

AValiação DO PARâMETRO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA CAMADA DE BASE CINZA/CAL DE PAVIMENTO A PARTIR DE ENSAIOS *IN SITU* APLICANDO O GEOGAUGE

Paulo Victor de Araújo Fernandes

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará
Departamento da Construção Civil

Francisco de Assis Franco Vieira

Bruno Tiago Angelo da Silva

Suely Helena de Araújo Barroso

Universidade Federal do Ceará

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

RESUMO

Foi construído um trecho experimental empregando cinzas de carvão mineral provenientes das usinas termelétricas do Pecém localizadas no estado do Ceará. A camada de base foi dividida em seis subtrechos dos quais cinco foram usados diferentes misturas de cinza/cal. Para avaliar o Módulo de Resiliência (MR) dos subtrechos *in situ* foi usado o Geogauge que determina rapidamente o parâmetro MR de campo, mas considera seu valor como sendo constante. No laboratório, o MR é determinado através de um modelo matemático em função do estado de tensões. Sendo assim, este estudo avaliou a possibilidade da obtenção de uma equação de correlação entre os MRs determinados em laboratório e campo para fins de controle de qualidade dos subtrechos construídos. Foram obtidos bons coeficientes de correlação ($R^2=0,90$) entre as duas variáveis, mas a equação desenvolvida foi considerada não adequada em função do reduzido banco de dados analisados neste trabalho.

ABSTRACT

An experimental section was constructed with the use of coal ash from Pecém thermoelectric plants located in the state of Ceará. The base layer was divided into five sub-sections of which four different ash/lime mixtures were used. To evaluate the Resilient Modulus (MR) of the *in situ* sub-sections, the Geogauge which quickly determines the field parameter was used to evaluate MR, but it considers its value as constant. In the laboratory, the MR is determined through a mathematical model as a function of the stress state. Thus, this study evaluated the possibility of obtaining a correlation equation between the MRs determined in laboratory and field for the purpose of quality control of built sections. Good correlation coefficients ($R^2 = 0.90$) were obtained between the two variables, but the developed equation was considered inadequate due to the small database analyzed in this work.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência estrutural do pavimento é dada, por um lado, na fase de projeto de dimensionamento, já que é por ela que normalmente são discutidas e definidas possíveis soluções de engenharia a serem aplicadas em cada fase de execução da obra. Por outro lado, é na fase do controle de qualidade que se verificam se as soluções tomadas na fase de projeto tem validade. Se o dimensionamento do projeto assume o Módulo de Resiliência (MR), definido como a razão entre a tensão desvio e a deformação elástica recuperável ou resiliente, como parâmetro fundamental para determinar a espessura de camada necessária de uma estrutura de pavimento, a metodologia mais adequada para controle de qualidade não pode mais ser aquela que visa somente a determinação das propriedades físicas de campo. “As metodologias e tecnologias utilizadas para aceitação e controle da qualidade das estruturas de pavimento tendem a acompanhar a evolução dos métodos de dimensionamento” (Ferri, 2013).

A metodologia utilizada para aceitação do controle de qualidade de uma obra rodoviária permite reconhecer se os parâmetros adotados na etapa do dimensionamento são aqueles obtidos na sua fase de execução. A sua relevância nas obras de infraestrutura viária consegue envolver temas relevantes como a segurança nas diversas etapas de obra, o retorno financeiro, econômico, social do investimento que vão estar ligados diretamente ao processo de

sustentabilidade ambiental da obra. No atual estado da prática, o controle de qualidade é baseado quase que exclusivamente na obtenção de propriedades físicas tais como a densidade de campo, o teor ótimo de umidade, além do controle da espessura das camadas.

Em particular, no controle de qualidade de pavimentos dimensionados por métodos mecanísticos-empíricos, a possibilidade de avaliação do módulo de rigidez *in situ* das camadas pode ser bastante útil para avaliar a eficiência das técnicas de construção e a adequação dos materiais utilizados, frente à determinação das suas características mecânicas, examinando antecipadamente os seus comportamentos em campo.

Nos últimos anos, na área de pavimentação, novos dispositivos ganharam importância ao avaliar propriedades mecânicas das camadas de pavimentos, desde que eles sejam capazes de medir a resistência de materiais com invasão mínima e muitas vezes de modo bastante rápido. Ensaio *in situ*, como o Geogauge (*Soil Stiffness Gauge – SSG*), podem ajudar a verificar a qualidade das camadas granulares dos pavimentos à medida que elas são construídas, determinando parâmetros de deformabilidade em campo.

O SSG é um redesenho de um dispositivo militar que usava detectores acústicos e sísmicos para localizar minas terrestres enterradas. A sua origem foi estimulada pelo interesse em querer atualizar os procedimentos de controle de qualidade de pavimentos utilizados que se baseavam praticamente em testes de massa específica e umidade *in situ*, conforme comenta Seyman (2003). O Geogauge foi fabricado pela *Humboldt Manufacturing Company* e desenvolvido em parceria com o FHWA (*The Federal Highway Administration*), apresentando-se com a finalidade de medir a rigidez do solo em campo, ao estabelecer um meio direto de medida das propriedades dos materiais e das estruturas das camadas dos pavimentos (Maia, 2016).

Nesse contexto, reconhece-se o SSG como um equipamento potencial para ser usado no controle de qualidade de construção de camadas granulares. Todavia, o equipamento produz apenas valores constantes de MR, ou seja, um valor único como resultado, concebendo resultados com módulos equivalentes que podem não ser representativos dos valores de rigidez determinados em laboratório e utilizados no dimensionamento mecanístico-empírico no Brasil. Assim sendo, é importante que se avalie se há correlações entre os MR obtidos em campo, através de testes com o SSG, e aqueles obtidos em laboratório através do ensaio Triaxial de Cargas Repetidas (TCR).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Informações Gerais Sobre o Trecho Experimental com Cinzas

O trecho experimental analisado pela Universidade Federal do Ceará (UFC) usou, como material de construção em suas camadas granulares, cinzas oriundas do carvão mineral queimado nas termelétricas do Pecém/CE. Toda a concepção do trecho foi conduzida pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC em parceria com a EDP Brasil, administradora do complexo das termelétricas do estado do Ceará: Energia Pecém e UTE Pecém II.

Localizado às margens da CE-085, no município de São Gonçalo do Amarante/CE, que fica a 62,5 km de Fortaleza, o trecho dá acesso ao Complexo Termelétrico do Pecém a partir da rodovia estadual. A via possui uma extensão de 1,4 km e 12 m de largura, incluindo uma

rotatória. Para a construção do trecho foram utilizadas as cinzas contidas no Módulo I da termelétrica que foram consideradas heterogêneas conforme mostrado em Vasconcelos *et al.* (2019). Na sub-base foi utilizada uma mistura constituída de 50% de solo + 50% desse tipo de cinza. Para a camada de base executou-se inicialmente um primeiro acesso com Brita Graduada Simples (BGS) e os segmentos restantes com misturas de cinza/cal, em que se empregaram diferentes valores de porcentagem de cal (1,6%, 3% e 5%).

A Figura 1 mostra a localização e a extensão do trecho experimental construído. Já a Figura 2 mostra como a camada de base do trecho se dividiu em seis intervalos e foi constituída por vários segmentos para análise em decorrência: (i) dos diferentes valores percentuais de cal utilizados; (ii) das diferentes datas de construção e (iii) em função de problemas que iam ocorrendo no campo (drenagem, chuvas, excesso de umidade das cinzas, etc). Observe-se que a partir de estaca 13, predominou a mistura cinza/cal.



Figura 1: Localização do trecho experimental com cinzas avaliado pela UFC

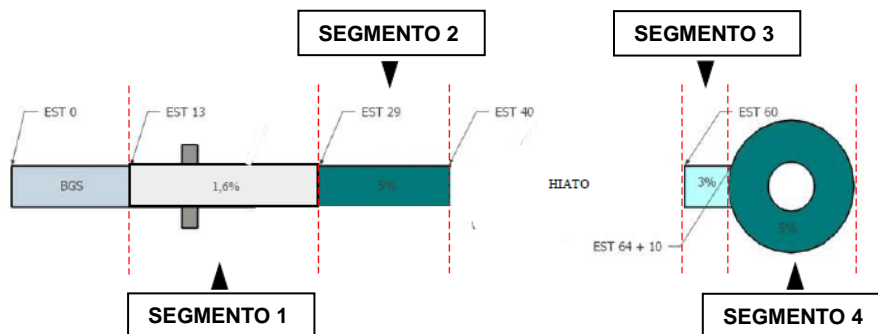


Figura 2: Camada de base do trecho experimental da UFC

O início do trecho experimental, que corresponde ao intervalo entre as estacas 0 e 13, foi executado em BGS e não entrou no escopo desta pesquisa. O segmento 1 foi construído com mistura de 98,4 % de cinzas e 1,6 % de cal. O segmento 2 teve aplicação de mistura de 95 % de cinzas e 5 % de cal. O segmento 3 foi executado com mistura de 97 % de cinzas e 3 % de cal. Já o segmento 4 teve o emprego de mistura de 95 % de cinzas e 5 % de cal. O segmento Hiato é composto por mistura cinza e cal, mas como esse trecho estava sendo reconstruído na época da elaboração do presente artigo, não entrou no escopo desta pesquisa.

Ressalte-se que o material do segmento 2 foi uma mistura de cinza/cal que foi refeita, pois sofreu alteração na composição de seu material para chegar ao valor de 95 % cinza e 5 % cal. Essa mudança se deu por identificação de um erro da empresa executora, devido ao cálculo do percentual da cal sobre o volume da cinza e não de sua massa, onde foi detectado que o trecho

continha apenas 1,6 % de cal no lugar de 5 %. Posterior a pré-execução da base nesse segmento, foi feita a correção do percentual do material da mistura de acordo com o projeto ou seja foi adicionado 3,4 % de cal na camada que continha 1,6 % de cal.

Duas situações levaram à não execução do ensaio SSG nos demais subtrechos: (i) o intervalo inicial do trecho que foi executado em BGS, por não ser o foco do trabalho avaliar o MR de camadas constituídas para esse tipo de material e (ii) o intervalo Hiato por estar sendo reconstruído no período de execução do ensaio de campo, inviabilizando a execução do teste.

A Tabela 1 mostra informações sobre o teor da cal empregado, período de conclusão, bem como extensão de cada segmento analisado.

Tabela 1: Informações sobre o teor da cal, período de conclusão e extensão dos segmentos.

Segmentos	Cal (%)	Estacas	Data de Conclusão	Extensões
1	1,6	13 – 29	04 jan. 2019	340 m
2	5 (1,6+3,4)	29 – 40	22 jan. 2019	200 m
3	3	60 – 64 + 10 m	23 jan. 2019	80 m
4	5	64 + 10 m – 71r	26 jan. 2019	150 m

2.2. Informações Sobre as Cinzas e a Cal Utilizadas

As cinzas usadas para construção do trecho experimental foram retiradas do Módulo I de armazenamento do Complexo Termelétrico do Pecém que está preenchido com cinzas (aproximadamente 350 mil m³ de volume) leves e pesadas, estando também depositados alguns outros materiais, como pirita, material orgânico e, inclusive, águas servidas das instalações da própria termelétrica. As cinzas oriundas dessa termelétrica vêm sendo estudadas por diferentes autores como Barros (2015), Silva (2017), Alcântara (2018) e Vasconcelos (2018), dentre outros. Vasconcelos (2018) realizou ensaios de caracterização física, química, ambiental, bem como ensaios mecânicos, onde classificou as cinzas do Módulo I como heterogêneas e como sendo Resíduos de Classe II-A (Não Inerte).

A cal utilizada para estabilização química das misturas foi do tipo hidratada calcítica comercial e classificada como do tipo CH-1. A sua escolha se deu por ser considerado um material abundante no estado e em função dos estudos desenvolvidos por Araújo (2009).

2.3. Ensaios de Módulo de Resiliência Realizados no Laboratório

Os materiais usados para os ensaios laboratoriais de MR foram coletados em oito pontos distintos ao longo de toda extensão da camada de base. Para cada segmento foi coletado material em dois pontos que foram misturados e homogeneizados. Posteriormente, foram moldados os corpos de prova para realização do ensaio Triaxial de Carga Repetida (TCR), usando o mesmo teor de umidade de campo, conforme o procedimento contido na norma DNIT 134/2018-ME. Com base nos resultados de MR, definiram-se modelos matemáticos para o cálculo das tensões e deformações. Adotaram-se como ferramentas os *softwares Excel e LAB Fit* para obtenção e análise dos resultados.

2.4. Ensaios de Campo Realizados com o Geogauge

O ensaio em campo utilizando o equipamento SSG foi realizado com a finalidade de avaliar a rigidez da camada de base de material alternativo conforme as exigências da Norma ASTM D 6758 e adotando algumas observações apontadas na pesquisa de Mendes (2013) e Maia (2016).

Com isso, os testes de SSG foram aplicados em 38 pontos, no dia 31 de janeiro de 2019 e, portanto, o levantamento se deu com diferentes tempos de cura. Os testes seguiram o alinhamento da rodovia, começando pela borda esquerda, em seguida o eixo e borda direita, em um intervalo de pontos a cada 10 metros, conforme mostra a Figura 3. No segmento 1 foram aplicados 16 testes; no segmento 2 foram aplicados 10 testes; no segmento 3 foram aplicados 5 testes e no segmento 4 foram realizados 7 testes.

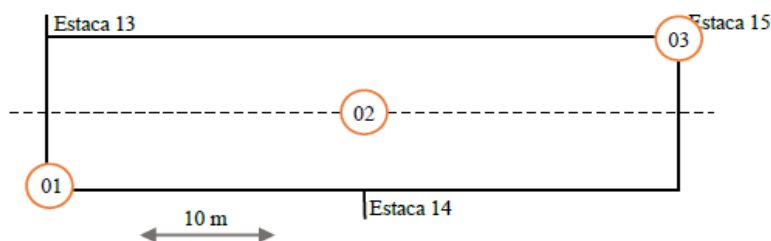


Figura 3: Esquema de aplicação do SSG no trecho experimental avaliado pela UFC

2.5. Estabelecimento de Correlações entre o MR Obtido em Laboratório e no Campo

Para que se obtenha uma correlação entre os módulos determinados com o equipamento SSG no campo e aqueles obtidos a partir do ensaio TCR em laboratório, possibilitando uma avaliação de parâmetro de MR da camada de base cinza/cal, é fundamental que o módulo de laboratório seja dado por um valor constante. Entretanto, sabe-se que no geral o MR de laboratório é expresso através de modelos matemáticos que estão em função do estado de tensões.

Os resultados da pesquisa NCHRP Project 1-28 A, da *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus For Flexible Pavement Design* e o estudo de Gudishala (2004) propõem o uso de pares de tensões desvio e confinante para camada de base iguais a 103 kPa e 34 kPa, respectivamente. Sendo assim, esses valores foram adotados neste estudo para obtenção do módulo representativo de laboratório para um estado específico de tensão. Destaque-se aqui a necessidade de uma melhor avaliação mecânica desses pares de tensões, que não foi o escopo do presente trabalho, para pesquisas futuras que envolvam uma análise mais direcionada ao tipo de pavimento que se está investigando.

Para a determinação do MR de campo, tendo em vista que foram determinadas várias medidas, foi necessário adotar um valor representativo para cada segmento do MR medido pelo SSG, nomeado neste trabalho pela sigla MR_{SSG} . Com os dados fornecidos dos ensaios de campo, fez-se a análise estatística dos dados para cada segmento (cálculos da média, desvio padrão e coeficiente de variação).

As correlações, entre os módulos medidos tanto com o SSG como os do TCR, foram obtidas através de análises de regressão simples. Essa correlação acontece através de uma matriz de correlação com os parâmetros determinados nos ensaios de MR (campo e laboratório).

No processo de correlação, o MR_R (Módulo de Resiliência Representativo de Laboratório) foi considerado a variável dependente e o MR_{SSG} como variável independente. Também foi feito o teste t para avaliar o nível de significância da equação gerada. Tentou-se, também, a normalidade dos resíduos e estimaram-se os intervalos de confiança para os modelos de regressão linear.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Resultados dos Ensaios com o Equipamento Geogauge

Ao todo foram realizados 38 testes, com o SSG aplicados em quatro intervalos compostos por mistura cinza/cal, na camada de base do trecho experimental. Para que o equipamento de SSG pudesse determinar os valores de elasticidade em MPa, foi inserido o valor do coeficiente de Poisson (ν) de 0,40 que, segundo a literatura, pode ser usado para camadas de sub-base e base.

As Tabelas 2, 3, 4 e 5, apresentam, respectivamente, os resultados dos testes de SSG obtidos para os segmentos 1, 2, 3 e 4 que apresentam teores de cal de 1,6%; 5%; 3% e 5%, respectivamente. Ressalta-se que as estacas identificadas com um número + letra r (rotatória) são consideradas estacas virtuais para sinalizar os locais onde foram aplicados os ensaios com SSG na rotatória.

Tabela 2: Resultados dos testes de SSG no segmento 1 com tempo de cura de 28 dias

SEGMENTO 1-1,6 % Cal			
Tempo de Cura 28 dias			
Estacas	SSG (MPa)	Estacas	SSG (MPa)
13	20,64	22	38,14
14	55,88	23	54,19
15	58,12	24	35,19
16	50,59	25	55,78
17	40,41	26	65,03
18	63,88	27	76,95
19	44,36	28	61,05
20	43,58	29	92,31
21	47,54		
Média			53,15
Desvio Padrão			16,64
Coeficiente de Variação (%)			31,31

Tabela 4: Resultados dos testes de SSG no segmento 3 com tempo de cura de 8 dias

SEGMENTO 3 - 3 % Cal		
Tempo de Cura 8 dias		
Estacas	SSG (MPa)	
60	165,13	
61	97,4	
62	108,99	
63	89,94	
64 +10	155,55	
Média		123,4
Desvio Padrão		34,56
Coeficiente de Variação (%)		28

Tabela 3: Resultados dos testes de SSG no segmento 2 com tempo de cura de 9 dias

SEGMENTO 2 - 5 % Cal			
Tempo de Cura 9 dias			
Estacas	SSG (MPa)	Estacas	SSG (MPa)
30	84,36	35	176,23
31	86,52	36	147,24
32	95,96	37	222,89
33	82,85	38	76,66
34	105,4	39	172,87
Média			125,1
Desvio Padrão			51,06
Coeficiente de Variação (%)			40,81

Tabela 5: Descrição dos testes de SSG no segmento 4 com tempo de cura de 5 dias

SEGMENTO 4 - 5 % Cal (Rotatória)			
Tempo de Cura 5 dias			
Estacas	SSG (MPa)	Estacas	SSG (MPa)
65r	345,73	69r	488,99
66r	332,22	70r	407,36
67r	346,71	71r	280,38
68r	346,53		
Média			363,98
Desvio Padrão			66,38
Coeficiente de Variação (%)			18,23

A média dos módulos de quase todos os segmentos que compõem a camada de base do trecho experimental se mostrou inferior a 150 MPa, exceto no segmento 4, onde se observou um valor maior.

No segmento 1, observou-se que a maioria dos testes com o SSG apresentou valores de MR inferiores aos demais segmentos o que pode ter sido ocasionado pelo baixo teor de cal usado (1,6 %). Esse baixo teor talvez só tenha sido suficiente para desenvolver as reações da fase rápida, sem desenvolver completamente as reações lentas cimentantes.

Ressalte-se aqui que todo o teor da cal determinado para a construção do trecho experimental foi dosado em laboratório e determinado em peso, sendo essas informações repassadas para a executora que deveria ter realizado as transformações para volume. Conforme informado anteriormente, o segmento 2 foi construído com uma mistura com 1,6 % de cal quando deveria ter sido construído com um teor de 5 %, por ocasião de um erro de dosagem no campo provocado pela necessidade de se ter convertido o teor da cal em peso para volume. Após executada a base nesse segmento e detectado o erro, foi realizada a adição de mais 3,4 % de cal, a fim de se atingir os 5 % previstos no projeto original.

Esperava-se que os segmentos 2 e 4 tivessem comportamentos similares em função de teoricamente terem a mesma dosagem (95 % cinza + 5 % cal). Os resultados apresentados pelo SSG mostraram que a mistura do segmento 2 não apresentou tanta rigidez quanto a do segmento 4. O processo de estabilização do segmento 2 gerou uma resistência equivalente a do segmento 3, construído com 3 % de cal. Talvez, o processo construtivo de correção da dosagem tenha provocado a não reação da cal já existente (1,6 %) com a cal adicionada (3,4 %) para a correção do teor de campo (5 %).

O segmento 4, dosado com 5 % de cal desde o início da construção do trecho de forma correta, mostrou-se com uma resistência bem superior a todos os demais segmentos apresentando média de MR de 364,98 MPa.

A análise da rigidez da mistura cinza/cal com o SSG mostrou um ganho na resistência da base ao longo do tempo e conseqüentemente proporcional ao acréscimo do teor da cal. Perceberam-se, também, os baixos valores de MR do SSG quando comparados aos MR de laboratório. Esse comportamento talvez seja justificado em decorrência da presença de pequenas trincas no campo, que causam diminuição na uniformidade da camada de teste, que podem conseqüentemente diminuir os valores do módulo de rigidez do SSG (Seyman, 2003).

3.2. Análise dos Dados de Campo e o Valor de Módulo Representativo do SSG (MR_{SSG})

O controle estatístico é constituído de forma que quase todos os pontos coletados em campo têm seus valores entre o Limite de Controle Superior (LCS) e o Limite de Controle Inferior (LCI), com a presença de uma linha média, onde o valor de MR_{SSG} de cada ponto deve permanecer dentro do intervalo determinado. Se o valor ultrapassar um desses limites, passa a ser interpretado como *outlier* (valor extremo) e, por conseguinte, torna-se elemento não influenciador para o cálculo da média. Nesse caso, o nível de confiança (α) adotado foi de 5% e, tecnicamente, 95% de todos os intervalos de confiança conterá o verdadeiro valor do parâmetro.

A Tabela 6 corresponde aos pontos médios analisados, após eliminação dos *outliers*, e apresenta valores inferiores à média simples calculada no item 3.1.

Tabela 6: Valores de MR_{SSG} representativos antes e após a análise estatística

SEGMENTOS	MR_{SSG} (MPa) (Sem análise estatística)	MR_{SSG} (MPa) (Com análise estatística)
1	53,15	52,20
2	125,09	106,48
3	123,40	103,20
4	363,98	355,71

O módulo de deformabilidade de cada segmento obtido com o SGG mostra uma dispersão de resultados entre si, como já esperado, uma vez que existe uma diferença no tempo de cura de cada segmento, além da diferença no percentual da cal em cada segmento.

3.3. Resultados do Ensaio Triaxial de Carga Repetida

Os resultados dos ensaios MR estão dispostos na Tabela 7. O modelo composto ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$) foi o que melhor representou o comportamento resiliente das misturas cinza/cal da camada de base do trecho experimental, dentre os modelos testados, embora o valor de correlação (R^2) seja ainda considerado baixo. Observou-se, de acordo com os resultados obtidos, que o comportamento da mistura cinza/cal depende mais da tensão desvio.

Tabela 7: Modelo de MR das misturas (cinza/cal) empregadas na camada de base considerando o tempo de cura de 7 dias.

SEGMENTOS	$MR = K_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$			
	K_1	K_2	K_3	R^2
1	143,1	0,115	-0,107	0,696
2	303,7	0,103	0,259	0,407
3	798,9	0,229	0,166	0,834
5	766,9	0,52	-0,719	0,588

3.4. Módulo de Resiliência Representativo de Laboratório (MR_R)

Gudishala (2004) trouxe o modelo que pode ser adaptado como uma ferramenta de comparação do Módulo Resiliente alcançado no campo com o utilizado no projeto do pavimento durante a sua construção, de modo a permitir a correlação entre os dois ensaios (laboratório e campo).

A obtenção dos valores de MR_R se deu através da resolução da própria equação do modelo composto, apresentado na Tabela 7, e usando-se o estado de tensões recomendado pelo *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design* e pela pesquisa de Gudishala (2004). Sendo assim, foram utilizados os pares de tensão desvio (σ_d) e tensão confinante (σ_3) de 103 kPa e 34 kPa, respectivamente.

Estudos como os de Maia (2016), que usou o modelo sugerido por Gudishala (2004), apresentou resultados satisfatórios na correlação entre os ensaios campo/laboratório. A Tabela 8 mostra os valores representativos dos MR_R da mistura cinza/cal.

Para efeito de análise dos dados, adotaram-se, para todos os segmentos, os valores de MR_R

relacionados com o tempo de cura de 7 dias no campo. Destaca-se que o MR_R do segmento 1 foi adotado a partir da resolução da equação do MR com tempo de cura de 7 dias, embora os autores reconheçam que quando foram feitos os testes com o SSG, o tempo de cura da mistura do segmento supracitado foi de 28 dias. Isso se deu em função de dificuldades operacionais da equipe estar no campo no tempo correto. Apesar de valer comentar que o segmento 1 possui um teor baixo de cal (1,6 %) e que talvez tenha sofrido apenas o processo de modificação pela cal o que pode provocar um acréscimo não considerável no valor de MR (Araújo, 2009) com o tempo de cura.

Tabela 8: MR_R das misturas considerando o tempo de cura de 7 dias e os pares de tensão desvio ($\sigma_d = 103$ kPa) e tensão confinante ($\sigma_3 = 34$ kPa)

SEGMENTOS	$MR = K_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$					MR_R (MPa)
	K1	K2	K3	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	
1	143,1	0,115	-0,107	0,034	0,103	123,70
3	303,7	0,103	-0,259	0,034	0,103	386,24
4	798,9	0,229	0,166	0,034	0,103	252,54
5	766,9	0,52	-0,719	0,034	0,103	677,45

Os resultados de MR_R e MR_{SSG} , expostos na Tabela 9 e apresentados na Figura 4, mostram a relação entre os valores dos módulos analisados no campo e no laboratório para os diferentes segmentos construídos com misturas de cinza+cal.

Tabela 9: Valores dos módulos representativos de MR_{SSG} e MR_R

SEGMENTOS	CAL	MR_{SSG} (MPa)	MR_R (MPa)
1	1,6 %	52,20	123,70
2	5 % (1,6 % + 3,4 %)	106,48	386,24
3	3 %	103,20	252,40
4	5 %	355,71	677,45

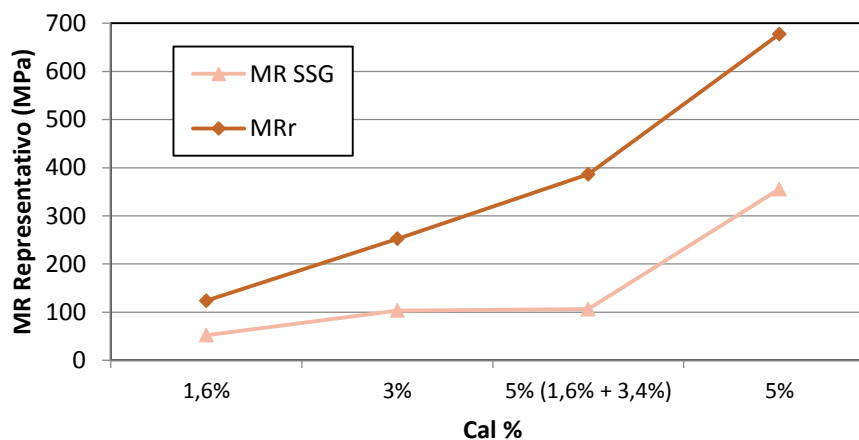


Figura 4: Valores de MR_{SSG} e MR_R versus teor de cal

Observa-se que o segmento 2, que teve mistura inicial com 1,6 % e depois passou para 5 % de cal, não ganhou tanta resistência quando comparado à mistura do segmento 4 com 5 % de cal. É significativo observar, também, que o gráfico da Figura 4 mostra que o comportamento dos valores de módulo obtidos com o SSG teve uma disposição natural em acompanhar os módulos obtidos com o TCR. Esses resultados parecem indicar que o comportamento do segmento 2 e 3 são similares, como se a cal adicionada (3,4 %), para realizar a correção de dosagem no trecho 2, não tivesse reagido com a cal existente no trecho construído (1,6 %). Ou seja, os resultados de laboratório e campo sugerem que os trechos 2 e 3 funcionam como se tivessem teores próximos de 3%.

3.5. Análise Estatística dos Valores de MR_R e MR_{SSG}

Para realização da análise estatística, adotou-se o Módulo de Resiliência Representativo de Laboratório (MR_R) como variável dependente, enquanto que o valor de MR_{SSG} foi considerado como variável independente. Observou-se que a variável independente MR_{SSG} tem um alto coeficiente de correlação (r) com a variável dependente MR_R , apresentando um valor de 0,95, e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,90. Esses valores apontam a existência de uma relação linear expressiva entre as variáveis e ainda que 90% das variações de y podem ser explicadas pelo modelo utilizado, apresentando-se como um bom modelo capaz de explicar o y (Módulo Representativo). Para melhor interpretar esses dados, elaborou-se a Figura 5 que mostra a dispersão da variável independente com a variável dependente de forma gráfica.

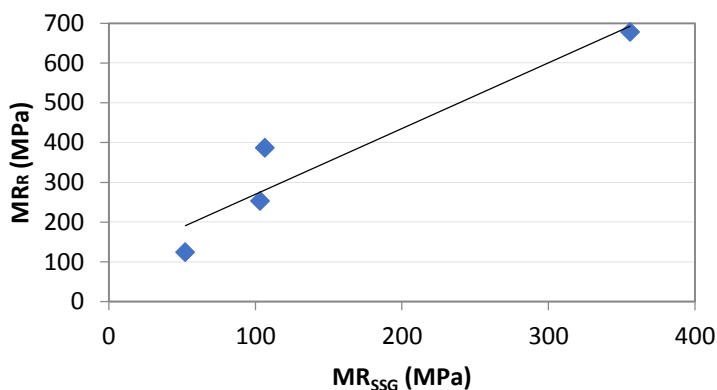


Figura 5: MR_R x MR_{SSG}

O modelo desenvolvido considera tanto um estado de tensão específico para determinação do MR representativo (MR_R) como também um valor de média dos MR_{SSG} . Portanto, tem-se a equação de correlação obtida neste estudo, apresentada pela Equação 1.

$$MR_R = 1,6516 * MR_{SSG} + 104,94 \quad R^2 = 0,90 \quad (1)$$

em que: MR_R : Módulo de resiliência representativo com o TCR [MPa];
 MR_{SSG} : Módulo de resiliência representativo com o SSG [MPa].

O primeiro parâmetro de análise de verificação da correlação entre os ensaios de campo e laboratório é o valor-P. Nesse caso, como o nível de significância (α) representa valor de 5 %, o valor-P deve, portanto, ser menor que 5%. Nesta pesquisa, a correlação entre os módulos de campo e laboratório apresentaram um valor percentual de 29,44%, com coeficiente de

determinação (R^2) de 90,27 %.

Como o valor-P é superior a α , o Teste da Hipótese reconhece a equação como não adequada para o tipo de correlação existente entre as duas variáveis, dado que a regressão linear entre as variáveis MR_R e MR_{SSG} não consegue atender tais premissas. O resultado mostra que a variável X (MR_{SSG}) não consegue explicar a variável Y (MR_R).

Esse resultado foi considerado coerente, tendo em vista o pequeno espaço amostral aqui analisado. Ao se fazer regressão com apenas 4 observações, implica-se praticamente na falta de confiança dos resultados, uma vez que a estatística reconhece que para ter valores representativos deve-se adotar no mínimo a quantidade de 5 observações para uma variável.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Geogauge (SSG) é um equipamento de fácil uso e baixo custo, mas ainda não muito utilizado para controle de qualidade de construção de pavimentos. Entretanto, estudos mostram se tratar de um equipamento com grande potencial de aplicabilidade prática e que possui coerência de resultados.

Para o caso do trabalho aqui apresentado, os valores dos MR do SSG apresentaram uma disposição natural em acompanhar os MR obtidos com o TCR. Foi possível perceber as mudanças das rigidezes das misturas cinca/cal quando o teor da cal foi alterado. Observou-se que os valores medidos com o SGG foram mais baixos quando comparados com aqueles medidos em laboratório através do ensaio triaxial dinâmico.

De um modo geral, a partir da pesquisa aqui desenvolvida foram obtidos bons coeficientes de correlação ($R^2=0,90$) entre as variáveis de campo e laboratório, mas a equação obtida foi considerada não adequada em função do reduzido banco de dados analisado. Sendo assim, é necessária uma ampliação da quantidade de observações para que se tenham correlações estatísticas confiáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Temática de Asfalto, à Aneel (órgão regulador) e a Energia Pecém e Eneva pelo financiamento da pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, M. R. G. (2018) *Estudo da utilização de cinzas pesadas de termoelétricas para produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados*. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- Araújo, A. F. *Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará*. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- Barros, K. S. (2015) *Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos*. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- DNIT (2018) *DNIT-134/2018 – ME – Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.
- Dias, C. R. C. (2004) *Estudo de Misturas de Areia-Asfalto e Cinza Cal Para Emprego em Pavimentos Urbanos*. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- Ferri, S. (2013) *Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos*. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

- Gudishala, R. (2004) *Development of resilient modulus prediction models for base and subgrade pavement layers from in situ devices test results*. 133 f. Thesis (Master of Science in Civil Engineering). Faculty of the Louisiana State University, Louisiana, 2004.
- Maia, C. L. (2016) *Análise comparativa de módulos de resiliência obtidos com o geogauge para o controle de qualidade de camadas granulares dos pavimentos*. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- Mendes, J. T. S. (2013) *Utilização do Defletómetro de Impacto Ligeiro, do GeoGauge e do Densímetro Elétrico para o Controlo in situ da Qualidade de Materiais em Obras de Pavimentação Rodoviária*. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2013.
- Seyman, E. (2003) *Laboratory Evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools*. 186 f. Thesis (Master of Science in Civil Engineering). Graduate Faculty of the Louisiana, State University and Agricultural and Mechanical College, 2003.
- Silva (2017) *Avaliação da aplicação de cinzas de termelétrica em blocos intertravados de pavimentos*. 165f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- TRB (2004) NCHRP Project 1-28 A. *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus For Flexible Pavement Design*. USA, 2004.
- Vasconcelos, S. D. (2018) *Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos*. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- Vasconcelos, S. D. *et al.* (2019) Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos. *Revista Transportes*, v.27, n. 2, p. 73-88.

Paulo Victor de Araújo Fernandes (vctpaulo@hotmail.com)
Francisco de Assis Franco Vieira (assisfranco.eng@gmail.com)
Bruno Tiago Angelo da Silva (brunoangelo@ufersa.edu.br)
Suely Helena de Araújo Barroso (suely@det.ufc.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)
R. Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza, CE, Brasil