Third International Workshop on Concrete Block Paving, Cartagena de Indias, Colombia, May 10-13, 1998
Tercer Taller Internacional de Pavimentación con Adoquines de Concreto, Cartagena de Indias, Colombia, Mayo 10-13, 1998

RESEARCH INTO THE STRUCTURAL PERFORMANCE OF INTERLOCKING BLOCK PAVEMENTS [1] [2]

John KNAPTON
Dr., Professor
UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE
Newcastle upon Tyne, United Kingdom

H. Murat ALGIN
Dr., Research Associate
UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE
Newcastle upon Tyne, United Kingdom

SUMMARY

The increase in the popularity of pavers as a road surfacing material has brought about the need to understand better the performance of pavements surfaced with pavers under traffic loading. One of the unique characteristics of the behaviour of pavers is the structural mechanics of interlock which causes the surface to adopt a mode of behaviour similar to that of conventional flexible materials [1]. The functional details of interlock were explained theoretically in the previous research [2, 3] by the Authors. Their resolution of the structural mechanics underpinning the behaviour of pavers leads to an important question: How does paver interlock affect entire pavement performance under combinations of various load applications and material properties and how can the structural performance of flexibly bedded units be integrated into the day to day design process? This paper seeks to resolve this question by using an axi-symmetrical finite element model in conjunction with previously reported theoretical research [2, 3] to examine the behaviour of a range of pavements surfaced with pavers.

1. INTRODUCTION

The purpose of the pavement structure components is to distribute traffic loads so that the stresses and strains developed by them in the subgrade and the sub-base are within the capacity of the materials in these layers. Figure 1 indicates the components of typical paver pavements. The purpose of the surface is to provide a durable, non skid, non slip, rideable and attractive upper surface to the pavement. Successful long-term performance of early paver pavements led to their widespread adoption, frequently on heavy duty pavement applications [1]. Observations of the performance of pavers surfacing trafficked pavements show that a significant advantage of paver surfacing is in the provision of the durability of concrete coupled with the flexibility of bituminous material [1].

The structural benefit provided by concrete block pavers has been defined in terms of interlock and Knapton [1] originally defined interlock as the inability of an individual paver to move independently of its neighbours. He categorised interlock into its three components viz.: rotational, vertical and horizontal.

Figure 1 illustrates how rotational interlock is achieved by providing edge restraint and how vertical interlock is provided by the paver joint filling material. Horizontal interlock is achieved by herringbone laying pattern or possibly by the use of a proprietory shaped paver. A pavement incorporating full interlock can sustain high levels of applied load. An interlocking paver pavement can be observed to behave in a manner whereby the pavers act together as a system such that the pavement has more of the character of a flexible homogeneous material rather than that of a collection of individual units behaving independently [1].

Knapton and Algin [2, 3] explained the structural mechanics of interlock by examining in detail the way in which patch loading applied to the wearing surface of pavers is transmitted as vertical stress into the underlying laying course material (usually referred to as bedding sand). The vertical stresses in the bedding sand were determined by considering vertical and rotational equilibrium of the pressures applied to the upper and lower horizontal paver surfaces. It was assumed that the paver is structurally rigid in relation to the bedding sand so a planar stress regime was assumed at the paver/sand interface. This assumption is justified by the values of Young's Modulus which would normally be applied to concrete (30 000 N/mm^2) and to sand in compression (300 N/mm^2) [2]. If tension were to be permitted to develop between the paver and the bedding sand the solution would be relatively straightforward. Tension cannot be developed in uncemented sand so it is assumed that compressive stress is developed in some parts of the interface and zero stress is developed elsewhere.

By ensuring vertical and rotational equilibrium, three equations can be developed (one vertical equilibrium and two rotational equilibrium equations, one in each orthogonal direction) which can be solved to obtain

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.

the values of the vertical stress in the bedding sand at each corner of the lower horizontal surface of the paver for the non-interlocking case. The stress at any point along the paver boundary can then be determined by calculating surface functions of vertical stress distribution. In the case of rectangular pavers, Figure 2 shows the five principal bedding sand stress patterns. The five cases can be best understood by considering them sequentially. Initially, in the tetrahedral vertical stress regime the applied upper surface patch load occupies one corner of the loaded paver. Bedding sand compressive stress occurs only at one lower paver corner and zero stress occurs at the remaining three corners. As the patch load occupies progressively more paver surface area, the situation illustrated is attained in which stresses are compressive at two paver corners (short-pentahedral or long-pentahedral vertical stress regime). Eventually, in the partial-hexahedral vertical stress regime the patch load creeps further over the paver so that three corners exhibit compressive bedding sand stress. Finally, compressive stress develops at each of the four corners in the absolute-hexahedral vertical stress regime. No matter how complex the patch loading might be, one of the five conditions in Figure 2 must represent the true state of vertical stress at the paver/bedding sand interface for a rectangular paver [2, 3].

In the case of interlock, the definition of interlock set out in Figure 1 is invoked as follows: If neighbouring pavers cannot move independently of one another, the bedding sand beneath them must accept similar compressive stress values along adjoining boundaries since any difference in neighbouring stresses would lead to differential strain in the sand and loss of vertical interlock. Therefore, along all of the paver boundaries, the stresses have been modified by taking the average of the two values along the sides of adjoining pavers. This is accomplished by assessing corner stress values and stress runout distances where appropriate. Figure 3 shows the fluctuations of these vertical stress distributions' surface functions in bedding sand for both the non-interlocking and the interlocking cases under 0,8 N/mm^2 applied tyre pressure resulting from a typical dual rear wheel conFiguration of a commercial vehicle travelling at an angle of zero to the orientation of the laying pattern [3].

The above thesis represents the first rigorous assessment of the true behaviour of a flexibly bedded (i.e. sand bedded) discrete pavement surface. It shows realistic levels of stresses and strains in the bedding material which explain many previously observed but until now unexplained phenomena [2, 3]. In particular, it explains why in some circumstances, initial paver surface deformation can occur when pavers are installed on granular materials which have not been fully compacted [2, 3].

This resolution of the structural mechanics underpinning the behaviour of pavers leads to an important question. How can the structural performance of flexibly bedded units be integrated into a day to day design process? Design procedures for pavers are based upon equivalencing pavers with conventional flexible pavement construction materials [4]. Therefore, it is important to consider the influence of pavement surfacing materials on the behaviour of a flexible pavement. This is now undertaken by assessing stresses and strains at critical pavement locations for surfacing materials of different mechanical properties and thickness.

2. APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD

The structural performance of paver pavements has been analysed using the finite element method. Applied load values, surface stiffness values, subgrade strength and surface thickness have been assessed by analysing pavements in which those factors have been varied. The properties adopted for each pavement used in the finite element model are shown in Table 1.

The finite element model shown in Figure 4 has been used in these analyses. The model comprises an axi-symmetric idealisation in which a cylindrical layered system of diameter 7 m and depth 2,5 m was modeled by 70 rectangular elements each having a node at each corner and midway along each side. Each model perimeter node was restrained horizontally and each node at the lowest level was restrained both horizontally and vertically. A concentrated load was applied at the uppermost node at the centre of the model. In order to simulate the effect of a circular patch load accurately, an extra very stiff axi-symmetric element, of radius equal to the radius of the load patch, was generated above the cylinder. The model shows how the inclusion of a very stiff element at the point of load application causes that element to remain almost horizontal as it deflects vertically. This shows that the true patch load is accurately modelled. The load patch radius was determined by assuming the load to be applied as pressures from 0,4 N/mm^2 to 3,2 N/mm^2. The model was graded such that smaller elements were concentrated near the point of load application where stress variation was steep and larger ones were generated at greater depth and radius. The Lusas finite element package [5] licensed to Newcastle University was used to generate the model.

The principal UK paver pavement design guide, BS 7533 : 1992 [4] uses conventional flexible pavement design technology with a one to one equivalence factor between pavers and asphalt, i.e. 100 mm thickness of bedding sand and pavers is equivalent structurally with 100 mm asphalt. Whilst this assumption has been proven through experience, as yet there has been no research directed towards defining the mechanics underpinning the assumption. By using the finite element model shown in Figure 4 with 7 surfacing material elastic modulus values of between 100 N/mm^2 and 16 000 N/mm^2 (i.e. values beyond the range of those which practical surfacing materials normally provide) and surface thickness

values similarly encompassing those frequently provided, it has been possible to assess the response of the whole pavement to the full range of surface material characteristics. The pavement response was defined in terms of surface deflection, tensile stress and compressive stress. The results presented in this paper allow the sensitivity of these responses to changes in the surfacing properties to be assessed for various subgrade support conditions characterised by California Bearing Ratio (CBR) values of 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 7 %, 10 % and 30 %. The model was based on the linear elastic theory in which the materials of each layer are assumed to be isotropic, homogenous and linearly elastic. The model has been analysed for surface thicknesses of 110 mm, 120 mm, 130 mm, 140 mm, 150 mm, 160 mm, 170 mm, 180 mm, 190 mm and 200 mm for 1 million repetitions of equivalent wheel loads of 100 kN, 200 kN, 400 kN and 800 kN.

3. IMPLICATION OF RESULTS

Figure 5(a) indicates the effect of the material properties and the variations in the applied load on the critical deflections of a model having a surfacing thickness of 110 mm. The maximum deflection on the surface decreases rapidly with increasing subgrade strength until it attains an almost stable level for subgrade CBR values in excess of 10 %. Figure 5(a) shows that the maximum deflection of the surface reduces slightly with an increase in surface stiffness and with a reduction in load magnitude. As subgrade CBR values fall below 5 %, the maximum deflection of the surface increases rapidly with an increase in the load magnitude. Therefore, Figure 5(a) confirms the subgrade improvement layer (capping layer) requirement of BS 7533 : 1992 [4] which recommends that if the CBR of the subgrade exceeds 5 %, the subgrade improvement layer is not required.

The influence of a pavement surface has been assessed by removing the surface and applying the loads directly onto the base course in order to understand how the presence of a surface influences deflection. The results of this analysis are shown in Figure 5(b) which illustrates a similar relationship. A comparison of Figures 5(a) and 5(b) shows that the CBR of the subgrade has much grater influence than the surface stiffness on the surface deflection. In particular, the critical deflection is very sensitive to a change in subgrade CBR value in heavy load applications. In addition, the presence of the surface course increases the stability of a pavement by preventing the decrease in its deflection.

Figure 6(a) indicates the influence of surface stiffness and subgrade CBR values on the maximum principal stresses (tensile) at the underside of the base. Figure 6(b) shows the relationship when loads are applied directly onto the base course. The critical tensile stresses decrease to an almost stable level with an increase in subgrade CBR value and reduce significantly with a reduction in load magnitude. The maximum tensile stresses slightly increase with an increase in surface stiffness, and attain an almost stable level with an increase in subgrade CBR value. However, for relatively low load magnitudes, an increase in subgrade CBR value has little influence on tensile stress. As subgrade CBR values fall below 5%, the maximum tensile stress increases significantly with an increase in load magnitude. These increases become significant in heavy load applications. Figure 6(a) shows that a change in the surface stiffness from 100 N/mm^2 to 16 000 N/mm^2 with a CBR of 2 % leads to a change of only 6 % in the tensile stress resulting from concentrated loads ranging from 100 kN to 800 kN. Most practical surfacing materials have stiffnesses of between 2 000 N/mm^2 and 5 000 N/mm^2 which would lead to a variation in stress values in the base of less than 1,5 %. Figure 6 shows that large variations in the surface stiffness have little effect on the performance of the base course and the changes in the maximum tensile stresses are insensitive for subgrade CBR values in excess of 10 %.

Figure 7(a) indicates the changes in minimum principal stresses (compression) at the underside of the base in terms of the variations of surface stiffness, number of load applications and subgrade CBR values. Figure 7(b) shows the stresses when loads are applied directly onto the base course. At subgrade CBR values less than 5 %, particularly in both relatively low surface stiffness and load magnitudes, the compressive stress increases rapidly with an increase in load magnitude, and then it attains an almost stable level with an increases in subgrade CBR value. In the case of a relatively high surface stiffness, the increase in compressive stress in insensitive to an increase in subgrade CBR. The average increase in the compressive stress is only 6 %. Figure 6(a) shows that a change in surface stiffness from 100 N/mm^2 to 16 000 N/mm^2 with a subgrade CBR of 2 % leads to a decrease of 25 % in the compressive stress resulting from patch loads ranging from 100 kN to 800 kN. Surface stiffness varying between 2 000 N/mm^2 and 5 000 N/mm^2 leads to a variation in compressive stress of less than 1 %. Figure 7 shows that large variations in surface stiffness have little effect on the performance of the pavement base.

Figures 8, 9 and 10 show some of the results achieved in analyses which focus upon determining the influence of surface thickness on the performance of the model. Figure 8 indicates the effect of the surface thickness on critical deflections for various surface stiffnesses. The maximum deflection decreases until it attains an almost stable level with an increase in both the surface thickness and the surface stiffness. The most sensitive change in deflection occurs in the case of relatively low surface stiffness. When surface stiffness exceeds 7 000 N/mm^2, the changes in the deflections have a minor effect on performance. However changes in surface thickness have a direct influence on maximum deflection particularly in relatively low surface

stiffness pavements. Therefore, an increase in surface thickness makes a pavement more stable.

Figure 9 shows the influence of surface thickness and surface stiffness on critical tensile stresses at the underside of the base. The critical tensile stress decreases until it attains an almost stable level with a increase in surface thickness and stiffness, especially in high surface thickness pavement. The curves converge at a surface stiffness of 1 500 N/mm^2. This means that as the stiffness falls below 1 500 N/mm^2, maximum principal stresses increase with a reduction in surface thickness. However, when the stiffness excesses 1 500 N/mm^2, the increase in the surface thickness reduces tensile stresses rapidly. Variations in surface stiffness causes minor effects on critical tensile stress distributions for a thickness of 110 mm.

Figure 10 shows the effect of surface thickness and stiffness on the minimum principal stresses (compressive) at the underside of the base. The critical compressive stresses decrease to the turning points with an increase in surface thickness and stiffness. Each curve rapidly decreases to a different turning-point, then attains an almost stable level. These turning-points are between surface stiffnesses of 1 000 N/mm^2 and 4 500 N/mm^2. An increase in stiffness after the turning-points of the curves has little influence on performance. Therefore, the use of surface material having a stiffness less than 4 500 N/mm^2 offers the same performance as material whose stiffness is higher than 4 500 N/mm^2.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The structural performance of paver pavements has been analysed using an axi-symmetrical finite element model based on linear elastic theory. The surface was modelled using the implications of the bedding sand stress calculation method [2, 3]. Applied load values, surface stiffness values, subgrade strength and surface thickness have been assessed by analysing pavements in which those factors have been varied. The paper illustrates the effect of those variables on critical deflections and on tensile and compressive stresses. The study has shown that the load spreading ability of a paver pavement is substantially dependent of surface stability. The surface course increases the stability of a pavement by influencing surface deflection. As subgrade CBR values fall below 5 %, the maximum deflection of the pavement surface increases rapidly with an increase in the load magnitude. This confirms the subgrade improvement layer (capping layer) requirement of BS 7533 : 1992 [4]. The CBR of the subgrade has a much greater influence than the surface stiffness on surface deflection. In particular, critical deflection is very sensitive to a change in the subgrade CBR value in heavy load applications. As subgrade CBR values fall below 5 %, maximum tensile stresses become more sensitive to load magnitude. This is particularly significant in heavy load applications. Large variations in surface stiffness have a minor effect on the performance of the base course and changes in the maximum tensile stresses are insensitive for CBR values in excess of 10 %. Changes in surface thickness have a direct influence on maximum deflections, particularly in relatively low surface stiffness pavement. Therefore, an increase in surface thickness makes the system more stable. The use of surface material having stiffnesses between 1 000 N/mm^2 and 4 500 N/mm^2 offers similar performance to pavements surfaced with material of stiffness higher than 4 500 N/mm^2. Additionally, compressive stresses are sensitive to change in this range according to the increase in surface thickness. Therefore, surface material thickness should be a premier consideration in the design of paver pavement.

5. REFERENCES

1. KNAPTON, John and BARBER, S.D. UK Research Into Concrete Block Pavement Design. -- P.33-37. // In: CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (1 : 1980 : Newcastle upon Tyne). Proceedings. -- Newcastle upon Tyne : CBP, 1980. -- P.v.

2. KNAPTON, John and ALGIN, Halil M. The Mathematical Solution to Interlock in Concrete Block Paving. -- P.261-278. // In: CONCRETE BLOCK PAVING : PAVE ISRAEL'96 : INTERNATIONAL CONFERENCE (5 : 1996 : Tel-Aviv). Proceedings. -- Tel-Aviv : Technion, 1996. -- 727P.

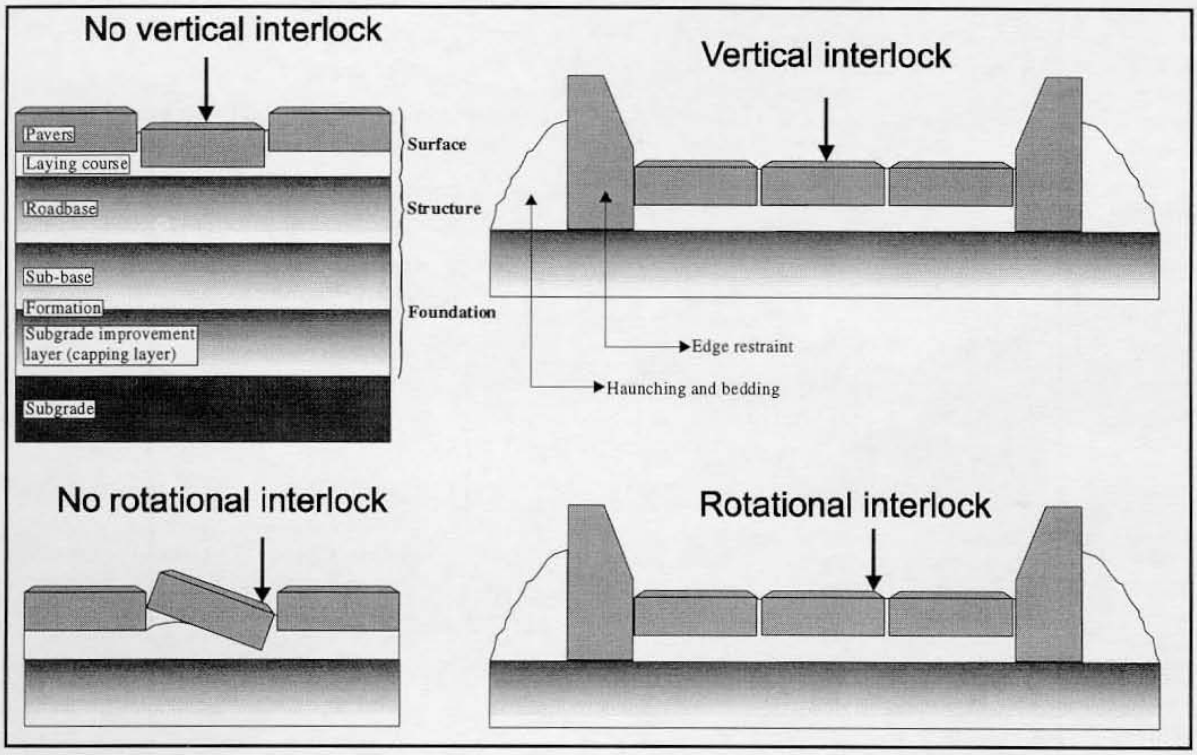
3. ALGIN, Halil M. The Behaviour of Flexibly Bedded Concrete Paver Pavements. -- Newcastle upon Tyne : University of Newcastle upon Tyne, 1996. -- P.v. -- Ph.D. Thesis.

4. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. The Structural Design of Pavements Surfaced with Clay Pavers or Concrete Block Paving. -- London : BSI, 1992. -- 16P. -- (BS 7533 : 1992).

5. FEA LTD. Manuals for LUSAS Software Suite of Programmes. -- London : S.e, 1994. -- P.v.

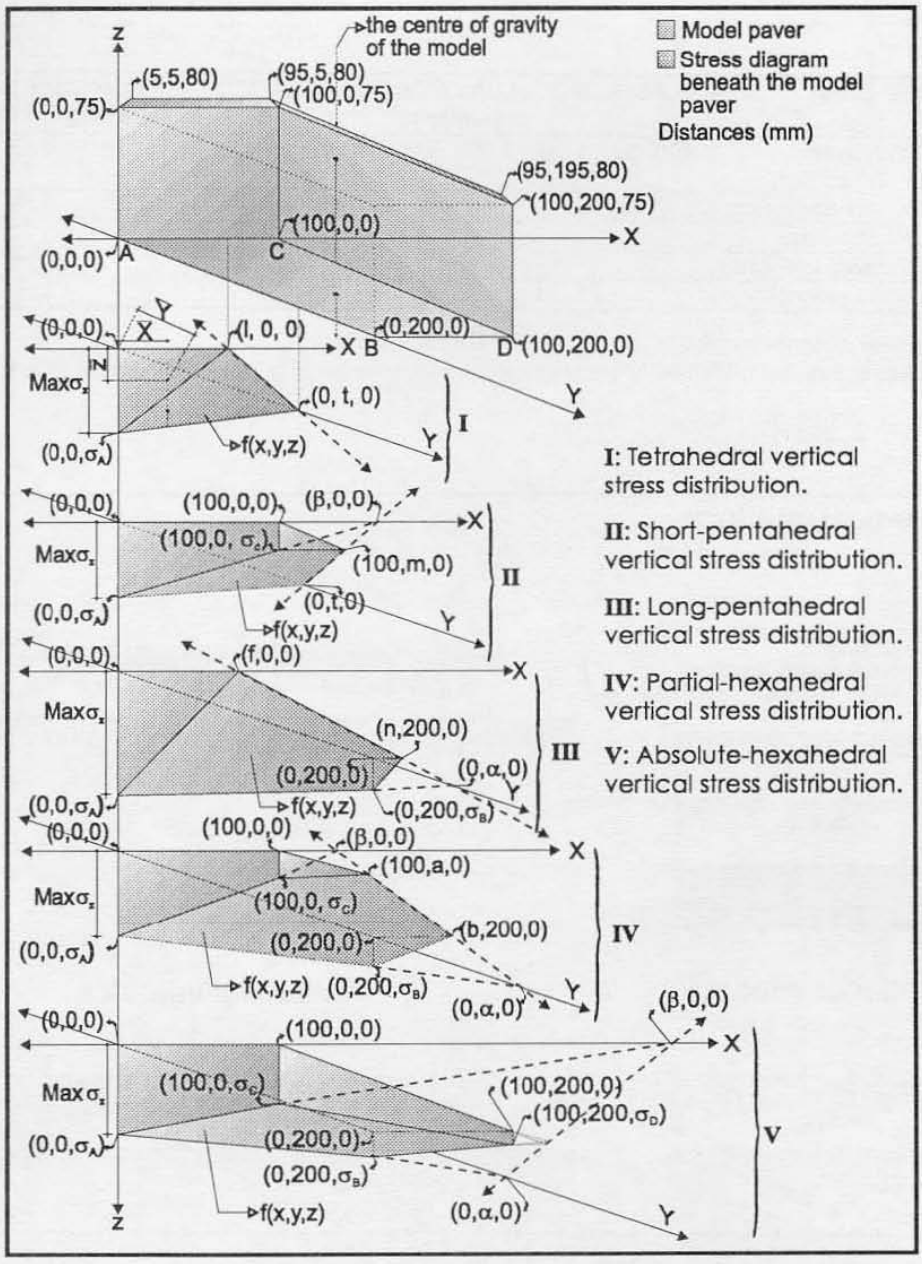
LAYER/ *CAPA*	ELASTIC MODULUS / *MÓDULO ELÁSTICO* (N/MM^2)	POISSONS'S RATIO *MÓDULO DE POISSONS*
Surfacing (pavers) *Superficie (adoquines)*	100, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000, 16 000	0,15
Base Course / *Base*	30 000	0,15
Sub-base / *Sub-base*	400	0,20
Capping / *Subrasante mejorada*	150	0,25
Subgrade / *Subrasante*	20, 30, 40, 50, 70, 100, 300	0,25

Table 1. Pavement material properties used in the finite element model.
Tabla 1. *Propiedades de los materiales para pavimentos utilizados en este modelo de elementos finitos.*



Non vertical interlock / *Sin trabazón vertical* - Vertical interlock / *Con tabazón vertical* - Non rotational interlock / *Sin trabazón rotacional* - Rotational interlock / *Con trabazón rotacional* - Pavers / *Adoquines* - Laying course / *Capa de arena* - Roadbase / *Base* - Sub-base / *Subbase* - Formation / *Cota de rasante* - Subgrade improvement layer (capping layer) / *Subrasante mejorada* - Subgrade / *Subrasante* - Surface / *Superficie* - Structure / *Estructura* - Foundation / *Fundación* - Edge restraint / *Confinamiento de borde* - Haunching and bedding / *Contrafuerte y base.*

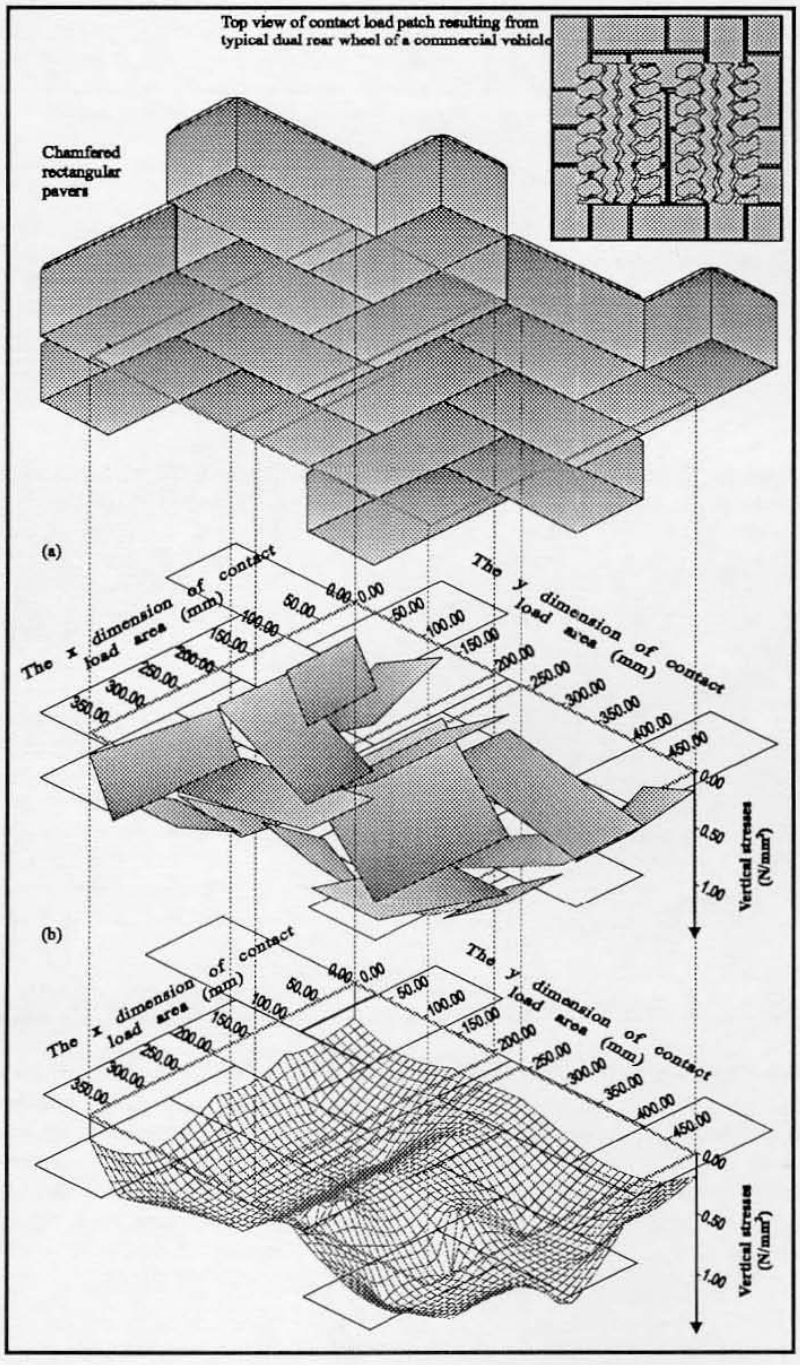
Figure 1. Vertical and rotational interlock, and a typical cross section of a pavement surfaced with pavers. These components of interlock are developed during paver installation.
Figura 1. *Trabazón vertical y rotacional, y una sección vertical típica de un pavimento recubierto con adoquines. Esos componentes de la trabazón se desarrollan durante la instalación de los adoquines.*



Model paver / *Adoquín modelo* - Stress diagram beneath the model paver / *Diagrama de esfuerzo debajo del adoquín modelo* - Distances / *Medidas (distancias)* - I. Tetraheddral vertical stress distributionl / *Distribución tetraédrica de los espuerzos verticales* - II. Short-pentahedral vertical stress distributionl / *Distribución pentaedrica corta de los esfuerzos verticales* - III. . Long-pentahedral vertical stress distributionl / *Distribución pentaedrica larga de los esfuerzos verticales.* - IV. Partial-hexahedral vertical stress distribution / *Distribución parcialmente exhaédrica de los esfuerzos verticales* - V. Absolutel-hexahedral vertical stress distribution / *Distribución absolutamente exaédrica de los esfuerzos verticales.*- The center of gravity of the model / *Centro de gravedad del modelo.*

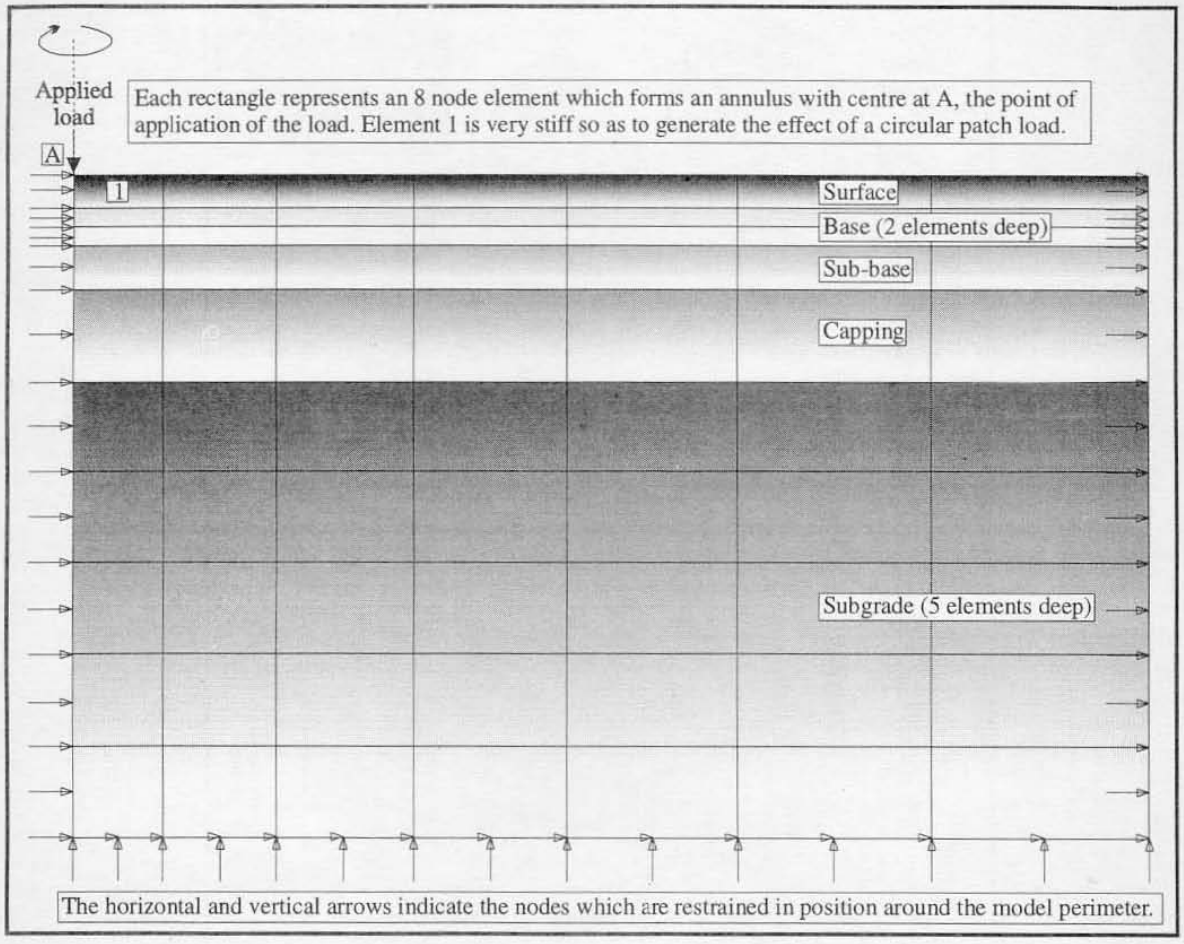
Figure 2. Compressive stress regimes beneath paver when patch load covers part of a paver surface. Compressive stress develops initially beneath one corner only and the stress block takes the form of a tetrahedron. Stress remains compressive for a length of "t" along one 200 mm long side and for a length "l" along one 100 mm short side. As the load patch progressively covers more of the paver wearing surface, stress develop progressively from corner to corner until eventually positive stress values occur beneath each paver corner.

Figura 2. *Regímenes del esfuerzo a la compresión debajo de un adoquín cuando la huella de carga cubre parcialmente su superficie. El esfuerzo a la compresión se desarrolla inicialmente sólo debajo de una esquina y el bloque de esfuerzos toma la forma de un tetraedro. El esfuerzo de compresión se extiende a lo largo de una distancia "t" en la dirección del lado largo de 200 mm y a lo largo de una distancia "l" en la dirección del lado corto de 100 mm. A medida que la huella cubre progresivamente la superficie, el esfuerzo avanza progresivamente de esquina a esquina hasta que, eventualmente, se observan esfuerzos de compresión debajo de todas las esquinas.*



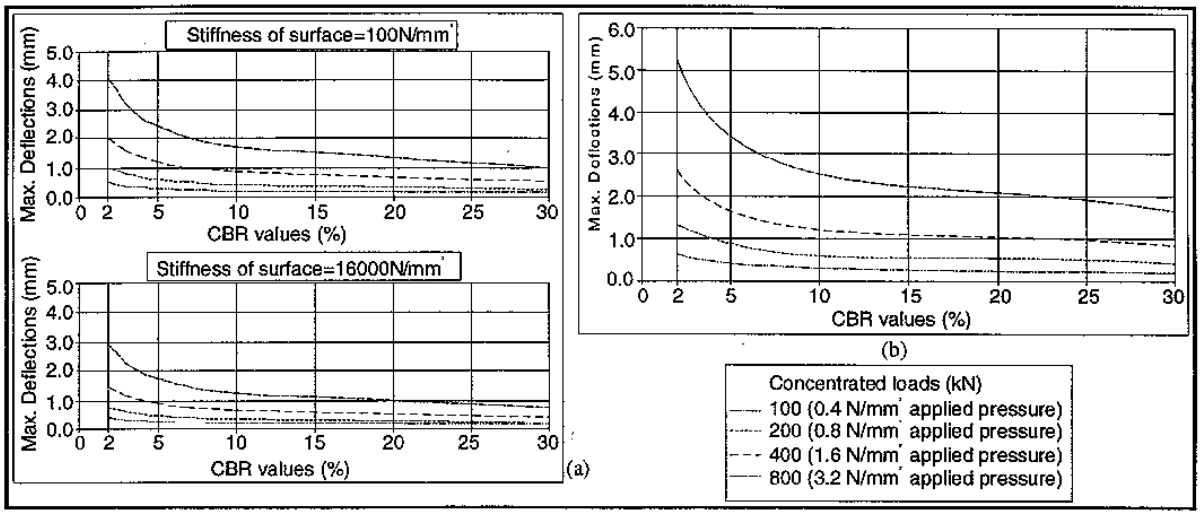
Top view of contact load patch resulting from typical dual rear wheel of a commercial vehicle / *Vista superior, en planta, de la huella típica de una llanta trasera de un vehículo comercial* - Chamfered rectangular paver / *Adoquín rectangular biselado* - The x dimension of contat load area / *Dimensión x de la huella* - The y dimension of contact load area / *Dimensión y de la huella* - Vertical stresses / *Esfuerzos verticales.*

Figure 3. Typical bedding sand functional surface distributions of vertical compressive stresses under 0,8 N/mm2 applied tyre pressure for vehicle traveling at angle zero to the orientation of the laying pattern. (a) indicates the surface functions of the stress regimes when pavers behave individually (non-interlocking case). (b) shows the surface function of the stress distribution when pavers behave systematically (interlocking case).
Figura 3. *Distribución típica de los esfuerzos verticales de servicio en la superficie de la capa de arena bajo una presión de llanta aplicada de 0,8 N/mm^2, para un vehículo que viaja a un ángulo de 0 ° con respecto a la orientación de patrón de colocación. (a) muestra los valores del esfuerzo en la superficie cuando los adoquines se comportan individualmente (caso sin trabazón). (b) muestra los valores del esfuerzo en la superficie cuando los adoquines se comportan como un sistema (caso con trabazón).*



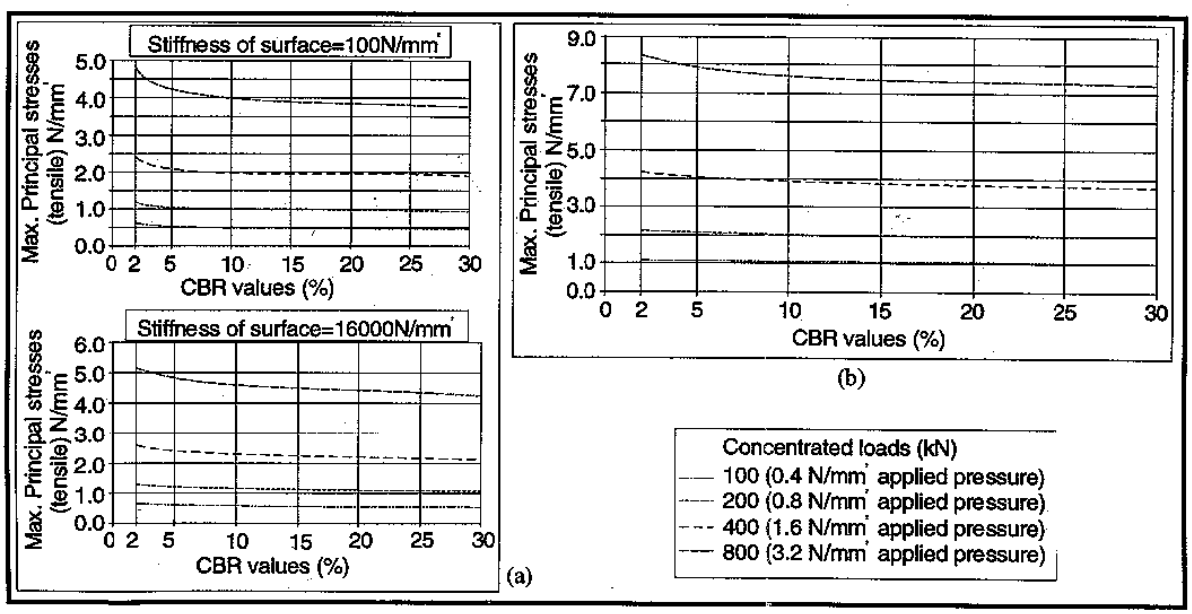
Applied load / *Carga aplicada* - Each rectangle represents an 8 node element which forms and annulus with centre at A, the point of application of the load. Element 1 is very stiff so as to benerate the effect of a circular patch load / *Cada rectángulo representa un elemento de 8 nodos que forma un anillo con centro en A, el punto de aplicación de la carga. El elemento 1 es muy rígido conel fin de generar el efecto de una huella circular* - Surface / *Superficie* - Base (2 elements deep) / *Base (2 elementos de profundidad)* - Sub-base / *Subbase* - Capping / *Subrasante mejorada* - Subgrade (5 elements deep) / *Subrasante (5 elementos de profundidad)* - The horizontal and vertical arrows indicate the nodes which are restrained in position around the model perimeter / *Las flechas verticales y horizontales indican los nodos con posición restringida alrededor del perimetro del modelo.*

Figure 4. Axi-symmetric finite element idealization is used for performance analyses of paver pavements.
Figura 4. *Idealización de elementos finitos axi-simétricos utilizada para el análisis de comportamiento de los pavimentos de adoquines.*



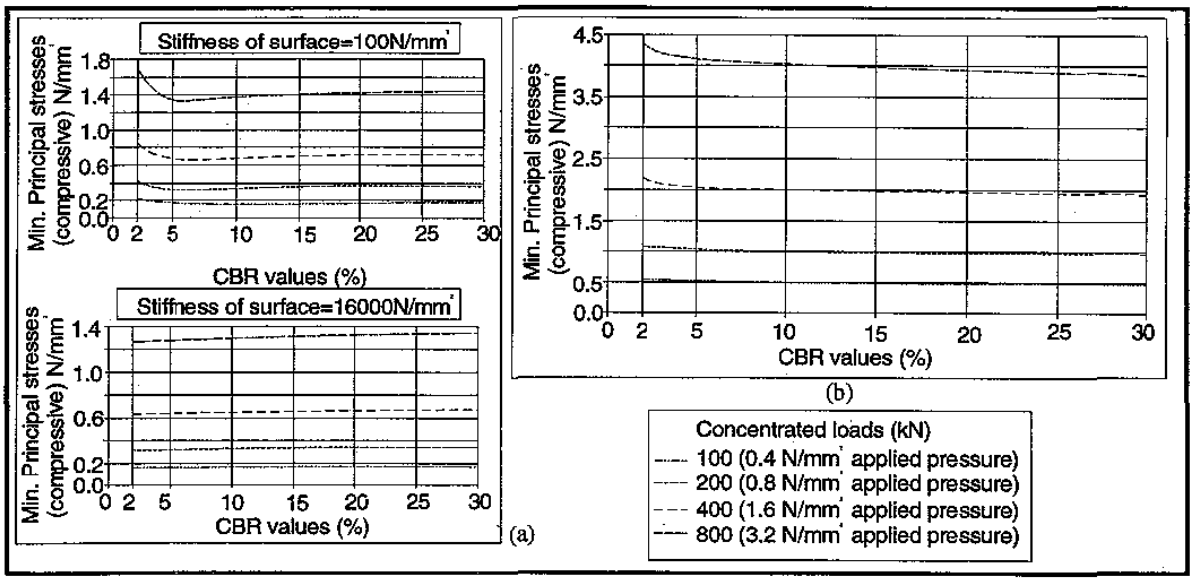
DEFLEXION MÁXIMA (mm) vs VALORES DE CBR (%)
Stiffness of surface / *Rigidez de la superficie* - Concentrated loads / *Cargas concentradas* - Applied pressure / *Presión aplicada.*

Figure 5. The effect of subgrade strength on critical deflections. (a) indicates the effect in terms of surface stiffness for a surface thickness of 110 mm. (b) shows the effect when loads are applied directly onto the base course.
Figura 5. *Efecto de la rigidez de la subrasante en las deflexiones críticas. (a) muestra el efecto en términos de la rigidez de la superficie para un espesor de la superficie de 110 mm. (b) muestra el efecto cuando la carga se aplica directamente sobre la base.*



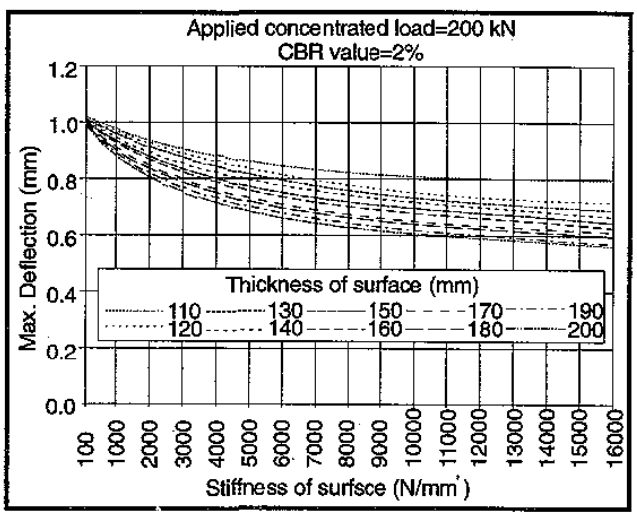
ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS (TRACCIÓN) (N/mm²) vs VALORES DE CBR (%)
(La traducción de términos como en la Figura 5).

Figure 6. Relationship between critical tensile stresses at the underside of the base course and subgrade CBR values. (a) indicates the relationship for various surface stiffnesses and a surface thickness of 110 mm. (b) shows the relationship when loads are applied directly onto the base course.
Figure 6. *Relación entre el esfuerzo de tracción crítico en la parte de abajo de la base y los valores de CBR de la subrasante. (a) muestra la variación para una superficie de 110 mm de espesor y rigidez variable. (b) muestra el efecto cuando la carga se aplica directamente sobre la base.*



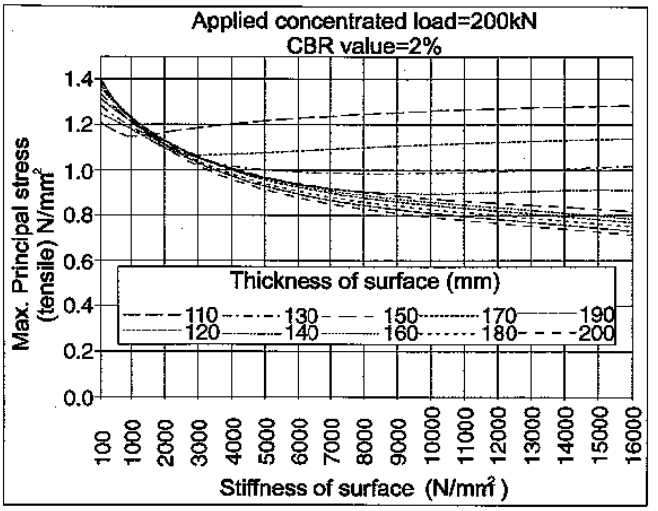
ESFUERZOS PRINCIPALES MÍNIMOS (COMPRESIÓN) (N/mm²) vs VALORES DE CBR (%)
(La traducción de términos como en la Figura 5).

Figure 7. The influence of subgrade CBR values on critical compressive stresses at the underside of the base course. (a) indicates the effect in terms of surface stiffness for a surface thickness of 110 mm. (b) shows the relationship when loads are applied directly onto the base course.
Figure 7. *Influencia del CBR de la subrasante sobre los esfuerzos críticos a compresión en la parte de abajo de la base. (a) muestra el efecto en términos de la rigidez de la superficie para un espesor de superficie de 110 mm. (b) muestra el efecto cuando la carga se aplica directamente sobre la base.*



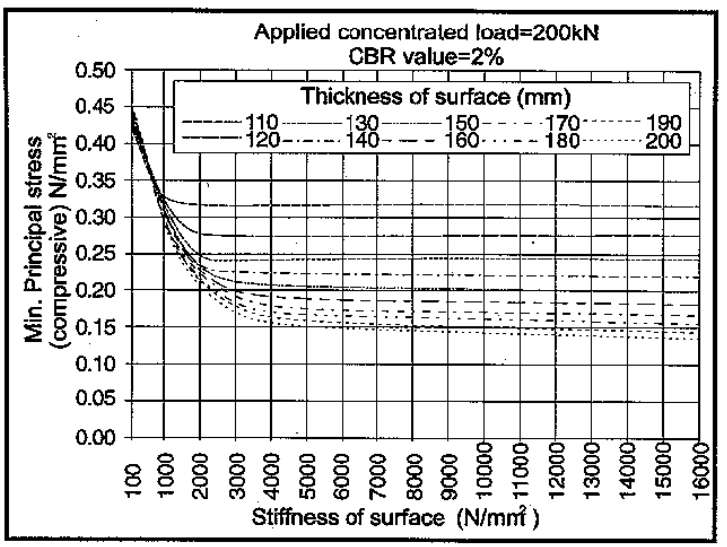
DEFLEXIÓN MÁXIMA (mm) vs RIGIDEZ DE LA SUPERFICIE (N/mm²)
Applied concentrated load */ Carga concentrada aplicada* - Thickness of surface */ Espesor de la superficie.*

Figure 8. The effect of surface stiffness and thickness on critical deflections.
Figure 8. *Efecto de la rigidez y del espesor de la superficie en las deflexiones críticas.*



ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS (TRACCIÓN) (N/mm²) vs RIGIDEZ DE LA SUPERFICIE (N/mm²)
Applied concentrated load / *Carga concentrada aplicada* - Stiffness of surface / *Rigidez de la superficie.*

Figure 9. The effect of surface stiffness and thickness on critical tensile stresses at the underside of the base course.
Figure 9. *Efecto de la rigidez y del espesor de la superficie sobre los esfuerzos críticos a la tracción en la parte de abajo de la base.*



ESFUERZOS PRINCIPALES MÍNIMOS (COMPRESIÓN) (N/mm²) vs RIGIDEZ DE LA SUPERFICIE (N/mm²)
Applied concentrated load / *Carga concentrada aplicada* - Stiffness of surface / *Rigidez de la superficie.*

Figure 10. The effect of surface stiffness and thickness on critical compressive stresses at the underside of the base course.
Figure 10. *Efecto de la rigidez y del espesor de la superficie sobre los esfuerzos críticos a la compresión en la parte de abajo de la base.*

INVESTIGACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS DE ADOQUINES [3] [4]

John KNAPTON
Dr., Profesor
UNIVERSIDAD DE NEWCASTLE UPON TYNE
Newcastle upon Tyne, Reino Unido

H. Murat ALGIN
Dr., Investigador Asociado
UNIVERSIDAD DE NEWCASTLE UPON TYNE
Newcastle upon Tyne, Reino Unido

RESUMEN

El aumento de la popularidad del adoquín como material de recubrimiento de superficies de vías ha traído la necesidad de entender mejor el funcionamiento de las superficies de pavimentos con adoquines bajo cargas de tráfico. Una de las características únicas del comportamiento de los adoquines es la estructura mecánica de la trabazón la cual lleva a que la superficie adopte un modo de funcionamiento similar al de un material flexible convencional [1]. El funcionamiento detallado de la trabazón fue explicado teóricamente en investigaciones previas [2, 3] por los autores de esta ponencia. Sus análisis de la mecánica estructural del funcionamiento del apoyo debajo de los adoquines lleva a una importante pregunta: ¿De que manera la trabazón de los adoquines afecta el funcionamiento de todo el pavimento bajo la combinación de varias cargas aplicadas y las propiedades del material, y cómo puede el funcionamiento estructural de la capa de unidades colocadas sobre apoyos flexibles ser integrado en el proceso diario de diseño?. Esta ponencia busca resolver esta pregunta usando un modelo de elementos finitos de simetría axial junto con previos reportes teóricos de investigaciones [2, 3] para examinar el comportamiento de una extensión de superficie pavimentada con adoquines.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de los componentes de la estructura de los pavimentos es distribuir las cargas de tráfico para que los esfuerzos y las deformaciones desarrolladas por ellas en las capas de subbase y subrasante estén dentro de la capacidad de los materiales de estas capas. La Figura 1 indica los componentes típicos de un pavimento de adoquines. El propósito de la capa superficial de un pavimento es brindar una superficie durable, no resbalosa para los peatones, no deslizable para los vehículos, transitable y atractiva. Afortunadamente el largo período de funcionamiento de los pavimentos de adoquines llevó rápidamente a su aceptación generalizada, frecuentemente en pavimentos para tráfico pesado [1]. Las observaciones del comportamiento de los adoquines que recubren pavimentos con tráfico muestran que una significativa ventaja de las superficies de adoquines es la provisión de la durabilidad del concreto unido a la flexibilidad de los materiales bituminosos [1].

El beneficio estructural dado por los adoquines de concreto ha estado definido en términos de la trabazón y Knapton [1] originalmente definió trabazón como la inhabilidad de un adoquín para moverse independientemente de los más cercanos. Él categorizó la trabazón a través de sus tres componentes: rotacional, vertical y horizontal.

La Figura 1 ilustra cómo la trabazón rotacional se logra por la provisión de los confinamientos laterales y la trabazón vertical está dada por el material de lleno de la junta. La trabazón horizontal está dada por el uso del patrón de espina de pescado o, posiblemente, por el uso de adoquines con formas adecuadas. Un pavimento que tenga trabazón completa puede soportar altos niveles de aplicación de cargas. Se puede observar que un pavimento de adoquines se comporta de una manera tal que los adoquines actúan conjuntamente como un sistema semejante al de un pavimento que tiene más un carácter de material homogéneo y flexible en vez de un conjunto de unidades individuales comportándose independientemente [1].

Knapton y Algin [2, 3] explicaron la mecánica estructural de la trabazón, al examinar, en detalle, la manera en la cual la huella de la carga sobre al superficie de desgaste, es transmitida como un esfuerzo vertical al material de la capa subyacente (usualmente se refiere a la capa de arena). El esfuerzo vertical en la capa de arena fue determinado al considerar el equilibrio vertical y rotacional de las presiones aplicadas en las caras superior e inferior de los adoquines. Se asumió que el adoquín es estructuralmente rígido con relación a la capa de arena, por lo cual se asumió entonces un régimen de esfuerzo plano en la interfase adoquín/arena.

---

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 Claudia L. Florez y Germán G. Madrid, no sometida a la aprobación de los autores.

Esta suposición es justificada por los valores del módulo de Young que normalmente se le aplica al concreto (30 000N/mm^2) y para la arena bajo compresión (300 N/mm^2) [2]. Si se permitiera que se desarrollara tracción entre el adoquín y la capa de arena, la solución podría ser relativamente fácil. No se puede desarrollar tracción en arena no cementada por lo cual se asume que el esfuerzo a compresión se desarrolla en algunas partes de la interfase y en el resto el esfuerzo es cero.

Al asegurar el equilibrio vertical y rotacional, se pueden desarrollar tres ecuaciones (una de equilibrio vertical y dos de equilibrio rotacional, una en cada dirección ortogonal) las cuales pueden ser resueltas para obtener los valores de los esfuerzos verticales en la capa de arena en cada esquina de la cara inferior del adoquín en el caso de que no se tenga tabazón. El esfuerzo en algún punto a lo largo del borde del adoquín puede ser entonces determinado calculando la función de la distribución vertical de esfuerzo superficial. En el caso de adoquines rectangulares, la Figura 2 muestra los cinco patrones de esfuerzos principales en la capa de arena. Los cinco casos pueden ser entendidos mejor al considerarlos en secuencia. Inicialmente en el régimen tetraédrico de esfuerzos verticales aplicados en la cara superior, la huella ocupa una esquina del adoquín cargado. En la capa de arena los esfuerzos de compresión ocurren sólo en una esquina de la cara inferior del adoquín y los esfuerzos cero ocurren en las tres esquinas restantes. A medida que la huella de la carga ocupa progresivamente más área superficial del adoquín, se logra la situación mostrada en la cual los esfuerzos son de compresión en dos esquinas del adoquín (régimen de esfuerzo de pentaedros cortos o de pentaedros largos). Eventualmente, en el régimen de esfuerzos vertical de hexaedro parcial, la huella de la carga se arrastra o se mueve lentamente hacia dentro del adoquín, entonces las tres esquinas presentan esfuerzos de compresión sobre la capa de arena. Finalmente se desarrolla esfuerzo de compresión en cada una de las cuatro esquinas en la capa de arena, en el régimen de esfuerzos verticales de hexaedro completo. No importa que tan compleja pueda ser la huella de la carga, una de las cinco condiciones que aparecen en la Figura 2 debe representar el verdadero estado del esfuerzo vertical en la interfase adoquín/capa de arena para un adoquín rectangular [2, 3].

En el caso de existir la trabazón, la definición de trabazón dada en la Figura 1 se invoca de la siguiente manea: si los adoquines próximos no pueden moverse independientemente unos de los otros, la capa de arena debajo de ellos tiene que soportar valores de esfuerzos de compresión verticales similares a lo largo de los límites entre adoquines, dado que cualquier diferencia en los esfuerzos vecinos, llevaría a deformaciones diferenciales en la capa de arena y a la perdida de la trabazón vertical. Por esto, a lo largo de todo el límite del cada adoquín, se han modificado los esfuerzos al tomar el promedio de los dos valores de las caras adjuntas de los adoquines vecinos. Ésto se cumple al evaluar los valores de los esfuerzos en las esquinas y la distancia a la cual desaparecen los esfuerzos cuando sea apropiado. La Figura 3 muestra los cambios de las funciones de la superficie de la distribución de esfuerzos verticales, en la capa de arena para ambos casos, sin trabazón y con trabazón, bajo una presión de llanta aplica de 0,8 N/mm^2 resultante de una configuración típica de llanta doble trasera de un vehículo comercial que viaja con un ángulo de 0 ° con respecto a la orientación del patrón de colocación.

La tesis anterior representa la primera evaluación rigurosa del verdadero comportamiento de una superficie de pavimento discreta apoyada sobare un estrato flexible (capa de arena). Esto muestra un nivel real de esfuerzos y deformaciones en el material de la capa que explica muchas observaciones previamente hechas pero que hasta ahora eran un fenómeno inexplicado [2, 3]. En particular, esto explica por qué, en algunas circunstancias, la deformación inicial de la superficie del adoquín puede ocurrir cuando los adoquines son instalados sobre material granular el cual no ha sido completamente compactado [2, 3].

Esta solución dada a la mecánica estructural que soporta el comportamiento de los adoquines lleva a una pregunta importante. ¿Cómo puede el comportamiento estructural de una estructura de unidades apoyadas sobre una capa flexible, ser integrada a los procedimientos de diseño del día a día?. Los procedimientos de diseño para pavimentos de adoquines se basan en hacer equivalentes los adoquines con los materiales tradicionales de construcción de pavimentos flexibles [4]. Por eso, es importante considerar la influencia del material de superficie en el comportamiento de los pavimentos flexibles. Esto se intenta ahora, asignando esfuerzos y deformaciones en los puntos críticos del pavimento para materiales de superficie de distintas propiedades mecánicas y espesores.

2. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines ha sido analizado usando el método de elementos finitos. Se han evaluado los valores de las cargas, los valores de rigidez de la superficie, los esfuerzos de subbase y los espesores de la superficie mediante el análisis de pavimentos en los cuales estos factores han sido variados. Las propiedades adoptadas para cada pavimento usado en el modelo de elementos finitos se muestran en la Tabla 1.

El modelo de elementos finitos que ha sido usado en estos análisis se muestra en la Figura 4. El modelo comprende una idealización de simetría axial en la cual un sistema de capas cilíndrico, de 7 m de diámetro y 2,5 m de profundidad, fue modelado mediante 70 elementos rectangulares, cada uno con

un nodo en cada una de las esquinas y en los puntos medios de cada una de los lados. Cada nodo perimetral del modelo fue restringido horizontalmente y cada nodo en el nivel más bajo fue restringido horizontal y verticalmente. Se aplicó una carga concentrada en el nodo más alto del centro del modelo. Para simular exactamente el efecto de una huella circular originada por la carga, se generó, sobre el cilindro, un elemento de simetría axial, extra rígido, de radio igual al radio de la huella de carga. El modelo muestra cómo la inclusión de un elemento muy rígido en el punto de aplicación de la carga causa que el elemento permanezca casi horizontal a medida que se deflecta verticalmente. Esto demuestra que la verdadera huella de la carga se ha modelado de manera precisa, El radio de la huella de la carga fue determinado asumiendo la carga como una presión entre 0,4 N/mm^2 y 3.2 N/mm^2. El modelo se graduó de manea que se colocaron elementos más pequeños cerca del punto de aplicación de la carga, donde la variación de esfuerzos era más pronunciada y se tenían esfuerzos mayores a mayor profundidad y radio. El paquete Lusas de elementos finitos [5] patentado por La Universidad de Newcastle fue usado en la generación del modelo.

La principal guía de diseño del Reino Unido, la Norma BS 7533 : 1992 [4] usa la tecnología convencional de diseño de pavimento flexible con un factor de equivalencia de uno a uno entre adoquines y asfalto; por ejemplo, 100 mm de espesor de capa de arena y adoquines son equivalentes, estructuralmente, a 100 mm de asfalto. Si bien esta suposición ha sido demostrada a través de la experiencia, todavía no ha habido investigación dirigida hacia la definición de la mecánica que soporte esta suposición. Usando el modelo de elementos finitos mostrado en la Figura 4 con 7 valores del módulo elástico del material de superficie, entre 100 n/mm^2 y 16 000 n/mm^2 (es decir, valores que van más allá de los rangos en los cuales se encuentran normalmente los materiales de superficie) y valores del espesor de la superficie abarcando los que frecuentemente se tienen, ha sido posible evaluar la respuesta de todo el pavimento al rango completo de características de los materiales de superficie. El pavimento resultante fue definido en términos de deflexión superficial, esfuerzos de tracción y esfuerzos de compresión.

Los resultados presentados en esta ponencia permiten evaluar la sensibilidad de estas respuestas los cambios en las propiedades de la superficie para varias condiciones de soporte de la subrasante, caracterizados mediante valores de la Relación de Soporte de California – CBR del 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 7 %, 10 % y 30 %. El modelo se basó en la teoría lineal elástica en la cual los materiales de cada capa son asumidos como isotrópicos, homogéneos y linealmente elásticos.. El modelo ha sido analizado para espesores de superficie de 110 mm, 120 mm, 130 mm, 140 mm, 150 mm, 160 mm, 170 mm, 180 mm, 190 mm, y 200 mm, y para un millón de repeticiones de carga de ejes equivalentes de 100 kN, 200 kN, 400 kN y 800 kN.

3. DEDUCCIÓN DE RESULTADOS

La Figura 5(a) muestra el efecto de las propiedades del material y la variación de la carga aplicada, en las deflexiones criticas de un modelo con superficie de 110 mm de espesor (equivalente a adoquines de 80 mm y 30 mm de capa de arena). La máxima deflexión en la superficie decrece rápidamente aumentando la resistencia de la subrasante hasta que ésta consigue un nivel casi estable para valores de CBR de la subrasante por encima del 10%. La Figura 5(a) muestra que la máxima deflexión de la superficie se reduce ligeramente con el incremento en la rigidez de la superficie y con la reducción de la magnitud de la carga. Cuando los valores de CBR de la subrasante caen por debajo del 5 %, la deflexión máxima de la superficie aumenta rápidamente con el aumento de la magnitud de la carga. Por consiguiente, la Figura 5(a) confirma el requisito de la Norma BS 7533 : 1992 [4] de una capa mejorada para la subrasante, la cual no se exige si el valor de CBR de la subrasante excede el 5 %.

La influencia de la superficie del pavimento se ha evaluado por la remoción de la superficie y la aplicación directa de las cargas sobre la base para entender cómo la presencia de una superficie influye en la deflexión. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 5(b) la cual ilustra una relación similar. Una comparación de las Figuras 5(a) y 5(b) muestra que el valor de CBR de la subrasante tiene una mayor influencia que la rigidez de la superficie sobre la deflexión superficial. En particular, la deflexión critica es muy sensible al cambio en el valor de CBR de la subrasante, en aplicaciones con cargas altas. Además, la presencia de la superficie incrementa la estabilidad del pavimento, al prevenir el decrecimiento en su deflexión.

La Figura 6(a) indica la influencia de la rigidez superficial y el valor de CBR de la subrasante en el esfuerzo principal máximo (tracción), en la parte inferior de la base. La Figura 6(b) muestra la relación cuando las cargas se aplican directamente sobre la base. El esfuerzo de tracción critico disminuye hasta casi un nivel estable con los incrementos en los valores de CBR de la subrasante y se reduce significativamente con la reducción en la magnitud de la carga. El esfuerzo de tracción máximo aumenta ligeramente con el incremento en la rigidez superficial y alcanza un nivel casi estable con incremento en el valor de CBR de la subrasante. Sin embargo, para magnitudes de carga relativamente bajas, un incremento en el valor de CBR de la subrasante tiene poca influencia en el esfuerzo de tracción. Cuando los valores de CBR de la subrasante están por debajo del 5 %, el máximo esfuerzo de tracción aumentó significativamente con el incremento en la magnitud de la carga. Esos incrementos llegaron a ser significativos en aplicaciones para carga pesadas. La Figura

6(a) muestra que un cambios grandes en la rigidez de la superficie tienen efectos pequeños en el comportamiento de la base y que los cambios en el esfuerzo de tracción máximo, son insensibles para valores de CBR por encima del 10 %.

La Figura 7(a) indica los cambios en esfuerzo principal máximo (compresión) en la parte inferior de la base, en términos de las variaciones de la rigidez de la superficie, número de aplicaciones de carga y valores de CBR. La Figura 7(b) muestra los esfuerzos cuando las cargas se aplican directamente sobre la base. Con valore de CBR de la subrasante de menos del 5 %, particularmente con rigideces de superficie o magnitudes de carga relativamente bajas el esfuerzo a compresión se incrementa rápidamente con el incremento en la magnitud de la carga, y luego alcanza un valor relativamente estable con el incremento del valor de CBR de la subrasante. En el caso de rigidez de la superficie relativamente alta, el incremento en el esfuerzo a compresión no es sensible al incremento del valor de CBR de la subrasante. El incremento promedio del esfuerzo de compresión es de sólo el 6 %. La Figura 6(a) muestra que un cambio en la rigidez de la superficie de 100 N/mm^2 a 16 000 N/mm^2, con un CBR del 2 %, llevó a una disminución del 25 % en los esfuerzos de compresión resultantes de huellas de carga con fluctuaciones entre 100 kN y 800 kN. La variación en la rigidez de la superficie, de 2 000 N/mm^2 a 5 000 N/mm^2 lleva a una variación en los esfuerzos de compresión menor del 1 %. La Figura 7 muestra que grandes variaciones en la rigidez de la superficie tienen un efecto pequeño en el comportamiento de la base del pavimento.

Las Figuras 8, 9 y 10 muestran algunos de los resultados conseguidos en los análisis enfocados a determinar la influencia del espesor de la superficie en un modelo de funcionamiento. La Figura 8 indica el efecto del espesor de la superficie en deflexiones criticas para varias rigideces de la superficie. La deflexión máxima disminuye hasta llegar a un nivel casi estable con el incremento tanto en el espesor como en la rigidez de la superficie. El más sensible cambio de la deflexión ocurre en el caso de una rigidez de la superficie relativamente baja. Cuando la rigidez de la superficie excede los 7 000 N/mm^2, los cambios en la deflexión tienen un menor efecto en el comportamiento. Sin embargo los cambios en el espesor de la superficie tienen una influencia directa en la deflexión máxima, particularmente en pavimentos con rigideces de superficie relativas bajas. Por eso, un aumento en el espesor de la superficie hace que un pavimento sea más estable.

La Figura 9 muestra la influencia de la rigidez y del espesor de la superficie en los esfuerzos de tracción en la parte de abajo de la base. El esfuerzo de tracción critico disminuye hasta llegar a un nivel casi estable con un aumento en la rigidez y del espesor de la superficie, especialmente en pavimentos con altos espesores de superficie. Las curvas convergen a una rigidez de superficie de 1 500 N/mm^2. Esto significa que cuando la rigidez cae debajo de este valor, el esfuerzo principal máximo aumenta con la reducción en el espesor de la superficie. Sin embargo cuando la rigidez excede los 1 500 N/mm^2, el aumento en el espesor de la superficie reduce rápidamente el esfuerzo de tracción. Las variaciones en la rigidez de la superficie tienen efectos menores en la distribución de esfuerzos críticos de tracción para un espesor de 110 mm.

La Figura 10 muestra el efecto del espesor y rigidez de la superficie en el esfuerzo mínimo principal (compresión) en la parte de abajo de la base. El esfuerzo critico de compresión disminuye hasta el punto de cambio con el incremento en el espesor y la rigidez de la superficie. Cada curva disminuye rápidamente para un diferente punto de cambio, y luego alcanza un nivel casi estable. Esos puntos de cambio están entre una rigidez de la superficie de 1 000 N/mm^2 y 4 500 N/mm^2. Un incremento después del punto de cambio tiene una pequeña variación del funcionamiento. Por eso el uso de materiales de superficie con una rigidez menor de 4 500 N/mm^2 ofrece el mismo funcionamiento que un material cuya rigidez sea más alta de 4 500 N/mm^2.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El funcionamiento estructural de los pavimentos de adoquines ha sido analizado usando un modelo de simetría axial de elementos finitos basados en la teoría lineal elástica. La superficie fue modelada usando las implicaciones del método de cálculo de los esfuerzos en la capa de arena [2, 3]. Los valores de carga aplicada, de rigidez de la superficie, resistencia de la subrasante y espesor de la superficie fueron evaluados mediante del análisis de pavimentos en los cuales estos factores han sido variados. Esta ponencia ilustra el efecto de estas variables en las deflexiones criticas y en los esfuerzos de tracción y compresión. El estudio ha mostrado que la capacidad de distribución de carga de los pavimentos de adoquines es substancialmente dependiente de la estabilidad de la superficie. La capa superficial aumenta la estabilidad de un pavimento mediante la manera como influye en la deflexión superficial. A medida que los valores de CBR de la subrasante caen debajo del 5 %, la deflexión máxima de la superficie de un pavimento aumenta rápidamente con el incremento en la magnitud de la carga. Ésto confirma el mejoramiento de la subrasante (subrasante mejorada) exigida en la Norma BS 7533 : 1992 [4]. El CBR de la subrasante tiene mucha mayor influencia en la deflexión de la superficie que la rigidez de ésta. En particular, la deflexión critica es muy sensible al cambio del valor del CBR de la subrasante en aplicaciones para cargas altas. Cuando el valor de la subrasante cae debajo del 5 %, los esfuerzos máximos de tracción se hacen más sensibles a la magnitud de las cargas. Esto es particularmente significativo

en aplicaciones para cargas altas. Grandes variaciones en la rigidez de la superficie tienen un menor efecto en el comportamiento de la base, y los cambios en el esfuerzo máximo de tracción no son significativos para valores de CBR que excedan el 10 %. Los cambios en el espesor de la superficie tienen una influencia directa en la deflexión máxima, particularmente en pavimentos con superficies de rigidez relativamente baja. Por lo tanto, un aumento en el espesor de la superficie hace que el sistema sea más estable. El uso de un material en la superficie con rigidez entre 1 000 N/mm^2 y 4 500 N/mm^2 ofrece un funcionamiento similar a pavimentos con superficies cuyo material tiene una rigidez más alta que 4 500 N/mm^2. Adicionalmente los esfuerzos de compresión son sensibles a los cambios en este rango según el incremento en el espesor de la superficie. Por eso, el espesor del material de superficie podría ser una consideración de primer orden en el diseño de pavimentos de adoquines.