

PREVISÃO DA REDUÇÃO DA IRREGULARIDADE EM PAVIMENTOS PÓS-RECAPEAMENTO BASEADO NO BANCO DE DADOS *INFOPAVE*

Jéssica Kurz Stelmach

Nilana Negreiros Mitida

Lélio Antônio Teixeira Brito

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

RESUMO

O desenvolvimento de irregularidades é uma das fontes de queda da serventia de pavimentos flexíveis. Antecipar este parâmetro ao longo da vida útil dos pavimento ou conhecer esta redução por ações de manutenção é tarefa imprecisa. Analisou-se a redução da irregularidade longitudinal em pavimentos asfálticos proveniente da execução de recapeamento. Considerou-se resultados obtidos em 39 seções de pavimentos flexíveis de estruturas semelhantes entre si, localizadas nos EUA e Canadá. Os registros da irregularidade e reduções medidas antes e após o recapeamento serviram como base para o modelo de regressão linear adotado na previsão da medição da irregularidade. Por meio de uma análise estatística, obteve-se o modelo para previsão da redução da irregularidade em função da espessura do recapeamento e fresagem, e da irregularidade anterior à execução deste, com um R^2 de 0,40. Objetivou-se fornecer suporte para decisões relacionadas à gerência de manutenção e também considerar modelos estatísticos para prever desempenho.

ABSTRACT

The development of longitudinal roughness is one a key type of pavement distress to decrease serviceability of flexible pavements. Anticipating this parameter over the life of a pavement or estimating its behavior due to maintenance routines is an imprecise task. This paper analyzed the decrease of longitudinal roughness profile in pavements due to the pavement overlays. Measurements from 39 sections of flexible pavements with similar structures, located in the US and Canada, were considered. Records of the roughness and reductions of previous and subsequent measures of the overlay were used to develop the linear regression model to predict roughness. Using a statistical analysis, a model to predict the decrease of roughness due to the overlay thickness and milling, and of the roughness prior to its execution, with a R^2 of 0.40. Provide support for decisions related to maintenance management and consider statistical models to predict performance were the key indicators sought.

1 INTRODUÇÃO

Garantir a trafegabilidade em qualquer época e condição climática do ano é o objetivo precípua da pavimentação, bem como, proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. A capacidade de suporte e a durabilidade de um pavimento relacionam-se diretamente com o seu desempenho estrutural e funcional. Do ponto de vista do usuário, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos dessa superfície são perceptíveis, uma vez que afetam seu conforto, isto significa que o veículo também sofre mais intensamente as consequências, gerando custos operacionais maiores. Portanto, o atendimento do conforto ao rolamento também significa economia nos custos do transporte. (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Ante a necessidade de entender melhor a sistemática na ruptura de pavimentos, faz-se necessário um banco de dados robusto quanto às condições estruturais e funcionais das rodovias, para que se possa estabelecer modelos comportamentais das estruturas. Tal banco de dados deve ser estruturado com a constante monitoração destas vias para que seja possível fazer uma previsão de desempenho e da vida restante dos pavimentos.

Com a finalidade de avaliar o desempenho de serviço das rodovias ao longo do tempo, os Estados Unidos da América (EUA), através da *Federal Highway Administration* (FHWA), implementou o *Long Term Pavement Performance* (LTPP). O propósito do programa é coletar análises e controles de qualidade de milhares de seções e possui uma vasta gama de

parâmetros correspondentes a quantificação de defeitos em pavimentos, disponíveis em um banco de dados chamado *InfoPave*. Em virtude da carência e da falta de disponibilidade destes dados no horizonte brasileiro, tanto em quantidade quanto em qualidade de informações e de monitoramento, fez-se da utilização dos dados disponíveis no *InfoPave*.

Para medida da irregularidade nas seções foi considerado o IRI - *International Roughness Index*, ou índice de irregularidade internacional, que quantifica os desvios do pavimento. Segundo o DNER-PRO 182/1994 (p. 03) a definição de irregularidade é: “Desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”. A irregularidade é considerada como o melhor indicador de serventia de pavimentos, a qual indica as condições de rolamento. A irregularidade é influenciada por vários componentes, tais como: trincamento, desgaste, deformações e manutenção realizadas (VITORELLO, 2008). Dependendo da situação em que a rodovia se encontra, uma possível intervenção é o recapeamento, que consiste em remoção total ou parcial da camada de revestimento por fresagem, seguida da aplicação de uma nova camada de revestimento, visando à redução da deterioração da rodovia. Tal intervenção gera uma redução na irregularidade da via, bem como a diminuição da deflexão sofrida pelo pavimento.

Em vistas de estabelecer a correlação das reduções da irregularidade pela espessura do recapeamento, analisa-se os dados obtidos no banco de dados *InfoPave*, de tal modo que seja possível quantificar a irregularidade do pavimento e, a partir destes dados, correlacionar com as intervenções feitas na via por recapeamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Vitorello (2008), estruturas de pavimentos geralmente não apresentam ruptura súbita, o que acontece é a deterioração funcional e estrutural associadas ao longo de seu tempo de abertura ao tráfego. Sua avaliação pode ser realizada tanto do ponto de vista estrutural como funcional. A avaliação estrutural é baseada na capacidade de carga do pavimento, nas deformações recuperáveis, ditas elásticas, bem como nas deformações permanentes, ditas plásticas. Por outro lado, a avaliação funcional está ligada ao conforto ao rolamento e aos defeitos da superfície.

Segundo Barella (2008), a importância atribuída à irregularidade longitudinal de pavimentos cresceu ao longo do tempo. O desenvolvimento rodoviário mundo afora, amparado pelo desenvolvimento concomitante da engenharia rodoviária, foi impulsionado pela indústria automobilística. Foram estabelecidos conceitos, tais como o da serventia de um pavimento, que mais tarde foi correlacionada com a medida da irregularidade, bem como técnicas de projeto, dimensionamento e de manutenção de rodovias. Em termos de avaliação funcional de um pavimento, a medida da irregularidade é de suma importância para usuários, construtores e gestores de uma malha rodoviária.

2.1 Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal de um pavimento é conceituada como o conjunto dos desvios da superfície viária em relação a um plano de referência. Estes desvios afetam diretamente a qualidade do rolamento, a dinâmica dos veículos e a ação dinâmica das cargas sobre a via. Podendo decorrer de imperfeições no processo executivo, bem como resultar de problemas ocorridos após a construção em virtude da atuação do tráfego, do clima e de outros fatores. A irregularidade influencia na interação da superfície da via com os veículos que a utilizam e

estes efeitos não dependem somente disto, mas também de fatores vinculados à suspensão do veículo e à sensibilidade dos usuários e da carga (PINTO E PREUSSLER, 2010).

De maneira mais simplificada, Barella (2008, p. 27-28) define que: “A irregularidade longitudinal de um pavimento representa o conjunto dos desvios indesejáveis de sua superfície, que atrapalha o rolamento rápido e suave dos veículos, gera insegurança e onera seus usuários, além de acelerar a degradação do pavimento”. A quantificação da irregularidade é o parâmetro utilizado na avaliação de pavimentos, no diagnóstico da situação existente e na definição da solução de restauração ou manutenção a ser aplicada. Ela também subsidia as decisões nos sistemas de gerência e atualiza a realimentação de modelos de previsão de desempenho, além de estimar a serventia de pavimentos (PINTO E PREUSSLER, 2010).

A escala IRI é definida como o índice entre o somatório dos deslocamentos ocorridos na suspensão de um veículo, dividido pela distância percorrida pelo veículo, sendo expressa nas unidades m/km ou mm/m. No Brasil, a escala padrão de medição adotada é o Quociente de Irregularidade (QI), reconhecido internacionalmente, a partir do uso do perfilômetro dinâmico de superfície. A resposta à irregularidade, obtida através da simulação de movimentos no quarto-de-carro, é aceita como uma medida padrão de irregularidade expressa em contagem por quilômetro (cont/km). Os conceitos de QI e IRI são similares, porém não imediatamente correlacionáveis, ainda que possa se admitir uma aproximação pelo fator multiplicador $QI = 13 \times IRI$. Na Tabela 1 apresenta-se uma relação da condição do pavimento quanto à irregularidade (PINTO E PREUSSLER, 2010).

Tabela 1: Condição do pavimento quanto à irregularidade de rodovias pavimentadas

Condição	QI (contagem/km)	IRI (m/km)
Excelente	13-25	1,0-1,9
Boa	25-35	1,9-2,7
Regular	35-45	2,7-3,5
Ruim	45-60	3,5-4,6
Péssima	>60	>4,6

Sendo a irregularidade considerada como o melhor indicador de serventia de pavimentos, indicando as condições de rolamento, é influenciada por vários componentes, tais como: trincamentos, desgastes, deformações e manutenções realizadas. Este parâmetro pode ser mensurado por diferentes tipos de equipamentos existentes (VITORELLO, 2008). As correlações destas medidas quanto as condições de rolamento podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2: Correlação do IRI com as condições de rolamento

IRI (m/km)	Condições de rolamento
10-12	Excessivas e profundas depressões, panelas e desagregação severa. Velocidades inferiores a 50km/h.
7-9	Frequentes depressões, panelas, remendos profundos e oscilações bruscas associadas com graves defeitos. Rolamento confortável com velocidades até 50-60km/h.
5-6	Defeitos associados a depressões e remendos, eventuais panelas, ondulações e corrugações fortes. Rolamento confortável com velocidades até 70-90km/h.

3-4	Podem ser percebidos deslocamentos moderados, grandes ondulações, depressões, remendos e eventuais panelas oriundas de desgastes em tratamentos superficiais corrugações moderadas. Rolamento confortável com velocidades até 100-120km/h.
0-2	Ondulações sentidas somente com velocidades menores de 80km/h. Pavimento sem depressões, panelas ou corrugações. Rolamento confortável com velocidades maiores de 120km/h.

2.1.1 Modelos de previsão da irregularidade

Segundo Bustos *et al.* (1998, *apud* Lerch, 2003) modelos de previsão consistem em encontrar os parâmetros que minimizem a diferença entre os valores previstos pelo modelo com os encontrados em campo. Através do método das janelas, as seções são criadas levando-se em conta as características superficiais, estruturais e de tráfego, agrupando trechos homogêneos. Como pode-se trabalhar com mais de uma rodovia ao mesmo tempo, é indicado para gerência de redes.

Lerch (2003) desenvolveu, por meio de uma análise de regressão linear múltipla, um modelo de avaliação da redução da irregularidade longitudinal após aplicação de camada de reforço, apresentado na Equação 1. Teve como um dos objetivos apresentar um modelo de previsão da redução da irregularidade como função da espessura do recapeamento e da irregularidade medida antes deste, considerando dados colhidos em 9 trechos estudados.

$$\Delta IRI = 0,31 \text{ ESP} + 0,87 \text{ IRI}_{\text{Antes}} - 3,17 \quad (1)$$

Onde:

$\Delta IRI = IRI_{\text{Antes}} - IRI_{\text{Depois}}$ = Variação do índice de irregularidade longitudinal (m/km) com a aplicação de camada de reforço;

ESP = Espessura da camada de reforço (cm);

IRI_{Antes} = Índice de irregularidade longitudinal antes da aplicação do reforço (m/km).

Já no modelo proposto por Nakahara (2005), foi elaborado um estudo experimental sobre o desempenho de reforços de pavimentos asfálticos em via urbana com elevado volume de tráfego comercial pesado. Para isto, foram testados modelos lineares com diferentes estruturas de covariância e também modelos de regressão logística. Foram monitorados os pavimentos durante quatro anos, e obteve-se o modelo para a variação da irregularidade após a restauração, discriminado na Equação 2.

$$\Delta IRI = -2,383 + 0,102h_{\text{Ref}} + 0,862 \text{ IRI}_{\text{Antes}} \quad (2)$$

Onde:

$\Delta IRI = IRI_{\text{Antes}} - IRI_{\text{Depois}}$ = Variação do índice de irregularidade longitudinal (m/km) com a aplicação de camada de reforço;

h_{Ref} = Espessura da camada de reforço (cm);

IRI_{Antes} = Índice de irregularidade longitudinal antes da aplicação do reforço (m/km).

2.2 Long Term Pavement Performance (LTPP)

Iniciado em 1987, o LTPP tem como objetivo o monitoramento de rodovias para o desenvolvimento de novos meios de reabilitação e manutenção, com foco em seções de pavimentos de rodovias norte-americanas. Conta atualmente com 2.548 seções de pavimentos rígidos e flexíveis, abrangidas ao longo dos EUA e em alguns locais do Canadá e de Porto Rico.

As informações das seções são disponibilizadas ao usuário através da *interface online*, chamada de *InfoPave*. Este contém dados coletados em campo com enfoque na estrutura, clima, tráfego e performance, visando fornecer informações sobre o comportamento dos pavimentos rodoviários. Fatores como as ações do clima, efeitos do tráfego, tipos de materiais utilizados, tipos de ensaios realizados, bem como quais equipamentos foram utilizados em cada ensaio também são levados em consideração.

Diante das informações obtidas através do banco de dados, é possível quantificar a irregularidade do pavimento visando correlacionar estes dados com as intervenções feitas na via por recapeamento, e por consequência, a relação de diminuição da irregularidade.

3 METODOLOGIA

Dentre os mais variados tipos de dados nas seções monitoradas do *InfoPave*, adotou-se como premissa a seleção de seções com configurações que se assemelham estruturalmente. As configurações utilizadas são: *Asphalt Concrete Pavement* (ACP) para o item *Surface Type*, sendo assim, filtradas somente as seções com revestimento em concreto asfáltico; *Unbound Base* para *Base Type*, o que selecionou somente as seções com base granular; *Average Annual Daily Truck Traffic* (AADTT) entre 1 e 15 mil para o volume de tráfego diário; e *Longitudinal Profile* (IRI) entre 0 e 6 m/km. Com isto, obteve-se 439 seções com dados de irregularidade medidos para estas configurações estruturais típicas, como indicado na Figura 1.

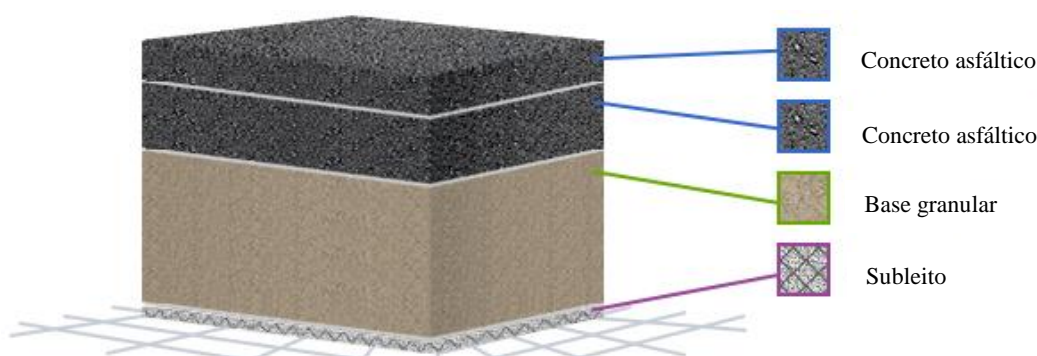


Figura 1: Estrutura típica considerada nesta pesquisa

A primeira análise feita foi a partir da visualização das 439 seções no *InfoPave*, somente no ambiente *online*, que apresenta as configurações como apresentado na Figura 1. Destas, observou-se que muitas seções apresentavam intervenções por reconstrução, que modificavam a estrutura do pavimento consideravelmente, como por exemplo, a retirada da camada de revestimento original para a colocação de um novo revestimento que não fosse em ACP, bem como intervenções por restauração tipo recapeamento, que também não mantêm o revestimento em ACP. Da mesma maneira, foi observado que em algumas seções com intervenções de manutenção estrutural, houve a substituição das camadas granulares de base e sub-base por camadas cimentadas, o que fugia do escopo inicial da pesquisa e, em decorrência disto, foram descartadas da análise.

Em seguida, excluíram-se da coleta as seções que não haviam sofrido intervenções de manutenção ou reabilitação, ou seja, aquelas que mantiveram suas configurações originais. Logo, foram reduzidas para 52 seções da análise, o que resultou em 387 seções que foram reanalisadas com uma nova observação visual de suas estruturas.

Partindo-se para a escolha de seções onde as intervenções de manutenção foram executadas mantendo as premissas iniciais, para que não ocorressem drásticas mudanças na estruturação do pavimento, foram selecionadas 97 seções com as medições das irregularidades longitudinais para *download*. Cada uma das 97 planilhas tem entre 30 e 60 mil dados sobre irregularidade, aproximadamente. Os ensaios são repetidos 5 vezes em cada segmento homogêneo. Isto totaliza entre 2,91 e 5,82 milhões de dados analisados nestas seções.

Das planilhas de irregularidade fornecidas pelo *InfoPave*, observou-se que em 58 seções, das 97 analisadas, não haviam medições de IRI feitas em intervalos anteriores e posteriores às intervenções, e sim, em momentos distintos. A partir destes, pôde-se fazer uso da exclusão destas seções. Excluiu-se, também, as que tiveram mais de uma ou mais de um tipo de intervenção entre duas medições de irregularidade. O que resultou em 39 seções, identificadas na Figura 2, com 390 medições de IRI, sendo 10 medições por seção. Dentre as 39 seções, 30 delas situam-se nos EUA, nos estados do Alabama, Arizona, Colorado, Flórida, Carolina do Norte, Óregon e Texas. As 9 remanescentes ficam situadas no Canadá, nas províncias de Alberta, Colúmbia Britânica, Nova Escócia e Ontário.

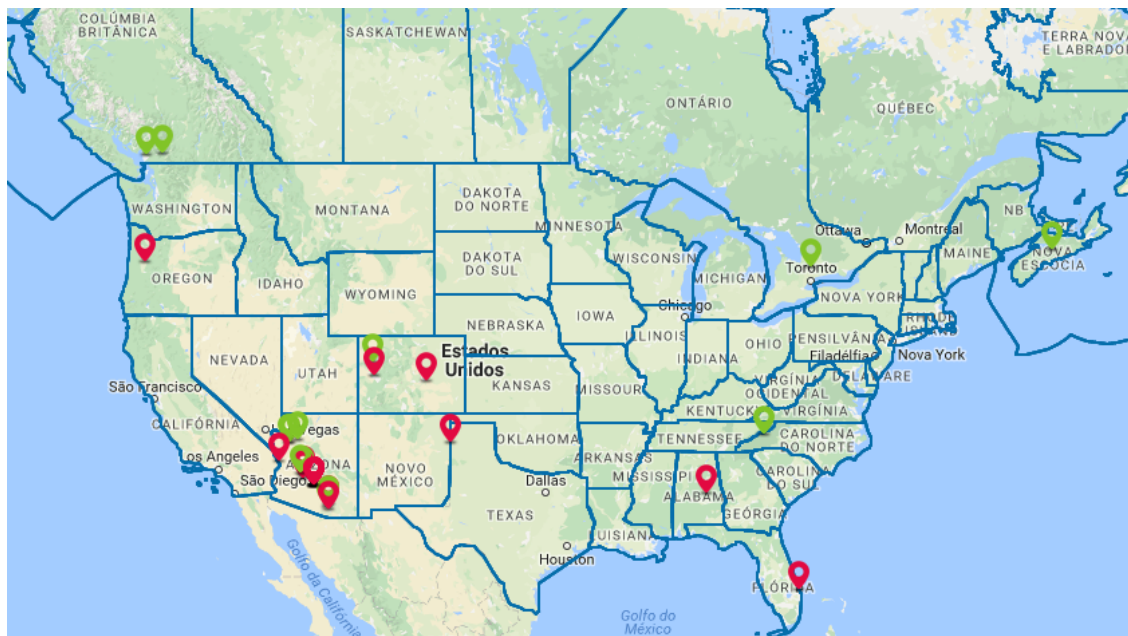


Figura 2: Localização geográfica das seções do estudo

Os parâmetros que foram buscados no banco de dados do *InfoPave* para realização do trabalho foram: IRI medido antes da intervenção (IRI_{Antes}), IRI após intervenção (IRI_{Depois}), espessura das camadas antes da intervenção (h_{Antes}) e após intervenção (h_{Depois}), espessura de camada fresada (h_{Fres}) e espessura do reforço (h_{Ref}).

A medição da irregularidade, na grande maioria das seções analisadas, foi feita utilizando-se perfilômetros a laser, a partir dos quais obteve-se os dados utilizados na pesquisa. Inicialmente esperava-se que houvesse dados frequentes de medição de irregularidade. Porém, verificou-se que a ocorrência das medições é feita apenas quando há mudança estrutural no pavimento, como por exemplo, uma nova camada de recapeamento. Assim, não há a avaliação da irregularidade ao longo do tempo, bem como considerando a evolução do tráfego na rodovia, o que passa a ser

prejudicial para o desenvolvimento de modelos de previsão. Isto ocorre pois não é possível que seja visto o crescimento uma vez que não é feita medição se não houver intervenção.

Após a compilação do IRI nas seções selecionadas, fez-se nova observação visual na *interface online*, onde compilou-se os valores de espessura da camada de revestimento pré e pós intervenção. Com os dados de espessura *versus* IRI, pode-se dar início às análises.

4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

Para a análise matemática dos dados, fez-se uso dos modelos propostos por Lerch (2003) e por Nakahara (2005). Tanto o primeiro, quanto o segundo, não apresentaram a adequação com os dados obtidos em campo, nas seções de estudo. Propôs-se, então, uma nova modelagem matemática para estes dados, iniciando-se por testes de hipóteses através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). O MMQ procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. A melhor correlação obtida por este método foi a demonstrada na Equação 3, que apresentou um R^2 de 0,53.

$$IRI_{\text{Depois}} = 0,482 + 0,282 IRI_{\text{Antes}} \quad (3)$$

Onde:

IRI_{Antes} = Índice de irregularidade longitudinal antes da aplicação do reforço (m/km).

IRI_{Depois} = Índice de irregularidade longitudinal depois da aplicação do reforço (m/km).

Na escolha do modelo apropriado, do ponto de vista estatístico, busca-se o mais parcimonioso, isto é, aquele que envolva o mínimo de parâmetros possíveis a serem estimados e que explique bem o comportamento da variável resposta. Utilizando-se, ainda, a hipótese dos mínimos quadrados, foram testadas interações com outras variáveis, como h_{Ref} , h_{Fres} , h_{Antes} e h_{Depois} . Porém, neste método, todas as variáveis, exceto a irregularidade antes da intervenção, demonstraram ter pouca representatividade ou até mesmo nenhuma representatividade nos modelos, sendo eles lineares, exponenciais ou logarítmicos.

A fim de que houvesse a validação matemática do modelo adotado, fez-se novo teste de hipóteses para os modelos lineares, que foram os mais aproximados, bem como tem-se na literatura atual. Para o novo teste, fez-se uso do *RStudio*, que é um *software* livre, de ambiente de desenvolvimento integrado em linguagem R, que é utilizada em cálculos estatísticos. Fez-se uso de uma análise correlacional entre todas as variáveis disponíveis, uma análise de diagnóstico, e desenvolveu-se o Modelo de Regressão Linear ajustado aos dados.

O termo correlação significa relação em dois sentidos, e é usado em estatística para designar a força que mantém unidos dois conjuntos de valores. A verificação da existência e do grau de relação entre as variáveis é o objeto de estudo da correlação. O estudo pressupõe que as variáveis tenham uma distribuição normal. Quando não é possível perceber uma relação sistemática entre as variáveis diz-se que estas são espúrias, não correlacionadas ou independentes. Um coeficiente de correlação 0 significa que não existe um relacionamento linear entre as duas variáveis. Já um coeficiente de correlação 1 significa que estas são altamente correlacionadas, sendo proporcionalmente, quando o sinal é positivo, ou inversamente proporcional, quando o sinal é negativo.

Os diagnósticos de regressão são usados para avaliar os pressupostos do modelo e investigar se há ou não observações com grande influência na análise. A análise de diagnóstico começou com a análise de resíduos para detectar a presença de pontos aberrantes e avaliar a adequação da distribuição proposta para a variável resposta. O *p-value* corresponde ao menor nível de significância que pode ser assumido para rejeitar a hipótese nula. Diz-se que há significância estatística quando o *p-value* é menor que o nível de significância adotado. Para a correlação encontrada, tem-se a Tabela 3, que apresenta a análise correlacional das variáveis IRI_{Depois} , IRI_{Antes} , h_{Ref} , h_{Fres} , h_{Antes} e h_{Depois} . Ela indica o quanto uma variável está correlacionada à outra, em uma escala de 0 a 1.

Tabela 3: Correlação de uma variável em relação à outra.

	IRI_{Antes}	IRI_{Depois}	h_{Antes}	h_{Depois}	h_{Fres}	h_{Ref}
IRI_{Antes}	1,00000000	0,53194158	-0,18750857	-0,02049914	-0,2350932	0,04941229
IRI_{Depois}	0,53194158	1,00000000	0,01851217	0,12747989	-0,3313325	-0,22370050
h_{Antes}	-0,18750857	0,01851217	1,00000000	0,80243085	0,3044918	0,15745885
h_{Depois}	-0,02049914	0,12747989	0,80243085	1,00000000	0,2203236	0,35173119
h_{Fres}	-0,23509318	-0,33133249	0,30449183	0,22032359	1,00000000	0,14142992
h_{Ref}	0,04941229	-0,22370050	0,15745885	0,35173119	0,1414299	1,00000000

Nas correlações lineares feitas com os dados obtidos do *InfoPave*, percebeu-se uma alta correlação entre os valores de espessura de fresagem. Porém, houve uma queda considerável na influência dos valores da espessura de reforço, o que demonstrou que a fresagem tem maior significância na redução da irregularidade comparada às seções onde não houve fresagem. Uma vez caracterizada esta relação, procurou-se descrevê-la sob forma matemática, por meio de uma função. A estimação dos parâmetros dessa função matemática é o objeto da regressão. Tendo IRI_{Depois} como a variável resposta, estimou-se os parâmetros para todas as variáveis predictoras, seja para explicar relações ou para fazer previsões.

Na primeira tentativa, fez-se uso de todas as variáveis correlacionadas, obtendo-se um modelo ajustado que indicava que as variáveis h_{Antes} , h_{Depois} e h_{Fres} deveriam ser retiradas do modelo por terem um *p-value* maior do que 5%, o que representa que estas variáveis seriam de baixa significância para este modelo.

Em seguida, foram testados modelos com a retirada individual de cada uma das variáveis que obtiveram pouca significância no primeiro modelo, o que reafirmou a retirada de h_{Antes} e h_{Depois} , mas a preservação de h_{Fres} . O modelo encontrado está apresentado na Equação 4. Para este, houve pouca significância de h_{Fres} e h_{Ref} e um R^2 de 0,32 – que representa o percentual da variação de uma variável em relação à outra, e também, um erro padrão de 0,337 em 35 graus de liberdade. A Figura 3 ilustra o diagnóstico desta regressão.

$$IRI_{Depois} = 0,80528 + 0,2652 IRI_{Antes} - 0,01686 h_{Fres} - 0,02355 h_{Ref} \quad (4)$$

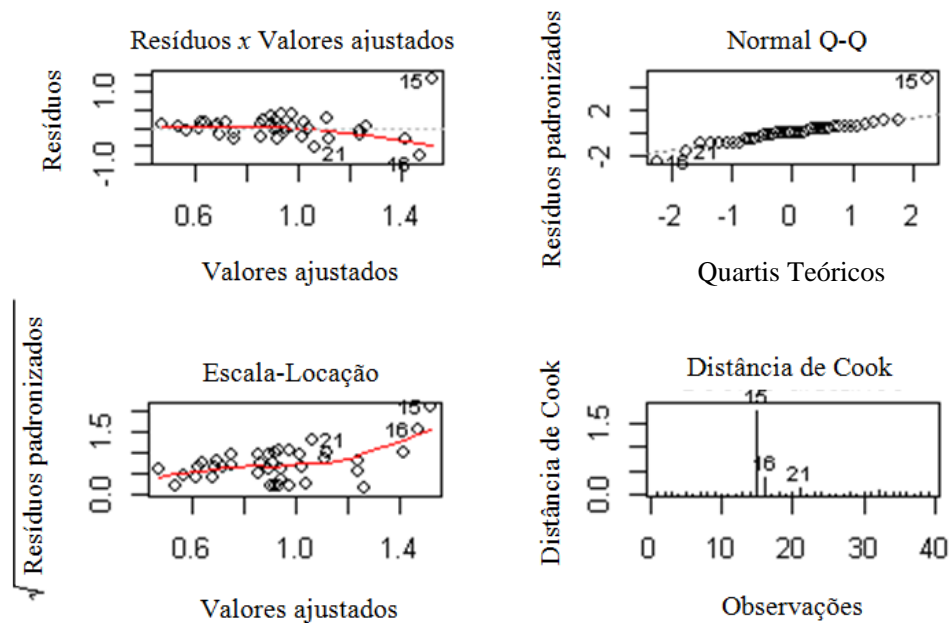


Figura 3: Diagnóstico de regressão da Equação 4

O painel superior esquerdo mostra valores residuais *versus* valores ajustados. O painel superior direito é um gráfico de quartis de distribuição normal de resíduos padronizados. O terceiro gráfico é da raiz quadrada do valor absoluto dos resíduos padronizados; isso reduz a aspereza da distribuição e torna mais fácil detectar se pode haver uma tendência na dispersão. O quarto gráfico é da distância de Cook, que é uma medida da influência de cada observação sobre os coeficientes de regressão. Percebe-se, neste último gráfico, que os valores 15 e 16 têm um pico proeminente na distância de Cook, o que representa terem um maior resíduo. Nota-se, também que o 21 tem um valor residual considerável, mas não é tão notável quanto os demais.

Seguindo-se nesta mesma linha e, entendendo-se os dados 15 e 16 como sendo pontos fora de série, fez-se outras duas tentativas de análise, retirando-se individualmente estes dois pontos e, em seguida, mais a retirada dos dois dos pontos combinados. Destas, ajustou-se o modelo apresentado na Equação 5, que foi o melhor ajustado aos dados, sem indicativos de rejeição das variáveis por terem um *p-value* menor do que 5%, com um R^2 de 0,40 e um erro padrão de 0,20 em 33 graus de liberdade. A Figura 4 ilustra o diagnóstico desta regressão.

$$IRI_{Depois} = 0,9914 + 0,1536 IRI_{Antes} - 0,0133 h_{Fres} - 0,0300 h_{Ref} \quad (5)$$

Pode-se perceber, pela distribuição normal dos resíduos padronizados, no segundo gráfico, que os resíduos se mostraram mais ajustados, não apresentando dados fora de série. Os dados de IRI medidos em campo, bem como os de IRI previstos pela Equação 5 encontram-se identificados na Tabela 4.

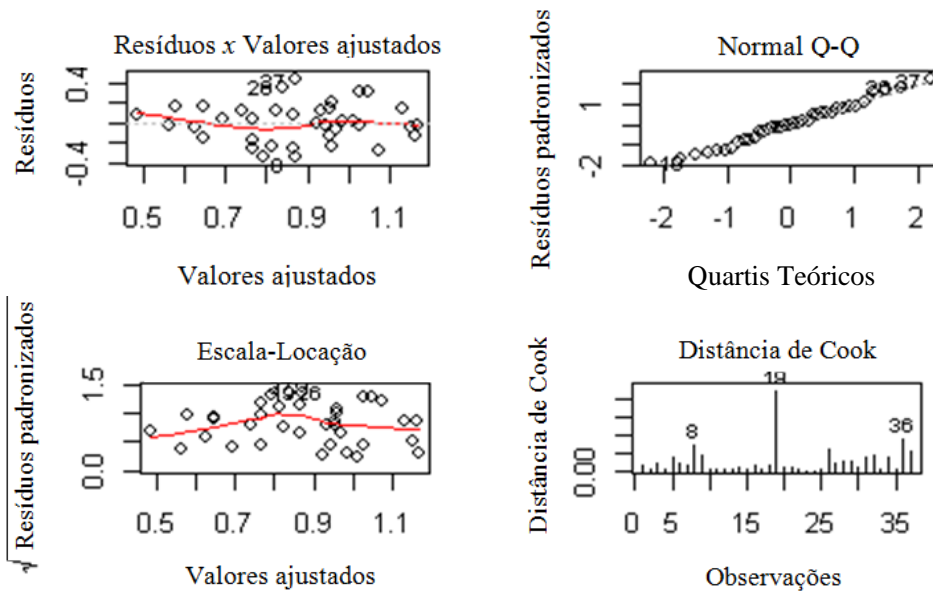


Figura 4: Diagnóstico de regressão da Equação 5

Tabela 4: IRI_{Medido} X $IRI_{Previsto}$

Estado/ Província	Identificação da Seção	IRI medida antes da intervenção (m/km)	IRI medida depois da intervenção (m/km)	IRI prevista pela Equação 5 (m/km)
Alabama	A310	1,01	1,34	0,98
Arizona	1003	1,10	0,57	0,47
Arizona	1006	1,08	0,80	0,69
Arizona	1016	1,66	0,57	0,85
Arizona	1018	1,07	0,54	0,53
Arizona	1021	1,30	0,75	0,62
Arizona	1022	0,75	0,50	0,57
Arizona	1025	1,27	0,59	0,75
Arizona	6055	0,76	0,46	0,75
Arizona	6060	0,85	0,50	0,69
Arizona	B902	1,19	0,91	0,94
Arizona	C310	1,01	0,99	0,98
Arizona	506	1,73	1,02	1,04
Arizona	508	1,55	0,94	0,86
Arizona	504	1,55	1,20	0,90
Arizona	505	2,56	1,27	1,27
Arizona	509	2,38	1,03	1,24
Arizona	559	2,06	1,16	1,02
Arizona	560	1,84	0,79	1,12
Arizona	502	2,01	1,36	1,12
Arizona	503	1,69	0,95	0,94
Arizona	507	1,83	1,30	0,93
British Columbia	6006	1,38	0,83	0,95
British Columbia	6007	1,85	0,73	1,02
British Columbia	6007	0,73	0,72	0,68
British Columbia	6007	1,08	0,81	0,64
Colorado	6002	3,37	1,11	1,42
Colorado	7783	1,50	0,61	0,92
Colorado	A310	0,65	1,00	0,90
Florida	4106	1,03	0,89	0,90
North Carolina	1801	1,00	0,86	0,72

<i>Nova Scotia</i>	6802	2,65	0,54	1,07
<i>Nova Scotia</i>	6802	0,66	0,57	0,62
<i>Ontario</i>	1806	0,95	1,05	0,86
<i>Ontario</i>	1806	2,26	1,15	1,24
<i>Ontario</i>	1806	1,15	0,91	0,92
<i>Oregon</i>	6011	1,18	1,10	0,91

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, demonstra-se possível, ainda que longe de óbvio, estabelecer correlações das reduções de irregularidade em função da espessura do recapeamento. O conhecimento de modelos de previsão de IRI pós-recape permite melhoria na confiabilidade da tomada de decisão a partir de planos de manutenção. Com o objetivo de ter uma relação entre a irregularidade medida na rodovia e a espessura do recapeamento a ser colocado sobre ela foi desenvolvido um modelo de previsão da irregularidade longitudinal. Para este estudo foram considerados dados da malha rodoviária pavimentada em 39 seções dos EUA e Canadá.

Para a análise estatística dos dados foram utilizados Modelos de Regressão Linear para avaliar a significância dos fatores e definir os parâmetros do modelo de previsão da irregularidade. O modelo que se mostrou mais satisfatório está descrito na Equação 5, e obteve um R^2 de 0,398 e um erro padrão de 0,20; e tem como variáveis explicativas IRI_{Antes} , h_{Fres} e h_{Ref} que são descritas de acordo com IRI_{Depois} . Estes valores de coeficiente de correlação, apesar de razoavelmente baixos para modelos estatísticos, podem ser considerados razoáveis haja visto o grande número de seções consideradas e a heterogeneidade das manutenções realizadas.

Além das variáveis geométricas da via, que são de impacto na redução do IRI, parece haver também outras variáveis. A mais evidente, e de difícil consideração, é certamente o processo construtivo adotado juntamente com os tipos de equipamento utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BARELLA, R.M. (2008) *Contribuição para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais*. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. (2006) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) *Medição da Irregularidade de Superfície de Pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter*. DNER-PRO 182/1994. Rio de Janeiro.
- LERCH, R. L. (2003) *Previsão de Irregularidade Pós-recape em Rodovias do RS: Ajuste do Modelo HDM-4*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- NAKAHARA, S. M. (2005) *Estudo de Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Vias Sujeita a Tráfego Comercial Pesado*. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. (2010) *Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia.
- VITORELLO, Thiago. (2008) *Análise de desempenho de estrutura de pavimento flexível da rodovia BR-290/RS no trecho Osório-Porto Alegre*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.