



Uso de novos materiais em forma de grelhas “Pré – betuminadas” para reforço de pavimentos Rodoviários

Eng. Filipe Dourado
Director Geral da S&P Clever Reinforcement Iberica Lda, Portugal

Eng. Josef Scherer
Director Geral da S&P Clever Reinforcement Company AG, Suíça

1. Introdução

O aumento do tráfego em carga e intensidade tem provocado o conseqüente aumento dos congestionamentos e paragens do trânsito rodoviário. Velocidades baixas e elevadas cargas manifestam-se especialmente em elevadas tensões nos pavimentos das redes viárias existentes. (Figuras 1, 2).

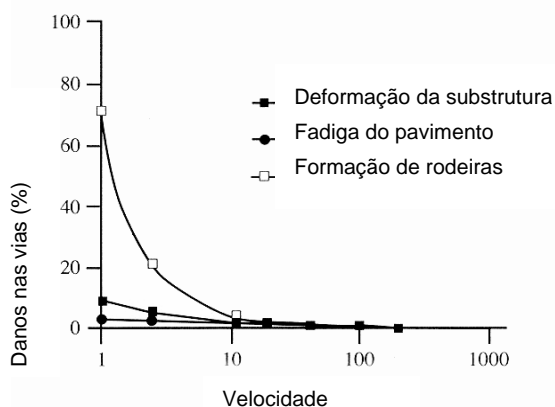


Figura 1: Influencia da velocidade

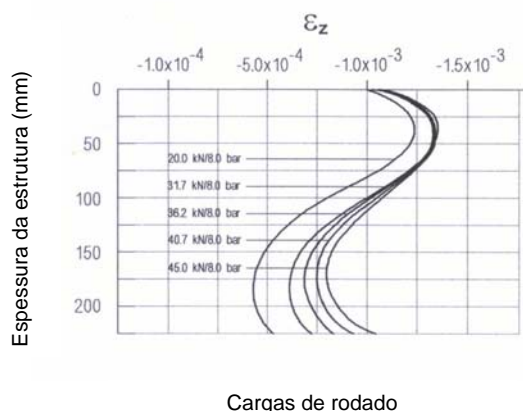


Figura 2: Influencia cargas dos rodados

Por esta razão vias rodoviárias existentes são reforçadas, integradas nas medidas de manutenção.

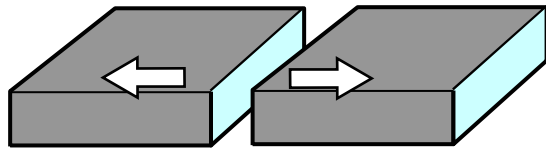
O objectivo essencial é aumentar a durabilidade, i.e. vida útil das superfícies viárias enquanto que minimizamos as futuras intervenções de manutenção necessárias.

O estado das vias rodoviárias existentes pode ser analisada de forma a qualificar os danos do pavimento.

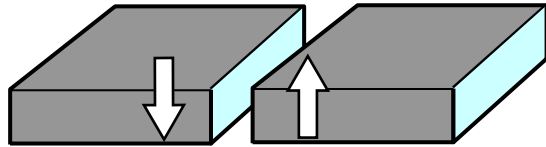
Padrão dos danos primários nas superfícies dos pavimentos rodoviários:

- **Deformação** Deformação plástica dos estratos de pavimento
Deformação estrutural das fundações e subsolo
- **Fissuração** Fissuras de fadiga sob cargas de tráfego
Fadiga térmica
Fissuras de reflexão
- **Danos superficiais**

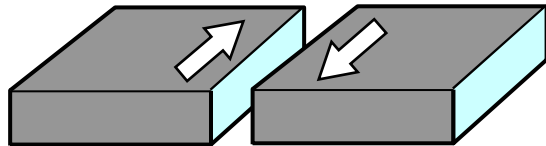
As medidas de manutenção específica são implementadas para prevenir futuros danos. Para evitar a deformação plástica dos estratos de pavimento, o conteúdo de betume dos novos estratos podem ser modificados. Uma das técnicas disponíveis é o uso de polímeros – modificados de alta resistência a deformações. Membranas de tracção (grelhas/grelhas intercalares) são usadas normalmente para prevenir deformações estruturais, fissuras de fadiga e fissuras de reflexão em pavimento existentes. Tendo em conta os vários mecanismos que têm um papel importante nos pavimentos de mistura betuminosa (Figura 3), as renovações deste tipo de pavimentos devem ser analisada sob conceitos apropriados de reparação.



Tracção ⇒ Reforço lateral



Corte vertical ⇒ Movimento livre através de uma concepção apropriada (SAMI intercalar)



Corte horizontal ⇒ Bloqueio de força através da colagem/monilitismo.

Figura 3: Mecanismos que actuam nos pavimentos ⇒ Técnicas apropriadas de reparação

2. Grelhas / SAMI membranas intercalares de absorção de tensões

A acção das grelhas de fibra de vidro ou aço são conhecidas. Estas grelhas são aplicadas a um pavimento existente fissurado, antes da instalação de nova camada de desgaste. Para atingir um valor elevado de aderência entre camadas, é estritamente necessário que a grelha se mantenha absolutamente estável durante a fase de instalação. A aderência das grelhas convencionais, de poliéster, polipropileno ou fibra de vidro, ao pavimento existente têm-se revelado insuficientes. A face superior das grelhas tradicionais (não – betuminada) tem um conteúdo insuficiente de betume, resultando numa aderência baixa entre esta superfície e a nova camada de revestimento. As deficiências na aderência entre camadas ocorrem especialmente nas zonas de sobreposição. Durante a fase de instalação, irregularidades no pavimento de base originam ondulações na estrutura na grelha. Este facto origina zonas de falha e problemas na camada de aderência. Existe uma probabilidade elevada de deslocamento da grelha durante a aplicação do novo pavimento, especialmente em zonas inclinadas, zonas apertadas e secções de trilhos de veículos de obra.

Uma nova geração de grelhas de vidro estão disponíveis a alguns anos. Pré-impregnadas em betume polimérico, estas grelhas são polvilhadas na superfície com areias calibradas de quartzo na face superior e fornecidas com uma folha de queima na face inferior. São instaladas de uma forma muito semelhante às bandas selantes de betume modificado. A excelente aderência previne todo e qualquer movimento durante a instalação do novo pavimento de revestimento. A adição de um betume polimerico em conjunto com a grelha “Pré-betuminada” garante uma camada de aderência apropriada. A interface de aderência resultante da impregnação de betume é outra vez dissolvida por intermédio das altas temperaturas ocorridas durante aplicação de nova camada de mistura de betume quente.

Os cordões individuais da grelha são abertos através do inerte do novo revestimento. Estes cordões são, por esse motivo, adaptáveis a uma larga granulometria de inertes e promovem o contacto ideal com o pavimento existente . Durante o processo de arrefecimento os cordões de fibra são perfeitamente integrados na matriz do novo estrato.

No ano 2001 foi aplicado numa obra a primeira grelha pré-betuminada de fibra de carbono em vez das grelhas de fibra de vidro tradicionais.

Existem basicamente dois tipos de reforço intercalar de pavimentos:

a. Grelhas intercalares de tracção.

Na prática , redes ou grelhas incorporando as seguintes fibras:

- Aço
- Poliéster / polipropileno
- Vidro
- Fibra de carbono (novo)

b. Geotêxteis impregnados com betume (SAMI)

A membrana SAMI (polipropileno-não-tecido) tem as seguintes propriedades:

- **Membrana intercalar de absorção de tensões**
(redução e redistribuição de tensões)
- **Selante de ingresso de água e sais**
(prevenção de penetração e ingresso de cloretos em betão)
- **Barreira de vapor evitando a ascensão de água sob forma de vapor por capilaridade**
- **Compensação de pequenos deslocamento verticais na vizinhança de juntas em betão**
(supressões em lajes de betão causadas por extensões térmicas que originem deslocamentos verticais)

Produtos combinados (grelhas/geotêxteis não-tecido) estão disponíveis no mercado. No caso destes produtos, a grelha actua numa função estática (reforço) enquanto que o geotêxtil não-tecido e a emulsão de aderência actuam como membrana SAMI. As fibras de elevado módulo de elasticidade podem absorver forças a um baixo valor de expansão (extensão) e são por essa razão utilizadas como grelhas de reforço. Fibras de baixo modulo sucumbem à expansão antes de conseguirem absorver qualquer força apreciável.

Outro factor importante e em voga, é a reciclabilidade dos pavimentos. Estas fibras não oferecem resistência a esforços de corte, pelo que são totalmente recicláveis, ao contrário das fibras de polipropileno ou metálicas.

Tipo de fibra	Modulo - E (N/mm²)	Extensão de rotura	Reciclabilidade da fibra (não absorção de forças de corte)	Notas
Carbono (C-fibre)	240,000	1.7 %	Sim	Apropriada para reforço de pavimentos
Aramida (A-fibre)	120,000	2.4 %	Não	Não apropriada para reforço de pavimento
Vidro (G-fibre)	65,000	3.5 %	Sim	Apropriada para reforço de pavimentos ou SAMI não-tecido
Poliéster (PES-fibre)	15,000	12.0 %	Não	Não apropriada para reforço de pavimento
Polipropileno (PP-fibre)	12,000	15.0 %	Sim	Apropriada como SAMI não-tecido
Aço (comparação)	210,000	~ 0.5 %	Não	<i>Não muito apropriada para reforço</i>

Tabela 1: Modulo-E / reciclabilidade das fibras / notas

A Tabela 1 evidencia que a fibra de carbono é essencialmente apropriada para reforço de pavimentos de mistura betuminosa. As SAMI não-tecidos intercalares preferencialmente feitas de fibra de vidro ou fibra de polipropileno. As fibras de vidro são apropriada como reforço ou membrana SAMI não tecido.

Longitudinal: baixo -custo fibra de vidro
 Transverso: elevado -custo fibra de carbono

As grelhas podem ser de três tipos:

- Grelhas puras pré -impregnadas em betume polimérico
- Grelhas / não-tecido
- Grelhas pre-betuminadas / não-tecido

Os produtos pré – impregnados de betume, designadas por pré-betuminadas, são ancorados por termo colagem à base através da queima do filme protector e fazendo rolar sobre a grelha pequenos rolos compactadores. Imediatamente após a passagem dos rolos, está pronta para a passagem de tráfego. As aplicações actuais demonstram que é praticamente impossível, por acção do tráfego, remover as grelhas pré-betuminadas. Um exemplo prático pode ser dado resumidamente:” Devido a uma incorrecta previsão do estado do tempo, a grelha pré-impregnada aplicada numa via com tráfego intenso foi exposta à chuva durante vários dias antes de ser aplicada a nova camada de desgaste. Durante este período, varias centenas de veículos passaram a baixa velocidade sobre a grelha saturada de água. A

superfície da grelha foi polvilhada com areia para garantir a necessária tracção na via até à instalação da nova camada de revestimento. Nenhum automobilista ou motociclista reclamou da aderência dos rodados sobre a superfície da grelha”.

3. Informação geral sobre fibras de carbono (C-fibre)

As fibras de carbono são um material de construção com provas dadas na indústria aeroespacial. As fibras de carbono de elevada densidade aparente (aproximadamente 1700 kg/m^3) e elevada resistência à tracção (aprox. 3000 a 5000 N/mm^2) têm tido aplicações interessantes nesta indústria muito antes destas terem sido introduzidas no campo da Engenharia Civil. Os materiais sintéticos de reforço têm promovido um impulso inovador em projectos de peças resistentes estéticas e construções híbridas. A fibra de carbono é utilizada nas mais variadas combinações para reforço interno e externo de estruturas resistentes. Devido a sua versatilidade e propriedades mecânicas favoráveis, as fibras de carbono têm vindo a ser usadas, com um crescimento de forma exponencial, em reforço de estruturas de betão armado. Daqui a poucos anos, a preservação estrutural na Europa predominará na medida em que os projectos de Construção nova na área da engenharia civil baixaram para menos de 50%. Não obstante, alterações nos padrões de utilização, danos nos componentes, e erros ocorridos durante a fase de planeamento e implementação, também geraram a necessidade da criação de requisitos para o reforço estrutural de betão armado.

A introdução bem sucedida das fibras de carbono a um nível prático, estabeleceu bases importantes que permitem desenvolvimento adicional deste material em outras aplicações na Engenharia Civil. O mais recente desenvolvimento inclui as grelhas “Pré-betuminadas” de carbono e fibra de vidro para reforço de pavimentos rígidos ou flexíveis em vias de comunicação.

4. Pavimentos de mistura betuminosa reforçados e encarados como um material de construção compósito

O betão armado é o material compósito mais conhecido na área da Engenharia Civil. Neste caso, os elementos de reforço, de torção livre, são embebidos na matriz do betão. A tabela 2 compara o Modulo – E dos componentes do betão armado.

Modulo - E da matriz	Modulo - E do elemento tencionando	Relação Modulo - E entre a matriz & elemento tencionado
Betão	Aço	BA (Betão Armado)
20 – 30 kN/mm ²	210 kN/mm ²	~ 1 : 10

Tabela 2: Relação entre o Modulo de elasticidade da matriz e elemento tencionado.

A tabela 4 compara o Modulo -E de várias camadas de pavimento reforçadas. O modulo E de um pavimento de mistura betuminosa tem um valor compreendido entre 3 - 30 kN/mm², dependendo da temperatura ambiente. O Modulo E de uma grelha de fibra é sempre mais baixo que o Modulo -E teórico da fibra. A configuração da grelha resulta num menor arranjo da fibra do que seria o ideal. Adequadamente, é aplicado um factor de redução ao módulo de elasticidade teórico da fibra na fase de dimensionamento (Tabela 3).

Factor de redução recomendado = **1.5**

	Modulo E da fibra	Modulo E da grelha de fibra
Fibra de carbono	240,000	160,000
Fibra de vidro	70,000	47,000
Fibra de poliéster	15,000	10,000

Tabela 3: Redução do modulo elástico da fibra

O Modulo-E reduzido da fibra pode ser usado para a seguinte tabela de comparativa.

Modulo -E da matriz	Modulo -E do elemento tencionado	Relação entre matriz & elemento tencionado
Pavimento betuminoso	Grelha fibra carbono 160 kN/mm ²	~ 1 : 18
Valor médio:	Fibra de vidro 47 kN/mm ²	~ 1 : 5
9 kN/mm ²	Grelha poliéster 10 kN/mm ²	~ 1 : 1

Tabela 4: Relação entre o modulo E da matriz e elemento tencionando no reforço de pavimentos betuminosos.

A comparação na tabela 4 claramente indica que a presença da fibra de poliéster no reforço de pavimentos não aumenta a resistência a flexo-tracção. As grelhas de fibra de vidro são marginalmente efectivas como reforço contra tensões de flexo-tracção. Por contraste, a fibra de carbono aumenta a resistência à flexo-tracção dos pavimentos de mistura betuminosa, e por essa razão também melhora a capacidade de carga da camada de pavimento reforçada. Desnecessário será dizer que, os melhoramentos na capacidade de carga só podem ser atingidas com um dada instalação de resistência ao corte nas membranas tencionadas nos pavimentos

multi-camada. A aderência de corte dos pavimentos multi-camada reforçados têm que ser eficientes.

As propriedades da rega de aderência são especificadas pelo fornecedor do sistema de reforço e monitorizada pela fiscalização ou supervisor dos trabalhos.

As camadas de reforço de pavimento são dimensionadas de acordo com a secção transversal teórica da fibra.

$$\text{Espessura teórica da grelha de fibra (lateral)} = \frac{\text{Peso da fibra (ao longo do eixo lateral)}}{\text{densidade da fibra}}$$

As fibra de carbono em forma de grelha contem 85 g/m² de fibra –C ao longo do eixo lateral .

Então :

$$\text{Espessura teórica da fibra} = \frac{85 \text{ g/m}^2}{1.7 \text{ g/cm}^3} = 0.050 \text{ mm}$$

Resultando :

$$\text{Secção transversal teórica da fibra C 1000 mm largura} = 1000 \times 0.050 = \underline{50 \text{ mm}^2/\text{m}}$$

Então: Factores de dimensionamento lateral para reforço com fibras-C:

Secção transversal:	50 mm ² /m
Resistência a tracção:	~ 4000 N/mm ²
Força de tracção lateral:	<u>200 kN/m</u>

Modulo -E: 160 kN/mm² (factor de redução 1.5)

5. Interface de aderência de pavimentos reforçados

A grelha intercalar só é eficiente se estiver apta de receber e absorver as tensões geradas na estrutura circundante. Em consequência, a aderência da grelha com o substrato e camada de revestimento têm um papel relevante no desempenho do reforço. De acordo com Leutner, pavimentos multi-camada usualmente necessitam de suportar forças de corte entre 10 – 15 KN (amostras de diâmetro 15 mm). Esta gama de valores também se aplica a pavimentos reforçados multi-camada. A experiência tem revelado que a interface de aderência vai melhorando com a maturação da camada de revestimento. Em consequência , é ajustado especificar uma gama de 10 – 12 kN de aderência ao corte para pavimentos multi-camada com três meses de “idade”.

A Consultest AG, um instituto de testes de materiais em Ohringen, Suíça, examinou as propriedades de aderência de várias camadas de pavimentos reforçados. Um pavimento existente de 6 cm de espessura foi fresado até 3 cm sendo depois recoberto com uma camada de revestimento de 3 cm de espessura (11 mm de diâmetro de inerte). Uma rega de aderência (tack coat) com dosagem de 150 – 200 g/m² foi aplicada antes da grelha. O revestimento foi aplicado usando equipamento convencional pavimentação e compactação. Foram instaladas como grelha

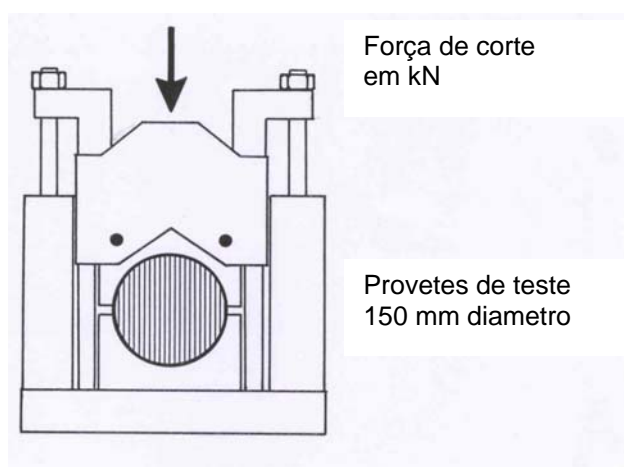
intercalar de reforço as grelhas pré-impregnadas de betume (“ Pré-betuminadas”)de fibra de carbono e não impregnadas de fibra de vidro; seguindo-se os testes de interface de aderência (Tabela 5)

Designação do modelo	Grelha intercalar
O	<i>Nenhuma</i>
G	“Não-betuminada” grelha de fibra de vidro
C	“Pré-betuminada” grelha de fibra de carbono

Tabela 5: Quadro sumario dos testes

Configuração dos testes:

Como parte integrante do teste, amostras cilíndricas com diâmetro de 150 mm foram removidas do pavimento com duas camadas e guardadas numa câmara climática a 20 °C durante um período de 8 horas. Os cilindros foram então submetidos aos ensaios de corte de acordo com Leutner (Figura 4). A força de corte composta (KN) na fronteira das camadas é usada como termo de comparação das propriedades de aderência (Tabela 6).



Os testes de corte são efectuados no plano da interface de aderência .

Designação da amostra	Força de corte composta (kN)
Amostras O (Sem rede embutida)	9.7 / 14.3 / 17.5
Amostras G (com grelha de fibra de vidro sem revestimento de betume)	Valor médio 2.8
Amostras C (com grelha de fibra de carbono “pré-betuminada”)	Valor médio para a aplicação de uma camada simples 12.9

Tabela 6: Forças de corte

Figura 4: Aparato de teste de aderência entre camadas

Interpretação dos resultados:

O modelo C da camada simples com *fibra de carbono* “pré-betuminada” exhibe o mesmo valor de aderência das camadas não reforçadas. Conclui-se que as grelhas “pré-betuminadas” embebidas não reduziram o nível de aderência na interface. As grelhas de fibra de vidro (modelo G) sem pré impregnação de betume exibiram uma redução de aderência na interface. As roturas durante o teste de aderência ao corte deram-se entre a camada nova e a superfície da rede nos casos das redes não pré-impregnadas de betume (modelos G). Devido à cobertura parcial, promovida pela grelha, do agente de aderência (tack coat) previamente aplicado, constatou-se que uma inadequada quantidade deste agente de aderência no novo pavimento de revestimento ou na superfície superior da grelha. Este facto reduz a aderência entre camadas no caso das grelhas não pré-impregnadas de betume. Centenas de verificações foram efectuadas a posteriori na obra confirmando os resultados preliminares obtidos em laboratório para a grelhas “pré-betuminadas”.

6. Agente de aderência (Tack coat) sob a rede intercalar

Em **dias quentes de verão**, é necessária uma rega de aderência especial com uma emulsão de betume de boa qualidade e betume relativamente rígido (com um índice elevado de penetração e elevado ponto de amolecimento, tabela 7) sob as rede intercalares da S&P.

<i>Emulsão</i> (tipo CR60 P)	Índice de penetração (EN12591) > 0.2	Ponto de amolecimento (SNEE 1427) > 47.0 ° C
---------------------------------	--	--

Tabela 7

Uma emulsão de aderência (tack coat) que preencha os requisitos da tabela 7 é adequada para aplicações a temperaturas elevadas. Antes de ser aplicada em grandes áreas, a emulsão deve ser de preferência aquecida a uma temperatura de 50 – 60 °C.

As considerações técnicas de projecto devem ter em conta a especificação técnica para a emulsão de aderência.

A quantidade de emulsão de betume requerida depende a rugosidade do substrato.

Sub base	Quantidade de emulsão (<i>emulsion G CR 60 P</i>)
Pavimento sub base	~ 300 - 400 g/m ² (emulsão 60 %)
Sub base com pavimento fresado	~ 400 - 500 g/m ² (emulsão 60 %)

Tabela 8

Na aplicação de 400 g/m² de emulsão betuminosa S&P (quantidade efectiva de betume de 240 g/m²), a emulsão mantém-se aberta à transmissão de vapor.

Se a rede intercalar for aplicada em zonas de sombra ou dias frescos, o problema do amolecimento da emulsão não ocorre. Nestes casos, é importante que emulsão tenha uma ruptura num período de tempo razoável para que se instale a rede intercalar sem problemas inconvenientes.

Emulsões de aderência em pavimentos de betão

As emulsões de aderência em pavimentos de betão são seleccionadas de acordo com diferentes critérios. O volume capilar dos poros de betão em pavimentos rodoviários é normalmente 3 – 4 vezes superior à porosidade de um pavimento de mistura betuminosa. Se os poros capilares do betão se encontrarem saturados aquando da instalação do novo pavimento, é usado um pavimento denso do tipo SMA (Stone Mastic asphalt) ou um pavimento betuminoso de reduzida espessura aplicado a quente, evitando-se assim os inconvenientes originados pela formação de vapor de água que pode, sob pressão, criar bolhas na camada de mistura betuminosa de revestimento. Pavimentos especiais de baixa porosidade devem sempre ser instalados em conjunção com uma barreira de vapor SAMI. Adicionalmente, a humidade residual da base em betão deve ser monitorizada e limitada antes da instalação do SMA ou da camada fina de mistura betuminosa quente. Existem, para este efeito, grelhas com geotêxtil não tecido integrado, são instaladas com 70 % de emulsão de betume polímero modificada (1.5 kg/m²). Este conteúdo de betume no sistema SAMI actua como uma barreira de vapor e previne eficientemente a formação de bolhas.

7. Grelhas intercalares para prevenir a formação de fissuras

As fissuras em pavimentos podem ser causadas por múltiplos factores, os principais apresentam-se na lista seguinte:

- **Fissuras de fadiga**
 - Progredindo de baixo para cima (típica)
 - Progredindo de cima para baixo (Camiões 40-t / pneus novos)
- **Fissuras térmicas**
 - Exposição a intensos ciclos alternados de gelo e degelo origina tensões térmicas elevadas.
- **Insuficiente substruturas / subsolo**
 - Perda de capacidade de carga do subsolo
 - Inadequada compactação de substruturas
 - Pós-compressão do subsolo com elevado conteúdo de argila
- **Defeitos construtivos**
 - Imperfeições nas juntas
 - Problemas de aderência
 - Capacidade de carga variável (condutas / drenagens etc.)
- **Envelhecimento do pavimento**

7.1 Fissuras de fadiga

Fissuras de fadiga em pavimentos de mistura betuminosa ocorrem como resultado da exteriorização de tensões (carga de rodados).

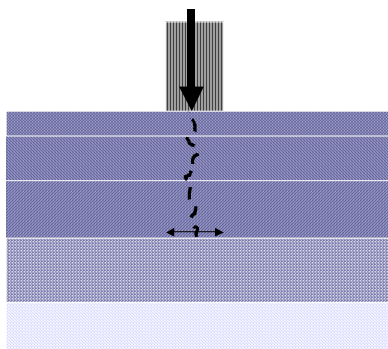


Figura 5: Formação típica de fissura de baixo para cima

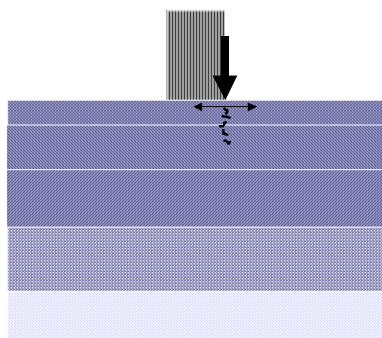


Figura 6: Formação de fissura de cima para baixo

O tipo de fadiga depende do tipo de pneus e sua pressão. A propagação de fissuras típica ocorre da base para o topo. Novos tipos de rodados e elevados ciclos de carga também originam fissuras de propagação inversa.

As Grelhas intercalares com fibra de vidro ou carbono firmemente instaladas no pavimento absorvem as forças de tracção que ocorrem na camada de desgaste e conseqüentemente retarda a formação de fissuras resultantes da acção das cargas aplicadas.

Os custos de manutenção do pavimento são respectivamente baixos, e a vida útil significativamente prolongada. O Netherlands Pavement Consultants (NPC) conduziu uma série de ensaios para avaliar a resistência das grelhas intercalares a fissuras de fadiga quando sujeitas a cargas cíclicas

Configuração do teste NPC :

Um pavimento com duas camadas de espessura total de 9 cm (3 cm + 6 cm) é carregado ciclicamente por intermédio de uma prensa de 4 pontos de apoio sobre uma viga com um vão de 500 mm. Durante o teste, a temperatura ambiente é mantida a 5 °C. São aplicadas cargas cíclicas (simulando as cargas dos rodados de um veículo) com uma frequência de 29.3 Hz controladas segundo os seguintes critérios:

Carga mínima: 50 N
Carga máxima: 4,500 N

Esta gama seleccionada de cargas simula as cargas típicas que ocorrem nas vias. É controlada a flexão da viga até à rotura do modelo ou até uma deformação irreversível de 35 mm em função do carregamento cíclico.

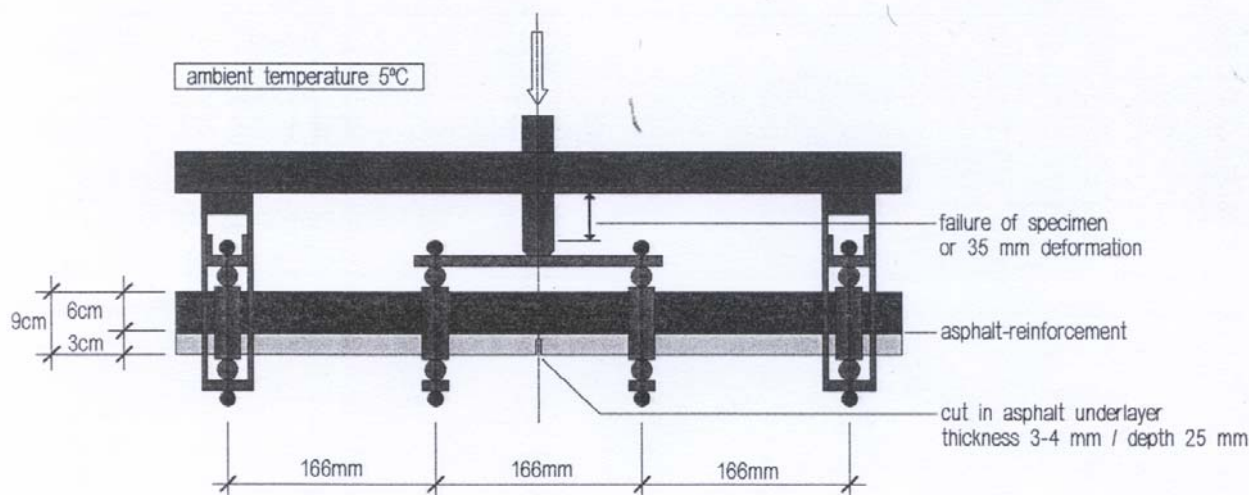


Figura 7: Configuração de testes NPC

A formação de fissuras de fadiga como resultado da aplicação de cargas cíclicas foi então registada. O ponto de início da fissura de fadiga é definido por um corte executado na base da viga modelo.

Durante o ensaio, um modelo de referência com duas camadas de pavimento foi comparado com os vários modelos de pavimentos reforçados de espessura idêntica (Tabela 9). Uma grelha intercalar não-tecido foi instalada entre as duas camadas de pavimento de acordo com as especificações do fabricante.

1	Modelo de referencia	Sem reforço
2	Não-tecido	Polipropileno, 140 g/m ²
3	Grelha PES	Poliéster, 60 kN/m (longitudinal e transversal)
4	Pre-betuminada Grelha GF	Fibra de vidro, 120/120 kN/m (longitudinal / transversal)
5	Pre-betuminada Grelha CF	Fibra de vidro, 120 kN/m (longitudinal) Fibra de carbono, 200 kN/m (transversal)

Tabela 9: Resumo dos modelos

Resultados:

Os resultados para verificar o efeito retardante das grelhas intercalares não-tecido na propagação de fissuras apresentam-se na *Tabela 10 / Figura 8*. A propagação de fissuras atravessando a camada superior origina deformações irreversíveis ou rotura do modelo de ensaio. Os resultados expõem informação sobre a resistência à fadiga dos pavimentos sob cargas cíclicas.

		Numero de ciclos até à rotura ou 35 mm de deformação	Resistência à fadiga sob carga constante
1	Modelo de referencia	± 30,000	1 x
2	Não-tecido	~ 70 – 75,000	2 – 2.5 x maior que o modelo de referência
3	Grelha de Poliéster	~ 90,000	3 x maior que o modelo de referência
4	Pré-betuminada Grelha GF	~ 180 – 185,000	6 x maior que o modelo de referência
5	Pré-betuminada Grelha CF	~ 1,000,000 – 1,150,000	35 x maior que o modelo de referência

Tabela 10: Resumo dos resultados

As amostras de pavimentos de mistura betuminosa reforçadas com grelha pré-betuminada de fibra de vidro exibiram uma elevada resistência à propagação de fissuras sob cargas cíclicas. A resistência à fadiga de pavimentos reforçados com fibras de carbono é teoricamente 35 vezes superior do que os pavimentos não reforçados. Para permitir a absorção de forças pela fibra de carbono, é absolutamente necessário garantir uma aderência perfeita entre as duas camadas de pavimento. Durante os testes, foi aplicada 300 gr/m² de uma emulsão betuminosa antes da colagem por queima da grelha intercalar. A Figura 8 indica claramente que a fibra de carbono é capaz de absorver as forças de tracção resultantes da simulação de cargas cíclicas dos rodados. As tensões induzem forças de corte entre as camadas de pavimento superiores e inferiores. Uma aderência inadequada pode dar origem a propagação de fissuras ao longo da superfície de contacto das duas camadas de pavimento e mais tarde na zona fronteira do final da grelha intercalar. O elevado módulo de elasticidade das fibras de carbono permite que as grelhas deste material absorvam forças imediatamente após a sua solicitação. As aplicações locais de fibras de Carbono podem dar origem a uma probabilidade elevada de formação de fissuras de reflexão na extremidade da grelha intercalar, por essa razão, toda a área do pavimento deve ser coberta com o reforço de fibra de carbono. São possíveis reforços locais no caso de materiais de baixo módulo elástico como as grelhas de fibras de vidro “pré-betuminadas”.

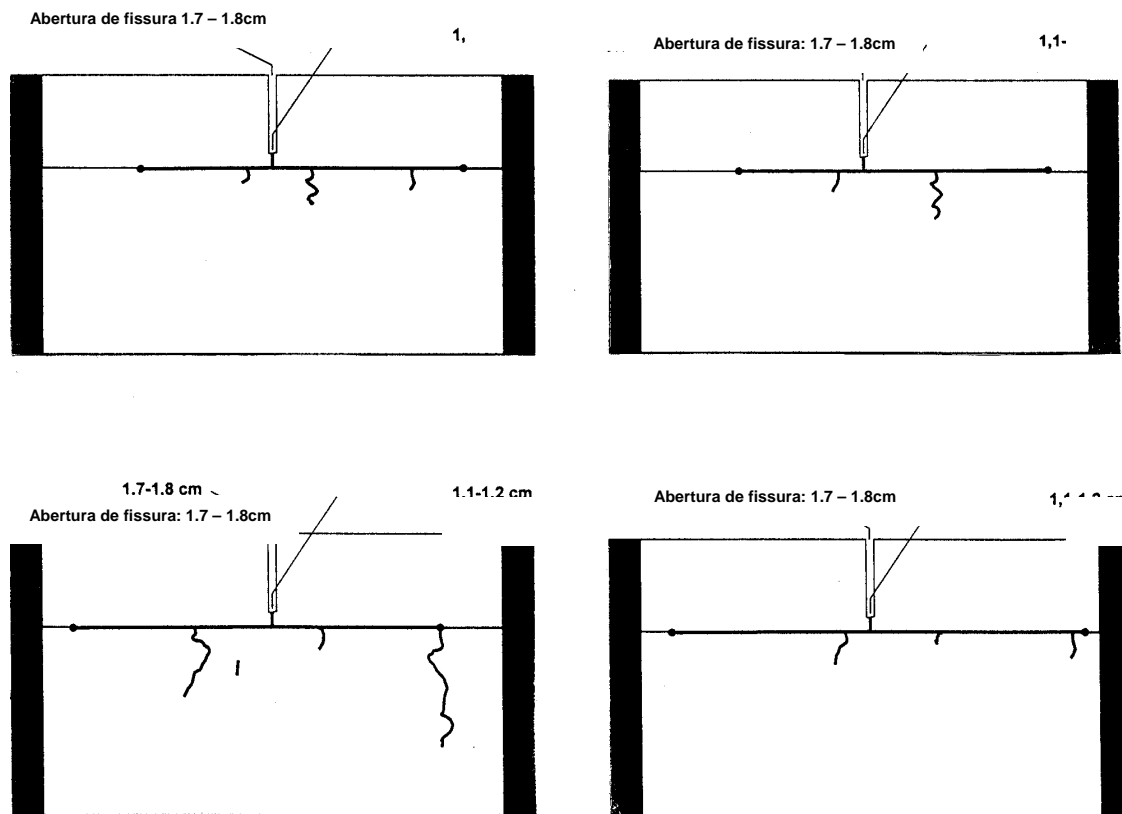


Figura 8: Diferentes estágios de formação de fissuras na rotura das amostras reforçadas com S&P Carbophalt sob carregamento cíclico .

7.2 Reflexão de fissuras devido aos ciclos de gelo e degelo

As fissuras térmicas têm origem nas flutuações diárias de temperatura. Os ciclos de gelos e degelo transferem especialmente elevadas tensões aos pavimentos de mistura betuminosa. Vias que foram previamente expostas a uma temperatura constante sob uma camada de neve isoladora, depois de limpas estão sujeitas a extremas tensões no Inverno, ciclos de gelo e degelo ocorrem várias vezes durante o dia nestes pavimentos. O Belgian Road Research Center conduziu um programa de testes para determinar a resistência das diferentes tipos de grelhas intercalares não-tecido à propagação de fissuras de reflexão, dos pavimentos existentes às novas camadas de revestimento, reproduzindo ciclos de gelo e degelo.

Os testes standards foram executados de forma a comparar a acção das seguintes grelhas intercalares:

- Polipropileno não-tecido (PP)
- Grelha de poliéster (PES)
- Grelha pré-betuminada de fibra de vidro
- Grelha pré-betuminada de fibra de carbono

Foram comparados os resultados obtidos com um modelo de referência não reforçado com secção transversal idêntica. Foi aplicado nos provetes uma camada de revestimento de 7 cm sobre a camada de pavimento pré-fissurado. A secção de testes foi compactada a uma escala real e só depois foram retiradas as amostras reduzidas para a execução dos provetes de ensaio. A fissura existente no pavimento existente foi simulada por execução de um corte na face inferior da amostra de ensaio. Os ciclos de gelo e degelo foram então simulados no pavimento pré-fissurado a uma temperatura de -10°C (*Figura 9*). A abertura da fissura (1 mm por ciclo) corresponde a expansão teórica do volume de água contido na fissura simulada. A abertura de fissura é regulada pelo controle de líquido que é alternativamente congelado e descongelado. Esta série de testes forma executados de forma a determinar a propagação de fissuras existentes de pavimentos antigos para as novas camadas de revestimento em função das tensões instaladas pelos ciclos (*Figura 10 / Tabela 11*).

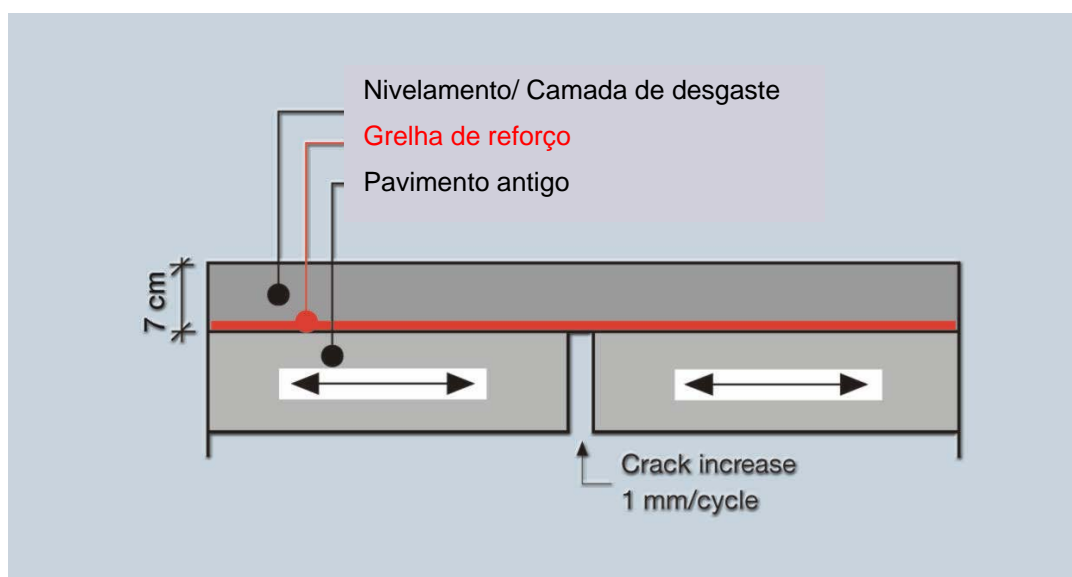


Figura 9: Configuração de teste do Belgian Road Research Centre

Resultados dos testes:

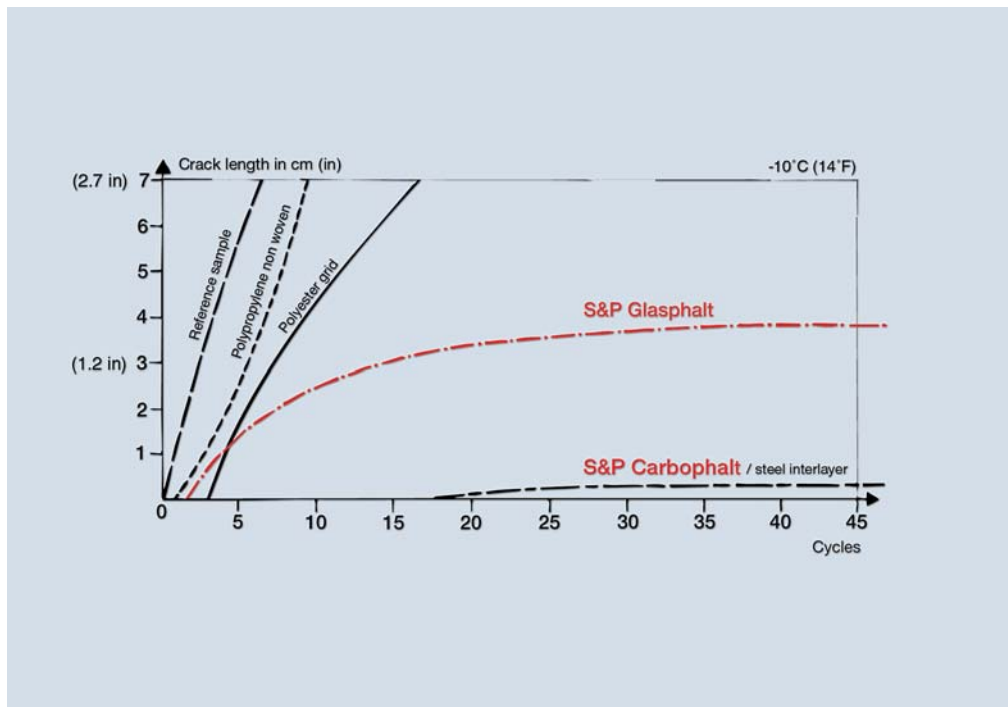


Figura 10: Resultados dos testes do Belgian Road Research Centre: este diagrama regista a propagação de fissuras em função da deformação horizontal.

Nos modelos não reforçados, a propagação de fissuras atingiu a superfície depois de 6 ciclos de gelo-degelo. A grelha de poliéster e as grelhas intercalares não-tecido foram ineficazes na prevenção de propagação de fendas devido ao seu baixo módulo de elasticidade. A fissura no pavimento reforçado com fibras de polipropileno não-tecido propagou na espessura total ao final de 10 ciclos, enquanto que o pavimento reforçado com poliéster resistiu até aos 18 ciclos. Por contraste, a “S&P Glasphalt pré-betuminada preveniu a propagação total da fissura do pavimento antigo para o novo pavimento. A fissura apenas atravessou 3-4 cm na nova camada de pavimento. A partir deste ponto a grelha de reforço passou a absorver as tensões adicionais, prevenindo assim o avanço da propagação da fissura. Na prática, é aconselhável instalar uma espessura de 4cm de novo pavimento sobre a grelha intercalar. A grelha de reforço Pré-betuminada de fibra de carbono da S&P praticamente estancou a propagação de fissura na camada de revestimento. Neste caso as tensões são absorvidas directamente pela fibra transferindo-as na forma de tensões de corte através da interface de aderência. Este facto permite a aplicação de camadas finas de asfalto quente sobre as grelhas de carbono.

Grelhas intercalares no pavimento	Modulo -E (N/mm²)	Numero de ciclos de gelo/degelo	Profundidade de propagação de fissura no novo pavimento	Espessura mínima de camada de revestimento para prevenir fissuras de reflexão
Não	--		Propagação total	Não pode ser prevenida
Polipropileno não-tecido	12,000	6	Propagação total	Não pode ser prevenida
Grelha poliéster	15,000	10	Propagação total	Não pode ser prevenida
Grelha Pré-betuminada Fibra de vidro (GF)	65,000	Teoricamente ilimitada	3 – 4 cm	4 - 5 cm
Grelha Pré-betuminada Fibra de carbono (CF)	240,000	Teoricamente ilimitada	~ 0.5 cm	2 cm
Rede de aço	210,000	Teoricamente ilimitada	~ 0.5 cm	5 – 6 cm de revestimento necessário.

Tabela 11: Resumo dos resultados

7.3 Grelhas para reflexão de fissuras

Fissura de todo o tipo tais como

- Fissuras térmicas
- Fissuras de fadiga
- Juntas de acabamento
- Juntas em betão
- Fissuras longitudinais e transversais resultantes de sub-bases estabilizadas etc.

são reflectidas para a superfície através da nova camada de pavimento, dando origem a manutenções com intervalos muito curtos. Negligenciar estas manutenções leva a danos e roturas prematuras na nova camada.

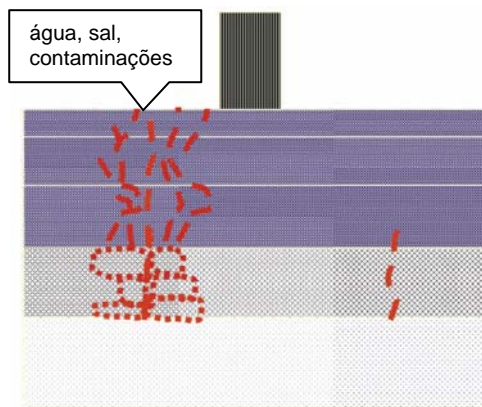


Figura 11: Origem das fissuras de reflexão

As grelhas exibindo um módulo elástico elevado e garantida a aderência por corte entre as duas camadas de pavimento reduzem significativamente a reflexão de fissuras aumentando a vida útil do pavimento.

Dependendo do número de fissuras existentes, o reforço pode ser aplicado localmente usando Fibra de vidro ou em toda a via com fibra de carbono.

8. Aumento da capacidade de carga recorrendo ao reforço com grelhas de fibra Carbono.

No Outono de 2003, foi testada a capacidade de carga da auto-estrada entre Andermatt-Hospental na Suíça antes da aplicação de uma nova camada de 4-cm de espessura reforçada com grelha de fibra de carbono “pré-betuminada”. As medições foram realizadas com um deflectómetro no eixo traseiro e com uma carga de 10 t.



Ilustração 1: Veículo de ensaio Lacroix e viga na posição de medição

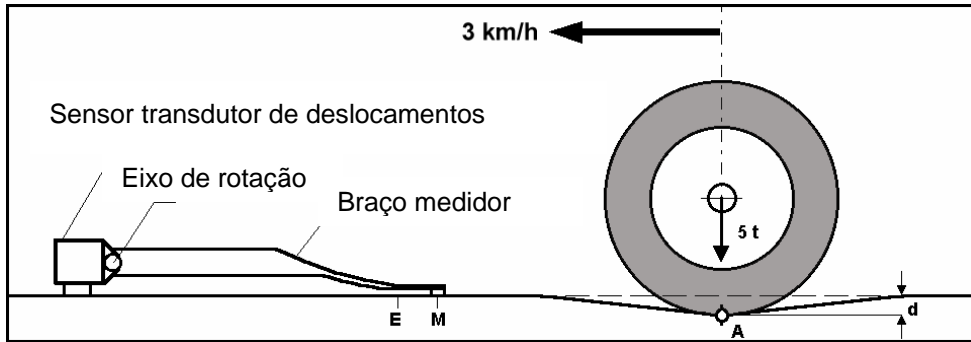


Figura 12: Princípio de funcionamento das medições de deflexão.

As medições de deflexão foram feitas em 5,5 metros de intervalo sobre todo o comprimento da via $2 \times 1.9 \text{ km} = 3.8 \text{ km}$. As medições principais estão ilustradas na Figura 12. Para avaliação dos resultados, a via testada foi dividida em secções homogéneas. Secções foram então registadas em gráfico conjuntamente com os parâmetros característicos da deflexão. (dv, 1/100 mm).

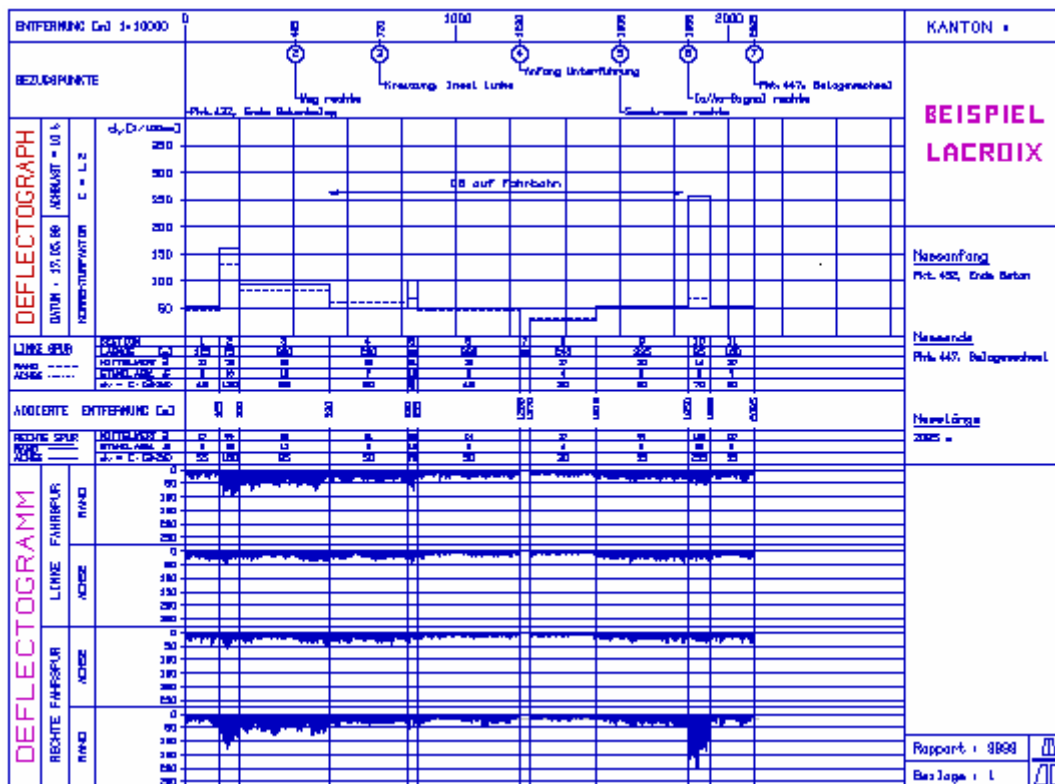


Figura 13: Excerto do gráfico representativo dos resultados.

Num número determinado de secções, foi instalada fibra de carbono como grelha intercalar sob uma nova camada de pavimento de 4 cm. Os valores de redução de d_v teórico esperado para uma nova camada de 4 cm (sem reforço) serviram como base para o dimensionamento do efeito de reforço da grelha intercalar de carbono. A tabela de Lacroix exhibe as medições do efeito de reforço de 4 cm de revestimento de mistura betuminosa e a grelha de fibra de carbono na vizinhança do eixo da via.

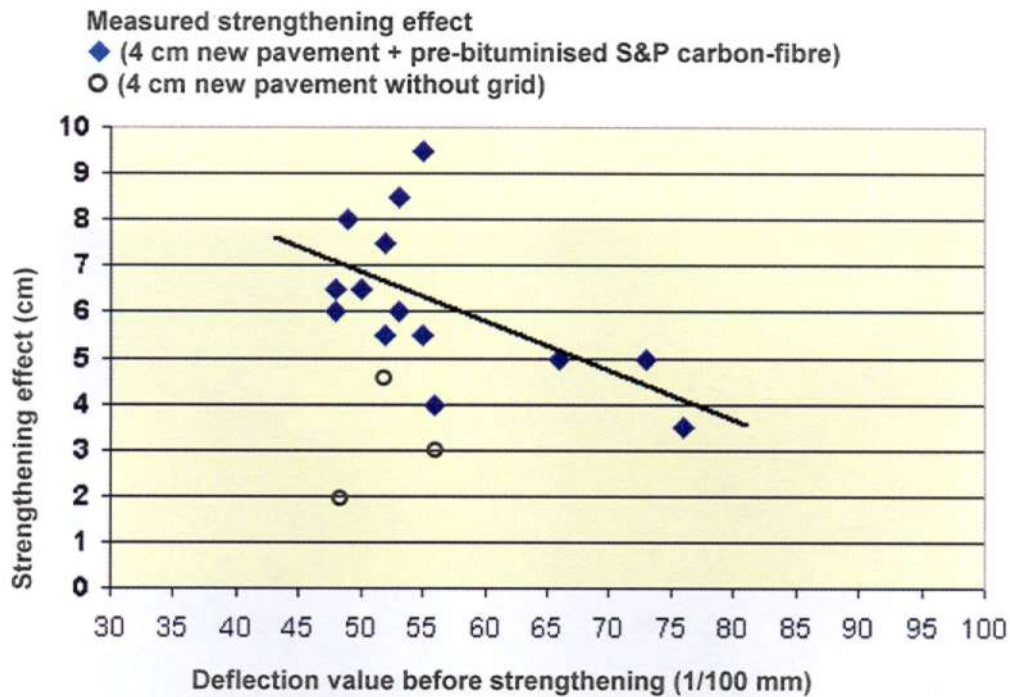


Figura 14: Resultados Lacroix

O efeito da grelha de fibra de carbono é equivalente a 3 cm de espessura de uma nova camada pavimento. Uma clara influência da grelha de carbono só pôde ser verificada no centro da via. Uma das razões pode ser a inexistência de abatimento na vizinhança dos rodados.

9. Pavimentos de espessura delgada reforçados com grelhas de fibra de Carbono.

Valor estrutural

O valor estrutural designado como SN (cm) é usado em alguns países como base para o dimensionamento de parâmetros de construção. O valor estrutural decisivo para uma secção de Estrada depende da classe de tráfego envolvida e dos coeficientes dos materiais (coeficiente de capacidade de carga da camada a). A Figura 15 compara as propriedades de diversos materiais de uma camada granular e camadas standard de pavimentos.

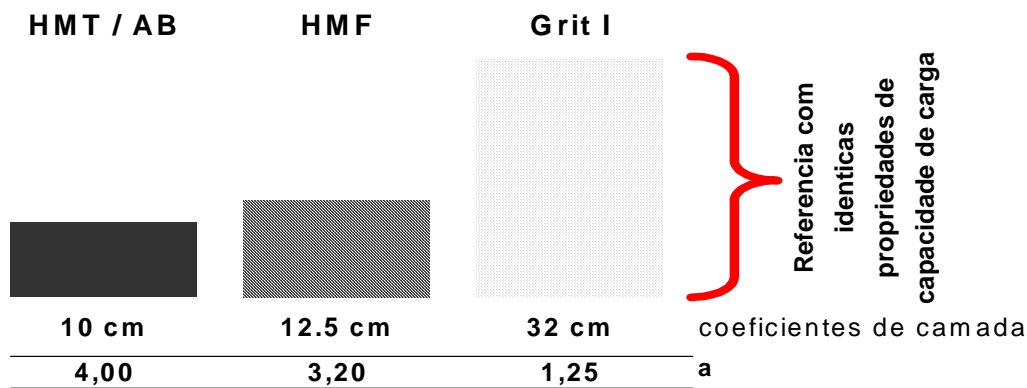


Figura 15: Propriedades dos materiais

O valor estrutural de camada das secções vai diminuindo com o envelhecimento do pavimento. (Figure 16).

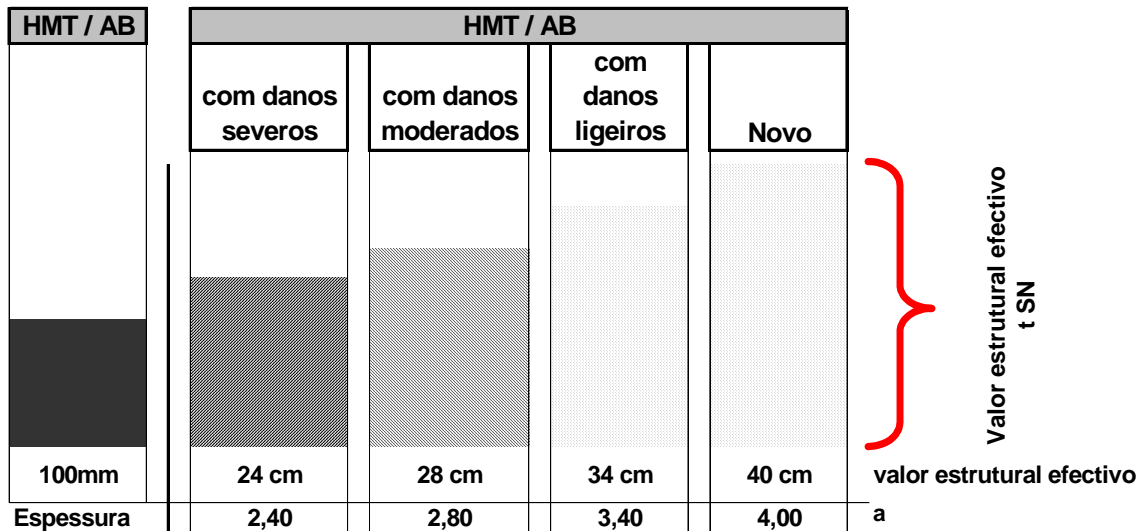


Figura 16: Comparação entre valor estrutural da camada e envelhecimento.

Medições de deflexão em pavimentos novos reforçados com grelhas de fibra de carbono demonstram que o efeito de reforço da fibra de carbono é equivalente a 3 cm de espessura de uma camada de novo pavimento de mistura betuminosa.

Podemos então concluir que: **Grelha de CF** \Rightarrow a (3-cm de camada nova) = 12

Pode-se fazer uma comparação de custos baseada nesta assumpção.

Comparação de custos

Fazendo uma comparação entre duas variantes de manutenção com custos médios aplicados na Europa:

Variante A (tradicional)

Fresagem de camada de desgaste (3.5 cm) e camada de regularização (8.5 cm); restituição com um pavimento estrutural idêntico.

Variante B (camada fina reforçada)

Fresagem da camada de desgaste (3.5 cm). Posterior reforço da totalidade da superfície com grelha de fibra de carbono. O novo pavimento consiste numa camada de asfalto quente de qualidade high-grade (DAS 8PmB-E) com 3.5 cm espessura.

Devido ao facto de nos dois casos, a camada de desgaste ser reposta com uma camada de espessura idêntica, a avaliação comparativa, da influência da reposição da camada de regularização (binder) ou a grelha de fibra de carbono, para o valor estrutural é relevante

		Avaliação da capacidade de carga da superestrutura							
Exemplo:	cm	a (danos ligeiros)		a (danos moderados)		a (danos severos)		a (estado novo)	
Camada de desgaste exist.	3,5	3,4	11,90	2,8	9,80	2,4	8,40	4,0	14,00
Camada de base existente	8,5	3,4	28,90	2,8	23,80	2,4	20,40	4,0	34,00
Total SNxst			40,80		33,60		28,80		48,00
Diferença ao estado novo			7,20		14,40		19,20		-
Diferença no pavimento de base			5,10		10,20		13,60		-
Dimensionamento com grelha de FC a 12.0		12,0	6,90	12,0	1,80	12,0	-1,60	12,0	12,00
Melhoramento no valor estrutural SN (cm)			+ 6.90		+ 1.80		- 1.60		+ 12.00

Tabela 12: Cálculo do valor estrutural

A comparação de custos seguinte (Tabela 13/14) em Euros revela claramente as vantagens em custos da solução da camada de desgaste reforçada

Custos da variante A: Reposição tradicional de camadas

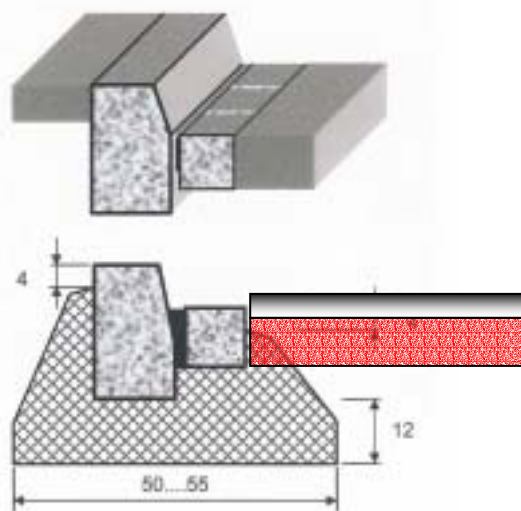
Pavimento: 6.50 x 350.00 m	Espessura	Unid	Quantidade	Preço Unit	Total
Fresagem	12 cm	m2	2.275,00	2,00	4.550,00
Manuseamento e transporte a vazadouro		t	655,00	6,25	4.093,75
Limpeza		m2	2.275,00	0,48	1.092,00
Emulsão de aderencia (Tack coa)t		m2	2.275,00	0,55	1.251,25
Camada de regularização (Binder 0-22, 8.5 cm)	8.5 cm	t	464,00	47,00	21.808,00
Rega de aderencia para o novo pavimento		m2	2.275,00	0,55	1.251,25
Inst. de camada de desgaste 0-11 S, B 65	3.5 cm	t	192,00	85,90	16.492,80
Total					50.539,05

Custos da variante B: Camada fina reforçada

Pavimento: 6.5 x 350.00 m	Espessura	Unid	Quantidade	Preço Uni	Total
Fresagem	3.5 cm	m2	2.275,00	1,20	2.730,00
Manuseamento e transporte		t	192,00	6,25	1.200,00
Limpeza		m2	2.275,00	0,48	1.092,00
Emulsão de aderencia		m2	2.275,00	0,70	1.592,50
Intalação da grelha de Fibra de Carbono		m2	2.275,00	10,70	24.342,50
Int. de camada de degaste DAS 8 PmB-E	3.5 cm	t	192,00	95,00	18.240,00
				Total	49.197,00

Tabela 13/14: Comparação de custos. Esta comparação de custos não teve em conta sobre custos de restituição de juntas de lancil, bem como recolocação de tampas de esgoto e escoamento de águas no caso da versão variante tradicional.

Detalhe de remate a uma junta de lancil



No caso da solução tradicional (12 cm de espessura de fresagem), as caixas de escoamento, tampas de caixas de visita e juntas têm que ser repostas ou redimensionadas. Isto não é necessário com a solução de camada fina reforçada.

Detalhe de remate a caixa de visita



Figura 18: Detalhe de caixa de visita

No caso do método tradicional (12 cm de fresagem), as caixas de visita têm que ser rebaixadas durante a fase de construção a subsequentemente recolocadas ao novo nível. No caso do método da camada fina reforçada este trabalho é desnecessário, sendo apenas necessário substituir os elementos danificados.

Literatura de Referência

- Relatório técnico Netherlands Pavement Consultants bv, NPC No. 018463
- Relatório de testes do Centre de recherches routières Brussels, Belgium, EP 61530
- Relatório de testes do Consultest, Ohringen, Switzerland, 1119-02
- Relatório de testes do SACR, autumn 2003