

Ensaio de campo em trechos de pavimentos experimentais executados com materiais alternativos

Vinicius Carmino Borges Santana, Lilian Ribeiro de Rezende

Escola de Engenharia Civil/ UFG, 74605-220, Brasil.

e-mail: viniciuscarmino@hotmail.com; lrezende@eec.ufg.br.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação, fosfogesso, RCD, filer de pedreira.

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e industrialização das cidades fizeram com que cada vez mais aumentasse o número de estradas e vias urbanas pavimentadas. Para a construção dessas vias, torna-se necessária a exploração de grande quantidade de materiais recomendados pelas especificações técnicas vigentes. No caso de regiões de clima tropical, é comum usar o cascalho laterítico para desempenhar o papel de base e sub-base desses pavimentos. Devido à grande urbanização que ainda existe atualmente, o uso desses materiais tornou-se um problema econômico e ambiental. Cada vez mais torna-se difícil encontrar jazidas próximas às obras, fato que aumentou custos, além da devastação ambiental gerada pelo processo de exploração.

Em contra partida, essa mesma industrialização e urbanização gera uma enorme quantidade de resíduos sólidos proveniente de indústrias e das construções, e que na maioria das vezes não possuem destino final para sua deposição no ambiente. Três casos particulares desses resíduos são objeto de estudo nesta pesquisa:

- Fosfogesso – subproduto originado da transformação da rocha fosfática para obter o ácido fosfórico utilizado na produção de fertilizante. Em Goiás, existem indústrias que geram um expressivo número deste material em Ouvidor e Catalão onde estão depositadas mais de 20 milhões de toneladas de fosfogesso (REZENDE, 2007);
- Resíduos da Construção e Demolição (RCD) – resíduos gerados nos processos de construção, reforma e demolição da indústria da construção civil que, geralmente, são considerados inúteis e descartados de forma nem sempre adequada, o que causa inúmeros problemas sócio-ambientais. Por outro lado, os resíduos sólidos da construção civil, especificamente os compostos por concretos, argamassas e

elementos cerâmicos (denominados de Classe A) são uma fonte de materiais alternativos de grande potencial e utilidade na engenharia. Seu uso mais tradicional em aterros nem sempre é o mais racional, pois ele pode também substituir materiais naturais normalmente extraídos de jazidas ou ser transformado em matéria-prima para componentes de construção com qualidade comparável aos materiais tradicionais;

- Fíler de pedreira - resíduo oriundo do processo de lavagem da brita. O eixo Goiânia-Brasília constitui-se no terceiro mercado consumidor de produtos resultantes do processo de britagem no país. Goiânia, com uma população de cerca de 1,4 milhões de habitantes, consome atualmente aproximadamente 100.000 metros cúbicos de pedra britada por mês, embora tenha potencial para consumir até 250.000 metros cúbicos. Segundo dados da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil (ANEPAC, 2004), existem hoje nessa região 10 produtores de brita distribuídos na periferia de Goiânia, em Aparecida de Goiânia e Goianira. (LUZ, 2005).

Na tentativa de resolver ambos os problemas, tanto o da falta de materiais naturais tradicionais para serem usados na pavimentação quanto ao do destino final desses resíduos, surge a ideia de utilizá-los como materiais alternativos na construção de pavimentos. Desde então, vários estudos já foram e continuam sendo realizados a fim de analisar a viabilidade da aplicação desses materiais na construção de pavimentos asfálticos. Dentre estes estudos, destacam-se as pesquisas realizadas por Oliveira (2003), Luz (2008), Silveira (2010) e Metogo (2010).

A presente pesquisa trata da continuidade desses estudos, onde são comparados os resultados de ensaios de campo executados num trecho de pavimento experimental construído com misturas de fosfogesso após um ano da sua liberação para o tráfego com os resultados já obtidos por outros autores em trechos experimentais construídos com o RCD e com o fíler de pedreira.

A pista experimental em estudo situa-se na região metropolitana de Goiânia. Está localizada na Avenida Brasília, Setor Vila Brasília, em Aparecida de Goiânia conforme mostrado na Figura 1. Possui 360 metros de extensão e 9 metros de largura, sendo que a parte referente a esta pesquisa tem 240 metros de comprimento. A outra parte está relacionada com a pesquisa de Cunha (2011).



Figura 1. Localização da pista experimental. ($16^{\circ} 44' 45.21''\text{S}$ – $49^{\circ} 15' 28.35''\text{W}$).

Por ser uma via de baixo volume de tráfego, a seção projetada pela prefeitura para esse trecho foi de base com 15 cm de espessura e revestimento em pré-misturado a frio (PMF) com 3 cm de espessura. Para este estudo, a pista foi subdividida em quatro subtrechos de 60 metros cada, diferenciados pelo tipo de material utilizado na base, conforme definido por Metogo (2010) e apresentado a seguir:

- Estaca 0+00 a 3+00: solo local (80%) + fosfogesso (20%);
- Estaca 3+00 a 6+00: solo local (80%) + fosfogesso (11%) + cal calcítica CH-I (9%);
- Estaca 6+00 a 9+00: solo local (91%) + cal calcítica CH-I (9%);
- Estaca 15+00 a 18+00: cascalho (100%).

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento “in-situ” de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal em um trecho de pavimento experimental após este ter sido liberado para o tráfego e compará-lo com os resultados já obtidos anteriormente em outras pesquisas em trechos constituídos também com materiais alternativos na região

de Goiânia, sendo eles o RCD e o fíler de pedreira. Como objetivo específico tem-se realizar e analisar os resultados de ensaios de campo do tipo prova de carga sobre placa e viga Benkelman.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizados os ensaios de campo apresentados a seguir. Os dados obtidos foram inicialmente comparados com os valores determinados por Metogo (2010) durante a construção da pista. Em seguida, esses dados foram também comparados com os resultados apresentados por Oliveira (2007), no caso do RCD, e por Luz (2008), no caso do fíler de pedreira.

3.1 Prova de Carga sobre Placa

O ensaio de prova de carga teve o objetivo de medir as deformações verticais do pavimento quando submetido à ação de carregamento estático. Os equipamentos utilizados foram

- uma placa metálica de 30 cm de diâmetro;
- sistema de reação constituído por um caminhão de eixo traseiro simples e rodas duplas, carregado com 8,2t e com pressão de inflação dos pneus igual a 560 kPa;
- um macaco hidráulico para aplicação dos carregamentos;
- três extensômetros com precisão de 0,01mm instalados sobre a placa de forma que suas posições formassem um triângulo equilátero.

Os extensômetros foram fixados por meio de braços de aço, numa viga metálica horizontal instalada numa distância fora da área de interferência do ensaio. Os ensaios foram realizados com estágios de carregamentos com duração de 5 minutos cada. Após o último estágio de carregamento, procedeu-se o descarregamento com intervalos de carga maiores, mas também com tempo de estabilização de 5 minutos. Ressalta-se que não há norma brasileira para a realização desse ensaio em pavimentos asfálticos.

Os ensaios foram realizados no eixo e nas bordas da pista, sempre sobre a camada de revestimento, começando-se pelo bordo esquerdo na estaca 0 + 10, seguido do eixo na estaca 01 + 10 e do bordo direito na estaca 02 + 10, respeitando-se esta sequência até chegar na última estaca ensaiada (17 + 10 no bordo direito).

3.2 Viga Benkelman

O ensaio de viga Benkelman foi realizado sobre o revestimento de acordo com as especificações da norma ME 24 (DNER, 1994). Os ensaios foram realizados de 10 em 10 metros em cada bordo ao longo do trecho experimental. A partir desse ensaio, foi possível determinar os deslocamentos gerados no pavimento quando submetido à ação de um caminhão carregado de 8,2 t no seu eixo traseiro e com pneus calibrados com 560 kPa.

Os valores de deflexão obtidos com o ensaio de viga Benkelman executado sobre o revestimento foram corrigidos em função da temperatura e da espessura do revestimento asfáltico de acordo com a norma do DER/SP(2006) e apresentada na Figura 2.

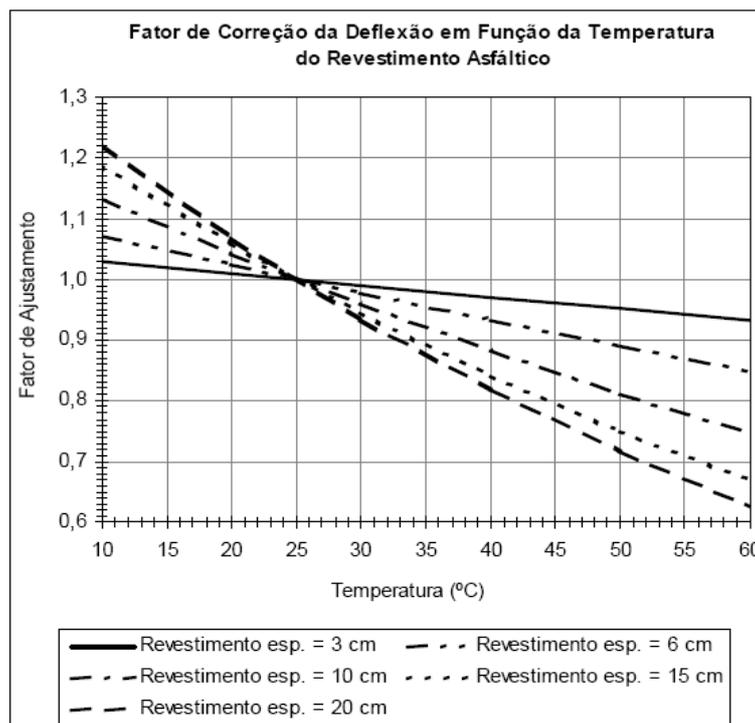


Figura 2. Gráfico de fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento (DER/SP, 2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos neste trabalho.

4.1 Prova de Carga sobre Placa

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados obtidos em cada trecho para os valores do deslocamento total (d_t) e do módulo de reação (k_{placa}), sendo estes parâmetros obtidos para a tensão de 560 kPa. São apresentadas também as médias desses valores para o presente ensaio e as médias dos valores correspondentes ao mesmo trecho obtidas nos estudos de Metogo (2010). Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as curvas tensão x deslocamento obtidas.

Tabela 1. Resultados obtidos no ensaio de prova de carga sobre placa.

Estaca	Material	d_t (mm)	k_{placa} (KPa/mm)
0+10 BE		2,10	266,67
1+10 EIXO		0,70	800,00
2+10 BD	Solo-FG	0,90	622,22
Média		1,23	562,96
Média Metogo (2010)		1,33	427,00
3+10 BE		1,40	400,00
4+10 EIXO		1,44	388,89
5+10 BD	Solo-FG-Cal	1,07	523,36
Média		1,30	437,42
Média Metogo (2010)		1,14	496,00
6+10 BE		1,32	424,24
7+10 EIXO		0,73	767,12
8+10 BD	Solo-Cal	0,96	583,33
Média		1,00	591,57
Média Metogo (2010)		0,81	700,00
15+10 BE		1,35	414,81
16+10 EIXO		1,76	318,18
17+10 BD	Cascalho	1,55	361,29
Média		1,55	364,76
Média Metogo (2010)		1,21	468,00

Obs.: BD = borda direita, BE = borda esquerda, FG = fosfogesso, d_t = deslocamento total, k_{placa} = módulo de reação.

Comparando os diferentes subtrechos executados com diversos materiais, nota-se que eles apresentaram comportamentos semelhantes com destaque para a base da mistura solo+cal, que apresentou menor deslocamento em comparação aos demais. Além disso, verifica-se a superioridade dos demais materiais alternativos estudados em relação ao cascalho tradicional. Nota-se também que os valores obtidos não tiveram consideráveis diferenças em relação aos valores obtidos anteriormente por Metogo (2010), sendo que as médias dos deslocamentos tiveram pequenas elevações, com exceção da mistura solo + fosfogesso que diminuiu de 1,33 para 1,23.

Analisando apenas os ensaios realizados neste trabalho (Figuras 3 e 4), observa-se que não há um comportamento constante em relação às diferenças observadas para aos

ensaios realizados na borda direita, no eixo e na borda esquerda. Assim, essa variabilidade vai depender do material utilizado, do controle de execução e da interferência da água de escoamento superficial na via. No caso específico desse trecho, Metogo (2010) e Cunha (2011) relatam as dificuldades encontradas durante a construção do trecho que ocorreu num período chuvoso (outubro e novembro/2009).

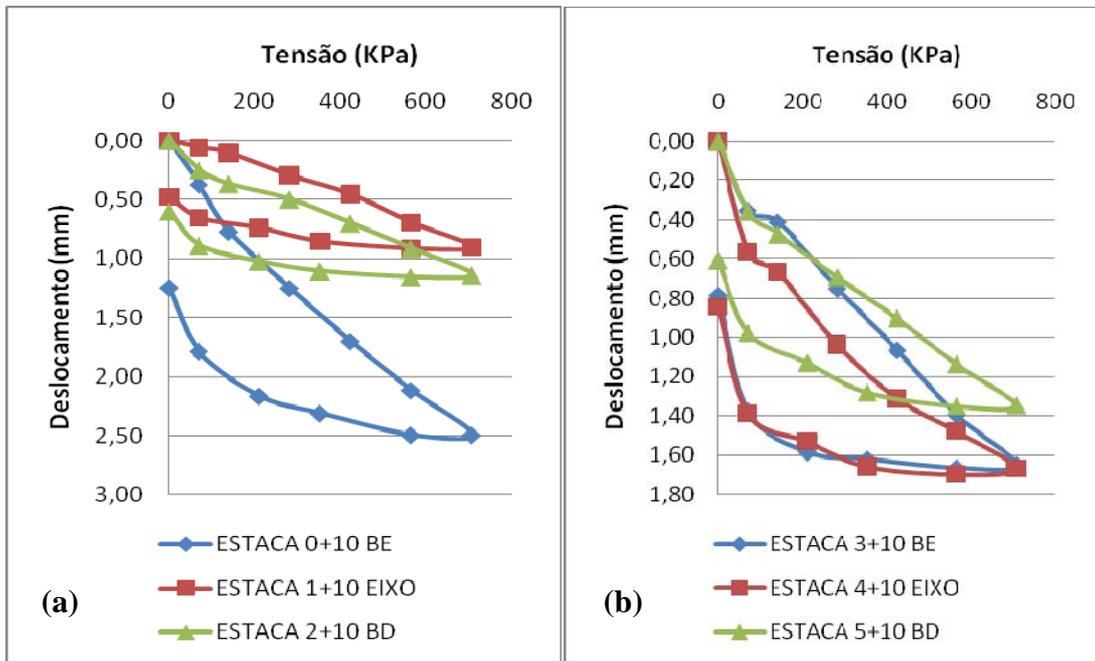


Figura 3. Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento: (a) subtrecho solo+fosfogesso; (b) subtrecho solo+fosfogesso+cal

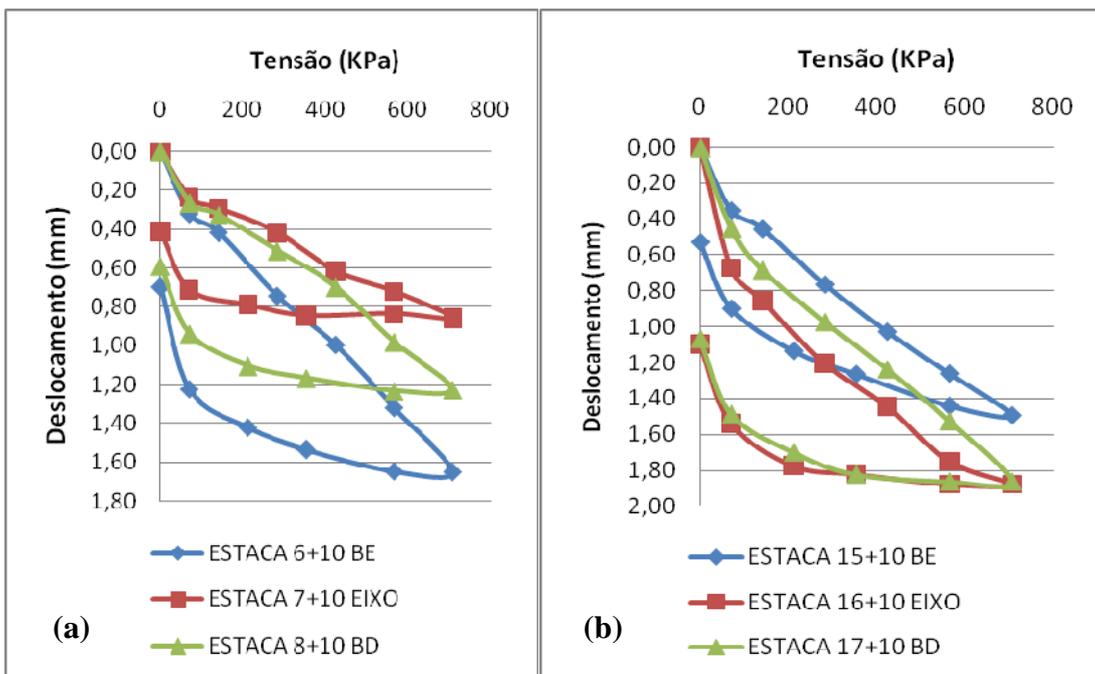


Figura 4. Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento: (a) subtrecho solo+cal; (b) subtrecho cascalho.

4.2 Viga Benkenlman

Os valores obtidos para os parâmetros estudados, tanto no bordo esquerdo como no bordo direito, estão apresentados nas Tabelas 2 e 3, assim como também suas médias e as médias dos resultados obtidos por Metogo (2010) após seis meses da conclusão do trecho. As Figuras 5 e 6 mostram as bacias médias obtidas para cada trecho nos bordos esquerdo e direito, respectivamente. Todos os resultados foram corrigidos com o fator de correção da deflexão em função da temperatura conforme apresentado na Figura 2. Verifica-se que os valores obtidos para a deflexão máxima podem ser considerados satisfatórios para um pavimento recém construído ($D_0 < 60 \times 10^{-2}$ mm). Segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), valores de raio de curvatura maiores que 100 m e produto R. D_0 superior a 5.500 indicam pavimentos sem problema estrutural.

Tabela 2. Resultados obtidos no ensaio de viga Benkelman no bordo esquerdo.

Estaca	Material	D_0 (x0,01mm)	D_{25} (x0,01mm)	R (m)	R x D_0 (m.0,01mm)
0+10	Solo + FG	47,50	28,50	164,47	7812,50
1+00		36,10	30,40	548,25	19791,67
1+10		36,10	22,80	234,96	8482,14
2+00		36,10	19,00	182,75	6597,22
2+10		39,48	16,92	138,52	5468,75
Média		39,06	23,52	201,20	7857,97
Média Metogo (2010)		68,00	40,00	111,00	7509,00
3+00	Solo + FG + Cal	39,90	22,80	182,75	7291,67
3+10		76,00	49,40	117,48	8928,57
4+00		47,50	30,40	182,75	8680,56
4+10		62,70	45,60	182,75	11458,33
5+00		57,00	43,70	234,96	13392,86
5+10		31,96	20,68	277,04	8854,17
Média		52,51	35,43	182,96	9607,36
Média Metogo (2010)	41,00	37,00	781,25	32031,25	
6+00	Solo + Cal	54,52	35,72	166,22	9062,50
6+10		47,00	37,60	332,45	15625,00
7+00		51,30	41,80	328,95	16875,00
7+10		43,70	39,90	822,37	35937,50
8+00		36,10	19,00	182,75	6597,22
8+10		48,88	30,08	166,22	8125,00
Média		46,92	34,02	242,25	11365,47
Média Metogo (2010)	49,00	41,00	390,62	19140,62	
15+00	Cascalho	53,20	24,70	109,65	5833,33
15+10		53,20	26,60	117,48	6250,00
16+00		49,40	26,60	137,06	6770,83
16+10		49,40	26,60	137,06	6770,83
17+00		68,40	39,90	109,65	7500,00
17+10		62,70	36,10	117,48	7366,07
18+00		57,00	41,80	205,59	11718,75
Média	56,19	31,76	127,92	7187,50	
Média Metogo (2010)	54,00	48,00	520,83	28125,00	

Obs.: FG = fosfogesso, D_0 = deflexão máxima, D_{25} = deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga, R = raio de curvatura.

Tabela 3. Resultados obtidos no ensaio de Viga Benkelman no bordo direito.

Estaca	Material	D ₀ (x0,01mm)	D ₂₅ (x0,01mm)	R ₀ (m)	R ₀ x D ₀ (x0,01mm)
0+05	Solo + FG	62,08	58,20	805,41	50000,00
0+15		44,62	29,10	201,35	8984,38
1+05		40,74	15,52	123,91	5048,08
1+15		36,86	31,04	536,94	19791,67
2+05		44,62	25,22	161,08	7187,50
2+15		29,40	25,48	797,19	23437,50
Média		43,05	30,76	254,20	10944,28
Média Metogo (2010)	47,00	30,00	184,00	8598,00	
3+05	Solo + FG + Cal	44,16	40,32	813,80	35937,50
3+15		63,36	44,16	162,76	10312,50
4+05		55,10	41,80	234,96	12946,43
4+15		49,40	43,70	548,25	27083,33
5+05		53,20	34,20	164,47	8750,00
5+15		28,80	24,96	813,80	23437,50
Média		49,00	38,19	289,00	14161,72
Média Metogo (2010)	56,00	43,00	233,00	13034,00	
6+05	Solo + Cal	36,48	19,20	180,84	6597,22
6+15		37,24	13,72	132,87	4947,92
7+05		27,44	21,56	531,46	14583,33
7+15		31,36	23,52	398,60	12500,00
8+05		25,22	17,46	402,71	10156,25
8+15		36,86	23,28	230,12	8482,14
Média		32,43	19,79	247,17	8016,41
Média Metogo (2010)	39,00	27,00	273,00	10625,00	
15+05	Cascalho	53,76	46,08	406,90	21875,00
15+15		53,20	39,90	234,96	12500,00
16+05		40,32	38,40	1627,60	65625,00
16+15		63,36	48,00	203,45	12890,63
17+05		76,80	51,84	125,20	9615,38
17+15		30,72	17,28	232,51	7142,86
Média		53,03	40,25	244,59	12969,61
Média Metogo (2010)	73,00	40,00	95,00	6969,00	

Obs.: FG = fosfogesso, D₀ = deflexão máxima, D₂₅ = deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga, R = raio de curvatura.

Da mesma forma que observado no ensaio de prova de carga sobre placa, nesse primeiro ano de monitoramento da via é possível observar ligeira superioridade dos materiais alternativos estudados em relação ao cascalho. Verifica-se, ainda, que a mistura solo local com cal apresentou o melhor comportamento. Observa-se também que existe uma ligeira melhora dos dados obtidos nesta pesquisa em relação àqueles apresentados por Metogo (2010) para as misturas estabilizadas quimicamente: solo+fosfogesso, solos+fosfogesso+cal e solo+cal. Esse fato pode ser explicado pelas reações que continuam a ocorrer ao longo do tempo e geram ganho de resistência do material. Em termos de análise das bordas do pavimento, os resultados obtidos podem ser considerados semelhantes.

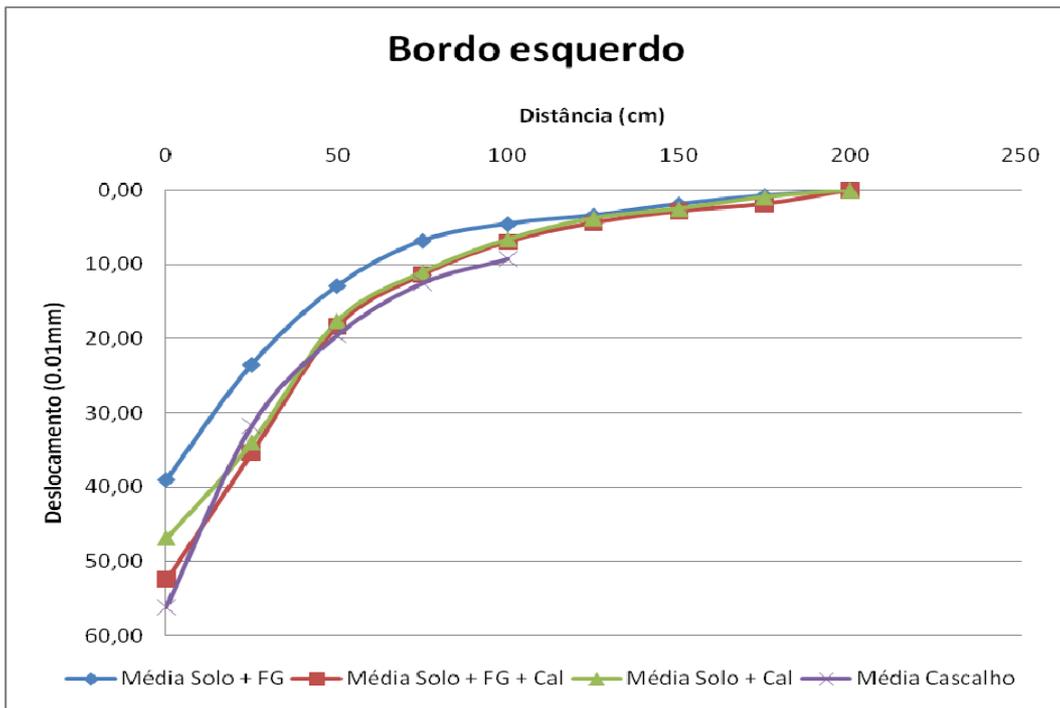


Figura 5. Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre o revestimento no bordo esquerdo.

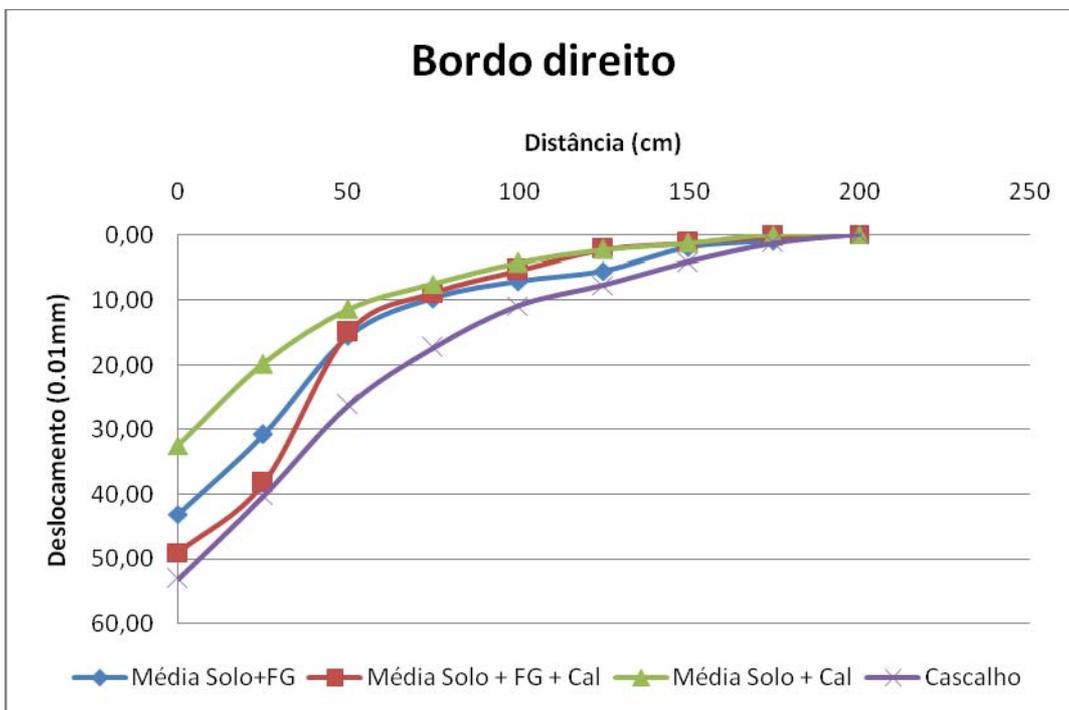


Figura 6. Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre o revestimento no bordo direito.

4.3 Comparações entre diferentes trechos existentes

Para avaliar a viabilidade de utilização do fosfogesso em relação a outros materiais alternativos estudados na região, os resultados obtidos nesta pesquisa foram comparados com aqueles apresentados por Luz (2008) que estudou mistura de solo com fíler de pedreira e por Oliveira (2007) que avaliou a aplicação do RCD.

As Figuras 7 e 8 mostram os resultados obtidos por Luz (2008) e Oliveira (2007), respectivamente, com relação aos ensaios de prova de carga sobre placa realizados nos outros trechos experimentais um ano após abertura ao tráfego. Observa-se que, nos dois casos, os valores de deslocamento obtidos para a tensão de 560 kPa foram inferiores a 1,5 mm. Esses resultados são semelhantes aqueles apresentados neste trabalho.

Com relação ao ensaio de viga Benkelman (Figuras 9 e 10), Luz (2008) e Oliveira (2007) obtiveram valores de deflexão máxima inferiores a 65×10^{-2} mm, também semelhantes ao estudo apresentado com o fosfogesso.

Sendo assim, verifica-se que, quanto ao desempenho estrutural do trecho analisado, pode-se considerá-lo adequado e semelhantes aos outros trechos experimentais já existentes na região.

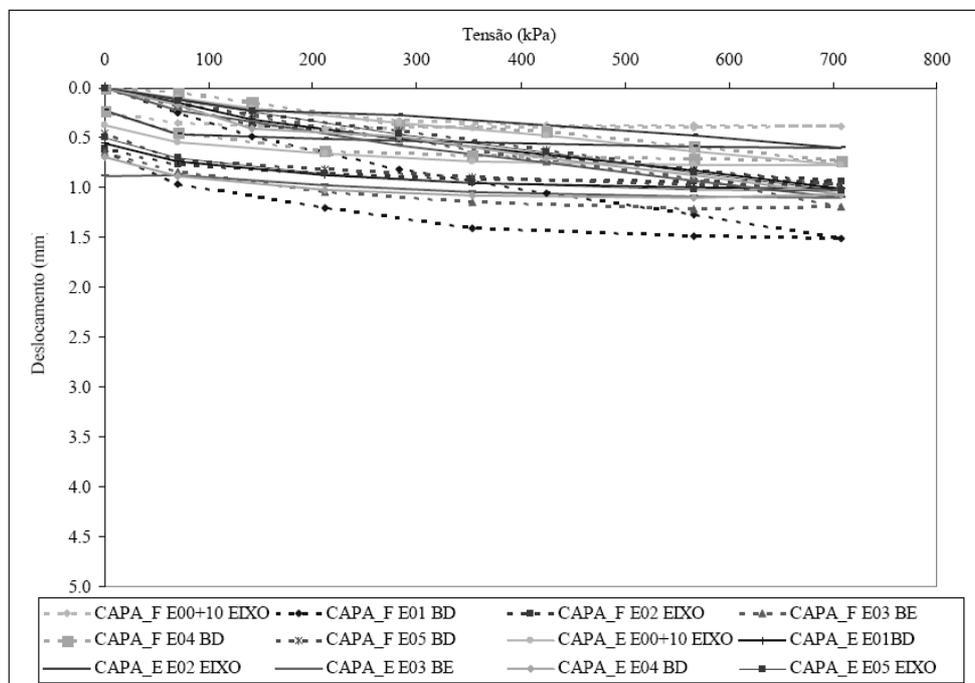


Figura 7 – Resultados do ensaio de prova de carga sobre placa no revestimento do trecho 1 logo após o período de construção e um ano depois da liberação do tráfego (LUZ, 2008)

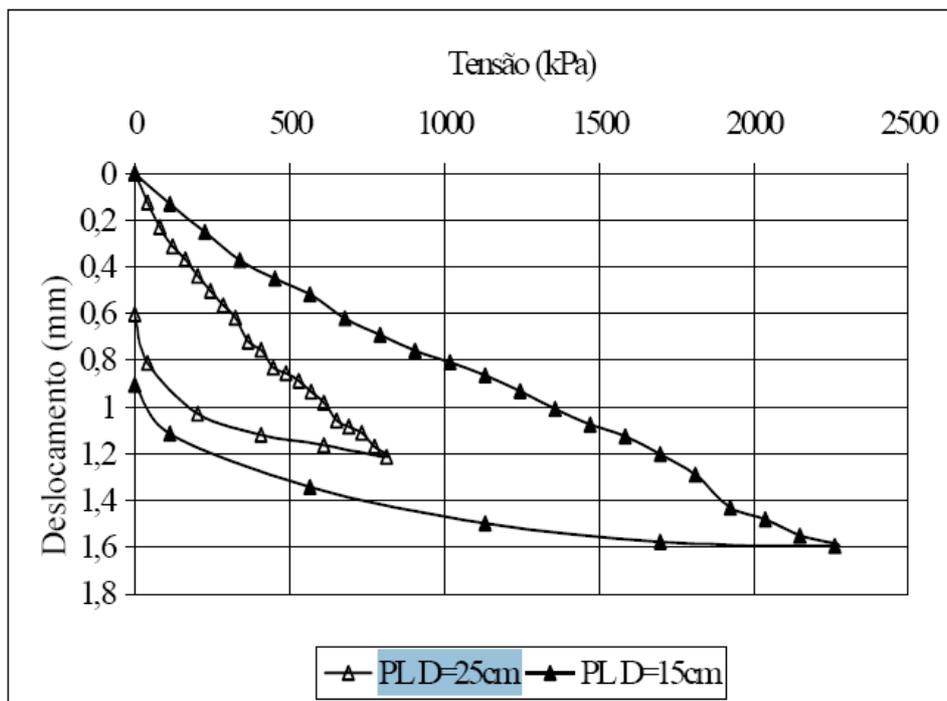


Figura 8 - Provas de carga sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) com dois diâmetros de placa diferentes – Maio 2005 (OLIVEIRA, 2007)

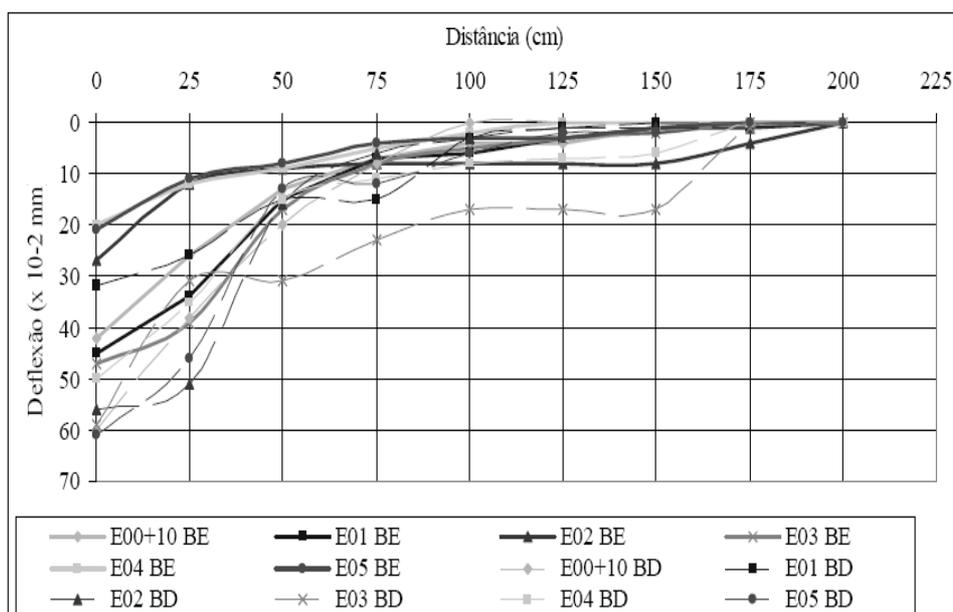


Figura 9 – Bacias de deslocamento do revestimento da pista experimental após 1 ano de funcionamento – Trecho 1 (LUZ, 2008)

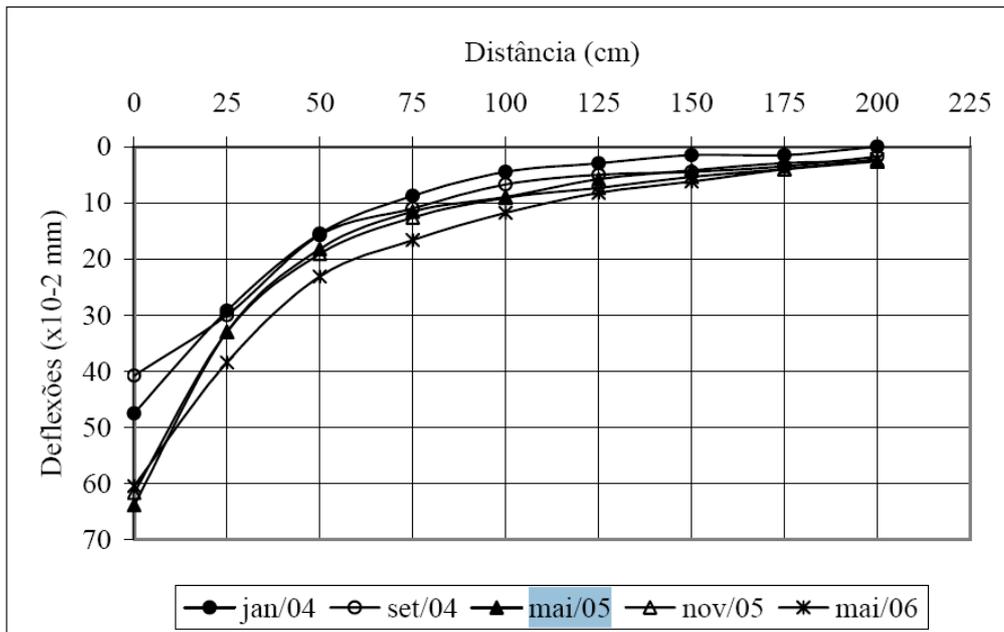


Figura 10 - Bacias de deflexões médias dos ensaios realizados sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA), em todos os períodos ensaiados (Oliveira, 2007)

4 CONCLUSÕES

Como conclusões desta pesquisa tem-se que:

- As misturas de fosfogesso utilizadas na construção do trecho experimental avaliado apresentam comportamento satisfatório após um ano de funcionamento;
- As misturas de fosfogesso mostram-se vantajosas em relação ao cascalho tradicionalmente utilizado;
- Comparando o fosfogesso com outros materiais alternativos já estudados na região (fíler de pedra e RCD), verifica-se que ele apresenta desempenho estrutural semelhante aos demais.

Por fim, pode-se afirmar que o uso do fosfogesso em pavimentos de baixo volume de tráfego é tecnicamente viável, além de contribuir para a solução de problemas ambientais.

REFERÊNCIAS

CUNHA, N. L. **Uso de materiais não convencionais para base de pavimentos asfálticos no município de aparecida de goiânia – GO** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil. Goiânia, 2011, 249p.

DNER - PRO 011/79. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis – Procedimento B** – MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1979, 16p.

DNER - ME024/94. **Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman** – MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, 6p.

DER/SP:DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO, **IP-DE-P00/003**: Avaliação funcional e estrutural de pavimento – Instrução de projeto, São Paulo, Maio 2006. 29p.

LUZ, M. P. **Aproveitamento de filer de pedreiras da região metropolitana de Goiânia em pavimentos flexíveis urbanos: avaliação técnica e sócio-ambiental**. 2008. 103f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) Programa de Doutorado em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

MESQUITA, G.M. **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente. Goiânia, 2007, 144p.

METOGO, D.A. **Construção e Avaliação de um Trecho Experimental de Pavimento Flexível Executado com Misturas de Solo Tropical, Fosfogesso e Cal**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica Estrutural e Construção Civil, 2010, 195p.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005, 190p.

RUFO, R. C. **Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2009, 152p.