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

INVESTIGATION AND EVALUATION OF TEST METHODS FOR SANDS FOR LAYING COURSE [1] [2]

Allan J. DOWSON
Head of Technical and Research
MARSHALL MONO LTD
Southowram, Halifax, United Kingdom

1. INTRODUCTION

The previous conferences and workshops have illustrated that the behaviour of bedding sand is not fully understood when used as a laying course material. There are many examples of failure but few are due to the lack of knowledge and understanding of the sand, albeit, when laid using current knowledge and practice. In a few cases, with the sand correctly specified to the required grading and confirmed by testing there has been surface failure.

Explanation on the formation of the sand grains and demonstrated the complexity of the grains due to the different weathering cycles it was subjected to in its formation is well documented.

The laying course material is an essential element in concrete block paving. In the case of structural pavements supporting loads that are applied through the wearing course, this can also be a potential source of weakness. In order to focus on the critical properties of bedding sands for use in these demanding conditions the main functions of the bedding sand are:

1. To provide an even surface on which to lay blocks.
2. To accommodate accepted tolerances in the finished surface level of the base.
3. To accommodate the manufacturing tolerances of block thickness.
4. To fill the lower part of the joints between blocks to aid interlock.
5. To distribute the loads resulting in vehicle movement on the construction.

The requirements of the laying course material to fulfil it's function should be:

1. Eeconomically and readily available.
2. Be easily screeded.
3. To allow any water that may percolate into it to drain freely.
4. Not to degrade or breakdown under the action of frost.
5. Be able to enter into the joints.
6. Be resistant to degradation of the grains of sand due to external forces.

Investigations into pavement failure showed that one problem was in the form of an elliptical depression. Lilley and Dowson [1] showed that it was oriented with its major axis along the wheel paths and generally 750mm to 1 m long and less than 500mm wide. The depth of the depression in some cases were 50mm which corresponded to the same thickness of the bedding course layer. None of the surrounding blocks had been displaced laterally. A light coloured deposit on the edge of the surface blocks suggested that the sand grains were being broken down to silt size by traffic loading. It was hypothesised that the silt sized particles formed a paste with the water entering the pavement and that this paste was squeezed out through the block joints under traffic loading.

Attributes of the sand laying course material which affect the performance of the pavement needs research to be carried out to identify suitable test methods. By evaluating the sand particles or grains to see whether it has any internal weakness that could effect the performance, a method or methods needs to be obtained.

The most effective way of measuring sand performance is to use it in the application and let vehicles run over it and to see if any detrimental failure will occur. This is not a practical solution and therefore test methods need to be developed to reduce the time to assess the sand.

2. LARGE SCALE TESTS

In 1980, Shackel [3] built a load simulator for the purpose of proving construction and design and as a supplementary test look at the sand performance. In the United Kingdom, the Transport and Road Research Laboratory [4] built a large scale wheel simulator, mainly for assessing bituminous surfacing and construction. This is used internally and is not truly representative of what happens in practice.

Knapton of the University of Newcastle [6] purchased a Road Gully Emptying Vehicle and converted this by replacing the diesel engine with an electric motor. The electric motor was to give applied transmission. This was controlled by a computer and programmed to accelerate and decelerate and to repeat this at a set frequency. This is known as the NUROLF apparatus and has been described in previous conferences. In view of the time taken to obtain results, other test methods that test the sand rather than the total construction are considered.

---

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.

3. LABORATORY SCALE TESTING

In 1988, Lilley and Dowson [1] produced a paper on a test method which involved sampling the sand and then rolling it together with steel ball bearings for a pre-set time and measuring the change in particle size distribution. Other tests have been evaluated to see whether they could be used to indicate sand quality.

3.1 DIRECT-SHEAR BOX TEST

This apparatus was originally designed to measure the properties of soils and their strength in shear. The test consists of a square box on plan but splits in half horizontally. The sample with its determined density is compacted into the box, and when fixed in position, weights are applied to the top of the box and contents, a horizontal load applied to the lower half of the box. The two halves of the box are forced in opposite directions until a near horizontal failure plane occurs between them.

3.2 CALIFORNIA BEARING RATIO

This test is normally used for determining the bearing capacity of sub-grade or sub-base material and was used to check whether it could be used for measuring the sand properties.

The representative sample is compacted in a standard way and the apparatus set in the machine.

A load is applied and at pre-determined penetrations of the sample the load readings are taken. After penetrating 7,0 mm, the final reading is taken and the sample removed. A graph is drawn and using the correction value in the formula the value is determined.

The sample in its container is inverted and the test repeated, the higher of the two results load readings is taken as the value.

The current test examines the properties under saturated conditions, to achieve these conditions the sample, after compaction, is stored in water for 3 days before the test begins.

3.3 MICROSCOPIC ANALYSIS

The purpose of this form of analysis was the examination to determine the structural differences between grains of sands in successful laying course and grains of sand in a failed laying course. This can show there is a clear distinction between the structure of the grains. Knapton [9] showed a distinction between crushed rock and naturally occurring sand. This method can be used to determine the mineralogy of the sand which can be used for sand selection as shown by Beaty [10].

Where the problems of depression in the surface has occurred, examination of the sand grains by the scanning electron microscope - SEM showed that they comprised of many sub-crystals, whilst areas of stable sand has independent crystals. Examples of a range of grains of sand examined under various magnification using the scanning electron microscope method to identify possible sands that could fail in use are illustrated (Photo 1, 2).

The SEM is used to obtain detailed surface information on a range of different materials, including metals, ceramics, biological and geological materials.

3.4 BOTTLE ROLLING

This test method was developed to compare sand performance in the laboratory under controlled conditions, the method involving taking a representative sample of the sand. Knowing the particle size distribution, using standard sieves, the sample and two steel ball of weight are rolled in a ceramic jar of specified size for 300 revolutions over a period of 6 hours. At the end of the test, the particle size distribution is again determined. The arithmetical difference between the percentage passing each sieve before and after the test gives an indication of degradation values. This allows sands to be compared and one that has been shown valid in practice sets a standard. Table 1 illustrates the results obtained from the bottle rolling test

4. POTENTIAL CAUSES OF SAND DEGRADATION

4.1 WATER PENETRATION THROUGH SAND

It was observed, that when water or moisture penetrated the sand, the laying course could effect the performance of the pavement. Under wheel loads, the action of rolling over the blocks can cause the very fine sand particles to become mobile and be deposited on the surface of the blocks. This manifests itself as a slurry which passes through the joints between the blocks, which are filled with sand. This paper investigates and observes the results of other research into the effect of moisture and water flow through pavements. The majority of this work has been carried out in the laboratory and very little has been carried out on live pavements. The work has concentrated on the percolation of water through the joints rather than the sand itself. The uses of ecological pavers, where the water can flow through the concrete and the base have generally been ignored.

Clark [11] in 1979, examined the water that could penetrate through freshly laid concrete block paving. His test bed was a concrete tank within which 3 m^2 could be laid. After the blocks were laid to a fall of 2,5 % and the joints between blocks filled with sand, a water spray was applied to the surface until there was a continuous flow of water. This was considered to be too steep and further tests were carried out using a 1 %.

Clark demonstrated that there was less than 20 % of the water applied to the surface actually passed through the joints irrespective of rain intensity. His conclusion was that a saturated sand laying course will not be detrimental to the performance of the

pavement. He did however lay the jointing sand over a 4 mm to 10 mm gravel to aid water flow after the water had passed through the sand laying course.

Smith [12] presented both laboratory and insitu run off data from his work. This differed from Clark's work in as much as the penetration test was carried out on a pavement that had been trafficked and had considerably lower intensities. Smith concluded that the runoff coefficient should be used in drainage calculations. Shackle [14] also measured the run off, as well as the amount of water entering the sand laying course through the joints.

Emery [13] states that an essential requirement of most pavement surfaces is to exclude water from underlying pavement surfaces.

Investigations by Knapton [9] into the effects of water penetrating concrete block paving concluded that:

- Ingress of moisture through block paving can have a marked effect upon the structural performance of the pavement.
- Under an adverse combination of water, material and traffic, a concrete block pavement can develop significant levels of rutting after a few thousand 8 000 kg standards axles, even though the grading limits requirements by BS 7533 are satisfied.

Emery [13] insisted on infiltration tests, that using a 140 mm diameter falling head perimeter, on an area of unsealed pavers should, in simulated flood conditions, i.e. with a depth of standing water of approximately 40 mm, have an infiltration rate of 1,8 l/min.

Laboratory research by Shackel [14], in which he simulated rainfall of approximately 45 mm/h on newly laid block paving, indicated that up to 65 % of the rainfall penetrated the joints of the pavement.

Rollings in his report to the Uni-group [15] stated most pavements have been built without adequate drainage for many years. The same is true for block pavements: the bulk of them have been built without adequate drainage. He also states that the sand can become saturated after rainfall and as most dense graded base courses are relatively impermeable the drainage downwards from the sand will be slow. He continues by stating that most block pavements have been placed without providing drainage for the sand layer and they have performed well through out the world.

R Yaron, J Bensabat and Ilan Ishai [16] and P. S. Quist [17] concluded, from their research, that water may accumulate in the bedding course and that water penetrating into and drained from the sand layers using conventional paving materials and procedures does not allow for a correct drainage of the sand layer. Inappropriate drainage of the infiltrating water can cause serious problems to the pavement's stability and durability.

To obtain a better understanding of water flow through sand and to examine the passage of water through sand a small apparatus was designed and used in the evaluation. The passage of water will vary, depending on the particle size. In this case the time taken for the water to stop running through the sand was recorded. The results of these tests were reported by Dowson [18] in Israel.

It is possible to seal pavers against the possibility of the sand becoming saturated. This is expensive and can create other problems on the block surface.

Concrete block pavements consist of a large number of small rigid units with flexible joints. The performance of the pavement depends on the pavers, the joint and how they relate to each other, as well as the foundation they are laid on. The effect of the applied load is to cause loaded pavers to move vertically downwards relating to the load and to rotate to the eccentricity of the load. Rotation is resisted by interlock. The most common way of laying most blocks is the herringbone pattern and from observations the contact area of a tyre covers more than one block. Algin [20] in his work showed an imprint of a dual tyre which is reproduced. In his work he concluded that the pressure applied through the blocks to the sand layer is much greater than the actual load.

Under such loads, the sand may be degraded by the load by the coarser particles breaking down to finer particles. Also, this pressure, especially with excess water in the sand layer caused the finer particles to move from high pressure loading to low loading pressure.

This pressure is liken to a bow wave of pressure and suddenly decreases in pressure, causing the fine sand to go backwards, as this continual action of pressure and no pressure, causes cumulative movement of the fine sand and water until it reaches the point of little resistance. The only place this can happen is at the joint between the block. The fine sand and water is in the form of a slurry and this is deposited on the surface of the blocks.

This pressure/no pressure is spiked pressure and this paper explains what happens when a tyre of print dimension 150 x 150 rolls over a block laid on sand that contains water.

From earlier work reported by Dowson [19], it was shown that there was at least 35 % of air in sand and the observed lack of fine material on the surface of the laying course. This action of the loads imposed by vehicles confirms that sand grains can be transported under pressure.

Algin [20] in his work demonstrated that this is the case even when the load is applied at one corner with the load moving across the block. He found the total applied load (N) onto pavers was calculated using the following equation for 0,8 N/mm^2 tyre pressure:

$$N = 0{,}8\ F$$

where:

N = Applied load, N.
F = Load surface area, mm^2.
0,8 = Tyre pressure of a highway vehicle, N/mm^2.

This paper assumes that the paver is structurally rigid in relation to the bedding sand so a planar stress regime can be assumed at the paver/sand interface. He also suggests that tension cannot be developed in uncemented sand so it is assumed that compressive strength is developed in some part of the interface and zero stress is developed elsewhere.

In this approach to evaluating the load / stress on the sand, the assumption was that the wheel runs along the length of the block. In this theoretical investigation the effect of a wheel load of 2 500 kg travelling at 50 km/h over the block will be used. The time taken for the tyre to pass over one block at this speed is very short. Therefore in one thousandth of a second the wheel moves 14 mm.

The assumptions are :

- The load on each tyre: 2 500 kg.
- Block dimension: 200 mm x 100 mm.
- Tyre print: 150 mm long by 200 mm wide.
- Speed of vehicle: 50 km/h.
- Load proportional to contact area.
- Load applied to block is load applied to sand.

It can be assumed that as soon as the tyre makes contact with the block then the maximum compressive stress has been achieved in the sand and as the wheel continues across the block the same load is applied through the contact area. The edge in contact has the maximum stress whilst the other end there is zero stress. As the tyre moves across the block then the stress moves forward until finally the original edge has no stress. The total downward force applied to the paver must be equal to the value of the stress in the sand.

The action of the tyre contact on to the block is shown in Figure 2 along with the load applied to the sand.

5. CONCLUSION

The reason why some bedding sands have performed poorly under the combination of regular traffic and the presence of water can now be understood. A combination of high levels of stress and rapid changes in those stress values, in conjunction with hydrostatic pressure can lead to failures. Rapidly changing stress values lead to the development of normal stresses in water when the water cannot flow freely. Algin and Knapton found that the stress in the bedding sand can change from 0,1 N/mm^2 to to 0,9 N/mm^2 over a distance of 100 mm.

A vehicle travelling at 50 km/h would cover 100 mm in less than one hundredth of a second and this would mean rapid changes in stress could cause spikes and destabilise the sand. The contact pressure causes a pressure wave which will move the smaller particles forward leaving the larger particle to remain in place.

To have a test to measure the performance of the sand is essential and in evaluating a test or tests the conclusions are:

1. **Nurolf**, whilst giving a practical laboratory controlled test, takes a long time and is expensive.
2. **The Shear Box test** is quick to perform. The normal stress distribution is far from uniform, as the point of normal load moves further away from the centre of the box and it is practically impossible to control accurately, pore pressure and drainage in samples containing silt and clay.
3. **CBR test** method is an accepted test for soils, however with sand there is little correlation between the grading and bearing capacity from a small trial test.

The best laboratory tests used in conjunction with each other are:

1. **Bottle rolling.** This is a quick laboratory test, simple to perform and low cost. This examines small samples of sand which must be representative if it is to be meaningful. The action nearly repeats the action of vehicles.
2. **The Electron Microscope.** This is simple to use to examine grains of sand to show whether they are conglomerates of smaller particle or a single grain but hard to evaluate the actual sand due to the very small sample.

6. REFERENCES

1. LILLEY, Alan Alfred and DOWSON, Allan J. Laying Course Sand for Concrete Block Paving. -- P>457-462. // In: CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (3 : 1988 : Roma). Proceedings. -- Treviso : PAVITALIA, 1988. -- 497P.
2. KNAPTON, John. The Nature and Classification of Bedding Sand. -- Washinton : BIBM, 1993. -- P.v.
3. SHACKEL, Brian. Pilot Study of the Performance of Block Paving Under Traffic Using a Heavy Vehicle Simulator. -- Melbourne : Council for Scientific and Industrial Research, 198?. -- 25P.
4. LISTER, N. W. and PORTER, J. Philosophy and Experience of Full Scale Pavement Testing. -- Zurich : TRRL, 1982. -- P.v.
5. ADDIS, R. R. and ROBINSON, R. G. The Load Sreading Poperties of Cay Bick Pavements. -- London : TRRL, 1989. -- 15P. -- Presented to: Concference on Clay paving Brick (1989 : Birmingham).
6. KNAPTON, John. Personal reports. Newcastle upon Tyne : The University, 1989.
7. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Specification ... -- London : BSI, 1990. -- Pv. -- (BS 1377 : Part 7).

8. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Specification... -- London : BSI, 1990. -- Pv. -- (BS 1377 : Part 4).
9. KNAPTON, John. Report on Sands to Interpave. -- Leicester : S.e., 1993. -- P.v.
10. BEATY, Anthony N. S. Quality Control for Bedding Sands. -- Victoria : Transport Association of Canada, 1996. -- P.v.
11. CLARK, A. J. Water Penetration through Newly Laid Concrete Block Paving. -- Wexham Springs : C&CA, 1979. -- 7P. -- (Technical Report 529).
12. SMITH, David R. E. Evaluations of Concrete Grid Pavements in the United States. -- P.330-336. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (2 : 1984 : Delft). Proceedings. -- Delft : CBP, 1984. -- 348P.
13. EMERY, John J. Infiltration of Fuels Through Paver Joints.
14. SCHACKEL, Brian and YAMIN, Sid. Laboratory Measurements of Water Infiltration Through Concrete Block Pavements. -- P.127-133. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL WORKSHOP (2 : 1994 : Oslo). Proceedings. -- Oslo : BLF, 1994. -- 495P.
15. ROLLINGS, Raimond S. Report to the UNI-Group. 1992.
16. YARON, R., BENSABAT, J. and ISHAI, Ilan. Use of the Bedding Layer as a Horizontal Drainage Medium in Concrete Block Pavements. -- P.633-644. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (5 : 1996 : Tel-Aviv). Proceedings. -- Tel-Aviv : Technion, 1996. -- 727P.
17. QUIST, P. S. and KIRK, J. S. Infiltration of Water Through Concrete Block Pavements. -- P.645-653. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : INTERNATIONAL CONFERENCE (5 : 1996 : Tel-Aviv). Proceedings. -- Tel-Aviv : Technion, 1996. -- 727P.
18. DOWSON, Allan J. Further Investigation Into Saturated Bedding Sand : Interim Report. -- P.151-159. // In : CONCRETE BLOCK PAVING : PAVE ISRAEL'96 : INTERNATIONAL CONFERENCE (5 : 1996 : Tel-Aviv). Proceedings. -- Tel-Aviv : Technion, 1996. -- 727P.
19. DOWSON, Allan J. Bedding Sands. In : INTERNATIONAL CONGRESS (14 : 1993 : Washington). Proceedings. -- Washington : BIBM, 1993. -- P.v.
20. 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.

SIEVE SIZE *TAMIZ*	% PASSING BEFORE ROLLING *% QUE PASA ANTES DEL ENSAYO*	INCREASE AFTER ROLLING *INCREMENTO DESPUÉS DEL ENSAYO*
10 mm	100	0
5 mm	98	0
2,36 mm	79	3
1,18 mm	65	6
600 µm	51	10
300 µm	16	12
150 µm	1	8
75 µm	-	4

Table 1. Example of degradation of a sand.
Tabla 1. *Ejemplo de la degradación de una arena.*



Photo 1. Sand grains.
Foto 1. *Granos de arena.*

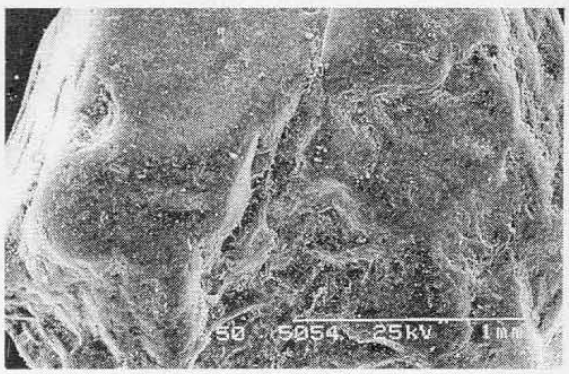

Photo 2. Micro-graph of sand grain.
Foto 2. *Microfotografia de un grano de arena.*

INVESTIGACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO DE ARENAS PARA LA CAPA DE ARENA [3] [4]

Allan J. DOWSON
Director de Investigación Técnica y Asesoría
MARSHALL MONO LTD
Southowram, Halifax, United Kingdom

1. INTRODUCCIÓN

Las Conferencias y Talleres previos han demostrado que el comportamiento de la capa de arena no ha sido entendido completamente como material para la colocación de adoquines. Se conocen muchos casos de fallas, pero pocos se deben al poco conocimiento y entendimiento de la arena, aunque, en algunos casos, cuando se ha colocado utilizando los conocimientos y la práctica comunes, también se han presentado fallas de la superficie, aun con arenas que cumplen la granulometría, confirmada con ensayos.

La explicación en la formación de los granos de arena y la demostración de la complejidad de sus granos cuando fue sometida a los diferentes ciclos climáticos durante su formación, está debidamente documentada.

El material de la capa de arena es un elemento esencial en el pavimento de adoquines de concreto. También pueden ser una causa potencial de debilidad, en el caso de pavimentos estructurales soportando cargas aplicadas a través de la capa de adoquines. Para poder enfocar las propiedades críticas de las arenas para la capa de arena para su uso en estas condiciones demandantes, las principales funciones de las arenas de cimentación son:

1. Proveer una superficie pareja sobre al cual colocar los adoquines.
2. Acomodar las tolerancias aceptadas en el nivel terminado de la superficie de la base.
3. Acomodar las tolerancias de los productores en el espesor de los adoquines.
4. Llenar la parte baja de las juntas entre los adoquines, para ayudar a la trabazón.
5. Distribuir las cargas resultantes del movimiento vehicular sobre el pavimento.

Los requisitos de la arena para la capa de arena deberían ser:

1. Que está disponible económica y rápidamente.
2. Que se pueda esparcir fácilmente.
3. Que permita que el agua que penetre en ella drene libremente.
4. Que no se degrade o se quiebre bajo la acción del congelamiento.
5. Que sea capaz de penetrar en las juntas.
6. Que sea resistente a la degradación de sus granos, debida a las fuerzas externas.

Las investigaciones acerca de las fallas en los pavimento mostraron que uno de los problemas era la aparición de depresiones elípticas. Lilley y Dowson [1] demostraron que dichas depresiones estaban orientadas con su eje mayor a lo largo de la ruta de las llantas y que generalmente tenía de 750 mm a 1 m de largo y no menos de 500 mm de ancho. La profundidad de la depresión fue en algunos casos de 50 mm, que correspondía al espesor de la capa de arena. Ninguno de los adoquines adyacentes se había desplazado lateralmente. Un depósito de color claro en la esquina de la superficie de los adoquines sugirió que los granos de arena se estaban quebrando bajo la acción del tráfico hasta quedar del tamaño de granos de limo. Se trazó la hipótesis de que las particulas de limo formaban una pasta con el agua que entraba en el pavimento y que dicha pasta salía de las juntas de los adoquines bajo la acción de las cargas del tráfico.

Se requiere investigación sobre los atributos de la arena para la capa de arena, los cuales afectan el desempeño del pavimento, con el fin de identificar los métodos de ensayo apropiados. Se necesita obtener un método o métodos para evaluar las partículas o granos de arena con el fin de saber si tienen debilidades internas que puedan afectar el mencionado desempeño.

La forma más efectiva de medir el desempeño de la arena consiste en utilizarla en una obra, dejar que los vehículos pasen sobre ella y mirar si ocurre alguna falla perjudicial. Esta no es una solución práctica y por lo tanto se requiere desarrollar métodos de ensayo para reducir el tiempo para evaluar la arena.

2. ENSAYOS A GRAN ESCALA

En 1980, Shackel [3] construyó un simulador de carga con el propósito de poner a prueba la construcción y el diseño de pavimentos de adoquines y, colateralmente, mirar el desempeño de la arena. En el Reino Unido, El laboratorio de Investigación sobre Transporte y Vías – TRRL [4] construyó un simulador de llanta a gran escala, principalmente para evaluar superficies bituminosas y su construcción. Éste

[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.

se utilizó de forma interna y no es verdaderamente representativo de lo que sucede en la practica.

Knapton de la Universidad de Newcastle upon Tyne [6] compró un tanque de limpieza de sumideros y lo convirtió reemplazándole el motor diesel por un motor eléctrico, con el fin de poder controlar el desplazamiento, controlado por un computador y programado para acelerar y desacelerar, y repetir este movimiento con una frecuencia establecida. Éste se conoce como el aparato NUROLF y ha sido descrito en conferencias anteriores. En vista del tiempo que se toma obtener los resultados, se quieren considerar otros métodos de prueba que evalúen la arena en vez de la construcción total.

3. ENSAYOS A ESCALA DE LABORATORIO

En 1988, Lilley y Dowson [1] presentaron un documento sobre un método de ensayo que consiste en tomar muestras de la arena y después de introducirla en un recipiente cilíndrico, de porcelana, junto con dos bolas de acero, se pone a girar el recipiente por un tiempo predeterminado y se mide el cambio en la distribución de los tamaños de las partículas de arena. Se han evaluado otros métodos de ensayo para saber si pueden ser utilizadas con el fin de conocer la calidad de la arena.

3.1 ENSAYO DE LA CAJA DE CORTE DIRECTO

Este aparato se diseñó originalmente para medir las propiedades de los suelos y su resistencia al corte directo. La prueba consiste de una caja cuadrada en planta, que se parte por la mitad horizontalmente. La muestra, con su densidad determinada, se compacta en la caja y cuando se coloca en posición, se le aplica peso a la tapa de la caja y al contenido de la misma aplicándosele, además, una carga horizontal a la parte baja. Las dos mitades de la caja se empujan en direcciones opuestas hasta que sucede una falla en el plano horizontal entre ellas.

3.2 RELACIÓN DE SOPORTE DE CLAIFORNIA - CBR

Este ensayo se utiliza normalmente para medir la capacidad portante de un material de subrasante, subbase o base; y se evaluó para ver si podía ser utilizado para medir las propiedades de la arena.

La muestra representativa se compacta de una manera estándar en un molde y éste se coloca en la máquina. Se aplica una carga y se toman las lecturas de carga cada que se alcanza una penetración predeterminada en la muestra. Después de penetrar 7 mm se toma la lectura final y se remueve la muestra. Se elabora una gráfica y utilizando el valor correspondiente en la formula, se determina el valor de CBR.

La muestra todavía entro del recipiente se invierte y se repite el ensayo. Se toma el valor más alto de las dos lecturas de carga como el valor definitivo.

Este ensayo, por lo general, examina las propiedades de la muestra en condición saturada, y para alcanzar estas condiciones, la muestra, después de compactada, se guarda en agua por tres días antes de que comience el ensayo.

3.3 ANÁLISIS MICROSCÓPICO

El propósito de esta forma de análisis era la determinación de las diferencias estructurales entre los granos de las arenas que se habían comportado de manera exitosa y los granos de las arenas que habían fallado en la capa de arena. Y mostró que existe una distinción clara entre la estructura de los granos con esos comportamientos. Knapton [9] mostró las diferencias entre la piedra triturada y la arena natural. Este método se puede utilizar para determinar la mineralogía de la arena, que puede ser utilizada para la selección de la arena como lo muestra Beaty [10].

Cuando ocurrieron problemas de depresión en la superficie, los exámenes de los granos de arena con el microscopio electrónico de barrido - SEM mostraron que se componían de muchos subcristales mientras que las arenas estables estaban constituidas por cristales independientes. Se ilustran ejemplos de arenas de diversos tipos de granos de arena examinadas bajo varios niveles de magnificación utilizando el SEM para identificar las arenas que podrían fallar en el uso (Foto 1 y 2).

El SEM también se utiliza para obtener información detallada de la superficie en un rango amplio de materiales incluyendo metales, cerámicos, materiales biológicos y geológicos.

3.4 MICRO MOLINO DE BOLAS

Este método se desarrolló para comparar el desempeño de la arena en el laboratorio, bajo condiciones controladas y el comportamiento en la obra. El método consiste en tomar una muestra representativa de la arena. Conociendo su granulometrías, la muestra y dos bolas de acero se ponen dentro de un recipiente cilíndrico de cerámica, y se le pone a girar hasta alcanzar 300 revoluciones, durante un periodo de 6 h. Al finalizar el ensayo se determina de nuevo la Granulometrías de la arena. La diferencia aritmética entre el porcentaje que pasa por cada tamiz antes y después del ensayo brinda una indicación de los valores de degradación. Ésto permite que las arena sean comparadas y una que ha mostrado ser válida en la práctica, determina la norma. La Tabla 1 ilustra los resultados obtenidos con el micro molino de bolas.

4. CAUSAS POTENCIALES DE DEGRADACIÓN DE LA ARENA

4.1 PENETRACIÓN DE AGUA A TRAVÉS DE LA ARENA

Se ha observado que cuando el agua o la humedad penetran en la arena, la capa de arena puede afectar el desempeño del pavimento. Bajo condiciones

de carga, el paso o rodamiento de las cargas sobre los adoquines puede causar que las partículas más finas de arena se muevan y se depositen en la superficie de los adoquines. Esto se manifiesta como una pasta que pasa a través de las juntas entre los adoquines, las cuales deben estar llenas de arena. Esta ponencia investiga y observa los resultados de otra investigación en el efecto de la humedad y del flujo de agua a través de los pavimentos. La mayor parte de este trabajo se ha llevado a cabo en el laboratorio y muy poco en las obras. El trabajo se ha concentrado en la filtración de agua a través de las juntas más que en la arena misma. Los usos de los adoquines "ecológicos" donde el agua puede fluir a través del concreto y la base, han sido, por lo general, ignorados.

Clark [11] en 1979, examinó la cantidad de agua que podía penetrar a través de los adoquines de concreto recién colocados. Su ensayo partía de un tanque de concreto dentro del cual se podían colocar 3 m^2 de pavimento de adoquines. Se colocaron los adoquines con una pendiente del 2,5 % y se llenaron las juntas entre los adoquines con arena. Se roció con agua hasta que hubiera un flujo constante de agua. Se consideró que la pendiente había sido demasiada y se redujo, para pruebas posteriores, al 1 %.

Clark demostró que menos del 20 % del agua aplicada a la superficie penetraba a través de las juntas, independientemente del flujo o la intensidad de la lluvia. Su conclusión fue de que colocar una capa de arena saturada no iría en detrimento del desempeño del pavimento. Sin embargo, él colocó una gravilla con tamaño entre 4 mm a 10 mm debajo de la capa de arena, para ayudar al flujo de agua después de que ésta haya pasado a través de la capa de arena.

Smith [12] presentó tanto pruebas de laboratorio como datos de las obras, en su trabajo sobre escorrentía. Ésto difería del trabajo de Clark tanto en que la prueba de penetración se llevó a cabo en un pavimento que había sido traficado y tenía intensidades considerablemente más bajas. Smith concluyó que el coeficiente de escorrentía se debería utilizar en cálculos de drenaje. Shackle [14] también midió la escorrentía así como la cantidad de agua que entraba en las capas de arena a través de las juntas.

Emery [13] asegura que un requerimiento esencial para la mayoría de las superficies de pavimento debería ser el excluir el agua de las superficies inferiores del pavimento.

Las investigaciones efectuadas por Knapton [9] acerca de los efectos del agua que penetra en los adoquines de concreto, concluyen que:

- El ingreso de humedad a través de los adoquines, puede tener un efecto marcado en el desempeño estructural del pavimento.
- Bajo una combinación adversa de agua, material y tráfico, un pavimento en adoquines de concreto puede desarrollar niveles significativos de ahuellamiento después de unos pocos miles de ejes estándar de 8 000 kg, aun cuando se hayan cumplido los requisitos de límites de granulometrías establecidos por la Norma BS 7 533.

Emery [13] insistió a través de ensayos de infiltración, que utilizando una cabeza de caída de 140 mm, en una área de adoquines que no se ha sellado, debería, en condiciones de inundación simuladas, es decir, con una profundidad de agua de 40 mm, tener una tasa de infiltración de 1,8 l/min.

Investigaciones de laboratorio llevadas a cabo por Shackel [14], en las cuales simuló una lluvia de aproximadamente 45 mm/h sobre adoquines recién colocados, indicaron que hubo una penetración de lluvia de hasta el 65 % en las juntas del pavimento.

Rollings en su reporte al Uni-Group [15] declaró que la mayoría de los pavimentos han sido construidos durante muchos años sin un adecuado drenaje. Lo mismo es verdad para los adoquines de concreto; la gran mayoría de ellos se ha construido sin el drenaje adecuado. También aseguró que la arena se puede saturar después de la ocurrencia de lluvia y que como la mayoría de las bases con gradaciones cerradas son generalmente impermeables, el drenaje hacia abajo de la arena se vuelve lento. Continúa asegurando que la mayoría de los adoquines se han colocado sin proveerles drenaje adecuado y se han comportado muy bien en todo el mundo.

R. Yaron, J. Bensabat e Ilan Ishai [16] y P. S. Quist [17] concluyeron de su investigación que pude haber acumulación de agua en la capa de arena y que el agua que esta agua, y que no se puede drenar correctamente utilizando materiales de pavimento y procedimientos convencionales. El drenado inapropiado del agua que se infiltra puede causar serios problemas para la estabilidad y durabilidad del pavimento.

Para obtener un mejor entendimiento del flujo de agua a través de la arena, y para examinar su paso a través de la misma, se diseño un pequeño aparato y se usa en esta evaluación. El paso del agua varía dependiendo del tamaño de las partículas. En este caso se registró el tiempo que le tomó al agua pasar a través de la arena. Los resultados de estos ensayos fueron reportados por Dowson [18] en Israel.

Es posible sellar los adoquines contra la posibilidad de que se sature la arena. Es costoso y puede acarrear otros problemas en la superficie de los adoquines.

Los pavimentos de adoquines de concreto consisten de un gran número de unidades rígidas con uniones flexibles. El desempeño del pavimento depende de los adoquines, de las juntas y de como se relacionen entre sí, así como también de los cimientos sobre los cuales estén colocados. El efecto de la carga aplicada es causar que los adoquines cargados se muevan verticalmente hacia abajo y roten ante la excentricidad de la carga. La rotación es resistida por la trabazón. La forma más común de colocar la mayoría de los adoquines es en forma de espina de

pescado y por observación, el área de contacto de las llantas cubre más de un adoquín. Algin [20] en su trabajo mostró la huella de una llanta doble que se reproduce. En su trabajo concluyó que la presión aplicada a través de los adoquines a la capa de arena, es mucho mayor que la carga misma.

Bajo dichas cargas la arena se puede degradar por la carga cuando las partículas gruesas se quiebran en partículas más finas. Además, ésta presión, especialmente con exceso de agua en la capa de arena, causó que las partículas más finas se movieran de una zona cargada con alta presión a una con baja presión.

Esta presión se compara con una ola de presión que disminuye repentinamente, causando que la arena fina se retroceda, y esta acción de presión y no presión causa desplazamientos acumulados de la arena fina hasta que alcanza el punto de menor resistencia. El único lugar en que esto puede suceder es en las juntas entre los adoquines. La arena fina y el forman de una pasta y se deposita en la superficie de los adoquines.

Esta presión / no presión es una presión de punta y este documento explica lo que puede pasar cuando una llanta con una dimensión de 150 mm x 150 mm pasa sobre un adoquín colocado sobre una arena que contiene agua.

De un trabajo anterior reportado por Dowson [19], se muestra que se tenía al menos 35% de aire en la arena, y se observó una falta de materiales finos en la superficie de la capa de arena. Esta acción de las cargas impuestas por los vehículos confirma que los granos de arena pueden ser transportados bajo presión.

Algin [20] en su trabajo demostró que ésta es la realidad, incluso cuando la carga se aplica en una esquina con la carga moviéndose a través de los adoquines. Encontró que la carga total aplicada (N) en los adoquines se calculaba utilizando la siguiente ecuación para presión de inflado de la llanta de 0,8 N/mm^2:

$$N = 0{,}8\ F$$

donde:

N: Carga aplicada, N.
F: Area de aplicación de la carga, mm^2.
0,8: Presión de llanta de un vehículo en autopista, N/mm^2.

Este documento asume que el adoquín es estructuralmente rígido en relación con la capa de arena, entonces se puede asumir un régimen plano de esfuerzos, en la cara inferior de los adoquines, entre los adoquines y la capa de arena. También sugiere que no se puede desarrollar tracción en arena no cementada de tal manera que se asume que se desarrolla un estado de compresión en parte de la cara interior y en el resto el esfuerzo es nulo.

En esta aproximación a la evaluación de la carga / esfuerzo sobre la arena, se asumió que la llanta corre a lo largo del adoquín. En esta investigación teórica, se utilizará el efecto de una carga de llanta de 2 500 kg viajando a una velocidad de 50 km/h sobre los adoquines. El tiempo que le toma a la llanta pasar sobre un adoquín, a esta velocidad, es muy corto. En una milésima de segundo la llanta se mueve 14 mm.

Las suposiciones son las siguientes:

- La carga en cada llanta: 2 500 kg.
- Dimensión de los adoquines: 200 mm x 100 mm.
- Huella de la llanta: 150 mm (largo) por 200 mm (ancho).
- Velocidad del vehículo: 50 km/h.
- Carga proporcional al área de contacto.
- Carga aplicada al adoquín es la carga aplicada a la arena.

Se puede asumir que tan pronto como la llanta hace contacto con los adoquines, se alcanza el esfuerzo máximo de compresión en la arena y a medida que la rueda continúa sobre el adoquín, se aplica la misma carga sobre toda el área de contacto. El borde en contacto recibe el máximo esfuerzo mientras que el otro lado tiene un esfuerzo nulo. A medida que la llanta se mueve a través del adoquín, el esfuerzo se desplaza hacia adelante hasta que finalmente no hay esfuerzo en el borde inicial. La fuerza total aplicada al adoquín debe ser igual al valor del esfuerzo en la arena.

La acción del contacto de las llantas sobre los adoquines, se muestra en la Figura 2 junto con la carga aplicada a la arena.

5. CONCLUSIÓN

La razón por la cual algunas arenas de la capa de arena se han desempeñado muy pobremente bajo la combinación del tráfico regular y la presencia de agua, se pueden entender ahora. Una combinación de altos niveles de esfuerzos y cambios rápidos en aquellos esos valores de esfuerzo, en conjunción con la presión hidrostática, pueden conllevar a fallas. El cambio rápido de los valores de esfuerzo, conllevan al desarrollo de esfuerzos normales en el agua cuando el agua no puede fluir libremente. Algin y Knapton encontraron que el esfuerzo en la capa de arena puede cambiar de 0,1 N/mm^2 a 0,9 N/mm^2 en una distancia de 100 mm.

Un vehículo viajando a 50 km/h podría cubrir 100 mm en menos de una centésima de segundo, lo cual significa cambios rápidos en el esfuerzo que podrían causa puntillazos y desestabilizar la arena. La presión de contacto causa una ola de presión que se mueve a las partículas más pequeñas, dejando que las más grandes permanezcan en su lugar.

Tener una ensayo para medir el desempeño de la arena es esencial, y al evaluar un ensayo o ensayos éstas son las conclusiones :

1. **Nurolf.** Aún cuando es un ensayo práctico en condiciones de laboratorio controladas, requiere de mucho tiempo y es costoso.

2. **Ensayo de la caja de corte.** Es rápido de llevar a cabo. La distribución de esfuerzos normales está lejos de ser uniforme, puesto que el punto de carga normal se mueve hacia adelante lejos del centro de la caja y es prácticamente imposible de controlar apropiadamente la presión de poros y el drenaje de los especímenes que contienen limo y arcilla.
3. **CBR.** Es una prueba aceptada para suelos, sin embargo con arena hay muy poca correlación entre la Granulometrías y la capacidad portante de una espécimen de ensayo pequeño.

Las mejores pruebas de laboratorio utilizadas conjuntamente son:

1. **Micro molino de bolas.** Es un ensayo de laboratorio, rápido, sencillo y de bajo costo. Examina pequeñas muestras de arena que deben ser representativas si se desea que tengan algún significado. Reproduce la acción de los vehículos, con bastante aproximación.
2. **Microscopio electrónico de barrido – SEM.** Es simple de utilizar para examinar granos de arena para demostrar si hay conglomerados de partículas pequeñas o granos individuales pero duros para evaluar la arena real en una muestra pequeña.