EXPERIMENTAL CONCRETE BLOCK PAVEMENT AT RECOARO (ITALY) 11 YEARS AFTER [1] [2]

Lorenzo DOMENICHINI
Full Professor
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
Firenze, Italy

Francesca LA TORRE
Ph.D., P.E.
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA"
Roma, Italy

Rita D'ALESSANDRO
Secretary
COMMISSIONE TECNICA PAVITALIA - ITALIAN PAVER MANUFACTURERS ASSOCIATION
Milano, Italy

1. INTRODUCTION

An experimental Concrete Block Pavement - CBP was constructed in 1986 in Recoaro Terme, a 7 500 inhabitant town, located in the North of Italy, at the base of the Dolomiti mountains, at an elevation of 446 m a.s.l.

It was part of an urban renovation project involving the main state access street SS 246, which represents the backbone of the town street network, and the annexed recreational areas.

The CBP was proposed to the municipality officials as an alternative to the flexible pavement solution provided for in the project design package and was accepted mainly for its architectural and urban fitting features.

The pavement is now 11 years old and its performance at present is considered very good by the people involved in street maintenance and by the local users. As a matter of fact, no maintenance activity was required up to now on the CBP, with the exception of winter maintenance (15 passages for snow removal occurred in 1996 and 7 in 1997) and the excavation of some utility trenches.

The performance of the CBP was monitored as part of a research project of Pavitalia (Italian Paver Manufactures Association) and the results of the tests and analysis performed are reported in this paper.

2. PAVEMENT CHARACTERISTICS AND TRAFFIC VOLUMES

The CBP section in Recoaro is 253 m long with a longitudinal gradient of 8 % to -10 %, and a 7 m large carriage way (two traffic lanes, both directions). Photo 1 shows a general view of the pavement.

The pavement structure consists of:

1.	Concrete blocks	80 mm
2.	Sand bedding	80 mm
3.	Unbound granular foundation	400 mm
4.	Alluvial sandy subgrade	

The blocks are of two colors, white and grey, have a dentated shape with no chamfer (Photo 2) and a surface of 19 500 mm^2. The pavers were laid down with a diagonal pattern with respect to traffic flow.

The traffic interesting the CBP section is mainly a light urban traffic, consisting of vehicles, medium size buses and commercial vehicles having a maximum gross weight of approximately 50 kN. The average daily traffic is at present is 1 230 vehicles, both directions, with 4 % of commercial vehicles.

For the analysis purposes of the present study, a typical commercial vehicles traffic mix of an urban district street was considered, including: 45 kN commercial vehicles (80 %) and 120 kN buses (20 %). This mix can be represented by an equivalency factor of 0,07 single axles (120 kN each) per commercial vehicle (0,33 axles/comm. vehicle if the 82 kN standard axle is considered). These values are calculated with reference to the AASHTO'83 axle equivalency factors for a flexible pavement with SN = 5.

A total amount of approximately 1 x 10^5 commercial vehicles (equal to 7 000 passes of 120 kN single axles) have been supported by the CBP up to now, considering a constant traffic volume over the last 11 years.

3. PERFORMANCE SURVEYS

3.1 VISUAL SURVEY

In April and August 1997 two visual surveys were performed in order to examine the pavement present service conditions.

1 The editors used the International System of Units (SI) in this book of Proceedings, and the comma "," as the Decimal Marker. Each paper is presented first in English and then in Spanish, with the Tables and Figures, in both languages, placed in between. The References are included only in the original version of each paper.

2 This is the original version of this paper.

In a general sense, they are very good. Only about 2 % of the total area presents spalled or eroded units and 5 % of units are broken in 2 or 3 pieces.

The joint sand in the traffic paths is generally missing (Photo 3); the amount of sand required to refill the joints is about 700 to 800 g/m^2 (average over five measurements) over a surface of about 32 m^2.

The surface smoothness is good when run along at different speeds and no clear difference exists when crossing from the flexible to the block pavement.

It shall be noted that no maintenance activity has been performed up to now on the CBP, while the contiguous flexible pavement, both before and after the CBP section, required a resurfacing in 1994.

3.2 BEARING CAPACITY

Two non destructive bearing capacity surveys were performed in 1988 and in 1997, using the same Falling Weight Deflectometer - FWD and the same operating conditions (applied load and sensor position). In the 1997 surveys the deflections measured in the first 100 m long section are less uniform than in the subsequent pavement length. This could be probably due to the presence of some underground utility or dis-homogeneity of the supporting layers.

The results of the tests were analyzed in a back calculation process in which the following scheme of the pavement structure was used:

1.	Blocks with bedding sand	160 mm
2.	Granular foundation	400 mm
3.	Subgrade	6 m
4.	Bedrock	Infinite half space

The back calculation results are summarized in Table 1 and are graphically shown in Figures 1 and 2, referred to respectively the 1988 and the 1997 surveys.

The results reported in Table 1 clearly show that the initial composite modulus of the paver block and sand layer is significantly lower than the one measured after 11 years of service. The majority of the 1988 calculated values are between 1 000 and 2 000 MPa, while the 1997 ones are mostly within the range from 1 500 to 3 000 MPa.

This result reveals that the pavement experienced a progressive stiffening under traffic, confirming the experimental findings of numerous investigators [1, 2, 3, 4]. This tendency has been referred to as "lock up" effect and occurs relatively rapidly under the initial traffic. As a practical design statement, the stiffening process is assumed to be completed after 10 000 wheel passes [1, 5].

The pavement also showed a load - hardening characteristic when tested with different loading levels. In Figure 3 the pavement maximum deflections, normalized with respect to the applied loads, are plotted against the latters. As it can be seen, at higher loads the normalized deflections decrease and the block and sand composite modulus increases, the foundation and subgrade moduli remaining almost constant.

In absolute terms, the values of the composite modulus of the block and sand layer of the Recoaro CBP well fit in the variability range reported in the literature, as shown in Table 2.

The back calculated moduli shown in Table 1, were used to perform fatigue analysis of the CBP with reference to the maximum Italian single axle legal load of 120 kN.

The subgrade permanent deformation design criteria was considered, according to Shackel [4], and the results obtained are summarized in Table 3.

Considering the value of 0,07 as the equivalent number of 120 kN axles per commercial vehicle calculated in the previous paragraph, the 1997 figure reported in Table 3 shows that the CBP can still support a traffic of about 500 000 commercial vehicles.

This allowable traffic is higher than the total truck traffic the pavement will be subject to in the next 20 years, considering a growth rate of 3 % per year (about 250 000 c.v.)

As a term of a comparison, the evaluation of the remaining life according to the design procedure based on the AASHTO Guide as proposed by Rada et al [5] was performed. Figure 4 shows the values of the paver blocks and sand layer structural coefficient ($a_{b,s}$) calculated according to the Rada approach, by means of the values of the composite modulus reported in Table 1.

A weighted design structural coefficient $a_{b/s}$ equal to 0,39 was therefore adopted for the block and sand layer in the evaluation of the Recoaro pavement SN, which results:

$SN = (a_{b,s}\ h_{b,s}) + (m_f\ a_f\ h_f) = (0,39 \times 6,29) + (0,40 \times 0,204 \times 15,75) = 3,69$

Where:

$h_{b,s}$, h_f: Are respectively the block + sand and the foundation thickness in inches.

a_f: Is the foundation structural coefficient defined according to Rada as a function of the elastic modulus.

m_f: Is the drainage coefficient, which is conservatively assumed to be very low.

Consequently, the AASHTO design relationship for flexible pavements, which is considered applicable also to the CBP [5], brings to an allowable number of 82 kN axles (W_{18}) equal to $12,3 \times 10^7$ (corresponding to $2,59 \times 10^7$ passes of the 120 kN axle).

Considering the traffic already supported by the CBP (7 000 passes of 120 kN single axles) it can be concluded that also the evaluation of the remaining life according to the AASHTO procedure shows that the CBP at Recoaro has at present a high bearing capacity allowing it to support the actual traffic, from a structural point of view, for over a 20 years life span.

3.3 SKID RESISTANCE

The skid resistance of the CBP was measured in 1997 by means of the SRT equipment (British portable pendulum, Photo 4). 12 tests were performed according to the Italian CNR standard [6]; five tests were performed in the wheel paths, both directions, and two tests outside the trafficked areas.

The results showed a BPN value of 48 inside the wheel paths and 69 outside the trafficked areas. Therefore a significant reduction of the blocks surface skid resistance occurred under traffic.

Unfortunately we are not able to understand if this decrease of the BPN value occurred, as referenced in literature [4, 7], within the first one or two years of service because no skid resistance certified measurement was performed before the 1997 one.

It should be noted that, according to the CEN prEN 1338 (draft European Standard) on Concrete Paving Blocks [8], a BPN value of 45 shall be required as acceptance value for single concrete blocks.

To estimate the effects of the joints during the on-site testing, a set of measurements was repeated along the main block direction so to measure the skid resistance over one single block. No significant difference in BPN values was encountered compared to the results obtained along the traffic flow direction.

It can be concluded that the CBP skid resistance is still acceptable after 11 years of service. However this property of the pavement should be monitored from now on to understand if it is still deteriorating or not.

3.4 TYRE ROAD NOISE

The adoption of CBP in urban areas is often related to the specific aim of changing the noise environment inside the car to increase the driver attention and reduce the speed. In these applications, however the CBP is sometimes deemed to induce also complains about a higher level of tyre - road noise perceived by the community around the road.

To asses this property, two "paired" measurement of the noise emitted by two passenger vehicles when running on the CBP and the adjacent flexible pavement were performed.

The testing procedures were selected so as to conform as much as possible to the requirement of the ISO/DIS 11819 - 1 standard [9].

The tests were performed under controlled traffic conditions. Two vehicles were used, running at specified speeds, ranging from 30 to 70 km/h, in one direction each time. Globally, 165 noise measures were collected, 82 referred to the CBP and 83 to the flexible pavement.

After a preliminary analysis, some measurements were rejected due to the fact that, when the vehicles were running uphill, the noise measurements were affected by a higher power train while passing in front of the first microphone station, compared to the second one.

The results were finally plotted as a function of the speed and the relationship shown in Figure 5 was obtained.

The sound pressure level at the standard speed of 50 km/h was calculated for both the CBP and the flexible pavement and the results are shown in Table 4. A difference of 2 dB resulted from the analysis.

The significance of this results, which is in line with other experimental findings [4, 10, 11, 12], must be considered together with the following facts:

1. The measurement error is 1 dB approx.
2. The scatter of the residuals is 1 to 2 dB.
3. The reduction of the speed of the traffic flow of 5 to 10 km/h (traffic calming effect often shown by this type of pavement) induces a reduction in the CBP noise of about 1,5 to 3 dB.
4. The tested CBP is 11 years old while the flexible pavement is only three years old.

Therefore, the obtained result can be considered very satisfactory. In fact, the design solutions adopted at Recoaro (smooth surface, diagonal laying pattern and absence of chamfer) promote, according to Vollpracht [10], less noisy surfaces. The recorded absolute values of the noise level seem higher than those reported in the literature. A possible reason for this could be the influence on tyre - road noise of the pavement present evenness conditions. Also under this point of view the results obtained must be considered as positive, considering that within a service life of 11 years other pavement solutions usually require interventions to restore the surface evenness (as for the flexible pavement adjacent to the CBP section), which is not the case of the Recoaro CBP.

4. CONCLUSIONS

The experimental concrete block pavement constructed in Recoaro (Italy) in 1986 was subject to an intensive survey in 1997 to evaluate its present service conditions.

Visual surveys, bearing capacity evaluations, skid resistance and tyre-road noise measurements were performed and analyzed in comparison with similar surveys performed in the past or to reference situations (untrafficked areas or the adjacent flexible pavement). In a general sense, it is performing very well and didn't require any maintenance activity up to now.

The CPB actual bearing capacity is still very good and allows to support the actual traffic for over a 20 years life span.

Confirming other experimental findings, the pavement experienced a progressive stiffening under traffic which improved its bearing capacity over time.

A reduction of the blocks surface skid resistance occurred under traffic, but its value is still higher than

the acceptable value of 45 considered by the draft European Standard for block pavements.

At last, the present tyre-road noise performance of the CBP was monitored. A difference of 2 dB resulted with reference to the adjacent flexible pavement which required, however, a resurfacing intervention three years ago. Therefore also under this point of view, which is highly important for CBP applications in urban environments, the Recoaro pavement can be considered as satisfactory.

The results obtained have demonstrated that the performance of the experimental concrete block pavement constructed in Recoaro is very good from both the structural and the functional points of view.

This result, together with the general positive judgment of the people in charge of the municipality road management, shows that the CBP represents a very cost effective and well performing alternative for paving light trafficked urban roads.

5. REFERENCES

1. SHACKEL, Brian. The Evolution and Application of Mechanistic Design Procedures for Concrete Block Pavements. -- P.114-120. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (3 : 1988 : Roma). Proceedings. -- Treviso : Pavitalia, 1988. -- 497P.
2. ARMITAGE, R. J. Concrete Block Pavement Evaluation with the Falling Weight Deflectometer. -- P.203-208. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (3 : 1988 : Roma). Proceedings. -- Treviso : Pavitalia, 1988. -- 497P.
3. ROLLINGS, Raymond S., ROLLINGS, Marian P., SHARP, Kieran G. Evaluation of Thickness Design Concepts for Block Pavements. -- P.61070. // In: CONCRETE BLOCK PAVING : PAVE NEW ZEALAND'92 : INTERNATIONAL CONFERENCE (4 : 1992 : Auckland). Proceedings. -- Porirua : C&CA of NZ, 1992. -- 3 Vol.
4. SHACKEL, Brian. Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavements. -- London, Elsevier, 1991. -- 229P.
5. RADA, Gonzalo R., SMITH, David R. and MILLER, John S. Structural Design of Concrete Block Pavements. // In : Journal of Transportation Engineering : ASCE., -- Vol. 116, No. 5 (Sep./Oct., 1990); P.615-635.
6. ITALIAN NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Catalogo delle pavimentazioni stradali. -- Roma : INRC, 1995. -- P.v. -- (CNR-BU 178-95).
7. KOMURA, Mitsuru, MIURA, Yuji and SAKEI, Yasuriori. On The Serviceability of Concrete Block Pavements Used on Streets and Bus Bays. -- P.212.215. // In: CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (2 : 1984 : Delft). Proceedings. -- Delft : CBP, 1984. -- 348P.
8. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Precast Concrete Paving Blocks : Requirements and Test Methods. -- Brussels : CEN, 1996. -- 61p. -- (PR-EN 1338, CEN/TC 178, N204B).
9. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Acoustics : Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise : Part 1: The Statistical Pass by Method. -- Brussels : ISO, 1995. -- P.v. -- (ISO/DIS 11819-1).
10. VOLPRACHT, Alf. Noise Reducing Concrete Block Pavements. -- P.216-223. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL WORKSHOP (2 : 1994 : Oslo). Proceedings. -- Oslo : BLF, 1994.-- 495P.
11. PAUSER, M. Noise Reduction on Concrete Paving Blocks. -- Vienna : S.e., 1994. -- P.v.
12. ISHIMURA, S., KANZAKI, Noburu and OHMORI, Yoshitaka. The Use of Interlocking Block Pavements for the Reduction of Traffic Accident. -- P.200-206. // In: CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (2 : 1984 : Delft). Proceedings. -- Delft : CBP, 1984. -- 348P.

LAYER *CAPA*	ELASTIC MODULUS *MÓDULO DE ELASTICIDAD* (MPa)	
	1988	**1997**
Blocks + Sand *Adoquines + arena*	1 476	2 278
Granular foundation *Base granular*	356	276
Subgrade *Subrasante*	200	232

Table 1. FWD back calculation results.
Tabla 1. *Resultados del análisis con el FWD.*

COUNTRY *PAÍS*	MODULUS *MÓDULO,*(MPa)	REFERENCE *REFERENCIA*
UK	913,5	Armitage ('88)
	2 030	
Japan	1 710	Miura et al ('84)
	4 400	
New Zealand	420	Seddon ('82)
Australia	355*	Interlocking ('86)
	3 248	
Netherlands	648,5	Houben et al ('84)
	2 814,6	
USA	3 150	Rollings ('84)
* Initial modulus value.		

Table 2. Summary of layer moduli for composite block and sand layer [5].
Tabla 2. *Resumen de los Módulos de Elasticidad para la capa compuesta por los adoquines y la arena [5].*

YEAR *AÑO*	ALLOWABLE NUMBER OF REPETITIONS OF THE 120 kN STANDARD AXLE / *NÚMERO DE REPETICIONES REMANENTES DE UN EJE ESTÁNDAR DE 120 kN*
1988	≅ 22 000
1997	≅ 38 000

Table 3. Results of the CBP fatigue analysis.
Tabla 3. *Resultado del análisis de fatiga del pavimento de adoquines de concreto.*



Photo 1. General view of the concrete block pavement section at Recoaro (I).
Foto 1. *Vista general de la sección en pavimento de adoquines de concreto en Recoaro, Italia.*

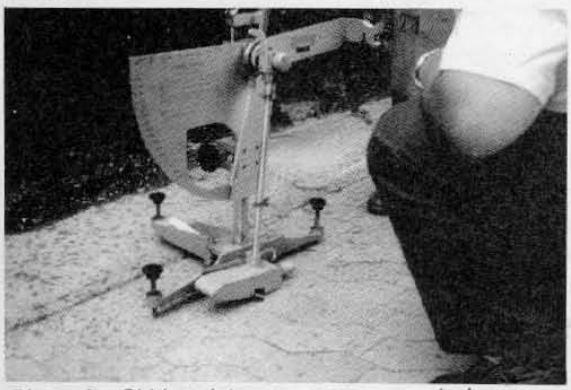


Photo 3. Skid resistance measurements by means of the British portable pendulum.
Foto 3. *Medición de la resistencia al frenado por medio del péndulo portatil británico.*

PAVEMENT *PAVIMENTO*	L_{veh} [dB]
Block pavement *Pavimento de adoquines*	75,9
Flexible pavement *Pavimento flexible*	73,9

Table 4. Sound levels at the standards speed of 50 km/h (L_{veh}).
Tabla 4. *Niveles de ruido (L_{veh}) a la velocidad estándar de 50 km/h.*

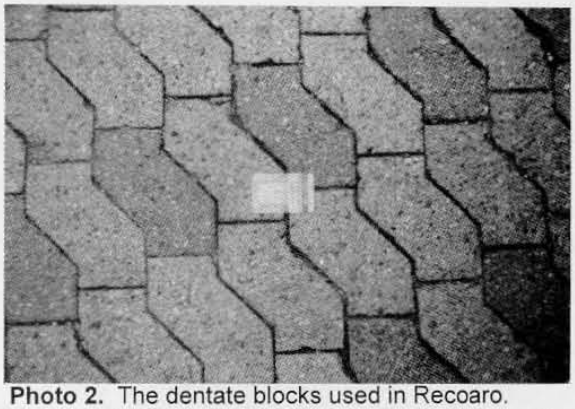


Photo 2. The dentate blocks used in Recoaro.
Foto 2. *Detalles de los adoquines utilizado en Recoaro.*

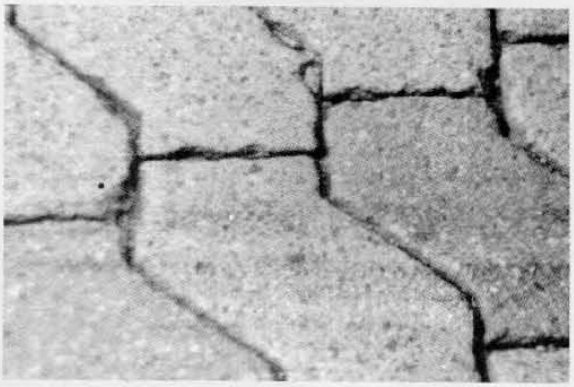
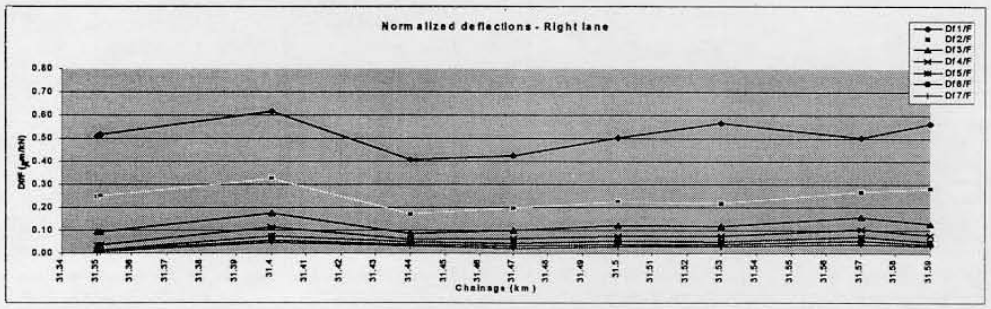
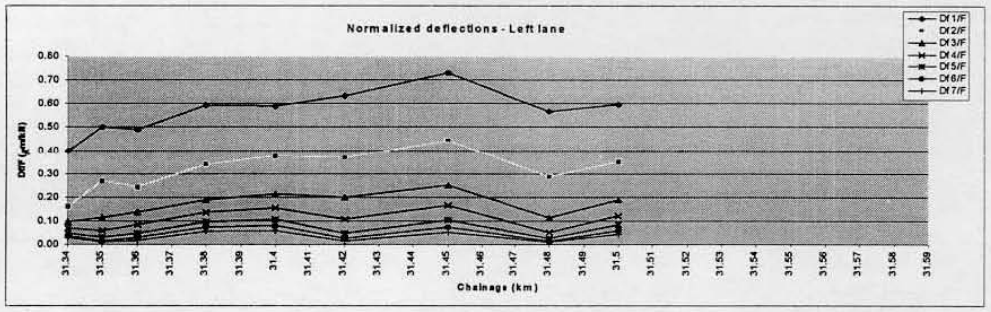
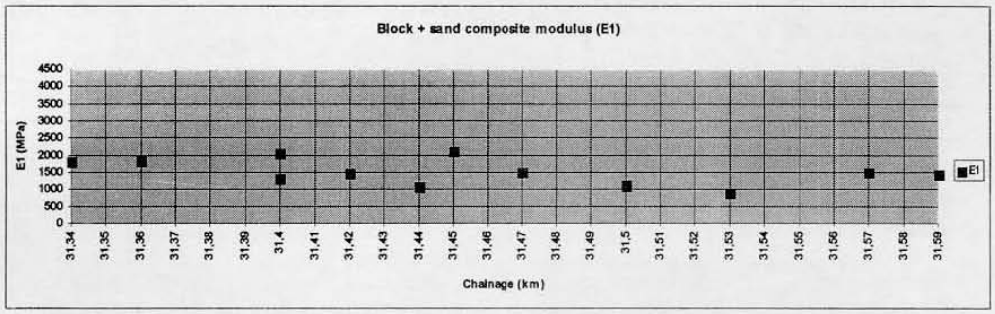
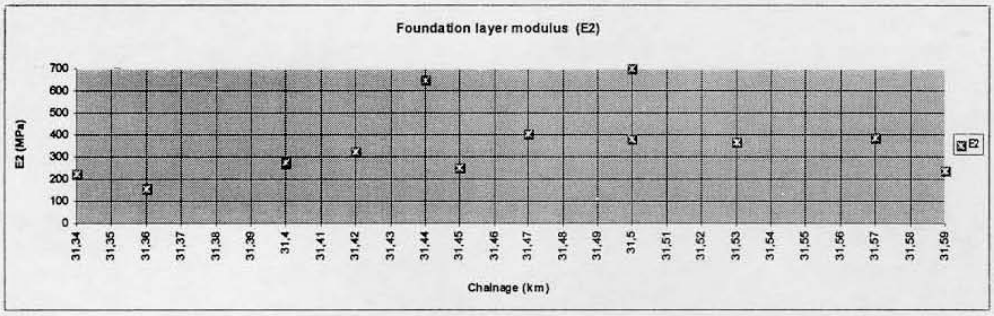


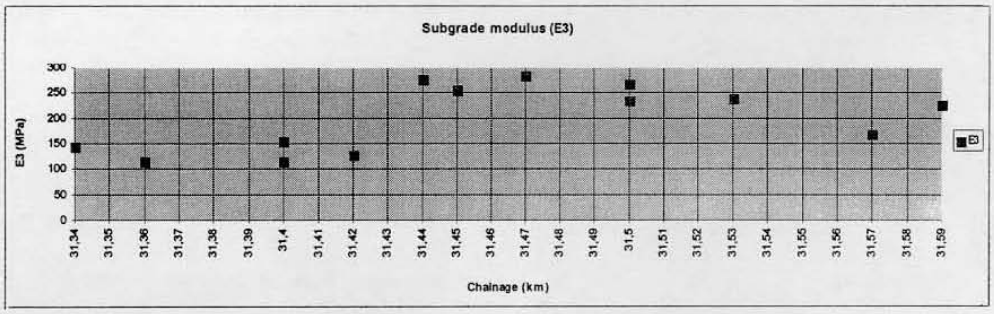
Photo 4. Joint sand missing in the traffic paths.
Foto 4. *Arena de junta faltante en las huellas del tráfico*











Dt/F (μm/kN) vs ABSISADO (km) - DEFLEXIONES NORMALIZADAS, CARRIL DERECHO

Dt/F (μm/kN) vs ABSISADO (km) - DEFLEXIONES NORMALIZADAS, CARRIL IZQUIERDO

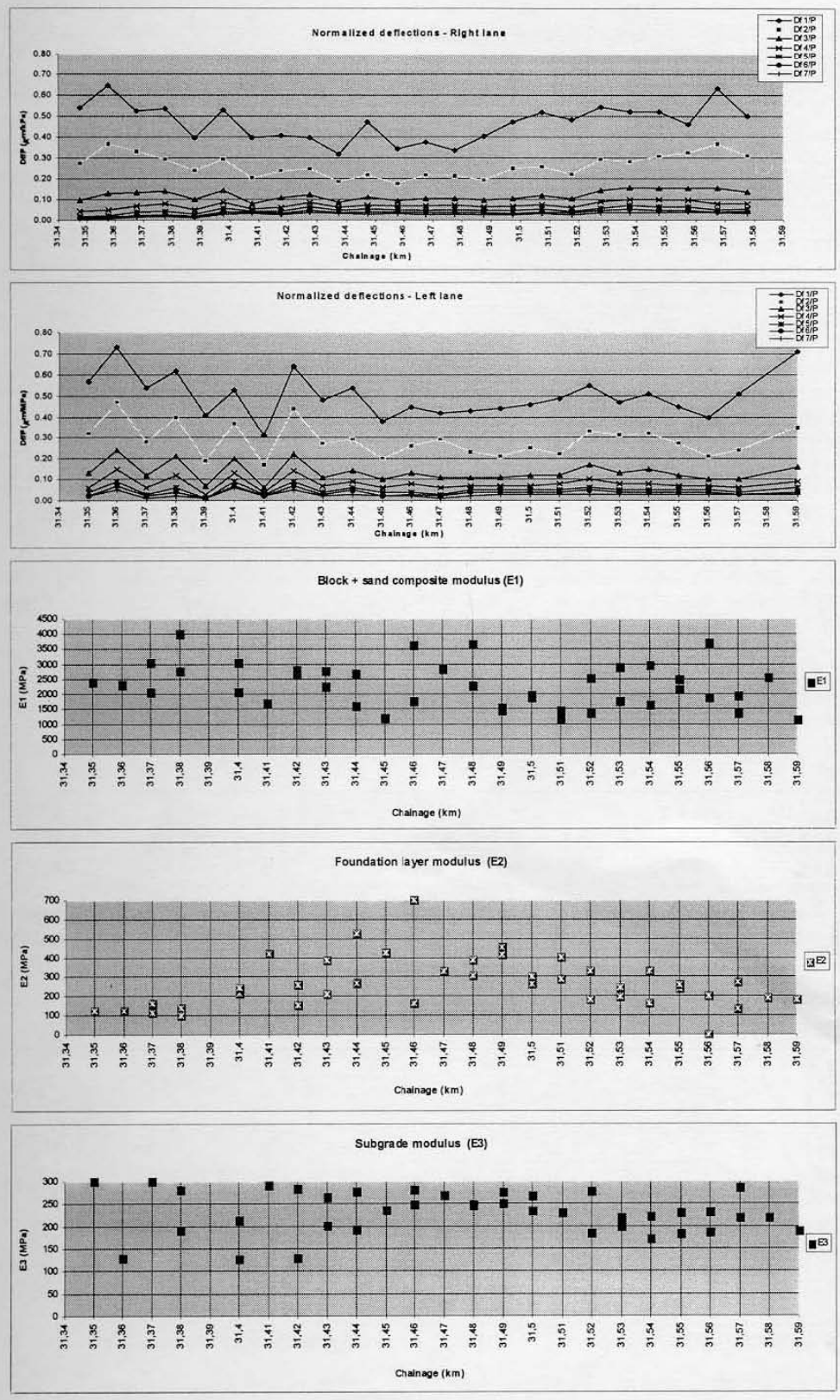
E1 (MPa) vs ABSISADO (km) - MÓDULO COMPUESTO DE LOS ADOQUINES + LA ARENA (E1)

E2 (MPa) vs ABSISADO (km) - MÓDULO DE LA CAPA DE BASE (E2)

E3 (MPa) vs ABSISADO (km) - MÓDULO DE LA SUBRASANTE (E3)

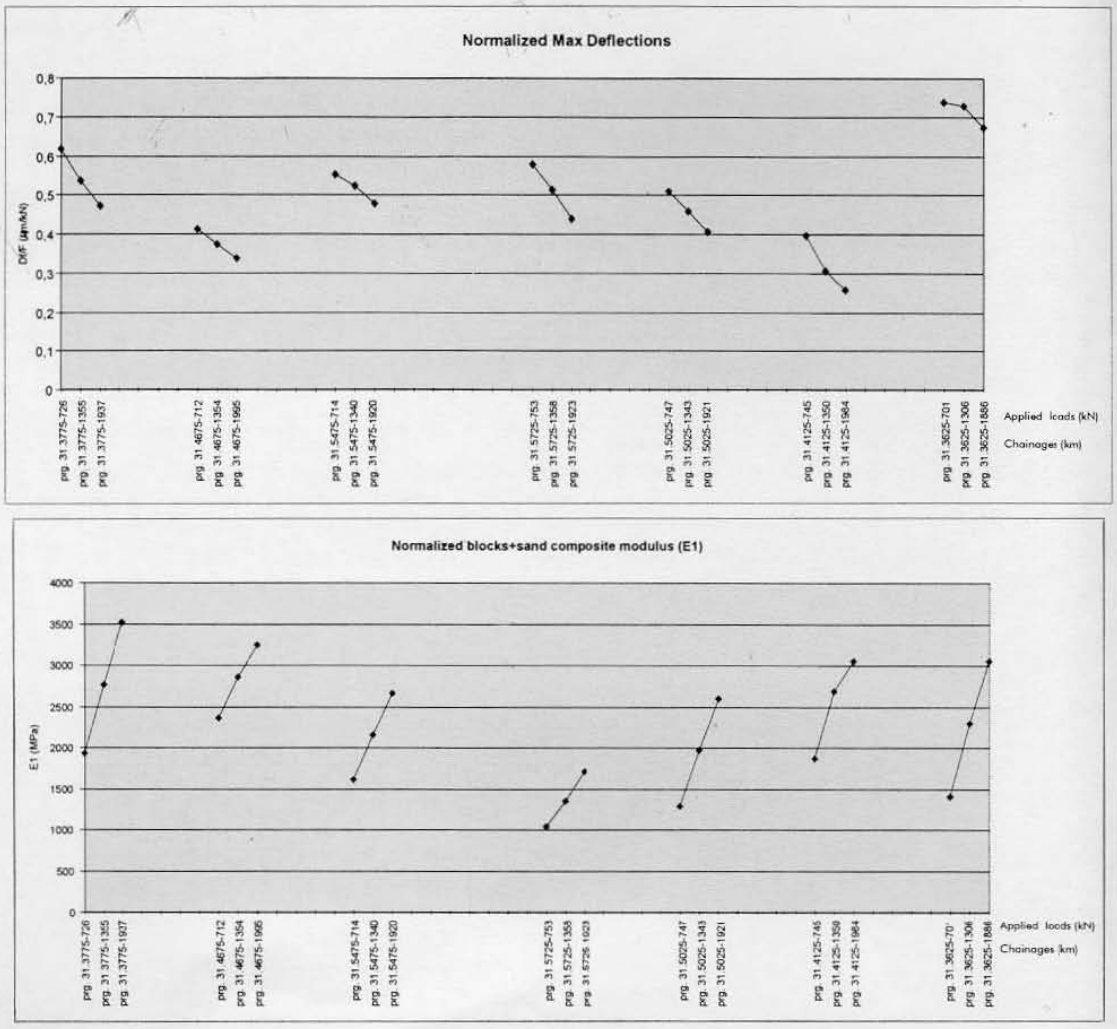
Figure 1. Results of the FWD survey made in 1988.

Figura 1. *Resultados del deflectómetro de impacto en 1988.*



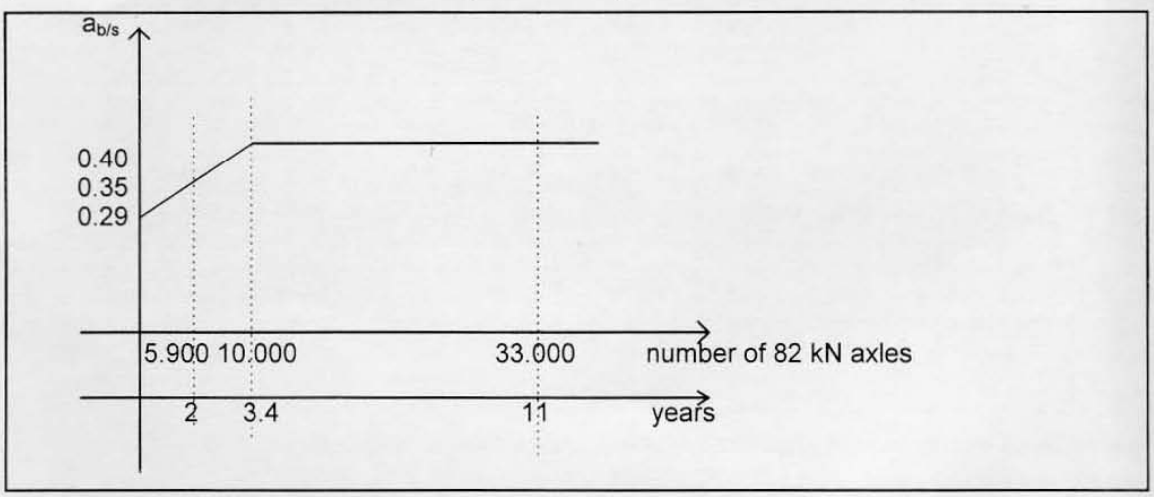
Dt/F (µm/kN) vs ABSISADO (km) - DEFLEXIONES NORMALIZADAS, CARRIL DERECHO
Dt/F (µm/kN) vs ABSISADO (km) - DEFLEXIONES NORMALIZADAS, CARRIL IZQUIERDO
E1 (MPa) vs ABSISADO (km) - MÓDULO COMPUESTO DE LOS ADOQUINES + LA ARENA (E1)
E2 (MPa) vs ABSISADO (km) - MÓDULO DE LA CAPA DE BASE (E2)
E3 (MPa) vs ABSISADO (km) - MÓDULO DE LA SUBRASANTE (E3)

Figure 2. Results of the FWD survey made in 1997.
Figura 2. *Resultados del deflectómetro de impacto en 1997.*



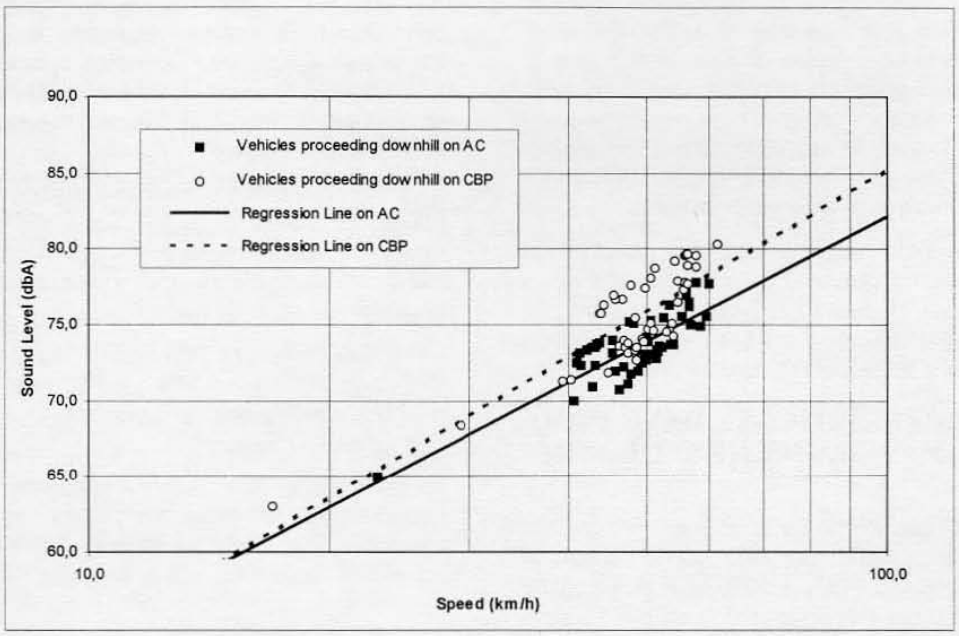
Dt/F (µm/kN) vs ABSISADO (km) & CARGAS APLICADAS (kN) - DEFLEXIONES NORMALIZADAS MÁXIMAS
E1 (MPa) vs ABSISADO (km) & CARGAS APLICADAS (kN) - MÓDULO COMPUESTO NORMALIZADO DE LOS ADOQUINES + LA ARENA (E1)

Figure 3. Results of FWD tests with different applied loads.
Figura 3. *Resultados del deflectómetro de impacto con la aplicación de diferentes cargas.*



Ab/s vs AÑOS & NÚMERO DE EJES DE 82 kN

Figure 4. AASHTO Structural Coefficient of the Recoaro block + sand layer resulting from the FWD tests performed.
Figura 4. *Coeficiente Estructural AASHTO de la capa de adoquines de concreto y arena, resultante de los ensayos llevados a cabo en Reocaro.*



NIVEL DE RUIDO (dbA) vs VELOCIDAD (km/h)
Vehicles proceeding downhil on AC / *Vehículos bajando sobre pavimento de concreto asfáltico* - Vehicles proceeding downhill on CBP / *Vehículos bajando sobre pavimento de adoquines de concreto* - Regression Line on AC / *Línea de regresión para el concreto asfáltico* - Regression Line on CBP / *Línea de regresión para los adoquines de conreto.*

Figure 5. Sound Level vs Speed for veichles proceeding downhill.
Figura 5. *Nivel de ruido vs Velocidad para los vehículos bajando por la vía.*

PAVIMENTO EXPERIMENTAL DE ADOQUINES DE CONCRETO EN RECOARO (ITALIA), 11 AÑOS DESPUÉS [3] [4]

Lorenzo DOMENICHINI
Profesor
UNIVERSIDAD DE LOS ESTUDIOS DE FLORENCIA
Florencia, Italia

Francesca LA TORRE
PhD, P.E.
UNIVERSIDAD DE LOS ESTUDIOS DE ROMA "LA SAPIENZA"
Milán, Italia

Rita D'ALESSANDRO
Secretaria
ASOCIACIÓN ITALIANA DE PRODUCTORES DE ADOQUINES DE CONCRETO - COMISIÓN TÉCNICA - PAVITALIA
Milán, Italia

1. INTRODUCCIÓN

En 1986 se construyó un pavimento experimental de adoquines de concreto en la ciudad de Termas de Recoaro, de 7 500 habitantes, localizada al norte de Italia, en la base de las montañas Dolomiti, con una altura de 446 m sobre el nivel del mar.

Fue parte de un proyecto de renovación urbana que comprendía la vía principal de acceso SS 246, espina dorsal de la red de calles e la ciudad y las áreas recreativas aledañas.

El pavimento de adoquines de concreto le fue propuesto a los funcionarios de la municipalidad como una alternativa a la solución en pavimento flexible incluida en el paquete del proyecto, y fue aceptada principalmente por sus características de adecuación arquitectónica y urbana.

3 Los editores utilizaron el Sistema Internacional de Unidades (SI) en estas Memorias, y la coma "," como Puntuación Decimal. Cada ponencia se presenta primero en Inglés y luego en Español, con las Tablas y Figuras, en ambos idiomas, colocadas en medio de ellas. La Bibliografía se incluye sólo en la versión original de cada ponencia.

4 Esta es una traducción de la ponencia original escrita en Inglés, realizada por Germán G. Madrid, no sometida a la aprobación del autor.

El pavimento tiene ahora 11 años y las personas involucradas en el mantenimiento de las vías y los usuarios locales conceptúan que se ha comportado muy bien. De hecho, hasta ahora no ha requerido de ningún mantenimiento, con la excepción del mantenimiento durante el invierno (tuvo 15 pasadas de remoción de nieve en 1996 y 7 en 1997), y la excavación de algunas brechas para redes.

El comportamiento del pavimento fue monitoreado como pare de un proyecto de investigación de la Asociación de Productores de Adoquines de Concreto – PAVITALIA, y los resultados y análisis llevados a cabo se presentan en esta ponencia.

2. CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO Y VOLÚMENES DE TRÁFICO

La sección de pavimento de adoquines de concreto en Recoaro tiene 253 m de largo, con un gradiente longitudinal entre el 8 % y – 10 %, y 7 m de ancho (dos carriles, ambas direcciones). La Foto 1 muestra una vista general del pavimento.

La estructura del pavimento consiste en:

1.	Adoquines de concreto	80 mm
2.	Capa de arena	80 mm
3.	Base granular	400 mm
4.	Subrasante aluvial arenosa	

Los adoquines son de dos colores, blancos y grises, de forma dentada, sin bisel (Foto 2) y con una superficie de 19 500 mm^2; fueron colocados con un patrón diagonal con respecto al flujo del tráfico.

El tráfico sobre el pavimento de adoquines de concreto es principalmente urbano, liviano, consistente en automóviles, bueses medianos y camiones con un peso muerto de aproximadamente 50 kN. El tráfico promedio diario es, actualmente, de 1 230 vehículos, en ambas direcciones, con 4 % de vehículos comerciales.

Para efectos de análisis del presente estudio, se consideró el tráfico de una calle urbana, con una mezcla de vehículos comerciales que incluye: 80 % de vehículos de 45 kN y 20 % de buses de 120 kN. Esta mezcla se puede representar con un factor de equivalencia de 0,07 ejes sencillos (de 120 kN cada uno) por vehículo comercial (0,33 ejes por vehículo comercial si se considera el eje estándar de 82 kN). Esos valores son calculados con referencia a los factores de equivalencia para pavimentos flexibles de la AASHTO´83, con SN = 5.

Hasta la fecha el pavimento ha soportado un número aproximado de 1 x 10^5 vehículos comerciales (igual a 7 000 pasadas de ejes simples de 120 kN), considerando un tráfico constante en los 11 años.

3. VALUACIONES DEL COMPORTAMIENTO

3.1 EVALUACIÓN VISUAL

En abril y agosto de 1997 se llevaron a cabo dos inspecciones visuales con el fin de examinar las condiciones de servicio presentes del pavimento. En términos generales eran muy buenas. Solo un 2 % del área total presentaba adoquines desbordados o desgastados, y el 5 % de las unidades estaban quebradas en 2 o 3 pedazos.

En general se había perdido la arena de junta en las huellas del tráfico (Foto 3). La cantidad de arena necesaria para volver a llenar las juntas fue de 700 a 800 g/m^2 (promedio de cinco mediciones) sobre una superficie de unos 32 m^2.

La tersura de la superficie es buena al circular a varias velocidades sobre ella, y no se establece ninguna diferencia al pasar del pavimento de asfalto al de adoquines de concreto.

Se debe anotar que no se ha realizado ninguna actividad de mantenimiento hasta ahora en este pavimento de adoquines de concreto, mientras que el pavimento de asfalto, existente antes y después del de adoquines, se debió repavimentar en 1994.

3.2 CAPACIDAD PORTANTE

En 1988 y 1997 se llevaron a cabo dos ensayos no destructivos de evaluación de la capacidad portante, usando el mismo deflectómetro de impacto - FWD y las mismas condiciones de operación (carga aplicada y localización de los sensores). En 1997, las deflexiones medidas en la primera sección de 100 m de longitud fueron menos uniformes que para el resto del pavimento. Esto se puede deber a la presencia de alguna red subterránea o a la falta de homogeneidad de las capas de soporte.

Los resultados del ensayo se analizaron con un proceso de cálculo retrospectivo en el cual se utilizó el siguiente esquema para el pavimento:

1.	Adoquines con capa de arena	160 mm
2.	Base granular	400 mm
3.	Subrasante	6 m
4.	Piso de roca	Espacio semiinfinito

Los resultados del análisis retrospectivo se resumen en la Tabla 1 y se muestran gráficamente en las Figuras 1 y 2, referidas, respectivamente, a las evaluaciones de 1988 y 1997.

Los resultados de la Tabla 1 muestran claramente que el módulo del compuesto adoquines y arena es significativamente menor que medido después de 11 años de servicio. La mayoría de los valores calculados en 1988 están entre 1 000 y 2 000 MPa, mientras que los de 1997 están en el rango entre 1 500 y 3 000 MPa.

Este resultado revela que el pavimento experimentó una rigidización progresiva bajo el tráfico, confirmando los resultados experimentales de numerosos inverstigadores [1, 2, 3, 4]. Esta tendencia se ha denominado como el efecto "lock up" y ocurre relativamente rápido bajo el tráfico inicial. Como un principio práctico de diseño, se asume que este proceso se completa después de 10 000 pasadas de llanta [1, 5].

El pavimento también mostró una característica de endurecimiento con las cargas, cuando se ensayó con diferentes niveles de carga. En la Figura 3 se presentan las máximas deflexiones (normalizadas con respecto a las cargas aplicadas) contra las cargas respectivas aplicadas. Como se puede ver, al aumentar las cargas decrecen las deflexiones normalizadas y el módulo del compuesto adoquines y arena se incrementa, con los módulos de la base y la subrasante permaneciendo constantes.

En términos absolutos, los valores del módulo del compuesto del pavimento de adoquines de concreto de Recoaro se acomodan al rango de variabilidad reportado en la literatura, como lo muestra la Tabla 2.

Los módulos calculados retrospectivamente mostrados en la Tabla 1, se usaron para llevar a cabo análisis de fatiga del pavimento de adoquines de concreto, con referencia al eje sencillo máximo legal en Italia, que es de 120 kN.

Se consideró el criterio de diseño de deformación permanente de la subrasante de Shackel [4], y los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.

Considerando un valor de 0,07 como el número equivalente de ejes de 120 kN, por vehículo comercial, calculado en los párrafos anteriores, las cifras de 1997 que aparecen en la Tabla 3 muestran que el pavimento de adoquines de concreto todavía puede soportar aproximadamente unos 500 000 vehículos comerciales.

Este tráfico permisible es más alto que el tráfico total al cual estará sujeto el pavimento durante los próximos 20 años, considerando una rata de crecimiento del 3 % anual (aproximadamente 250 000 vehículos comerciales).

Como medida de comparación, la evaluación de la vida remanente según el método de diseño basado en la Guía AASHTO, tal como lo propone Rada [5] dio como resultado los valores que se indican en la Figura 4, para el coeficiente estructural para la capa de adoquines y arena ($a_{b,s}$), calculado con los valores del módulo compuesto de la Tabla 1.

Por lo tanto se adoptó un coeficiente estructural $a_{b,s}$ de 0,39 para la capa de arena y de adoquines, para la evaluación del pavimento de Recoaro, en el cual

$SN = (a_{b,s}\ h_{b,s}) + (m_f\ a_f\ h_f) = (0,39 \times 6,29) + (0,40 \times 0,204 \times 15,75) = 3,69$

Donde:

$h_{b,s}$, h_f: Son, respectivamente, los espesore (alturas) de los adoquines + arena y la base, en pulgadas.

a_f: Es el coeficiente estructural de la base definido según Rada como una función del módulo elástico.

m_f: Es el coeficiente de drenaje, que se asume conservativamente como muy bajo.

Consecuentemente, la relación de diseño de la AASHTO para pavimentos flexibles, que se considera aplicable también a los pavimentos de adoquines de concreto [5], llega a un número permitido de ejes de 82 kN (W_{18}) igual a $12,3 \times 10^7$ (correspondiendo a $2,59 \times 10^7$ pasadas de ejes de 120 kN).

Teniendo en consideración el tráfico que ya ha soportado el pavimento de adoquines de concreto (7 000 pasada de ejes sencillos de 120 kN), que la evaluación de la vida remanente, según el procedimiento de la AASHTO, también muestra que el pavimento de adoquines de concreto de Recoaro tiene en la actualidad una alta capacidad portante, permitiéndole soportar el tráfico actual, desde el punto de vista estructural, por 20 años de vida adicionales.

3.3 RESISTENCIA AL FRENADO

La resistencia al frenado del pavimento de adoquines de concreto se midió en 1997 por medio de un equipo SRT (péndulo portátil británico, Foto 4). Se llevaron a cabo 12 ensayos según la norma italiana CNR [6]; cinco de ellos se hicieron en la ruta de las llantas, en ambas direcciones, y dos más fuera de las áreas con circulación de tráfico.

Los resultados muestran un valor BPN de 48 en las rutas de las llantas y de 69 en las áreas sin tráfico. Por lo tanto se ha dado una reducción significativa de la resistencia al frenado en las áreas bajo tráfico.

Infortunadamente no es posible entender si esta reducción del valor de BPN ocurrió, tal y como se hace referencia en la literatura [4, 7], durante el primero o los dos primeros años de servicio, debido a que no se había efectuado ninguna medición certificada de la resistencia al frenado antes de la de 1997.

Se debe notar que, según el borrador de Norma Europea prEN 1 338 para adoquines de concreto [8], publicado por la Comisión Europea de Normalización – CEN, se requiere un valor BPN de 45 como valor individual para aceptar adoquines de concreto.

Para estimar el efecto de las llanta en los ensayos en el sitio, se efectuó una serie de medidas a lo largo del la longitud de los adoquines, con el fin de que la medición se hiciera sobre un solo adoquín. No se encontró ninguna diferencia significativa en los valores de BPN comparados con los valores obtenidos a lo largo de la dirección del tráfico.

Se puede concluir que el valor de resistencia al frenado es todavía aceptable después de 11 años de servicio de este pavimento de adoquines de concreto. Sin embargo, esta propiedad del pavimento se debe monitorear a partir de ahora con el fin de poder determinar si los adoquines de concreto todavía se siguen deteriorando o no.

3.4 RUIDO PRODUCIDO POR LAS LLANTAS Y LA VIA

La adopción de los pavimentos de adoquines de concreto en las áreas urbanas se relaciona, con frecuencia, al propósito de modificar el ambiente de ruido dentro del vehículo para incrementar la atención del conductor y reducir la velocidad. En estas aplicaciones el pavimento de adoquines está condenado, algunas veces, a inducir protestas por el alto nivel de ruido producido por las llantas, percibido por la comunidad vecina.

Con el fin de evaluar esta propiedad, se compararon las mediciones realizadas paralelamente con dos vehículos circulando tanto sobre el pavimento de asfalto adyacente como sobre el de adoquines.

El método de ensayo se seleccionó de tal manera que se acomodara, lo mejor posible, a los requisitos de la norma ISO/DIN 11819 – 1 [9].

Los ensayos fueron realizados bajo condiciones de tráfico controladas. Se usaron dos vehículos, a velocidades específicas entre 30 km/h y 70 km/h, en una dirección cada vez. En conjunto se hicieron 165 mediciones de ruido, 82 sobre el pavimento de adoquines de concreto y 83 sobre el de asfalto.

Después de análisis primario, se rechazaron algunas mediciones debido al hecho de que, cuando los vehículos iban cuesta arriba, las mediciones se vieron afectadas por el ruido de la transmisión en un cambio de mayor potencia, al pasar en frente a los micrófonos, comparadas con las de los vehículos que iban cuesta abajo.

Los resultados se graficaron en función de la velocidad y la relación obtenida se muestra en la Figura 5. Se calculó la intensidad del ruido a la velocidad media de 50 km/h, tanto para el pavimento de asfalto como para el de adoquines de concreto, y los resultados se muestran en la Tabla 4. Del análisis resultó una diferencia de 2 dB.

El significado de estos resultados, que se encuentran en la misma línea de otros hallazgos experimentales [4, 10, 11, 12], se deben considerar al mismo tiempo que lo siguiente:

1. El error de medición es de aprox. 1 dB.
2. La dispersión de los resultados está entre 1 dB y 2 dB.
3. La reducción en la velocidad del flujo vehicular, entre 5 km/h y 10 km/h, debido al efecto de aquietamiento mostrado por el pavimento de adoquines de concreto, induce una reducción en el ruido generado entre 1,5 dB y 3 dB.
4. El pavimento de adoquines ensayado tiene 11 años, pero la rodadura de asfalto tiene solo 3 años.

Por lo anterior, el resultado obtenido se puede considerar muy satisfactorio. De hecho, las soluciones de diseño adoptadas en Recoaro (superficie tersa, patrón de colocación diagonal y ausencia de bisel) promueve, según Vollpracht [10], superficies menos ruidosas. Los niveles de ruido registrados parecen ser mayores que los reportados en la literatura. Una posible razón para esto pudiera ser la influencia sobre el ruido de las llantas de las condiciones de tersura actuales de los adoquines. También, bajo este punto de vista, los resultados obtenidos se deben considerar como positivos, considerando que en una vida de servicio de 11 años, otras soluciones para pavimentos usualmente requieren intervenciones para restaurar la tersura superficial (como en el pavimento de asfalto adyacente a la sección de adoquines de concreto), lo que no ocurrió con el pavimento de adoquines de concreto de Recoaro.

4. CONCLUSIONES

El pavimento experimental de adoquines de concreto, construido en Recoaro, Italia, en 1986, fue sometido a una rigurosa inspección en 1997, con el fin de evaluar sus actuales condiciones de servicio.

Las inspecciones visuales, la evaluación de la capacidad portante y de la resistencia al frenado, y las mediciones del ruido generado por la llantas, se analizaron y compararon con los datos de otras inspecciones realizadas en el pasado o con situaciones de referencia (como áreas sin tráfico o un pavimentos de asfalto adyacente. En general, el pavimento de adoquines de concreto se está comportando muy bien y no ha requerido de ninguna actividad de mantenimiento hasta ahora.

La capacidad portante actual del pavimento de adoquines de concreto es todavía muy buena y permite soportar el tráfico actual por 20 años más.

Confirmando otros hallazgos experimentales, el pavimento ha experimentado una rigidización progresiva bajo el tráfico, lo que ha mejorado su capacidad portante con los años.

Con el tiempo se ha reducido la resistencia al frenado de los adoquines, pero su valor es todavía mayor que el valor (BPN) de 45 aceptado por el borrador de la Norma Europea para adoquines de concreto.

Para terminar, se monitoreó el comportamiento del pavimento de adoquines de concreto en cuanto a ruido. Se encontró una diferencia de 2 dB con relación al pavimento flexible adyacente el cual requirió, de hecho, la colocación de una nueva superficie hace 3 años. Por lo tanto, también desde este punto de vista, que es muy importante para las aplicaciones urbanas de los pavimentos de adoquines de concreto, el pavimento de Recoaro se puede considerar como satisfactorio.

Los resultados obtenidos han demostrado que el comportamiento del pavimento experimental de adoquines de concreto construido en Recoaro es muy bueno tanto desde el punto de vista estructural como funcional.

El resultado, junto con el juicio positivo, en general, de las personas en la administración de vías de la municipalidad, muestra que el pavimento de adoquines de concreto representa una alternativa eficiente desde el punto de vista de costos y de un muy buen comportamiento para pavimentar vías urbanas con tráfico liviano.