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

PAVED SURFACES AND THE IMPORTANCE OF CORRECT MATERIALS SPECIFICATION AND DETAILING [1] [2]

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

SUMMARY

It is very important to study failures, but we see material performing at their limit and can therefore accurately assess factors of safety in all the component parts of the structure. Failure is not easy to define, as different professions have different priorities. The architect concentrates on the visual impact, while the engineer is more concerned in constructing a pavement. The maintenance engineer, who maintains the day to day function of an area, will consider the pavement a failure if extensive maintenance is required.

Investigation failures can be complex, because one course failure can lead to a further failure. Often the initial conclusion is not correct.

This paper investigates all modes of failure, which the author has been involved with, over the past twenty years of investigation of concrete block paving pavements. The failures can be summarised into three distinct types:

1. Design.
2. Construction.
3. Product application.

Structural failure of the pavement manifests itself with the surface having large deformation. Generally caused by one or more of the underlying layers failing. This is either due to inadequate thickness and/or the quality to sustain the applied loads over the sub-grade. The properties of material used can change with time. Failure is caused when the structural layer fails to maintain a surface free from cracks and as more and more sand enters the crack this results in an unacceptable riding surface.

Wrong selection of base material can cause failure, particularly when moisture is allowed to penetrate these layers. Frost susceptible material should not be used.

Inadequate constraint of the blocks in service, results in blocks moving apart. Inappropriate or irregular sized joints can cause failure by allowing water to penetrate through the joint. The performance of the pavement relies on interlock, and thus depends upon relatively low elastic movements. Poor details and edge cutting can contribute to loss of interlock.

Surface depressions of about 1 m diameters have been described as "elephant footprints". These failures were originally attributed to sand failure when the sand particle degraded, causing the volume of sand to change.

Blocks have cracked in two pieces and this is generally attributed to an inadequate sand thickness or high impact loads

Typical type of failure of the block paving construction is illustrated in Photo 1

1. DESIGN FAILURES

In all design methods, the strength of the sub-grade is required and the strength is defined as the California Bearing Ratio. Current design methods use the saturated CBR value, rather than the CBR value determined in situ. The method of evaluating the saturated CBR value is described in BS 1377 : Part 4 [1]. Table 1, taken from BS 7533 [2] illustrate the California Bearing Ratio of different soils.

This table illustrates that one soil can exhibit many different CBR values used for design purposes. There are two relevant CBR's: firstly, one at the time of construction, secondly, the service life one. In general terms, the higher the CBR value, the stronger it is and the overall construction can be reduced.

A pavement is designed for a working life and the number of vehicles that will overrun the pavement. In correct assessment of the CBR of the sub-grade, a failure to take sufficient samples for the site investigation can result in an under design, for example by not taking the lowest representative CBR value. Not obtaining an accurate assessment the number of vehicles likely to use the pavement can lead to an over or under depth of construction design.

Material selection for each layer and the design procedure are described in BS 7533 [2]. The choice of the wrong material for the sub-base can result in the surface being lifted up as in the Photo 2. In this case the base was frost susceptible and heaved under frost attack.

When overlaying rigid bases, construction should be given to drainage of the laying course, as results of investigation have shown that the bearing capacity of the sand may be reduced owing to the sand fluidising or degrading.

---

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 Photos, in both languages, placed in between. The References are include only in the original version of each paper.

2 This is the original version of this paper.

Consideration given to surface falls is all important to the rapid removal of surface water, this will avoid ponding as shown in Photo 3.

For roads, the minimum falls are often specified as 1 % longitudinally and 2,5 % crossfalls. Where drainage systems are used, these should be lower than the pavement surface to drain the water off the area. The block surface tolerance adjacent to gullies, surface drainage channels and outlets should be + 6 mm, - 0 mm.

There is very limited written information about Design Failure where rutting has occurred.

Rutting is caused by the underlying layers of the construction be consolidated by channelised traffic over running the blocks and Photo 4 shows an example.

In 1994, at a Bus Station in Sheffield, following surface depressions, the engineers decided to drain the sand layer to minimise risk of further failure due to water ingress. Holes were drilled through the rigid base and the underlying layers and the holes were filled with a free draining gravel, this failure was reported in a paper in Israel [3].

When specifying the edge details, it is important that knowledge of the type and weight of vehicle is known. In Photo 5 the edge restraint was between the original macadam road surfacing and the blocks were very poor quality concrete. The concrete has failed and allowed the blocks to rotate and loose interlock.

In Photo 6, a full length British Standard drainage channel was laid onto a lean concrete kerb race in a heavily traffic road area. Not only did it break bond with the concrete race it rocked and due to the offset loading, cracked into two pieces. Also, because it became loose it came into contact with the adjacent channel block and the edges became spalled.

Interlock, as stated previously, requires the blocks to be contained and are not allowed to move sideways by being constrained using edge restraint. The edge restraint should be strong enough to withstand overrun.

Photo 7 illustrates a well-designed edge restraint using the small length kerbs, knowing the only traffic to use the area was cars and small vans.

There are two commonly specified thickness of blocks, 60 mm and 80 mm recommended for use in traffic locations. As a guide to their use, 80 mm blocks are used in heavily trafficked locations, while the 60 mm blocks are used in lightly trafficked areas. In some port areas in the United Kingdom 100 mm thick blocks have been used and for very lightly trafficked areas 50 mm thick blocks are used.

Some block shapes can only be laid in stretcher bond patterns. For the rectangular block the Herringbone pattern is often preferred in trafficked areas. Where rectangular blocks have been laid in stretcher bond in heavy breaking areas, the blocks have shunted out of line as shown in Photo 8.

To satisfy a customer's demand for laying blocks in straight lines in all directions, the joints were opened up and large joints occurred. Following trafficking, the joints opened up even more and Photo 9 shows the result of this action.

2. CONSTRUCTION FAILURES

Although many standards have been written about construction methods, main contractors continue to employ sub contractors with little or no skills of constructing block pavements. Many of these sub contractors are employed to screed the sand and lay blocks, and it falls to the main contractor to lay the underlying layers.

The sand laying course must not be used as a levelling material for the base. When constructing a flexible base, this base must be "tight" so that no sand can fall and fill the void. This will result in an unacceptable surface profile. Should the surface be open textured, as Photo 10. The surface should be made close knit and can be blinded with a finer material.

The sand, when screeded out using the uncompacted method of construction, should be of uniform density. At the beginning of the screeding process, it will take up to half a metre before a surcharge builds up behind the screed board. As the volume of sand is different, then when trafficked, the result will be a slight depression between the main concrete block paving area and the existing surface, as shown in Photo 11. This can be overcome by spreading a thin layer of sand on top of the screeded sand.

When cement bound materials - CBM are used as a base, correct curing and protection is required to the compact base. In large areas where CBM 3 have been used, the base should be allowed to harden and to shrink. These cracks should be sealed so that no sand particles can penetrate the joint either by a waterproof membrane or some other way for example filter fabric. Photo 12 shows a series of shrinkage cracks in the base. These were discovered on investigation into the surface depression, where the original appropriation of blame was sand degradation.

In situations where block pavements are constructed against existing roads, and the base is discontinuous, shrinkage can occur between the existing and new construction, creating a natural gap between them, again as in the above example sand can penetrate the joint after trafficking, resulting in the block paving at this point being lower than its original level.

The majority of roadways have many forms of inspection chambers constructed in them and are normally constructed of brick. This can create two serious problems, firstly, the imported material used for the sub-base is not normally compacted to the same degree as the open areas of the site. When traffic runs over the completed pavement, it will consolidate this layer through the upper layers causing a

depression around the chamber. The second problem that can occur, is the similar to the problem described previously when constructing against another different material. Both of these can be reduced by compacting the base around the chamber in thinner layers, and laying a filter fabric on the sub-base or road base and up the side of the iron work of the chamber. When a chamber cover which has failed to bond to the brickwork of the chamber, resulting in sand loss through the gap created by vehicles running over them, causing the metal work to rock. The solution was to rigidly fix the frame by a strong epoxy mortar and bolting the frame and the brickwork together, rather than just setting the frame on a weak mortar.

The other methods of treatment around inspection chambers are to surround the chamber frame with a concrete surround and Photo 13 illustrate the problem that has occurred.

In many cases, the contractor sets out the restraints and rigidly fixes them, and generally does not make any allowance for the block tolerance. This laying tolerance will result in a very thin cut being made and fitted or that the block joints opened up to allow the blocks to fit.

Both methods can lead to failure by the small pieces being sucked out by traffic or street cleaners, resulting in blocks spreading, causing a loss of interlock. The standard requires the joint between blocks shall not be greater than 5 mm. Yet the practice cutting thin or small pieces still continues and these are shown in Photo 14. Photo 15 illustrates inaccurate cutting unacceptable to the requirements of the standard and liable, depending on traffic loading to cause ultimate failure.

For client satisfaction, the contractor attain straight lines in laying blocks by varying the joint width. This is acceptable practice only on relatively flat pavements. This becomes a problem when road cambers and corners are involved and this will result in blocks moving and joints opening up, leading to possible failure with water entering to underlying layers. Photo 16 shows the result of this loose laying after trafficking by heavy vehicles and buses.

BS 7533 [2] gives the tolerance for each layer and clause states the minimum thickness of sand. If this sand layer is much less, then the blocks may crack under repetitive loading. Not all block pavements are new construction, many are overlay construction. In these cases, the original road surface is planned removing the top layer. When this happens the larger aggregate particles stand proud of the building matrix and when the sand thickness is at a minimum, there is a risk of block cracking. Photo 17 illustrates the problem of cracked blocks. On investigation not only was there large pieces of aggregate pointing upwards but the sand thickness was between 10 mm and 15 mm thick. This is shown in Photo 17.

The performance of the block pavement surface is dependant on interlock. This is achieved by fine sand totally filling the gap between the vertical faces of the blocks. The standard recommends kiln dry sand, for ease of filling the joint. In the majority of cases the sand becomes moist and the flowability is greatly reduced and instead of completely filling the joint, it will bridge. This gives the appearance of a full joint, but on drying out or being washed in by rain the joints are void of sand. This can lead to water penetrating into the underlying layers.

Another practice, not recommended, is that contractors lay all the blocks on the area, and then sand the whole area. This later operation could be several weeks after the laying of the blocks, and again, if it rains, water will penetrate the underlying layers.

As previously explained, this water can mobilise the sand and cause an unsatisfactory surface profile and this has an effect on the performance of the supporting layers. The recommendation of the standard for screeding, laying blocks, cutting closures, vibrating, filling the joints should be completed daily, or even as the laying procedure progresses.

Other construction and contractors' problems include organisation of distribution of sand before screeding. Instead of stock piling the sand at one end of the site, in this case the contractor placed piles along the road. The sand was subsequently overrun making it difficult to screed the sand out effectively and efficiently and Photo 18 shows this.

Setting out for edge restraints needs careful attention and by wrongly setting out then it can lead too excessive cutting.

As previously stated that for concrete block pavements to work correctly we need interlock. To achieve this the block needs to be restrained by the use of appropriate kerbs. The edge restraint should not be too long.

Apart from containing the blocks the other purpose of the edge restraint is to contain the sand.

Another example of the contractor's failure to construct the pavement correctly is shown in Photo 19 and this is attributed to a differential in the thickness of the sand course layer.

Ponding can be caused by the contractor not laying the required thickness of sub-base over the sub-grade and the client changing the use from a car parking to a heavy duty vehicle park.

3. MATERIALS FAILURE

The materials elements of the construction are the laying course sand and concrete blocks.

Blocks generally do not fail, on some occasions the corners break off. This is explained as either products from a new mould pinching, or that the blocks have come into direct contact with each other due to the base deflecting more than usual as shown in Photo 20. The action of the loaded tyre running over the blocks, causes the blocks to be stressed at the point of contact and for corners to break off.

Blocks, when laid, can dry out at different rates leaving the individual block appearing wet or damp. This can be caused by a poorly compacted block or the block has been produced with a lot of fine material in the matrix.

Blocks can be supplied with a deficiency of fines in the surface causing the surface being rough while sometimes the surface of the block is open textured as shown in Photo 21.

Blocks are blamed for failures but generally it is other reasons for it. In Photo 22 where the blocks are breaking up, the cause of damage is due to the impact of the underside of buses grounding on the surface. The main causes are the buses going too fast and the ramp is too short.

The characteristic of the fine sand particle around and on the edge of the block generally indicates sand degradation. But this is not always the case an example of this is illustrated in the Photos 23. First appearances indicate sand failure but when the surface of the base was exposed. The surface profile was out of tolerance and the base that had been used was badly imprinted with the block shape. The whole surface had deflected more than it should allowing water to penetrate into the underlying layers causing the fine material in the sand to be mobilised and pumped up to the surface.

Other failures attributed to the sand are shown in Photo 24 and this has been attributed to over thick sand laying course and ingress of water.

4. SURFACE PERFORMANCE

One aspect of a paving surface performance is the Skid and Slip resistance properties of the material, which is very important, and the selection of correct products is paramount to the performance.

It is necessary to differentiate between slip and skid; "slip" is for pedestrians and "skid" is for vehicles. Considering "skid" resistance in simple terms, the tyre of the vehicle runs on the stone in the surface of the road. This is called the macro texture and the friction between the stone and the tyre forms the micro texture. In a similar way for paving units, the joints between the units form the macro texture and the finished surface is related to the micro texture.

BS 6717 [4] restricts the acid soluble content of the aggregates in concrete block paving to minimise the risk of slip and skid. In my opinion, there is no direct comparison of used skid resistance values of different materials and to quote required values for our products in low speed locations, for example up to 50 km/h, with a skid resistance value required for motorway standards is a nonsense. In the laboratory, we can determine a skid resistance value, and this skid resistance is reflected in the new European Standard and is set at a minimum value of 40 [5].

Slip is much harder to evaluate as everyone walks with a different gait, different shoe conditions and constantly different loading characteristics. On a recent study, it was interesting to observe walking habits. It is possible to measure the pressure applied through the heel contact and action of initial contact of the heel and it could possibly determine the risk of how and when slip occurs. Surface texture, aggregate type and state of cleanliness all effect "slip" resistance. The Greater London Council, in their investigations, produced a table of slip values. Using this, and a laboratory test method, to evaluate and obtain a figure for slip, we are able to specify a minimum value of 35. One local authority decided to specify a value of nearly double this figure and laid products with this very high value. Whilst this generally caused no problems to the able-bodied people, it caused very serious problems to the less-abled. Because the grip on the flag, and shoe soles were too good to allow the foot to move freely over the surface.

5. TESTING METHODS

To measure slip resistance, there are many different methods and the list shown gives the better known methods:

5.1 THE TORTUS TEST

This instrument was developed in the UK to measure dynamic friction. It is portable, has a small contact area and can be moved across the floor at variable speeds to model heel slip initiation and skid. No correlation with performance has been reported. Its limitations are that it requires a long run of uninterupted surface.

5.2 THE JAMES MACHINE

This is an articulated strut device developed in the USA in 1944 to measure the coefficient of static friction. It is regarded as not being easily portable and thus has been supersede by more recent models with improved portability.

5.3 THE NSB BRUNGRABER TESTER

This device is a development of the James machine to measure static friction. It is more portable than its predecessor, easy to use, thus reducing the possibility of operator error and avoids the problem of standing time before the application of loads. However, it requires a large number of measurements to obtain reliable results.

5.4 THE JAPANESE DRAGMETER

This is a portable, low speed device designed to measure dynamic sole slip by correlation with human sensory perception obtain through feed back from test subjects.

5.5 THE CEBTP SKID METER

This portable, drag type device was developed in France to measure dynamic slip of sole and heel at relatively low speed. Readings are taken over a distance of 1,5 m at a constant speed of 3 km/h.

5.6 THE SWEDISH STANDARD SLIPPING TEST

It involves the modelling of a shoe on a device that simulates the movement of the foot during walking. Although a standard method used in Sweden it has not gained international recognition as a test.

5.7 NORSE METER

A road grip tester using a full size automotive test wheel that operates at speeds of 30 km/h to 95 km/h and can measure over a distance of 4 km. A specially designed vehicle.

5.8 SCRIM (SIDEWAYS-FORCE COEFFICIENT ROUTINE INVESTIGATION MACHINE)

This is a purpose made machine which has a test wheel which is dragged along for approximately 0,5 km.

5.9 GRIP TESTER

This apparatus is a surface friction tester that may be towed at speeds up to 130 km/h or may be pushed. It works on the braked wheel principle.

5.10 PENDULUM TESTER

This was originally designed for measuring the friction of shoes. It has an arm approximately the distance from a person's knee to the foot. Using a rubber slider the foot is swung through an arc and the friction between the specimen and the rubber is measured on a calibrated scale.

It is my opinion that the most acceptable test method is the Pendulum test to measure the slip/skid value, not only in the laboratory but in the field.

6. CONCLUSIONS

In this paper, the different types of failures have been describe, although there are other failures these represent the major reported ones. Failures are generally caused by the incorrect design or in construction methods. In most cases, we understand the reason for the failure and this could have been avoided with more care being taken.

The initial conclusion is often incorrect due to some other failure of one or more of the supporting layers. Sand is always the first reason for failure and it has been shown that the cause more often is in base failure. Failures, in general, can be attributed to a basic lack of understanding of construction and design techniques. By using the designing and construction documents available from the British Standards Institution, Trade Association Data Sheets and the dedicated design guides, the majority of failures can be resolved before they occur. All this information has been based on many years of construction and design techniques.

In most cases, we understand the reason for failure and the failure could have been avoided with more care being taken. In the case of bedding sand, some of the failure occurred even in well-considered projects because the failure mechanism was not understood. Whilst specifications have been developed to avoid laying course failure, they have been discovered by empirical observations to explain the mechanism of sand failure and performance in respect to loading. A fuller understanding of the formation and hardness of material against breaking down under load and with the presence of water is the basis for this theory.

Whilst this paper has highlighted failures due to design, construction and product, there are many more examples where these problems have not occurred and Photo 25 show one of the many heavy duty applications that are working very successfully.

One of the most publicised heavy duty application is at Euston. Photo 26 shows the area after it had been trafficked for 15 years. The maintenance of this area was confined to an occasional sweep and no further attention apart from cleaning out the gullies.

7. REFERENCES

1. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. -- London : BSI, 199?. -- P.V. -- (BS 1377).

2. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Guide for Structural Design of Pavement Constructed with Clay or Concrete Block Pavers. -- London : BSI, 1992. -- 16P. -- (BS 7533).

3. DOWSON, A.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.

4. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Precast Concrete Paving Blocks. -- London : BSI, 1986. -- P.V. -- (BS 6717).

5. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Precast Concrete Paving Blocks : Requirements and Test Methods. -- Brussels : CEN, 1996. -- 63P. (prEN 1338).

TYPE OF SOIL *TIPO DE SUELO*	PLASTICITY INDEX *ÍNDICE DE PLASTICIDAD*	HIGH WATER TABLE *NIVEL FREÁTICO ALTO*			LOW WATER TABLE *NIVEL FREÁTICO BAJO*		
		CONSTRUCTION DETAILS *DETALLES DE CONSTRUCCIÓN*			CONSTRUCTION CONDITIONS *CONDICIONES DE CONSTRUCCIÓN*		
		POOR *POBRES*	AVERAGE *PROMEDIO*	GOOD *BUENOS*	POOR *POBRES*	AVERAGE *PROMEDIA*	GOOD *BUENAS*
Heavy clay *Aricila pesada*	70 60 50 40	1,5 to 2 1,5 to 2 1,5 to 2 2 to 2,5	2 2 2 to 2,5 2,5 to 3	2 2 to 2,5 2 to 2,5 2,5 to 3	1,5 to 2 1,5 to 2 2 2,5	2 2 2 to 2,5 3	2 to 2,5 2 to 2,5 2 to 2,5 3 to 3,5
Silty clay *Arcilla limosa*	30	2,5 to 3,5	3 to 4	3,5 to 5	3 to 3,5	4	4,6
Sandy clay *Arcilla arenosa*	20 10	2,5 to 4 1,5 to 3,5	4 to 5 3 to 6	4,5 to 7 3,5 to 7	3 to 4 2,5 to 4	5 to 6 4,5 to 7	6 to 8 7 to >8
Silt / *Limo*	--	1	1	2	1	2	2
Sand (poorly graded) *Arena (mal gradada)*	--	← 20 →					
Sand (well graded) *Arena (bien gradada)*	--	← 40 →					
Sandy gravel *Grava arenosa*	--	← 60 →					

To / *a*

Table1. C.B.R. Values for different soils.
Tabla 1. *Valores de CBR para diferentes suelos.*



Photo 1. / ***Foto 1.***



Photo 2. / ***Foto 2.***



Photo 3. / ***Foto 3.***



Photo 4. / ***Foto 4.***

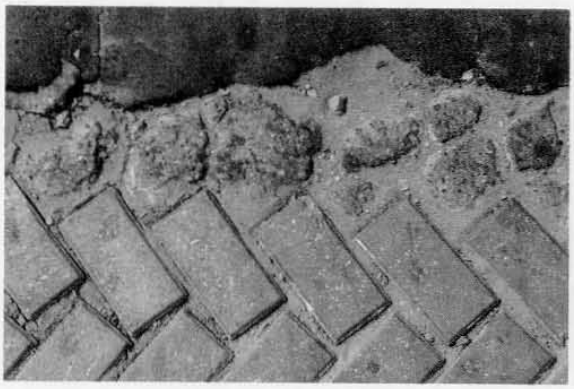

Photo 5. / ***Foto 5.***



Photo 6. / ***Foto 6.***



Photo 7. / ***Foto 7.***



Photo 8. / ***Foto 8.***



Photo 9. / ***Foto 9.***



Photo 10. / ***Foto 10.***



Photo 11. / ***Foto 11.***



Photo 12. / ***Foto 12.***



Photo 13. / *Foto 13.*



Photo 14. / *Foto 14.*



Photo 15. / *Foto 15.*



Photo 16. / *Foto 16.*



Photo 17. / *Foto 17.*



Photo 18. / *Foto 18.*



Photo 19. / *Foto 19.*



Photo 20. / *Foto 20.*



Photo 21. / ***Foto 21.***



Photo 22. / ***Foto 22.***



Photo 23. / ***Foto 23.***

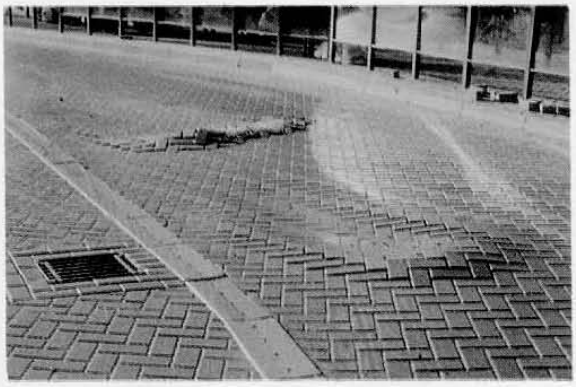

Photo 24. / ***Foto 24***

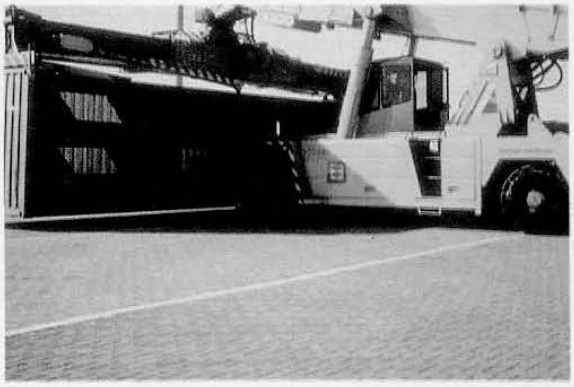

Photo 25. / ***Foto 25.***



Photo 26. / ***Foto 26.***

LAS SUPERFICIES ADOQUINADAS Y LA IMPORTANCIA DE ESPECIFICAR CORRECTAMENTE LOS MATERIALES Y EL DETALLADO [3] [4]

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

RESUMEN

Es muy importante estudiar las fallas para ver los materiales desempeñándose hasta sus límites y poder determinar acertadamente los factores de seguridad en todos los componentes de la estructura. Una falla no es fácil de definir, ya que los diferentes profesionales tienen diferentes prioridades. El arquitecto se concentra en el impacto visual, mientras que el ingeniero se preocupa más por la construcción del pavimento. El ingeniero de mantenimiento, que mantiene una determinada área funcionando diariamente, considerará el pavimento como fallado si se le debe hacer mantenimiento a menudo.

La investigación de fallas puede ser compleja porque un falla corriente puede llevar a una falla futura. A menudo la conclusión inicial no es correcta.

Esta ponencia investiga todos las posibilidades de falla que existan, en los cuales el autor haya estado comprometido en los últimos 20 años de investigación de pavimentos de adoquines de concreto. Las fallas se pueden resumir en tres tipos:

1. De diseño
2. De construcción.
3. De aplicación de producto.

La falla estructural de un pavimento se manifiestan por si misma cuando la superficie muestra grandes deformaciones, causadas generalmente por la falla de una o más capas subyacentes. Este es debido a que poseen un espesor o una calidad inadecuados para soportar las cargas aplicadas, estando colocadas sobre la subrasante. Las propiedades del material utilizado pueden cambiar con el tiempo. La falla se genera cuando las capas estructurales no pueden sostener una superficie libre de grietas y a medida que más y más arena entre en las grietas, se tendrá una superficie cada vez más inaceptable para el paso de vehículos.

La selección inadecuada del material de base puede causar fallas, particularmente cuando se permite que penetre la humedad en estas capas. No se debe utilizar material sensible al congelamiento.

El confinamiento inadecuado de los adoquines en servicio, da como resultado el desplazamiento de los mismos. Las juntas de espesor inapropiado o irregular pueden causar fallas al permitir la entrada de agua a través de ellas. El funcionamiento del pavimento depende de la trabazón y, por lo tanto, depende de movimientos elásticos relativamente bajos. Los detalles constructivos pobremente ejecutados y los cortes en los extremos pueden contribuir a la pérdida de trabazón.

Las depresiones en la superficie, de cerca de 1 m de diámetro han sido denominadas "huellas del elefante", y fueron atribuidas originalmente a fallas en la arena cuando las partículas de arena se degradan, causando que varíe el volumen de arena.

Los adoquines se han partido en dos, y esto se atribuye, generalmente, a un inadecuado espesor de la capa de arena o a cargas de gran impacto.

La falla constructiva típica de los pavimentos de adoquines, se muestra en la Foto 1.

1. FALLAS EN EL DISEÑO

En todos los métodos de diseño, es necesario conocer la resistencia de la subrasante definida de acuerdo con el valor de la Relación de Soporte de California – CBR. Los métodos actuales de diseño usan el valor de CBR saturado en vez del valor de CBR determinado en el sitio. El método para evaluar el valor de CBR saturado se describe en la Norma Británica BS 1377 : Parte 4 [1]. La Tabla 1, tomada de la Norma Británica BS 7533 [2] ilustra el valor de CBR para diferentes tipos de suelos.

Esta tabla muestra que un mismo suelo puede exhibir muchos valores CBR diferentes utilizados para el diseño. Existen dos valores de CBR relevantes: uno durante la construcción, y el otro el de la vida de servicio. En términos generales mientras más alto el valor CBR, más fuerte es el suelo y la construcción total puede ser reducida.

Un pavimento se diseña para una vida útil y según el número de vehículos que van a pasar sobre el pavimento. En la evaluación correcta de CBR de la subrasante, el no tomar muestras suficientes del sitio de la investigación puede resultar en un subdiseño, por ejemplo, por no tomar el menor valor representativo del CBR. El no obtener unos valores estimados

[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 al versión original de cada ponencia.

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

correctos acerca del número de vehículos que van a transitar la vía, puede derivar en un espesor mayor o menor de la estructura diseñada para construcción.

La selección del material para cada capa y los procedimientos de diseño, están descritos en la Nomra Británica BS 7533 [2]. La elección del material errado para la subbase puede dar como resultado que la superficie se levante como se puede apreciar en la Foto 2. En este caso la base era sensible al congelamiento y se elevó ante el ataque de este.

Cuando se coloca una capa rígida de base, se le debe construir un drenaje a la capa de arena, ya que las investigaciones muestran como resultado que la capacidad de soporte de la arena se puede reducir debido a su fluidificación o degradación.

Se deben tener en cuenta las pendientes de la superficie, importantes para la rápida remoción de agua superficial, lo que evitará la formación de charcos como se muestra en la Foto 3.

Para las carreteras, la pendiente mínima se especifica generalmente como el 1 % longitudinalmente y el 2,5 % transversalmente. Cuando se utilizan drenajes, estos deben estar más bajos que la superficie del pavimento para poder drenar el agua del área. La tolerancia de la superficie de adoquines de concreto cercana a los sumideros, a los canales de drenaje de la superficie y las salidas deben ser de + 6 mm – 0 mm.

La información escrita acerca de las fallas en diseño donde se ha presentado ahuellamiento, es muy limitada.

Los ahuellamientos son causados porque las capas estructurales subyacentes se consolidan por el tráfico canalizado que pasa sobre los adoquines, y la Foto 4 muestra un ejemplo.

En 1994, en una estación de buses en Sheffield, a raíz de la aparición de depresiones en la superficie, los ingenieros decidieron drenar la capa de arena para minimizar el riesgo de fallas futuras debido a la entrada de agua. Se perforaron huecos a través de la base rígida y se llenaron los huecos con gravilla suelta. Esta falla se reportó en una ponencia en la Conferencia de Israel [3].

Cuando se especifican los detalles de confinamiento lateral, es importante tener conocimiento del tipo y peso de los vehículos. En la Foto 5 el confinamiento entre la superficie de asfalto existente y la de adoquines era de concreto con una resistencia deficiente. El concreto falló e hizo que los adoquines rotarán y perdieran trabazón entre ellos.

En la Foto 6, un canal de drenaje de acuerdo con la Norma Británica, de toda la longitud, se colocó sobre un bordillo de concreto pobre en un área de tráfico pesado en una carretera. No sólo se separó del concreto sino que también se inclinó y se quebró debido al la carga excéntrica. También, al aflojarse, quedó en contacto con los adoquines del canal adyacente y los bordes se desbordaron.

La trabazón, como se describió previamente, requiere que los adoquines sean contenidos y no se permite que se muevan de un lado para otro, apretándolos. Los bordes deben ser lo suficientemente fuertes para tolerar el manejo.

La Foto 7 ilustra un confinamiento lateral bien diseñado, en el cual se utilizaron bordillos cortos pues se sabía que el único tráfico que tendría sería el de automóviles y pequeñas camionetas.

Existen dos alturas (espesores) de adoquines que se especifican comúnmente: 60 mm y 80 mm recomendados para el uso bajo tráfico. Como guía para su uso, los adoquines de 80 mm se utilizan para lugares con tráfico pesado, mientras que los de 60 mm se utilizan en áreas de tráfico liviano. En algunos puertos del Reino Unido se han utilizado adoquines de 100 mm de altura (espesor) para áreas de tráfico muy pesado y para áreas de tráfico muy liviano, se han utilizado adoquines de 50 mm de espesor.

Algunas formas de adoquines sólo se pueden colocar en patrón de hiladas. Para los adoquines rectangulares, se prefiere el patrón de espina de pescado en áreas con tráfico vehicular. Cuando se colocan los adoquines rectangulares en hiladas, en áreas de mucho frenado, los adoquines se han apartado de su alineamiento, como se muestra en la Foto 8.

Para satisfacer la demanda del consumidor para colocar adoquines de concreto en línea recta en ambas direcciones (hileras), se abrieron las juntas y quedaron de gran tamaño. Después de que se dieron al tráfico, las juntas se separaron aún más como se muestra en la Foto 9.

2. FALLAS DE CONSTRUCCIÓN

Aun cuando se han escrito muchas normas acerca de los métodos para la construcción de pavimentos de adoquines, muchos contratistas continúan empleando subcontratistas con pocas o casi nulas habilidades en la construcción de pavimentos de adoquines de concreto. Muchos de estos subcontratistas son empleados para colocar la capa de arena y la de adoquines, correspondiéndole al contratista principal colocar las capas subyacentes.

La capa de arena no se puede usar como material nivelador para la base. Cuando se construye una base flexible, esta debe ser cerrada, de manera que la arena no caiga dentro de los espacios vacíos y los llene. Ésto resultaría en un perfil inaceptable en la superficie. Si la superficie de la base tiene que tener una textura abierta, se debe tratar de acabar con dedicación y se puede sellar con un material más fino.

Al colocar la arena, usando el método no compactado, de colocación, debe ser de densidad uniforme. Al comienzo del enrasado, se toma cerca de medio metro de avance antes de que se pueda formar una sobrecarga detrás del enrasador. Dado que varía el volumen de la arena, después cuando se expone el

pavimento al tráfico, el resultado es una pequeña depresión entre el área principal de adoquines de concreto y la superficie existente, como se muestra en la Foto 11. Esto se puede solucionar regando una capa delgada de arena sobre la arena ya enrasada.

Cuando se utilizan materiales estabilizados con cemento – CBM para las bases, es necesario curar y proteger correctamente base ya compactada. En áreas más grandes donde se han utilizado un CBM Tipo 3 (suelo-cemento), se debe esperar a que endurezca la base y se contraiga. Estas fisuras se deben sellar de tal manera que no penetren partículas de arena en ellas, ya sea mediante membranas impermeabilizantes u otros medios, por ejemplo, geotextil para filtros. La Foto 12 muestra una serie de fisuras de contracción en la base. Estas fueron descubiertas en una investigación al inspeccionar una depresión en la superficie, para la cual se había culpado a la degradación de la arena.

En situaciones en las cuales se construyen pavimentos de adoquines de concreto en vías existentes y la base es discontinua, puede suceder que ocurran fisuras entre la construcción existente y la nueva construcción, creando una grieta natural entre ellas. Una vez más, como en el ejemplo anterior, la arena puede penetrar en las fisuras después de puesto el pavimento al trafico, dando como resultado que en este momento el pavimento de adoquines de concreto está por debajo de su nivel original.

La mayoría de las vías cuentan con formas variadas de cámaras de inspección construidas dentro de ellas, normalmente en mampostería. Ésto puede ocasionar dos problemas serios: primero, el material importado usado para la base, no ha sido compactado al mismo nivel de las áreas abiertas del lugar. Cuando el trafico pasa sobre el pavimento terminado, consolida esta capa a través de las capas superiores, causando una depresión alrededor de la cámara. El segundo problema que puede ocurrir es similar al problema descrito previamente cuando se construye con otro material diferente. Ambos se pueden reducir compactando la base alrededor de la cámara en capas más delgadas y colocando un geotextil sobre la subrasante o la base y subiéndolo hacia las paredes de la cámara. Cuando una tapa de la cámara no se ha pegado bien a la estructura de mampostería, se tiene como resultado la pérdida de arena a través de la fisura creada por los vehículos que la pisan, lo que ocasiona que el marco de metal se desplace. La solución fue pegar firmemente el marco con un mortero epóxico fuerte y empalmar el marco y la mampostería mediante pernos, en vez de, únicamente, asentar el marco sobre un mortero débil.

Los otros métodos de tratamiento alrededor de las cámaras de inspección son rodear el marco de la cámara con un marco de concreto, y la Foto 13 muestra el problema que ocurrió.

En muchos casos el contratista define los confinamientos y los fija rígidamente, y generalmente no deja ningún margen de tolerancia para los adoquines. Ésto resultará en que haya que hacer uno cortes muy pequeños para acomodarlos o que las juntas entre adoquines se abran para permitir que se acomoden.

Ambos métodos pueden generar fallas por las pequeñas piezas que pueden ser succionadas por el tráfico o por las máquinas limpiadoras de calles, lo que genera el desplazamiento de los adoquines y la pérdida de la trabazón. La norma requiere que la junta entre adoquines no sea mayor de 5 mm. Pero la practica de cortar piezas delgadas o pequeñas continúa y esto se muestra las Foto 14. La Foto 15 muestra un corte poco preciso, inaceptable según los parámetros de la norma y que puede ser responsable, dependiendo del peso del tráfico, de ocasionar fallas.

Para satisfacción del cliente, el contratista procura líneas rectas al colocar los adoquines, variando el espesor de las juntas. Esta práctica es aceptable solamente en pavimentos planos. Se convierte en un problema cuando las cámaras y las esquinas de la vía se involucran y dan como resultado el movimiento de adoquines y la apertura de las juntas, llevado a una probable falla si el agua entra en las capas subyacentes. La Foto 16 muestra el resultado de ésta colocación suelta, después de que le ha pasado tráfico pesado y de buses.

La Norma Británica BS 7533 [1] fija la tolerancia para cada capa y determina el espesor mínimo para la capa de arena. Si es mucho menor, los adoquines se pueden quebrar bajo las cargas repetitivas. No todos los pavimentos en adoquines son nuevos, muchos son sobrecapas. En estos casos la superficie original de la vía se hace más uniforme, removiendo la capa superior. Cuando esto sucede las partículas de mayor tamaño de los agregados se salen de la matriz y cuando el espesor de la arena está al mínimo, existe el riesgo de que se quiebren los adoquines. La Foto 17 muestra el problema de los adoquines quebrados. Al investigar este caso, había no solamente trozos de agregados apuntando hacia afuera sino que el espesor de la arena estaba solo entre 10 mm y 15 mm.

El desempeño del pavimento de adoquines depende de la trabazón. Ésta se logra llenando totalmente de arena fina la junta entre las caras verticales de los adoquines. Las normas recomiendan arena secada al horno para facilitar el llenado de la junta. En la mayoría de los casos la arena se vuelve húmeda y la fluidez se reduce mucho, y en vez de llenar completamente la junta, la puentea. Esto da la apariencia de una junta completamente llena, pero al secarse, o al ser mojada por la lluvia las juntas quedan vacías, sin arena, lo cual ocasiona que el agua penetre en las capas subyacentes.

Otra práctica no recomendada es que los contratistas coloquen los adoquines en el área y luego barran el sello de arena en toda el área. Esta última

operación se podría estar realizando muchas semanas después y, una vez más, si llueve, el agua penetraría las capas subyacentes.

Como se explicó previamente, esta agua puede movilizar la arena y causar un perfil superficial insatisfactorio, lo que tiene efecto en el comportamiento de las capas subyacentes. La recomendación de la norma es que la colocación de la arena, de los adoquines, el corte de los ajuste, el vibrado, el llenado de las juntas se lleve a cabo diariamente o a medida que avanza el proceso.

Otro problema para la construcción y los contratistas es la distribución de la arena antes de colocarla. En vez de arrumar la arena a un lado de la obra, en este caso el contratista colocó arrumes a lo largo de la vía. Consecuentemente la arena se regó haciendo más difícil el proceso de enrasarla efectivamente como lo muestra la Foto 18.

La definición del lugar de los confinamientos se debe hacer con mucho cuidado, pues si se alinean en forma incorrecta, puede originar cortes excesivos.

Como se dijo al principio para que los pavimentos de adoquines de concreto trabajen correctamente se requiere de la trabazón. Para lograrla es necesario que los adoquines sean restringidos mediante el uso de bordillos adecuados, los cuales no deben ser muy largos.

Además de contener los adoquines, el confinamiento debe contener la capa de arena.

Otro ejemplo de la falla de los contratistas para construir el pavimento correctamente se muestra en la Foto 19 y es atribuida a diferenciales en el espesor de la capa de arena.

Los charcos pueden ser ocasionados por que el contratista no extendió el espesor requerido de base sobre las capas subyacentes, y/o por el cliente al cambiar el uso del pavimento, de un parqueadero de automóviles a uno para vehículos pesados.

3. FALLA DE LOS MATERIALES

Los materiales de la construcción son la capa de arena gruesa y los adoquines de concreto.

Los adoquines generalmente no fallan, en algunas ocasiones las esquinas se desbordan. Esto se explica ya sea por productos de unos moldes nuevos o que los adoquines han estado en contacto directo, unos con otros, debido a la deflección de la base, más allá de lo usual, como se muestra en la Foto 20. La acción de la llanta cargada origina esfuerzos en el punto de contacto y que las esquinas se quiebren.

Los adoquines, cuando están colocados, se pueden secar a ratas diferentes, haciendo que parezcan húmedos o empapados. Ésto puede ser ocasionado por que los adoquines hayan sido pobremente compactados, o que hayan sido producidos con agregado muy fino en la matriz.

Los adoquines pueden ser suministrados con deficiencia en los finos de la superficie, lo que causa que ésta sea tosca, mientras que algunas veces la superficie tiene una textura abierta como se muestra en la Foto 21.

Generalmente se culpa a los adoquines de las fallas, pero las causas son otras. en la Foto 22 donde los adoquines se están quebrando , la causa del daño se debe al impacto de la parte de abajo de los buses al rozar la superficie. La causa es que los buses van a muy alta velocidad y la rampa es demasiado corta.

La característica de la aparición de partículas de arena fina alrededor y sobre los bordes de los adoquines, generalmente indica degradación de la arena. Pero este no es siempre el caso; un ejemplo de ello se ilustra en la Foto 23. Las primeras apariencias indican fallas en la arena pero sólo cuando la superficie de la base está expuesta, el perfil de la superficie estaba fuera de la tolerancia y la base que se había utilizado estaba profundamente impresa con la forma del adoquín. Toda la superficie se había deflectado más de lo debido, permitiendo que el agua penetrara en las capas subyacentes causando que los materiales finos de la arena se movilizaran y se bombearan hacia arriba hasta la superficie.

Otras fallas que se atribuyen a la arena se muestran en la Foto 24 y se han atribuido a capas de arena más gruesas de lo estipulado y al ingreso de agua.

4. DESEMPEÑO DE LA SUPERFICIE

Un aspecto del desempeño de la superficie son sus propiedades de resistencia al frenado y al deslizamiento, que son muy importantes; y la selección de los productos correctos es primordial para el desempeño.

Es necesario diferenciar entre la resistencia al deslizamiento y al resbalamiento. Resbalar es para los peatones y deslizarse para los vehículos. Considerando la resistencia a deslizarse en términos sencillos, la llanta del vehículo se desplaza sobre la piedra de la superficie de la vía. Esta es llamada la textura macro y la fricción entre la piedra y la llanta forma la micro textura. En forma similar para los adoquines, las juntas entre ellos forman la macro textura y el acabado de la superficie se relacional con la micro textura.

La Norma Británica BS 6717 [4] restringe el contenido de partículas de agregado solubles en ácido, para los adoquines de concreto, con el fin de minimizar el riesgo de deslizamiento y resbalamiento. En opinión del autor, no existe comparación directa entre los valores utilizados de resistencia al deslizamiento de los diferentes materiales, y el solicitar valores para productos en lugares para baja velocidad, por ejemplo, hasta 50 km/h, según los solicitados para las normas en autopistas no tiene sentido. En los laboratorios se puede determinar un valor de resistencia al deslizamiento. Esta resistencia está reflejada en

la nueva Norma Europea en la cual se colocó a un valor mínimo de 40 [4].

El resbalamiento es mucho más difícil de evaluar puesto que todo el mundo camina con una marcha diferente, diferentes condiciones de calzado y, en muchos casos, diferentes características de carga. En un estudio reciente fue muy interesante observar el caminado de las personas. Es posible que se pueda medir la presión aplicada a través del contacto con el tacón y la acción del contacto inicial con el mismo, y esto podría probablemente determinar el riesgo de cuándo y cómo ocurre el resbalamiento. La textura de la superficie, el tipo de agregados y el estado de limpieza influyen en la resistencia al resbalamiento. El Consejo del Gran Londres, en sus investigaciones, produjo una tabla de valores de resbalamiento. Utilizando ésta y un método de laboratorio para evaluar y obtener una cifra para el resbalamiento, se puede especificar un valor mínimo de 35. Una autoridad local decidió especificar cerca del doble de esta cantidad y colocó productos adecuados para este valor tan alto. Si bien ésto no le causó problemas a las personas con todas sus capacidades, le causó grandes problemas a los menos capacitados, dado que el agarre entre el piso y las suelas de los zapatos era demasiado bueno para moverse libremente sobre la superficie.

5. MÉTODOS DE ENSAYO

Para medir la resistencia al resbalamiento, existen diferentes métodos y la lista que se presenta a continuación da los más conocidos:

5.1 EL ENSAYO TORTUS

Este instrumento se desarrolló en el Reino Unido para medir la fricción dinámica. Es portátil, tiene una pequeña área de contacto y puede ser movido a través del piso a velocidades variables para modelar el deslizamiento del tacón y el resbalamiento. No se ha reportado correlación con el desempeño. Sus limitaciones son que requiere de una superficie larga e ininterrumpida.

5.2 LA MÁQUINA JAMES

Este es un aparato con forma de una barra articulada, desarrollado en los Estados Unidos en 1944 para medir el coeficiente de fricción estática. Se reconoce como un equipo que no es muy portátil y por consiguiente ha sido superado por modelos recientes más portátiles.

5.3 EL PROBADOR NSB BRUNGRABER

Este aparato es un desarrollo de la máquina James para medir la fricción estática. Es más portátil que su predecesor, fácil de usar, lo cual reduce la posibilidad de error de operación y evita el problema del tiempo perdido entre las aplicaciones de carga. Sin embargo requiere una gran cantidad de mediciones para obtener resultados confiables.

5.4 EL MEDIDOR DE ARRASTRE JAPONÉS

Este es un aparato portátil de baja velocidad, diseñado para medir el resbalamiento dinámico de la suela y el tacón, correlacionada con la percepción sensorial humana obtenida a través de la retroalimentación de sujetos sometidos a la prueba.

5.5 EL MEDIDOR DE DESLIZAMIENTO CEBTP

Este aparato portátil, del tipo arrastre, se desarrolló en Francia para medir el resbalamiento dinámico de la suela y el tacón a relativa baja velocidad. Las lecturas se toman sobre una distancia de 1,5 m a una velocidad de 3 km/h.

5.6 LA PRUEBA SUECA ESTÁNDAR DE RESBAMIENTO

Incluye el modelo de un zapato en un aparato que simula el movimiento del pie durante el caminar. Aunque es un método estándar en Suecia, no ha ganado aún reconocimiento internacional como prueba.

5.7 EL MEDIDOR NORSE

Un medidor de agarre de carreteras que utiliza rueda de prueba de tamaño real, que opera a un velocidades entre 30 km/h y 95 km/h, y que puede medir sobre una distancia de 4 km, en un vehículo especialmente diseñado.

5.8 SCRIM (MÁQUINA DE INVESTIGACIÓN RUTINARIA DEL COEFICIENTE DE FUERZA LATERAL)

Esta es una máquina hecha para dicho propósito, que tiene una rueda de prueba que se arrastra a lo largo de aproximadamente 0,5 km.

5.9 PROBADOR DE AGARRE

Este aparato es un probador de la fricción de la superficie que se puede remolcar a velocidades de hasta 130 km/h o puede ser empujado. Trabaja bajo el principio de rueda frenada.

5.10 VERIFICADOR DE PÉNDULO

Fue diseñado para medir la fricción de los zapatos. Tiene un brazo con una longitud de aproximadamente la distancia entre la rodilla y el pie de una persona. Utilizando un deslizador de caucho el pie es columpiado en forma de arco y la fricción entre el espécimen y el caucho se mide en una escala calibrada.

Es la opinión del autor que el método de prueba más aceptable es el del Péndulo para medir los valores de deslizamiento y resbalamiento, no sólo en el laboratorio, sino también en el campo.

6. CONCLUSIONES

En este documento se han descrito las diferentes

clases de fallas y aunque existen otras fallas, éstas representan la mayoría de los casos reportados. Las fallas son causadas, generalmente, por el incorrecto diseño o por defectos en los métodos de construcción. En la mayoría de los casos entendemos que las causas de las fallas se pudieron haber evitado si se hubiese tenido más cuidado.

La conclusión inicial es a menudo incorrecta, debido a alguna otra falla de una o más de las capas de soporte. La arena es siempre la primera razón de falla y se ha demostrado que la causa más frecuente está en la falla de la base. Las fallas, en general, pueden ser atribuidas a una falta de entendimiento básico de las técnicas de construcción y de diseño. Utilizando los documentos disponibles para la construcción y el diseño, publicados por la Institución Británica de Normalización – BSI, en sus Hojas de Datos de las Asociaciones Gremiales y las guías de diseño, se pueden evitar la mayoría de las fallas antes de que ocurran. Toda esta información se ha basado en muchos años de depuración de las técnicas de diseño y construcción.

En la mayoría de los casos se entienden las razones para las fallas, y las fallas se pudieron haber evitado si se hubiera tenido más cuidado. En el caso de la capa de arena, algunas de las fallas ocurrieron en proyectos bien concebidos, debido a que el mecanismo de falla no se había entendido en ese entonces. Se han desarrollado procedimientos para evitar fallas en la capa de arena, descubiertos por observaciones empíricas para explicar el mecanismo de las fallas en la arena y su comportamiento con respecto a las cargas. Un entendimiento más completo de la formación y dureza de los materiales como factor en la degradación bajo las cargas y en presencia de agua, es la base de esta teoría.

Mientras que este documento ha resaltado las fallas debidas al diseño, la construcción y la producción, hay muchos más ejemplos donde estos problemas no han ocurrido; y la Foto 25 muestra una de las muchas de las aplicaciones de tráfico pesado que trabajan exitosamente.

Una de las utilizaciones en tráfico pesado a la que se le ha dado mayor publicidad ha sido la estación de Euston. La Foto 26 muestra esta área después de resistir el tráfico durante 15 años. El mantenimiento ha sido sólo una barrida ocasional, sin más atención fuera de la limpieza de los sumideros.