

# FERRAMENTAS DIGITAIS AVANÇADAS DE PROJETO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS E O SEU PAPEL NA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS CORRENTES

Nuno Verdelho Trindade<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INPAV, Avenida Carolina Michaelis n.40 3.C – 2795-050 Linda a Velha, Portugal

email: info@inpav.com <http://www.inpav.com>

---

## Sumário

*O presente trabalho pretende apresentar as principais vantagens e o impacto que as tecnologias e processos de última geração têm na produtividade dos gabinetes de engenharia, no que diz respeito ao projeto de vias de comunicação e em particular ao dimensionamento de pavimentos rodoviários.*

*Estes novos processos serão analisados e exemplificados através da descrição do funcionamento da suite de software “INPAV Design”, desenvolvida pelo Autor e dirigida à automatização integral do dimensionamento de pavimentos rodoviários.*

---

**Palavras-chave:** dimensionamento de pavimentos; projeto de pavimentação; software de cálculo estrutural; pavimentos rodoviários; pavimentos aeroportuários

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade de dimensionamento de pavimentos tem como um dos objetivos fundamentais a obtenção de estruturas seguras, fiáveis, económicas e que simultaneamente correspondam aos parâmetros ambientais e de sustentabilidade pretendidos pelos intervenientes no projeto.

Especialmente em grandes empreendimentos de infraestrutura viária, é recorrente os intervalos temporais disponíveis para a realização daquela atividade, serem significativamente reduzidos. Devido à inadequabilidade das ferramentas de cálculo automático tradicionalmente usadas, o projetista opta, naquelas situações, frequentemente pela escolha de soluções, que satisfaçam, na medida do possível, os objetivos pretendidos, não sendo realista, pela urgência inerente à tarefa, a obtenção de soluções teoricamente “ótimas” que tenham em conta, em devida proporção, a totalidade dos parâmetros considerados relevantes.

O conjunto de ferramentas digitais avançadas de dimensionamento, que surgiram nos anos mais recentes, têm um papel determinante na alteração daquelas circunstâncias, promovendo a otimização do projeto de pavimentos rodoviários e a redução drástica do tempo despendido pelo projetista. Permitem alargar o espectro de análise a um número virtualmente ilimitado de hipóteses, levando em consideração os diferentes critérios de dimensionamento. Em vez do processo manual de tentativa-erro, durante o qual diferentes características geométricas e físicas vão sendo sucessivamente testadas, o papel do projetista passa por estabelecer critérios e condições limite iniciais e a analisar de entre a multiplicidade de soluções resultantes, a que mais se adequa aos objetivos intrínsecos do projeto.

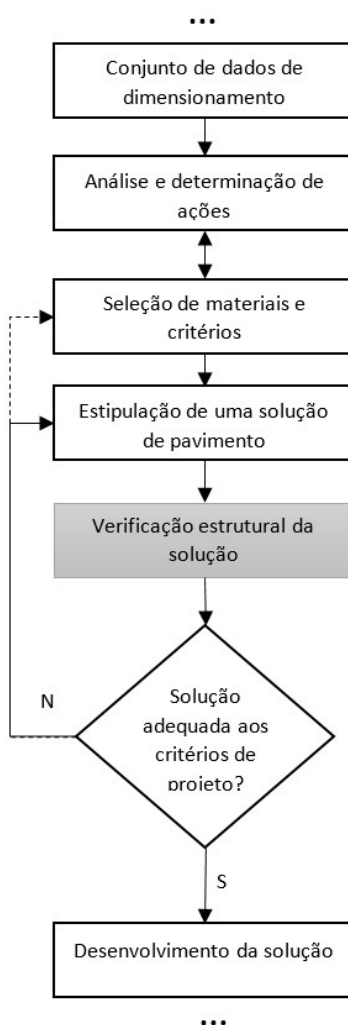
É nesse âmbito que surge o presente trabalho, que pretende apresentar uma ferramenta digital capaz de calcular e verificar rapidamente e de forma iterativa, centenas de hipóteses estruturais diferentes, prestando auxílio ao longo de todo o processo de dimensionamento, com potencial para influenciar positivamente o paradigma funcional e organizativo da atividade do projetista.

Apesar do software ser passível de utilização na grande maioria das situações de dimensionamento de pavimentos rodoviários e aeroportuários novos e em situações de reabilitação e reforço, o presente trabalho será focado nos pavimentos rodoviários flexíveis, sendo abordadas as componentes de previsão da evolução do tráfego, de tratamento de dados climáticos, análise estrutural e produção de peças de projeto.

## 2 PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO TRADICIONAL COM RECURSO A FERRAMENTAS INFORMÁTICAS CORRENTES

O processo de cálculo de pavimentos rodoviários betuminosos novos, usando ferramentas informáticas tradicionais passa, de uma forma geral, pela verificação estrutural iterativa de sucessivas configurações e escolha da mais adequada aos critérios do projeto. Em cada iteração vão sendo modificadas as diferentes características da estrutura, nomeadamente no que diz respeito ao número, natureza, organização e espessuras das camadas do pavimento e aos materiais utilizados.

Na Fig.1 exemplifica-se, numa esquematização simplificada, a forma como parte do processo de dimensionamento se desenvolve.



**Fig.1. Diagrama simplificado de parte do processo tradicional de dimensionamento de pavimentos rodoviários betuminosos novos (atividades total ou parcialmente automatizadas a sombreado)**

A partir da análise de um conjunto de dados de dimensionamento, o projetista determina as ações a que, previsivelmente, o pavimento estará sujeito, selecionando o tipo de materiais a utilizar na execução do pavimento e estabelecendo os principais critérios e estratégias de dimensionamento.

O arranque do cálculo iterativo propriamente dito dá-se, frequentemente com a utilização de metodologias de pré-dimensionamento, por exemplo a prevista no Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) [1], que permitem encaminhar o trabalho do projetista e encurtar o tempo despendido nas atividades subsequentes.

Embora a verificação estrutural seja tradicionalmente um dos poucos passos do processo, que se realiza, a cada iteração, recorrendo a meios de cálculo automático, obriga, quase sempre, à intervenção do projetista na análise da resposta estrutural, viabilidade da solução e, frequentemente, na transposição e modificação manual de dados, entre iterações.

Algumas das aplicações tradicionalmente mais usadas em Portugal pelos projetistas de pavimentos são o *Elsym* [2] o *BISAR* [3] [4] ou ainda o *Ecoroute* [5], embora a adoção de ferramentas avançadas de dimensionamento, mesmo em gabinetes de menor dimensão faça cada vez mais sentido e tenda a crescer.

### **3 EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO FERRAMENTAS INFORMÁTICAS AVANÇADAS**

No que diz respeito ao dimensionamento mecânico têm sido utilizadas, em diferentes regiões, ferramentas informáticas que possibilitam um cálculo mais avançado. É o caso dos países francófonos, com o *ALIZÉ-LCPC* [6] do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées e Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA), ou dos EUA, com o *AASHTOWare Pavement ME Design*, desenvolvido pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [7] [8], entre outros.

Embora estes programas informáticos representem um passo em frente no que diz respeito ao desenvolvimento tecnológico no campo do dimensionamento automático de pavimentos, que até há poucos anos sofria de um evidente atraso em relação a outras especialidades de engenharia, a grande maioria encontra-se limitada às respetivas metodologias regionais não podendo ser diretamente transpostos, sem as devidas adaptações, para outras realidades.

Em Portugal foi criado o *INPAV Design*, uma suite dirigida especialmente aos projetistas portugueses e dos países de expressão portuguesa, que introduz o conceito de automatização integral do dimensionamento de pavimentos [9].

#### **3.1 Um novo paradigma funcional e organizativo da atividade do projetista**

Ao contrário do processo tradicionalmente usado no dimensionamento de pavimentos rodoviários betuminosos novos (Fig.1) o novo software permite que a grande maioria das tarefas se desenvolva de forma completamente automática e que a intervenção do projetista tenha lugar apenas em fases de introdução de dados e configuração de critérios, bem com na tomada de decisões quanto à solução a desenvolver.

Na Fig.2 é mostrada parte do novo processo de dimensionamento que, com o intuito de permitir uma explicação mais adequada do conceito, se encontra na sua forma mais simplificada, sendo relativa aos pavimentos rodoviários betuminosos novos.

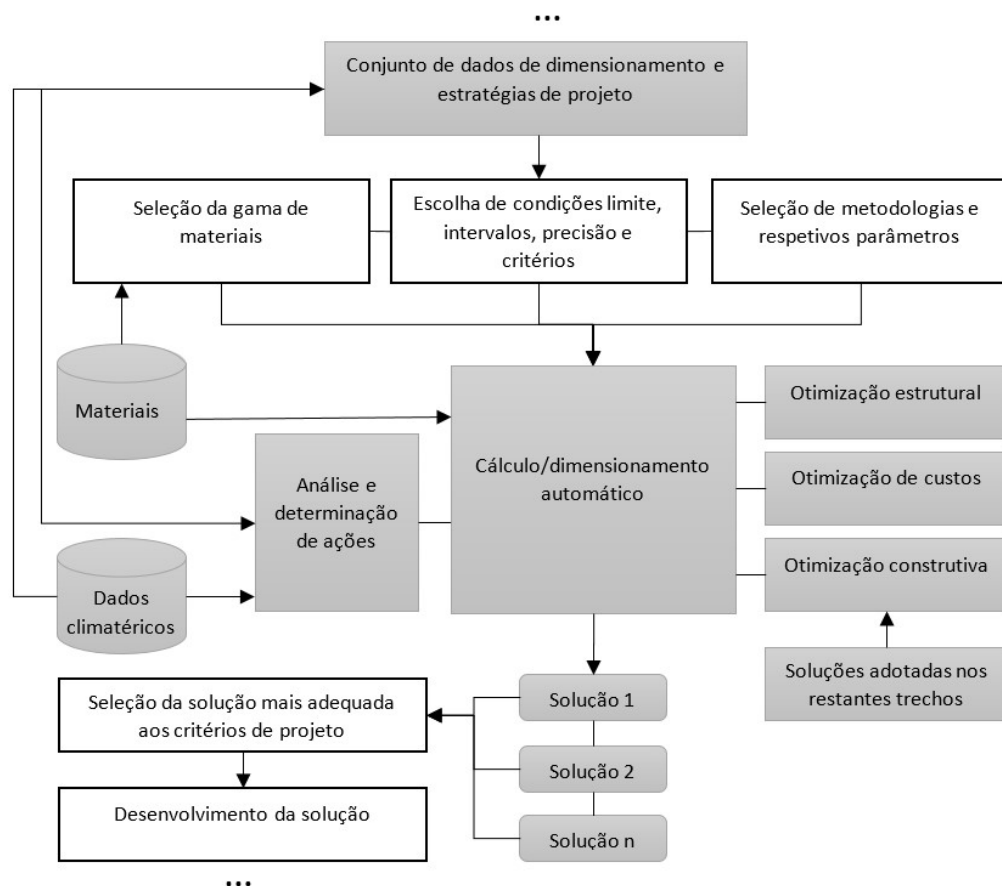
Este é um processo linear do ponto de vista do projetista, mas que confia, internamente, em métodos iterativos e cálculo massivo e em paralelo, de múltiplas soluções, com recurso a extensas bases de dados.

Numa fase inicial são introduzidas, para cada troço da via ou vias em estudo, as características e valores relativos ao tráfego e os dados climatéricos. São igualmente definidas, com base nas estratégias de desenvolvimento do projeto, a gama de materiais a usar, as posições relativas admissíveis das camadas de pavimento, as metodologias de cálculo e respetivos parâmetros, os critérios de dimensionamento, os intervalos de espessuras permissíveis, os limites máximos de espessura total do pavimento e os níveis de precisão de cálculo, entre outros.

Desta fase inicial de introdução de dados e configuração geral, após concluído o cálculo automático, o projetista pode passar imediatamente para a escolha da solução final. Para cada trecho o software apresenta um conjunto de soluções otimizadas e ordenadas de acordo com a importância dos critérios inicialmente definidos.

A porção intermédia, de cálculo, entre a fase de introdução de dados e a fase de escolha da solução é totalmente automatizada. O software faz uso de bases de dados climatéricas e de materiais e otimiza as soluções de acordo com três pontos:

- (i) Estrutural – Tendo em conta as possibilidades e critérios definidos pelo projetista no que diz respeito à distribuição relativa de camadas, respetivas espessuras, propriedades dos materiais usados, etc.;
- (ii) Económica – Através da base de dados de materiais, totalmente personalizável e que permite a configuração dos custos unitários. É igualmente possível a contabilização independente de custos adicionais estimados associados à execução;
- (iii) Construtiva – O dimensionamento tem em conta o projeto na sua globalidade e em particular as soluções adotadas nos diferentes trechos. Este é um critério sobretudo dirigido à homogeneização de soluções a um nível geral, com o objetivo de melhorar o processo construtivo.



**Fig.2. Diagrama simplificado exemplificativo de parte do novo processo de dimensionamento de pavimentos rodoviários betuminosos novos (atividades total ou parcialmente automatizadas a sombreado)**

### 3.2 Modularidade e versatilidade na resposta a uma multiplicidade de problemas

O recurso à modularidade e a aposta na versatilidade dos diferentes componentes do software permitiu aumentar a sua abrangência.

Assim, de acordo com o tipo de projeto pretendido e a natureza dos pavimentos a dimensionar, o projetista pode optar por dois modos distintos: um primeiro modo dirigido exclusivamente ao projeto de pavimentos novos e um segundo adequado à reabilitação/reforço de pavimentos.

No caso do projeto de pavimentos novos, a que o presente trabalho se refere, existem ainda três configurações de cálculo:

- (i) Cálculo Simples – Permite que o projetista efetue cálculos expeditos para avaliação de resposta estrutural, sem necessidade de percorrer um processo de configuração e introdução detalhada de dados. A interface (Fig.3) é muito simples e funciona de forma similar à de programas como o *BISAR* [3] [4] ou ainda o *Ecoroute* [5], possuindo, no entanto, muito maior versatilidade no que diz respeito por exemplo à manipulação de dados, número de secções e camadas permitidas e grau de “colagem” de camadas;
- (ii) Verificação Estrutural – A configuração de “Verificação Estrutural” traduz-se por um conjunto de módulos independentes que se articulam em torno de uma componente de gestão e podem ser utilizados de forma independente ou em conjunto para auxiliar o projetista no dimensionamento. Esses módulos são especialmente dedicados a cálculos tráfego, determinação de temperaturas de serviço, cálculo de módulos de deformabilidade das camadas de pavimento, ao cálculo estrutural propriamente dito e à geração de peças desenhadas [9];
- (iii) Dimensionamento – Esta é a configuração de cálculo de índole mais autónoma e que requer menor intervenção do projetista. É esta configuração que o processo de dimensionamento apresentado na Fig.2 e a descrição presente no subcapítulo anterior melhor se aplicam.

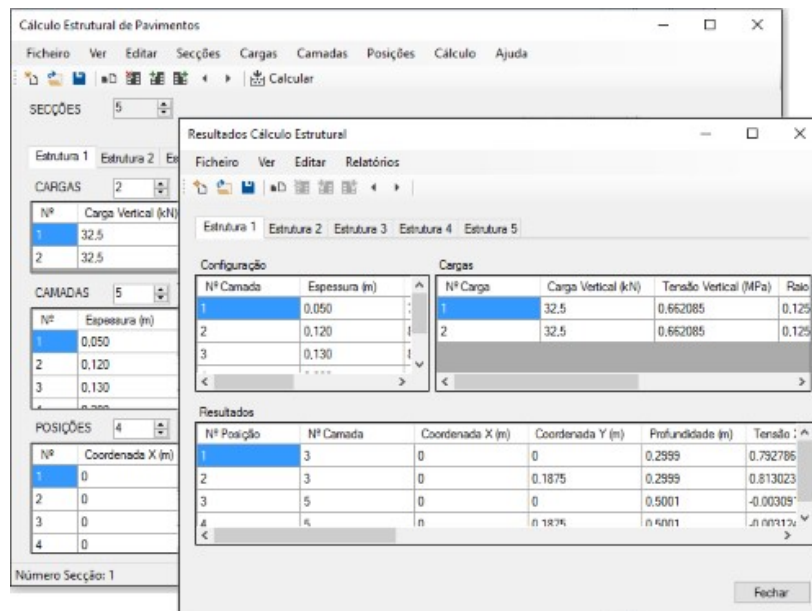


Fig.3. Interface do modo Pavimentos Novos na configuração de Cálculo Simples

As configurações de “Verificação Estrutural” e “Dimensionamento” partilham diversas funcionalidades. No entanto, enquanto que na primeira a introdução de dados é efetuada ao longo do processo de dimensionamento e seja possível a seleção do nível de transposição de resultados entre módulos, na segunda o objetivo é a automatização máxima, sendo pedida a intervenção do projetista apenas no início, com a introdução de dados e no final com a escolha da solução mais conveniente. Em qualquer uma delas é possível, no entanto, a visualização detalhada de todos os cálculos internos.

Uma dessas funcionalidades é a ferramenta de cálculo de tráfego, que permite a determinação, recorrendo a diferentes tipos de dados de base, do número acumulado de eixos padrão. Possibilita a obtenção, com base em distintos pressupostos, dos fatores de agressividade, incluindo o previsto no MACOPAV [1], bem como a consideração de fatores de equivalência de veículos de acordo com o previsto pela AASHTO [10] ou *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) [11].

Outra funcionalidade é a determinação automática de temperaturas de serviço em cada uma das camadas da estrutura de pavimento, utilizando a metodologia da Shell [12] [3], com recurso a bases de dados climáticos que possuem informação relativa a mais de uma centena de países.

Ambas as configurações recorrem também a uma componente avançada de cálculo de módulos de deformabilidade, totalmente personalizável no que diz respeito à metodologia adotada.

Isto é conseguido graças a um sistema relacional editável de equações, que possibilita a utilização da maioria das grandezas envolvidas no dimensionamento, na configuração, até ao mínimo pormenor, da forma como o cálculo é efetuado. Deste modo é possível utilizar diretamente as metodologias da Shell [12] e de Brown [13] (método da Universidade de Nottingham) ou qualquer outra definida pelo projetista.

Esta funcionalidade articula-se diretamente com uma base de dados que inclui as designações e propriedades dos diferentes materiais de pavimentação, bem como o seu custo unitário, essencial para a otimização económica das soluções.

Embora tal procedimento não seja relevante na utilização da terceira configuração de cálculo (“Dimensionamento”), o software permite efetuar automaticamente o pré-dimensionamento de acordo com o MACOPAV [1].

A produção de algumas das peças desenhadas e escritas, essenciais para o desenvolvimento do projeto podem ser também geradas automaticamente, nomeadamente listagens de cálculo estrutural, de tráfego, de temperaturas e diagramas das estruturas de pavimento, entre outras.

Embora o software ainda não possua, neste momento, funcionalidade dedicadas especialmente ao dimensionamento de pavimentos rígidos, alguns dos módulos disponíveis podem ser utilizados, até certo ponto, na verificação deste tipo de estruturas.

### **3.3 Implicações da automatização, escalabilidade e computação distribuída**

Quando o projetista opta por utilizar um cálculo totalmente automatizado de elevada precisão e, especialmente quando o número de secções em análise é muito elevado, o poder computacional necessário ao funcionamento célere do software pode ser relevante.

Um dos fatores determinantes é a opção por uma análise em contínuo das tensões e deformações em toda a profundidade da estrutura de pavimento, em vez de uma análise discreta em pontos específicos da estrutura. Isto é especialmente relevante quando, naquele âmbito, o projetista define um valor de incremento de profundidade muito baixo, ou pretende a obtenção de diagramas para múltiplas coordenadas horizontais ou “bolbos” de tensões.

Embora o programa funcione em torno de um motor de cálculo que se encontra em constante otimização (tendo sofrido diversas atualizações ao longo do seu desenvolvimento) e na maioria das situações possa funcionar de forma bastante rápida em computadores *desktop* correntes, foi prevista a possibilidade da sua utilização em projetos de muito grande dimensão, com centenas de secções em análise ou utilização do software na verificação estrutural intensiva em trabalhos académicos de investigação.

Para isso o motor de cálculo do *INPAV Design* foi testado e otimizado para funcionar, de forma adequada, em ambientes de multiprocessamento e computação distribuída (em sistemas operativos Windows), através do uso

de um número virtualmente ilimitado (apenas restringido pelo *hardware* disponível na estação principal) de nós de cálculo.

#### 4 CONCLUSÕES

Apesar da componente de pavimentação ser de enorme relevância, tanto do ponto de vista construtivo como económico em projetos de vias de comunicação, só nos anos mais recentes começaram a aparecer ferramentas informáticas com capacidade de auxiliar, de forma efetiva o projetista ao longo de todo o processo de dimensionamento.

O conjunto de programas que fazem parte do *INPAV Design* pretendem ser um contributo significativo nesse sentido, promovendo uma mudança nos processos de dimensionamento utilizados nos gabinetes de engenharia.

Esta alteração na forma como o projetista de pavimentos desenvolve a sua atividade deve ser vista como uma evolução natural positiva, que valoriza e transpõe as suas valências para os aspetos que são mais importantes, nomeadamente a conceção, análise crítica e de decisão durante a elaboração de projetos.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos à minha família pela compreensão demonstrada nas longas horas que dediquei ao desenvolvimento deste trabalho.

#### 6 REFERÊNCIAS

1. *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas (JAE), 1995.
2. G. Ahlborn, *ELSYM 5, Computer Program for Determining Stresses and Deformations in a Five-layer Elastic System*, University of California, Berkeley.
3. 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.
4. *BISAR 3.0 User Manual*, Shell International Oil Products B.V., The Hague, 1998.
5. M. Choupas, *Ecoroute - Logiciel de Dimensionnement des Chaussees*, Services D'etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 1993
6. *Manuel d'utilisation du logiciel ALIZÉ-LCPC version 1.3*, LCPC, Montreuil, 2010.
7. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC, 2008
8. *2016 M-E Pavement Design Manual*, Colorado Department of Transportation (CDOT), Durango, 2015
9. N. V. Trindade, *Soluções para Automatização Integral do Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2013.
10. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1993.
11. *Flexible Pavements for Roads, Streets, Walks and Open Storage Areas - Mobilization for Construction*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 1984.
12. *Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*, Shell International Petroleum Company Ltd., London, 1978.
13. S. F. Brown, *Bituminous Materials. Elastic Stiffness and Permanent Deformation. Course on Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation*. Lecture I. University of Nottingham, 1998.