

1^{AS} JORNADAS DE ENGENHARIA CIVIL

16 a 26 Novembro 1976



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

ALGUMAS DIFICULDADES DO CÁLCULO DE PAVIMENTOS

por ELIAS DA COSTA
Professor do I.S.E.L.

SUMÁRIO

— EVOLUÇÃO DO CÁLCULO DE PAVIMENTOS. DIFICULDADES SURTIDAS NO CÁLCULO RACIONAL DE PAVIMENTOS, DEVIDAS AO COMPORTAMENTO REOLÓGICO COMPLEXO DAS SUAS DIFERENTES CAMADAS, À HETEROGENEIDADE DO TRÁFEGO RELATIVAMENTE AOS PESOS POR EIXO, VELOCIDADES, ETC., ÀS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA E HUMIDADE QUE DETERMINAM ALTERAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DAS CAMADAS.

SOME DIFFICULTIES IN THE DESIGN OF PAVEMENTS

SUMMARY

— EVOLUTION IN THE DESIGN OF PAVEMENTS. DIFFICULTIES ARISING FROM THE RACIONAL CALCULATION OF PAVEMENTS, OWING TO THE COMPLEX REOLOGICAL BEHAVIOUR OF ITS DIFFERENT LAYERS, HETEROGENEITY OF THE TRAFFIC ACCORDING TO THE WEIGHT BY AXLE, SPEED, ETC., VARIATIONS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY WHICH PROVOKE SOME ALTERATIONS IN THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIALS OF THE LAYERS.

QUELQUES DIFFICULTÉS DANS LE CALCUL DE PAVEMENTS

SOMMAIRE

— ÉVOLUTION DANS LE CALCUL DE PAVEMENTS. PROBLÈMES QUI SE PRÉSENTENT AU CALCUL RATIONNEL DE PAVEMENTS, DUES AU COMPORTEMENT REOLOGIQUE COMPLEXE DE SES DIFFÉRENTES COUCHES, À L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DU TRAFFIC PAR RAPPORT AUX POIDS PAR AXE, VITESSES, ETC., AUX VARIATIONS DE TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ QUI DÉTERMINENT DES ALTÉRATIONS AUX CARACTÉRIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX QUI COMPOSENT LES COUCHES.

1 — HISTÓRIA

Já desde há muito tempo que a determinação das dimensões da estrutura de um pavimento tem merecido a atenção dos construtores de estradas.

Assim, a constituição das célebres estradas romanas, já era variável tomando em consideração a natureza dos solos, embora as suas dimensões pecassem geralmente por excesso pois a mão-de-obra e os materiais eram pouco dispendiosos. Deste modo é possível haver ainda hoje troços de estradas romanas transitáveis como sucede aliás também com muitas pontes romanas. Mas evidentemente o dimensionamento dessas estradas era arbitrário e dependia do julgamento pessoal do construtor ou de regras empíricas muito simples obtidas da prática de outras obras análogas mas sem qualquer base científica.

Foi principalmente após a 2.ª Guerra Mundial com o desenvolvimento da utilização de veículos de tracção mecânica tanto em número como velocidade e peso que o problema se modificou profundamente e essa evolução, antes diria explosão, exige um estudo mais cuidado e urgente.

Mau grado dos construtores chamados práticos, a sua arte tornou-se, não desnecessária evidentemente, mas insuficiente para acompanhar aquela evolução do tráfego. A necessidade premente de construir estradas e as dificuldades do cálculo racional, levaram no entanto inicialmente ao estabelecimento de fórmulas empíricas mas cada vez mais elaboradas e com uma base científica de observação e de experimentação em grande escala. Infelizmente essa fase ainda continua em grande número de casos pois as dificuldades são tantas para encontrar uma metodologia racional isenta de quaisquer críticas que este problema muito dificilmente tem progredido. Devo dizer no entanto que o cálculo eletrônico tem ultimamente contribuído para um maior progresso dos métodos racionais.

O muito conhecido método CBR é um método empírico inicialmente muito simples mas que tem vindo a ser aperfeiçoado tomando em consideração as variáveis mais influentes de modo a torná-lo mais realista. E no entanto basta conhecer o ensaio CBR para se avaliar quanto longe está da realidade e da indefinição portanto dos métodos que nele se baseiem.

As dificuldades que existem no cálculo racional e que se irão mencionar, não tem evidentemente o mesmo peso na sua acção

perturbadora do cálculo ou na sua influência real mas julgo que há vantagens em conhecê-las e principalmente saber avaliar aquela influência e é nisto que a prática dos trabalhos tem realmente a maior importância.

Evidentemente que as estradas tem que se fazer e não se pode esperar que apareça um método racional impecável para elas se executarem. Se se quiser obter um método racional prático é pois necessário aplicar hipóteses simplificadoras, como aliás sucede noutros ramos de Engenharia, conhecendo as consequências das diferentes hipóteses adoptadas. Hoje existem já diversas teorias nestas condições mas baseadas por vezes em hipóteses demasiadamente simplificadas.

No entanto o progresso traduz-se na adopção de hipóteses cada vez mais realistas embora daí resulte evidentemente maior complexidade para o cálculo.

Mas os ábacos e o cálculo informático nos ajudarão.

Indicar as dificuldades não representa pois pessimismo mas simplesmente tem por fim alertar os técnicos para que todos os resultados obtidos devam ser objecto de uma análise crítica cuidada antes de serem adoptadas e para isso é indispensável conhecer aquelas dificuldades.

2 — COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS MATERIAIS

O comportamento reológico dos materiais rodoviários é muito complexo. Embora a maioria das teorias existentes os considerem como elásticos evidentemente é uma aproximação um pouco grosseira principalmente no início da existência do pavimento. É curiosa a contradição entre essas teorias em que por um lado os consideram elásticos e por outro fixam a sua duração em função do número de passagens das cargas o que demonstra que admitem que haja dissipação de energia.

Por outro lado considerá-los como visco-elásticos obedecendo ao modelo de VOIGT como o fazem já algumas teorias, embora represente um progresso evidentemente ainda não é a realidade pois na verdade o seu comportamento é plástico-visco-elástico não linear principalmente, como se disse, no início do pavimento. Não é fácil obter qualquer modelo reológico verdadeiramente representativo.

Mas mesmo considerando os pavimentos como elásticos, a complexidade do cálculo tem obrigado a considerar-se apenas os casos até três camadas e só recentemente o cálculo electrónico tem permitido considerar mais camadas.

Por outro lado a determinação das características mecânicas da teoria da elasticidade a materiais não elásticos tem levantado grandes dificuldades obtendo-se resultados não só muito dispersos mas dependentes do ensaio adoptado para as determinar.

Assim por exemplo o módulo de elasticidade do betão betuminoso que é um tipo de camada de desgaste muito utilizada, tem sido tomado igual a valores muito diferentes pelos diferentes autores:

100 000 a 40 000 Kg/cm² — por Jeuffroy e Bachelez

80 000 Kg/cm² — por Burmister

50 000 a 25 000 Kg/cm² — por Peattie

20 000 Kg/cm² — por Jones

20 000 a 15 000 Kg/cm² — por Ivanov

Estas diferenças são principalmente devidas à velocidade de aplicação das cargas, temperatura, etc. As mesmas diferenças se notam quanto ao coeficiente de Poisson, assim por exemplo:

0,5 — para Fox, Peattie, Jeuffroy e Bachelez

0,35 — para Jones

0,25 — para Mehta e Valetsos

Isto tem interesse porque, para valores menores de coeficiente de Poisson, obtém-se no cálculo maiores deformações verticais do pavimento.

O valor 0,35 está actualmente a ser mais utilizado.

Dadas as dificuldades em determinar o módulo de elasticidade quer pela velocidade de propagação de ondas quer por ensaios de deflexão dinâmica, tem-se tentado correcioná-lo com o CBR. Como é evidente a dispersão é enorme, dada a diferença profunda entre os ensaios:

Assim por exemplo:

E = 100 CBR — para Henkelon e Peattie

E = 20 a 30 CBR — para Jeuffroy e Bachelez

E = 15 a 20 CBR — para Bonnard e Recordon

Outro factor que torna a análise mais complexa embora em geral não seja considerado é a utilização do chamado binder ou camada de ligação que consiste numa mistura betuminosa menos cuidada e com teor de betume menor que o betão betuminoso. Embora desta utilização possam resultar algumas economias, ela não é justificável tecnicamente dado que as tracções são maiores justamente aí e o binder tem uma resistência menor que o betão betuminoso. Antes se compreendia que o binder tivesse maior teor de betume e menor porosidade para maior resistência à fissuração, maior adesividade e menor envelhecimento.

3 — FACTORES QUE INFLUEM NAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Outro factor que influi por vezes bastante, principalmente nas camadas betuminosas, é a temperatura. Assim por exemplo para os módulos de elasticidade do betão betuminoso teremos:

a 5.°C — E = 50 000 Kg/cm²

a 30.°C — E = 20 000 Kg/cm²

com betume de penetração 80/100 ou ainda

a 5.°C — E = 40 000 Kg/cm²

a 30.°C — E = 15 000 Kg/cm²

com betume de penetração 180/200

Simultaneamente pode-se apreciar nestes valores também a influência da dureza do betume, no valor do módulo de elasticidade.

Edwards apresentou um processo para o qual o pavimento é calculado para um determinado TMMA (Temperatura Média Mensal do Ambiente). Evidentemente melhora o problema mas não o resolve para climas com diferenças de temperatura muito grandes.

Tudo isto é muito importante porque a distribuição das tensões e deformações depende dos módulos de elasticidade. Um aumento do módulo de elasticidade do betão betuminoso corresponde a maiores tracções na parte inferior desse betão. É talvez uma das causas mais frequentes da sua fendilhação. Pelo contrário uma diminuição a maiores tensões e deformações no

solo de fundação do pavimento.

O módulo de elasticidade de um betão betuminoso varia, como se viu, com a penetração do betume, portanto também quando este envelhece: as tensões nele podem aumentar enquanto que a sua resistência diminui.

Finalmente o módulo de elasticidade varia com o teor do betume, a própria qualidade dos agregados e sua granulometria, a sua compactidade, etc. Outro factor de grande importância é a velocidade de aplicação das cargas e a sua duração.

O comportamento reológico do pavimento para cargas estáticas é muito diferente do das cargas dinâmicas.

Enquanto que no segundo caso, o comportamento é quase elástico tanto mais quanto maior a velocidade de actuação, no primeiro caso, a parte viscosa manifesta-se com maior intensidade.

A diversidade de velocidade dos veículos é portanto outro factor de perturbação e se em certos casos as cargas dinâmicas são piores, noutros casos as estáticas. Não basta portanto considerar nos cálculos a maior velocidade dos veículos como também não é suficiente considerá-los parados.

Finalmente o tempo entre duas aplicações das cargas influi no comportamento do pavimento pois verifica-se em certos casos a sua auto-reparação principalmente no betão betuminoso.

Mas o comportamento do próprio solo de fundação do pavimento é muito complexo e variável. Um dos factores mais importantes é a variação do teor de água como se poderá verificar através dos ensaios CBR.

Um solo argiloso com razoáveis resistências mecânicas quando seco, pode ter mesmo resistências nulas para teores de água maiores.

Ora o teor de água sob o pavimento não é igual, é muitas vezes maior junto das bermas; também é junto das bermas que o teor de água é mais variável. Isto é, tanto pior quando é precisamente aí que se localizam as maiores tensões e deformações.

Este facto era mais prejudicial no antigo processo de construção da abertura de caixa, hoje felizmente posto de parte em quase toda a parte.

Um processo para evitar as maiores deformações do pavimento junto das bermas embora pouco vulgarizado, consiste em adoptar espessuras maiores das sub-bases junto das bermas em relação ao eixo da estrada. A maior inclinação da sub-base facilita igualmente a sua drenagem.

No entanto, as variações da resistência do solo com o teor de água são hoje atenuadas utilizando na última camada dos aterros, solos de características determinadas de acordo com as especificações existentes.

4 — RELAÇÃO ENTRE AS CARGAS NUM PAVIMENTO

A diversidade de tipos de veículos e de carga por eixo, torna necessária a sua homogeneização, isto é, a redução a eixo tipo, obtida pela multiplicação do peso do veículo por um coeficiente de equivalência de modo a obter o número de passagens equivalente do eixo-tipo com a mesma acção sobre o pavimento que uma única passagem do eixo do veículo. Esses coeficientes são indicados em tabelas ou em fórmulas evidentemente empíricas, tais como a fórmula de Dormond e Metcalf adoptada pelo TRRL ou seja:

$n = 2,2 \times 10^{-L}$ sendo n o número de passagens de um eixo standard (8,2 toneladas) equivalente a uma passagem de um eixo de 7 toneladas. É claro que seria desnecessário dizê-lo que esses coeficientes são diferentes conforme os autores o que não é para admirar dada a dificuldade em obtê-los mas o pior é que eles são dependentes da própria constituição do pavimento e portanto não podem ser válidos para todos os pavimentos.

Por outro lado a intensidade de tráfego a considerar para uma estrada a projectar é baseado em elementos estatísticos, de uma precisão também por vezes muito precária. Os próprios recenseamentos de tráfego normalmente dão apenas os números de veículos por categorias, isto é, veículos ligeiros, pesados de dois eixos, etc. e nada nos dizem sobre as cargas dos eixos cuja determinação por sua vez é baseada em estudos pouco precisos.

Este problema actualmente pode ser resolvido mais perfeitamente por meio de básculas dinâmicas que permitem conhecer as cargas dos eixos dos veículos sem ser necessário fazê-los parar.

5 — RELAÇÕES ENTRE AS CAMADAS DE UM PAVIMENTO

Há métodos de cálculo (método da AASHO, método do Asphalt Institut, etc.) que determinam apenas a espessura de uma camada única necessária para o pavimento, deduzindo-se desta espessura, as espessuras das outras camadas por meio igualmente de coeficientes de equivalência também empíricos.

Assim por exemplo a espessura de um tapete de betão betuminoso seria igual a n vezes a espessura do macadame ordinário. Neste caso o valor n varia segundo os autores entre 3 e mesmo 3,5 até 2.

Na realidade estes coeficientes além de serem imprecisos, devem igualmente depender da constituição do pavimento e portanto a sua utilização não pode ser geral. Mas outro factor também muito importante para o desenvolvimento do cálculo de qualquer método racional de dimensionamento, é a natureza das interfaces entre as diferentes camadas do pavimento.

Há teorias, como a de Burmister que as consideram perfeitamente aderentes. Outras, como a de Jeuffroy e Bachelez consideram a camada de desgaste com uma laje simplesmente apoiada sem atrito sobre outras camadas perfeitamente ligadas, etc. A teoria de Ivanov considera também as camadas aderentes entre si mas facto muito importante, a relação dos módulos de resistência entre uma camada do pavimento e a sua camada imediatamente inferior não pode ser superior a um determinado valor.

A realidade da natureza das interfaces, no entanto, deverá estar no meio termo isto é, nem perfeitamente independente nem perfeitamente ligadas.

Este facto é de grande importância conhecer pois pode-se considerar idêntico ao comportamento de duas vigas sobre-postas submetidas à flexão contractando-se livremente ou de duas vigas fixadas rigidamente entre si por meio de entalhes por exemplo. Como sabemos, as suas resistências num caso e noutro, são muito diferentes.

Muitas outras causas de erro se poderiam ainda citar tais como as camadas serem calculadas geralmente como indefinidas quando tem uma largura bem definida, as cargas são supostas circulares quando o não são, etc., etc.

6 — CONCLUSÃO

Embora a maioria dos métodos utilizados apenas nos dêem as espessuras convenientes das diferentes camadas de um pavimento e por vezes as tensões e deformações maiores, é possível já hoje calcular as tensões e deformações em qualquer ponto da estrutura de um pavimento tal como sucede noutras estruturas.

No entanto, como vimos, o cálculo é sempre baseado em hipóteses simplificadoras que nem sempre satisfazem.

É claro que os estudos desenvolvem-se em todo o mundo no sentido de nos aproximarmos mais da realidade.

Para atender aos efeitos de temperatura e do tempo de carga é adoptado por vezes, um subterfúgio que consiste em determinar um dimensionamento que satisfaça simultaneamente às seguintes hipóteses:

- a) — cargas estáticas com temperatura limite superior conforme o clima da região;
- b) — velocidade dos veículos igual à do projecto com uma temperatura limite inferior conforme o clima da região.

É um processo que nos permite calcular com mais aproximação a tensão de tracção na parte inferior do betão betuminoso (2.ª hipótese) e a maior pressão no solo de fundação, (1.ª hipótese).

Mas desejo terminar, insistindo mais uma vez que ter uma confiança cega nos cálculos assim como fazer uma crítica derrotista, são atitudes ambas perigosas e ambas geralmente motivadas pela falta de conhecimentos destes problemas.

A atitude mais razoável é fazer sempre uma interpretação crítica dos resultados obtidos.