

# CASO DE ESTUDO SOBRE RECICLAGEM A FRIO EM CENTRAL COM BETUME-ESPUMA NA ER243 – ACESSIBILIDADES À ZONA INDUSTRIAL DE RIACHOS

**Francisco Castro**, Eng. Civil na Construções Pragosa, SA



# MOTIVAÇÃO

- Promoção de soluções construtivas sustentáveis, inovadoras e eficazes, na reabilitação de redes rodoviárias.
- Divulgação dos conhecimentos adquiridos durante a aplicação de técnicas de reciclagem, com foco na metodologia de controlo de qualidade utilizada em obra.

⇒ **Reciclagem a frio com betume-espuma com utilização de central móvel** é uma técnica que promove a valorização dos materiais existentes nos pavimentos, através da reincorporação de 100% de misturas betuminosas fresadas na mistura reciclada.

# INTRODUÇÃO

## Caso de estudo: “ER243-Acessibilidades à Zona Industrial de Riachos”

1. Conceção
2. Execução
3. Controlo de Qualidade

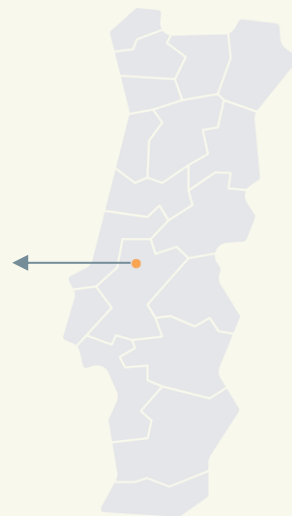
⇒ Entidades envolvidas:



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia



Trabalhos de  
reabilitação/beneficiação  
em 5362 m da ER243  
- Torres Novas/Entroncamento



# 1. CONCEPÇÃO

Etapas:

- Caracterização mecânica da estrutura de pavimento existente;
- Estudo de formulação em laboratório da mistura reciclada a frio;
- Cálculo estrutural da solução de pavimentação.

# 1. CONCEPÇÃO

## 1) Caracterização da estrutura de pavimento existente

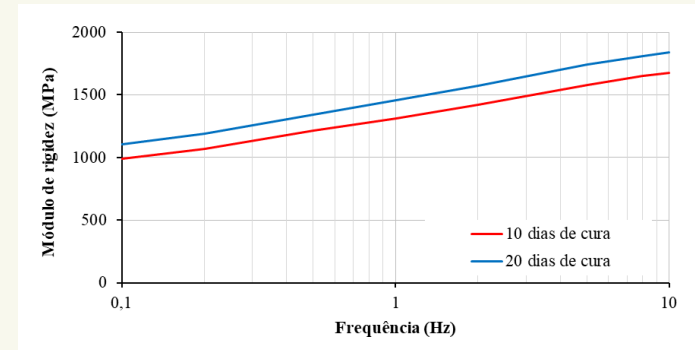
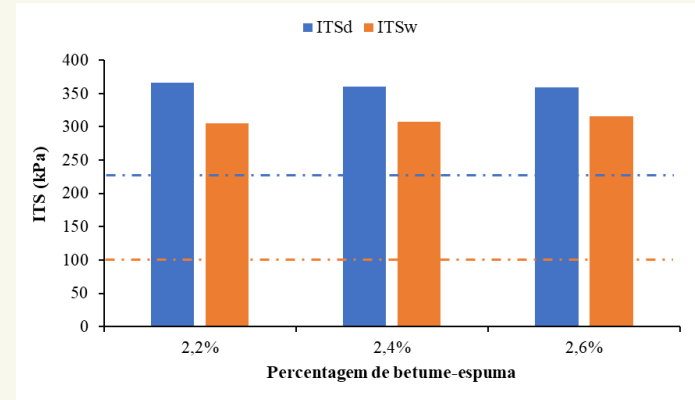
- Poços de sondagem
- Carotes às misturas betuminosas existentes
- Ensaio com defletómetro de impacto (FWD)
- Recolha de amostras de material fresado



# 1. CONCEPÇÃO

## 2) Estudo de formulação em laboratório da mistura reciclada a frio

- Determinação da percentagem ótima de betume espuma da mistura (metodologia *Wirtgen*)
- Caracterização mecânica do material em termos de módulo de rigidez



# 1. CONCEPÇÃO

## Formulação da mistura reciclada a frio

[Agregados] + [Água] + [Fíler Ativo] + [Ligante Reciclador]

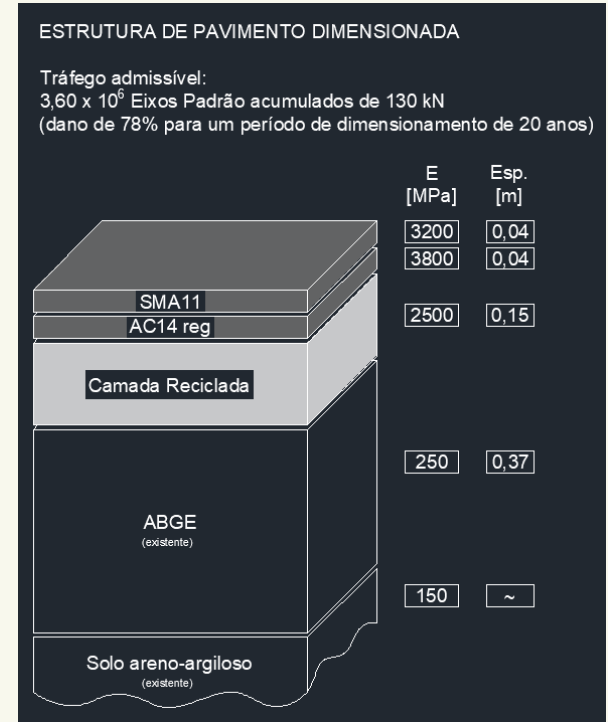
- Material betuminoso fresado ( $D_{\text{máx}} = 40\text{mm}$ ) & 4,0% de fíler calcário (0/0,250mm)
- 5,0% de água
- 2,0% de cimento CEM II (32,5)
- 2,6% de betume-espuma 70/100 (2,5% de água);  $T=170^{\circ}\text{C}$
  
- $E_d = 2500 \text{ MPa}$



# 1. CONCEPÇÃO

## 3) Cálculo estrutural da solução de pavimentação

- Método empírico-mecanicista utilizando as leis de fadiga da Shell
- Dimensionamento como camada ligada (teor volumétrico de betume conservativo de 8,0%)
- Solução equivalente em termos de capacidade de suporte de tráfego (T3) à solução original



## 2. EXECUÇÃO

Processo Construtivo:

- Fresagem do pavimento degradado e constituição do *stock* de fresado
- Produção da mistura reciclada a frio com central móvel KMA240i
- Transporte, espalhamento e compactação da mistura reciclada
- Pavimentação das camadas betuminosas a quente

## 2. EXECUÇÃO

Fresagem do pavimento degradado e constituição do *stock* de fresado

- Fresagem seletiva a velocidade controlada
- Controlo granulométrico do material fresado com britador



## 2. EXECUÇÃO

Produção da mistura reciclada frio com central móvel KMA240i

- KMA240i
- Silos para aditivos
- Isocontentores de betume
- Tanque de água
- Stock de fresado
- Britador e giratória
- Pá carregadora



## 2. EXECUÇÃO

Produção da mistura reciclada frio com central móvel KMA240i

- Central móvel carrega camiões basculantes



## 2. EXECUÇÃO

Transporte, espalhamento e compactação da mistura reciclada

- Pavimentação de elevada espessura de camada



## 2. EXECUÇÃO

### Transporte, espalhamento e compactação da mistura reciclada

- Esquema de compactação.
- Abertura ao tráfego é imediata após a aplicação da camada reciclada.



## 2. EXECUÇÃO

### Pavimentação das camadas betuminosas a quente

- A pavimentação das misturas betuminosas ocorre após a camada reciclada perder pelo menos metade do teor de humidade de produção (~5%).



## 3. CONTROLO DE QUALIDADE

Subdivisão em 3 etapas:

- Controlo de produção da mistura reciclada a frio;
- Controlo na aplicação da mistura reciclada a frio;
- Controlo após a execução da mistura reciclada a frio (material curado).

## 3. CONTROLO DE QUALIDADE

### 1) Controlo de produção da mistura reciclada a frio.

- Controlo da granulometria, teor de água e temperatura do *stock* de fresado;
- Controlo da temperatura do betume;
- Adequabilidade do betume para espumar (viscosidade e estabilidade da espuma de betume);
- Caracterização físico-mecânica da mistura reciclada a frio à saída da central.

### 3. CONTROLO DE QUALIDADE

Caracterização físico-mecânica da mistura reciclada a frio à saída da central:

- Teor de água da mistura;
- Granulometria;
- Ensaio de *Proctor* Modificado;
- Ensaio à tração indireta de provetes *Marshall* moldados (ITS);
- Baridade aparente de provetes *Marshall* moldados;
- Baridade Máxima Teórica.



### 3. CONTROLO DE QUALIDADE

#### 2) Controlo na aplicação da mistura reciclada a frio.

Avaliação da compactação relativa (CR) através do ensaio de campo da garrafa de areia

$$CR_{méd} = \frac{2,28}{1,96} \times 100 \cong 116\%$$

- ⇒ Esquema de compactação utilizado eficiente
- ⇒ Densidade alvo atingida ~ 2,1 ton/m<sup>3</sup>



## 3. CONTROLO DE QUALIDADE

### 3) Controlo após a execução da mistura reciclada a frio (material curado).

- Recolha de provetes *in situ* após cura (sondagens à rotação e extração de lajetas);
- Ensaios de resistência de tração indireta (ITS) de provetes cilíndricos;
- Ensaios de módulo de rigidez em provetes prismáticos (método de flexão em 4 pontos);
- Ensaio de campo com defletómetro de impacto (FWD) para avaliação capacidade de carga do pavimento.

## 3. CONTROLO DE QUALIDADE

### Recolha de provetes *in situ* para caracterização mecânica

- Confirmação de espessuras | 15cm
- Porosidade média | 11,6%
- Baridade aparente média | 2142Kg/m<sup>3</sup>
- Material apresenta coesão.
- Sondagens à rotação realizadas após 5 semanas de cura do material.



### 3. CONTROLO DE QUALIDADE

Ensaio de tração indireta (ITS) de provetes cilíndricos  
(obtidos através das lajes extraídas)

$$ITS_{dry} = 633 \text{ kPa} (> 225 \text{ kPa})$$

$$ITS_{wet} = 620 \text{ kPa} (> 100 \text{ kPa})$$

$$\frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} = 98\% (> 50\%)$$

- ⇒ Resultados obtidos superiores ao estudo de formulação.
- ⇒ Reduzida sensibilidade à água após cura da mistura.

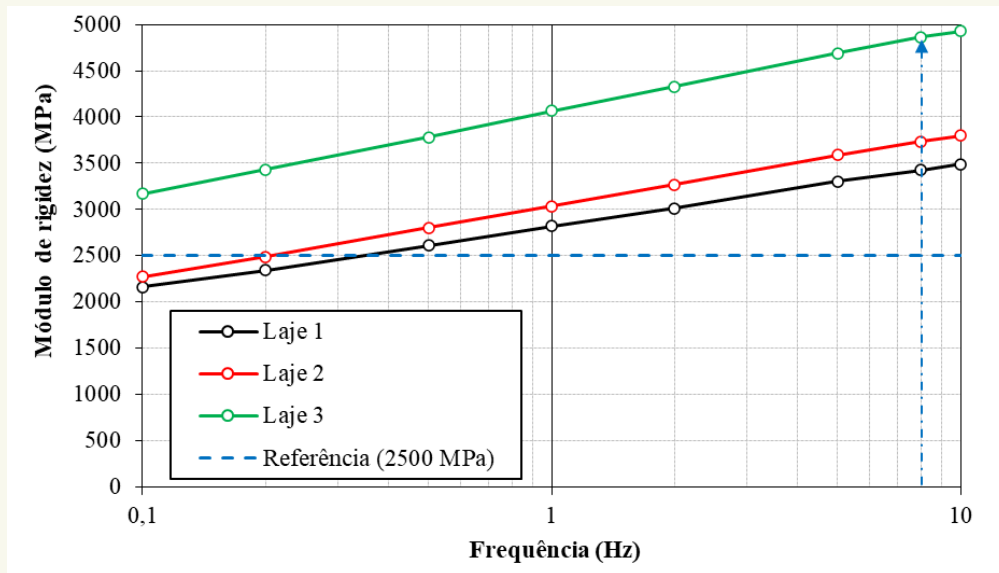


### 3. CONTROLO DE QUALIDADE

#### Ensaio de módulo de rigidez em provetes prismáticos

⇒ Módulo de rigidez das 3 lajes extraídas *in situ* foi superior a 2500 MPa (8 Hz).

⇒ Após a cura da mistura, o seu desempenho mecânico foi superior ao estabelecido em fase de conceção nos 3 locais de recolha.



Resultados de módulo de rigidez pelo método da flexão em 4 pontos (a 20°C).

## 3. CONTROLO DE QUALIDADE

### Ensaio de campo com defletómetro de impacto (FWD)

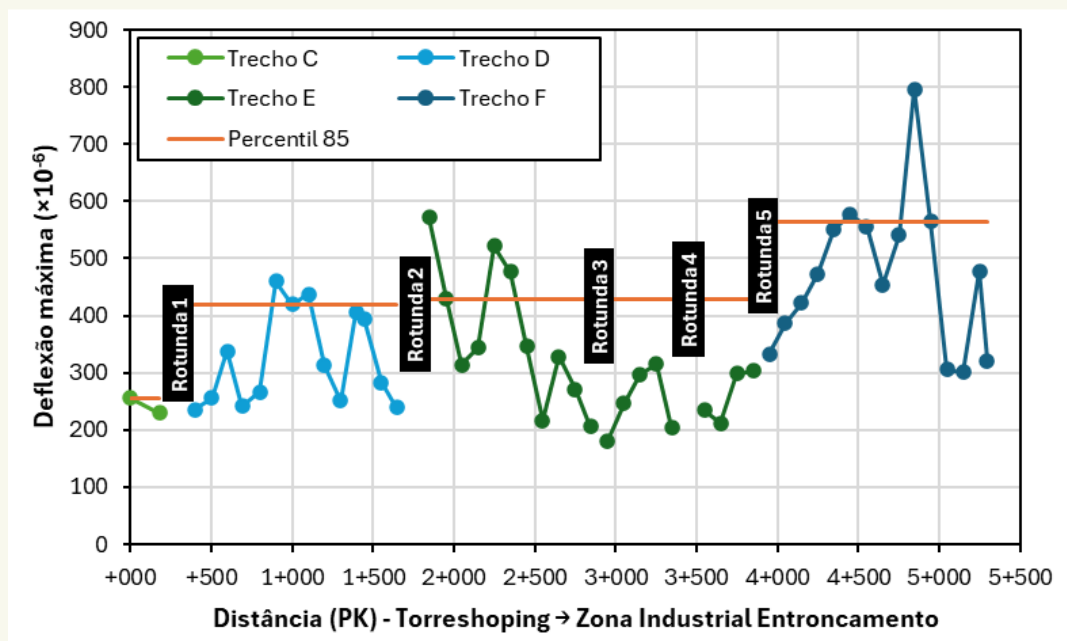
- Avaliação da capacidade de carga do pavimento após a reabilitação
- Retro-análise dos resultado: módulo de rigidez da mistura reciclada



## 3. CONTROLO DE QUALIDADE

### Ensaio de campo com defletómetro de impacto (FWD)

- Avaliação da capacidade de carga do pavimento, através da medição das deflexões características (percentil 85)
- Ensaio realizado depois da época das chuvas (menor capacidade de carga do material subjacente à mistura reciclada)

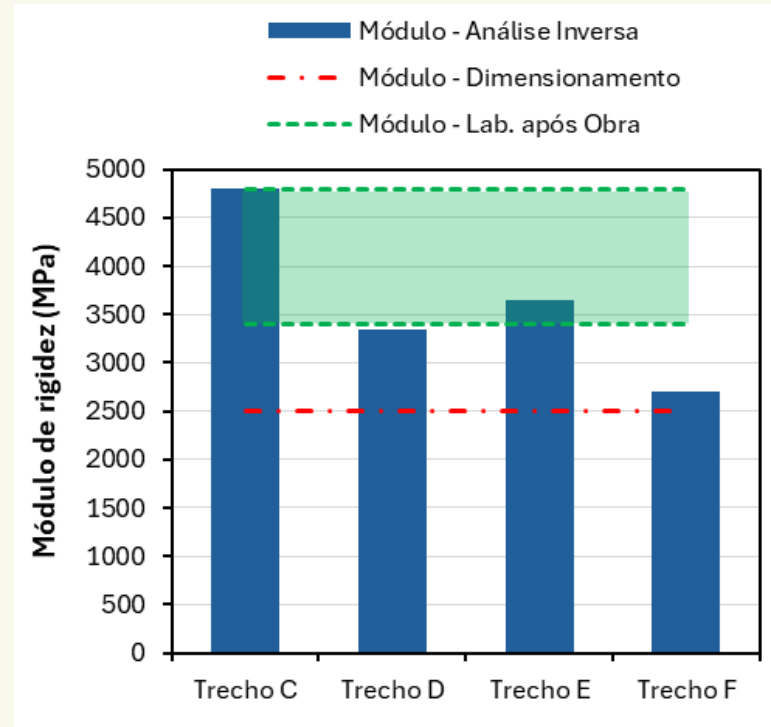


### 3. CONTROLO DE QUALIDADE

#### Ensaio de campo com defletómetro de impacto (FWD)

◦ Módulo de rigidez da mistura reciclada a frio por retro-análise dos resultados do ensaio de campo

⇒ Os valores de módulo foram superiores ao valor usado no dimensionamento (2500 MPa) e semelhantes ao resultados laboratoriais (~3500 MPa)



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Solução enquadrável com as metas ambientais europeias, com redução da pegada carbónica e menor consumo de recursos virgens.
- Controlo de qualidade realizado atestou o cumprimento dos pré-requisitos de desempenho da mistura reciclada considerados no dimensionamento da solução
- Solução tecnicamente viável, com ganhos nos tempos de execução e estrangimentos de trânsito diminutos.
- Caso de estudo é um contributo para a elaboração de especificações técnicas no Caderno de Encargos das Infraestruturas de Portugal.
- O caso de estudo visa a promoção da reciclagem a frio com betume-espuma para uma utilização mais ampla na indústria da pavimentação.

# OBRIGADO!

francisco.castro@pragosa.pt

+351 927 056 041

goncalo.henriques@pragosa.pt

+351 927 056 031

