

SOLUÇÕES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS PARA PAÍSES COM CLIMAS TROPICAIS – PROJETO DE I&D TROPICAL-PAV

V. Antunes¹, P. Fonseca², J. Afonso³, L. Gomes⁴, M.L. Antunes⁵, A.C. Freire⁶, P. Pereira⁷, H. Silva⁸, L.P. Santos⁹ e J. Neves¹⁰

^{1,2} Elevolution - Engenharia e Construção S.A., Tel:214759000 Estrada do Seminário 4 Alfragide, 2610-171 Amadora, Portugal

email: vitorfsantunes@gmail.com <http://www.elevogroup.com/pt/>

^{3,4} Mota-Engil Engenharia e Construção S.A., Tel:225190300 Rua do Rego Lameiro 38, 4300-454 Porto, Portugal.

^{5,6} LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Tel:218443000 Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

^{7,8} Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Tel:253510200 Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal.

^{9,10} CERIS, CESUR, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Tel:218417000 Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal.

Sumário

Algumas empresas do setor da construção que integram a Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC) decidiram promover a cooperação tecnológica entre si e com as entidades do Sistema Científico e Tecnológico Nacional (SCTN) para o desenvolvimento de novas soluções de pavimentação rodoviária para aplicação em países de clima tropical, nomeadamente ao nível das misturas betuminosas e das camadas de solo-cimento.

O objetivo do projeto foi permitir a eventual criação de uma solução de pavimentação inovadora através do desenvolvimento de uma mistura betuminosa e de uma mistura de solo-cimento formuladas com base em ensaios empíricos e de desempenho, à escala laboratorial e, posteriormente, validando esse desempenho num ensaio à escala real recorrendo a uma Pista de Ensaios Acelerados de Pavimentos, onde foram aplicados carregamentos idênticos às solicitações que serão alvo ao longo do seu período de vida útil. Esta Pista de Ensaios Acelerados de Pavimentos construída no âmbito deste projeto integra um protótipo de um simulador de tráfego, que reproduz a simulação do tipo de solicitação a que um pavimento habitualmente está sujeito.

Palavras-chave: Solo-cimento, mistura betuminosa inovadora, Pista de Ensaios à Escala Real, Simulador de Tráfego.

1 INTRODUÇÃO

No mercado global atual, incluindo os mercados dos países tropicais e emergentes, as empresas portuguesas em geral, e da construção em particular, enfrentam uma concorrência crescente de empresas de outros países. Neste contexto, a criação de valor terá de mudar de paradigma, devendo para isso apostar-se na aplicação do conhecimento adquirido na inovação tecnológica, permitindo com isso a consequente diferenciação técnica e sustentável das soluções que as empresas devem apresentar.

Conscientes da importância desta estratégia, algumas empresas do setor da construção que integram a Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC) decidiram promover a cooperação tecnológica entre si, bem como com as entidades do Sistema Científico e Tecnológico e Nacional (SCTN), nomeadamente as Universidades do Minho, de Coimbra e de Lisboa e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, na investigação e desenvolvimento de uma nova solução de pavimentação rodoviária para climas tropicais, com um novo tipo de mistura betuminosa, com duas metodologias de colocação em obra do solo-cimento distintas e, paralelamente, estudar e avaliar o fenómeno da evolução da propagação de fendas.

Resta referir que existe um pressuposto de base, transversal a todo o projeto, que assenta no facto de o aumento da competitividade das empresas estar também associado a uma racionalização e sustentabilidade dos investimentos por parte dos Donos de Obra, quer por via do custo de construção, quer considerando o

custo no ciclo de vida do pavimento, nomeadamente com a redução das intervenções ao nível da conservação das estradas. Habitualmente, os pavimentos em serviço nestes países têm intervenções de reabilitação a cada 3 anos. Com este projeto de I&D, pretende-se dilatar este período para 6 anos, prevenindo-se economizar cerca de 50% dos custos de reabilitação durante o período de vida útil de cada projeto.

No que se refere à constituição das estruturas de pavimento, as misturas betuminosas, quando os integram, configuram as camadas superiores da estrutura e representam uma das componentes mais importantes para o desempenho do pavimento ao longo do seu período de vida. Estas misturas têm uma constituição que conduz a um comportamento em serviço complexo (caracterizável por um regime/modelo visco-elasto-plástico) e, por consequência, o seu desempenho é dependente quer das condições de atuação do tráfego, quer da temperatura a que se encontram em cada momento.

Em países emergentes tropicais, a combinação de tráfego de elevada taxa de crescimento e cargas muito elevadas a temperaturas altas, pode conduzir ao deficiente desempenho das estruturas de pavimento que integrem misturas betuminosas. Uma das principais patologias que pode ser observada nos pavimentos destes países é a sua deformação plástica, que provoca um elevado assentamento da superfície, na zona de passagem dos rodados. Estes assentamentos, denominados de rodeiras, reduzem a qualidade do pavimento (ao nível do conforto e segurança da circulação automóvel), necessitando, assim, de intervenções para a sua eliminação, provocando enormes custos para os utentes e administração rodoviária, uma vez que conduzem à redução da qualidade de serviço oferecido pela estrada.

Assim, este projeto tem por objetivo desenvolver estruturas de pavimento inovadoras, quer ao nível das camadas inferiores, essencialmente com a utilização de materiais locais, quer no que respeita às camadas betuminosas superiores, desenvolvendo uma mistura betuminosa inovadora na sua constituição e de elevado desempenho, de forma a reduzir as patologias que prejudicam o desempenho da rede rodoviária.

De modo a apoiar a fundamentação técnica do projeto, apresentam-se, de seguida, algumas considerações teóricas sobre as estruturas de pavimentos adotadas nos climas tropicais, com particular destaque para a utilização de misturas betuminosas e de solo-cimento e a realização de ensaios acelerados de pavimentos rodoviários em pista, à escala real. Apresentam-se ainda as características da pista de ensaios e do simulador utilizado, evidenciando-se o elevado potencial que esta infraestrutura apresenta ao permitir o estudo de diferentes tipos de estruturas de pavimentos e materiais em condições reais.

2 INFRAESTRUTURA DA PISTA DE ENSAIOS À ESCALA REAL

A infraestrutura da Pista de Ensaios onde foi construído o pavimento a ensaiar e onde se apoia o Simulador de Ensaios Acelerados sobre Pavimentos Rodoviários (SEAPR), é constituída por uma estrutura de betão, em forma de “U” (fosso), com a largura de 3,0 m, entre o interior das suas paredes, e um comprimento total de cerca de 31,0 m (ver **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**).

Esta estrutura tem uma espessura para as suas paredes de 0,25 m e para o fundo de cerca de 0,30 m. A laje de fundo fica situada a 2,0 m livres da superfície. O comprimento do trecho experimental de ensaio, de atuação do simulador, é de 12,0 m, permitindo ensaiar 4 trechos de pavimento diferentes (3,0 m de comprimento cada) ou 4 alternativas do mesmo tipo de estrutura. Em uma das extremidades, de modo a permitir o acesso do equipamento de construção (e demolição) do pavimento, foi construída uma rampa em laje de betão armado (“rampa de acesso”), também com 0,30 m de espessura, com uma inclinação de, aproximadamente, 18% e um comprimento de 11,0 m, ladeada pela continuação dos muros existentes na área experimental e que serão de altura variável desde 2,0 m na zona de ensaio do simulador (12,0 m) até à cota da superfície. Para permitir a aceleração e desaceleração do simulador é utilizada parte da zona de 8 m numa extremidade e 11m na outra (3,0 m de comprimento). Deste modo, os muros laterais do “fosso” têm o comprimento total de 31,0 m (11+12+8). Sobre os muros do “fosso” (31,0 m de comprimento) assentam os carris que suportam o simulador e onde acosta a corrente de energia para o fazer funcionar (ver Fig. 4).

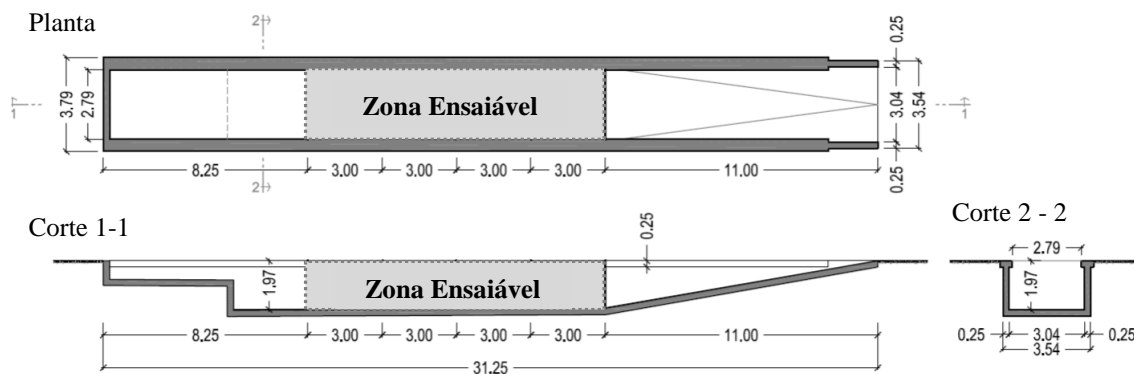


Fig. 1. Planta e cortes esquemáticos da infraestrutura em “U” para suporte à pista de ensaios

Na área experimental, de ambos os lados e na altura de 15,0 cm e de 45,0 cm a contar da superfície, foram instalados hidratantes (3 locais a cada 3,0 m ou seja 12 no total, de forma a poder condicionar o teor em água da camada de base e de fundação do pavimento). Devido a este sistema, foi necessário instalar, junto à laje de fundo, um sistema de evacuação de água controlável diretamente ligado ao respetivo esgoto, o que também servirá para escoamento de água de limpeza do fosso da pista.

Sobre esta infraestrutura foi colocada uma cobertura, de forma a permitir o condicionamento climatérico, composta por material isolante, controlando as perdas térmicas e otimizando a potência instalada. As suas dimensões são de 36,0 m de comprimento por 6,0 m de largura e uma altura variável de 2,0 m a 3,0 m, sendo estas as adequadas para a circulação no interior, de modo a que não interfira com a estrutura do simulador de tráfego. A cobertura é de tecido de PVC, retardante de chamas, Classe M2, de 550 g/m². Esta cobertura tipo túnel permite a instalação de uma frente e de uma traseira, ambos constituídos de tecido de PVC e equipados com tiras de fechamento.

Está prevista a instalação de uma Unidade de Expansão Direta, no interior da câmara de ensaios, de modo a ser possível garantir uma temperatura e humidade controlada, para valores de cerca de 30°C e 60% de humidade. Assim será garantido o aumento de temperatura do pavimento em ensaios.

A garantia do funcionamento do equipamento, em conformidade com as condições determinadas, será efetuada através da instalação de um sistema de controlo que comunica com todos os componentes do sistema e que fará a aquisição de dados e registo dos mesmos. Neste momento já se encontram instaladas sondas no interior da estrutura e no pavimento, que recolhem informações dos valores de temperatura e de humidade.

Na Fig. 2 apresentam-se as fotografias representativas de 3 fases da construção da pista de ensaios acelerados.

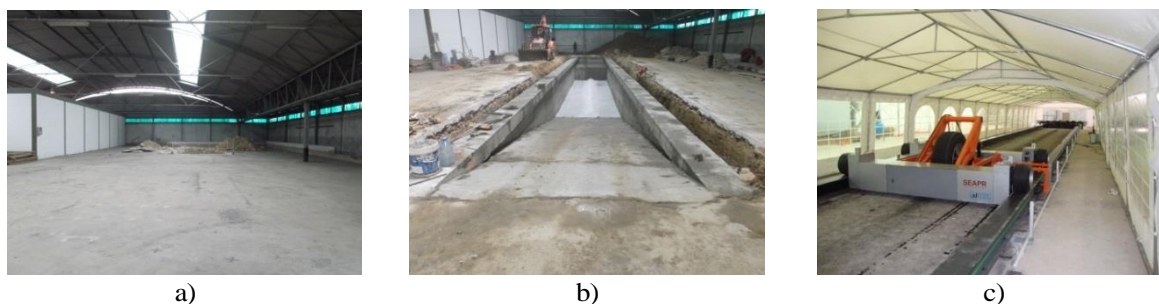


Fig. 2. a) Pavilhão antes do início da construção da pista; b) fase da construção da estrutura de betão armado com aplicação do dreno de fundo; c) estrutura final da pista de ensaios acelerados construída

3 ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Nos países tropicais do continente Africano, o projeto da estrutura de um pavimento rodoviário, englobando a caracterização geométrica e mecânica das camadas de materiais é, em geral, regido pelos manuais da *Southern Africa Transport and Communications Commission* [1]– SATCC – e *Technical Recommendations for Highways* – TRH [2]–[8]. Neste momento, é também considerada a referência dos manuais mais recentes, que se baseiam essencialmente nas TRH, o *South African Pavement Engineering Manual* – SAPEM [9]–[12]. São preconizadas, nos documentos referidos, as especificações dos materiais, dos ensaios laboratoriais para a avaliação das características dos materiais de pavimentação, nomeadamente a avaliação do módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas betuminosas e ensaios sobre os materiais granulares, além dos trabalhos de pavimentação a executar.

O pavimento-tipo que foi estudado e construído na pista de ensaios baseia-se na atual prática dos países africanos de expressão portuguesa, onde são seguidas as especificações anteriormente referidas, tendo sido consideradas 4 estruturas de pavimento. Nestas 4 estruturas serão contempladas 2 estruturas diferentes para as camadas de base e sub-base, ambas de solo-cimento.

A nível nacional, não existe, atualmente, a prática da utilização de solos tratados com ligantes hidráulicos para aplicação em camadas de base, sendo que apenas se encontram preconizados requisitos no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [13] para a aplicação destas soluções ao nível das camadas de sub-base.

Nas camadas de base e de sub-base em solo-cimento foram aplicadas duas soluções diferentes a nível construtivo, sendo que em dois troços de 3m x 3m do trecho experimental foi aplicada uma solução de 30 cm de uma camada de solo estabilizado realizada numa única fase construtiva, enquanto nos restantes dois troços de 3m x 3m foi aplicada uma camada de 30 cm no total, mas executada em duas fases construtivas, ou seja, estabilizada e compactada em duas camadas com 15cm + 15cm. Após a execução das camadas com uma espessura total de 30 cm, estas foram regadas com uma rega de cura com emulsão do tipo C60B4 (ECR-1).

Ao nível das camadas superiores foram também contempladas duas soluções construtivas, conjugadas com as duas soluções aplicadas na camada de base/sub-base, de forma a obterem-se 4 estruturas distintas de pavimento (ver Fig. 3). Estas soluções passam pela aplicação de uma camada de 6 cm de espessura de um betão betuminoso do tipo AC14 surf BB 50/70 (com um betume de penetração nominal 50/70) em dois dos troços, sendo que a outra solução passa pela aplicação de um Revestimento Superficial Duplo (RSD), sobre o qual se preconizou inicialmente a aplicação de uma camada com 4 cm de betão betuminoso com um betume de penetração nominal 50/70 modificado. Contudo, devido aos resultados dos ensaios laboratoriais, e devido à quantidade de mistura betuminosa que seria necessária produzir para que existisse a garantia da estabilidade da modificação da mistura betuminosa, optou-se pela aplicação de uma camada de 4 cm de um betão betuminoso com as mesmas propriedades do aplicado na solução de 6 cm de espessura, sobre o RSD.

A aplicação da solução com RSD pretende estudar a eficácia de sistemas com capacidade para retardar a propagação das fendas resultantes da hidratação do cimento. A existência de fendas ao nível das camadas de desgaste dos pavimentos é um fator que potencia a sua degradação por via da entrada de água nas camadas inferiores. Por esse motivo, pretende-se estudar uma solução com a aplicação de uma membrana do tipo SAMI (“*Stress Absorbing Membrane Interlayer*”) e desenvolver uma solução que, paralelamente ao facto de ter de resistir às deformações plásticas, apresente um adequado desempenho no que respeita a uma maior resistência à propagação de fendas.

As estruturas de pavimento construídas estão dimensionadas para uma vida útil correspondente a um tráfego expresso em termos de eixos padrão de 80 kN, de referência habitual nesses países, correspondente ao intervalo de 1 a 3 milhões, incorporando camadas estabilizadas com cimento. A aposta na estabilização de solos com cimento justifica-se dado que na vasta maioria desses territórios abundam materiais ou solos com condições boas ou aceitáveis para estabilização com cimento, sendo para o efeito relativamente fácil a

localização de jazidas ou manchas de empréstimo a distâncias de transporte próximas das obras. Por último, há ainda a referir que existe um histórico de construção de mais de 60 anos em camadas de solo-cimento em alguns desses países.

Segue-se uma apresentação sumária dos resultados obtidos na formulação em laboratório dos materiais em estudo para aplicação no trecho experimental à escala real com as principais conclusões obtidas.

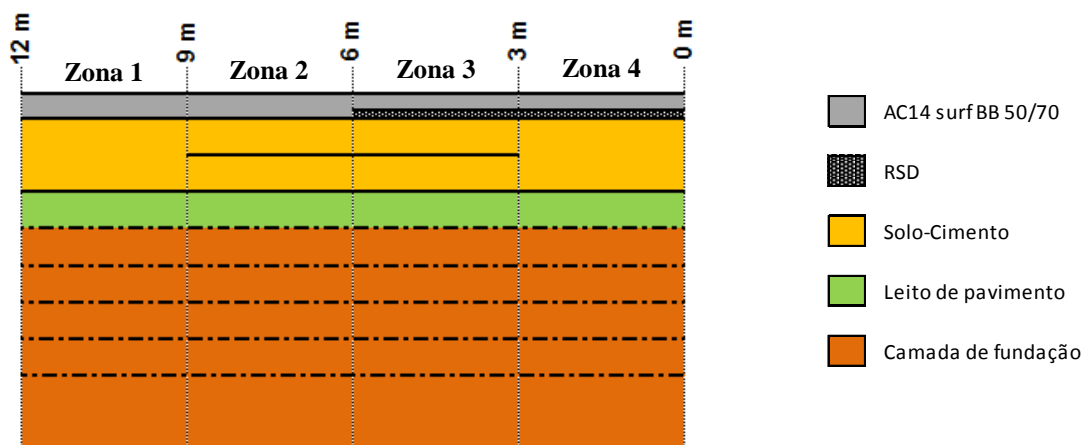


Fig. 3. Representação esquemática das soluções de pavimento aplicadas na pista de ensaios

3.1 Ligantes betuminosos

No âmbito dos trabalhos realizados, procurou-se desenvolver betumes alternativos ao betume puro tradicional (de penetração nominal 50/70), tipicamente utilizado nos países tropicais, que conseguissem apresentar um melhor desempenho nas condições particulares existentes nesses países e, em especial, uma maior resistência às deformações permanentes quando aplicado em climas mais quentes. A solução encontrada consistiu em adicionar ácido polifosfórico (PPA), tendo em vista a modificação do betume base acima indicado, em detrimento da utilização dum outro aditivo líquido (SBR). A percentagem ótima de PPA a utilizar foi identificada no estudo de formulação laboratorial como sendo de 2%.

Os resultados obtidos durante a caracterização básica e avançada dos vários betumes estudados permitiram retirar as conclusões necessárias para a seleção fundamentada do aditivo selecionado e dos ligantes betuminosos a utilizar nas fases seguintes do trabalho, nomeadamente nas duas camadas de desgaste diferentes a aplicar nas estruturas do pavimento a construir no trecho experimental.

Concluiu-se que o betume convencional de penetração nominal 50/70 cumpre os requisitos exigidos para esse tipo de ligante a utilizar na camada de desgaste convencional para as estruturas do pavimento com esta solução. Relativamente ao betume modificado a utilizar na camada de desgaste alternativa (modificada), a solução pode consistir em utilizar um betume modificado comercial com a adição de 2% de PPA, pois este consegue apresentar características que se assemelham mais às de um betume da classe de penetração nominal 35/50 (mais resistente às deformações permanentes).

3.2 Mistura betuminosa

O estudo de formulação do RSD bem como das camadas de desgaste foram realizados conforme preconizado nos manuais e especificações da SATCC [1] e TRH [3]. Assim, para o RSD optou-se, como ligante, pelo betume de penetração nominal 80/100, e para as camadas de desgaste o ligante escolhido foi o betume de penetração nominal 50/70, no caso das Estruturas Tipo 1 e 2. Para as Estruturas do Tipo 3 e 4, o betume selecionado é o mesmo, tendo este sido modificado com 2% de PPA. Concluiu-se que, após a análise das duas misturas betuminosas formuladas, BB 50/70 e BB 50/70 2PPA, a mistura betuminosa a

aplicar deveria ser a que não foi sujeita a modificação (BB 50/70) em todos os casos, uma vez que os resultados obtidos com o ensaio de pista para a mistura betuminosa BB 50/70 2PPA resultaram num pior comportamento quando comparados com os resultados da mistura betuminosa BB 50/70. Acresce que houve dificuldades no processo de modificação do betume com a adição do PPA, nomeadamente revelando-se uma segregação precoce do agente modificador (com separação do betume virgem e posterior assentamento), o que seria prejudicial se ocorresse em ambiente de produção industrial. Considerou-se, assim, que esta possibilidade de modificação tem de ser melhor desenvolvida e validada para posterior produção industrial.

Relativamente aos agregados de natureza granítica utilizados na mistura, foi selecionada a seguinte composição: 35% de brita 1, 63% de pó de pedra e 2% de fíler. Estas percentagens foram escolhidas de acordo com o fuso granulométrico limite definido pelo SATCC [1].

No que diz respeito à percentagem ótima de betume, foram testados provetes com cinco percentagens de betume: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%. Após a realização de ensaios laboratoriais foi selecionada como percentagem ótima de betume 5%, uma vez que foi para esta percentagem que a força de rotura obtida foi superior. Assim, as características da mistura betuminosa BB 50/70 escolhida são: baridade = 2398,1 kg/m³; porosidade = 3,3%; VMA = 15,0%; carga de rotura = 16,0 kN e deformação = 3,6 mm.

3.3 Solo

O solo aplicado nas camadas de fundação e leito do pavimento foi classificado segundo a classificação unificada de solos ASTM 2478, e pela classificação de solos para fins rodoviários AASHO, sendo que ambas as metodologias são utilizadas há vários anos a nível nacional para a classificação destes materiais, como também pela nova metodologia preconizada nos manuais técnicos sul-africanos SAPEM [12].

O solo aplicado nas camadas de fundação e de leito do pavimento foi classificado como argila pouco plástica (CL), segundo a classificação ASTM; A-7-6, definindo-se como um solo argiloso com comportamento de fraco a pobre, segundo a classificação AASHO e *Gravel-soil* do tipo G10, segundo a classificação sul-africana [12].

3.4 Solo-cimento

A classificação obtida para o solo utilizado nas camadas de fundação e de leito do pavimento inviabiliza o tratamento direto com cimento deste material. Assim, para se obter um solo com as características mais próximas dos tipos de solo existentes nos países tropicais, foi formulado em laboratório um solo, designado como “solo modificado”, de modo a evidenciar características mais próximas do pretendido. Para tal, recorreu-se à adição de uma areia siliciosa, vulgo areia de rio, lavada e calibrada. Após alguns ensaios, definiu-se a formulação em massa deste solo modificado: 50% de solo utilizado nas camadas inferiores (fundação e leito do pavimento); 40% de areia siliciosa com a fração granulométrica 0/2mm e 10% de areia siliciosa com a fração granulométrica 2/4mm.

O “solo modificado”, tal como o solo aplicado nas camadas inferiores, foi igualmente classificado por todas as metodologias aplicáveis, tendo-se obtido as seguintes classificações: areia argilosa SC (ASTM); solo A-6, sendo um solo argiloso com comportamento de fraco a pobre (AASHO) e *Soil-gravel* G8 ou G7 caso seja desprezado o valor do índice de plasticidade (classificação sul-africana) [12]. Este solo formulado em laboratório já possui propriedades que o tornam viável para a estabilização com cimento.

O estudo de formulação de solo-cimento foi realizado segundo as metodologias e normativas utilizadas a nível nacional e pela metodologia e respetivas normas sul-africanas. Da análise comparativas das duas metodologias verificou-se existirem diferenças, tanto ao nível da preparação dos provetes, como da execução dos ensaios e das classes de resistência requeridas e classificações associadas.

Após o ensaio de consumo inicial de estabilizador (ICL/ICS) [14], definido na metodologia sul-africana, e respeitando os limites inferiores apresentados em ambas as metodologias para o teor em cimento, foi selecionado o teor mássico de 3% de cimento. Para este teor foram, posteriormente, realizados os ensaios para a determinação do índice de plasticidade após a estabilização [15], [16], o ensaio Proctor para a determinação do teor em água ótimo e massa volúmica aparente seco máximo [17], os ensaios de compressão simples e tração indireta [18], [19] para vários tempos de cura (1, 7, 14, 21, 28, 60, 90, 120, 150, 180 dias), sobre provetes moldados através da compactação Proctor com energia de compactação pesada em molde grande, sendo o material disposto em 5 camadas e compactando-se cada uma delas com 55 pancadas ao teor em água ótimo e curados em câmara climatizada. Destes ensaios verificou-se que, para apenas o valor do índice de plasticidade, não era possível cumprir os requisitos preconizados nas especificações sul-africanas, tendo-se obtido um resultado de 18,1%, que é cerca de 3 vezes superior ao definido na normalização sul-africana.

No que diz respeito aos restantes resultados obteve-se, e tendo em conta a normalização sul-africana, 2,62 MPa para a resistência à compressão simples e 383,04 kPa para a resistência à tração indireta, ambas medidas aos 7 dias de cura. Pela normalização europeia, o valor obtido foi de 2,53 MPa para a resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura. Destes resultados, e verificando-se o estabelecido nas especificações para estes materiais em ambas as metodologias, este classifica-se como um material do tipo C3, segundo a normalização sul-africana, e um material com classe de resistência à compressão simples Rc de 2,53MPa pelo CETO [13], o que é muito superior ao requerido.

Apesar de os valores de resistência obtidos segundo a normalização sul-africana serem um pouco superiores aos pretendidos ($R_c \approx 1,5\text{MPa}$), para que se obtivessem resistências entre as classes de resistência C3 e C4, não foi alterado o estudo, dado que já estava a ser aplicado o teor mínimo em cimento permitido pelas especificações. Deste modo, ambas as soluções para as camadas de base e sub-base foram construídas com este material, diferindo apenas no processo de estabilização e compactação: 30 cm versus 15cm + 15cm.

4 ENSAIOS À ESCALA REAL

O Simulador de Tráfego constitui a componente mais específica de qualquer instalação de ensaios acelerados de pavimentos, dado que é este elemento que é responsável pela simulação do tráfego real em tempo mais curto que o da vida do pavimento. Este simulador é do tipo linear, podendo ser aplicado tanto numa instalação fixa como pode ser deslocado para outra pista de ensaios, com diferente localização.

Globalmente, o simulador de tráfego à escala real caracteriza-se por utilizar uma roda simples, ou dupla, de tamanho típico de um veículo pesado, que percorre o pavimento, sujeitando-o a uma carga vertical (ver Fig. 4) que pode ser ajustada. A roda realiza movimentos lineares de “vaivém” ao longo do comprimento da pista, atingindo uma velocidade de ensaio máxima constante desejada num trecho do pavimento em ensaio, sendo esta velocidade ajustável conforme o pretendido. Para além disso, este movimento de “vaivém” é feito ao longo da pista em linhas paralelas, por ajuste transversal, designando-se este movimento por “*lateral wander*” (ver Fig. 4). O sistema de ensaio permite o ensaio “unidirecional”, isto é, a roda pode rolar sobre o pavimento num sentido de movimento com carga vertical, sendo transportada sem contacto no sentido inverso. Por último, o sistema de ensaio é totalmente controlado por computador, para a realização completa de um ensaio de longa duração, com a recolha de informação completa do ensaio.

Em termos de características técnicas, o equipamento respeita os parâmetros apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Características técnicas do Simulador de Tráfego

Pista de ensaios		Velocidade máxima [km/h]	Carga vertical [kN]	Movimento da roda		Velocidade movimento lateral [mm/s]	Pneus tipo	
Comprimento [m]	Largura [m]			Vertical [mm]	Lateral [mm]		Simplex	Duplo
12	3	20	0 a 95	≥ 80	± 250	≤ 20	385R22,5	245R17,5

Dadas as especificidades do sistema concebido para o simulador de tráfego, nomeadamente no que respeita às características técnicas como sejam a velocidade de circulação, a carga vertical aplicável, o percurso de circulação e mesmo o tipo de pneu a utilizar, podem ser realizados ensaios acelerados a uma escala representativa do que acontece na realidade no pavimento sob variadas condições de aplicação de carga e condições climáticas, tendo em vista a validação de soluções estruturais para países da África Austral.

No que respeita à carga, são realizados ensaios acelerados com a utilização de uma roda simples, a aplicação de carga é com variação lateral do ponto de aplicação, já que esta é a forma de representar a realidade, sendo possível fazê-lo em período diurno e noturno possibilitando, assim, a aplicação de um maior número de ciclos de carga num menor tempo de ensaio.

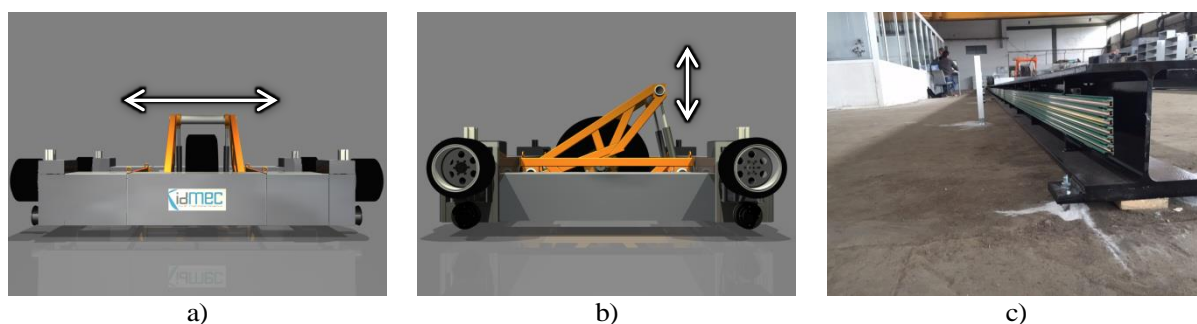


Fig. 4. Representação esquemática: a) movimento lateral da roda; b) movimento vertical da roda para aplicação de carga; c) fotografia da calha de alimentação elétrica, do SEAPR, fixa ao carril sobre o qual se desloca o mesmo

A realização de ensaios acelerados ocorre em condições climáticas controladas e monitorizadas, estando preconizada a montagem de um sistema que permita realizar o acondicionamento, com a possibilidade de variar o teor em água nas camadas de fundação e de solo-cimento, tendo em vista simular muito aproximadamente as condições observadas nos países da África Austral, e avaliar o comportamento do pavimento construído à deformação permanente e à fadiga.

Durante a construção do pavimento foram realizados ensaios de carga com defletómetro de impacto portátil (DIP) e pesado (FWD), além de ensaios de controlo de compactação das diferentes camadas como ensaio com o gama densímetro, ensaio de garrafa de areia e ensaio com o GeoStiffness Gauge. Nas diferentes fases da realização do ensaio acelerado são realizados ensaios de carga com ambos os defletómetros. Os ensaios de carga são realizados ao longo das rodeiras e ainda na zona entre rodeiras, em zonas próximas do alinhamento central da pista de forma a serem minimizados os possíveis efeitos fronteira criados pela estrutura de betão, tendo em vista a avaliação do comportamento mecânico das camadas constituintes do pavimento.

Os ensaios de FWD e DIP são executados para diferentes tempos de carga e com diferentes temperaturas do pavimento, tendo em vista uma avaliação paralela do comportamento do pavimento, de modo a poder complementar a informação proveniente dos ensaios à escala real, e a fazer essa avaliação em condições similares às observadas nos países da África Austral, em diferentes épocas do ano e sob diferentes volumes de tráfego.

Complementarmente aos ensaios de carga realizados sobre a pista de ensaios são levados a cabo ensaios para avaliação das características superficiais da camada de desgaste, tendo em vista caracterizar a macro e a microtextura da mistura betuminosa aplicada, referindo-se o ensaio pela técnica volumétrica da mancha e o ensaio de pêndulo britânico, respetivamente. São ainda realizadas inspeções visuais com marcação de fendas, nivelamento topográfico de precisão e medição de cavado de rodeira. Dadas as limitações geométricas da pista de ensaios, não será possível realizar os ensaios de avaliação em contínuo daquelas propriedades, sendo estas apenas avaliadas pontualmente.

Os ensaios são realizados ao longo de toda a superfície do pavimento, tendo em vista a obtenção de resultados representativos das características superficiais. Estes ensaios são realizados ao longo de diferentes fases do ensaio acelerado do pavimento, de modo a ser possível avaliar a evolução da macro e da microtextura ao longo do tempo.

5 CONCLUSÕES

Um dos objetivos principais do projeto era aumentar a competitividade das empresas, através de competências e conhecimentos adquiridos com o desenvolvimento do presente projeto. Este objetivo foi concretizado, tendo as empresas ficado dotadas de um conhecimento técnico acrescido resultante dos ensaios e da investigação realizada, estando deste modo melhor preparadas para responder às questões do foro técnico que lhes venham a ser colocadas no âmbito da sua atividade em países tropicais, nomeadamente nos países africanos.

Os materiais foram estudados com recursos a normas portuguesas e africanas, permitindo fazer o paralelismo entre elas e aumentando a capacidade de transferência de conhecimento entre a experiência rodoviária portuguesa desenvolvida ao longo dos últimos anos e a realidade atual dos países tropicais em desenvolvimento.

Os desenvolvimentos atingidos ao longo do projeto foram sendo incorporados no produto final a ensaiar e a desenvolver, sendo este procedimento bastante importante no desenrolar de um projeto de investigação e desenvolvimento. Como exemplo concreto, pode-se indicar a realização de um estudo de formulação de uma mistura betuminosa com a incorporação de um modificante para o betume (com o objetivo de o tornar mais duro) mas que, em função dos resultados não satisfatórios obtidos nesse mesmo estudo, foi decidido pela sua não incorporação na mistura betuminosa a aplicar na pista de ensaios.

Realça-se também que o relacionamento entre os copromotores saiu reforçado com a concretização do presente projeto. Ficou provado que empresas, tradicionalmente concorrentes entre si no mercado português, se podem unir em torno de um objetivo comum como o de desenvolver competências técnicas que as diferenciem dos demais concorrentes em mercados não tradicionais e diferentes do português. Esta valorização da engenharia rodoviária portuguesa é, também, um dos objetivos das instituições do SCTN nas suas vertentes tanto de ensino como de investigação e desenvolvimento tecnológico. Com este projeto, os participantes conseguiram, uma vez mais, colocar em prática o seu *know-how* e experiência adquirida ao longo de todos estes anos em que participaram no ensino e no desenvolvimento das competências de engenharia rodoviária.

No entanto, no âmbito deste projeto, aquilo que poderá ser considerado como um dos pontos mais positivos, além das conclusões retiradas da análise das soluções de pavimentação definidas no presente estudo, é a conceção e criação de uma infraestrutura de referência, até à data inexistente em Portugal (pista de ensaios e simulador de tráfego), que perdurará para além deste projeto e que poderá/deverá ser rentabilizada no desenvolvimento de muitos outros estudos. Existem muitas outras soluções inovadoras que poderão ser desenvolvidas e estudadas com recurso à pista de ensaios e ao simulador de tráfego e que poderão ajudar ainda mais a potenciar a capacidade técnica nacional.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Division of Roads and Transport Technology, “Technical Specifications for Roads and Bridges Construction (in Portuguese),” Pretoria, South Africa, 2010.
- [2] COLTO, “Technical Recommendations for Highways. TRH8: Design and Use of Hot-mix Asphalt in Pavements,” Pretoria, South Africa, 1987.
- [3] SANRAL, “Technical Recommendations for Highways. TRH3: Design and Construction of Surfacong

Seals,” Pretoria, South Africa, 2007.

- [4] CSRA, “Technical Recommendations for Highways. TRH16: Traffic Loading for Pavement and Rehabilitation Design,” Pretoria, South Africa, 1991.
- [5] CSRA, “Technical Recommendations for Highways. TRH14: Guidelines for Road Construction Materials,” Pretoria, South Africa, 1985.
- [6] COLTO, “Technical Recommendations for Highways. TRH13: Cementitious Stabilizers in Road Construction,” Pretoria, South Africa, 1986.
- [7] COLTO, “Technical Recommendations for Highways. TRH12: Flexible Pavement Rehabilitation Investigation and Design,” Pretoria, South Africa, 1997.
- [8] COLTO, “Technical Recommendations for Highways. TRH4: Structural Design of Flexible Pavements for Interurban and Rural Roads,” Pretoria, South Africa, 1996.
- [9] South African National Roads Agency, “South African Pavement Engineering Manual. Chapter 4: Standards,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [10] South African National Roads Agency, “South African Pavement Engineering Manual. Chapter 12: Construction Equipment and Method Guidelines,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [11] South African National Roads Agency, “South African Pavement Engineering Manual. Chapter 10: Pavement Design,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [12] South African National Roads Agency, “South African Pavement Engineering Manual - Chapter 3: Materials Testing,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [13] EP, “Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais.” Estradas de Portugal, S.A., Almada, Portugal, 2012.
- [14] SABS, “SANS 3001-GR57 - South African National Standard Civil engineering test methods Part GR57: Determination of the initial stabilizer consumption of soils and gravels,” Pretoria, South Africa, 2014.
- [15] SABS, “SANS 3001-GR12:2013 Civil engineering test methods - Part GR12: Determination of the flow curve liquid limit,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [16] SABS, “SANS 3001-GR10: 2013. Civil engineering test methods. Part GR10: Determination of the one-point liquid limit, plastic limit, plasticity index and linear shrinkage,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [17] SABS, “SANS 3001-GR31:2013. Civil engineering test methods. Part GR31: Determination of the maximum dry density and optimum moisture content of laboratory mixed cementitiously stabilized materials,” Pretoria, South Africa, 2013.
- [18] SABS, “SANS 3001-GR54 - South African National Standard Civil engineering test methods Part-GR54: Determination of the indirect tensile strength of compacted and cured specimens of cementitiously stabilized materials,” Pretoria, South Africa, 2014.
- [19] SABS, “SANS 3001-GR53 - South African National Standard Civil engineering test methods Part-GR53: Determination of the unconfined compressive strength of compacted and cured specimens of cementitiously stabilized materials,” Pretoria, South Africa, 2010.