

# THE NORTH AMERICAN PORT PAVEMENT DESIGN MANUAL <sup>1 2</sup>

**John KNAPTON**

Professor

UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE

Newcastle upon Tyne, United Kingdom

**David R. SMITH**

Director

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE - ICPI

Sterling, VA, U.S.A.

## 1. INTRODUCTION

This paper describes the North American Version of the Second Edition of the Port & Industrial Pavement design manual. For the first time, a radically new way of analyzing pavements is incorporated in the design method. The original research upon which the First Edition [1] was based was undertaken in the 1970's and pavements were analyzed by programmable calculator technology [12]. This meant that stresses and strains could be calculated accurately at only one or two special points in the proposed pavement structure. In the latest edition, finite element analysis has been employed and the design of the whole pavement has been separated into design of the base and design of the foundation. In making this separation, no accuracy is lost and the design exercise has been greatly simplified such that only one chart, shown in Figure 2 is now required for design. The chart may be used to proportion the base course of a heavy duty pavement.

During the last 10 years, a good deal of experience has been gained in the use of Material Conversion Factors or Material Equivalence Factors so that they can now be used as a means of effectively swapping one material for another during the design process. This means that when a design has been produced using Figure 2, the designer can generate alternative design solutions using different materials and so investigate a full range of solutions. Table 9 gives Material Conversion Factors for a full range of commonly used base materials. The new edition differs from previous ones in that Material Conversion Factors were used previously only in overlay design.

## 2. DESIGN PRINCIPLES

The design procedure is based upon the principle that pavements are designed to remain serviceable throughout the design life of the pavement. In terms of structural performance, serviceability failure in a heavy duty pavement usually occurs by either ex-

cessive vertical compressive strain in the subgrade or excessive horizontal strain in the base. For pavements with stabilized bases the tensile strain in the base is the active design constraint whereas subgrade compressive strain is frequently the active design constraint for pavements with granular bases. Surface deformation in the order of 50 mm (2 in) to 75 mm (3 in) will normally exist at failure. The new Manual also deals with the important topic of pavement overlay or inlay. An existing pavement may need to be strengthened either because it has deteriorated to a condition, which no longer offers adequate support to the handling equipment, or because heavier equipment is to be introduced. Taking advantage of the existing or residual strength of pavement can sometimes lead to cost savings. The paper also shows how the residual strength of a pavement can be quantified and included in the overlay design procedure.

## 3. ANALYSIS TECHNIQUE

In order to produce Figure 2, typical industrial pavements have been analyzed using the finite element method in which a model was developed to represent all components of the pavement. Elastic properties and Poisson's ratio values were chosen to describe the behavior of each pavement component. Fatigue is taken into account by defining limiting stresses to which the pavement can be exposed for one load pass and then reducing those stresses to account for multiple load repetitions.

A new method of design is introduced allowing a simpler design procedure. This involves dividing the pavement into foundation and structure so that the structure (base) thickness can be proportioned to withstand the applied load regime and the foundation can be proportioned to develop adequate support to the upper layers (base and surfacing) taking into account ground conditions. The rationale behind this is that it was found during the research leading to the publication of the new edition that present highway pavement design procedures include pavement foundation guidance which relates sub-base and capping specification to subgrade strength such that the subgrade is always stressed to a level commensurate with its strength. Essentially, recent developments in pavement design procedures have

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> This is the original version of this paper.

separated design into foundation design which is based upon subgrade strength and base design which is based upon loading regime. Figure 1 indicates the courses in a typical heavy duty pavement. In some pavements, one or more of the courses may be absent.

#### 4. CALIBRATION OF THE DESIGN METHOD

All design procedures based upon mechanistic analysis require proven criteria for levels of stress or strain which define limiting permissible values. Usually, these criteria are stresses or strains known to exist in successful designs produced by empirical design methods. By this means, the mechanistic model is effectively calibrated and design produced by it has the same level of integrity as those produced by the design method used in the calibration exercise. Part IV of the AASHTO Pavement Design Guide [13] "Mechanistic-Empirical Design Procedures" states: "It is, therefore, necessary to calibrate (mechanistic) models with observations of performance i.e. empirical correlations". The calibration limiting stresses upon which Figure 2 is based are determined as follows. A proven semi-empirical pavement design method has been used to assess the levels of stress at critical positions in the following manner. The calibration method adopted is the UK highway pavement design method modified for interlocking concrete pavers, BS 7 533 which is based upon the original AASHTO research. BS 7 533 [6] has been used to produce a number of design examples covering a wide range of pavement design situations which have then been analyzed using the same linear elastic finite element model as is used to establish permissible stresses. The stresses which the finite element model has demonstrated to exist in pavements designed according to BS 7 533 are used as the critical design stresses in pavement design. In other words, Figure 2 has been produced using the same finite element model which has been used to back-analyze a range of pavements produced using the original AASHTO research. This means that the experience and methodology underpinning BS 7 533 has been extended to deal with all those pavements likely to be encountered in heavy duty pavement design situations. A benefit of this technique is that should the finite element model include inaccuracies, then those inaccuracies should largely cancel in that they will have been included in the BS 7 533 back-analysis calibration exercise in exactly the same way as they have been included in the design charts in Figure 2.

Fifteen pavements designed according to BS 7 533 were analyzed using the finite element model to determine stresses and strains at critical locations in each pavement. The pavement sections developed from BS 7 533 are shown in Table 1. Table 1 shows the design thicknesses adopted for each course when designed according to BS 7 533. All of the pavement structures presented in Table 1 were ana-

lyzed using the finite element model in conjunction with a standard axle load of 8,2 t (18 000 lb).

Preliminary analysis using the finite element program confirmed that the critical stresses occur at the bottom and at the top of the base directly beneath the applied load. Values of stresses at these critical locations are shown in Tables 2 and 3. Figure 3.9 of the AASHTO Design Guide relates tensile stress in concrete pavements to pavement thickness, wheel load and support offered to the slab by the underlying materials. A check on the validity of the Manual can be undertaken by comparing the tensile stresses produced by the finite element analysis with those produced by the AASHTO Guide. Table 2 includes the AASHTO tensile stresses for comparison. In all cases, the AASHTO tensile stresses are within 7 % of the finite element stresses. From Table 2, it can be concluded that BS 7 533 produces pavements whose strength is in line with AASHTO guidelines.

From Tables 2 and 3 it can be seen that the stresses induced in the base of the pavement are very similar for each subgrade CBR value and that they diminish with increasing levels of traffic. These Tables enable design stresses to be selected for all pavement types (although it is unlikely that traffic levels will exceed 4 million standard axles - MSA on a specific area during its design life in a typical port operation, the inclusion of higher levels of traffic widens the applicability of the Manual of pavements serving other industries and indeed to highway pavements). A small stress range in compression is to be expected owing to the equilibrium of vertical forces through the pavement from the point of load application down to other areas. Compressive stresses are important in surfacing materials where concentrated point loads applied by e.g. container corner casting, small steel wheels from specialized plant, stabilizing jacks in mobile cranes may cause localized surface distress. In conclusion the tensile stress at the underside of the base is frequently the limiting stress for structural design purposes in all practical pavements. Table 4 shows average values of the three tensile stresses existing in pavements designed over subgrades with CBR's of 1 %, 2 % and 5 % for each of the five fatigue levels (1,5 MSA to 25 MSA) used in the analysis. The values in Table 4 are used as permissible design stresses and the Design Chart has been constructed using these values. It is customary to use unfactored stress levels in pavement design since the failure limit state is essentially one of serviceability.

Having used the finite element model to calculate the stresses shown in Table 4 which exist in pavements designed according to BS 7 533, it is possible to analyse a range of typical pavements in order to establish the loads which generate similar stress values for a given number of load passes. This exercise has been carried out to produce Figure 2.

The finite element model used in developing the design charts and in the calibration exercise comprises an axi-symmetric idealization in which a cylindrical

layered system of diameter 7 m (23 ft) and depth 2,44 m (8 ft) was modelled by 63 rectangular elements each having a node at each corner and mid-way along each side. Each model perimeter node was restrained horizontally and each node at the lowest level was restrained both horizontally and vertically. A single point load was applied at the uppermost node at the center of the model. In order to simulate the effect of a circular patch load accurately, an extra very stiff axi-symmetric element, of radius equal to the radius of the load patch was generated above the cylinder. The load patch radius was determined by assuming the load to be applied as a pressure of 773 kPa (112 psi). The model was graded such that smaller elements were concentrated near the point of load application where stress variation was steep and larger ones were generated at greater depth and radius. The LUSAS finite element package licensed to the Civil Engineering Department at Newcastle University, UK, was used to generate the model [4].

## 5. PAVING MATERIALS

The material properties used in the analysis upon which the design charts in Part 6 are based are presented in Table 5. Figure 2 allows designs to be developed for pavements including a base comprising 9,67 MPa (1 400 psi) concrete with a flexural strength of 1,93 MPa (280 psi). It is assumed that the surface comprises 80 mm thick concrete pavers bedded in 30 mm thickness sand. Experience has shown that alternative pavement surfacing materials have little influence on overall pavement strength and alternative surfacing materials can be substituted with little influence on overall structural performance. In the finite element analysis, the surface has been modelled as a homogeneous 110 mm thick layer of material having an elastic modulus of 3 868 MPa (560 000 psi) and a Poisson's Ratio of 0,15. This has been found to equate closely with the properties of both pavers and bituminous bound surfacing materials. In the case of concrete block paving, 80 mm thick rectangular units laid to a herring-bone pattern have been found to exhibit a high level of stability and strength.

Once a pavement section has been developed using 9,67 MPa (1 400 psi) concrete, it can be "exchanged" for one incorporating base material of either greater or lesser flexural strength with the base thickness being adjusted accordingly. For example, a concrete base can be designed by replacing the cement treated base produced by Figure 2 with a Portland Cement Concrete - PCC base, using the Material Equivalence Factors in Table 9. The pavement surface selection depends on its resistance to wear and other surfacing requirements rather than the contribution which it might make to overall pavement strength.

## 6. LOAD ASSESSMENT

The loading regime to be used with Figure 2 is rationalized to a single equivalent load describing the

actual regime. When the design process is started there is usually no unique load value which characterizes the operational situation. Consequently it is necessary to gather information known about the loading environment in order to derive the equivalent single load to be used with Figure 2. Firstly information regarding the types of loads that can be expected is given with factors that should be considered. This is followed by a rational method of deriving the single equivalent pavement load required for use with the design chart through proximity and dynamic factors. The value of the design wheel load depends upon the range of container weights being handle. Design should be based upon the Critical Load which is defined as the load whose value and number of repetitions leads to the most pavement damage. Relatively few repetitions of a high load value may inflict less damage than a higher number of lesser load values. The entire load regime should be expressed as a number of passes of the critical load. For each container weight, calculate the damaging effect caused when plant is handling containers of that weight from the following equation:

$$D = (W/26\ 400)^{3,75} (p/112)^{1,25} N$$

where:

D = Damaging effect.

W = Wheel load corresponding with specific container weight (lb).

P = Tyre Pressure (psi).

N = % of containers corresponding with specific container weight

The container weight leading to the greatest value of D is the critical weight container and all subsequent wheel load calculations should be based upon this load. Experience in the use of the previous Editions of the manual indicates that when the containers being handled comprise 100 % 12,2 m (40 ft) containers, the critical load is commonly 22 t (48 400 lb) and when 6,1 m (20 ft) containers are being handled, the critical load is 20 t (44 000 lb). In general, mixes of 40 ft/20 ft containers have a critical container weight of 21 t (46 200 lb).

## 7. DYNAMICS

The effects of dynamic loading induced by cornering, accelerating, braking and surface unevenness are taken into account by the factor  $f_d$ . Where a section of a pavement is subjected to dynamic effects the wheel loads are adjusted by the factors given in Table 6.

## 8. CONTAINER CORNER CASTING LOAD VALUES

Containers are usually stacked in rows or blocks and until recently usually no more than three high, with a maximum of five high. However, in recent times containers have been stacked up to 8 high in a few locations and this way become more common. Corner castings measure 178 mm x 152 mm (7 in x 6 in) and frequently they project 12,7 mm (0,5 in) below

the underside of the container. Table 7 gives the maximum loads and stresses for most stacking arrangements. Since it is unlikely that all containers in a stack will be fully laden the maximum gross weights will be reduced by the amounts shown. The values shown in Table 7 can be used directly in the design chart. In the case of empty containers pavement loads can be calculated on the basis that 40 ft containers weigh 2,7 t (6 000 lb) and 20 ft containers weigh 1,8 t (4 000 lb).

### 9. WHEEL PROXIMITY FACTORS

The active design constraint is horizontal tensile strain at the bottom of the base course. If one wheel only is considered, the maximum horizontal tensile strain occurs under the center of the wheel and reduces with distance from the wheel. If two wheels are sufficiently close together, the strain under each wheel is increased by a certain amount owing to the other wheel. Wheel loads are modified by the appropriate proximity factor from Table 8. These factors are obtained as follows. If the wheel proximity were not considered, the relevant stresses would be the radial tensile stress directly beneath the loaded wheel. If there is a second wheel nearby, it generates tangential stress directly below the first wheel. This tangential stress is added to the radial stress contributed by the primary wheel. The proximity factor is the ratio of the sum of these stresses to the radial tensile stress resulting from the primary wheel. The following equations are used to calculate the stress:

$$\sigma_R = \frac{W}{2\pi} \left[ \frac{3r^2z}{\alpha^{5/2}} - \frac{1-2\nu}{\alpha+z\alpha^{1/2}} \right]$$

$$\sigma_T = \frac{W}{2\pi} [1-2\nu] \cdot \left[ \frac{z}{\alpha^{3/2}} - \frac{1}{\alpha+z\alpha^{1/2}} \right]$$

Where:

$\sigma_R$ : Radial stress.

$\sigma_T$ : Tangential stress.

W: Load.

r: Horizontal distance between wheels.

z: Depth to position of stress calculations.

$\nu$ : Poisson's ratio.

$\alpha$ :  $r^2 + z^2$

When more than two wheels are in close proximity, the radial stress beneath the critical wheel may have to be increased to account for two or more tangential stress contributions. Table 8 shows that the proximity factor depends on the wheel spacing and the Effective Depth to the bottom of the pavement base. The Effective Depth can be approximated from the following formula and represents the depth from the pavement surface to the underside of the base should the base have been constructed from sub-grade material.

$$\text{Effective Depth} = \sqrt[3]{\frac{35.000}{\text{CBR} \times 10}}$$

Where:

CBR: California Bearing Ratio of the subgrade.

As an example, consider a front lift truck with three wheels at each end of the front axle. The critical location is beneath the centre wheel. Suppose a pavement were designed on ground with a CBR of 7% and the wheel lateral centers were 600 mm. From the formula, the approximate Effective Depth of the bottom of the pavement base is:

$$\text{Effective Depth} = \sqrt[3]{\frac{35.000}{7 \times 10}} = 2,381 \text{ m (94 in)}$$

By linear interpolation from Table 4 the proximity factor is 1,86. This should be applied twice for the central wheel. This means that the effective single load is increased by 0,86: twice i.e.  $1 + 0,86 + 0,86 = 2,72$ . Note that this is approximately 10% less than 3 so that this type of wheel arrangement effectively reduces pavement load by 10%. For wheels bolted side by side where the wheel centers are separated by less than 300 mm, the entire load transmitted to the pavement through one end of the axle can be considered to represent the wheel load. An investigation of the actual equivalent wheel load indicates that the actual equivalent wheel load is approximately 1,97 times one wheel load when there are two wheels bolted together at an axle end.

### 10. DIFFERENT BASE MATERIALS

Figure 2 has been constructed with reference to 9,67 MPa (1 400 psi) compressive strength cement treated base with a flexural strength of 1,93 MPa (280 psi). The thickness of this material produced by the design chart may be exchanged for an equivalent amount of an alternative material of greater or lesser strength using Material Conversion Factors set out in Table 9 and the rationale for this technique of exchanging one material for another is described below. It should be recognized that experience in the use of Material Conversion Factors indicates that within a limited range, they can prove to be an efficient means of expanding one design solution into many alternatives, each of similar structural capability. The Conversion Factors shown in Table 9 are derived from the AASHTO Pavement Design Guide. In the AASHTO Guide, Bituminous Treated Bases, Cement Treated Bases and Granular materials are each assigned a Structural Coefficient which is a measure of its relative stiffness and indirectly of performance.

For example, 9,67 MPa (1 400 psi) Cement Treated Base has a Structural Coefficient of 0,28 (Figure 2.8 of the AASTHO Guide) and Bituminous Treated Base with a Modulus of 1 174 MPa (170 000 psi) has a Structural Coefficient of 0,2. This means that this Bituminous Treated Base has a Conversion Factor of 0,28/0,2 i.e. 1,4. Therefore, suppose a design exercise resulted in a 150 mm (6 in) Cement Stabilized Base 9,67 MPa (1 400 psi), the equivalent Bituminous Treated Base would be 1,4 x 150 mm (6 in) i.e. 210 mm (8,5 in) thick.

## 11. OVERLAYING PROCEDURE

A well designed and constructed pavement should remain serviceable for the period for which the designer intended. During its service life, a pavement is subjected to applied surface stress from traffic and to internal stress caused by restraint to thermal and moisture movement. Even a well designed pavement may be damaged by being overloaded or by being subjected to abnormal internal stress during particularly severe weather. The pavement may remain serviceable throughout its design life or for only part of it but at some stage it will need to be strengthened otherwise it will have to be taken out of service.

## 12. PAVEMENT TRANSFORMATION PROCEDURE

The existing pavement is transformed into an equivalent thickness of 9,67 MPa (1 400 psi) compressive strength Cement Treated Base. The equivalent thickness of Cement Treated Base is that which would be required to give the same load carrying capability as the existing pavement. The existing pavement constitutes a part of the strengthened pavement, so it is essential to determine accurately the thickness of each of the existing courses and the degree of degradation that each of these courses has undergone.

If records of the original design of the pavement are not available it will be necessary to take either cores or trial holes to obtain this information. Even if records do exist, cores or trial holes should be taken to verify the actual situation. These tests should be carried out so that each one represents approximately 465 m<sup>2</sup> (5 000 ft<sup>2</sup>) of pavement. There should be a minimum of three tests and a maximum of seven for larger pavements of uniform construction and condition. Where areas of a hardstanding are used for dissimilar types of traffic, then each location should be considered as a separate area for analysis purposes. Similarly, if the initial cores show that certain areas of pavement are stronger than others, it may be preferable to divide the overlay area into several zones and each zone should then have at least three cores taken.

In certain circumstances, the properties of the materials may have changed since they were initially used, owing to cementing action or intrusion of materials from another pavement course, and it is essential to know whether this has occurred. Sampling should also be used to determine the condition of each course so that the appropriate Condition Factors may be selected. It may be difficult to assess the condition of lower pavement courses, particularly with regard to cracking. In such situations, conservative assumptions should be made.

Once each course has been identified, it is transformed to an equivalent thickness of 9,67 MPa (1 400 psi) cement treated base by dividing its actual thickness by the appropriate Material Conversion Factor from Table 10. Most of the materials shown

are defined in the AASHTO pavement design guide [13].

The transformed thickness is multiplied by two Condition Factors. Values of the first Condition Factor CF1 are given in Table 11 and are used for both rigid and flexible pavements.

The second Condition Factor (CF2, Table 12), takes into account the reduction in strength of each course as a result of rutting and settlement in the surface of flexible pavements. This is measured as a difference in levels under a 3 m (10 ft) straight edge. If a pavement has deformed, cores should be taken to determine which courses of the pavement are affected. When there is no deformation or cracking, the Condition Factors are taken as 1.0 i.e. the material is as new. The transformation procedure is carried out for each course in the pavement and the sum of the transformed thicknesses is taken as the equivalent thickness of the existing pavement. The equivalent thickness is used in the design of the overlay.

## 13. REFERENCES

1. BRITISH PORTS FEDERATION. The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries. London : BPF, 1988. -- p.v.
2. MELETIOU Marios and KNAPTON, John. Container Terminal pavement management. -- Geneva : United Nations, 1987. -- P.v. (Unctad Monograph on Port Management, No.5).
3. TROUP, S. D. An investigation into current methods for airport pavement design : undergraduate dissertation. -- Newcastle upon tyne : University of Newcastle upon tyne, 1994. -- P.v.
4. FEA LTD. Manuals for LUSAS software suite programs. S.p.i. -- P.v.
5. GUIDO, V. A., APRILE, J. J. And SABIS, P. A. The effect of randomly dispersed fibregreed reinforced on the CBR of soils. -- s.l. : Geosynthetics, 1995. -- P.v.
6. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. The british standard guide for structural design of pavement constructed with clay or concrete block pavers. -- London : BSI, 1992. -- P.v. (BSI, BS 7533:1992).
7. TRANSPORTATION AND ROAD RESEARCH LABORATORY. A guide to the structural design of pavement for new roads. -- 3ed. -- London : HMSO, s.f. -- P.v. (Road note 29).
8. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Precast concrete paving blocks : specifications for paving blocks. -- London : BSI, 1988. -- P.v. (BSI, BS 6717:1988). -- Part 1.
9. ENGLAND. Department of Transport. Manual of contract documents for highway works :

specification for highway works. -- London : HMSO, s.f. -- P.v.

10. \_\_\_\_\_ Highway construction details. -- London : HMSO, s.f. -- P.v.
11. KNAPTON, John and ELLERTON, J. Single pour industrial floor slabs. -- Newcastle upon tyne : University of Newcastle upon tyne, University Ventures, 1994. -- P.v.

12. BARBER, S. D. Pavement design for port areas. -- Newcastle upon tyne : University of Newcastle upon tyne, 1980. -- P.v. -- Ph D. Thesis.
13. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAYS AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO guide for design of pavement structures. -- Washington : AASHTO, 1993. -- P.v.

CBR of Subgrade <i>CBR de la subrasante</i>	1 %	2 %	5 %
Capping <i>Subrasante mejorada</i>	600 mm (24 in)	350 mm (14 in)	Omit <i>Omitir</i>
Sub-base <i>Subbase</i>	150 mm (6 in)	150 mm (6 in)	150 mm (6 in)
<b>MSA</b> <i>10<sup>o</sup> Ejes estándar</i>	<b>BASE THICKNESS</b> <b>ESPESOR DE LA BASE</b>		
1,5	100 mm (4 in)	125 mm (5 in)	125 mm (5 in)
4	125 mm (5 in)	125 mm (5 in)	125 mm (5 in)
8	175 mm (7 in)	175 mm (7 in)	175 mm (7 in)
12	200 mm (8 in)	200 mm (8 in)	200 mm (8 in)
25	225 mm (9 in)	225 mm (9 in)	225 mm (9 in)

Table 1. Pavement course thicknesses used in finite element analysis.

Tabla 1. Espesores de las capas del pavimento utilizadas en el análisis con elementos finitos.

MSA <i>10<sup>o</sup> Ejes estándar</i>	CBR = 1 %	CBR = 2 %	CBR = 5 %	AASHTO
1,5	2,30 MPa (333 psi)	2,37 MPa (343 psi)	2,24 MPa (325 psi)	2,21 MPa (320 psi)
4	1,75 MPa (254 psi)	1,80 MPa (261 psi)	1,69 MPa (244 psi)	1,83 MPa (265 psi)
8	1,32 MPa (191 psi)	1,35 MPa (195 psi)	1,26 MPa (182 psi)	1,28 MPa (185 psi)
12	1,02 MPa (147 psi)	1,04 MPa (150 psi)	0,96 MPa (139 psi)	1,00 MPa (145 psi)
25	0,82 MPa (119 psi)	0,84 MPa (121 psi)	0,78 MPa (113 psi)	0,79 MPa (115 psi)

Table 2. Maximum principle stresses (tensile) at the underside of the base course in those BS 7 533, pavements back-analyzed in the calibration exercise. The final column shows stresses produced by Figure 3.9 of the AASHTO Pavement Design Guide.

Tabla 2. Esfuerzo principal máximo (tracción) en la parte de abajo de la capa de base en pavimentos diseñados según la Norma BS 7 533. La última columna muestra los esfuerzos producidos según la Figura 3.9 de la Guía de Diseño de Pavimentos de la AASHTO.

MSA <i>10<sup>o</sup> Ejes estándar</i>	CBR = 1 %	CBR = 2 %	CBR = 5 %
1,5	-1,83 MPa (-256 psi)	-1,79 MPa (-260 psi)	-1,71 MPa (-248 psi)
4	-1,55 MPa (-224 psi)	-1,57 MPa (-227 psi)	-1,50 MPa (-217 psi)
8	-1,32 MPa (-191 psi)	-1,37 MPa (-198 psi)	-1,31 MPa (-190 psi)
12	-1,23 MPa (-178 psi)	-1,22 MPa (-178 psi)	-1,19 MPa (-173 psi)
25	-1,15 MPa (-167 psi)	-1,15 MPa (-167 psi)	-1,13 MPa (-164 psi)

Table 3. Minimum principle stresses (compressive) at the upper surface of the base course in those BS 7533 pavements back-analyzed in the calibration exercise.

Tabla 3. Esfuerzos principales mínimos (compresión) en la cara superior de la capa de base en los pavimentos diseñados según la Norma BS 7 533 analizados para el ejercicio de calibración.

MSA <i>10<sup>o</sup> Ejes estándar</i>	AVERAGE <i>PROMEDIO</i>	AASHTO
1,5	2,32 MPa (336 psi)	2,21 MPa (320 psi)
4	1,74 MPa (252 psi)	1,83 MPa (265 psi)
8	1,35 MPa (196 psi)	1,28 MPa (185 psi)
12	0,97 MPa (140 psi)	1,00 MPa (145 psi)
25	0,77 MPa (112 psi)	0,79 MPa (115 psi)

Table 4. Average tensile stresses used as design stresses. AASHTO stresses are also shown.

Tabla 4. Esfuerzos promedios a tracción usados como esfuerzos de diseño. También se muestran los esfuerzos según la AASHTO.

Layer Capa	Elastic Modulus Módulo de Elasticidad	Poisson's Ratio Relación de Poisson
Surfacing (pavers) Rodadura (adoquines)	3 867 MPa (560 000 psi)	0,15
Cement treated base Base tratada con cemento 9,67 MPa (1 400 psi)	33 840 MPa (4 900 000 psi)	0,15
Granular sub-base Subbase granular	290 MPa (42 000 psi)	0,20
Granular capping Subrasante mejorada granular	145 MPa (21 000 psi)	0,25
Subgrade Subrasante	10 % CBR	0,25

Table 5. Pavement material properties used in producing design charts.

Tabla 5. Propiedades de los materiales utilizadas para producir los ábacos de diseño.

CONDITION CONDICIÓN	PLANT TYPE TIPO DE EQUIPO	f <sub>d</sub> (%)
BREAKING FRENADO	Font Lift Truck	±30
	Straddle Carrier	±50
	Side Lift Truck	±20
	Tractor and Trailer	±10
CORNERING GIRO DE ESQUINA	Front Lift Truck	40
	Straddle Carrier	60
	Side Lift Truck	30
	Tractor and Trailer	30
ACCELERATION ACELERACIÓN	Font Lift Truck	±10
	Straddle Carrier	±10
	Side Lift Truck	±10
	Tractor and Trailer	±10
UNEVEN SURFACE SUPERFICIE IRREGULAR	Font Lift Truck	20
	Straddle Carrier	20
	Side Lift Truck	20
	Tractor and Trailer	20

Table 6. Dynamic load factors (f<sub>d</sub>). Static loads increased by the percentage figures in the Table.

Tabla 6. Factores dinámicos de carga (f<sub>d</sub>). Cargas estáticas incrementadas en el porcentaje que aparece en la Tabla.

STACKING HEIGHT ALTURA DE ARRUME	REDUCTION IN GROSS WEIGHT REDUCCIÓN EN EL PESO TOTAL (%)	CONTACT STRESS ESFUERZO DE CONTACTO (MPa (psi))	LOAD ON PAVEMENT FOR EACH STACKING ARRANGEMENT CARGA SOBRE EL PAVIMENTO POR CADA ARRUME (kN)		
			Singly / Solos	Rows / Filas	Blocks / Bloques
1	0	2,51 (363)	74,3 (16,7)	148,6 (33,4)	297,1 (66,8)
2	10	452 (654)	134,3 (30,2)	268,7 (60,4)	537,3 (120,8)
3	20	6,02 (872)	178,8 (40,2)	357,6 (80,4)	715,3 (160,8)
4	30	7,03 (1 018)	208,6 (46,9)	417,2 (93,8)	834,5 (187,6)
5	40	7,52 (1 089)	223,7 (50,3)	447,5 (100,6)	895,0 (201,2)
6	40	9,02 (1 306)	268,2 (60,3)	536,5 (120,6)	1 072,9 (241,2)
7	40	10,54 (1 526)	313,2 (70,4)	626,3 (140,8)	1 252,6 (281,6)
8	40	12,09 (1 750)	358,1 (80,5)	716,2 (161,0)	1 432,3 (322,0)

Table 7. Pavement loads from stacking full containers.

Tabla 7. Cargas sobre el pavimento debidas al arrume de contenedores llenos.

WHEEL SPACING SEPARACIÓN DE LLANTAS (mm (in) [ft])	PROXIMITY FACTOR FOR THE EFFECTIVE DEPTH TO BASE OF: FACTOR DE PROXIMIDAD PARA UNA PROFUNDIDAD EFECTIVA A LA BASE DE:		
	1 m (40 in)	2 m (80 in)	3 m (120 in)
30 (12) [1]	1,82	1,95	1,98
60 (24) [2]	1,47	1,82	1,91
90 (36) [3]	1,19	1,65	1,82
120 (48) [4]	1,02	1,47	1,71
180 (72) [6]	1,00	1,19	1,47
240 (96) [8]	1,00	1,02	1,27
360 (144) [12]	1,00	1,00	1,02
480 (192) [16]	1,00	1,00	1,00

Table 8. Wheel proximity factors.

Tabla 8. Factores de proximidad de llantas.

PAVEMENT LAYER CAPA DEL PAVIMENTO		COMPRESSIVE STRENGTH RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPa (psi)	CONVERSION FACTOR FROM A 9,67 MPa (1 400 psi) CEMENT TREATED BASE FACTOR DE CONVERSIÓN CON RELACIÓN A UNA BASE TRATADA CON CEMENTO DE 9,67 MPa (1 400 psi)
(i)	Pavement quality concrete / <i>Concreto para pavimentos</i>	29,01 (4 200)	0,80
(ii)	Pavement quality concrete / <i>Concreto para pavimentos</i>	38,67 (5 600)	0,70
(iii)	Bituminous Treated Base / <i>Base tratada con asfalto</i> Modulus = 2 417 MPa (350 000 psi)	-	0,93
(iv)	Bituminous Treated Base / <i>Base tratada con asfalto</i> Modulus = 1 174 MPa (170 000 psi)	-	1,40
(v)	Bituminous Treated Base / <i>Base tratada con asfalto</i> Modulus = 622 MPa (90 000 psi)	-	2,80
(vi)	Cement Treated Base / <i>Base tratada con cemento</i> Modulus = 7 597 MPa (1 100 000 psi)	9,67 (1 400)	1,00
(vii)	Cement Treated Base / <i>Base tratada con cemento</i> Modulus = 5 663 MPa (820 000 psi)	5,52 (800)	1,27
(viii)	Cement Treated Base / <i>Base tratada con cemento</i> Modulus = 4 282 MPa (620 000 psi)	2,90 (420)	1,75
(ix)	Cement Treated Base / <i>Base tratada con cemento</i> Modulus = 3 246 MPa (470 000 psi)	0,97 (140)	2,80
(x)	Granular sub-base Layer / <i>Subbase granular</i> Modulus = 145 MPa (21 000 psi)	100% CBR	2,00
(xi)	Granular sub-base Layer / <i>Subbase granular</i> Modulus = 94 MPa (13 600 psi)	22% CBR	2,80
(xii)	Granular sub-base Layer / <i>Subbase granular</i> Modulus = 83 MPa (12 000 psi)	15% CBR	3,00
(xiii)	Granular sub-base Layer / <i>Subbase granular</i> Modulus = 48 MPa (7 000 psi)	6% CBR	4,67

Table 9. Different pavement base, sub-base and capping materials with permissible flexural strengths and conversion factors from a 9,67 MPa (1 400 psi) cement treated base.

Tabla 9. Diferentes materiales para base, subbase y subrasante mejorada con sus resistencias a la flexotracción permitidas y los factores de conversión con relación a una base tratada con cemento de 9,67 MPa (1 400 psi).

Like Table 9 without the second column / Como la Tabla 9 sin la segunda columna

Table 10. Material Conversion Factors for different pavement construction materials.

Tabla 10. Factores de Conversión de Materiales, para los diferentes materiales de construcción de pavimentos.

CONDITION OF MATERIAL CONDICIÓN DEL MATERIAL	CF1
As new / <i>Como nuevo</i>	1,0
Slight cracking <i>Ligera fisuración</i>	0,8
Substantial cracking <i>Fisuración substancial</i>	0,5
Fully cracked or crazed and spalled / <i>Totalmente fisurado, o microfisurado y descascarado</i>	0,2

Table 11. Condition factors for cracking and spalling.

Tabla 11. Factores de condición para fisuración y descascaramiento.

DEGREE OF LOCALIZED RUTTING OR LOCALIZED SETTLEMENT GRADO DE AHUELLAMIENTO O ASENTAMIENTOS LOCALIZADOS mm (in)	CF2
0 - 12 (0 - 0,5)	1,0
12 - 25 (0,5 - 1)	0,9
25 - 82,5 (1 - 3,25)	0,6
More than / <i>Más de</i> 82,5 (3,25)	0,3

Table 12. Condition factors for maximum degree of localized rutting and localized settlement.

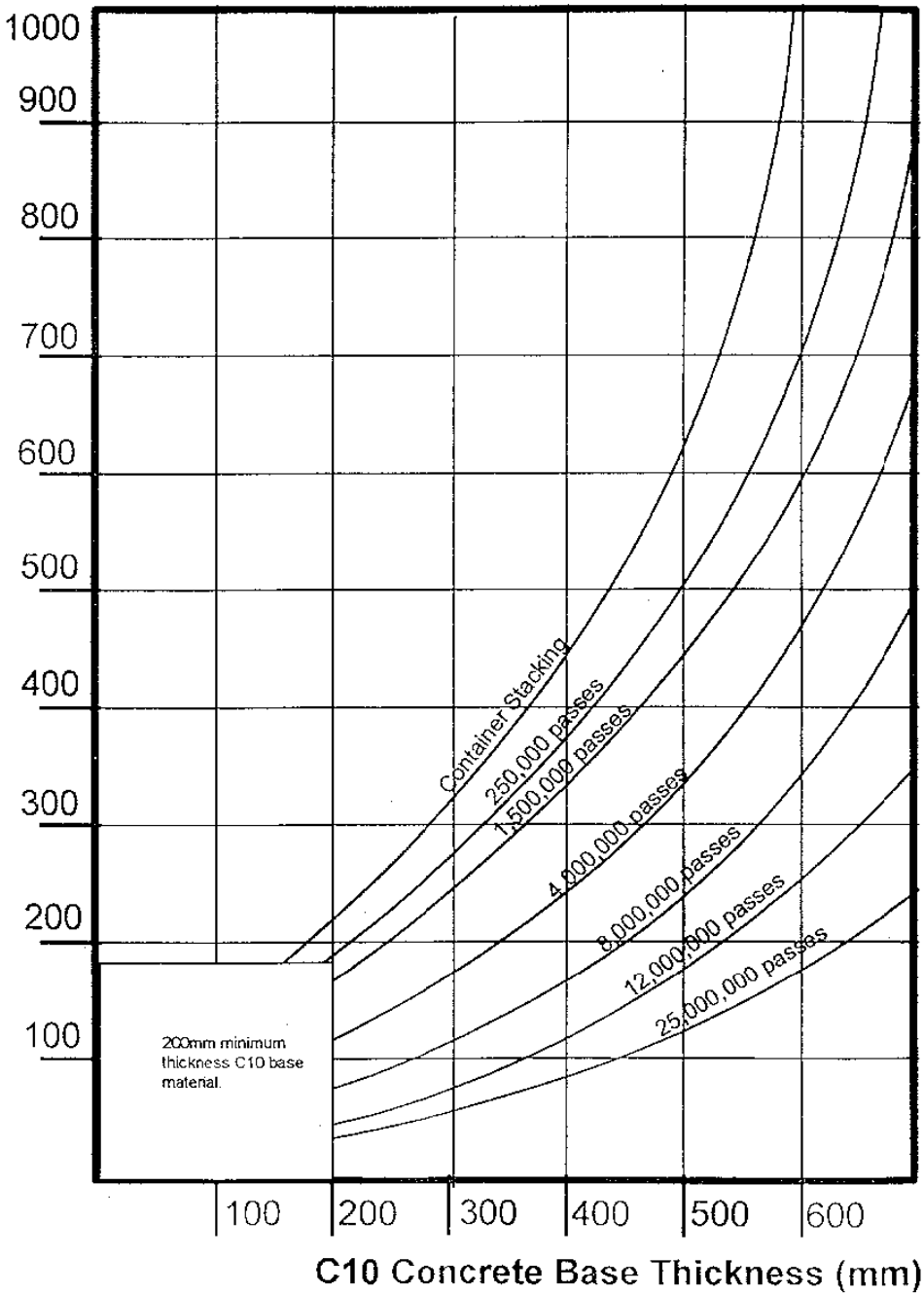
Tabla 12. Factores de condición para grado máximo de ahuellamiento o asentamiento localizados.



Surface / Superficie
Structure – Base / Estructura - Base
Foundation - Sub-base and Capping Fundación – Subbase y Subrasante Mejorada
Formation – Subgrade / Fundación - Subrasante

Figure 1. Pavement Components.  
 Figura 1. Componentes de un pavimento.

Equivalent Single Load (kN)



CARGA EQUIVALENTE UNITARIA (kN) vs ESPESOR PARA UNA BASE DE CONCRETO C10 (mm)

200 mm minimum thickness C10 base material / 200 mm, espesor mínimo de base de material C10 – Container Stacking / Arrumes de contenedores – Passes / Pasadas.

Figure 2. Base thickness design chart.

Figura 2. Carta de diseño para el espesor del pavimento.

# MANUAL NORTEAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS <sup>3 4</sup>

## John KNAPTON

Profesor  
UNIVERSIDAD DE NEWCASTLE UPON TYNE  
Newcastle upon Tyne, Reino Unido

## David R. SMITH

Director  
INSTITUTO DEL PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO - ICPI  
Sterling, VA, U.S.A.

## 1. INTRODUCCIÓN

Esta ponencia describe la versión Norteamericana de la Segunda Edición del Manual de Diseño de Pavimentos Industriales y Portuarios. Por primera vez se incorpora una nueva y radical forma de analizar el pavimento en el método de diseño. La investigación original sobre la cual se basó la primera edición [1], se llevó a cabo en los años 70 y los pavimentos se analizaron con tecnología de calculadora programable [12]. Esto quiere decir que las tensiones y los esfuerzos podían ser calculados en forma precisa sólo en uno o dos puntos especiales en la estructura de la estructura propuestas para el pavimento. En la última edición, se han utilizado análisis por elementos finitos y el diseño de todo el pavimento se ha separado en el diseño de la base y en el diseño de la fundación. Al hacer esta separación no se pierde ninguna exactitud y el ejercicio de diseño se ha simplificado de tal forma que sólo se requiere de un ábaco, que se muestra en la Figura 2 y no se necesita para el diseño. El ábaco puede ser utilizado para dimensionar la base del pavimento de tráfico pesado.

Durante los últimos diez años, se ha venido adquiriendo una gran experiencia en el uso de los Factores de Conversión de Materiales o Factores de Equivalencia de Materiales, de tal manera que pueden ser ahora utilizados como medios para intercambiar un material por otro en forma efectiva, durante el proceso de diseño. Esto significa que cuando se ha realizado un diseño utilizando la Figura 2, el diseñador puede generar soluciones alternativas utilizando diferentes materiales y así investigar una alta gama de soluciones. La Tabla 9 muestra Factores de Conversión de Materiales para una amplia gama de materiales utilizados comúnmente para la base. La nueva edición difiere de las anteriores en

que los Factores de Conversión de Materiales fueron utilizados previamente sólo en diseños de sobrecapas.

## 2. PRINCIPIOS DE DISEÑO

El procedimiento de diseño se basa en que los pavimentos son diseñados para ser de utilidad a lo largo de la vida útil de diseño del pavimento. En términos de desempeño estructural, las fallas en el servicio en un pavimento de trabajo pesado, generalmente se dan ya sea por una excesiva deformación vertical por compresión en la subrasante o por una excesiva deformación horizontal en la base. Para pavimentos con bases estabilizadas, la deformación por tracción en la base, es la limitante activa de diseño mientras que la deformación por compresión en la subrasante es con frecuencia es la limitante activa de diseño para pavimentos con bases granulares. Las deformaciones superficiales del orden de 50 mm (2 in) a 75 mm (3 in) existirán normalmente en el momento de la falla. El nuevo manual trata el importante tema del refuerzo o las sobrecapas del pavimento. Un pavimento existente puede requerir de refuerzo por que se deterioró hasta un punto en el cual no puede ofrecer más un soporte adecuado al equipo de manejo o porque se introducirá equipo más pesado. Tomar ventaja de la fuerza residual o actual del pavimento puede llevar a economías. La ponencia también muestra cómo puede ser cuantificada la resistencia residual del pavimento e incluida en el procedimiento de diseño de las sobrecapas.

## 3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Para producir la Figura 2 se analizaron pavimentos industriales típicos usando el método de elementos finitos, en el cual se desarrolló un modelo que representa todos los componentes del pavimento. Las propiedades elásticas y los valores de la relación de Poisson se escogieron para describir el comportamiento de cada componente del pavimento. Se tomó en consideración la fatiga esfuerzos limitantes a los cuales puede ser expuesto el pavimento para el paso de una carga y reducir luego los esfuerzos para recibir muchas repeticiones de carga.

Se introduce un nuevo método de diseño que permite un procedimiento más sencillo. Incluye dividir el

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> Esta es una traducción de la ponencia original escrita en Inglés, realizada por Claudia L. Flórez y Germán G. Madrid, no sometida a la aprobación del autor.

pavimento en fundación y estructura, de tal manera que el espesor de la estructura (base) pueda ser dimensionado para soportar un régimen de carga aplicado y la fundación pueda ser dimensionada para desarrollar un soporte adecuado para las capas superiores (base y rodadura), teniendo en cuenta las condiciones del terreno. La razón detrás de esto, es que se encontró durante la investigación que conllevó a la publicación de la nueva edición, que los procedimientos actuales de diseño de carreteras incluyen una guía para la fundación del pavimento, que relaciona las especificaciones de la subbase y la subrasante mejorada con la resistencia de la subrasante, de tal manera que la subrasante siempre se lleva a un nivel de esfuerzos adecuados para su resistencia. Esencialmente los diseños actuales en procedimientos de diseño de pavimentos han separado el diseño en: Diseño de fundación, que está basado en la resistencia de la subrasante, y el diseño de la base que está basado en el régimen de carga. La Figura 1 muestra las capas en un pavimento típico de trabajo pesado. En algunos pavimentos una o más capas pueden estar ausentes.

#### **4. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE DISEÑO**

Todos los procedimientos de diseño basados en análisis mecánicos, requieren criterios comprobados para los niveles de esfuerzo o deformación que definen valores límites permisibles. Usualmente estos criterios son esfuerzos o deformaciones que se sabe que existen en diseños exitosos producidos por métodos de diseño empíricos. Por estos medios el modelo mecánico se calibra efectivamente y el diseño producido tiene el mismo nivel de integridad que aquellos producidos por el método de diseño utilizado en el ejercicio de calibración. La parte IV de La Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO [13] "Procedimientos de diseño mecánicos-empíricos", establece que: Se requiere entonces calibrar los modelos con observaciones de desempeño i.e. correlaciones empíricas". Los esfuerzos limitantes de la calibración en los cuales se basa la Figura 2, se determinan como sigue. Un método de diseño de pavimentos semi-empírico probado, ha sido utilizado para calcular los niveles de esfuerzo en posiciones críticas, de la siguiente forma: El método de calibración adoptado es el método modificado de diseño de pavimentos de carreteras del Reino Unido, para pavimentos de adoquines de concreto, Norma BS 7 533 basada en la investigación original de la AASHTO. La Norma BS 7 533 [6] se ha utilizado para producir un número de ejemplos de diseño, que cubren una amplia gama de diseños de situaciones de diseño de pavimentos, las cuales luego han sido analizadas usando el mismo modelo elástico lineal de elementos finitos, como se utiliza para establecer los esfuerzos permisibles. Los esfuerzos que el modelo de elementos finitos ha demostrado que existen en los pavimentos diseñados de acuerdo con la Norma BS 7 533, son utilizados como esfuerzos críticos de diseño en el diseño del pavimento. En otras palabras, la Figura 2 se produjo utili-

zando el mismo modelo de elementos finitos que ha sido utilizado para comprobar de nuevo un rango de pavimentos producidos, utilizando la investigación original de la AASHTO. Esto quiere decir que la experiencia y la metodología que soporta la Norma BS 7 533 se ha extendido para manejar todos los pavimentos probables de ser encontrados en situaciones de diseño de pavimentos para cargas pesadas. Un beneficio de esta técnica es que si el modelo de elementos finitos incluye inexactitudes, entonces esas inexactitudes se cancelarían en buena medida, ya que habrían sido incluidas en el ejercicio de comprobación de la Norma BS 7 533, exactamente de la misma forma en que habrían sido incluidos en el ábaco de la Figura 2.

15 pavimentos diseñados de acuerdo con la Norma BS 7 533 se analizaron utilizando el modelo de elementos finitos para determinar esfuerzos y deformaciones en lugares críticos en cada pavimento. Las secciones de pavimento desarrolladas de la Norma BS 7 533 se muestran en la Tabla 1. Esta muestra el espesor del diseño adoptado para cada capa, cuando se diseñan de acuerdo con la Norma BS 7 533. Todas las estructuras de pavimento presentadas en la Tabla 1 se analizaron utilizando el modelo de elementos finitos en conjunción con una carga de ejes estándar de 8,2 t (18 000 lb).

Análisis preliminares utilizando el programa de elementos finitos, confirmaron que los esfuerzos críticos ocurren en el fondo y en la parte superior de la base, directamente debajo de la carga aplicada. Los valores de esfuerzos en estos lugares críticos se muestran en las Tablas 2 y 3. La Figura 3.9 de la guía de diseño AASHTO relaciona los esfuerzos de tracción en los pavimentos de concreto con el espesor del pavimento, la carga de las llantas y el soporte ofrecido a las losas por los materiales subyacentes. Se puede revisar la validez del manual comparando los esfuerzos de tracción producidos por el análisis de elementos finitos con aquellos producidos por la guía AASHTO. En la Tabla 2 se incluyen los esfuerzos de tracción de la AASHTO para comparación. En todos los casos, los esfuerzos de tracción AASHTO están dentro de  $\pm 7\%$  de los esfuerzos calculados por elementos finitos. De la Tabla 2 se puede concluir que la Norma BS 7 533 produce pavimentos cuya resistencia está acorde con las pautas de la AASHTO.

De las Tablas 2 y 3 se puede deducir que los esfuerzos inducidos en la base del pavimento son muy similares para todos los valores de CBR de la subrasante y que disminuyen con el incremento en los niveles de tráfico. Estas Tablas permiten seleccionar los esfuerzos de diseño para todo tipo de pavimentos (aún cuando es poco probable que los niveles de tráfico excedan cuatro millones de ejes estándar - MSA, en una área específica durante su vida útil para una operación portuaria típica, la inclusión de niveles mayores de tráfico, amplía la aplicabilidad del Manual de Pavimentos sirviendo a otras industrias y obviamente a los pavimentos de carreteras). Se espera un rango pequeño de esfuerzo de

compresión, debido al equilibrio de las fuerzas verticales a través del pavimento, desde el punto de aplicación de carga hacia abajo a las otras áreas. Los esfuerzos de compresión son importantes en los materiales de rodadura donde las cargas puntuales concentradas aplicadas, e.g. las esquinas de los contenedores, ruedas pequeñas de acero de equipos especializados y los brazos estabilizadores en grúas móviles, pueden causar deterioro superficial localizado. En conclusión, el esfuerzo a tracción, en la parte de abajo de la base, es con frecuencia el esfuerzo limitante de los propósitos del diseño estructural en todos los pavimentos. La Tabla 4 muestra los valores promedio de los tres esfuerzos a tracción existentes en los pavimentos diseñados sobre subrasantes con CBR's de 1%, 2%, y 5% para cada uno de los cinco niveles de fatiga (entre 1,5 MSA a 25 MSA) usados en el análisis. Los valores en la Tabla 4 son usados como esfuerzos permisibles de diseño y el ábaco de diseño se ha construido utilizando estos valores. Se ha vuelto costumbre utilizar niveles de tensión no factorados en el diseño de pavimentos, puesto que el estado límite de falla es esencialmente el de servicio.

Habiendo utilizado el modelo de elementos finitos para calcular los esfuerzos mostrados en la Tabla 4, los cuales existen en los pavimentos diseñados de acuerdo con la Norma BS 7 533, es posible analizar un rango de pavimentos típicos para poder establecer las cargas que generan valores de esfuerzo similares para un número dado de pasadas de carga. Este ejercicio se llevó a cabo para producir la Figura 2.

El modelo de elementos finitos utilizado para desarrollar los diagramas de diseño y los ejercicios de calibración, comprende una idealización axi-simétrica en la cual un sistema cilíndrico de capas, de diámetro de 7 m (23 ft) y con una profundidad de 2,44 m (8 ft), se modeló con 63 elementos rectangulares, cada uno con un nudo en cada esquina y en la mitad, a lo largo de cada lado. Cada nudo perimetral del modelo fue restringido horizontalmente y cada nudo, en el nivel más bajo, fue restringido tanto horizontal como verticalmente. Se aplicó sólo carga en un punto en el nudo más alto en el centro del modelo. Para poder simular el efecto de una carga de huella circular en forma precisa, se generó un elemento extra muy rígido, axi-simétrico, sobre el cilindro de radio igual al radio de la carga circular. El radio de la huella de carga se determinó asumiendo que la carga a ser aplicada tenía una presión de 773 kPa (112 psi). El modelo se graduó de tal manera que los elementos pequeños se concentraran cerca del punto de aplicación de carga, donde la variación de esfuerzos era muy grande, y los elementos más grandes se generaron a una profundidad y un radio mayor. El paquete de elementos finitos Lusas, licenciado al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Newcastle upon tyne, reino Unido, fue el utilizado para generar el modelo [4].

## 5. MATERIALES DEL PAVIMENTO

Las propiedades del material utilizado en el análisis en los cuales se basaron los diagramas de diseño en la parte 6, se muestran en la Tabla 5. La Figura 2 permite desarrollar diseños para pavimentos que incluyan una base comprendiendo concreto de 9,67 MPa (1400 psi), con una resistencia a la flexión de 1,93 MPa (280 psi). Se asume que la superficie tiene adoquines de concreto de 80 mm de espesor sobre una capa de arena de 30 mm de espesor. La experiencia ha mostrado que los materiales alternativos para rodadura de pavimentos tienen poca influencia sobre la resistencia global del pavimento. Y que estos materiales se pueden sustituir, con poca influencia sobre el comportamiento estructural general. En el análisis de elementos finitos, la superficie ha sido modelada como una capa de material homogéneo de 110 mm de espesor, con un módulo elástico de 3 868 MPa (560 000 psi) y una relación de Poisson de 0,15. Se ha visto que esto ha igualado de cerca las propiedades los materiales de superficie tanto adoquines como concreto asfáltico. En el caso de los pavimentos de adoquines de concreto, se encontró que las unidades rectangulares de 80 mm de espesor, colocadas en patrón de espina de pescado, muestran un mayor nivel de estabilidad y resistencia.

Una vez que se ha desarrollado una sección de pavimento utilizando concreto de 9,67 MPa (1 400 psi) puede ser "intercambiado" por un material de base con un resistencia a la flexión mayor o menor y con un espesor ajustado en consecuencia. Por ejemplo, una base de concreto se puede diseñar reemplazando la base tratada con cemento, producida por la Figura 2, con una base de concreto de cemento pórtland, utilizando los factores de equivalencia de material de la Tabla 9. La selección de la superficie del pavimento depende de su resistencia al uso y de otros requerimientos de superficie, más que a la contribución que podría tener en la resistencia global del pavimento.

## 6. EVALUACIÓN DE LA CARGA

El régimen de carga para ser utilizado con la Figura 2, es normalizado a una sola carga equivalente, describiendo el régimen actual. Cuando se comienza el proceso de diseño, generalmente no hay un valor único de carga que caracterice la situación operacional. Consecuentemente, es necesario reunir información conocida acerca del ambiente de cargue para poder deducir la carga única equivalente para ser usada en la Figura 2. Primero, la información de los tipos de carga que se pueden esperar, se da con los factores que se deberían tener en cuenta. Esto es seguido por un método racional de deducir la carga de pavimento equivalente requerida para utilizarla con el ábaco de diseño a través de los factores de proximidad y dinámicos. El valor de la carga de la llanta del diseño depende del rango de pesos de contenedores que se vaya a manejar. El diseño debería estar basado en la carga crítica, la cual se define como la carga cuyos valores y números de repeticiones conllevan al daño mayor del pa-

vimiento. Relativamente pocas repeticiones de un alto valor de cargue, pueden causar menos daños que un número mayor de cargas de valor menor. El régimen total de carga debería estar expresado como el número de pasadas de una carga crítica. Para el peso de cada contenedor, calcule el efecto del daño causado cuando la planta maneje contenedores de ese peso, con la siguiente ecuación:

$$D = (W/26\ 400)^{3,75} (p/112)^{1,25} N$$

Donde:

- D = Efecto del daño.
- W = Carga de llanta para un peso de contenedor específico, (lb).
- P = Presión de las llantas, (psi).
- N = % de contenedores correspondientes al peso específico del contenedor.

El peso del contenedor que lleva al mayor valor de D es el peso crítico del contenedor y todos los cálculos subsecuentes de carga se deben basar en este valor. La experiencia en el uso de las ediciones previas del manual indican que cuando los contenedores que se manejan incluyen el 100% de contenedores de 12,2 m (40 ft), la carga crítica generalmente es de 22 t (48 400 lb) y cuando se manejan contenedores de 6,1 m (20 ft), la carga crítica es de 20 t (44 000 lb). En general, la mezcla de contenedores de 40 ft/20 ft tienen un peso crítico de contenedor de 21 t (46 200 lb).

## 7. DINÁMICA

Los efectos de la carga dinámica causados por giros de esquina, aceleración, frenado y desigualdades de la superficie, son tenidos en cuenta por el factor fd. En los lugares donde una sección del pavimento está sujeta a efectos dinámicos, las cargas de llanta son ajustadas por los factores que se dan en la Tabla 6.

## 8. VALORES DE CARGA EN LAS ESQUINAS DE LOS CONTENEDORES

Los contenedores generalmente están arrumados en filas o bloques y hasta hace poco en no más de tres niveles con un máximo de cinco niveles. Sin embargo, últimamente en algunas partes han apilado hasta ocho niveles y ésto se vuelve cada vez más común. Las esquinas de los contenedores miden 178 mm x 152 mm (7 in x 6 in) y frecuentemente sobresalen 12,7 mm (0,5 in) por debajo de la parte baja del contenedor. La Tabla 7 muestra las cargas y los esfuerzos máximos para la mayoría de los tipos de arrumes. Como es poco probable que todos los contenedores en un arrume, estén completamente cargados, el peso máximo bruto se reduce en las cantidades mostradas. Los valores mostrados en la Tabla 7 pueden ser utilizados directamente en el ábaco de diseño. En el caso de los contenedores vacíos, la carga sobre el pavimento puede ser calculada sobre la base de que el contenedor de 40 ft

pesa 2,7 t (6 000 lb) y el de 20 ft pesa 1,8 t (4 000 lb).

## 9. FACTORES DE PROXIMIDAD DE LLANTA

La limitante activa de diseño es la deformación horizontal a tracción en el fondo de la base. Si solamente se considera una llanta, la deformación de tracción máxima horizontal ocurre bajo el centro de la llanta y se reduce con la distancia desde la misma. Si las dos llantas están lo suficientemente juntas, la deformación bajo cada una se incrementa por una cierta cantidad, debida a la otra llanta. Las cargas de las llantas son modificadas por el factor de proximidad apropiado de la Tabla 8. Estos factores se obtienen de la siguiente forma: Si la proximidad de la llanta no se considerara, los esfuerzos relevantes serían los esfuerzos de tracción radiales directamente debajo de la llanta cargada. Si hay una segunda llanta cerca, genera esfuerzos tangenciales directamente debajo de la primera llanta. Este esfuerzo tangencial se suma al esfuerzo radial contribuido por la llanta principal. El factor de proximidad es el cociente entre la suma de estos esfuerzos y los esfuerzos radiales a tracción resultantes de la llanta primaria. Las siguientes ecuaciones son utilizadas para calcular los esfuerzos:

$$\sigma_R = \frac{W}{2\pi} \left[ \frac{3r^2z}{\alpha^{3/2}} - \frac{1-2\nu}{\alpha+z\alpha^{1/2}} \right]$$

$$\sigma_T = \frac{W}{2\pi} [1-2\nu] \cdot \left[ \frac{z}{\alpha^{3/2}} - \frac{1}{\alpha+z\alpha^{1/2}} \right]$$

Donde:

- $\sigma_R$ : Esfuerzo radial
- $\sigma_T$ : Esfuerzo tangencial.
- W: Carga.
- r: Separación horizontal entre llantas.
- z: Profundidad de la posición de cálculo de esfuerzos.
- $\nu$ : Relación de Poisson.
- $\alpha$ :  $r^2 + z^2$

Cuando más de dos llantas están cerca, el esfuerzo radial debajo de la llanta crítica, puede que tenga que ser incrementado para tener en cuenta dos o más contribuciones de esfuerzo tangencial. La Tabla 8 muestra que el factor de proximidad depende del espacio entre las llantas y de la profundidad efectiva al fondo de la base del pavimento. Se puede aproximar la profundidad efectiva por medio de la siguiente fórmula y representa la profundidad de la superficie del pavimento al lado bajo de la base, si la base ha sido construida con material de la explanación.

$$\text{Profundidad efectiva} = \sqrt[3]{\frac{35\ 000}{\text{CBR} \times 10}}$$

Donde:

- CBR: Relación de soporte de California de la subrasante.

Como ejemplo considere un equipo front lift truck con tres llantas en cada lado del eje frontal. La localización crítica es debajo de la llanta del centro de cada grupo. Supóngase que se diseña un pavimento sobre un terreno con un CBR del 7% y los centros de las llantas laterales separados a 600 mm. De la fórmula, la profundidad efectiva aproximada del fondo de la base del pavimento es:

$$\text{Profundidad efectiva} = \sqrt[3]{\frac{35\,000}{7 \times 10}} = 2,381 \text{ m (94 in)}$$

Por interpolación lineal de la Tabla 4, el factor proximidad es 1,86. Este debería ser aplicado dos veces para la rueda central, ésto quiere decir que la carga efectiva individual se incrementa en 0,86 dos veces, i.e.  $1 + 0,86 + 0,86 = 2,72$ . Note que es aproximadamente 10% menos que 3; de tal manera que este tipo de arreglos para las llantas reduce efectivamente la carga del pavimento en 10%. Para llantas colocadas lado a lado, donde los centros de la llanta están separados por menos de 300 mm, la carga total transmitida al pavimento a través de un terminal de un eje, puede ser considerado para representar la carga de la llanta. Una investigación del equivalente actual de carga de la llanta indica que su equivalente actual es aproximadamente 1,97 veces la carga de una llanta cuando hay dos llantas colocadas juntas al extremo de un eje.

## 10. DIFERENTES MATERIALES DE BASE

La Figura 2 se ha construido con referencia a una base tratada con cemento con una resistencia a la compresión de 9,67 MPa (1 400 psi) y una resistencia a la flexotracción de 1,93 MPa (280 psi). El espesor de este material producido por el ábaco de diseño, puede ser intercambiado por una cantidad equivalente de un material alternativo de mayor o menor resistencia, utilizando los Factores de Conversión de Materiales establecidos en la Tabla 9 y los fundamentos para esta técnica de intercambiar un material por otro se explican más adelante. Es bueno aceptar que la experiencia en el uso de los Factores de Conversión de Materiales indica que dentro de un rango limitado pueden ser un medio eficiente de expandir una solución de diseño en muchas alternativas, cada una con capacidad estructural similar. Los factores de conversión mostrados en la Tabla 9 son derivados de la guía de diseño de pavimentos de la AASHTO. En la guía AASHTO se le asigna un coeficiente estructural a las bases tratadas con asfalto, a las bases tratadas con cemento y a los materiales granulares por separado que es una medida de su rigidez relativa e indirectamente de su desempeño.

Por ejemplo una base tratada con cemento de 9,67 MPa (1 400 psi) tiene un coeficiente estructural de 0,28 (Figura 2.8 de la guía AASHTO) y la base tratada con asfalto con un módulo de 1 174 MPa (170 000 psi), tiene un coeficiente estructural de 0,2. Esto quiere decir que esta base tratada con asfalto

tiene un factor de conversión de 0,28/0,2 i.e. 1,4. Por lo tanto, suponga que un ejercicio de diseño dio resultado una base estabilizada con cemento de 9,67 MPa (1400 psi), de 150 mm (6 in) de espesor; la base tratada con asfalto equivalente tendría un espesor de  $1,4 \times 150 \text{ mm (6 in)}$  i.e. 210 mm (8.5 in).

## 11. PROCEDIMIENTO DE SOBRECAPAS

Un pavimento bien diseñado y construido debería permanecer útil durante el período para el cual fue diseñado. Durante su vida útil, un pavimento está sujeto a esfuerzos superficiales aplicados debido al tráfico y a esfuerzos internos debido a las restricciones a los movimientos térmicos y debidos a la humedad. Incluso un pavimento bien diseñado, se puede dañar por una sobrecarga o por haber sido sometido a esfuerzos internos anormales durante un clima particularmente severo. El pavimento puede permanecer útil a lo largo de la vida para lo cual fue diseñado o parte de ella, pero en algún momento tendrá que ser reforzado, de lo contrario habrá que sacarlo de servicio.

## 12. PROCEDIMIENTO DE TRANSFORMACIÓN DEL PAVIMENTO

El pavimento existente es transformado en un espesor equivalente de base tratada con cemento con 9,67 MPa (1400 psi) de resistencia a la compresión. El espesor equivalente de base tratada con cemento es aquel que será requerido para dar la misma capacidad de carga que el pavimento actual. El pavimento actual constituye una parte del pavimento reforzado de tal manera que es esencial determinar exactamente el espesor de cada una de las capas existentes y el grado de degradación que ha sufrido cada una de ellas.

Si no se tienen registros del diseño original del pavimento, será necesario extraer núcleos o excavar apiques para obtener esta información. Aún si existen los registros, se debieran tomar núcleos o hacer apiques para verificar la situación actual. Estos ensayos se deberían hacer de tal manera que cada uno represente aproximadamente 465 m<sup>2</sup> (5 000 ft<sup>2</sup>) de pavimento. Debería haber un mínimo de tres ensayos y un máximo de siete para pavimentos más grandes de construcción y condiciones uniformes. Donde las mismas áreas sean utilizadas para tipos de tráfico diferente, entonces cada lugar debería ser considerado como una área separada para propósitos de análisis. Igualmente, si los núcleos iniciales muestran que ciertas áreas del pavimento son más resistentes que otras, puede ser preferible dividir el área de sobrecapas en varias zonas y cada zona debería tener al menos tres núcleos extraídos.

En determinadas circunstancias, las propiedades de los materiales pueden haber cambiado desde que fueron utilizadas inicialmente, debido a la acción de cementante o a la intrusión de materiales de otra capa del pavimento, y es esencial saber si ésto ha ocurrido. Se deben utilizar también muestras para

determinar la condición de cada capa, de tal manera que puedan ser seleccionados los factores de condición apropiados. Puede ser difícil calcular las condiciones de las capas más bajas del pavimento, particularmente en lo que concierne a las grietas. En estas situaciones se deben hacer suposiciones conservadoras al respecto.

Cuando se ha identificado cada capa, se transforma a un espesor equivalente al de base tratada con cemento de 9,67 MPa (1 400 psi) dividiendo su espesor actual por el Factor de Conversión de material apropiado tomado de la Tabla. La mayoría de los materiales mostrados están definidos en la guía de diseño de pavimentos AASHTO [13].

El espesor transformado se multiplica por dos factores de condición. Los valores del primer Factor de Condición CF1 se dan en la Tabla 11 y son utiliza-

dos para pavimentos rígidos y flexibles. El segundo Factor de Condición (CF2, Tabla 12), tiene en cuenta la reducción en la resistencia de cada capa como el resultado de ahuellamiento y asentamiento en la superficie de los pavimentos flexibles. Esto se mide como una diferencia en los niveles bajo una regla de 3 m (10 ft). Si un pavimento se ha deformado, se debieran extraer núcleos para determinar cuáles capas del pavimento han sido afectadas. Cuando no existe deformidad o grietas, los factores de condición se toman como 1,0 i.e. el material está como nuevo. El procedimiento de transformación se lleva a cabo para cada capa en el pavimento y la suma del espesor transformado es tomado como el espesor equivalente del pavimento existente. El espesor equivalente es usado en el diseño del revestimiento.