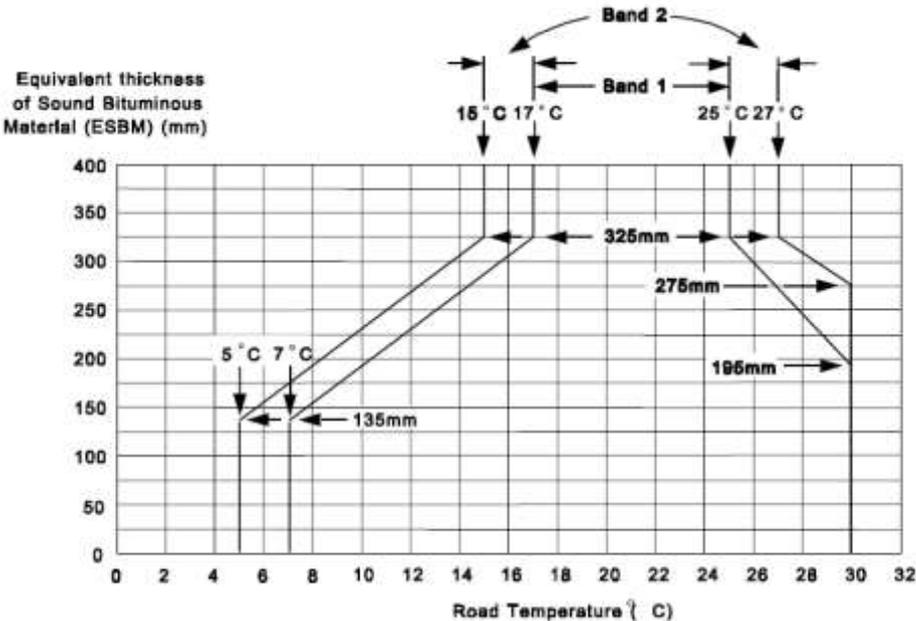


Figura 8. Límites de temperatura de ensayo en relación a las categorías
(Fuente: Highways Agency de Inglaterra, 1999)

MONTHS OF YEAR (Shaded area refers)												Range of Pavement Temperature	Survey Category	
J	F	M	A	M	J*	J	A	S*	O	N	D			
		■	■	■	■				■	■			Band 1	1A
		■	■	■	■				■	■			Band 2	1B
■						■			■			■	Bands 1 & 2	2
						■	■						Bands 1 & 2	3

* period ends 15 of month, starts 16 of month

Figura 9. Categorías de ensayo según los meses del año en Inglaterra
(Fuente: Highways Agency de Inglaterra, 1999)

Dicho documento establece además que a pesar de realizar mediciones dentro del período adecuado, las deflexiones se deben corregir a una temperatura estándar de 20 °C, sin indicar el procedimiento.

- Yousuf (2015) en su publicación "Strengthening of flexible pavement through benkelman beam deflection (BBD) technique", da a conocer un estudio realizado en la India con relación a la utilización de la viga Benkelman que en ese país rige bajo la "Tentative Guidelines of Flexible Road Pavements Using Benkelman Beam Deflection Technique" IRC: 81-1981, dicho estudio está enfocado en la evaluación y determinación del diseño de las mejoras a realizar en los pavimentos por el método BBD que se basa en dos parámetros: la

recolección de datos de campo incluyendo estudios de tránsito y en la corrección de los factores de humedad y temperatura.

En la parte del país que cuenta con clima tropical, se recomienda que la temperatura estándar ubicada en 35 °C, y la corrección por temperatura no aplica si la capa bituminosa es muy delgada. La corrección de la variación de la temperatura en los valores de deflexiones, que no fueron tomados a una temperatura del pavimento de 35 °C, debe ser de 0,01 mm por cada grado centígrado de diferencia con la temperatura estándar. En las zonas más frías de altitud mayor a 1000 msn, donde la temperatura media por día es inferior a 20 °C durante más de 4 meses al año, la corrección a 35 °C no se aplica. A falta de datos adecuados sobre la relación de deformación-rendimiento, recomiendan que las medidas de deflexión en estos sectores se hagan cuando la temperatura ambiente sea superior a 20 °C.

Se determina que la medida de la temperatura en el pavimento debe ser tomada a 4 cm de profundidad, en agujeros de diámetros no mayores a un cm, y la temperatura se mide pasados los 5 minutos.

- En estudios realizados en Francia por Simonin et al (2015), “Performance of Deflection Measurement Equipment and Data Interpretation in France”, que fue presentado en el International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) Berlin, Alemania, se realiza un análisis de sensibilidad, para evaluar la incidencia de la frecuencia de los equipos de medición y la temperatura sobre las deflexiones, y los métodos de corrección a tener en cuenta para estos parámetros.

Realizaron un análisis de resultados de diferentes equipos, el Lacroix, el curviámetro y el FWD, comparando las mediciones de cada aparato con una deflexión de referencia medida por un transductor del desplazamiento vertical anclado a una profundidad de 6 m. De ahí concluyeron que el equipo que más se asemeja a las deflexiones de referencia es el FWD. Se puede interpretar lo anterior, en el sentido de que el transductor mide el desplazamiento absoluto de la superficie, por ende las mediciones de las deflexiones con equipos diferentes al FWD, debido a sus características de operación, no representan esta condición y requieren un análisis más exhaustivo, para utilizar los datos de las deflexiones obtenidas en un retro ajuste modular.

Basados en la influencia que tiene la temperatura y la frecuencia sobre la respuesta mecánica del pavimento, realizan un análisis de sensibilidad de las capas bituminosas en relación a estos parámetros. De acuerdo a los resultados obtenidos recomiendan no realizar mediciones por encima de los 30 °C. Conjuntamente destacan la necesidad de realizar la corrección en las deflexiones obtenidas, para equipararlas a la temperatura y frecuencia de referencia aplicada usualmente en Francia, 15 °C y 10 Hz respectivamente. La ecuación de corrección utilizada es:

$$d_{15} = \frac{d_T}{1 + K \cdot \frac{T - 15}{15}}$$

Donde:

d_T Deflexión a temperatura T

d_{15} Deflexión a 15 °C

T Temperatura a media profundidad de las capas del pavimento

K Coeficiente que depende de la estructura del pavimento:

0.15 pavimento flexible con un espesor de mezcla asfáltica inferior a 15 cm

0.20 pavimento flexible con un espesor de mezcla asfáltica superior a 15 cm

0.08 pavimento con subbase tratada con material hidráulico y base bituminosa

0.04 pavimento semirígido donde solo la capa de rodamiento es asfáltica

En la Figura 10 se representan gráficamente los coeficientes de corrección por temperatura, de acuerdo a la ecuación propuesta.

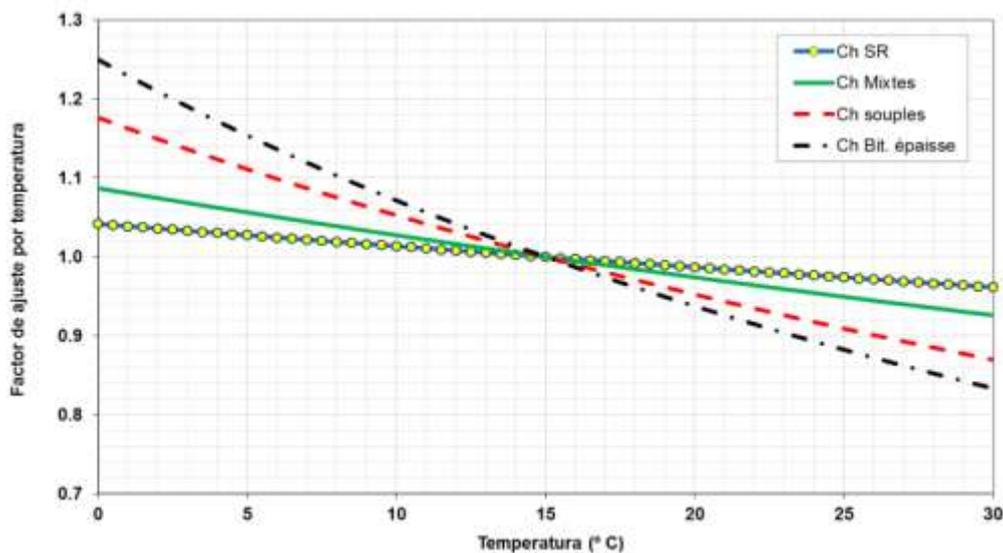


Figura 10. Coeficientes de ajuste por temperatura

3. FACTORES DE CORRECCIÓN UTILIZADOS EN ARGENTINA

En lo referente a la corrección por temperatura de las deflexiones en la Argentina, se adoptó como temperatura de referencia en 20 °C, normalizándose las mediciones efectuadas con regla Benkelman y con equipos tipo FWD, pero no las realizadas con los deflectógrafos Lacroix.

Para las auscultaciones realizadas con la regla Benkelman se establece un rango de medición entre 10 °C y 30 °C y un factor corrector de la deflexión, utilizando una expresión analítica que involucra la temperatura de ensayo y el espesor de las capas bituminosas. Dicha ecuación fue expuesta por Petroni et al. (1977), en el marco del VIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito.

$$D_c = \frac{D}{1 + \frac{(T - 20) H}{1000}}$$

Donde:

D_c deflexión a temperatura de referencia (mm/100)

- D deflexión medida a temperatura de ensayo (mm/100)
- T temperatura (°C)
- H espesor capas asfálticas (cm)

La representación gráfica de la ecuación se muestra en la Figura 11.

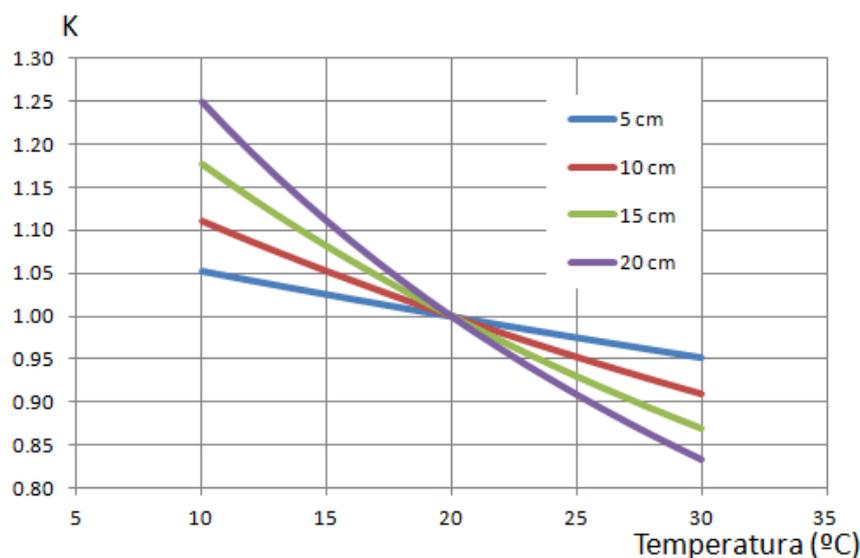


Figura 11. Factor de corrección regla Benkelman

Por su parte en la utilización del FWD, la corrección por temperatura de las deflexiones se ejecuta según lo establecido en la guía de diseño ASHHTO 93, en las Figuras 2 y 3 previamente expuestas en este documento, se expresan gráficamente los factores de corrección para base granular o cementada en función de la temperatura y el espesor asfáltico.

En referencias a las mediciones con los equipos Lacroix la Dirección Nacional de Vialidad plantea un entorno de la temperatura del pavimento evaluada con termómetro entre 5 °C y 30 °C. No existiendo un criterio adoptado para la normalización a 20 °C.

4. ANÁLISIS DEL POSIBLE PERÍODO DE MEDICIÓN

Para poner de manifiesto las limitaciones impuestas por el entorno de temperaturas admisible se utilizó un programa de simulación del clima Tempe, desarrollado en el Laboratorio Vial (1986), con el que se simuló un año con días típicos para dos ubicaciones geográficas, correspondientes a las localidades de Reconquista, Chaco, y Ushuaia, Tierra del Fuego.

Siguiendo los criterios de temperatura que permiten efectuar la medición, se indican en el eje “y” de las Figuras 12 y 13 las horas del día en las que sería apto realizar mediciones. Especialmente en la Figura 12 correspondiente a la zona de la ciudad de Reconquista puede observarse la poca disponibilidad horaria, reducida aún más si por seguridad se limitan las mediciones al horario diurno.

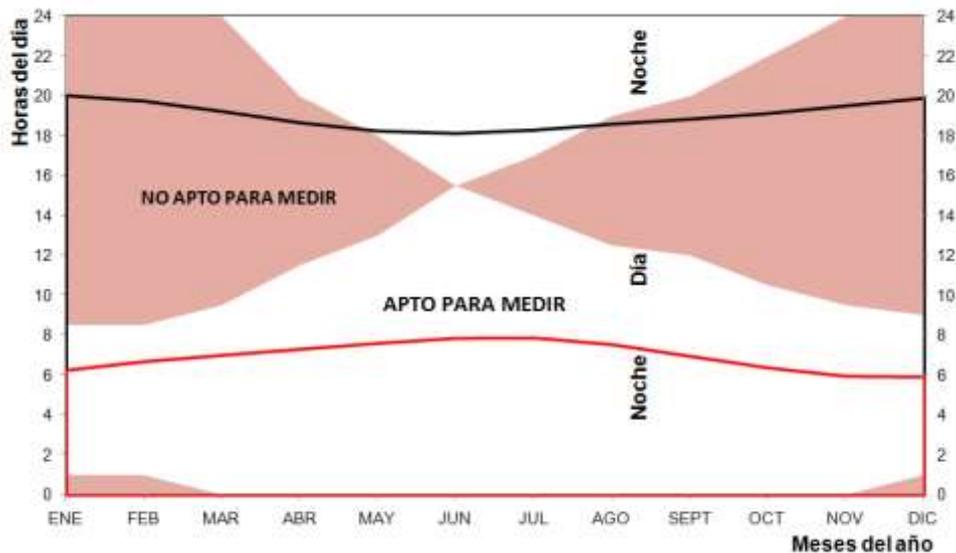


Figura 12. Horario apto para efectuar mediciones en las proximidades de Reconquista

Como era de esperar, en Reconquista la limitación se produce por un elevado valor térmico de la superficie, siendo sólo posible medir en cualquier horario dentro de un día típico del mes de junio. Es necesario acotar que dentro de nuestro país existen situaciones de temperaturas aún más extremas.

Estas circunstancias ponen énfasis en estudiar la posibilidad de extender el rango de temperaturas aptas para efectuar las mediciones, pero dadas las variaciones ocasionadas en los valores obtenidos, esto es sólo recomendable si se obtienen expresiones que permitan normalizar las mediciones obtenidas a la temperatura de referencia adoptada.

El mismo análisis se realizó para la ubicación de Ushuaia, donde puede verse que las limitaciones a la medición se dan por baja temperatura. Figura 13.

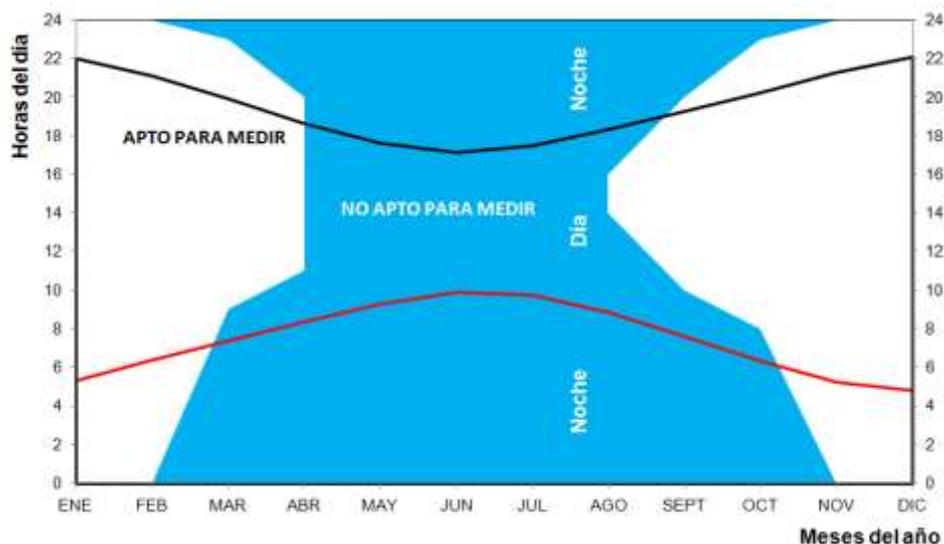


Figura 13. Horario apto para efectuar mediciones en las proximidades de Ushuaia

Con este fin es que se comenzó el análisis de diferentes experiencias que aportan información relevante a este estudio, cabe aquí expresar la predisposición e interés planteado por el personal de la Dirección Nacional de Vialidad en el tratado de esta problemática.

5. ALGUNAS EXPERIENCIAS PROPIAS

Mediciones en la RN n° 35, Provincia de La Pampa

En marzo de 2016, el 21° Distrito La Pampa realizó mediciones en un sector de la Ruta Nacional n° 35 con las dos versiones del equipo Lacroix existentes en Argentina el anterior modelo originario de la firma WDM y el más recientemente incorporado de origen francés de la firma Vectra.

Estos equipos presentan diferencias en los resultados obtenidos en un mismo momento y sector originadas en diferencias en su geometría que pueden ser evidenciadas en la Figura 14, que esquematiza la geometría de sus ejes y sistema de relevamiento. Estudios conjuntos con la DNV dieron origen a ecuaciones que permiten vincular las mediciones de ambos equipos.

El sector auscultado presenta un espesor de mezcla asfáltica de sólo 5 cm, efectuándose mediciones con valores de temperatura de la mezcla asfáltica entre 20 y 41 °C. Las deflexiones graficadas en la Figura 15 muestran la tendencia esperada, expresando mayores deflexiones a mayores temperaturas.

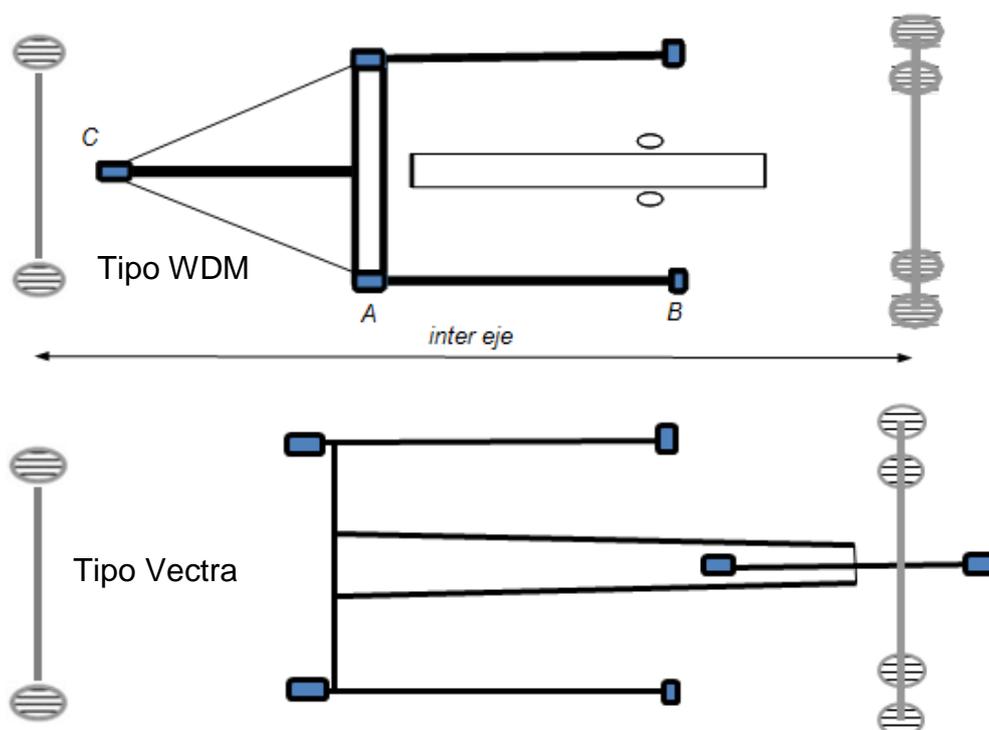


Figura 14. Esquema de los equipos Lacroix

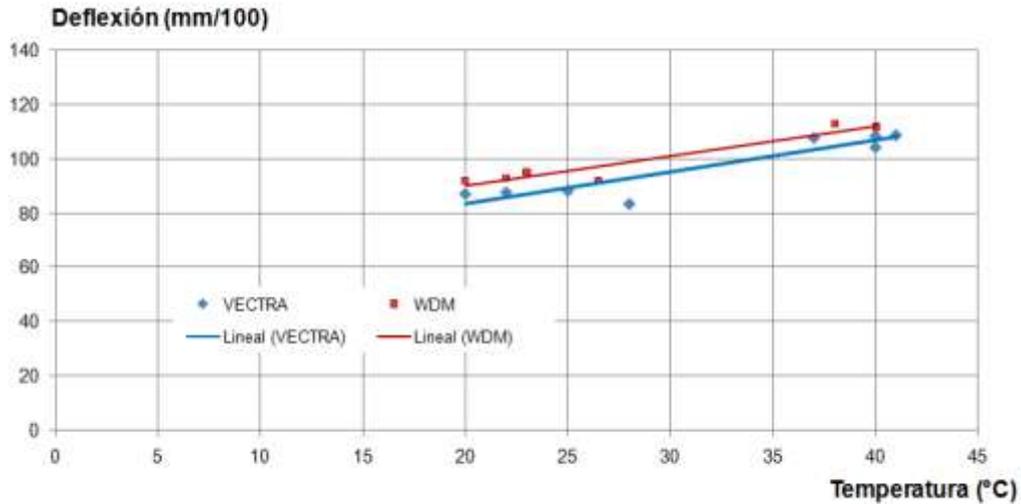


Figura 15. Mediciones a diferentes temperaturas de la mezcla, RN n° 35

El paralelismo que evidencian las tendencias de ambos tipos de equipos induce a que los factores de normalización por temperatura sean únicos, expresados independientemente del tipo de deflectógrafo Lacroix.

Utilizándose el programa de modelización BackViDe se retroajustó la estructura en base a las mediciones con el equipo WDM a 30 °C suponiendo una mezcla asfáltica convencional íntegra. Manteniendo el modelo obtenido se simularon las mediciones a las diferentes temperaturas y con ambos equipos, graficándose los resultados en la Figura 16 donde se observa una adecuada correspondencia general con una susceptibilidad a la temperatura algo menor.

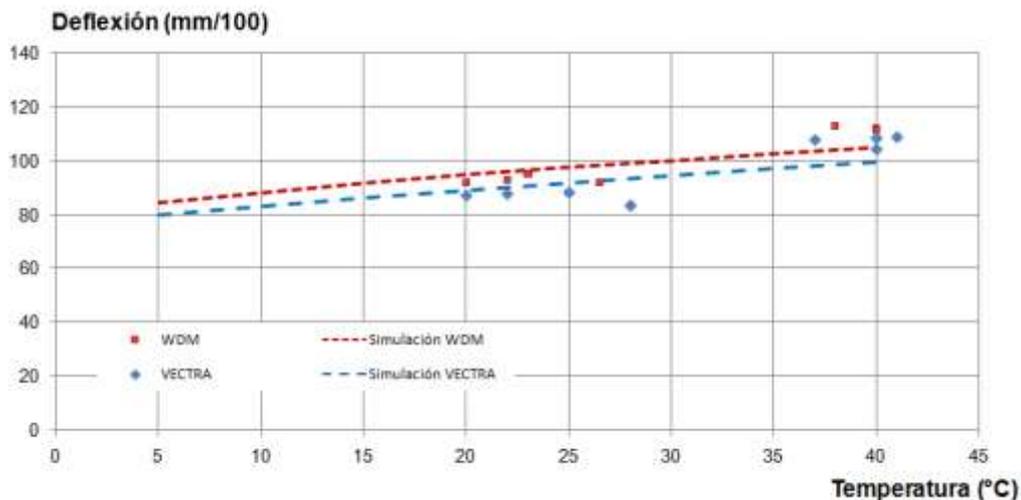


Figura 16. Mediciones y simulación a diferentes temperaturas, RN n° 35

Para valorar la magnitud relativa de los factores de corrección que resultarían de esta experiencia, se grafican en la Figura 17 conjuntamente con los planteados para las

mediciones Benkelman y FWD para los mismos 5 cm de mezcla, notándose una gran similitud entre ellos.

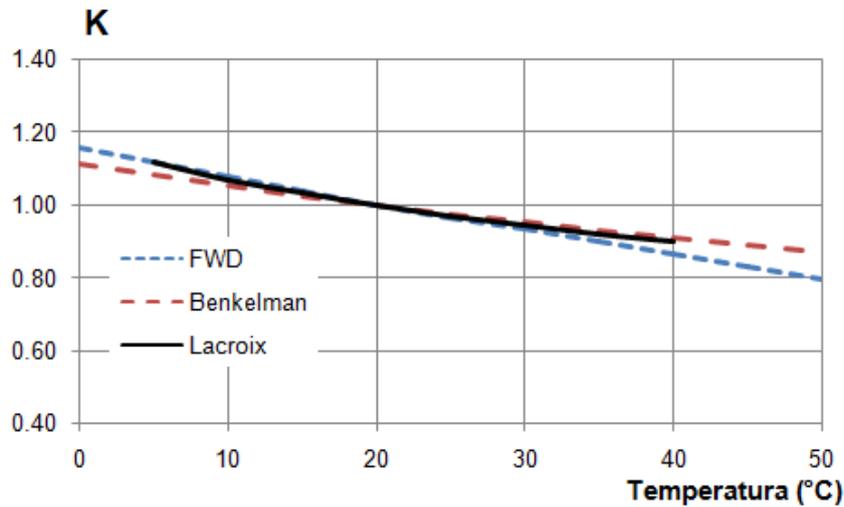


Figura 17. Comparación de los factores obtenidos con los adoptados en otras metodologías

Mediciones en la RN n° 12, tramo Zárate Brazo Largo

En oportunidad de realizar controles operativos sobre los equipos Lacroix en marzo de 2013 sobre un sector de la RN n° 12, pudo observarse un aumento sistemático de la deflexión a lo largo de las dos mañanas en que se realizaron los controles.

La Figura 18 muestra los valores de la temperatura de superficie evaluada por los cinco deflectógrafos tipo Vectra con sensor infrarrojo, diferenciando las mediciones de las dos mañanas, donde la recta de regresión de menores valores corresponde al segundo día de medición que presentó una nubosidad elevada.

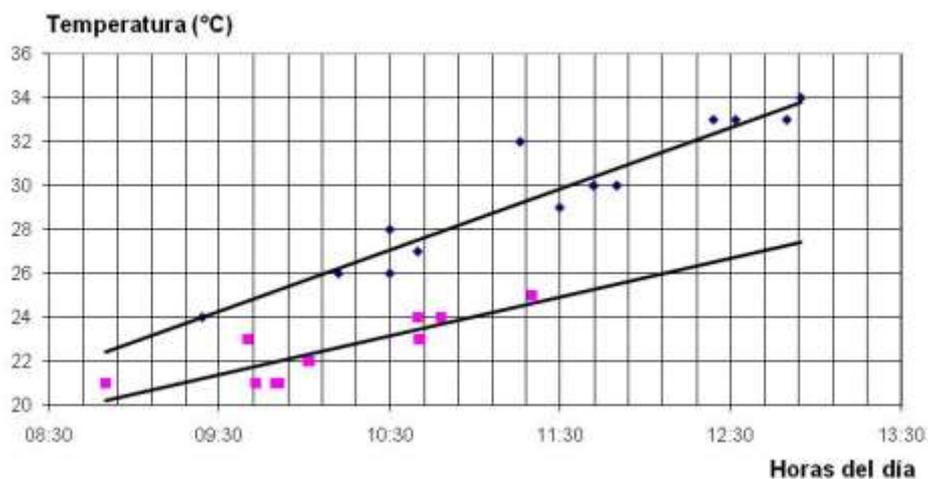


Figura 18. Aumento de la temperatura de superficie a lo largo de la mañana

Este sector posee una importante estructura, constatada oportunamente con georradar, presentando un espesor de 26 cm de mezcla asfáltica, hecho que motiva los reducidos valores de deflexión obtenidos.

El hecho de disponer de la temperatura de superficie y no de la temperatura media de la mezcla plantea discrepancias entre ambos días analizados en conjunto, hecho por el cual se continua el análisis con el primer día de medición, la Figura 19 muestra la tendencia de las mediciones respecto a la temperatura de superficie, valorada por el sensor infrarrojo de cada equipo.

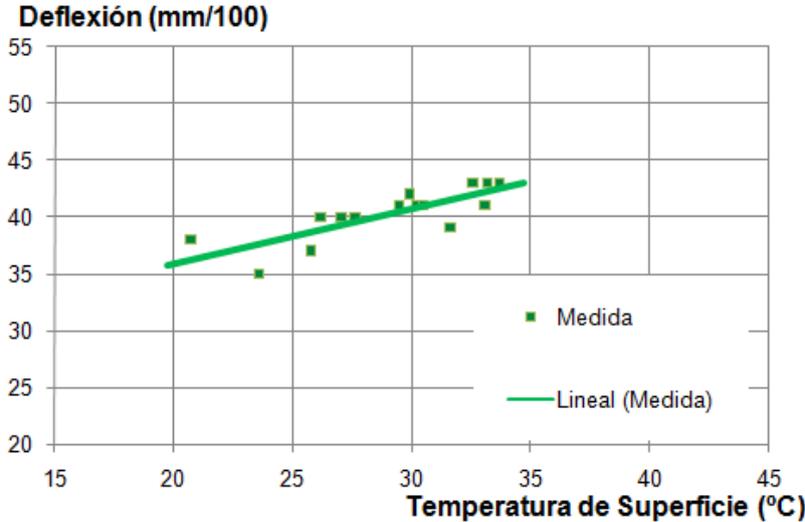


Figura 19. Tendencia de la deflexión en función de la temperatura de superficie

Para estimar la temperatura media de los 26 cm de capas asfálticas se utilizó el programa Tempe para simular el clima de la zona obteniéndose la relación con la temperatura de superficie, para un día de marzo típico, mostrada en la Figura 20.

Se pone de manifiesto la diferencia existente entre ambas temperaturas, en superficie se alcanzan 43 °C mientras que la mezcla logra un máximo inferior de 34 °C. Puede observarse también que varía a lo largo del día cual es el valor mayor lográndose por ejemplo 30 °C en la superficie en dos oportunidades, a las 10:50 hs con un valor medio inferior de 25 °C y también a las 19:40 hs con un valor medio algo superior de 31 °C.

Dado que se asigna la temperatura media de la mezcla al valor adecuado para definir el módulo de trabajo y poder simular los diferentes momentos, se procedió a modelizar la estructura para la condición media de los ensayos realizados, 28 °C de temperatura de superficie y 25 °C de media para la mezcla. Procediendo luego a simular las mediciones como si se hubieran efectuado a lo largo de todo el día.

La Figura 21 muestra comparativamente los valores medidos y simulados respecto a la temperatura de superficie, donde se aprecia una muy buena congruencia entre ambos, puede también notarse la discrepancia que se produce por la tarde si se mantiene la

temperatura de superficie como el único indicador de la variación de la deflexión sin considerar el clima conjuntamente con el espesor asfáltico.

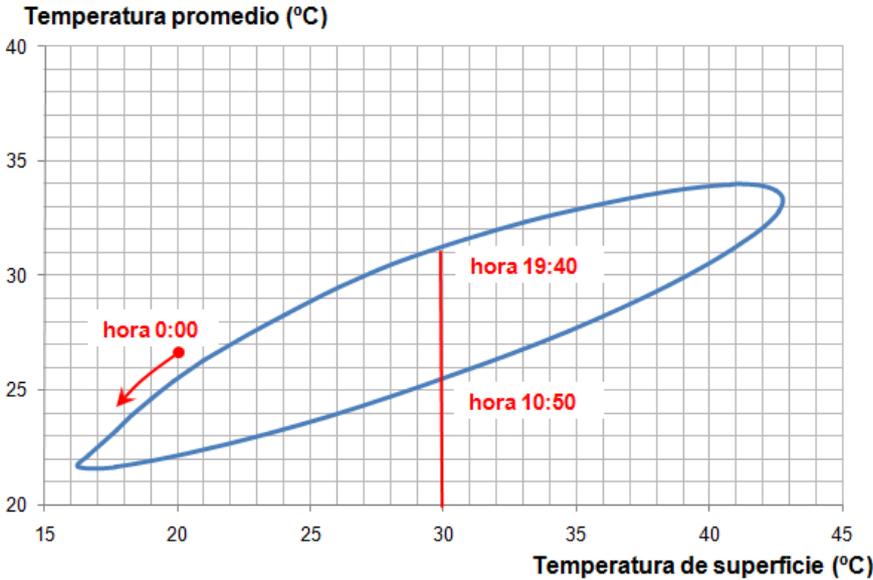


Figura 20. Relación entre temperatura de superficie y media de la mezcla para el día de evaluación

Como en la experiencia anterior y para valorar la magnitud relativa de los factores de corrección que resultarían de esta experiencia, se grafican en la Figura 22 conjuntamente con los planteados para las mediciones Benkelman y FWD para los mismos 26 cm de mezcla, notándose en este caso una mayor susceptibilidad del equipo Lacroix respecto a la temperatura.

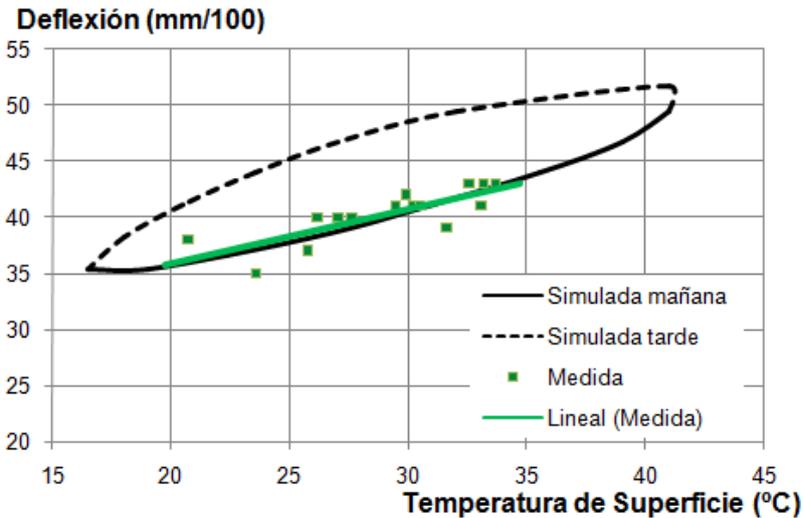


Figura 21. Deflexiones Lacroix medidas y simuladas

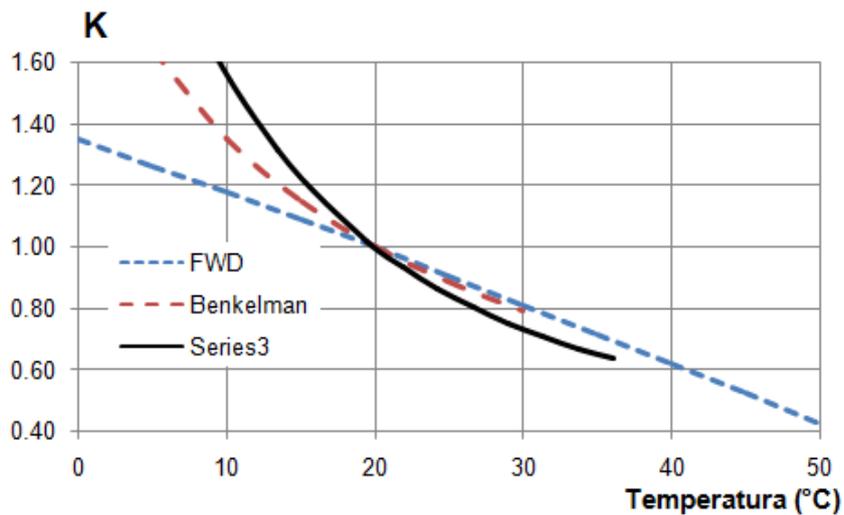


Figura 22. Comparación de los factores obtenidos con los adoptados en otras metodologías

Para que el eje temperatura fuera comparable con la operatoria utilizada para valorar la temperatura, consistente en la medición con termómetro sobre un hueco de aproximadamente 4 cm, se planteó una correlación entre esta temperaturas y la de la media de la mezcla y así poder ajustar las coordenadas del gráfico.

6. PRIMERA APROXIMACIÓN A LA NORMALIZACIÓN

Sin pretender establecer como definitivos los valores obtenidos y sólo con el objetivo de visualizar las tendencias encontradas en este estudio, que por el momento se consideran parciales.

Se plantea la simulación de diferentes espesores de mezcla asfáltica sobre capas granulares y una subrasante caracterizada por su ecuación constitutiva que podría caracterizarse por un valor soporte relativo de 5%. Siguiendo la metodología planteada en el último caso mostrado se obtiene la gráfica de la Figura 23 donde se grafica el coeficiente de normalización a 20 °C para espesores de la mezcla asfáltica de 5, 10, 15, 20 y 25 centímetros en función de la temperatura de los 5 cm superiores.

Es necesario recalcar que en estructuras con subrasantes de mayor rigidez y/o bases cementadas y/o mezclas asfálticas modificadas y/o deterioradas, se obtendrían menores susceptibilidades con la temperatura.

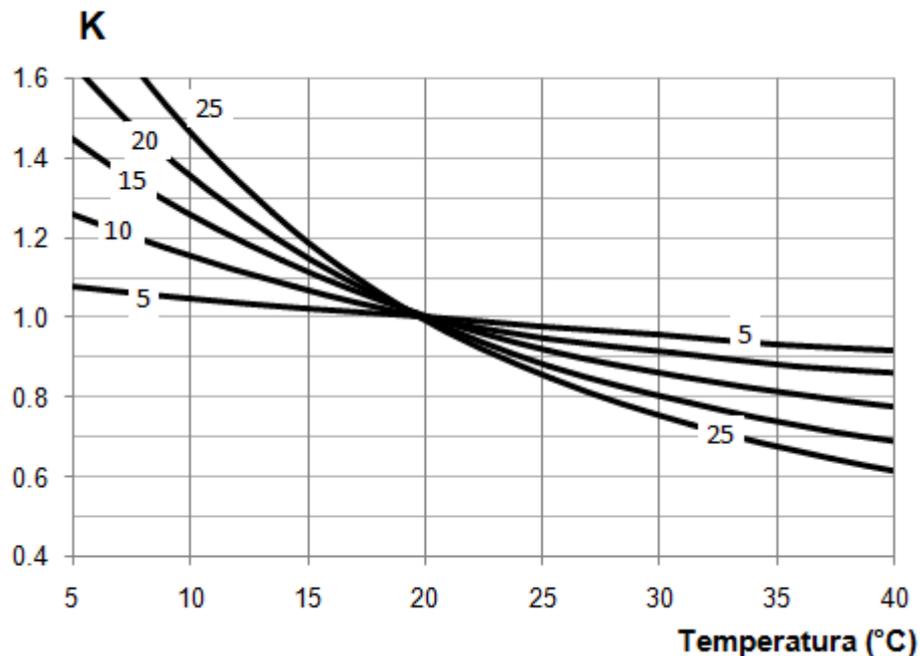


Figura 23. Órdenes del factor de corrección para equipos Lacroix, en función de la temperatura de la mezcla

7. CONCLUSIONES

El análisis del estado del arte a nivel mundial muestra que el tema que presenta la temática de la normalización de las deflexiones en los diferentes tipos de dispositivos respecto a la temperatura, no es nuevo pero sigue siendo actual.

Si bien 20 °C es la temperatura de referencia usualmente adoptada puede evidenciarse que no constituye una norma general, adoptándose por ejemplo 15 °C ó 35 °C de acuerdo a las características climáticas del lugar.

Se resalta la existencia de múltiples factores que pueden ser considerados en un enfoque exhaustivo tendiente a la normalización de las mediciones como los factores estacionales y los diferentes parámetros que condicionan la rigidez relativa de las capas asfálticas respecto al resto de la estructura:

- la frecuencia del equipo de ensayo
- la temperatura de las capas asfálticas y donde valorarla
- el espesor de las capas asfálticas
- la rigidez de la subrasante
- la presencia de capas cementadas
- en menor grado el espesor y calidad de capas granulares.

Se reconoce el presente trabajo como una primera aproximación a esta problemática que deberá ser ampliada con el análisis de diferentes mediciones a realizar en futuras campañas.

Finalmente brindamos un sincero agradecimiento al personal de la DNV sin el cual no se hubiera podido contar con los datos requeridos para el análisis.

8. REFERENCIAS

- [1] WASHO. (1954) The WASHO Road Test. Special Report 18, Highway Research Board.
- [2] Petroni E., Kuziora A., Levchenko V., Casal C., Bellone E., Venier G. (1977). Variación con la temperatura de la deflexión Benkelman recuperable. Memoria VIII congreso argentino de vialidad y tránsito. Buenos Aires. Argentina.
- [3] Smithand H. R. y Jones C. R. (1980). Measurement of pavement deflections in tropical and sub-tropical climates. TRRL laboratory report 935. Crowthorne, Berkshire.
- [4] IRC: 81 (1981). Tentative Guidelines of Flexible Road Pavements Using Benkelman Beam Deflection Technique. Indian Road Congress. Nueva Delhi. India.
- [5] Giovanon O. (1986). Predicción de la temperatura de la mezcla a partir del clima de una región. XXIV Reunión Anual del Asfalto en Mar del Plata, Argentina.
- [6] CEDEX. (1988) Norma NTL 356, Medida de las deflexiones de un firme mediante el ensayo con viga Benkelman, España.
- [7] AASHTO. (1993). guide for design of pavement structures. USA
- [8] NRC SHRP (1993). Procedure for temperature correction of maximum deflections. Engineering, PCS/LAW. Report SHRP-P-654. Washington D.C.
- [9] FHWA. (1994). LTPP Seasonal Monitoring Program: Instrumentation Installation and Data Collection Guidelines. Report No. FHWA-RD-94-110. McLean, VA.
- [10] Baltzer S., Ertman L. H., Jansen, J., Lukanen, E. y Stubstad, R.(1994). Prediction of AC material temperatures for routine load/deflection measurements. Fourth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Minneapolis.
- [11] Highways Agency (1999). Pavement design and maintenance. Pavement maintenance assessment. Structural assessment methods. DMRB Volume 7 Section 3 Part 2 deflection testing (pp 1-10), London, Inglaterra.
- [12] The Asphalt Institute (2000). Asphalt overlays for highway and street pavement, Manual Series N°17. Maryland, USA.
- [13] Lukanen, O., Stubstad R. and Briggs R. (2000). Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-98-085, USA.
- [14] Ministerio de fomento. (2003). Norma 6.3–IC, Rehabilitación de firmes, anexo 3; Guía para el estudio de las deflexiones en pavimento bituminosos. España.
- [15] Tosticarelli J., Pagola M., Giovanon O., Martínez P., Mezzelani G., Muzzulini J. (Noviembre, 2006). La auscultación de pavimentos en la argentina. Su evolución y estado actual. XXXIV reunión del asfalto, Mar del Plata, Argentina.
- [16] Giovanon O. y Pagola M. (2009). Modelización estructural con deflectometría Lacroix. Laboratorio vial IMAE.
- [17] Simonin J., Geffard J., Hornych P. (Septiembre, 2015). Performance of deflection measurement equipment and data interpretation in France. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering. (NDT-CE), Berlin, Alemania.
- [18] Yousuf N. & Mohsin H. K. (2015). Strengthening of flexible pavement through benkelman beam deflection (BBD) technique. Impact Journal.