

15:35

**Subject:** VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos

# INOVAÇÃO E NOVOS DESAFIOS

## VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos

[Início](#) :: [objectivos e tópicos](#) :: [comissão técnica / organizadora](#) :: [inscrição](#) :: [patrocínios](#) :: [programa](#) :: [contactos](#) :: [faq's](#)

[regras / instructions papers](#) :: [artigos / papers](#) :: [comunicações](#) :: [hotéis](#) :: [visitar o Porto](#)

### Programa Preliminar

<b>15 de Novembro - manhã</b>	
8:30	Recepção dos participantes e distribuição de documentação
9:30	Sessão de Abertura presidida pelo Vereador da Câmara Municipal do Porto <b>Lino Ferreira</b> <b>Carlos Costa</b> (Director da FEUP) <b>Joaquim Cavalheiro</b> (EP, EPE - Direcção de Estradas do Porto) <b>Reis Campos</b> (Presidente da AICCOPN) <b>Marcel Mendes</b> (Universidade Presbiteriana Mackenzie) <b>Jaime Queirós Ribeiro</b> (Coordenador da Comissão Organizadora, FEUP) <b>Maria da Conceição Azevedo</b> (Coordenadora da Comissão Técnica, CAEMD)
10:15	"Betumes inovadores. Betumes modificados com polímeros, de alta viscosidade. Betumes de baixa temperatura de aplicação. Ligantes sintéticos", <b>Hélio Nunes</b> , REPSOL Portugal (1ª Conferência convidada)
10:45	Debate
<b>11:00</b>	<b>Abertura da exposição técnica e intervalo para café</b>
11:30 - 12:35	
2ª Sessão: Presidida por <b>Alberto Bardesi</b> , Repsol YPF Coordenador: <b>Fontes de Carvalho</b> (AENOR, membro da Comissão Técnica)	
11:30	"Betumes com pó de borracha de pneu fora de uso produzidos por via húmida em fábrica: betumes melhorados (BC), betumes modificados (BMC) e betumes de alta viscosidade (BMAVC)", <b>Francisco José Lucas Ochoa</b> , REPSOL
11:45	"Incorporação de borracha moída de pneumáticos pela via seca em misturas tipo AAUQ para o município de Manaus", <b>Diego Meneses de Melo</b> , FT/UFAM Universidade de Manaus
12:00	"Betumes Modificados com Borracha. AENOR - Experiência e Perspectivas", <b>Manuel Prates</b> , AENOR (2ª Conferência convidada)
12:30	Debate
<b>13:00</b>	<b>Intervalo para almoço</b>

## 15 de Novembro - tarde

14:30 - 16:00

3ª Sessão: Presidida por **Marcel Mendes**, Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Coordenador: **Maria da Conceição Azevedo** (CAeMD, membro da Comissão Técnica)

14:30

"Lechadas asfálticas y SMA en las pistas de los aeropuertos españoles", **José António Zamorra** e **Fernando Aguirre**, Infraestructuras Conelsan, Assessores da AENA (3ª Conferência convidada)

15:00

"Análise crítica dos novos modelos de financiamento praticados no Brasil em obras rodoviárias", **Ana Paula Ramires**, Empresa Queiróz Galvão

15:15

"Sustentabilidade ambiental na produção de pavimentos", Alfredo Mário Savelli, Universidade Presbiteriana Mackenzie

15:30

Debate

**16:00**

**Intervalo para café/Exposição técnica**

16:30 - 17:45

4ª Sessão: Presidida por **Durbalino Carvalho**, Vice-Governador da Província de Malanje, R. P. Angola  
Coordenador: **Jorge Freire** (EP, EPE, membro da Comissão Técnica)

16:30

Desenvolvimento sustentado - reciclagem a quente e reciclagem a frio, **Antonio Páez Dueñas**, REPSOL YPF

16:45

"Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento - Novas perspectivas", **J. Pedro Vieira e Moreira, Gabriel Couto**

17:00

"30.000 km of structural road surveys in one year. Challenges of large road network auscultation and management", **José Antonio Ramos García**, Euroconsult

17:15

"Perspectiva da Engenharia Rodoviária no Brasil", **Rui Alves Margarido**, ANDIT - Associação Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (4ª Conferência convidada)

**17:45**

**Debate, Encerramento da Sessão do 1º dia e Beberete**

## 16 de Novembro - manhã

9:30 - 11:00

5ª Sessão: Presidida por **Luís Gonzaga**, CICCOPN  
Coordenador: **Jaime Queirós Ribeiro** (FEUP, membro da Comissão Técnica)

9:30	"Pista Experimental do Mackenzie-DER-SP", <b>Marcel Mendes</b> , Universidade Presbiteriana Mackenzie (5ª Conferência convidada)
10:00	"Reforço de pavimentos betuminosos com malhas de aço", <b>António Rui Dias Alves</b> , EP, EPE
10:15	"Modelo de Gestão de Pavimentos para Corredores de Ônibus para a Cidade de São Paulo - SP - Brasil", <b>João Virgílio Merighi</b> , U. Presbiteriana Mackenzie
10:30	Debate
<b>10:50</b>	<b>Intervalo para café/Exposição técnica</b>

11:20 - 13:20

6ª Sessão: Presidida por **Cândido Costa**, ATIC  
Coordenador: **Ângela Nunes** (SECIL/ATIC, membro da Comissão Técnica)

11:20	"Análise crítica dos modelos de transferência de carga em juntas de pavimento de concreto de cimento Portland", <b>João Virgílio Merighi</b> , U. Presbiteriana Mackenzie
11:30	"Boas práticas para a utilização de cal hidráulica em vias de comunicação", <b>Maria da Conceição Azevedo</b> , CAeMD
11:50	"Execução de Pavimentos em Betão pelo Método de Moldes Fixos", <b>Luís Antunes da Silva Reis</b> , GEAFSA
12:05	"Proposta de ensaio alternativo para a determinação da durabilidade por perda de massa de corpos de prova na dosagem de solo cimento", <b>Rita Moura Fortes</b> , U. Presbiteriana Mackenzie
12:20	"Conservación de pavimentos de hormigón: reparaciones a espesor completo y sellado de juntas y grietas", <b>Carlos Jofré</b> , IECA (6ª Conferência convidada)
13:05	Debate
<b>13:20</b>	<b>Intervalo para almoço</b>

<b>16 de Novembro - tarde</b>	
14:30 - 16:00	
7ª Sessão: Presidida por <b>Pires da Costa</b> , FEUP Coordenador: <b>Adriano Teixeira</b> (CICCOPN, membro da Comissão Técnica)	
14:30	"Estudos de segurança rodoviária com recurso a modelo virtual", <b>Carlos Rodrigues</b> , FEUP (7ª Conferência convidada)
15:00	"Gestão ambiental em empresas de infra-estrutura de transportes", <b>Rita Moura Fortes</b> , Universidade Presbiteriana Mackenzie
15:15	"Análise do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis: os modelos materiais das misturas betuminosas" <b>Cecília Vale</b> , FEUP
15:30	Debate
<b>16:00</b>	<b>Intervalo para café/Exposição técnica</b>
16:30 - 18:00	
8ª Sessão: Presidida por <b>João Virgílio Merighi</b> , Universidade Presbiteriana Mackenzie Coordenador: <b>Hélio Nunes</b> (REPSOL, membro da Comissão Técnica)	
16:30	"A Granalhagem como Técnica Inovadora e Eficaz para a Melhoria das Condições de Aderência de um Pavimento Rodoviário", <b>Pedro Ferreira</b> , Securvia, Lda
16:45	"Características superficiais dos pavimentos e segurança rodoviária. Métodos de análise e resultados de alguns estudos." <b>João Lourenço Cardoso</b> , LNEC (8ª Conferência convidada)
17:15	Debate
17:45	Encerramento da Sessão das Jornadas presidida pelo Administrador da EP, EPE, <b>José Manuel Soares Ferreira Lemos</b> (FEUP/DECivil) <b>Durbalino Carvalho</b> , Vice-Governador da Prov. Malanje, R. P. Angola <b>Sousa e Melo</b> (FEUP, Relator Geral) <b>Jaime Queirós Ribeiro</b> (Coordenador da Comissão Organizadora, FEUP) <b>Adriano Teixeira</b> (Comissão Técnica, CICCOPN/LGMC) <b>Rita Moura Fortes</b> , Universidade Presbiteriana Mackenzie (Comissão Organizadora) <b>Maria da Conceição Azevedo</b> (Coordenadora da Comissão Técnica, CAEMD)

## LOCAL E DATA DE REALIZAÇÃO

As Jornadas terão lugar na cidade do Porto, no Auditório da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), nos dias 15 e 16 de Novembro de 2007.

## COMISSÃO TÉCNICA

COORDENADOR:

- Doutora Eng.ª Maria da Conceição M. Azevedo, CAEMD
- Eng. Adriano Teixeira, CICCOPN/LGMC
- Eng.ª Ângela Nunes, SECIL/ATIC
- Prof. Doutor Jaime Queirós Ribeiro, FEUP
- Prof. Doutor João Virgílio Merighi, Univ. Mackenzie
- Eng. Jorge Freire, EP, EPE
- Eng. Hélio Nunes, REPSOL
- Eng. Fontes de Carvalho, AENOR

## **“REUTILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTO – NOVAS PERSPECTIVAS”**



**J. Pedro Moreira**  
Mestre Eng.  
Gabriel Couto, SA  
V. N. Famalicão  
Portugal



**Paulo Pereira**  
Professor Doutor  
Universidade Minho  
Guimarães  
Portugal

### **SUMÁRIO**

Na actualidade, a crescente preocupação com a protecção ambiental, que se verifica em todas as áreas, leva a que, a nível da Engenharia Rodoviária, sejam já utilizadas diversas técnicas de reciclagem de subprodutos resultantes de trabalhos de beneficiação e reforço de pavimentos flexíveis. Neste artigo enquadra-se o processo de reutilização de materiais recorrendo à mistura de material fresado com pó e cimento, dentro dos processos de reciclagem de pavimentos e apresentam-se resultados que permitem concluir que a técnica pode constituir uma alternativa à reutilização de subprodutos da construção, em substituição de camadas granulares de pavimento.

### **1. A RECICLAGEM DE PAVIMENTOS**

Ao longo da sua vida, um pavimento deverá “produzir” o mínimo volume de resíduos, consumindo também o mínimo de novos recursos naturais, quer os agregados, quer particularmente aqueles que exigem um elevado consumo de energia, como é o caso dos ligantes betuminosos. Por outro lado, os pavimentos rodoviários, pelo enorme volume de materiais que consomem, poderão constituir a solução para a absorção de grandes quantidades de resíduos industriais, [1].

Aquando da tomada de decisão de beneficiação de um pavimento, há que diferenciar as distintas alternativas. As soluções actuais podem passar pela substituição das camadas de misturas betuminosas utilizando processos convencionais de fresagem de pavimentos e reposição de novas misturas betuminosas, ou por processos de reciclagem de pavimentos.

Dentro da reciclagem de pavimentos, o processo a adoptar deverá ser aquele que reúna as características mais vantajosas do ponto de vista técnico económico e ambiental, dependendo das características dos materiais a reciclar.

A reciclagem de pavimentos consiste em reutilizar os materiais para a construção de novas camadas mediante a desagregação dos mesmos até uma certa profundidade, a adição de um ligante (cimento, emulsão, betume-espuma), água (para a hidratação, mistura e compactação), eventualmente novos agregados (como correctores granulométricos) e aditivo, com a dosificação obtida mediante os ensaios efectuados. A mistura homogénea destes materiais espalha-se, compacta-se e cura-se adequadamente, constituindo uma nova camada de pavimento, [2].

Como principais vantagens da técnica da reciclagem, podem enumerar-se as seguintes, [1].

- redução do impacte ambiental, devido ao facto de não ser necessário colocar os materiais retirados dos pavimentos em vazadouros, reduzindo deste modo o problema da produção de resíduos;
- economia de materiais e de energia (técnica a frio);
- redução da utilização de novos agregados e ligantes betuminosos, dando suporte ao conceito de “utilização em ciclo fechado dos materiais rodoviários”;
- “eliminação das fendas”, impedindo a sua propagação;
- redução do impacto das obras de conservação, para o pavimento e para os utentes;
- manutenção da cota do pavimento existente.

Dentro das técnicas de reciclagem podem ser escolhidas diversas opções consoante a temperatura a que são executadas, o local em que se realizam e o tipo de ligante que utilizam. O uso de resíduos em camadas de misturas betuminosas é hoje uma das formas de reutilizar os materiais resultantes dos trabalhos de beneficiação de pavimentos flexíveis.

Muitos dos materiais alternativos utilizados são constituídos por materiais com características mecânicas pouco favoráveis, quando utilizados por si só. Para constituírem uma alternativa viável em relação aos agregados convencionais, estes devem, em primeiro lugar ser modificados. Os métodos mais evidentes de alcançar estes objectivos são a adição de cal, cimento, cinzas volantes, escórias granulares de pavimento, ou outras pozolanas, [3].

Recentemente, em alguns países, os aspectos ambientais prevalecem frequentemente sobre considerações económicas, particularmente quando está em discussão a reutilização de materiais.

No momento em que uma obra ou um país conseguir reutilizar toda a quantidade de material fresado, então não haverá necessidade de mais investimentos ou investigação neste campo. Até que essa situação se alcance, deverão ser estudados novos processos de incorporação de maiores percentagens de material fresado e da investigação de outras técnicas e meios, [4].

Podem ser dadas variadas classificações à reciclagem de acordo com:

- o local onde é executada a mistura;
- a temperatura do processo (a frio ou a quente);

- as características do material a reciclar;
- o tipo de ligante.

Na Figura 1 apresenta-se o enquadramento desta temática evidenciando também algumas alternativas à reutilização de material fresado.

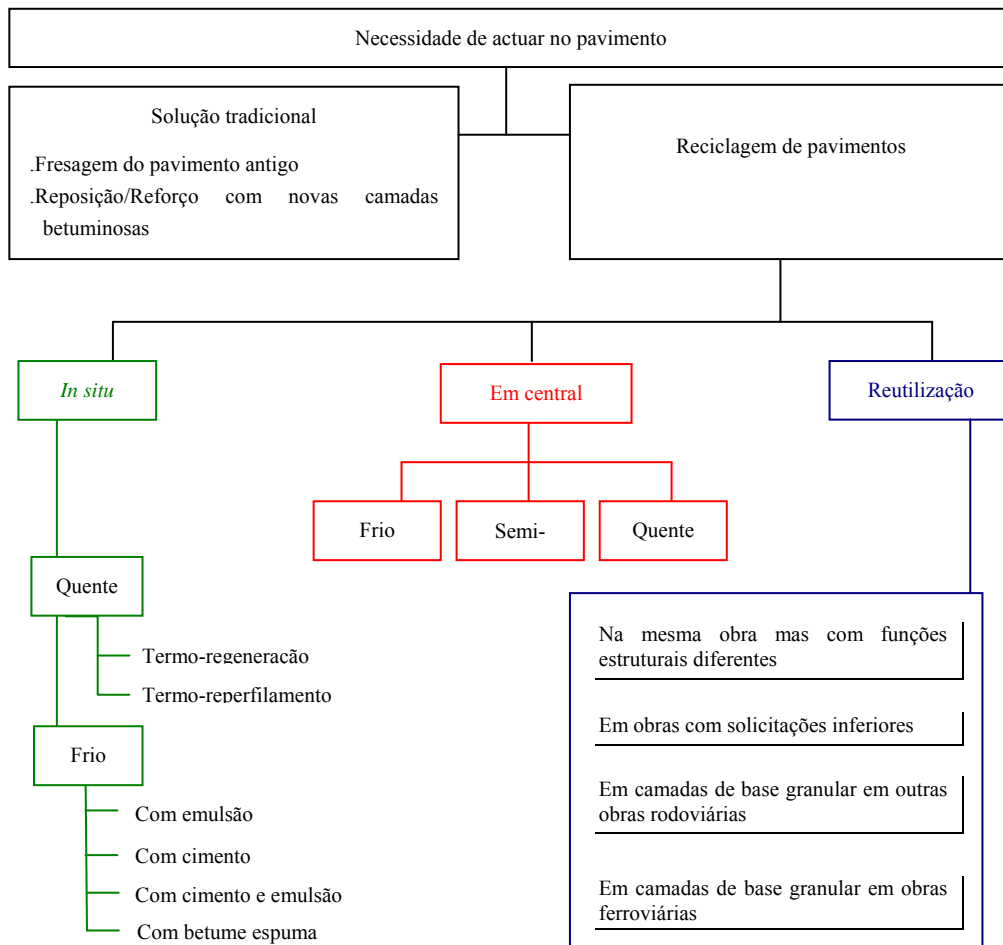


Figura 1: Técnicas de reabilitação e reciclagem de pavimentos, [5]

Um dos aspectos comuns a todas técnicas de reciclagem consiste na importância fulcral dos estudos preliminares, em que são tidos em consideração aspectos como a geometria do pavimento, a natureza dos trabalhos de manutenção que terão de ser levados a cabo durante o período de vida do pavimento, a caracterização dos materiais a reciclar englobando a previsão da sua evolução ao longo do tempo, a espessura aproximada da intervenção e a formulação da mistura final dos materiais a empregar na estrutura de pavimento.

Os avanços das técnicas de reciclagem de materiais em pavimentos, resultaram do melhoramento das técnicas utilizadas e do aprofundamento do conhecimento das propriedades dos materiais aplicados e na diminuição dos custos. Este tipo de técnica conserva os recursos naturais porque reutiliza materiais, diminuindo a necessidade de incorporação de novos ligantes e inertes. Há ainda técnicas que, complementarmente, utilizam outro tipo de resíduos, tais como borracha de pneus ou escórias e subprodutos provenientes de outras indústrias, incorporando-os nas misturas betuminosas ou em camadas granulares de pavimentos.

A reciclagem de pavimentos não é uma técnica recente de reabilitação de pavimentos, no entanto necessita de ser aperfeiçoada e economicamente justificada, através do uso de processos mais avançados com novas tecnologias.

Em qualquer dos casos de reciclagem de pavimentos é essencial a realização um estudo laboratorial, preferencialmente acompanhado de um troço experimental que valide os resultados, de modo a serem escolhidas as melhores soluções de reabilitação de pavimentos.

A reutilização de materiais fresados em camadas granulares de pavimento permite encontrar formas de realizar aproveitamento de grandes quantidades destes materiais em zonas onde usualmente se utilizam solos ou agregados britados. Em Portugal já existe experiência na aplicação deste tipo de material em substituição de camadas de pavimento, nomeadamente em substituição de camadas de leito de pavimento, conforme caso descrito em [6], com resultados animadores e que impulsionam o aparecimento de novas perspectivas para a reutilização de grandes quantidades de material fresado.

## **1. MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO COM PÓ E CIMENTO (FPC) – OBJECTIVO E MÉTODO**

Uma das formas de reutilizar o material fresado resultante de obras de reabilitação de pavimentos consiste na sua aplicação em diferentes camadas da estrutura de pavimento.

Uma camada executada com material fresado (RAP) estabilizado com pó e cimento (FPC), pretende constituir uma camada granular de pavimento ligada com cimento que confira aumento da capacidade de carga da estrutura de pavimento. Deste modo, permite-se que seja reduzida a quantidade de materiais nas restantes camadas.

Os objectivos a atingir com a aplicação desta técnica são:

- Reutilizar materiais de valor económico residual baixo;
- Aumentar a capacidade de carga do pavimento;
- Reduzir o consumo de agregados britados e betumes;
- Proteger o ambiente.

O trabalho apresentado integra parte de uma tese de mestrado elaborada na Universidade do Minho [5], o qual pretendeu desenvolver uma nova solução de reciclagem a frio para a reutilização de materiais fresados provenientes da fresagem de pavimentos flexíveis. O estudo



baseou-se principalmente em ensaios laboratoriais que permitiram caracterizar o material, na avaliação da sua resistência e no desenvolvimento de leis de comportamento pelas quais a mistura de materiais tendencialmente se rege.

## 2. ESTUDO E RESULTADOS

### 2.1. Caracterização dos materiais

#### 3.1.1. Agregados e ligantes do material fresado

O material fresado obtém-se a partir de operações de desagregação de pavimentos, normalmente designadas por fresagem de pavimentos. O material resultante da fresagem de pavimentos tem como constituintes principais os agregados e betume utilizados aquando da construção inicial das camadas de misturas betuminosas. De acordo com a classificação unificada para solos (ASTM D2487-85) o material fresado pode ser caracterizado como um cascalho bem graduado com areia (GW).

A análise granulométrica realizada às amostras de material fresado baseou-se na especificação LNEC – E 233, realizada a três amostras distintas de modo a obter uma curva média representativa do material a estudar, conforme se ilustra na Figura 2.

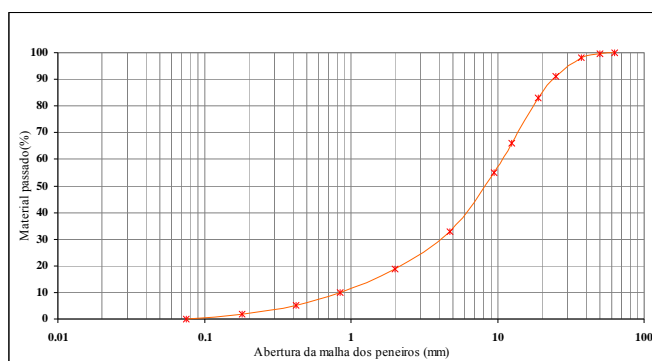


Figura 2: Curva granulométrica do material fresado

A caracterização do ligante permitiu concluir que o betume presente na mistura era do tipo 10/20 conforme se indica no Quadro 1.

Quadro 1: Características do betume extraído do material fresado

Penetração a 25 °C, pen25 (0,1mm)	Temperatura de Anel e Bola, T <sub>AB</sub> (°C)
18	64,3

### 3.1.2. Agregados novos e ligantes

A introdução de um agregado britado de granulometria fina, neste caso o pó de pedra, tem como objectivo principal colmatar os vazios do material fresado. Além de funcionar como corrector granulométrico, o pó de pedra constituirá grande parte da estrutura de ligação com o cimento a incorporar na mistura.

O pó de pedra utilizado foi obtido por processos convencionais de crivagem de rocha granítica. A classificação comercial do pó é do tipo 0/5. A curva granulométrica do pó de pedra é a que se apresenta na Figura 3.

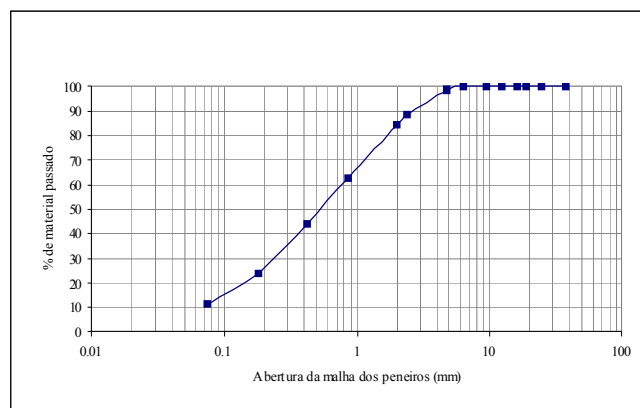


Figura 3: Curva granulométrica do pó de pedra

À semelhança dos ligantes hidráulicos utilizados nos casos de estabilização de solos com cimento ou nos casos de reciclagem a frio, o cimento utilizado foi um cimento Portland da classe CEMII/B-L 32,5 N, pouco reactivo, que não favorece o aparecimento de fissuras devido ao fenómeno de retracção térmica, promovendo o desenvolvimento lento e controlado do processo de cura. As características do cimento demonstram-se no Quadro 2.

### 3.1.3. Mistura de materiais

O estudo da mistura de material fresado com pó de pedra iniciou-se com a definição da curva granulométrica média obtida para as amostras retiradas.

As hipóteses de mistura abordadas foram 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 e 70/30 por cento de material fresado e pó de pedra respectivamente. No Quadro 3 são apresentadas algumas das características dos materiais utilizados na mistura.

Quadro 2: Características do cimento

<b>Composição</b>		
<b>Núcleo cimento (%)</b>		
Clinker portland		70-75
Filer calcário		25-30
Cinzas volantes		
<b>Gesso (%)</b>		5
<b>Características Mecânicas</b>		
<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>		
2 Dias		3,9
7 Dias		5,6
28 Dias		6,9
<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>		
2 Dias		20,2
7 Dias		30,0
28 Dias		39,2

Quadro 3: Propriedades do material fresado e do pó de pedra

Propriedades	Material Fresado	Pó de Pedra
Peso específico	2,57 g/cm <sup>3</sup>	2,6 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	1%	0,76%
Equivalente de areia	91%	74 %
Desgaste de Los Angeles	20%	30%
Valor do azul de metileno	N/D	0,51

Para todas as hipóteses de mistura de pó com material fresado, foram executados ensaios de Proctor Modificado segundo a norma LNEC E 197 de modo a ser possível avaliar e comparar o teor em água de cada mistura, a baridade máxima obtida e comparar o comportamento de todas as misturas. Figura 4.

## 2.2. Ensaios

O método escolhido para avaliar as características mecânicas do material foi a realização de ensaios de compressão axial simples e ensaios de compressão diametral, à semelhança dos ensaios realizados para misturas de solo com cimento e de material reciclado *in situ* com cimento.

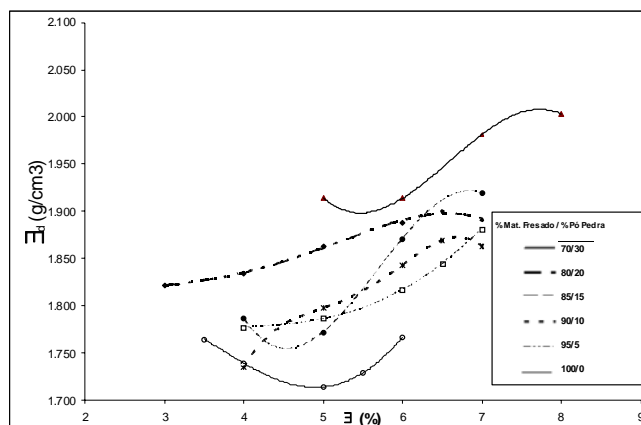


Figura 4: Curvas de compactação para diferentes misturas de material fresado e pó de pedra

Os provetes moldados para o efeito eram cilíndricos, com 0,178 m de altura e 0,152 m de diâmetro, de acordo com o especificado na norma espanhola NLT 310/90 “Compactación con martillo vibrante de materiales granulares”. A compactação foi executada com recurso a um martelo vibrador do tipo Kango (810W).

Os ensaios de compressão axial simples sem confinamento lateral foram realizados de modo a avaliar as quantidades correctas de pó de pedra e cimento a adicionar à mistura para que fossem atingidos os valores de resistência à compressão simples exigidos para solos tratados com cimento.

Moldaram-se, numa primeira fase, vários provetes para ensaio à compressão simples usando 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 e 70/30 % de material fresado e pó de pedra respectivamente, com uma variação da percentagem de cimento de 2, 3, 4, 5 e 6 %. Adicionando 30% de pó de pedra a mistura tinha um comportamento próximo ao de um solo, conforme se tinha anteriormente observado no comportamento da curva Proctor.

Na fase seguinte estudaram-se mais aprofundadamente duas soluções, em que foi avaliada a acção conjunta do cimento e do pó de pedra:

- ✓ 100% material fresado, sem adição de pó e considerando somente a acção do cimento;
- ✓ 70% de material fresado com 30% de pó de pedra, considerando a acção do cimento e do pó de pedra.

Realizaram-se ensaios de compressão simples e compressão diametral, seguindo as normas espanholas NLT 305/90 e NLT 304/90 respectivamente, aos 7, 28 e 90 dias de cura, para o teor óptimo de humidade ( $\omega_{opt}$ =5,5% no caso de 100/0;  $\omega_{opt}$ =7% no caso de 70/30).

Os resultados obtidos demonstram que existe uma clara influência do pó de pedra no comportamento de ambas as misturas. Na Figura 5 ilustra-se a acção do cimento na resistência à compressão simples efectuada em provetes da mistura de materiais sem a adição de pó de pedra.

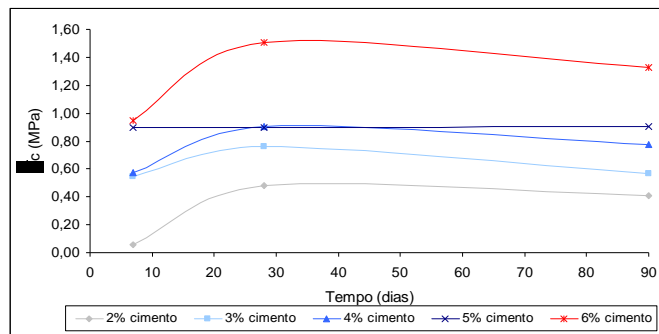


Figura 5: Variação da tensão de compressão ao longo do tempo para a mistura 100/0

No caso de estudo de material fresado sem a adição de pó de pedra, verifica-se alguma variabilidade comportamento da mistura que pode ser explicada por três motivos:

- i. os vazios do material fresado não são totalmente preenchidos pela parte fina da mistura de pó e cimento, reduzindo desta forma a superfície de contacto dos agregados de maiores dimensões;
- ii. a superfície de contacto, com betume, não permite uma adequada aderência da parte ligada com cimento;
- iii. a falta de material fino na mistura poderá favorecer o desenvolvimento de microfissuras e a conseqüente redução da resistência da mistura.

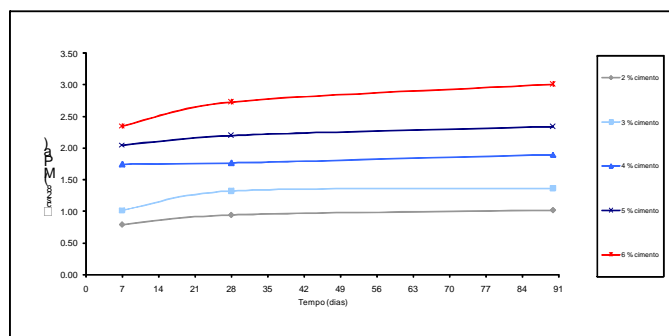


Figura 6: Variação da tensão de compressão ao longo do tempo para a mistura 70/30

Conclui-se ainda que, para cumprir os requisitos exigidos pelo MACOPAV (Manual de Concepção de Pavimento para a Rede Rodoviária Nacional) ( $\sigma_c \geq 2,5$  MPa e  $\sigma_d \geq 0,3$  MPa), teria de ser utilizada a mistura 70/30 com 6 % de cimento, com o teor em água óptimo de 7% calculado no ensaio de Proctor Modificado. As curvas ilustradas nas Figura 6 a Figura 8 demonstram que os valores mínimos são atingidos na mistura analisada.

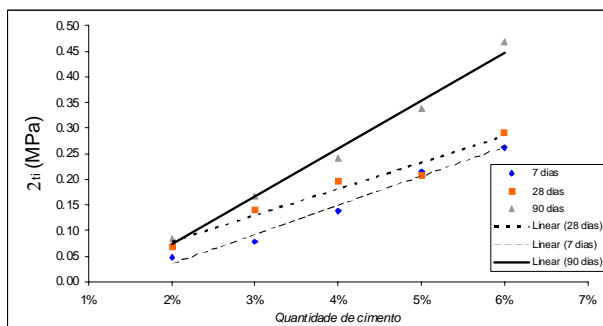


Figura 7: Variação da tensão de compressão com a % de cimento

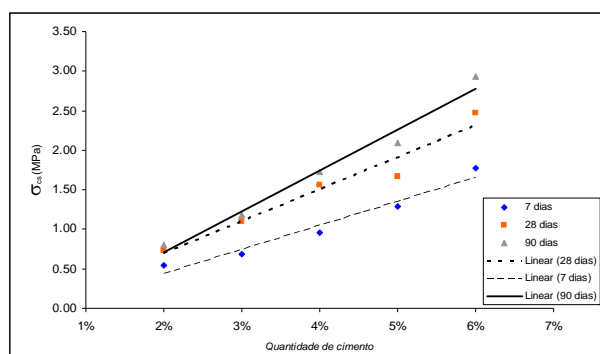


Figura 8: Variação da tensão de tracção com a % de cimento

A acção do cimento nos dois tipos de mistura segue leis de comportamento quase coincidentes e bem definidas, conforme se demonstra nas Figuras 9 e 10, onde é comparada a variação da relação entre a tensão de tracção e a tensão de compressão para as diferentes hipóteses de adição de cimento a ambas as misturas.

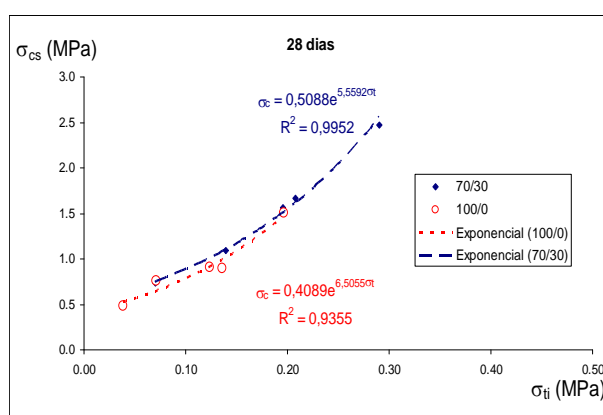


Figura 9: Relação entre a tensão de compressão e a tensão de tracção aos 28 dias

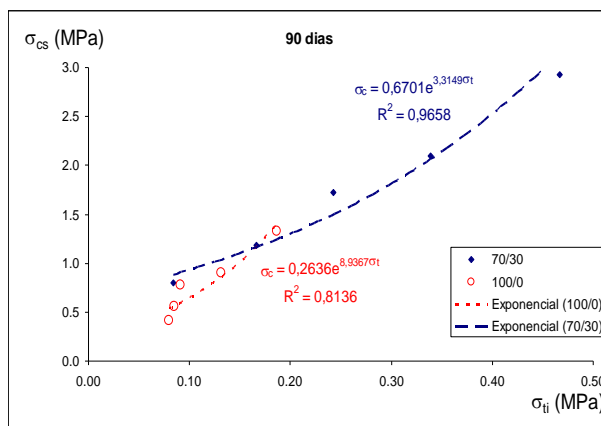


Figura 10: Relação entre a tensão de compressão e a tensão de tração aos 90 dias

Depreende-se então que há um ganho de resistência da mistura 70/30 comparativamente com a mistura em que não se adiciona pó de pedra, que poderá ser explicado pela acção combinada entre o pó de pedra e o cimento.

### 2.3. Estudo comparativo

Para ser avaliada a viabilidade técnica da solução em termos práticos, foi dimensionada uma estrutura de pavimento utilizando FPC em substituição de camadas granulares de pavimento. Assim realizou-se o dimensionamento de uma estrutura de pavimento de referência utilizando materiais tradicionais, para três níveis de tráfego distintos (baixo, médio e elevado).

O dimensionamento teve como princípio o método proposto pela Shell, utilizando um programa de cálculo automático ELSYM5 para avaliação do estado de deformação e tensão das camadas.

Quadro 4: Constituição de pavimento utilizando materiais tradicionais

	Tráfego baixo (T5) ( $N_{dim}^{80} = 2 \times 10^6$ )		Tráfego médio (T3) ( $N_{dim}^{80} = 40 \times 10^6$ )		Tráfego elevado (T1) ( $N_{dim}^{80} = 100 \times 10^6$ )	
	e (cm)	E (MPa)	e (cm)	E (MPa)	e (cm)	E (MPa)
BBDegaste	4	3834	5	3834	6	3834
Macadame Bet.	7	4518	16	4518	19	4518
Base em ABGE	15	248	20	312	20	312
Sub-base ABGE	20	130	20	130	20	130
Leito Pav.	∞	60	∞	60	∞	60

No dimensionamento foi considerado um solo de fundação da classe F2, com o módulo de deformabilidade, segundo as recomendações do MACOPAV (Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional), com um valor de  $E = 60$  MPa. Ainda, e segundo o mesmo manual, o coeficiente de Poisson é de  $\nu = 0,40$ .

A introdução de uma camada ligada aglutinada com ligante hidráulico modifica a análise estrutural do pavimento, dado que o critério de ruína se resume geralmente ao controlo da tensão de tracção instalada na base da camada ligada.

Os valores críticos propostos pelo MACOPAV para a tensão de tracção máxima na base das camadas tratadas com conglomerantes hidráulicos, seguem a seguinte lei de fadiga:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1 + a \times \log N_{adm} \quad (1)$$

em que:

$\sigma_t$  – valor máximo da tensão induzida pelo eixo padrão;  
 $\sigma_r$  – resistência à tracção em flexão (com aplicação de um só carregamento);  
 $a$  – constante que depende da composição e propriedades da mistura,  
 $N_{adm}$  – n.º admissível de passagens do eixo padrão (em geral 130kN)

Para o caso em estudo admitiu-se:

$a = -0,08$

$$\sigma_r = R_f \approx 1,5 \times R_{cd} = 1,5 \times 0,30 = 0,45 \text{ MPa} \quad (2)$$

A lei de fadiga do material que controla o estado de tensão na base da camada ligada pode ser dado pela expressão (3):

$$\frac{\sigma_t}{0,45} = 1 - 0,08 \times \log N_{adm} \quad (3)$$

Seguindo as recomendações do Macopav para a camada ligada com cimento, foi adoptado um módulo de elasticidade de  $E=2000$  MPa e um coeficiente de Poisson de  $\nu=0,20$ .

Quadro 5: Dimensionamento com incorporação de FPC - espessura das camadas (cm)

	Tráfego		
	Baixo	Médio	Elevado
Betão betuminoso de desgaste	6	5,5	6
Macadame betuminoso	8	10	11
Base em ABGE	-	15	15
Sub-base em FPC	25	20	20

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que, comparativamente com uma estrutura de pavimento convencional, as diferenças de espessuras das camadas são significativas, quando se



adopta uma camada na sub-base de pavimento com rigidez superior à de uma camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa. Quadro 5 e Figura 11.

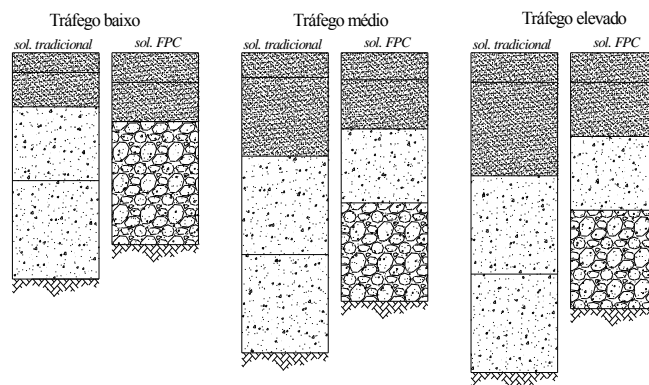


Figura 11: Comparação entre uma solução de pavimento tradicional e um pavimento com incorporação de FPC

### 3. ESTUDO ECONÓMICO

O aumento da capacidade de carga traduz-se numa diminuição do consumo de misturas betuminosas e agregado britado de granulometria extensa. Tal redução pode trazer consigo vantagens económicas. No Quadro 6 resumem-se os custos calculados com base no dimensionamento efectuado à estrutura de pavimento com materiais tradicionais e a estrutura de pavimento com incorporação de FPC.

Quadro 6: Custo de três estruturas de pavimento

Designação	Custo (€/m <sup>2</sup> )					
	Tráfego baixo		Tráfego médio		Tráfego elevado	
	Trad.	FPC	Trad.	FPC	Trad.	FPC
BB de desgaste	2,8	4,1	3,4	3,7	4,1	4,1
Macadame	3,9	4,4	8,8	5,5	10,5	6,1
ABGE de Base	3,3		4,1	3,3	4,1	3,3
ABGE de Sub base	4,1		4,1		4,1	
FPC		4,41		3,66		3,66
<b>Total</b>	<b>14,1</b>	<b>12,91</b>	<b>20,4</b>	<b>16,16</b>	<b>22,8</b>	<b>17,16</b>

Dos resultados obtidos conclui-se que, em todos os casos, a escolha de uma solução de estrutura de pavimento em que haja incorporação de FPC, permite benefícios económicos, na ordem de [5]:

- ✓ 1,2 €/m<sup>2</sup> no caso de tráfego baixo que corresponde a 9% da redução do preço;
- ✓ 4,2 €/m<sup>2</sup> para tráfego médio que corresponde a uma redução de 20%;
- ✓ 5,6 €/m<sup>2</sup> no caso de uma estrutura de tráfego elevado a que corresponde uma redução de 25% do preço da estrutura de pavimento.

Além dos custos directamente afectos à diminuição de materiais gastos na estrutura de pavimento, poder-se-á contabilizar a diminuição de custos decorrentes da não circulação de produtos novos. Pelo facto se transportar menos quantidade de inertes e ligantes betuminosos para o local da empreitada, haverá uma diminuição do volume de tráfego nas vias adjacentes à obra. A diminuição do tráfego traduz-se numa diminuição dos prejuízos quer para o utente por força da diminuição do volume de tráfego, quer para a administração rodoviária que verá o pavimento menos solicitado por veículos pesados. O valor apurado desse custo pode variar entre 4500 €/dia para o caso da via de tráfego baixo e 32000 €/dia para o caso de estudo da via de tráfego elevado, considerando que a infraestutura adjacentes têm uma extensão de 10 km.

#### **4. A PATENTE E DIVULGAÇÃO NO MERCADO**

O processo de patenteamento da invenção de FPC foi supervisionado pela TecMinho e analisado pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), tendo sido formalizado o pedido em Fevereiro de 2006. A partir de 31 de Agosto de 2007 foi publicada a patente pelo INPI, [7], no Boletim da Propriedade Industrial, com o nº 103496 e classificação internacional E01C 5/06 (2006.01).

A divulgação internacional iniciou-se no final de 2006, via Innovation Relay Centres Network (Ref. 06 pt ptau 0gs9), organismo criado pela Comissão Europeia, cujo principal objectivo consiste na divulgação de novas tecnologias, apoiando a transferência de conhecimento para o tecido empresarial. Neste momento desenvolve-se a análise de possíveis parcerias com empresas estrangeiras no sentido de ser possível transferir a tecnologia para alguns países europeus.

Em Portugal, com apoio da ADI está em curso, neste momento, um estudo de formulação de FPC, na empresa Gabriel Couto, onde serão formuladas novas misturas de materiais em que se utilizará outro tipo de cimento, do tipo CEMII A-L/42,5R para estabilização de solo, de modo a avaliar o comportamento final da nova mistura. Será ainda construído um novo trecho experimental, utilizando a nova formulação, em que serão medidos *in situ*, os valores de resistência do pavimento submetido a tráfego pesado ao longo de um ano.

#### **5. CONCLUSÕES**

O objectivo principal deste artigo é demonstrar a possibilidade de reutilização de materiais fresados em camadas granulares de pavimento, contribuindo para o estudo de processos alternativos aos métodos de reciclagem a frio.

O estudo realizado baseou-se na execução de ensaios de caracterização mecânica das misturas de materiais realizadas, de um dimensionamento comparativo com as soluções tradicionalmente adoptadas para pavimentos e num estudo económico.

As principais conclusões deste estudo são:

- A adição de cimento, a materiais provenientes de fresagem de pavimentos confere um incremento de resistência à compressão simples e diametral;
- A mistura de pó de pedra promove o aumento da capacidade resistente do material. Adicionando 30% de pó de pedra a mistura tinha um comportamento próximo ao de um solo;
- Para serem cumpridos os requisitos mínimos propostos pelos manuais de dimensionamento, para solos estabilizados com cimento, ter-se-á que adoptar uma mistura com 70% de material fresado, com 30% de pó de pedra e 6% de cimento Portland do tipo II-32,5;
- A adopção de uma camada constituída pela mistura de material fresado com pó de pedra e cimento, sendo uma camada de rigidez superior, favorece a resistência global da estrutura de pavimento, permitindo que se utilizem quantidades inferiores de agregados britados de granulometria extensa e misturas betuminosas;
- A solução é economicamente viável para os níveis de tráfego estudados, permitindo que sejam reduzidos os custos entre 9 e 25 %, em relação à adopção de uma estrutura tradicional de pavimento em que se utiliza agregado britado de granulometria extensa e misturas betuminosas;
- A técnica é ambientalmente justificável já que permite que sejam utilizados volumes inferiores de materiais novos e porque utiliza subprodutos da construção.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Pereira, Paulo, – “A Construção e a Conservação Sustentáveis de Pavimentos Rodoviários – A Reciclagem de Pavimentos e a Reutilização de Resíduos Industriais”. 2ª *Semana de Engenharia – Micrograf*, Porto, 2001.
- [2] Jofré, C. – “La técnica del reciclado de firmes com cemento”. 1º *Simposio internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes com cemento*. Salamanca, Spain, 2001.
- [3] Dawson, Andrew, – “Granular Pavement Layer Materials ... Where Are We ?” Melbourne, Austrália, 2001.
- [4] Technical Committee C7/8 “Road Pavements”, *PIARC. Innovative Pavement Design*, France, 2003.
- [5] Moreira, J. Pedro Vieira – “Contribuição para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento”. *Tese de Mestrado*, Guimarães, 2005.
- [6] Miranda, V., Miranda, R., Ferreira, C. – “Concepção e construção de um leito de pavimento em material fresado de misturas betuminosas, num trecho da A1 – AE do Norte” *IV CRP*, Estoril, 2006.
- [7] INPI. – “Processo de Reciclagem de Pavimentos através da utilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento” *Boletim da Propriedade Industrial n.º. 2007/08/31*, Lisboa, 2007.