

# ATRITO SUPERFICIAL DE CAMADAS BETUMINOSAS QUE INCORPORAM AGREGADOS DE SEIXO BRITADO

Elza Sardão<sup>1</sup>, Silvino Capitão<sup>1</sup>, Arminda Almeida<sup>2</sup> e Luís Picado-Santos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Eng<sup>a</sup> Civil, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal

email: [capitao@isec.pt](mailto:capitao@isec.pt) <http://www.isec.pt>

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos, 3030-788, Coimbra, Portugal

<sup>3</sup>DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.

---

## Sumário

*O artigo centra-se na avaliação, em laboratório, do atrito superficial (Pêndulo Britânico) e da profundidade da textura (mancha de areia) de camadas de desgaste que incorporam agregados de seixo britado, comparando os resultados com os de camadas que contêm agregados granitoides, os quais são, em geral, considerados mais aptos para aquela função. Algumas das lajetas foram sujeitas a desgaste acelerado e outras incorporaram agregados com desgaste prévio no equipamento micro-Deval. Verificou-se que o atrito foi, em geral, mais baixo nas lajetas com seixo. Contudo, verificou-se que estas cumpriram os limiares de aceitação indicados em várias fontes, tanto para pavimentos novos, como para pavimentos em serviço.*

---

**Palavras-chave:** Agregados de seixo britado; atrito superficial; camadas de desgaste; misturas betuminosas; textura.

## 1 INTRODUÇÃO

A segurança rodoviária é um tema que merece especial atenção por parte das administrações rodoviárias, tanto das municipais como das de âmbito nacional. As camadas de desgaste desempenham um papel muito importante a esse nível, porquanto devem conferir aos pavimentos as características de aderência necessárias.

A camada de desgaste é a superfície de rolamento sobre a qual se realiza o contacto direto com o tráfego, devendo garantir: um bom coeficiente de atrito pneu/pavimento, mesmo para condições climáticas difíceis; um nível de geração de ruído pneu/pavimento e características óticas aceitáveis; uma superfície regular que garanta a circulação em condições de conforto, economia e segurança; e uma adequada textura para facilitar a drenagem superficial das águas que escoam sobre a superfície. Contudo, as camadas de desgaste convencionais de um pavimento devem também transmitir as cargas dos veículos às camadas inferiores, ao mesmo tempo que impermeabiliza o pavimento, de forma a evitar a infiltração de água.

## 2 AGREGADOS PARA CAMADAS DE DESGASTE

Os agregados formam o esqueleto pétreo das camadas betuminosas superficiais, contribuindo para a resistência à ação do tráfego e influenciando as características da superfície, incluindo a resistência à derrapagem. A norma NP EN 13043 estabelece alguns requisitos e o modo como são avaliados os agregados a utilizar em misturas betuminosas, agrupando as propriedades em três grupos: geometria das partículas, características físicas e composição química.

Geralmente, preferem-se agregados duros, resistentes ao choque e aos esforços a que estão sujeitos por atrito entre partículas, e que resistam ao polimento causado pelo tráfego que circula sobre a superfície do pavimento.

A identificação dos minerais constituintes pode possibilitar informações relevantes acerca das propriedades físicas e químicas que os agregados podem apresentar, sendo o quartzo e o feldspato minerais duros e resistentes ao polimento, geralmente encontrados em rochas ígneas, tais como o granito e o granito-gnaiss. Quanto à adesividade ao ligante asfáltico, são os agregados provenientes de rochas alcalinas (em geral com 45 a 52% de sílica), que geralmente apresentam melhor adesividade [1].

Contudo, a seleção de agregados não se pode reger apenas pelas qualidades acima mencionadas, sendo importante ter em conta a disponibilidade, o custo e o tipo de aplicação. Em Portugal Continental existe uma ampla área do território onde abundam rochas sedimentares, as quais são em grande parte muito brandas, o que inibe a sua utilização em camadas de desgaste. Contudo, as questões relacionadas com a sustentabilidade e o impacto económico no setor da construção viária (exploração de agregados), devem ser consideradas no processo de escolha do agregado.

Os seixos são fragmentos de rocha com forma arredondada e superfície relativamente lisa. Quando britados mecanicamente obtém-se uma proporção de material angular razoável. As partículas roladas, antes da britagem, podem ter dimensões entre 4 e 64 mm, podendo encontrar-se na sua constituição silicatos, como o quartzo e o feldspato, ou quartzo, micas e minerais resultantes de meteorização. O quartzo é um mineral que exhibe brilho vítreo, podendo apresentar-se sob várias cores, apresentando uma dureza elevada [2].

Em Portugal, a utilização de seixo britado em camadas de desgaste tem vindo progressivamente a ser reduzida, em detrimento da utilização de rochas granitoides. Nalguns cadernos de encargos, como é o caso do publicado pela Estradas de Portugal [3], a utilização de seixo britado em camadas de desgaste é mesmo explicitamente proibida, independentemente de serem cumpridos os requisitos estabelecidos. Noutros cadernos de encargos, aquela utilização está sujeita ao cumprimento pelo agregado de requisitos adicionais.

Noutros Países, como a Espanha [4], não se permite a utilização de seixo britado em camadas de desgaste de estradas com elevados níveis de tráfego pesado (classes T00 e T0), enquanto em França [5] pode aplicar-se seixo britado em camadas de desgaste, admitindo-se menos de 100% de partículas com faces esmagadas ou partidas. Em Espanha o seixo britado tem de cumprir alguns requisitos adicionais (por exemplo, a dimensão das partículas antes da britagem deve ser seis vezes superior à dimensão máxima do agregado final).

Dentre os requisitos estabelecidos para os agregados a utilizar em camadas de desgaste, os mais difíceis de cumprir são os associados à resistência e à geometria das partículas grossas. Os parâmetros físicos mais comuns são os relativos à resistência à fragmentação ( $LA - Los Angeles$ ), ao desgaste micro-Deval ( $M_{DE}$ ) e ao polimento ( $PSV - Polished Stone Value$ ). É comum procurarem-se materiais que cumpram as categorias  $LA_{20}$ ,  $M_{DE15}$  e  $PSV_{50}$ , embora sejam admitidos por alguns cadernos de encargos agregados granitoides com desempenhos inferiores ( $LA_{30}$ ) [3]. Os requisitos geométricos mais comuns estabelecem limites para o índice de achatamento (FI) e a percentagem de partículas totalmente esmagadas e partidas nos agregados grossos ( $C_{x/y}$ ). As categorias aceites são habitualmente as  $FI_{20}$  ou  $FI_{15}$ , em função do tipo de mistura, e  $C_{100/0}$ . Em França [5], por exemplo, admite-se até 10% de partículas não totalmente esmagadas ou partidas ( $C_{95/y}$  ou  $C_{90/y}$ ).

### 3 ATRITO E TEXTURA

#### 3.1 Considerações Gerais

A aderência entre o pneu e o pavimento consiste na capacidade de mobilização de forças de atrito no contacto pneu - pavimento durante a condução (aceleração, travagem e mudança de direção), sendo essencial à segurança dos utentes, particularmente em condições de superfície molhada. Um pavimento que apresente boa aderência permite uma redução de distâncias de paragem e um aumento da capacidade de conservação da trajetória desejada para o veículo, principalmente em curvas, podendo influenciar o número de acidentes.

O coeficiente de atrito é o rácio entre duas forças: uma paralela à superfície de contacto (interface pneu-pavimento) entre dois corpos e oposta ao movimento do corpo, e outra perpendicular à superfície de contacto (carga da roda). O atrito pode variar a curto e a longo prazo. No primeiro caso as variações são originadas pelas condições climáticas sazonais, enquanto no segundo ocorrem pela degradação da superfície do pavimento por ação do tráfego. O coeficiente de atrito longitudinal (CAL) influencia sobretudo a distância de paragem, enquanto o coeficiente de atrito transversal (CAT) condiciona a segurança de circulação em curva ou nas

mudanças bruscas de direção. O coeficiente de atrito transversal é o que tem maior influência ao nível de acidentes e da velocidade de circulação [6].

A textura desempenha um papel fundamental na qualidade funcional de um pavimento, designadamente, na resistência à derrapagem, no desgaste dos pneus, no ruído e vibrações transmitidas ao interior dos veículos, tratando-se de um parâmetro que influencia diretamente a segurança, o custo de operação dos veículos, o conforto e o ambiente.

A microtextura caracteriza-se por comprimentos de onda que variam entre 1  $\mu\text{m}$  e 0,5 mm e amplitudes verticais entre 1  $\mu\text{m}$  e 0,2 mm, dependendo da aspereza das partículas de agregado, a qual é função da estrutura mineralógica e petrográfica do agregado utilizado [7], contribuindo para a rotura do filme de água que se forma entre o pneu e o pavimento molhado. A macrotextura apresenta comprimentos de onda que podem variar entre 0,5 e 50 mm, com uma amplitude vertical a variar entre 0,2 e 10 mm, os quais resultam das partículas maiores de agregado contido na mistura. A macrotextura é caracterizada pela profundidade média dos espaçamentos das partículas do agregado, contribuindo para reduzir o fenómeno de hidroplanagem. Também é responsável pela deformação mecânica dos pneus em contacto com a superfície (histerese), contribuindo para a resistência à derrapagem, principalmente em situações de elevada velocidade e de pavimento molhado [8].

### 3.2 Fatores que Influenciam o Atrito

São, habitualmente, identificados vários fatores que influenciam o atrito: o desgaste dos agregados devido à ação de polimento provocada pelos pneus dos veículos; a exsudação do betume na camada de desgaste; as descontinuidades devidas ao fendilhamento; a redução da porosidade do pavimento devido à densificação da camada de desgaste; a geometria de traçado da estrada e as condições de drenagem; a formação de rodeiras que leva à acumulação de água, com produção de hidroplanagem e a formação de gelo; a poluição devida ao derrame de combustíveis que afetam os materiais constituintes da camada de desgaste; a microtextura e a capacidade de drenabilidade superficial do pavimento ([9]; [10]). A baixas velocidades é suficiente a garantia de bons valores de microtextura para uma resistência à derrapagem satisfatória, enquanto para velocidades elevadas são necessários quer bons níveis de microtextura quer de macrotextura, embora o aumento da velocidade diminua a resistência à derrapagem em todos os casos [11].

Os requisitos estabelecidos para os agregados baseiam-se no pressuposto de que o seu cumprimento conduz a adequados níveis de aderência superficial dos pavimentos. Por isso, propriedades do agregado tais como, a granulometria, a forma das partículas, a resistência à fragmentação, ao polimento, ao desgaste e ao choque térmico, a absorção de água, a afinidade dos agregados grossos com o betume e a estabilidade química são importantes para a resistência à derrapagem. Geralmente, obtêm-se melhores desempenhos das características superficiais do pavimento recorrendo ao uso de agregados compostos por minerais de durezas diferentes, ou que se desgastem por remoção de grãos dos minerais constituintes [6]. Para uma boa macrotextura e para um boa aderência devem procurar-se agregados com valores altos de PSV e baixos valores de  $M_{DE+LA}$  [12].

A presença de água sobre a superfície do pavimento reduz significativamente a aderência entre o pneu e o pavimento. A água pode submergir as irregularidades geométricas das partículas superficiais de agregado e levar a uma redução da aderência, uma vez que o atrito em pavimentos molhados é suscetível a baixos níveis de microtextura.

Uma película de água com 2,5 mm de espessura pode reduzir a resistência à derrapagem em 75% e levar ao fenómeno de hidroplanagem [13]. Este fenómeno pode ocorrer por hidroplanagem viscosa, em situação de travagem, mesmo a velocidades baixas, devido à viscosidade da água que dificulta a sua expulsão entre o pneu e o pavimento na área de contacto. Pode ainda ocorrer hidroplanagem dinâmica para velocidades de circulação superiores, em que a água penetra nas concavidades do rasto do pneu, reduzindo a área de contacto entre o pneu e o pavimento, ou causando a perda de contacto total entre as duas superfícies [6]. A presença de deformações na superfície pode levar à acumulação de água, a qual, aliada a velocidades elevadas, pode originar hidroplanagem dinâmica.

Na superfície do pavimento num período seco, acumulam-se poeiras, borracha e a partículas resultantes do desgaste do próprio pavimento, obstruindo os vazios da textura e levando à redução ligeira do atrito. Contudo, quando chove cria-se uma pasta muito fina e fluída que funciona como um lubrificante, a qual resulta da mistura dos detritos com a água, reduzindo significativamente o atrito. Ao fim de algum tempo esta película tende a desaparecer por ação da chuva e dos veículos. Quando terminada a chuva a água escoar-se da superfície, secando

o pavimento, restabelecendo-se os valores normais de atrito. O valor do coeficiente de atrito transversal e o tempo necessário para a secagem da superfície dependem do perfil transversal do pavimento, da macrotextura e da permeabilidade da camada de desgaste [14].

A irregularidade superficial resulta de defeitos geométricos da camada de desgaste durante a construção, passagem sucessiva de veículos e deformação do suporte, podendo ser observada tanto longitudinalmente como transversalmente. O aumento da irregularidade produz um contacto intermitente entre os pneus e o pavimento, aumentando a distância de paragem dos veículos [10].

A resistência à derrapagem baixa com o aumento da temperatura do pavimento e do ar, embora as variações de temperatura apresentem maior influência nas propriedades do pneu que nas características de atrito do pavimento. Considera-se geralmente que numa superfície em serviço a resistência à derrapagem diminui com o aumento da temperatura [15]. Trata-se de um resultado significativo, o qual implica uma correção dos valores de atrito medidos, para que possam comparar-se valores obtidos a diferentes temperaturas.

## 4 ESTUDO EXPERIMENTAL DO ATRITO SUPERFICIAL DE MISTURAS PRODUZIDAS COM VÁRIOS TIPOS DE AGREGADOS BRITADOS

### 4.1 Constituintes, Composições e Processo de Fabrico das Lajetas Estudadas

O estudo que se apresenta resulta dos trabalhos realizados no âmbito de uma dissertação de mestrado [16]. Produziram-se duas misturas betuminosas do tipo AC 14 surf 35/50, típicas de camadas de desgaste, utilizando seixo britado como agregado grosso numa delas e gnaïsse britado na outra. As características físicas obtidas para os agregados utilizados são as indicadas no Quadro 1. O coeficiente de polimento acelerado declarado para o gnaïsse é da categoria PSV<sub>50</sub>. A granulometria e os valores de azul-de-metileno obtidos para os agregados finos cumprem os requisitos estabelecidos no CE da EP [3]. As duas misturas foram produzidas com betume 35/50, o qual cumpria os limites indicados na EN 12591: 2009.

Quadro 1. Características físicas dos materiais grossos utilizados e comparação com os limites do CE EP

| Característica                   | Massa volúmica (Mg/m <sup>3</sup> )        |      |      | Granulometria        | FI (%)           | SI (%)           | C (%)               | LA (%)              | M <sub>DE</sub> (%) |
|----------------------------------|--|------|------|----------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                  | pa   | prd  | psd  |                      |                  |                  |                     |                     |                     |
| <b>Material</b>                  |  |      |      |                      |                  |                  |                     |                     |                     |
| Brita seixo 11/16                | 2,64                                       | 2,61 | 2,62 | G <sub>c</sub> 85/35 | DND              | DND              | C <sub>79/1</sub> * | LA <sub>25</sub>    | M <sub>DE</sub> 10  |
| Brita seixo 4/16                 | 2,64                                       | 2,6  | 2,61 | G <sub>c</sub> 90/15 | DND              | DND              | C <sub>10/5</sub> * | LA <sub>25</sub>    | M <sub>DE</sub> 10  |
| Brita gnaïsse 8/20               | 2,63                                       | 2,61 | 2,61 | G <sub>c</sub> 90/15 | FI <sub>15</sub> | SI <sub>15</sub> | C <sub>100/0</sub>  | LA <sub>20</sub>    | M <sub>DE</sub> 10  |
| Brita gnaïsse 4/12               | 2,62                                       | 2,59 | 2,61 | G <sub>c</sub> 90/15 | FI <sub>15</sub> | SI <sub>15</sub> | C <sub>100/0</sub>  | LA <sub>20</sub>    | M <sub>DE</sub> 10  |
| <b>Caderno de encargos da EP</b> |  |      |      |                      |                  |                  |                     |                     |                     |
| Limite/ Categoria                | ±0,05 Mg/m <sup>3</sup> do valor declarado |      |      | A declarar           | FI <sub>15</sub> | ND               | C <sub>100/0</sub>  | LA <sub>20</sub> ** | M <sub>DE</sub> 15  |

pa, prd, psd – massas volúmicas do material impermeável das partículas, das partículas secas em estufa, e das partículas saturadas com superfície seca, respetivamente; FI – índice de achatamento; SI – índice de forma; C – percentagem de partículas esmagadas ou partidas e de partículas totalmente roladas; LA – coeficiente de Los Angeles; M<sub>DE</sub> – coeficiente do micro-Deval.

\*As percentagens de partículas totalmente britadas ou esmagadas e totalmente roladas foram determinadas em laboratório, por não terem sido indicadas na ficha de produto do produtor.

\*\*Para rochas granitoides: LA<sub>30</sub>

As frações de agregados utilizadas foram combinadas nas seguintes proporções: 18% de brita seixo 11/16, 31% de brita seixo 4/16, 48% de pó calcário e 3% de filer comercial, para a mistura com seixo; 10% de brita gnaïsse 8/20, 40% de brita gnaïsse 4/12, 48% de pó calcário e 2% de filer comercial, para a mistura com gnaïsse. A percentagem de betume 35/50 utilizada em ambas as misturas betuminosas foi de 5%. As composições utilizadas foram as declaradas pelo produtor de misturas betuminosas que cedeu os materiais para o estudo.

As misturas foram produzidas numa misturadora elétrica de laboratório. O betume e os agregados foram aquecidos a 160°C e a compactação das lajetas foi realizada com um cilindro compactador de reduzidas

dimensões. Cada uma das lajetas produzidas tinha 450×450×40 mm<sup>3</sup>, tendo-se produzido duas lajetas para cada uma das misturas ensaiadas. Adicionalmente moldaram-se mais duas lajetas, uma para cada uma das misturas, utilizando partículas com dimensão nominal superior a 4 mm previamente submetidas a um processo de desgaste no equipamento *micro-Deval*, tal como preconizado pela NP EN 1097-1.

#### 4.2 Procedimentos de Desgaste Acelerado das Lajetas e dos Agregados

Para cada uma das misturas fabricadas, submeteram-se duas das lajetas produzidas a um procedimento de desgaste acelerado com recurso a duas catrabuchas, uma de náilon e outra de aço, animadas de um movimento de rotação planetário. Para isso, as catrabuchas foram adaptadas a uma misturadora, tendo-se aplicado até 100 minutos de desgaste com a catrabucha de náilon (catrabucha tipo tacho – fio de náilon com corindo abrasivo grão 80 da *Bosch*), e acima de 100 minutos com a catrabucha de arames de aço (catrabucha tipo tacho – arame ondulado da *Bosch*).

Os tempos de desgaste foram estabelecidos após a aplicação de várias ações de desgaste sobre uma lajeta de teste. Verificou-se que após algum tempo de desgaste, a catrabucha de náilon arrancava a película de betume superficial sem alterar significativamente a textura das partículas mais grosseiras do agregado superficial, tal como acontece geralmente nos pavimentos logo após a sua entrada ao serviço. Depois de obtido o arranque de parte da película de ligante, após 100 minutos da ação de desgaste foi utilizada uma catrabucha de arames de aço, com o objetivo de acelerar o processo de desgaste da textura superficial das partículas de agregado e, assim, obter o desgaste das asperezas superficiais das partículas de agregado, tal como acontece nos pavimentos.

O procedimento de desgaste acelerado teve como objetivo comparar o desempenho em relação ao atrito superficial das lajetas construídas com agregados de seixo britado e de gnaïsse quando submetidas à mesma ação de desgaste. A metodologia utilizada não pretendeu simular completamente a ação de desgaste dos pneus sobre os pavimentos, embora se tenha procurado uma variação qualitativa semelhante à que ocorre nos pavimentos. Na Figura 1 ilustra-se o processo de desgaste utilizado e o efeito produzido sobre uma lajeta (4 réplicas de desgaste, com cerca de 15 cm de diâmetro).



**Fig.1. Processo de desgaste com catrabuchas de náilon e de aço e efeito produzido após ação de desgaste**

Foram também ensaiadas duas lajetas adicionais, uma para cada um dos tipos de agregados avaliados. Nesse caso, submeteram os agregados utilizados a um procedimento de desgaste prévio no equipamento *micro-Deval*, o qual teve como objetivo desgastar os agregados com dimensão superior a 4 mm, uma vez que estes influenciam de forma significativa a textura superficial do pavimento. A observação organolética da aspereza superficial das partículas de cada um dos tipos de agregados após abrasão no equipamento de *micro-Deval* não detetou alterações significativas. Os resultados dos ensaios são os apresentados no Quadro 2, verificando-se que os agregados de seixo apresentam maior resistência à abrasão do que os agregados de gnaïsse.

Quadro 2. Resultados dos valores de  $M_{DE}^*$  obtidos em laboratório para cada um dos agregados

| Agregados  | Gnaïsse 4/12 | Gnaïsse 8/20 | Seixo 4/16 | Seixo 11/16 |
|--|--------------|--------------|------------|-------------|
| $M_{DE}^*$ [%]<br>(partículas de dimensão superior a 4 mm) | 26           | 23           | 12         | 14          |

As lajetas fabricadas com agregados sujeitos a abrasão prévia foram submetidas à simulação do efeito de algum tráfego através da aplicação da catrabucha de náilon do modo descrito acima, durante 50 minutos, com intuito de retirar, em parte, a película de betume que envolve os agregados superficiais.

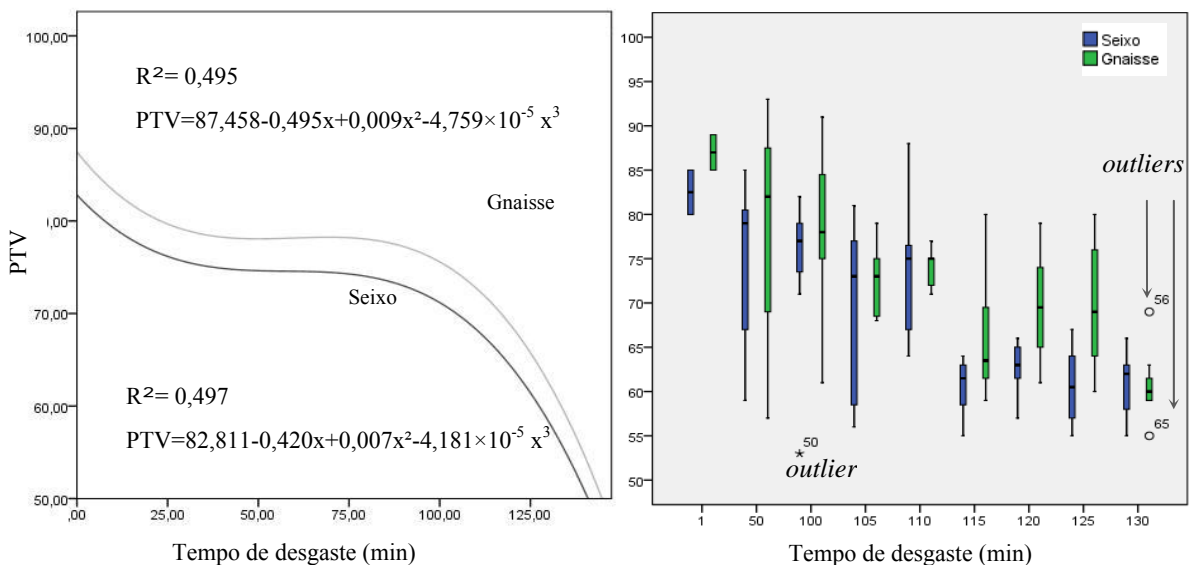
### 4.3 Medição do Atrito com Pêndulo Britânico (PTV)

Após o fabrico das lajetas e ao longo das ações de desgaste efetuadas, avaliaram-se em laboratório os valores de PTV – *Pendulum Test Value* com recurso ao pêndulo britânico.

Para avaliar a evolução do PTV foram realizadas medições para os seguintes tempos de desgaste acelerado: 1, 50, 100, 105, 110, 115, 120, 125 e 130 minutos, os quais correspondem, respetivamente, aos seguintes números de voltas das catrabuchas: 72, 3600, 7200, 7560, 7920, 8280, 8640, 9000 e 9360. Em cada uma das zonas submetidas a desgaste, e para cada um dos tempos considerados, foram medidos valores de PTV na direção da compactação das lajetas e na direção perpendicular àquela (40 medições em cada lajeta, 20 em cada direção, para cada um dos tempos de desgaste).

As lajetas com seixo e gnaisse antes do desgaste tinham um PTV médio de, respetivamente, 84,5 e 88, cumprindo o requisito mínimo de PTV igual a 60 exigido no CE da EP para pavimentos novos.

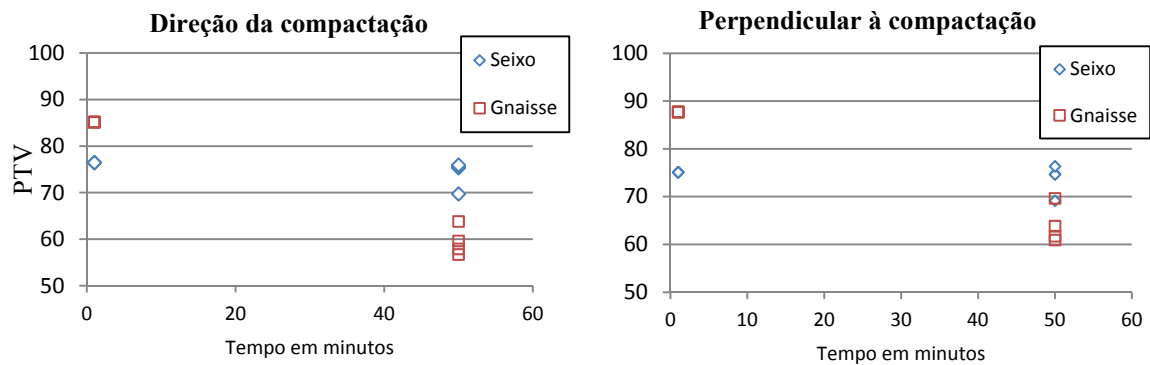
Apesar do número de medições de PTV ter sido relativamente elevado (360 medições ao todo para cada tipo de mistura), verificou-se alguma dispersão dos resultados. Na Figura 2 apresentam-se, para a direção da compactação, as linhas de tendência que ilustram a evolução do PTV das lajetas estudadas, e a representação gráfica das caixas de bigodes para cada uma das misturas betuminosas avaliadas, as quais mostram a magnitude da dispersão dos valores de PTV.



**Fig. 2. Linhas de tendência e caixas de bigodes da variação do PTV das lajetas com seixo e com gnaisse**

A Figura 2 permite verificar que a mistura com gnaisse apresentou geralmente valores de PTV superiores aos da mistura com seixo ao longo do processo de desgaste adotado. Além disso, observa-se que a diferença entre os dois materiais diminuiu à medida que o tempo de desgaste aumentou. Os resultados obtidos para a direção perpendicular à compactação são similares e têm uma variação semelhante. Contudo, as lajetas com seixo apresentaram valores de PTV um pouco superiores, o que levou a que as diferenças de PTV entre as misturas com seixo e com gnaisse fossem bastante pequenas (5 pontos ou menos).

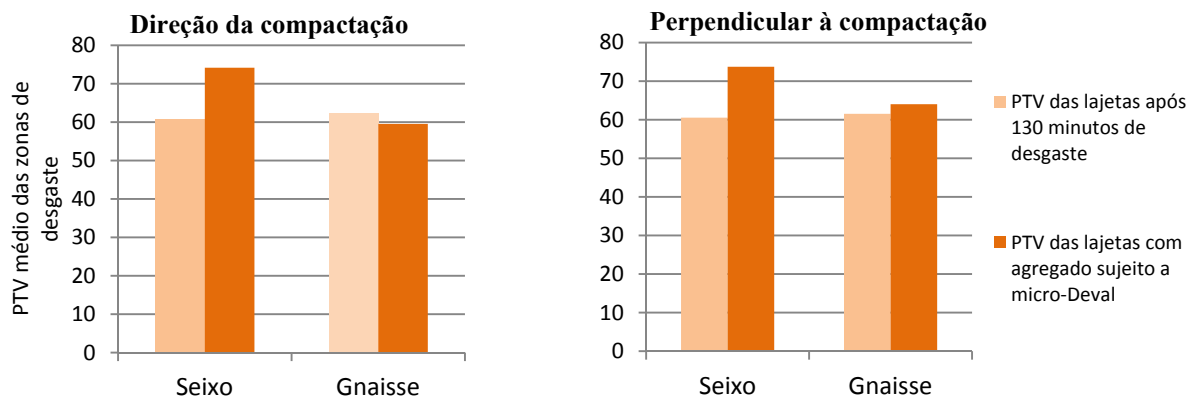
Para as lajetas fabricadas com agregado sujeito a desgaste prévio no equipamento do micro-Deval obtiveram-se os resultados que se apresentam na Figura 3.



**Fig. 3. Evolução do PTV das lajetas com seixo e com gnaisse com agregados sujeitos a abrasão prévia**

Ao contrário do que aconteceu anteriormente, os resultados representados na Figura 3 permitem verificar que apesar da lajeta com gnaisse ter apresentado melhores valores de PTV logo após o fabrico, a situação inverteu-se depois de arrancada uma parte significativa da película superficial de betume (situação após 50 minutos de desgaste com catrabucha de náilon). Além disso, observa-se que a variação de PTV na lajeta com seixo foi muito baixa entre as duas situações analisadas, ao contrário do que acontece na lajeta com gnaisse.

Na Figura 4 comparam-se os valores de PTV obtidos nas lajetas produzidas com agregados novos e sujeitas a 130 minutos de desgaste acelerado com os medidos sobre as lajetas fabricadas com agregados previamente submetidos a micro-Deval, depois de removida parte da película superficial de betume (desgaste de 50 minutos com catrabucha de náilon).



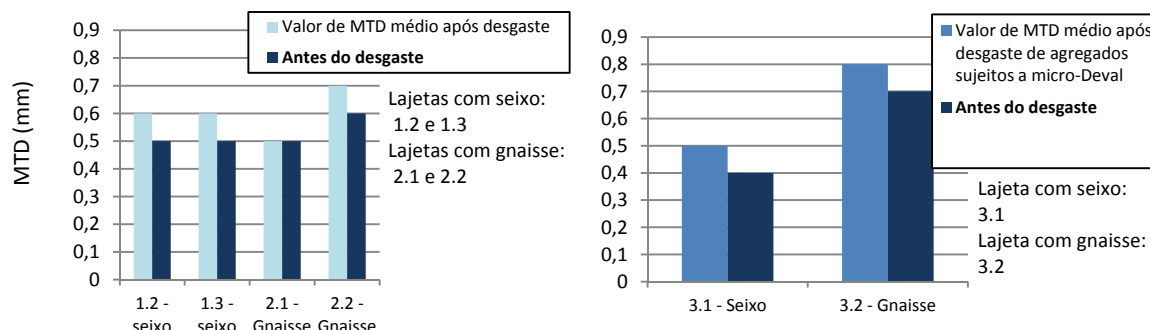
**Fig. 4. Comparação entre os valores de PTV das lajetas após 130 min de desgaste e os das lajetas com agregados sujeitos a abrasão prévia**

Depreende-se da Figura 4 que os valores de PTV medidos sobre as lajetas com seixo, depois de submetidas a 130 minutos de desgaste, são inferiores aos observados para as lajetas do mesmo material depois de submetido a abrasão prévia ( $12000 \pm 10$  voltas) no equipamento micro-Deval, tal como era esperado com base nos valores de  $M_{DE}^*$  indicados no Quadro 2. Nas lajetas com gnaisse a diferença dos valores de PTV medidos nas duas situações de desgaste foi muito reduzida. Além disso, verifica-se que o seixo garantiu bastante melhores características de atrito que o agregado de gnaisse depois de submetido à ação de desgaste no equipamento micro-Deval, e após remoção de uma parte significativa da películas superficial de betume.

#### 4.4 Avaliação da Textura pelo Ensaio da Mancha de Areia (MTD)

O parâmetro MTD – profundidade da textura foi avaliado pelo ensaio da mancha de areia em todas as lajetas produzidas. Este ensaio possibilita a avaliação da profundidade média da textura, através da altura média da mancha de areia formada sobre a camada de desgaste. As medições foram realizadas sobre as lajetas disponíveis antes e após os desgastes efetuados com as catrabuchas. Para que fosse possível a medição dos valores de MTD dentro do círculo submetido a desgaste, e após várias tentativas sobre uma lajeta de teste, chegou-se a um volume de areia calibrada de  $7,07 \text{ cm}^3$  (inferior ao valor normalizado de  $25 \text{ cm}^3$ ). Na Figura 5 resumem-se os

valores obtidos. Uma vez que o ensaio não pode ser realizado através do procedimento normalizado, os resultados obtidos podem ser tomadas apenas como indicativos.



**Fig. 5. Valores médios de MTD obtidos sobre lajetas antes e depois dos processos de desgaste**

Da análise dos valores médios de MTD representados na Figura 5, verifica-se que para as lajetas com seixo, os valores são muito próximos dos medidos para as lajetas com gnaisse e que os valores de MTD antes do desgaste, são geralmente inferiores aos preconizados no caderno de encargos da EP, o qual indica para um AC 14 surf valores mínimos de 0,7 mm. Para as lajetas produzidas com agregados sujeitos à ação do equipamento de *micro-Deval* verificou-se que os valores de MTD da lajeta com seixo eram inferiores aos obtidos para a lajeta com gnaisse, em todas as zonas de desgaste realizadas. Tal leva a concluir que não parece haver grande influência do efeito da desgaste prévio dos agregados no valor de MTD.

O aumento dos valores de MTD após a ação de desgaste acelerado está provavelmente relacionado com a perda de uma parcela da fração fina superficial da mistura durante a ação de desgaste, o que permite aumentar a macrotextura superficial.

#### 4.5 Comparação dos Valores Obtidos com Outros Casos

De modo a avaliar melhor os resultados obtidos, procedeu-se à sua comparação com valores do CAT – Coeficiente de Atrito Transversal e do MTD obtidos noutra estudo [6], o qual considerou vários ambientes rodoviários diferentes para modelar o número esperado de acidentes em função das características superficiais do pavimento.

Para analisar a influência relativa do pavimento na ocorrência de acidentes, aquele autor recorreu a modelos para estabelecer patamares de resistência à derrapagem e de profundidade de textura: um preventivo e outro limite. O preventivo corresponde à situação em que se intervém no pavimento pelo facto da resistência à derrapagem e/ou a profundidade de textura terem atingido os limites de alerta de segurança (superiores aos mínimos). Essas ações de conservação são preventivas e são realizadas frequentemente para reduzir o risco de derrapagem. O patamar limite dá origem a intervenções imediatas, uma vez que a resistência à derrapagem e/ou a profundidade de textura atingiram valores abaixo dos limites mínimos, para os quais existe elevado risco de ocorrência de acidentes.

Para além dos patamares de segurança, aquele estudo estabelece três cenários base que consideram os diferentes ambientes rodoviários e condições de tráfego. Os ambientes são:  $A_1$  – Ambiente com forte presença de características urbanas;  $A_2$  – Ambiente caracterizado por predominância significativa de cruzamentos em ambiente rural;  $A_3$  – Ambiente com elevada percentagem de extensão em curva, trainéis inclinados e, simultaneamente, velocidade média de circulação elevada. Os valores propostos para cada patamar em função dos ambientes são identificados no Quadro 3 e ilustrados na Figura 7 para um AC 14 surf.

Na Figura 7 comparam-se os valores médios de PTV medidos, após 130 minutos de desgaste, com os valores de referência do CAT referidos. Verifica-se que em qualquer dos quartis referentes aos resultados experimentais, os valores de PTV medidos, na direção da compactação e na perpendicular a esta, são superiores aos patamares definidos. Note-se que, embora os valores de PTV e de CAT não sejam diretamente comparáveis, os primeiros podem ser tomados como um bom indicador dos segundos.



Na Figura 7 comparam-se ainda os valores de MTD com os limites estabelecidos por Fernandes [6], verificando-se que os valores médios medidos nas zonas sujeitas a 130 minutos de desgaste satisfazem os requisitos do patamar limite em todos os ambientes rodoviários referidos. O mesmo acontece para o patamar preventivo para os ambientes A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>. No ambiente A<sub>3</sub> todas a lajetas cumprem os requisitos do patamar preventivo à exceção de lajeta 2.1, a qual incorpora gnaisse.

Quadro 3. Limiares estabelecidos para o CAT e para o MTD [6]

| Ambiente       | Parâmetro | Preventivo | Limite |
|----------------|-----------|------------|--------|
| A <sub>1</sub> | CAT (%)   | 50         | 40     |
|                | MTD (mm)  | 0,5        | 0,4    |
| A <sub>2</sub> | CAT (%)   | 55         | 45     |
|                | MTD (mm)  | 0,5        | 0,4    |
| A <sub>3</sub> | CAT (%)   | 60         | 50     |
|                | MTD (mm)  | 0,6        | 0,5    |

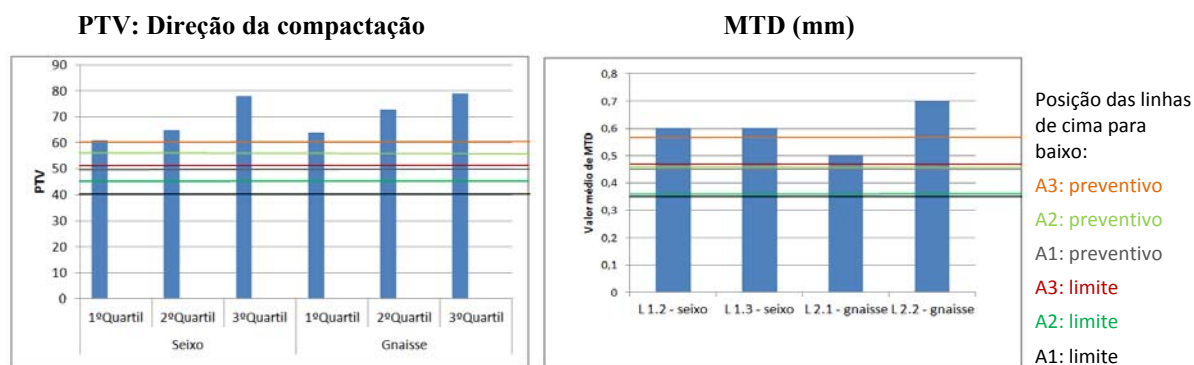


Fig. 7. Comparação dos valores de PTV e de MTD medidos com os limiares indicados em [6]

## 5 CONCLUSÕES

Os agregados utilizados em misturas betuminosas para camadas de desgaste são geralmente escolhidos com base no cumprimento de um conjunto de requisitos daqueles materiais constituintes. Pressupõe-se, assim, uma relação direta entre aqueles requisitos e o atrito superficial proporcionado pelas camadas de desgaste que os incorporam. Por essa razão, alguns tipos de agregados, como é o caso do seixo britado, têm sido menos utilizados em camadas de desgaste relativamente a outros.

No presente artigo foi possível mostrar que os agregados de seixo britado utilizados conduziram a níveis de atrito aceitáveis, e para algumas situações superiores aos obtidos para as misturas com agregados de gnaisse. Importa realçar que os agregados de seixo utilizados não cumpriam os requisitos geralmente referidos na bibliografia e nos cadernos de encargos, particularmente no que se refere à percentagem de partículas totalmente britadas e totalmente roladas. Com base nos resultados obtidos, será útil aprofundar o estudo da utilização de seixo britado como agregados para camadas de desgaste, de modo a que a sua utilização possa ser suportada de forma mais definitiva.

Verificou-se que os patamares de PTV definidos como valores mínimos (situação limite) e preventivos (nível de alerta) do atrito superficial de pavimentos em serviço, estabelecidos por outros autores para vários ambientes rodoviários, foram superados pelas lajetas produzidas, mesmo depois de sujeitas a uma ação de desgaste acelerada com 130 minutos de duração. Esta tendência foi verificada para todos os quartis dos valores de PTV, quer para os que foram medidos na direção da compactação, quer para os obtidos na direção perpendicular àquela.

No que diz respeito aos valores de MTD, medidos depois de 130 minutos de desgaste acelerado, satisfazem razoavelmente os requisitos estabelecidos para os vários ambientes rodoviários tomados como referência [6].

Assim, face aos resultados obtidos, é de recomendar o desenvolvimento e utilização de metodologias de avaliação laboratorial de desempenho, em termos de previsão do atrito [17], as quais possam servir para complementar, ou substituir, os requisitos habitualmente estabelecidos para os agregados. A prossecução desse novo paradigma, conjugado com um esforço dos produtores na melhoria de alguns parâmetros geométricos dos agregados de seixo britado, permitiriam potenciar a utilização daqueles agregados em condições de serviço exigentes. Isso levaria à sua utilização com vantagem nas zonas do país onde escasseiam outros agregados com maior aceitação para camadas de desgaste, reduzindo significativamente os custos e os impactes ambientais associados ao transporte longínquo de agregados.

## 6 REFERÊNCIAS

1. L. Bernucci; L. Motta; J. Ceratti; J. Soares, *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*, Rio de Janeiro, 2008.
2. F. Cruz, V. Mendes, *Apontamentos Teóricos de Introdução à Geotecnia*, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2011.
3. EP, *14.03 Pavimentação – Características dos Materiais*, Caderno de Encargos Tipo de Obra, Estradas de Portugal, S.A. Almada, 2011.
4. DGC, *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*, D.G. de Carreteras – Centro de Publicaciones – M. de Fomento, Madrid, 2004.
5. AFNOR NF XP P18-545. Granulats – Éléments de Definition, Conformité et Codification. Association Française de Normalisation, Paris, 2008.
6. A. Fernandes, *Programas de manutenção de características da superfície de pavimentos associados a critérios de segurança rodoviária*, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
7. J. Pinto, *Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.
8. J. Duarte, *Avaliação do Coeficiente de Atrito em Aeroportos Portugueses: O caso do aeroporto de Lisboa*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
9. Y. Delanne, M. Ghothié, Influence de l'état de mouillage sur les performances d'adhérence des pneumatiques. *Bulletin des Laboratoires des Points et Chaussées*, nº255, 23-34, 2005.
10. P. Pereira, V. Miranda, Impactes ambientais da irregularidade dos pavimentos rodoviários, *SIAIS – Simpósio Internacional*, Porto, 1999.
11. OCDE, *Road Surface Characteristics – Their interaction and their optimization*, France: OCDE Expert Group Road Transport Research, 1984.
12. Z. Tang, *Polissage et Adhérence des Chaussées Routières*, Tese de doutoramento, École Doctorale Matériaux, Ouvrages, Durabilité, Environnement et Structures, [s.l.], 2007.
13. D. Harwood, J. Mason, B. Kulakowski, K. Fitzpatrick, *Truck characteristics for use in highway design and operation*, Research Report FHWA RD-89-226, US Federal Highway Administration, 1989.
14. F. Branco, P. Pereira, L. Picado-Santos, *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra, 2008.
15. M. Bazlamit, F. Reza, Changes in Asphalt Pavement Friction Components and Adjustment of Skid Number for Temperature, *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 470-476, 2005.
16. E. Sardão, *Camadas de Desgaste Betuminosas com Incorporação de Seixo Britado – Análise de Alguns Parâmetros Relativos ao Atrito Superficial*, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2012.
17. A. Rezaei, E. Masad, Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 14:1, 24-35, 2013.