

DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM DIFERENTES LIGANTES ASFÁLTICOS E ADIÇÃO DE CAL A PARTIR DO ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA

Valdir dos Santos Barboza Júnior

Karine Wille Kraemer

Rômulo de Souza Pereira

Magnos Baroni

Luciano Pivoto Specht

Universidade Federal de Santa Maria

Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV)

RESUMO

A deformação permanente é apontada como uma das principais causas de defeitos nos pavimentos brasileiros. Para diminuir esse dano compreende-se a adição de agentes melhoradores de desempenho, como ligantes modificados e cal. Este estudo tem como finalidade comprovar a significativa melhora do desempenho dos revestimentos asfálticos quanto à deformação permanente, oriunda desta adição, através do ensaio uniaxial de carga repetida. Foram utilizados agregados de origem basáltica e granítica, em oito diferentes misturas: quatro compostas também por cal e quatro sem cal. A faixa utilizada foi a granulometria "C" do DNIT e a metodologia de dosagem adotada foi a Superpave. Após a realização do ensaio constata-se maiores valores de *Flow Number* para as misturas que possuem adição de cal e um aumento ainda mais significativo das que utilizam ligante AMP 60/85.

ABSTRACT

The permanent deformation is appointed as one of the main causes of defects in the Brazilian pavements. To decrease this damage it is adopted the addition of performance enhancing agents, such as modified petroleum asphalt cements (CAP) and lime. This paper has as purpose prove the significant improvement of the performance of the asphalt surface, regarding to permanent deformation, arising from this addition, through the uniaxial repeated load test. It was used aggregates from basaltic and granite origin, in eight different mixtures: four compounds also with lime and four without lime. The range used was the DNIT C and the methodology of dosage employed was the Superpave. After the test realization it is verified larger values of Flow Number in mixtures that have lime addition and a still more significant increase in mixtures that use CAP AMP 60/85.

1. INTRODUÇÃO

O setor rodoviário é o meio de transporte de cargas e passageiros predominante no Brasil. Além disso, a economia brasileira está baseada no setor primário, que mais demanda infraestrutura de transporte. Logo o desempenho da malha viária influencia o panorama econômico e o desenvolvimento do país, e, portanto, esta deve ser projetada para apresentar segurança, conforto e economia.

As rodovias brasileiras em sua maior parte são compostas de pavimento asfáltico constituídas por uma mistura de agregados pétreos de diferentes tamanhos e de ligante asfáltico. Tanto o ligante asfáltico, quanto o revestimento asfáltico detêm como característica um comportamento viscoelastoplástico e termossensível.

Por razão da falta de cuidados adequados, mal dimensionamento e a alto tráfego veículos pesados nos revestimentos asfálticos, ocorre o surgimento de diferentes tipos de patologias, como a deformação permanente e o trincamento por fadiga. A deformação permanente, caracterizada por afundamentos de trilha de roda (ATR) e possíveis sobre-elevações da mistura nas laterais. A durabilidade do pavimento quanto à deformação permanente pode ser afetada por fatores de projeto, como o tipo do ligante, granulometria, tipo de agregados, e adições utilizados na mistura asfáltica; e por fatores de campo como presença de água no pavimento, carga do tráfego e condições climáticas.

Diversos pesquisadores têm utilizado aditivos para aumentar a conformidade química entre o ligante asfáltico e o material granular. Estes aditivos são denominados de agente melhorador de adesividade (AMA), sendo a cal virgem, cal hidratada e o DOPE, os agentes mais aplicados no meio rodoviário.

Algumas pesquisas estão sendo efetuadas para analisar quanto a incorporação de cal nas misturas asfálticas atua no desempenho mecânico dos pavimentos. Na bibliografia internacional, pode-se citar os trabalhos Bari e Witczak (2005) e Little e Seebaly (2006) que realizaram pesquisas voltadas na melhoria do desempenho mecânico das misturas asfálticas por meio da incorporação de cal.

No Brasil, pode-se relatar alguns estudos executados no estado do Rio Grande do Sul, como o de Bock (2012), Boeira (2014), Paviani (2015) e Granich (2015) que pesquisaram sobre a incorporação de cal nos pavimentos asfálticos por meio de diversos ensaios mecânicos.

Outro agente que pode melhorar o desempenho e a qualidade das misturas asfálticas é o uso de ligantes asfálticos modificados por polímeros. Este tipo de ligante é empregado na maioria dos casos em vias de elevado fluxo de tráfego.

Esta pesquisa tem como finalidade estudar a resistência à deformação permanente com diferentes tipos de agregados, ligantes asfálticos (convencional e modificado) e a adição de cal, por meio do ensaio *Flow Number*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um pavimento é composto por várias camadas, cada qual devendo transferir os esforços recebidos do tráfego para as camadas inferiores, até sua distribuição ao solo. A camada superior de revestimento asfáltico é composta por uma mistura de agregados e ligantes asfáltico (CAP), e por vezes ocorre adição de algum melhorador de desempenho, como a cal, ou a troca de um CAP convencional por um modificado por polímero.

2.1. Deformação permanente

A deformação permanente em misturas asfálticas pode ser determinada por meio da ocorrência conjunta entre a deformação plástica do agregado pétreo e da deformação viscosa do ligante asfáltico. Ambos possuem um importante papel no comportamento mecânico da mistura asfáltica. O ligante, por consequência de sua consistência e reologia, e o agregado, por razão das forças de fricção internas entre suas partículas (JOLIET E MALOT, 2000).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), estão entre os principais agentes causadores da deformação permanente a granulometria da mistura asfáltica, a consistência do ligante e a sua devida dosagem. A influência que a quantidade de ligante asfáltico tem em uma mistura é inversamente proporcional ao atrito entre os agregados, ou seja, quanto maior o teor de ligante empregado menor o intertravamento dos agregados, funcionando como lubrificante e facilitando o movimento relativo entre as partículas.

Ainda segundo Kennedy *et al.*, (1994), os agregados correspondem a 80% de responsabilidade na precaução do ATR. Por isso é necessário que a mistura asfáltica possua um esqueleto mineral adequado, comprovando-se a influência dos agregados na estrutura. Segundo Nascimento

(2008), são influenciadores fundamentais no comportamento mecânico das misturas asfálticas, o ligante asfáltico e o agregado empregado. O teor de asfalto, a viscosidade e principalmente a modificação do ligante, são fatores importantes que dependem diretamente do ligante. De maneira geral, ligantes menos viscosos tornam as misturas menos rígidas e mais suscetíveis a sofrer deformações permanentes.

A caracterização da deformação é dividida em três formas distintas, de acordo com suas causas. A primeira delas acontece por consequência da aplicação de carga vertical, com isso ocorre a densificação dos materiais devido ao excesso do volume de vazios. O segundo tipo de deformação surge devido ao efeito Poisson, além da densificação vertical, conta com tensões laterais, as quais promovem a formação de sobre-elevações laterais por causa da baixa resistência ao cisalhamento. Por último, a deformação mecânica ocorre nas camadas inferiores da camada asfáltica por causa da sua baixa resistência (Witczak, 2007)

2.2. Agentes melhoradores de Adesividade (AMA)

Esses produtos tem o objetivo de conferir à mistura propriedades específicas. Quanto ao que se detém este trabalho, a adição de cal, estudos indicam que sua adição retarda o envelhecimento do ligante e promove redução do dano acarretado pela água no pavimento pois supõe-se que melhora a interação química entre o ligante e os agregados.

A cal é um fíler mineral quimicamente ativo. Ela reage com o CAP, retirando constituintes indesejáveis e concomitantemente suas pequenas partículas se disseminam na mistura asfáltica, tornando-a mais resistente às deformações permanentes e à fadiga (Paviani, 2015). Ainda segundo Bock (2012) a cal não é utilizada somente para prevenção de danos causados pela umidade, mas também como um aditivo melhorador multifuncional, diminuindo o envelhecimento químico do ligante e contribuindo para um melhor desempenho dos revestimentos asfálticos em relação a patologias como trincamento por fadiga e deformação permanente.

Outros trabalhos como Tunnicliff e Root (1984), Hicks (1991) e Little e Epps (2001) concluíram que a cal modifica as propriedades dos finos, endurece o CAP e melhora a estabilidade da mistura. Consequentemente se observa aumento da resistência ao dano gerado pela umidade no revestimento asfáltico, uma mistura mais rígida e diminuição da taxa de oxidação, embora o aumento da rigidez aumente a suscetibilidade às trincas por fadiga.

Outra maneira de melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas é a utilização do ligante modificado por polímero. Pois as características do ligante estão relacionadas à temperatura e essas propriedades serão transmitidas à mistura asfáltica. Para valores menores, o ligante se encontra em uma fase próxima a um sólido, pois sua viscosidade é alta. Conforme aumenta a temperatura, as moléculas que compõem o material começam a se mover entre si e diminuem a viscosidade, começando a apresentar comportamento semelhante a um líquido. É nas faixas de temperatura mais elevadas que se observa maior dano de deformação permanente no pavimento pois a camada de revestimento asfáltico com baixa viscosidade se torna deficiente para suportar as cargas do tráfego. As solicitações são então suportadas pelas camadas inferiores (Bernucci, 2010).

Para aumentar a viscosidade e melhorar o desempenho dos ligantes menos viscosos à temperatura de serviço mais elevadas, opta-se por incorporar polímeros ao ligante (Almeida

Júnior, 2016). Conforme Hunter (2000), asfaltos com polímeros apresentam maior rigidez a altas temperaturas e menor rigidez em baixas temperaturas, contribuindo para melhor resistência tanto a deformação permanente como a fadiga das misturas asfálticas.

2.3. Ensaio de deformação permanente

Existem alguns ensaios que permitem a avaliação da suscetibilidade de uma mistura asfáltica quanto à deformação permanente. Entre eles o ensaio *Triaxial Stress Sweep (TSS)*, e o ensaio de uniaxial de carga repetida ou *Flow Number* ao qual se restringe este trabalho.

O *Flow Number*, também chamado de ensaio uniaxial de carga repetida, consiste na aplicação de carga repetida em um corpo de prova. É considerado um bom indicador devido a aplicação da carga representar mais semelhança com a carga de tráfego em campo (em relação a aplicação de uma carga estática por exemplo), utilizando os parâmetros de emprego de pulsos de carga ao corpo de prova e um intervalo de repouso.

O corpo de prova é ensaiado a temperatura de 60 °C, com as cargas na frequência de 1 Hz. A tensão de 204 kPa é aplicada durante 0,1 s e após é executado o intervalo, com aplicação de tensão de 10,2 kPa durante 0,9 s, conforma a norma brasileira ABNT NBR 16505/2016 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Existem três critérios para a finalização do ensaio: Atingir 7200 de ciclos de aplicação de carga; atingir 5% de deformação no corpo de prova; ou atingir o *Flow Number*. A figura 1 representa um gráfico do ensaio de FN.

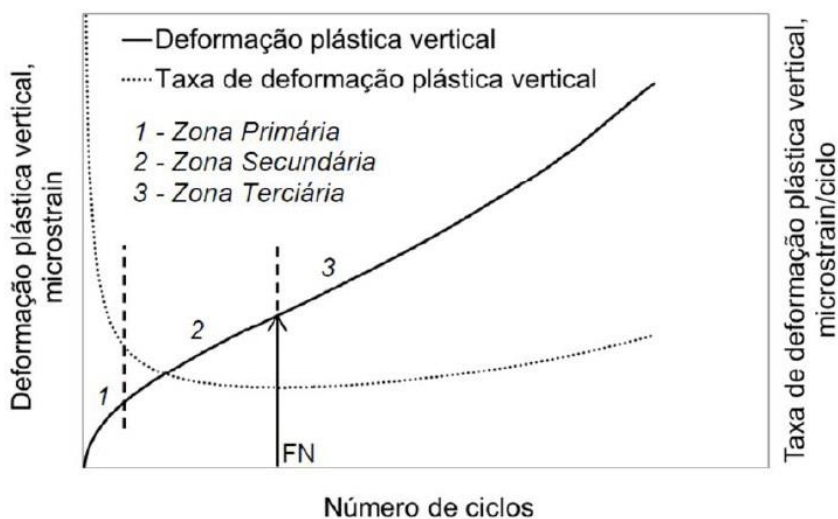


Figura 1: Gráfico do ensaio de *Flow Number* (ABNT 16505, 2016)

A Zona Primária (1) é caracterizada por deformação elevada no corpo de prova. Na Zona Secundária (2) obtém-se uma deformação a taxa constante, e quanto mais baixa a inclinação dessa reta, há o indicativo de mais resistência a deformação permanente para a mistura. A passagem para a Zona Terciária (3) ocorre com o aumento da velocidade de deformação e posterior falha do material, e é esta transição que indica o valor do *Flow Number*. Quanto maior este valor, maior a chance de a mistura resistir a deformação permanente (Dongrè *et al*, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo do presente artigo, é retratado o planejamento da pesquisa, características dos agregados, dos ligantes asfálticos e das misturas asfálticas. Além disso, o capítulo descreverá os procedimentos laboratoriais que foram empregados na pesquisa. Os ensaios foram realizados no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Foram utilizadas oito misturas diferentes para as moldagens, sendo que quatro delas contaram com a adição de cal e outras quatro não. Os corpos de prova foram moldados segundo a metodologia *Superpave* e foram utilizados dois tipos diferentes de ligantes asfálticos, o CAP 50/70 (convencional) e o AMP 60/85-E (modificado). A tabela a seguir apresenta a composição de cada mistura e a sua respectiva nomenclatura.

Tabela 1: Composição e Nomenclatura das misturas

Agregado	Ligante	Cal	Nomenclatura
Basalto	CAP 50/70	Sem	BS 50/70
Granito	CAP 50/70	Sem	GS 50/70
Basalto	CAP 50/70	Com	BC 50/70
Granito	CAP 50/70	Com	GC 50/70
Basalto	AMP 60/85	Sem	BS 60/85
Granito	AMP 60/85	Sem	GS 60/85
Basalto	AMP 60/85	Com	BC 60/85
Granito	AMP 60/85	Com	GC 60/85

3.1. Materiais utilizados na pesquisa

Os materiais empregados na pesquisa são normalmente empregados em obras rodoviária, são eles: agregados virgens, cal virgem e ligante asfáltico.

3.1.1. Agregados Minerais

Os agregados utilizados na pesquisa são oriundos de duas unidades de produção, são elas:

- Jazida P1 (Granito), localizada no município de Capão do Leão-RS coordenada geográfica 31°46'21.90"S, 52°30'18.04"O.
- Jazida P2 (Basalto), localizada no Km 30, da BR-290/RS (FreeWay-RS) coordenada geográfica 29°52'51.96"S, 50°33'33.95"O.

As principais propriedades dos materiais estão descritas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Características dos agregado basáltico

Ensaio	Norma	Basalto		
		Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
Massa esp. real (g/cm ³)		2,827	2,840	-
Massa esp. aparente (g/cm ³)	DNER-ME 081/98	2,718	2,720	-
Absorção (%)		1,420	1,510	-
Massa esp. real (g/cm ³)	DNER-ME 084/95	-	-	2,828
Desgaste (%)	DNER-ME 035/98		8,76	-
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94		2,69	-
Equivalente de Areia (%)	DNER-ME 054/97	-	-	82
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	0,84	0,83	-
Índice de Forma	NBR 7809/06	2,15	2,09	-

Tabela 3: Características dos agregado granítico

Ensaio	Norma	Granito		
		Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
Massa esp. real (g/cm ³)		2,632	2,580	-
Massa esp. aparente (g/cm ³)	DNER-ME 081/98	2,560	2,510	-
Absorção (%)		1,060	1,050	-
Massa esp. real (g/cm ³)	DNER-ME 084/95	-	-	2,643
Desgaste (%)	DNER-ME 035/98		26,39	-
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94		5,35	-
Equivalente de Areia (%)	DNER-ME 054/97	-	-	71
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	0,77	0,51	-
Índice de Forma	NBR 7809/06	1,99	2,61	-

3.1.2. Cal

A cal empregada na pesquisa é proveniente do estado do Paraná e é classificada como cal calcítica.

3.1.3. Ligante Asfáltico

Os ligantes asfálticos utilizados nesta pesquisa foram o CAP 50/70 (Convencional) e o AMP 60/85-E modificado por polímero. As especificações de qualidade dos materiais asfálticos foram aprovadas conforme especificações brasileiras.

3.2. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Após toda a caracterização dos materiais, iniciou-se a execução das fases de composição granulométrica das misturas e a dosagem de cada mistura.

3.2.1. Dosagem das misturas asfálticas

A metodologia empregada para a confecção granulométrica se faz presente na norma DNIT031/2006-ES.

A curva granulométrica deste trabalho contou com 2 tipos de ligantes diferentes, um com adição de cal e a outra sem adição de cal. A referida curva atendeu às especificações da faixa C do DNIT 031 – ES, indicada na figura 2. Foi desenvolvida uma curva granulométrica padrão, tanto com cal como sem cal, com isso possuímos duas curvas com distribuição granulométrica idênticas, totalizando oito curvas granulométricas idênticas (4 sem cal e 4 com cal). Na curva com cal são retirados a parcela de agregado nas peneiras nº 80 e 200 e acrescentado, em proporção, a cal. O valor adicionado de cal nas misturas corresponde a 2% da massa total de grãos. O tamanho máximo nominal das misturas é de 19mm. A figura 3 apresenta os teores de ligante asfáltico encontrados para cada mistura dosada.

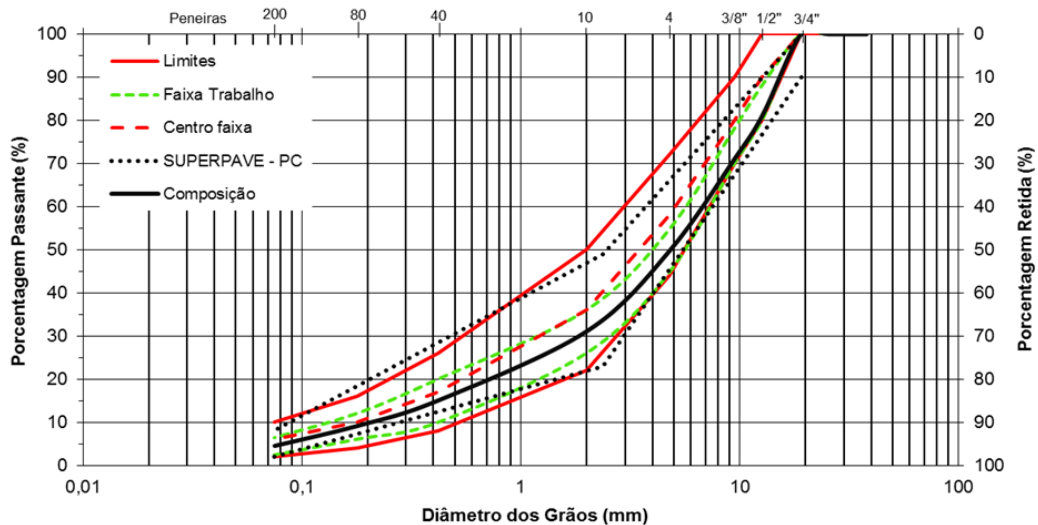


Figura 2: Composição granulométrica das misturas asfálticas Faixa C DNIT 031/2006-ES.

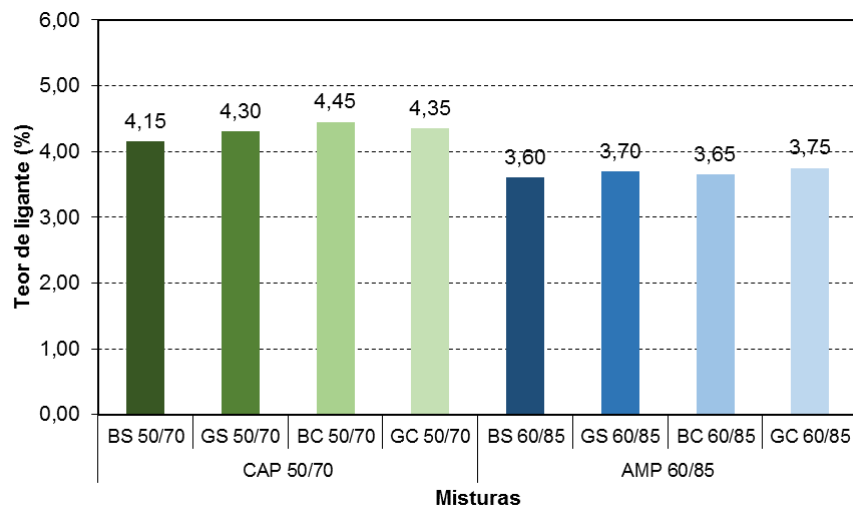


Figura 3: Comparação entre os teores de misturas asfálticas

3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

3.3.1. Ensaio de Flow Number

O ensaio de uniaxial de carga repetida ou *Flow Number* é caracterizado através da norma ABNT NBR 16505/2016 – Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Sabe-se que o grau de compactação (GC) verificado durante

a moldagem é de $97\% \pm 0,5\%$ e o volume de vazios presente em cada corpo de prova varia de 6% a 8%. As dimensões obtidas para os corpos de prova são: $150\text{ mm} \pm 2,5\text{ mm}$ e diâmetro $102\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$. O ensaio foi realizado na prensa UTM-25 por meio do software UTS014 – *Asphalt Permanent Deformation Test*.

Após a realização do ensaio, os valores adquiridos geram uma curva de ciclos vs deformação acumulada.

O modelo está sendo apresentado na Equação 1, onde N é o número de ciclos e as constantes A,B,C e D são determinadas para cada amostra ensaiada. Os resultados destas constantes se dão por meio de uma otimização numérica por intermédio dos mínimos quadrados.

$$\epsilon_p = ANB + C(eDN - 1) \quad (1)$$

em que ϵ_p : Deformação da Parcela plástica
 A: Constante
 N: Número de Ciclo
 B: Constante
 C: Constante
 D: Constante

A correlação entre o *Flow Number* e a deformação permanente é que quanto maior o número de ciclos de carga aplicada e a menos deformação permanente acumulada, melhor é o desempenho da mistura em questão quanto ao afundamento de trilha de roda.

4. DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Para o ensaio foram ensaiados três corpos-de-prova por mistura, a $60\text{ }^\circ\text{C}$ conforme a norma brasileira NBR 16505/2016. A Tabela 4 abaixo mostra o resultado do FN, seus desvios padrões e coeficientes de variação.

Tabela 4: Resultados de FN

Mistura	FN (Ciclos)	DP (Ciclos)	Cv(%)
BS 50/70	65	3	4,4
GS 50/70	68	8	12
BC 50/70	175	11	6
GC 50/70	123	14	11
BS 60/85	509	71	14
GS 60/85	340	33	10
BC 60/85	720	88	12
GC 60/85	431	23	5

A partir dos dados obtidos pelo ensaio, foi realizado um tratamento estatístico para as amostras, com o objetivo de analisar as principais variáveis (agregado, cal e ligante asfáltico) deste estudo. Para a análise dos dados foi utilizada a ferramenta de regressão linear múltipla, disponível no software Excel. Foram selecionadas as variáveis que têm interferência sobre a variável resposta FN. As variáveis estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Variável resposta e variáveis explicativas

Variável Resposta	Variáveis Explicativas
FN	Agregado
	Cal
	Ligante

As variáveis explicativas foram consideradas qualitativas, elas foram transformadas em variáveis “Dummy”. Onde foram adotados os valores de pares de (0,1) para as variáveis.

Vale ressaltar que o objetivo desta análise não é criar uma equação de previsão para o ensaio de FN. A finalidade é analisar se as variáveis explicativas são significativas para a variável resposta. Foram utilizados os dados de todos os ensaios, não as médias, e realizou-se o método de variância ANOVA (Analysis of Variance) para verificar a influência das variáveis independentes nas variáveis dependentes. Para saber se as condições são aceitáveis, foi utilizado um fator de confiança de 95% ($F < 0,05$). A Tabela 6 mostra os resultados do teste ANOVA.

Tabela 6: Teste Anova

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F Calculado	F
Regressão	3	764073,44	254691,15	49,03	0,0000001
Resíduo	14	72719,00	5194,21		
Total	17	836792,44			

Pode-se verificar que o valor de F é menor que 5%. Com isso, o modelo de regressão linear múltipla é estatisticamente significativo. Na Tabela 7 estão descritos os coeficientes obtidos por meio do teste t para o ensaio de FN.

Tabela 7: Resultados do teste t

Variáveis	β	T
Constante	112,5	0,00750
Agregado	-128,35	0,00213
Cal	122,45	0,00300
Ligante	386,05	0,00001

Todas as variáveis foram significativas. Logo, todas apresentaram valores de T menores que 5%. Na Tabela 8 estão descritos os resultados estatísticos de regressão.

Tabela 8: Resultado da regressão linear múltipla

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,956
R-Quadrado	0,913
R-quadrado ajustado	0,894
Erro padrão	72,071
Observações	18,000

Na Tabela 8, foi adquirido um $R^2 = 0,894$, mostrando que o modelo de regressão linear múltipla ajustado é capaz de explicar 89,4% da variabilidade dos dados.

A equação 2 demonstra o modelo criado para o ensaio de FN, por meio dos coeficientes gerados na Tabela 8.

$$FN = 112,5 - 128,35 \cdot A + 122,45 \cdot B + 386,05 \cdot C \quad (2)$$

Onde:

A é o tipo de agregado, que varia nas categorias basalto = 0 ou granito = 1;

B é o tipo de aditivo, que varia nas categorias sem cal = 0 ou com cal = 1;

C é o tipo de ligante asfáltico, que varia nas categorias CAP 50/70 = 0 ou AMP 60/85 = 1.

O objetivo desta análise foi de apenas analisar se as variáveis eram significativas para o ensaio de FN. A Equação 2 gerada serve apenas para esta pesquisa.

A Figura 4 mostra os resultados de FN com limites propostos por Nascimento (2008) e Bastos et.al. (2017).

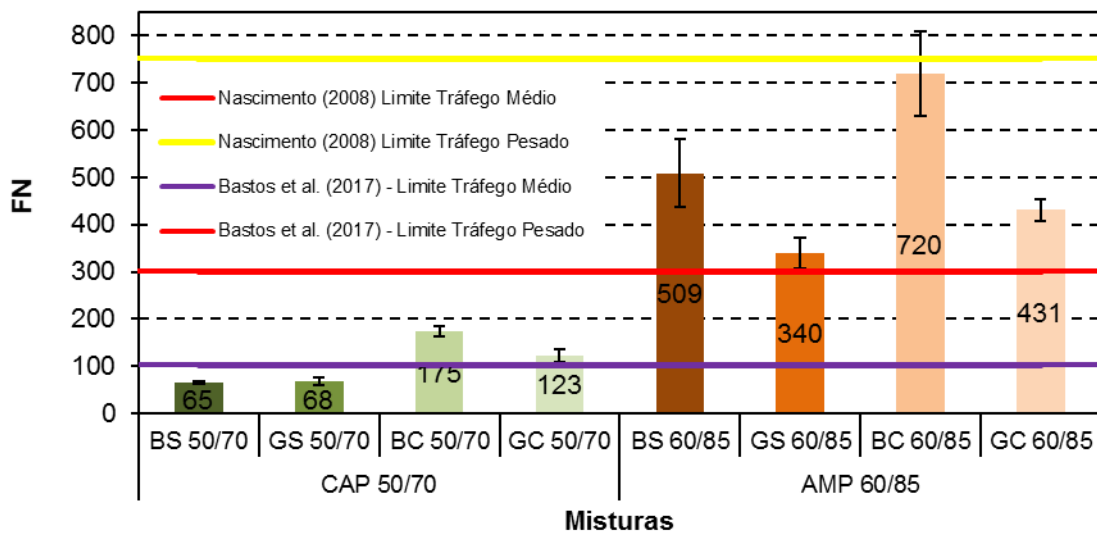


Figura 4: Resultado de *Flow Number* para as misturas

Nenhuma mistura chegou a atingir 10000 ciclos, tendo se finalizado todos os ensaios a 5% de deformação. As misturas que utilizam ligante AMP 60/85 apresentam os maiores valores de FN, em média valores 5,12 vezes maiores que as misturas de CAP 50/70. As maiores diferenças de resultados foram obtidas entre as misturas BS 50/70 e BS 60/85 onde a amostra com AMP 60/85 apresentou desempenho 7,82 vezes maior que a mesma amostra composta pelo CAP 50/70.

A adição de cal também contribuiu para o aumento do FN: todas as misturas que tiveram esta adição apresentaram valores maiores, em média 1,8 vezes, em relação às que não tiveram. Para as misturas BS 50/70 E BC 50/70 o resultado foi 2,82 vezes maior.

Quanto aos agregados, as amostras de origem basáltica alcançaram valores maiores do que as misturas de origem granítica, com exceção da mistura BS 50/70 se comparada a GS 60/85. Este desvio se enquadra no desvio padrão, não podendo afirmar a influência de escolha de agregado para uma mistura quanto a FN. Em média, as misturas de origem basáltica apresentam FN 1,39 vezes maior que as graníticas.

Segundo parâmetros descritos por Nascimento (2008), é notável que nenhuma mistura apresentou FN superior a 750, para tráfego pesado, desconsiderando o desvio padrão. Todas as misturas com AMP 60/85 se adequariam ao tráfego médio pois apresentaram valores maiores que 300. As demais misturas se enquadrariam em pavimentos de tráfego leve.

Analisando os limites propostos por Bastos *et al* (2017), com FN menor que 100 para tráfego leve, se enquadram as misturas BS 50/70 e GS 50/70. Com a adição de cal as mesmas misturas BC 50/70 E GC 50/70 poderiam ser encaixadas em tráfego médio, com FN de 100 a 300. Todas misturas compostas por AMP 60/85 se adequam ao tráfego médio pesado com FN de 300 a 1000. Porém nenhuma seria adequada ao tráfego extremamente pesado com FN maior que 1000.

A substituição do ligante convencional pelo ligante modificado aumenta o valor do ensaio de FN, e isto permite inferir um aumento da resistência da mistura à deformação permanente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se que a substituição do ligante CAP 50/70 pelo AMP 60/85 foi tão relevante que aumentou os valores de FN em média 5,12 vezes. Com a adição de cal os valores de FN aumentaram, e em decorrência ocorre uma maior resistência deformação permanente. No geral as misturas com materiais pétreos de origem basáltica apresentaram melhor resultado que as graníticas.

É possível perceber que o uso do ligante modificado e adição de cal nas misturas asfálticas proporciona alguns benefícios para os pavimentos asfálticos. Especialmente no caso da cal, seu preço muito pequeno em relação aos outros componentes da mistura asfáltica proporciona tanto vantagens mecânicas quanto baixo custo financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO TP (2015) 79-15 - *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. Washington, D. C.
- AASHTO ND (2015) T 209-15 - *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt*. Washington, D. C.
- ABNT (2003) NBR 6473 - *Cal Virgem E Cal Hidratada - Análise Química*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 15619 - *Misturas Asfálticas - Determinação da Densidade Máxima Teórica e da Massa Específica Máxima Teórica em Amostras Não Compactadas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- ABNT (2016) NBR 16505 - *Misturas Asfálticas - Resistência à Deformação Permanente Utilizando o Ensaio Uniaxial de Carga Repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. (2016) Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem. Santa Maria, 2016. *Dissertação (Mestrado)*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- AHLRICH, R.C. (1996) Influence of Aggregate Gradation and Particle Shape/Texture on Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt Pavements.
- BACK, A. H. (2018) Avaliação das Propriedades Químicas e Geomecânicas de Agregados Oriundos de Jazidas de Rochas de Diferentes Litologias do Estado do RS. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- BARI J. e WITCZAK, M. W. (2006) Development of a New Revised Version of the Witzack E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75.
- BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. e NASCIMENTO, L. A. H. (2017) Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. *Revista Transportes*, v. 25, n. 2.
- CNT (2017) Pesquisa CNT de Rodovias 2017 CNT: SEST: SENAT. - Relatório gerencial. – Brasília.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. (2010) Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA. 504 p. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.
- BOCK, A. L. (2012) Efeitos Da Incorporação De Cal Hidratada Em Concretos Asfálticos Elaborados Com Ligante Convencional E Modificado. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)* – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BOEIRA, F. D. (2016) Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados. Qualificação de doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- BOEIRA, F. D. (2014) Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales. *Dissertação de mestrado em Engenharia Civil*. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- DNIT (2006) 031 - *Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Especificação de Serviço.
- DONGRÊ, R.; D'ANGELO, J. e COPELAND, A. (2009) *Refinement of Flow Number as determined by the asphalt mixture performance tester for use in routine QC/QA practice*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2127.
- GRANICH, A. R. (2015) Efeitos da adição de cales na vida de fadiga de concretos asfálticos com agregados de basalto e ligantes convencional e modificado. *Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre,
- HICKS,R.P (1991) Moisture damage in asphalt concrete. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis Of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington.
- HUNTER, E.R. e KSAIBATI, K. (2001) Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes. Report MPC02-138. Wyoming.
- KENNEDY ET AL., (1994) Distress identification manual for long-term pavement performance program. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation 4° Edition Revised. 154p.Mclean.
- JOLIET,Y.; MALLOT,M. (2000) Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator. 2° Eurasphalt e Eurobitume Congress Barcelona.
- LITTLE, D.N. e EPPS, J. A. (2001) The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt, prepared for National Lime Association. The Versatile Chemical.
- NASCIMENTO, L.A. H. (2008) Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Rio de Janeiro, 2008, 204 p. *Dissertação (Mestrado)*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PAVIANI, T. M. (2015) Efeitos da adição de cal hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico. *Dissertação (mestrado)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- SEBAALY, P.E; LITTLE, D.; HAJI, E; BHASIN, A. (2007) "Impact of Lime and Liquid Anti-strip on the Properties of an Idaho Mixture," *Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, TRR #1998*, pp. 65-74, Washington, DC.
- TUNNICLIFF, D. G. e ROOT, R. E (1984) Use of antistripping additives in asphalt concrete mixtures. Transportation research Council. NCHRP Report 274, Washington, DC.
- WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K. E; PELLINEN, T. K.; EL-BASYOUNY, M.; VON et al., (2002) Simple performance test for Superpave mix design, National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA.

Endereço de autores:

Valdir dos Santos Barboza Júnior: valdirbarbozajr@gmail.com

Karine Wille Kraemer: karine-wille@hotmail.com

Rômulo de Souza Pereira: romulosouza_pereira@hotmail.com

Magnos Baroni: magnos.baroni@gmail.com

Luciano Pivoto Specht: luspecht@gmail.com

GEPPASV - Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária

Universidade Federal de Santa Maria

Centro de Tecnologia – Depto. Transportes

Av. Roraima, 1000, Cidade Universitária

Camobi, Santa Maria, RS, CEP: 97105-900