

# TRANSPORTES

Capa > Edições anteriores > v. 7, n. 1 (1999)

IDIOMA

v. 7, n. 1 (1999)

Capa

## Sumário

Conselho Editorial

[PDF](#)

Sobre

[10.14295/transportes.v7i1.224](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.224)

Acesso

Cadastro

Editorial

[PDF](#)

Pesquisa

[10.14295/transportes.v7i1.225](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.225)

Atual

Artigos

Anteriores

[Um estudo experimental sobre os afundamentos nas trilhas de rodas de pavimentos delgados com basaltos alterados](#)

[PDF](#)

Notícias

Washington Peres Núñez, Jorge Augusto Ceratti, Suyen Nakahara, José Augusto de Oliveira

[10.14295/transportes.v7i1.218](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.218)

Submeter manuscrito

[Modelo para formação de composições ferroviárias](#)

[PDF](#)

Liége M. S. Firmino Murgel, Nicolau D. Fares Gualda

[10.14295/transportes.v7i1.219](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.219)

USUÁRIO

Login

Senha

Lembrar usuário

Acesso

[Avaliando o impacto atual e futuro de um pólo gerador de tráfego na dimensão de uma rede viária abrangente](#)

[PDF](#)

Helena Beatriz Bettella Cybis, Luis Antonio Lindau, Davi Ribeiro Campos de Araújo

[10.14295/transportes.v7i1.220](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.220)

[Mobility management – o projeto Momentum](#)

[PDF](#)

[10.14295/transportes.v7i1.221](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.221)

Resenhas

[The logic of logistics: theory, algorithms and applications for logistics management](#)

[PDF](#)

[10.14295/transportes.v7i1.222](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.222)

ARTIGOS POPULARES

- A percepção do especialista sobre o...
- Definição de transporte: uma reflexão...
- Faixas adicionais para acíves de...
- Reciclagem e sustentabilidade...
- Revisão da literatura acadêmica...
- Influência de Medidas de Segurança de...
- Utilização dos testes estatísticos de...
- Avaliação da qualidade do

[X Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte](#)

[PDF](#)

[10.14295/transportes.v7i1.223](https://doi.org/10.14295/transportes.v7i1.223)

**TRANSPORTES** (ISSN: 2237-1346) é uma publicação da **ANPET** - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes ([www.anpet.org.br](http://www.anpet.org.br))



Este obra está licenciado com uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilha Igual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## **ARTIGO**

# **UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE OS AFUNDAMENTOS NAS TRILHAS DE RODAS DE PAVIMENTOS DELGADOS COM BASALTOS ALTERADOS**

**Washington Peres Núñez**  
**Jorge Augusto Ceratti**  
**Suyen Nakahara**

Escola de Engenharia

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**José Augusto de Oliveira**

DAER-RS - Departamento Autônomo de Estradas de  
Rodagem do Estado do Rio Grande do Sul

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo em verdadeira grandeza sobre afundamentos nas trilhas de roda em pavimentos delgados com bases de basaltos alterados. Um simulador linear de tráfego aplicou mais de 267.000 ciclos de carga, variáveis entre 82 e 130 kN, a cinco pistas experimentais construídas na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, localizada em Porto Alegre. As estruturas ensaiadas continham bases com espessuras de 16, 21 e 32 cm, construídas com basaltos alterados de duas procedências distintas. Um total de 4.148 flechas, medidas periodicamente, forneceram um conjunto de dados consistente para uma análise estatística significativa. A evolução das flechas mostrou depender das características do tráfego e das estruturas dos pavimentos. Considerando os afundamentos nas

trilhas de roda como causa da degradação de pavimentos delgados e uma flecha de 25 mm como critério de ruptura, calcularam-se fatores de equivalência de carga, através de uma análise de confiabilidade.

**Palavras-chave:**

Ensaio Acelerado de Pavimentos, Flechas, Pavimentos Delgados, Basaltos Alterados, Confiabilidade

**ABSTRACT**

This paper presents the results of a study of rutting of thin pavements where weathered basalts were used as base layers. A linear traffic simulator applied more than 267,000 axle loads, ranging from 82 to 130 kN, to five full-scale test sections built in a Pavement Testing Facility located in Porto Alegre (Southern Brazil). Two different weathered basalts and three base thicknesses (16 cm; 21 cm and 32 cm) were used. A total of 4,148 measurements of rut depth, made at intervals, provided a statistically significant data set. Rutting evolution showed to depend not only on traffic characteristics but also on pavement structure. Considering rutting as major failure cause of thin pavements and a rut depth of 25 mm as terminal criterion, load equivalence factors were calculated, by means of a reliability analysis.

**Key words:**

Accelerated Pavement Test, Rutting, Thin Pavements, Weathered Basalts, Reliability

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) apresenta mais de 120.000 km de rodovias de baixo volume de tráfego. A pavimentação destas vias é de relevância econômica, pois através delas se dá, principalmente, o fluxo da produção agrícola. No plano social, pavimentos de boa qualidade contribuem significativamente na melhoria da qualidade de vida (acesso a escolas, postos de saúde, etc.) das populações rurais.

A pavimentação dessas rodovias ditas coletoras, e também conhecidas como estradas vicinais, impõe a utilização de materiais locais, com baixos custos e qualidade técnica aceitável. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER/RS) vêm desenvolvendo, desde 1992, um amplo estudo sobre rochas vulcânicas (especialmente basaltos) alteradas, presentes em 40% da superfície do RS, bem como em outros estados da federação, e partes do Uruguai, do Paraguai e da Argentina.

Um Protocolo de Colaboração Consensual Técnico-Científico assinado pelas duas instituições, no início desta década, recebeu, posteriormente, as adesões da empresa Ipiranga Asfaltos S. A. e da Associação Riograndense de Empreiteiras de Obras Públicas (AREOP).

Além de abundantes em boa parte do RS, os basaltos alterados são de fácil extração (sem uso de explosivos) e britagem. O desempenho diverso de trechos construídos com essas rochas, nos anos 80, motivou o desenvolvimento de um programa de pesquisa, incluindo:

- \* estudos geológicos-geotécnicos de dez jazidas de rochas vulcânicas alteradas, localizadas em várias regiões do RS;
- \* o projeto e a construção de um simulador linear de tráfego; e
- \* a construção e solicitação de pistas experimentais em verdadeira grandeza, nas quais basaltos alterados foram usados como constituintes da camada de base.

Como resultado de estudos geológicos-geotécnicos, Arnold (1993) propôs um critério de qualificação para rochas vulcânicas alteradas, baseado no ensaio de resistência à compressão puntiforme. Seguindo o procedimento especificado pelo ISRM (1985), calcula-se um índice de resistência puntiforme,  $IS$ , para dois conjuntos de corpos de prova; um deles previamente imerso por sete dias e o outro seco ao ar. De acordo com Arnold (1993), podem ser empregadas na construção de pavimentos, rochas vulcânicas alteradas que apresentarem valores mínimos de 0,7 para o quociente entre a resistência após imersão e a seca ao ar, e de 3,5 MPa para a resistência após imersão.

Em rodovias de baixo volume de tráfego, pavimentos delgados são constituídos por revestimentos (geralmente tratamentos superficiais) de poucos centímetros, e camadas granulares com espessuras conjuntas de 15 a 40 cm. Poucos trabalhos, como o apresentado por Duffell e Pan (1996), têm-se centrado em analisar as causas e conseqüências de degradações nesse tipo de pavimentos. Estudos dessa natureza exigem o demorado acompanhamento do desempenho de trechos rodoviários ou a realização de ensaios acelerados em pistas experimentais solicitadas por simuladores de tráfego.

Nos pavimentos delgados, segundo Corté e Goux (1996), o acúmulo de deformações verticais permanentes no subleito e nas camadas granulares é uma das principais causas de degradação. Essas deformações, conhecidas como afundamentos nas trilhas de roda ou simplesmente como flechas, além de causarem desconforto, aumentam de forma significativa o risco de acidentes, em especial em períodos de chuva intensa quando uma camada de água se acumula.

A evolução das deformações permanentes em materiais granulares constituintes de camadas de pavimentos, têm sido objeto de estudos laboratoriais realizados por Nichols (1969), Barksdale (1972), Pumphrey e Lentz (1986); Hornych et al. (1993), entre outros.

Equações empíricas relacionando a profundidade da flecha com carga de roda equivalente, pressão nos pneus, número de solicitações, espessura da sub-base e ISC (Índice de Suporte Califórnia) do subleito e da sub-base, foram desenvolvidas, a partir de análises de regressão, pelo *U.S. Corps of Engineers*. Uma dessas equações, foi apresentada por Smith (1993).

Com o objetivo de analisar os efeitos das cargas de roda e da pressão nos pneus no afundamento de pavimentos com camadas granulares, foi projetada no Canadá uma série de ensaios controlados. O *Transportation Research Laboratory (TRL)* do Reino Unido, foi contratado para realizar um estudo em verdadeira grandeza do problema. O simulador de tráfego linear do TRL solicitou pavimentos,

constituídos unicamente por camadas granulares, construídos sobre subleito argiloso. Douglas (1997) observou que o aumento da carga em 82% resultou em flechas 5,7 mais profundas, mantendo-se constantes a espessura da sub-base e o número de passagens da carga.

Relatos apresentados pelo OCDE (1991), por Chen et al. (1997), Oliver et al. (1997), Coree e Button (1997) e Groenendijk et al. (1997) discutiram o afundamento nas trilhas de roda em misturas asfálticas e camadas estabilizadas, em seções experimentais solicitadas por simuladores de tráfego. Algumas das conclusões desses relatos podem ser estendidas às camadas de bases granulares.

Este artigo descreve a evolução dos afundamentos nas trilhas de roda nas pistas experimentais construídas em janeiro e fevereiro de 1996, na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos localizada no Campus da UFRGS, em Porto Alegre. Discutem-se os resultados obtidos entre maio de 1996 e outubro de 1997, e propõem-se fatores de equivalência de cargas que contemplam as características do tráfego e das estruturas ensaiadas.

## 2. O PROGRAMA EXPERIMENTAL

O experimento discutido neste artigo foi desenvolvido na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos localizada no Campus do Vale da UFRGS, em Porto Alegre.

A finalidade da instalação, composta por um simulador de tráfego, pistas experimentais e prédio de controle, é quantificar o desempenho de pavimentos em verdadeira grandeza, submetidos a

carregamentos acelerados. As potencialidades da instalação e alguns resultados obtidos no primeiro ano de operação foram apresentados por Núñez et al. (1997).

## 2.1. O Simulador de Tráfego DAER-UFRGS

O Simulador de Tráfego DAER-UFRGS, mostrado na Figura 1, foi projetado por pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS e construído, de 1992 a 1994, na Oficina Central do DAER, em Guaíba, região metropolitana de Porto Alegre.

O equipamento, com 15 m de comprimento, 2,5 m de largura e 4,3 m de altura, simula a passagem de um semi-eixo simples com rodas duplas. Cargas de eixo compreendidas entre 82 e 130 kN são aplicadas hidraulicamente; com variações correspondentes na pressão de enchimento dos pneus de 0,56 MPa (80 psi) a 0,73 MPa (105 psi).

As cargas são aplicadas em um único sentido, ao longo de 8 metros, com velocidade média de 6 km/h. O tempo médio para completar-se um ciclo de carga é de aproximadamente 14,5 s, o que permite aplicar cerca de 250 ciclos por hora. Um deslocamento transversal de 0,5 cm ocorre toda vez que o semi-eixo retorna para o início do ciclo, evitando a canalização total do tráfego.

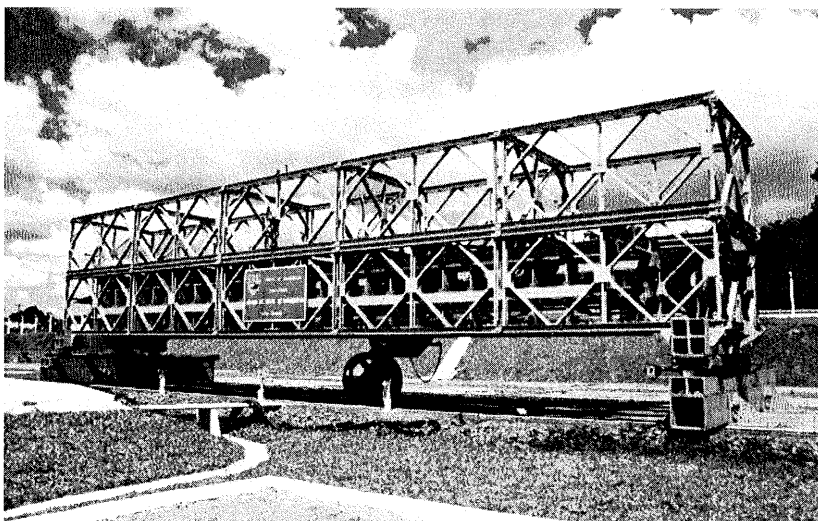


Figura 1: O Simulador de Tráfego sobre uma pista experimental

## 2.2. Os Pavimentos Experimentais

A análise apresentada neste artigo fundamenta-se no desempenho de cinco pavimentos experimentais com 20 m de comprimento e 3,5 m de largura, com bases constituídas por basaltos alterados. Todos os pavimentos apresentam como revestimento um tratamento superficial duplo com capa selante, com espessura total de 2,5 cm.

### 2.2.1. O Subleito Argiloso

O subleito das pistas experimentais é uma argila vermelha de comportamento laterítico, similar aos solos residuais de basaltos, com um teor de argila (partículas menores que 2  $\mu\text{m}$ ) de 43%, Limite de Liquidez de 44%, Limite de Plasticidade de 23% e Índice de Plasticidade de 21%. O solo foi classificado como CL no sistema universal (SUCS), como A-7-6(7) no sistema da AASHTO e como LG' na classificação MCT.

A curva de compactação de laboratório, na energia Normal do ensaio de Proctor, apresentou peso específico aparente seco máximo de 16,7  $\text{kN}/\text{m}^3$  e teor ótimo de umidade de 20,6%.

O material de subleito foi lançado e compactado em três camadas de 20 cm de espessura, obtendo-se um grau de compactação de 103%. O teor de umidade de compactação variou entre 19 e 22% (média de 20,4%, desvio padrão de 1,2%, em 54 observações), assegurando um ISC mínimo de 10%.

### 2.2.2. Bases Granulares

As bases granulares dos pavimentos experimentais são constituídas por basaltos alterados provenientes de jazidas previamente estudadas por Arnold (1993), localizadas nos município de Frederico Westphalen (Jazida F) ao norte do Estado e de Ibirubá (Jazida E) na região central do RS. Os seus índices de resistência à compressão puntiforme, IS, após sete dias de imersão em água, são de 6,80 e 3,85 MPa, respectivamente.



Após serem extraídos com pás carregadeiras, os basaltos alterados foram britados obtendo-se um agregado graúdo com tamanho máximo de 10 cm, um agregado miúdo de 1,9 cm e pó, que constituíram as camadas de base do tipo macadame seco.

### 2.2.3. O Projeto Fatorial

As combinações entre resistência dos basaltos alterados, espessuras de camadas de base e cargas de eixo aplicadas foram determinadas em um projeto fatorial, resumido na Tabela 1.

**Tabela 1: O Projeto Fatorial**

Pista	Jazida de Basalto	Espessura da camada de Basalto (cm)	Cargas de eixo aplicadas (kN)
01	F	16	100 e 130
03	F	21	82 e 110
04	E	21	82 e 130
07	F	32	120 e 130
08	E	32	100 e 120

### 2.3. Medições Realizadas Durante o Experimento

Em cada pavimento foram ensaiadas duas faixas, denominadas de setores, com 75 cm de largura, separadas por um setor não-trafegado com 70 cm de largura. Em cada setor foi aplicado um determinado nível de carga de eixo.

Os setores foram designados por um código com quatro algarismos; os dois primeiros identificam a pista e os dois últimos a carga de eixo em toneladas-força (1 tf  $\cong$  10 kN). Assim, o setor 0812, é a faixa da Pista 08 solicitada pela carga de eixo de 12 tf (120 kN).

Ao longo do experimento mais de 267.000 ciclos de carga foram aplicados aos pavimentos pelo Simulador de Tráfego. Periodicamente foram realizados levantamentos de deformações elásticas (deflexões pontuais e bacias defletométricas); deformações permanentes (flechas) e degradações superficiais (especialmente de trincas). Os parâmetros climáticos (precipitações pluviométricas, temperaturas do ar e sucção no solo de subleito) foram monitorados. A evolução das deformações elásticas com o tráfego, bem como os dados climáticos foram apresentados e discutidos por Núñez (1997).

Os afundamentos nas trilhas de roda, ou flechas, foram determinados através de nivelamento de oito seções transversais espaçadas de metro em metro. Em cada seção, as cotas do pavimento foram medidas, com precisão de milímetros, de 10 em 10 cm. O perfil transversal correspondente a um número N de passagens de cargas, foi referido ao perfil obtido antes do início do carregamento.

Para determinar a flecha média correspondente a um número N de ciclos de carga, foram consideradas as flechas máximas medidas em quatro seções centrais, que limitam o trecho no qual o rodado se movimentou com velocidade constante. Ao todo foram medidas 4.148 flechas, constituindo um universo suficientemente grande para um tratamento estatístico. Acredita-se que o erro máximo ocorrido na determinação das flechas, seja por erros do equipamento ou do operador, é de 1 mm.

O tráfego sobre as seções experimentais prosseguiu até registrar-se uma flecha não inferior a 20 mm. As razões para interromper o ensaio nesse estágio foram que: a) o DAER julgava que um pavimento em serviço com esse tipo e nível de degradação deveria ser alvo de recuperação; b) nos pavimentos mais espessos (Pistas 07 e 08) a velocidade de deformação plástica diminuía drasticamente; e c) se considerou mais conveniente a aplicação de cargas em outro setor, de forma a não retardar excessivamente a realização da parte experimental da pesquisa.

A Tabela 2 apresenta o número de ciclos de carga aplicados e a flecha final registrada em todos os setores. Pode-se observar que às vezes o tráfego causou flechas superiores a 20 mm.

**Tabela 2:** Número de solicitações e flechas finais nos setores analisados

Setor	Carga de eixo (kN)	No de ciclos de carga aplicados	Flecha média final (mm)
0110	100	17.600	31
0113	130	3.850	31
0308	82	63.900	22
0311	110	21.886	30
0408	82	9.800	26
0413	130	2.600	24
0712	120	42.209	20
0713	130	12.700	15(*)
0810	100	69.000	20
0812	120	23.500	22

(\*) Ensaio interrompido prematuramente devido a problemas mecânicos

### 3. EVOLUÇÃO DAS FLECHAS COM O TRÁFEGO

As Figuras 2 e 3 ilustram as evoluções das deformações permanentes nas Pistas 03 e 08, em função das cargas de eixo aplicadas. Duas tendências diferentes podem ser identificadas.

Nos pavimentos mais espessos (Pistas 07 e 08) foram observadas duas fases distintas no desenvolvimento das flechas: um rápido crescimento inicial e posteriormente uma evolução mais lenta. O mesmo

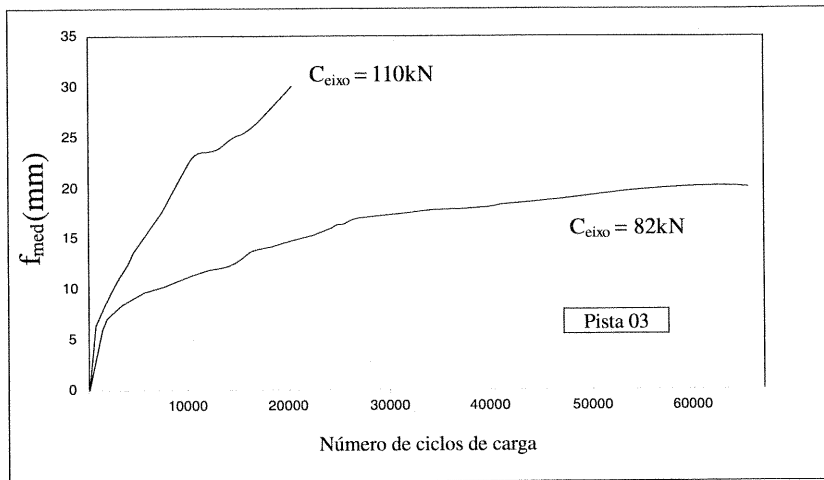


Figura 2: Evolução das flechas médias na Pista 03

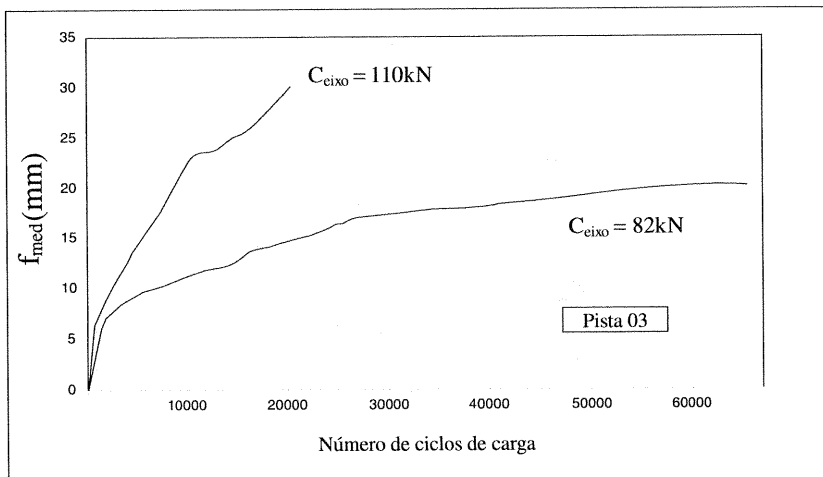


Figura 3: Evolução das flechas médias na Pista 08

comportamento, que manifesta a adequação da estrutura para o nível de carregamento aplicado, foi observado no setor 0308.

Nos pavimentos mais fracos (Pistas 01 e 04), identificou-se uma terceira fase, nas qual as flechas crescem exponencialmente. A mesma tendência foi observada no setor 0311, como se observa na Figura 2.

Pesquisadores do *Bundesäntalt für Strassenwesen* (BaST), Alemanha, propuseram o seguinte modelo para a evolução das flechas:

$$f_N = f_0 + a N^{0.5} \quad (1)$$

A flecha  $f_N$ , correspondente a  $N$  ciclos de carga, depende da flecha inicial  $f_0$ , que caracteriza a fase de consolidação no início da vida do pavimento, e do fator de afundamento  $a$ , que explicita a agressividade da carga de eixo.  $f_0$  depende das características construtivas.

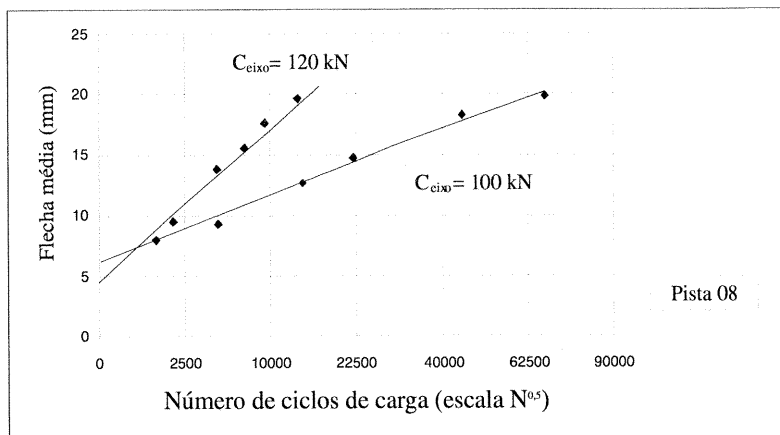
As Figuras 4 e 5 demonstram que o modelo (1) ajusta adequadamente o comportamento quanto à deformabilidade plástica das Pistas 07 e 08. Nessas figuras também se observa que:

- a) para dois setores de uma pista experimental, os valores de  $f_0$  são praticamente idênticos. De fato, esses valores, próximos a 5 mm, refletem a dificuldade em compactar-se as camadas de macadame seco com basaltos alterados;
- b) o fator de afundamento,  $a$ , é fortemente influenciado pela carga de eixo e também pela estrutura do pavimento, ou seja espessura das camadas e resistência dos materiais.

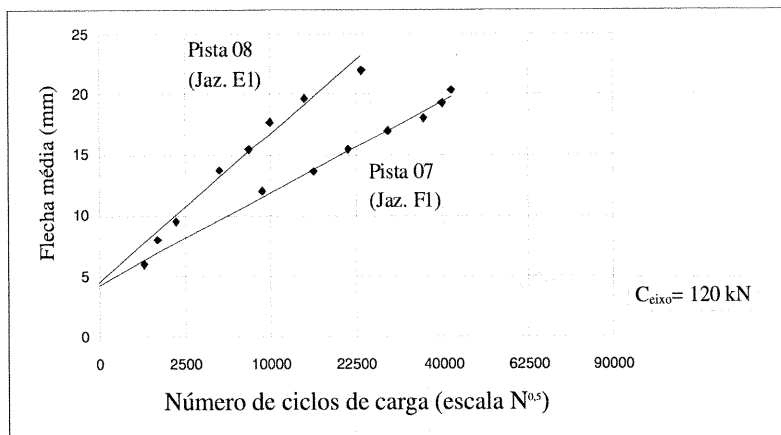
A Tabela 3 apresenta valores de  $a$  correspondentes aos setores considerados nas Figuras 2 a 5.

**Tabela 3:** Valores do fator de afundamento em alguns setores ensaiados

Setor	0308	0311	0810	0812	0712
Fator de afundamento, $a$	0,072	0,197	0,056	0,122	0,076



**Figura 4:** Evoluções das flechas nos dois setores da Pista 08, de acordo com o modelo (1)



**Figura 5:** Comparação entre as evoluções das flechas em duas pistas, evidenciando o efeito da procedência (resistência) do basalto alterado

### 3.1. Efeito da Carga de Eixo na Velocidade de Deformação Plástica

Para determinar-se a velocidade (ou taxa) de deformação plástica, as flechas calculadas em um dado intervalo foram subtraídas das correspondentes ao intervalo seguinte e divididas pelo número de cargas de eixo aplicadas. Os resultados assim obtidos representam a parcela de deformação plástica que se acumulou em cada ciclo de carga.

As Tabelas 4 e 5 exemplificam esse procedimento. Após a consolidação inicial dos pavimentos, as velocidades de deformação plástica decresceram acentuadamente para valores médios de  $10^{-4}$  e  $6 \times 10^{-4}$  nos setores 0810 e 0812, respectivamente; explicitando a influência da carga de eixo na evolução das flechas.

**Tabela 4:** Evoluções da flecha média e da velocidade de deformação plástica no setor 0810

N	5.100	11.080	15.000	23.500	46.400	69.000
flecha média (mm)	9.25	12.33	12.67	14.67	18.33	20.00
velocidade de deformação plástica ( $10^{-4}$ mm/ciclo)	18	5	1	2	2	1

**Tabela 5:** Evoluções da flecha média e da velocidade de deformação plástica no setor 0812

N	1.150	2.000	5.000	7.700	10.000	14.300	23.500
flecha média (mm)	8.00	9.50	13.75	15.50	17.67	19.67	22.00
velocidade de deformação plástica ( $10^{-4}$ mm/ciclo)	70	18	14	6	9	5	3

Salienta-se que na análise conjunta dos cinco pavimentos ensaiados Núñez (1997) observou que a velocidade de deformação plástica depende também da estrutura do pavimento (espessura e natureza das camadas).

### **3.2. Distribuição das Deformações Permanentes no Subleito e no Pavimento**

Após o tráfego ter sido encerrado, uma avaliação post-mortem foi realizada nas Pistas 01 e 04. Trincheiras foram abertas para determinar quais camadas contribuíram para o afundamento plástico e em que proporção. Constatou-se que:

- a) a contribuição do revestimento (tratamento superficial com capa selante) no afundamento plástico foi pequeno, geralmente inferior a 4 mm na Pista 01 e 2 mm na Pista 04;
- b) as bases de macadame seco basalto alterado foram as mais afetadas pelo afundamento. As flechas nestas camadas foram em média de 20 mm na Pista 01 e 16 mm na Pista 04;
- c) a despeito das pequenas espessuras dos pavimentos, e das elevadas tensões normais transmitidas, a contribuição do subleito no desenvolvimento das flechas foi pequena: 6 mm na Pista 01 e 7 mm na Pista 04. Este fato não surpreende, uma vez que se sabe que solos lateríticos compactados podem apresentar elevada rigidez.

A avaliação post-mortem também permitiu a identificação de dois mecanismos de degradação que afetam pavimentos delgados com basaltos alterados. Os agregados graúdos da Pista 04 (Jazida E), com menor resistência, foram parcialmente quebrados pelas elevadas cargas de eixo (130 kN). Já o basalto alterado mais resistente, empregado na Pista 01 (Jazida F), resistiu ao esmagamento. Nesse pavimento, as cargas de eixo provocaram o deslocamento (dilatância) do agregado graúdo.



## 4. FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA EM PAVIMENTOS DELGADOS COM BASES DE BASALTOS ALTERADOS

### 4.1. Análise de confiabilidade

Com auxílio do software ProTempo, desenvolvido por Ribeiro, Pohl e Moutinho Silva (1997), Núñez (1997) realizou uma análise probabilística da evolução das flechas com os números de ciclos de carga. Baseado no desempenho das estruturas ensaiadas, a flecha de 25 mm foi adotada como critério de ruptura para os pavimentos delgados.

O ProTempo possibilitou acessar a confiabilidade do pavimento, sem ter-se conduzido o ensaio até a condição terminal. O software permitiu que se fizesse uma análise detalhada, ajustando uma distribuição de probabilidade de Weibull aos dados e que se estimassem os números de ciclos de carga até a falha, com um nível de confiabilidade de 80%, recomendado pela AASHTO (1993) para estradas vicinais.

### 4.2. Análise de regressão múltipla

Com os valores obtidos na análise de confiabilidade, procedeu-se a uma análise de regressão múltipla, empregando-se o software STATISTICATM. Núñez (1997) propôs o modelo:

$$N = 10^{5,25} \cdot C^{-3,97} \cdot E^{4,12} \cdot IS^{1,98} \quad (2)$$

sendo N o número de ciclos de carga correspondente à flecha de 25 mm, C a carga de eixo em kN ( $82 \leq C \leq 130$ ), E a espessura do pavimento (camada de basalto alterado + 2,5 cm de tratamento superficial) em cm ( $16 \leq E \leq 36$ ), e IS a resistência à compressão puntiforme do basalto alterado após imersão em água por sete dias, em MPa ( $3,85 \leq IS \leq 6,80$ ).

A regressão apresentou um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,93$ , um desvio padrão de estimativa de 0,17 e  $F_{0,05}(3, 6) = 28,49$ ; todas as variáveis sendo significativas.

A equação (2) explicita que o número de ciclos de carga que causa uma flecha de 25 mm

- diminui exponencialmente (aproximadamente 4ª potência) com o aumento da carga de eixo;
- aumenta com a 4ª potência da espessura do pavimento; e
- aumenta como quadrado do índice de resistência puntiforme do basalto alterado

### 4.3. Fatores de equivalência de carga

A equação (2) foi empregada para calcular os fatores de equivalência de carga para pavimentos delgados com bases em basaltos alterados, mostrados na Tabela 6. Fica implícito que o tipo de dano considerado é a flecha, o nível de dano 25 mm, e o nível de confiabilidade 80%. Salienta-se que esses fatores se limitam à configuração do rodado do simulador de tráfego empregado na análise experimental; ou seja, valem para eixos simples com rodas duplas.

**Tabela 6:** Fatores de equivalência de carga para pavimentos delgados com basaltos alterados

Carga de eixo (kN)	82	90	100	110	120	130
Fator de equivalência de carga	1,00	1,45	2,20	3,21	4,53	6,23

Observa-se que um aumento de carga de eixo de 59% ( $130 \text{ kN}/82 \text{ kN} = 1,59$ ) reduz a vida do pavimento em 6,23 vezes.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo discutiram-se os resultados de um estudo sobre os afundamentos de trilhas de roda em pavimentos delgados com bases em basaltos alterados.

Os afundamentos nas trilhas de roda foram a principal manifestação de degradação em todos os pavimentos ensaiados. As flechas

aumentaram exponencialmente com a repetição das cargas de eixo. Foram observadas duas fases diferentes no desenvolvimento das flechas: um rápido crescimento no início do ensaio, seguido de um

crescimento gradual mais lento. A velocidade de deformação plástica mostrou-se dependente da carga de eixo e da estrutura do pavimento (espessura e resistência do basalto alterados).

Uma avaliação post-mortem realizada em duas pistas revelou que a camada de macadame seco com basalto alterado foi a que mais contribuiu (60 %) para os afundamentos nas trilhas de roda. Dois mecanismos de degradação de basaltos alterados foram identificados: esmagamento dos agregados graúdos menos resistentes e deslocamento lateral dos mais resistentes.

A flecha de 25 mm foi adotada como critério de ruptura. A partir de análises de confiabilidade e de regressão múltipla, foi proposta uma equação relacionando o número de ciclos de carga que o pavimento suporta até a ruptura, com a carga de eixo, a espessura do pavimento e a resistência à compressão puntiforme do basalto alterado, após sete dias de imersão.

Calcularam-se fatores de equivalência de carga que consideram as características dos materiais e do tráfego. Observou-se que com o aumento da carga de eixo em 59% a vida do pavimento torna-se 6,23 menor.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a colaboração da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), da empresa Ipiranga Asfaltos S. A., da Associação Riograndense de Empreiteiras de Obras Públicas (AREOP), de técnicos e engenheiros do DAER/RS e, em especial, da equipe de campo da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) *AASHTO guide for design of pavement structures*, Washington, D.C.
- Arnold, G. P. (1993) Estudo do comportamento mecânico de basaltos alterados do Rio Grande do Sul para emprego em pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado, UFRGS/CPGEC, Porto Alegre, 145p.
- Barksdale, R. D. (1972) Laboratory evaluation of rutting in base course materials. Proceedings of the 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Londres, p.161-174.
- Chen, D. H.; K Fults e M. Murphy (1997) The primary results for the first TxMLS test pad. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 76, Washington, D.C. Proceedings... Washington:TRB.
- Coree, B. J. e J. W. Button (1997) Full-scale rutting of large stone asphalt mixture. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 76, Washington, D.C. Proceedings... Washington:TRB.
- Corté, J-F. e M-T Goux, (1996) Le guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée. *Révue Générales des Routes et Aerodromes*, 741:39-43.
- Douglas, R. A. (1997) Heavy load, low tire pressure rutting of unbound granular pavements. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, v. 123, n.5, p.357-363
- Duffell, J. R. e J. K.Pan (1996) Minor road deterioration: causes, consequences and maintenance options. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Londres, 117:278-290.
- Groenendijk, J.; A.Miradi; A. A. A. Molenaar; C. H. Vogelzang e L. J. M. Dohmen (1997) Rutting development in LINTRACK test pavements: evaluation of the Shell subgrade criterion. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 76, 1997, Washington, D.C. Proceedings... Washington:TRB.
- Hornych, P.; J-F Corté e J-L Paute (1993) Étude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées. *Bulletin de Liaison du LCPC, Paris*, n.184, p.45-55.

- International Society for Rock Mechanics - Commission on Testing Methods. (1985) Suggested method for determining point load strength (revised version). International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, Oxford, v.22, p.51-60.
- Nichols, F. P. (1969) Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials. Highway Research Record, Washington, D.C., n.39, p.82-96.
- Núñez, W. P. (1997) Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados. Tese de Doutorado, CPGEC UFRGS, Porto Alegre, 297p.
- Núñez, W.P.; J. A. Ceratti; S. M. Nakahara e J. A. Oliveira (1997) Um ano de operação da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos localizada em Porto Alegre - RS. Anais da XI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, p.23-35.
- Organisation de Coopération et de Développement Economique - OCDE (1991) Essais en vraie grandeur des superstructures routières. Paris:OCDE, 276p.
- Oliver, J. W. H.; G. W. Jameson; K. G. Sharp; N. J. Vertessy; J. R Johnson-Clarke e A. J. Alderson (1997) An evaluation of the rut-resistant properties of asphalt mixes under field and laboratory conditions. In:Transportation Research Board Annual Meeting, 76, 1997, Washington, D.C. Proceedings... Washington:TRB.
- Pumphrey, N. D. e R. W. Lentz, (1986) Deformation analysis of Florida highway subgrade sand subjected to repeated load triaxial tests. Transportation Research Record, Washington, D.C., n.1089, p.49-56.
- Ribeiro, J. L. D.; L. Pohl, e M. Moutinho Silva (1997) Modelos de degradação. Relatório Técnico 02/97. UFRGS/PPGEP, Porto Alegre.
- Smith, D. M. (1993) Effects of variable tire pressure on road surfacings. Technical report GL-93-20, Vol.II: Analysis of tests results. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg.

**Endereço dos autores:**

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS.

Av. Osvaldo Aranha 99, 3º andar - 90.035-190 - Porto Alegre, RS