

SOLUÇÕES PARA AUTOMATIZAÇÃO INTEGRAL DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Nuno Verdelho Trindade¹

¹COBA - Consultores de Engenharia e Ambiente, S.A., Avenida 5 de Outubro 323, 1649-011 Lisboa, Portugal
email: nvt@coba.pt ou nfvtrindade@gmail.com <http://www.coba.pt>

Sumário

Neste trabalho serão analisadas, a importância da utilização de sistemas de dimensionamento automático integral no projeto de pavimentação, que permitam acompanhar o processo na sua totalidade, desde a fase de modelação até à obtenção de soluções finais e produção de peças escritas e desenhadas e as possibilidades que a capacidade e disponibilidade computacional atual nos podem fornecer neste campo. Nesse âmbito será também apresentado o desenvolvimento de um programa de cálculo automático para o dimensionamento de pavimentos rodoviários, criado com o objetivo de suprir as lacunas dos programas de cálculo usados correntemente.

Palavras-chave: dimensionamento de pavimentos; software de cálculo automático; pavimentação rodoviária

1 INTRODUÇÃO

O cálculo automático tem sofrido grandes avanços ao longo das últimas décadas, em praticamente todas as áreas da Engenharia Civil. No projeto de vias de comunicação, a exceção tem sido a especialidade de pavimentação rodoviária, para a qual se usam ferramentas informáticas pouco práticas e bastante genéricas, que permitem a automatização de apenas uma pequena parte do processo de dimensionamento de pavimentos. Isto deriva de uma multiplicidade de fatores, que incluem a enorme variabilidade das características dos pavimentos a dimensionar, a lacuna que continua a existir na uniformização dos critérios e procedimentos de dimensionamento e, principalmente, do risco de investimento associado ao desenvolvimento de ferramentas informáticas avançadas com aplicação tão específica.

Apesar da prática do projeto de pavimentos ter um âmbito alargado, devendo ter em conta as restantes componentes do projeto rodoviário, como o traçado, a drenagem, a sinalização, a geotecnia, entre outras e implicar a análise *in situ* do trecho em estudo, o processo de dimensionamento de pavimentos rodoviários é, na generalidade, efetuado em gabinete, utilizando os dados fornecidos pela entidade contratante e os recolhidos em campo, compreendendo diferentes fases. Dependendo do tipo de obra (obra nova, reabilitação/reforço, alargamento, etc.), estas fases podem incluir a análise e tratamento dos dados provenientes de inspeção visual e prospeção, o estudo dos dados referentes a temperaturas e tráfego, dos quais se obterão as ações relevantes para o dimensionamento, o cálculo estrutural, para obtenção de estruturas de pavimento adequadas e, finalmente, a produção das peças escritas e desenhadas que compõem a documentação de projeto.

A automatização integral do dimensionamento de pavimentos rodoviários implica portanto, que sejam tidas em conta todas as fases anteriormente referidas, a interdependência, complexidade e variabilidade das mesmas e o caráter iterativo daquele.

Ao invés das ferramentas informáticas usadas na prática corrente do projeto de pavimentos em Portugal que, na generalidade, possibilitam apenas a verificação da segurança estrutural, uma ferramenta de automatização integral do dimensionamento de pavimentos deve permitir um verdadeiro dimensionamento, possuindo módulos avançados de previsão da evolução do tráfego, de tratamento de dados climáticos e de análise estrutural, entre outros, podendo ser usado pelo projetista para reduzir drasticamente o tempo despendido, tanto no projeto de pavimentos de estradas novas como em projetos de reabilitação e reforço.

Com o sistema apresentado neste trabalho, não se pretendeu criar uma ferramenta para a análise de singularidades em pavimentos, que podem ser simuladas de forma mais adequada recorrendo, por exemplo, a ferramentas de modelação com malhas de elementos finitos, mas antes para ser utilizada na quase totalidade das situações correntes de dimensionamento, com que se confrontam os projetistas de vias de comunicação portuguesas.

2 LIMITAÇÕES DO SOFTWARE CORRENTE DE CÁLCULO ESTRUTURAL

Tal como já referido, a prática do dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal assenta sobretudo na utilização de *software* de cálculo estrutural que permite a obtenção de tensões e deformações a partir da definição de padrões de carregamento e das coordenadas dos pontos onde se pretendem conhecer aquelas grandezas. A obtenção destes valores possibilita, através da comparação com as ações de tráfego, traduzidas de uma forma geral pelo Número Acumulado de Eixos Padrão (NAEP), verificar a segurança de uma estrutura de pavimento arbitrada, através da aplicação de métodos mecanísticos.

Algumas das aplicações mais usadas em Portugal pelos projetistas de pavimentos são o *Elsym* [1] o *BISAR* [2] [3] ou ainda o *Ecoroute* [4], que se baseiam nos mesmos princípios de cálculo, admitindo um modelo que pressupõe a isotropia e comportamento elástico linear dos materiais das camadas de pavimento, pelo que todos eles fornecem resultados muito similares.

Cada um destes programas possui algumas vantagens e limitações em comparação com os restantes, no entanto qualquer um deles apenas permite auxiliar o projetista numa parte do processo de obtenção de estruturas de pavimento e não realizar um verdadeiro dimensionamento.

Existem programas específicos que permitem a determinação de outras grandezas necessárias ao dimensionamento, como por exemplo o *BANDS* [5] utilizado para o cálculo dos módulos de deformabilidade, no entanto estes não funcionam de forma integrada com outros aplicativos, pelo que não permitem alcançar uma produtividade satisfatória, obrigando à transposição manual de dados a cada tentativa ou iteração.

Alguns exemplos de *software* que permite a integração entre várias fases do dimensionamento são o *SPDM* [6] da Shell que peca no entanto pela baixa versatilidade, estando limitado a um número restrito de situações ou o *ALIZÉ-LCPC* [7] do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées e Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA), que permite o acompanhamento de praticamente todo o processo de dimensionamento, no entanto possui limitações no que diz respeito aos cálculos de tráfego e está direcionado para a prática de dimensionamento de acordo com as metodologias francesas.

As limitações do *software* existente são frequentemente colmatadas, por parte dos projetistas, pela utilização em paralelo de rotinas desenvolvidas em folhas de cálculo, que possuem uma interface ideal para a visualização detalhada de todos os cálculos e permitem compreender facilmente qual a sequência de dimensionamento e detetar eventuais erros. No entanto têm algumas limitações importantes. Em primeiro lugar porque não funcionam de forma independente, pressupondo a existência no computador de um programa que permita ler e executar as rotinas de cálculo mas também porque não possuem a mesma capacidade e rapidez de cálculo conseguida pelos programas desenvolvidos, compilados e assemblados com as poderosas linguagens de programação atuais.

3 PREMISSAS DA AUTOMATIZAÇÃO INTEGRAL DO DIMENSIONAMENTO

O conceito de automatização integral do dimensionamento de pavimentos rodoviários pressupõe que após a introdução dos dados iniciais, quer sejam de tráfego, temperaturas ou características dos materiais, o projetista tenha de intervir o mínimo possível na transposição de resultados entre as diversas etapas do dimensionamento.

Deverá permitir que a preocupação do projetista se centre na escolha de materiais e critérios de dimensionamento, nas simplificações e arredondamentos a introduzir e na análise crítica dos resultados finais.

Desta forma é possível diminuir significativamente o tempo que decorre entre as fases iniciais do dimensionamento e a produção de peças finais de projeto. Permite também o aumento da precisão e a redução substancial da suscetibilidade a erros.

4 DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Neste capítulo são apresentadas as características e o processo de desenvolvimento de um sistema informático para o cálculo automático de pavimentos rodoviários, com o objetivo de auxiliar o projetista na sua atividade, acompanhando o dimensionamento de pavimentos flexíveis em todas as suas etapas.

Uma das maiores dificuldades na criação deste sistema informático foi a sistematização da infinidade de diferentes casos de dimensionamento. À partida é tarefa virtualmente impossível prever rotinas de cálculo que permitam o dimensionamento integral de qualquer situação de projeto, mesmo que nos restrinjamos a um tipo particular de pavimento.

Tentou-se atenuar este problema através do recurso à modularidade, o que permitiu uma maior versatilidade à medida que se avança ao longo das diferentes etapas do dimensionamento.

Por outro lado, apesar da enorme variabilidade de situações possíveis de projeto, é possível isolar alguns princípios transversais a todas estas situações e esse foi um bom ponto de partida para tornar o sistema desenvolvido aplicável à grande maioria dos casos correntes de projeto.

O *software* possui assim diferentes módulos que podem ser ou não utilizados, aproveitando a totalidade ou apenas parte das suas funções, de acordo com as necessidades específicas do projeto. Estes módulos funcionam de forma integrada em torno de um módulo central que controla o influxo e efluxo de dados entre eles e executa todas as rotinas iterativas. No entanto cada um dos módulos pode ser também utilizado de forma independente.

As principais componentes do sistema (Fig.1), além do módulo central de gestão, são o módulo de tráfego, o módulo de temperaturas, uma componente que permite a determinação dos módulos de deformabilidade das camadas de pavimento, o módulo de cálculo estrutural e o módulo de geração de peças desenhadas.

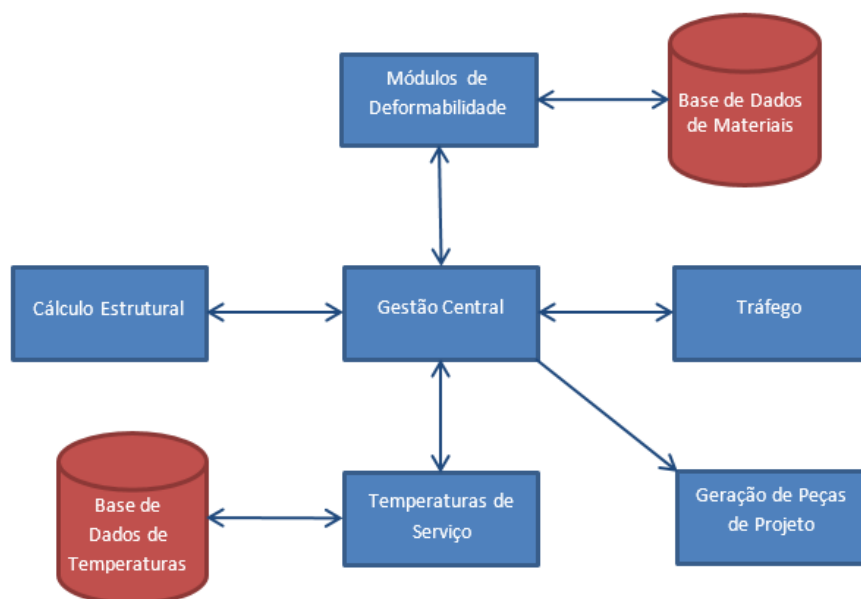


Fig.1. Diagrama de fluxos de dados entre os diferentes módulos

4.1 Tráfego

Este módulo permite obter, de diferentes formas e partindo de uma multiplicidade de tipos de dados fornecidos, o número acumulado de eixos padrão.

O módulo de tráfego permite estimar a evolução do tráfego e determinar as respetivas taxas de crescimento, em função dos valores de TMDA de veículos pesados de forma agregada ou independente tendo em conta as diferentes classes dos veículos que circulam na secção em estudo.

De acordo com os dados de entrada e a metodologia a utilizar, o módulo de tráfego permite obter os fatores de agressividade, admitindo que estes variam com os volumes de tráfego, com base no acumulado de veículos pesados entre o ano de abertura e o ano horizonte de projeto ou no TMDA de veículos pesados no ano de abertura, partindo do tabelado no Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) [8].

O cálculo atualiza-se automaticamente quando se modifica o número de anos considerados para o dimensionamento, o eixo padrão utilizado, a percentagem de tráfego no sentido de circulação mais solicitado e a percentagem de tráfego na via de dimensionamento.

É também possível considerar fatores de equivalência dos veículos, com base nos fatores de equivalência por eixo, caso se opte por metodologias de análise de dados de tráfego como as previstas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [9] ou *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) [10]. As equações a utilizar são configuráveis, podendo ter em conta variáveis como os pesos legais ou o valor acumulado de veículos pesados, o que permite uma grande versatilidade na utilização de metodologias não contempladas à partida pelo sistema.

4.2 Temperaturas de serviço

O módulo de cálculo de temperaturas (Fig.2) permite a determinação automática de temperaturas de serviço para cada uma das camadas da estrutura de pavimento utilizando a metodologia da Shell [11] [2] e com base numa extensa base de dados climáticos de estações meteorológicas nacionais e internacionais e respetivas temperaturas ponderadas do ar.

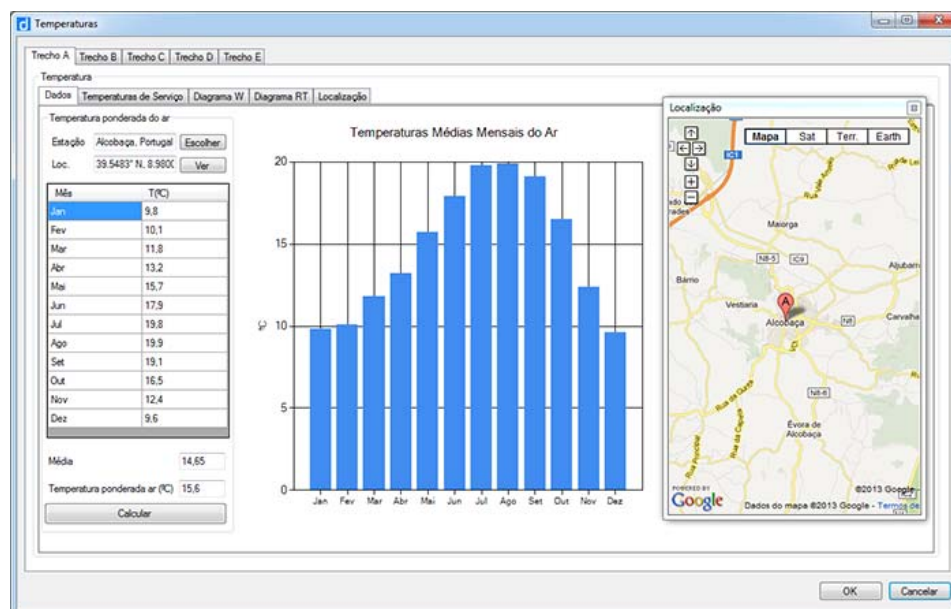


Fig.2. Captura de ecrã do módulo de temperaturas

Em interação com os restantes módulos e durante o processo iterativo de dimensionamento, as temperaturas de serviço são recalculadas de acordo com as variações nas espessuras das camadas betuminosas.

4.3 Módulos de Deformabilidade

Esta componente permite o cálculo dos módulos de deformabilidade das camadas de pavimento, com base nos materiais utilizados, na espessura e posição relativa de cada camada.

Permite a obtenção dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas de diversas formas, nomeadamente com base nas metodologias da Shell [11] e de Brown [12] (método da Universidade de Nottingham), introduzindo manualmente fatores como a percentagem volumétrica de betume, porosidade ou a penetração do betume, ou recorrendo a uma base de dados de materiais que em articulação com os restantes componentes do sistema, preenche aqueles valores automaticamente de acordo com a natureza e localização da camada.

A base de dados de materiais pode ser editada pelo projetista de acordo com as necessidades específicas de um determinado projeto e as suas opções relativamente aos fatores anteriormente referidos, a adoptar, mas já inclui uma coleção de itens que têm em conta as mais recentes designações, de acordo com o presente no Caderno de Encargos Tipo Obras da EP - Estradas de Portugal [13].

A temperatura de serviço considerada é obtida automaticamente do módulo de temperaturas, podendo também optar-se por fixar aquele valor, tornando-o independente da profundidade da camada em questão.

Este módulo incorpora ainda uma ferramenta de retroanálise, direcionada para projetos de reabilitação/reforço.

4.4 Cálculo Estrutural

Este módulo (Fig.3) permite o cálculo das tensões e deformações admissíveis em pontos específicos da estrutura de pavimento, nos quais se preveja que existam os valores máximos de deflexões, ou em contínuo, definindo um intervalo de análise e um valor de incremento de profundidade para uma determinada coordenada horizontal, o que permite obter automaticamente os valores máximos e os respetivos diagramas de variação.

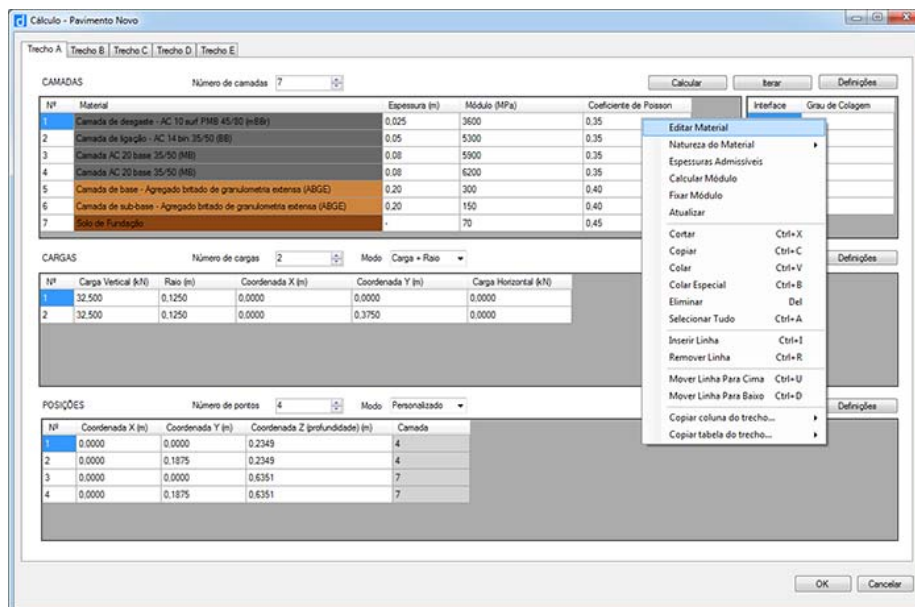


Fig.3. Captura de ecrã do módulo de cálculo estrutural (pavimentos novos)

Tal como os programas de cálculo estrutural tradicionais, este módulo possibilita a introdução de diferentes configurações de carregamento, podendo estas ser visualizadas num diagrama, à medida que são introduzidas através de coordenadas. Possui igualmente uma base de dados com uma multiplicidade de configurações *standard* incluindo as configurações correspondentes aos eixos padrão mais utilizados em Portugal.

Além disso é possível a consideração de diferentes posições dos sistemas de eixos de referência para as coordenadas de carregamento e pontos de análise, de acordo com as preferências do utilizador. O programa apresenta também a possibilidade de conversão automática de coordenadas quando os eixos são deslocados.

Tal como as restantes componentes do sistema, este módulo pode ser utilizado de forma independente, para fazer por exemplo um cálculo rápido de verificação estrutural.

Este módulo possibilita também a consideração da colagem ou descolagem entre diferentes camadas. Em cada interface pode ser considerada uma situação de colagem ou decolagem total ou ainda de colagem parcial.

Esta componente de cálculo é caracterizada pela robustez, uma vez não tem quaisquer limites quanto ao número de carregamentos considerados nem no que diz respeito ao número de pontos a analisar ao longo da estrutura de pavimento.

4.5 Geração de peças desenhadas e escritas

Após o dimensionamento, a aplicação possibilita a geração dos principais elementos a utilizar nas peças escritas do projeto, nomeadamente os quadros de cálculo de tráfego, os quadros de cálculo de temperaturas, quadros com o cálculo detalhado dos módulos de deformabilidade e as saídas de cálculo com os resultados da análise estrutural. Todos estes elementos são personalizáveis.

É possível também a geração automática de memórias descritivas, através de ficheiros modelo, indicando a posição e ordem dos quadros obtidos.

Quanto às peças desenhadas, o sistema permite, para já, apenas a geração de ficheiros CAD com diagramas das estruturas de pavimento para cada secção considerada.

4.6 Módulo de gestão

É neste módulo que é introduzido o número e características das secções a analisar. Não há qualquer limitação no número de secções a estudar em simultâneo, pelo que o programa pode ser utilizado para projetos de alguma complexidade, onde haja grande variabilidade de condições de fundação e de volume de tráfego e portanto a necessidade de estudo simultâneo de várias dezenas de secções.

O módulo de gestão permite a interação entre os restantes componentes do sistema. Por exemplo articula as componentes de cálculo estrutural, temperaturas de serviço e módulos de deformabilidade, de forma a fazer variar estes últimos com a espessura das camadas e respetiva temperatura de serviço.

Neste módulo são também definidos quais os critérios a utilizar no dimensionamento e os intervalos a admitir na aplicação desses critérios. O programa permite estabelecer um dimensionamento automático baseado numa análise que pode ter em conta um ou diversos critérios, como sendo o critério económico (considerando o custo dos materiais utilizados), a gama de materiais a usar, os valores máximos e mínimos de espessura total do pavimento, entre outros.

No final do processo iterativo de dimensionamento e em função dos critérios considerados, é apresentada ao projetista apenas a solução ótima ou então uma listagem de todas as hipóteses possíveis dentro dos intervalos apresentados, permitindo a escolha mais fácil da solução final.

Este módulo oferece também uma ferramenta de pré-dimensionamento utilizando o MACOPAV.

Para projetistas de vias de comunicação, com menos experiência no projeto de pavimentos rodoviários, o sistema oferece um modo simplificado de pré-dimensionamento através da utilização de *wizards*, ecrãs sucessivos que questionam o utilizador sobre as características do pavimento e os principais dados disponíveis.

5 CONCLUSÕES

A automatização integral do dimensionamento de pavimentos rodoviários oferece vantagens significativas relativamente à utilização de sistemas não integrados que obriguem o projetista ao tratamento e transposição manual dos valores obtidos. Estas vantagens refletem-se na fiabilidade dos resultados obtidos, no tempo despendido no dimensionamento e consequentemente na produtividade geral do projetista.

Apesar da aplicação que aqui se apresenta ainda de encontrar numa fase de desenvolvimento, necessitando de refinamento e apresentando ainda lacunas no que diz respeito a alguns aspetos, como sejam por exemplo a aplicabilidade da totalidade dos módulos de dimensionamento exclusivamente aos pavimentos flexíveis, entre outras, exhibe algumas características e melhoramentos que a distinguem das aplicações tradicionalmente usadas pelos projetistas de pavimentos em Portugal.

6 AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos à COBA - Consultores de Engenharia e Ambiente, S.A., onde atualmente exerço a minha atividade profissional, pela oportunidade de colaboração em inúmeros projetos de infraestruturas rodoviárias e pelo incentivo à elaboração deste trabalho.

7 REFERÊNCIAS

1. G. Ahlborn, *ELSYM 5, Computer Program for Determining Stresses and Deformations in a Five-layer Elastic System*, University of California, Berkeley.
2. C.P. Valkering, F.D.R. Stapel, *The Shell Pavement Design Method on a Personal Computer*, 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham (1992) 351-374.
3. *BISAR 3.0 User Manual*, Shell International Oil Products B.V., The Hague, 1998.
4. M. Choupas, *Ecoroute - Logiciel de Dimensionnement des Chaussees*, Services D'etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 1993
5. *BANDS 2.0 User Manual*, Shell International Oil Products B.V., The Hague, 1998.
6. *SPDM 3.0 User Manual*, Shell International Oil Products B.V., The Hague, 1998.
7. *Manuel d'utilisation du logiciel ALIZÉ-LCPC version 1.3*, LCPC, Montreuil, 2010.
8. *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas (JAE), 1995.
9. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1993.
10. *Flexible Pavements for Roads, Streets, Walks and Open Storage Areas - Mobilization for Construction*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 1984.
11. *Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*, Shell International Petroleum Company Ltd., London, 1978.
12. S. F. Brown, *Bituminous Materials. Elastic Stiffness and Permanent Deformation. Course on Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation*. Lecture I. University of Nottingham, 1998.
13. *Caderno de Encargos Tipo Obras (CETO)*, EP - Estradas de Portugal, S.A, 2009.