

## RESULTADOS DE ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

**Laynara Xavier Barroso**

**Lilian Ribeiro de Rezende**

Universidade Federal de Goiás

Escola de Engenharia Civil e Ambiental

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

### RESUMO

Vários estudos vêm buscando correlacionar as propriedades viscoelásticas obtidas por meio do ensaio de módulo dinâmico com o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os resultados de ensaios de módulo dinâmico para misturas asfálticas com vista na previsão do comportamento mecânico. Para tanto foram executados ensaios de módulo dinâmico com seis misturas asfálticas distintas, produzidas com mesmo ligante asfáltico (CAP 50/70) e variando o tipo de agregado, a granulometria e o método de dosagem (Marshall e *Superpave*). Com as relações entre módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) foi verificada a correlação com o comportamento mecânico das misturas asfálticas obtidas em termos de *Flow Number* (FN) e propriedades volumétricas. Para a deformação permanente, as melhores relações entre  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  e FN foram encontradas para misturas compostas com o mesmo agregado e ensaiadas na frequência de 20 Hz.

### ABSTRACT

Several studies have shown the relationship between viscoelastic properties and stiffness obtained from dynamic modulus test with asphalt mixtures mechanical behavior. Thus, this paper aims to evaluate the results of dynamic modulus tests for asphalt mixtures to predict mechanical behavior. Dynamic modulus tests were performed with six different mixtures produced with the same asphalt binder (CAP 50/70), and varying the aggregate type, the curve gradation, and the mix design methods (Marshall and Superpave). The relationship between the dynamic modulus ( $|E^*|$ ) and phase angle ( $\delta$ ) pointed to correlation with the mixtures mechanical behavior in terms of Flow Number (FN) and volumetric properties. For permanent deformation, the better relation found between  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  and FN were obtained for mixture produced with the same aggregate and evaluated at the frequency of 20 Hz.

## 1. INTRODUÇÃO

As principais causas da degradação dos pavimentos asfálticos são: intensidade do tráfego, ações climáticas, dimensionamento deficiente do pavimento, projeto de mistura asfáltica ineficaz, deficiência na qualidade dos materiais e problemas de construção. Esses fatores juntos ou isolados ocasionam, por vezes, o surgimento de trincas na superfície do revestimento e o afundamento por deformação permanente (FHWA, 2001). Esses danos, ao atingirem um determinado grau de severidade, tornam-se responsáveis pelo fim da vida útil do pavimento.

Um dos defeitos mais comuns nas vias brasileiras é o trincamento por fadiga, produto do esforço de tração e cisalhamento imposto pelo tráfego na via. Esse defeito inicia em regiões críticas e se intensificam com ação do tráfego ao longo do tempo (Georgouli *et al.*, 2016). Em geral, o pavimento asfáltico fica mais suscetível ao surgimento de trincas nos períodos de temperatura mais baixas. Os ensaios para determinação da vida de fadiga de misturas em laboratório são geralmente realizados em temperaturas intermediárias, tal como o ensaio de tração indireta, amplamente difundido no Brasil, realizado na temperatura de 25°C (ROSSATO, 2015).

Por sua vez, a deformação permanente caracterizada pela deformação plástica do pavimento pode ocorrer de forma isolada na camada de revestimento e/ou nas camadas subjacentes a este. Esse dano tende a acontecer em regiões onde o pavimento seja submetido a elevado cisalhamento e elevadas temperaturas. Esses danos podem se manifestar por meio de afundamentos superficiais conhecidos como trilhas de roda. Ao surgirem, comprometem a

funcionalidade do pavimento, podendo provocar problemas de aquaplanagem devido ao acúmulo de água na superfície da pista.

O surgimento recorrente desses defeitos exige a necessidade de previsão do comportamento das misturas em termo de deformação permanente e vida de fadiga em laboratório. Diversos autores já realizaram estudos buscando correlacionar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com os resultados de módulo dinâmico (MD). Em seus estudos, Safiuddim *et al.* (2013) verificaram a possibilidade de haver uma boa relação entre a vida de fadiga e o módulo dinâmico de misturas asfálticas. Estudo semelhante foi desenvolvido por Ali *et al.* (2015) que verificaram a sensibilidade do módulo dinâmico de misturas asfálticas em relação à vida de fadiga. Hasan *et al.* (2017) encontraram que o modulo dinâmico obtido para temperaturas e frequências intermediárias têm uma boa correlação com a vida de fadiga de misturas encontradas em laboratório.

Em relação à deformação permanente, diversos autores já buscaram correlacionar a resistência a deformação permanente de misturas asfálticas com os resultados de módulo dinâmico, tais como Witczack *et al.* (2002), Nascimento (2008), Apeagiey (2011), Zhang *et al.* (2013), entre outros. Esses estudos foram realizados visando correlacionar os parâmetros viscoelásticos e rigidez das misturas com a tendência à deformação permanente do pavimento.

Apeagiey (2011) ao estudar 16 misturas asfálticas distintas, verificou que o módulo dinâmico (MD) e a graduação destas misturas asfálticas apresentaram fortes correlações com os resultados de *Flow Number* (FN) quando obtidos para a temperatura de 38°C. Nascimento (2008) verificou boa correlação ( $R^2=0,81$ ) entre FN e o parâmetro  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  determinados para 5Hz e 54,4°C para quatro misturas executadas com mesmo ligante e método de dosagem, porém não obteve resultados semelhantes quando correlacionou as propriedades de rigidez da mistura com os resultados de deformação obtidos pelo simulador de tráfego francês. Em contrapartida, Zhang *et al.* (2013) ao correlacionar resultados de MD com resultados de FN de seis misturas distintas não verificou fortes correlações entre os resultados, porém ao analisar a relação entre o FN Index, obtido pela relação entre a deformação acumulada no ensaio de ruptura e o valor de FN com os resultados de MD determinado para temperatura de 54,4°C e frequência de 10Hz, obtiveram as melhores correlações ( $R^2= 0,80$ ).

A partir do ensaio de MD é possível verificar o comportamento viscoelástico da mistura por meio da determinação do módulo complexo ( $E^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ). O ângulo de fase representa a defasagem da resposta elástica do material em relação à aplicação de carga. Quanto maior o ângulo de fase, menos elástico é o material e vice-versa. Por sua vez, o módulo dinâmico apresenta uma medida da rigidez do material, quanto maior o valor do modulo dinâmico, maior rigidez das misturas, tendendo a uma menor deformação do material quando submetido a uma determinada aplicação de carga (Asphalt Institute, 2001).

Os resultados de módulo dinâmico estão intimamente relacionados com as propriedades das misturas asfálticas como é possível verificar pelos modelos de previsão de módulo dinâmico baseados em equações teóricas como as de Witckzack Model (2006) e Hirsh Model (2003). Esses modelos consideram as propriedades dos ligantes e agregados, as propriedades volumétricas das misturas como teor de ligante efetivo e porcentagens das curvas granulométricas. A boa correlação encontrada entre as equações teóricas de previsão e os

resultados obtidos em ensaios de MD indicam que esses parâmetros podem apresentar algum tipo de previsão quanto ao comportamento mecânico de misturas asfálticas.

Em vista disso, este artigo tem por finalidade verificar a possível existência ou não de correlação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase com outros parâmetros mecânicos geralmente obtidos para misturas asfálticas para os agregados e faixas granulométricas utilizadas na região.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As misturas analisadas foram previamente estudadas por Barroso (2018). Tratam-se de seis misturas do tipo concreto asfáltico com variação do tipo de agregado, faixa granulométrica e método de dosagem. As características de cada mistura bem como a denominação utilizada neste estudo são apresentadas na Tabela 1.

As seis misturas foram dosadas com gnaiss granítico e micaxisto, e o ligante asfáltico CAP 50/70, sendo estes tipos de agregados e ligante comumente empregados na execução de revestimentos asfálticos no estado de Goiás. Para as misturas de mesmo agregado e mesma faixa granulométrica, B e C, foram mantidas as mesmas curvas granulométricas quando dosadas por ambos os tipos de dosagem, Marshall e *Superpave*.

Os resultados para previsão de comportamento em relação à deformação permanente foram obtidos pela correlação entre FN e pela relação entre o módulo dinâmico  $|E^*|$  e o ângulo de fase ( $\delta$ ) determinadas para a temperatura de 60°C e para as frequências 0,2; 0,5; 1; 5; 10 e 20 Hz, a fim de se verificar a melhor frequência para correlação com os resultados de FN. Buscou-se verificar a frequência com a melhor correlação quando analisada para todas as misturas, para as misturas dosadas somente com o agregado gnaiss granítico e para ambos métodos de dosagem.

**Tabela 1:** Características das misturas estudadas (Barroso, 2018).

Mistura	Agregado	Faixa – ES 031 (DNIT, 2006)	Dosagem	Teor de ligante (%)	VAM (%)	Flow Number	
						FN médio (Ciclos)	Desvio Padrão
1	Gnaiss granítico	C	Marshall	4,9	15,9	77	9
2			<i>Superpave</i>	4,4	13,5	140	13
3		B	Marshall	4,6	15,5	84	23
4			<i>Superpave</i>	4,2	13,1	241	35
5	Micaxisto	C	<i>Superpave</i>	5,6	16,0	118	28
6		Marshall	5,8	18,2	76	11	

Obs.: VAM: Vazios no agregado mineral; FN: *Flow Number*.

Para as seis misturas estudadas foi determinado o módulo dinâmico conforme a norma T 342 (AASHTO, 2013). As temperaturas de ensaio foram de 25°C e 60°C e as frequências, 20, 10, 5, 1, 0,5 e 0,2 Hz em corpos de prova de  $7 \pm 1\%$  de volume de vazios com deformação axial com deformação axial entre 50 e 150 microstrain. O volume de vazios de 7% foi adotado, pois representa o mesmo volume de vazios utilizados no ensaio de *Flow Number*, conforme especificado no manual de execução de trechos monitorados (REDE, 2010). O *Flow Number* (FN) dosos das misturas asfálticas, definido como o número de ciclos de carga correspondente a mínima taxa de variação de deformação axial durante o ensaio de aplicação

de carga, foi determinada pelo ajuste dos dados ao modelo de Franken. O ensaio para obtenção de FN foi realizado também para misturas com volume de vazios de  $7 \pm 1\%$ . A temperatura de ensaio foi de  $60^\circ\text{C}$ , sendo aplicada uma tensão de contato de 10,2 kPa e tensão desviadora de 204 kPa, conforme projeto de norma (DNIT, 2018).

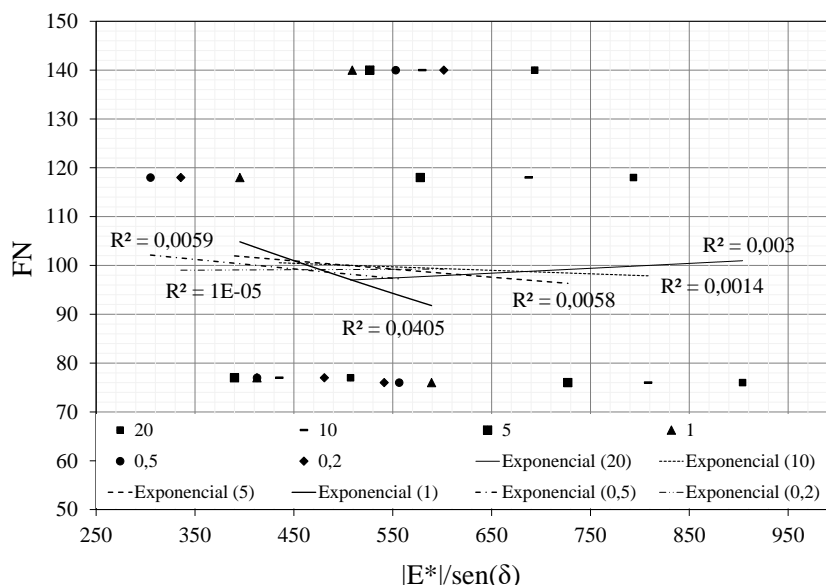
As análises das correlações propostas foram realizadas com base nos critérios adotados por Witczack *et al.* (2002) em estudos realizados com módulo dinâmico para misturas asfálticas, conforme apresentado na Tabela 2. Todas as curvas foram ajustadas conforme o modelo exponencial por ter sido o ajuste com melhor correlação entre os dois parâmetros.

**Tabela 2:** Critério de correlação  $R^2$  (Witczack *et al.*, 2002).

Critério	$R^2_{\text{adj}}$
Excelente	$> 0,90$
Bom	0,70 - 0,89
Razoável	0,40 - 0,69
Ruim	0,20 - 0,39
Muito ruim	$< 0,19$

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a correlação entre o FN e o parâmetro de deformação permanente  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para temperatura de  $60^\circ\text{C}$ . Considerando a correlação com todas as misturas, observa-se que essas apresentaram um comportamento não uniforme com o aumento do FN. Porém, Witczack *et al.* (2002) e Nascimento (2008) apontam uma tendência crescente entre ambos parâmetros, sendo que quanto maior o parâmetro  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  melhor tende a ser o comportamento em termo de deformação permanente, tendência que não foi observado nas misturas estudadas.



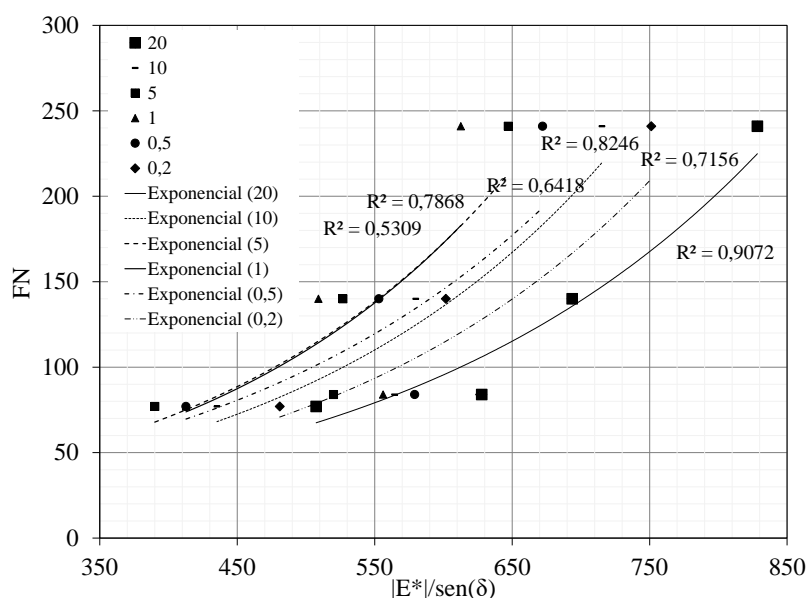
**Figura 1:** Flow Number versus  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para as todas as misturas e frequências.

Além disso, nota-se que as correlações para todas as frequências analisadas foram ruins. Os resultados encontrados foram insatisfatórios, pois os valores da relação  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  foram elevadas para as misturas de micaxisto quando comparadas com as demais misturas, apesar destas apresentarem o menor resultado de FN. Destaca-se que para todas as misturas os valores de FN foram considerados baixos e muito próximos entre si, indicando que elas podem

apresentar problemas de deformação permanente, e, assim, influenciarem em uma possível classificação qualitativa das misturas.

Conforme apontado por Barroso (2018), as misturas produzidas por amassamento (Superpave) apresentaram maior valor de FN que misturas de mesma granulometria e agregado produzidas por impacto (Marshall). Resultado semelhante foi obtido por Almeida Jr. *et al.* (2018) para mistura Faixa B e CAP 50/70, onde verificou-se uma redução no teor de ligante em 0,55% entre a mistura Marshall e Superpave, respectivamente, bem como um aumento de 111% no valor do FN. Na pesquisa de Barroso (2018), verificou-se que para mistura enquadrada na mesma faixa e mesmo tipo de ligante, Faixa B e CAP 50/70 ocorreu uma redução de 0,4% no teor de ligante e aumento de 187% no FN. Segundo Almeida Jr. *et al.* (2017), o maior teor de ligante reduz o atrito entre os agregados aumentando a propensão à deformação permanente.

Observou-se que quando desconsideradas as misturas com micaxisto (Misturas 5 e 6), as novas correlações  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  apresentadas na Figura 2 demonstram maior homogeneidade no comportamento, com melhora no valor do  $R^2$  em função do aumento da frequência. Para essas misturas, as melhores correlações foram verificadas para as frequências mais elevadas de 10 e 20 Hz, consideradas como boa e excelente, respectivamente, segundo classificação de Witczack *et al.* (2002). Verifica-se também que para os maiores valores de FN, maiores os valores dos parâmetros  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$ .



**Figura 2:** Flow Number versus  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para as misturas com gnaisse granítico e todas as frequências.

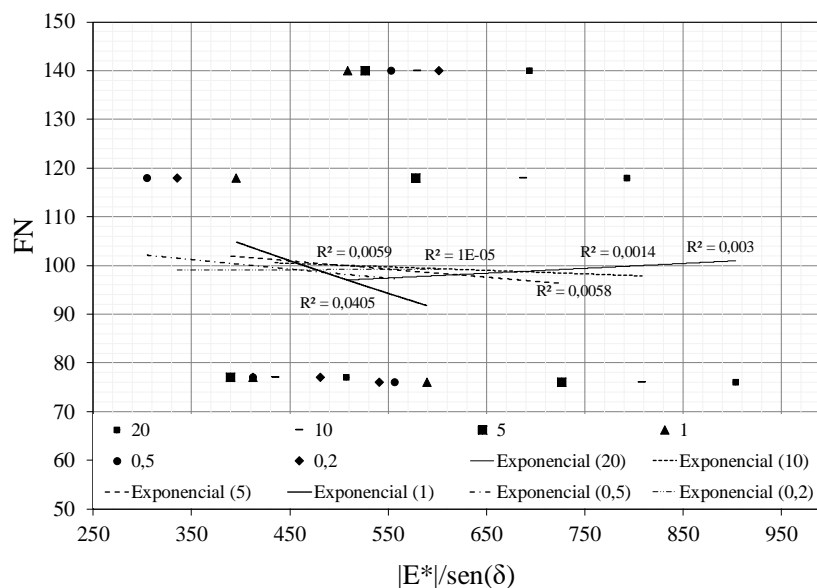
Em seu estudo, Witczack *et al.* (2002) encontrou melhores correlações entre o parâmetro  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para a frequência de 5Hz e temperatura de 54,4°C com resultados de afundamento de trilha de rodas obtidos para diferentes misturas asfálticas aplicadas em três trechos experimentais: MnRoad, ALF e WesTrack. A primeira pista foi realizada com dois tipos de ligante AC/20 e Pen 120/150, com misturas dosadas tanto pelo método Marshall, quanto *Superpave*. As misturas da segunda pista foram dosadas pela metodologia *Superpave* com três ligantes convencionais e dois modificados a partir de duas graduações com mesmo agregado. As misturas da terceira pista foram produzidas conforme metodologia *Superpave*, ligante PG

64-22 com variação da granulometria e teor de asfalto. Para as misturas de cada pista estudada, o autor encontrou valores de  $R^2$  igual a 0,971, 0,886 e 0,853, respectivamente.

As frequências intermediárias, 1 Hz e 0,5 Hz, apresentaram as piores correlações, 0,531 e 0,642, respectivamente. Além disso, nota-se que as frequências de 1 Hz e 5 Hz apresentaram sobreposição das curvas de ajuste, indicando uma pequena variação nos resultados da relação entre rigidez e ângulo de fase destas misturas com a variação de ambas frequências. Desse modo, observa-se que não é possível encontrar uma única relação para previsão de comportamento à deformação permanente de misturas com diferentes tipos de agregados em função dos parâmetros de rigidez e viscoelasticidade do material.

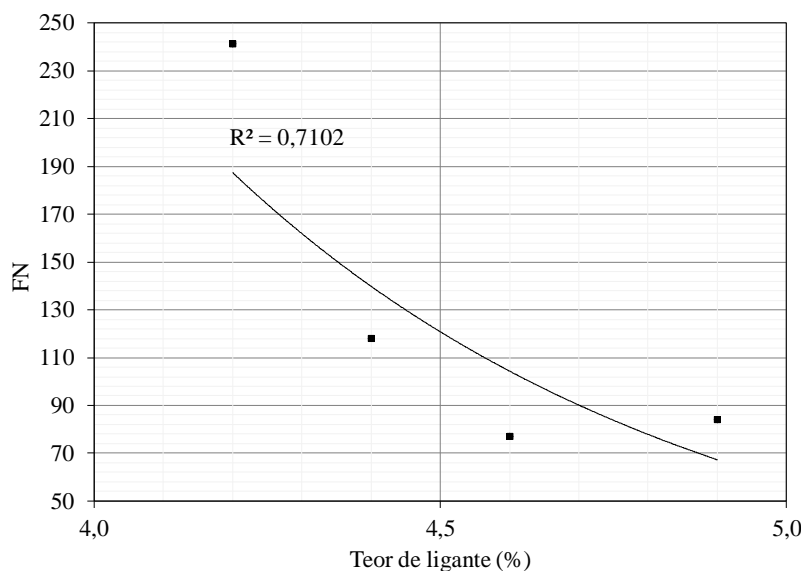
Segundo Gouveia (2016), as propriedades dos componentes do concreto asfáltico influenciam na variação do módulo dinâmico, tais como textura da superfície, forma dos grãos, entre outros. A influência do tipo de agregado no comportamento à deformação permanente deste estudo pode estar relacionada ao fato de que os agregados de micaxisto possuem formato mais lamelar que os agregados de gnaiss granítico. Outra diferença que se deve considerar é que nas misturas com micaxisto foi utilizada areia artificial da mesma rocha de origem; já nas misturas com gnaiss granítico foi utilizada areia de rio, como citado por Barroso (2018). Destaca-se, ainda, que todos os agregados utilizados apresentaram resultados satisfatórios quanto às especificações requeridas.

Quanto à granulometria, ao analisar somente as misturas Faixa C, com micaxisto e granito gnaiss, verifica-se baixa correlação entre os resultados encontrados. Desse modo, ao analisar ambas situações, Figura 2 e 3, foi possível observar que o tipo de agregado apresentou maior influência no comportamento da mistura em termo de deformação do que a granulometria, não sendo observado um comportamento homogêneo das misturas Faixa C, ainda que estas possuam granulometrias semelhantes. Destaca-se que as seis misturas estudadas apresentam o mesmo Tamanho Máximo Nominal (TMN) de agregados, tanto Faixa B quanto Faixa C, de 19 mm, conforme resultados encontrados por Barroso (2018).



**Figura 3:** Flow Number versus  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para as misturas com Faixa C e todas as frequências.

Comportamento semelhante foi quando as misturas foram analisadas em termos de FN *versus* teor de ligante das misturas. Quando a correlação é realizada com todas as misturas, verifica-se valores de  $R^2$  ruins. Ao analisar somente a deformação permanente entre as misturas com mesmo agregado (Misturas 1 a 4), verifica-se que o maior valor de FN foi obtido para a Mistura 4 e o menor para a Mistura 1 (Figura 4). Desse modo, observou-se que o resultado apresenta uma melhor correlação quando analisados para misturas com agregados de mesma origem.

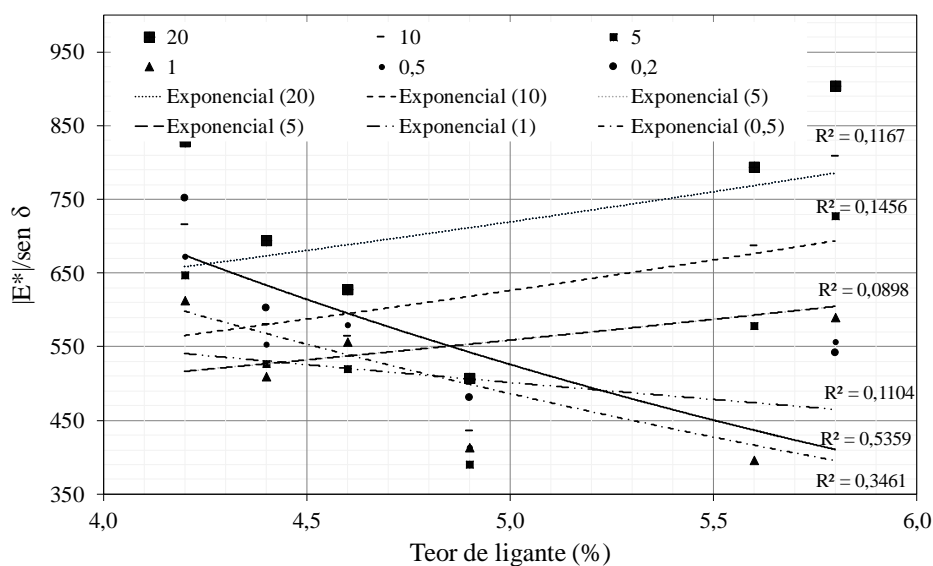


**Figura 4:** Correlação entre *Flow Number* e  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para 5 Hz para misturas com Gnaisse Granítico.

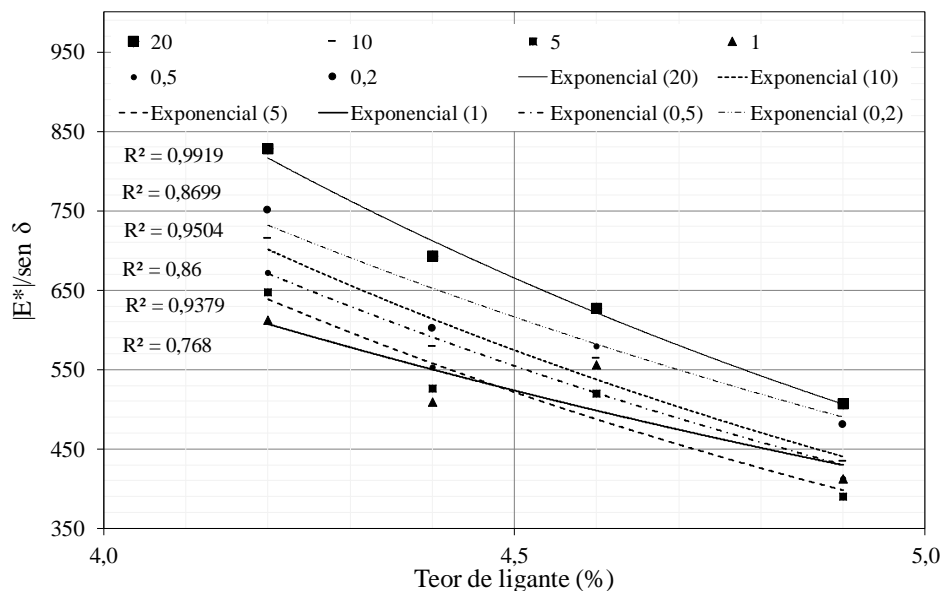
A Figura 5 apresenta a correlação entre o teor de ligante das misturas e  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  para as diferentes frequências de todas as misturas (Figura 5a) e para as misturas com mesmo agregado (Figura 5b). Analisando as relações  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  somente para as misturas com gnaisse granítico (Figura 5b) foi possível notar que para a frequência de 20 Hz foram obtidos os melhores resultados de  $R^2$ , semelhante ao resultado encontrado na Figura 2. A correlação encontrada para esta frequência foi de 0,99, demonstrando que o teor de ligante apresenta forte influência nas propriedades viscoelásticas das misturas, podendo então ser refletida no comportamento a deformação permanente da mistura em campo. A pior correlação com o teor de ligante foi encontrada para 0,5 Hz.

Em relação ao tipo de dosagem, *Superpave* e Marshall, o módulo dinâmico se apresentou como um melhor indicativo em termos de deformação permanente para as frequências mais baixas para ambos os tipos de dosagem (Figura 6), sendo as melhores as correlações verificadas para as misturas dosadas pelo método *Superpave*. Foi possível observar que para ambos tipos de dosagem, as frequências mais elevadas apresentaram a pior correlação com a deformação permanente, sendo então verificada uma melhor correspondência à medida que diminui a frequência. As misturas Marshall apresentaram correlações ruins, com exceção da frequência de 0,2 Hz. Destaca-se que as análises foram realizadas com poucos pontos, sendo indicada a verificação com um número maior de amostragem. Porém, apesar da quantidade limitada de amostras, é possível observar a tendência de comportamento entre os dois parâmetros, podendo este ser adotado como um indicativo inicial de comportamento, principalmente para misturas dosadas pelo método *Superpave* em baixas frequências.

Na Figura 6 percebe-se uma diferença de comportamento entre o parâmetro de deformação permanente e o *Flow Number* entre Marshall e *Superpave*, onde verifica-se que nas misturas Marshall apesar da pequena diferença entre os valores de FN, temos grande variação do parâmetro de rigidez das misturas. Diferentemente as misturas dosadas pelo método *Superpave*, apresentam uma tendência de comportamento crescente entre ambos parâmetros analisados, conforme citado anteriormente. Acredita-se que mudanças na estrutura da mistura pela dosagem por amassamento possam ter provocado uma maior influência nos resultados de MD e *Flow Number* para as misturas *Superpave* quando comparada as misturas Marshall, refletindo o que de fato ocorre no campo.



(a)

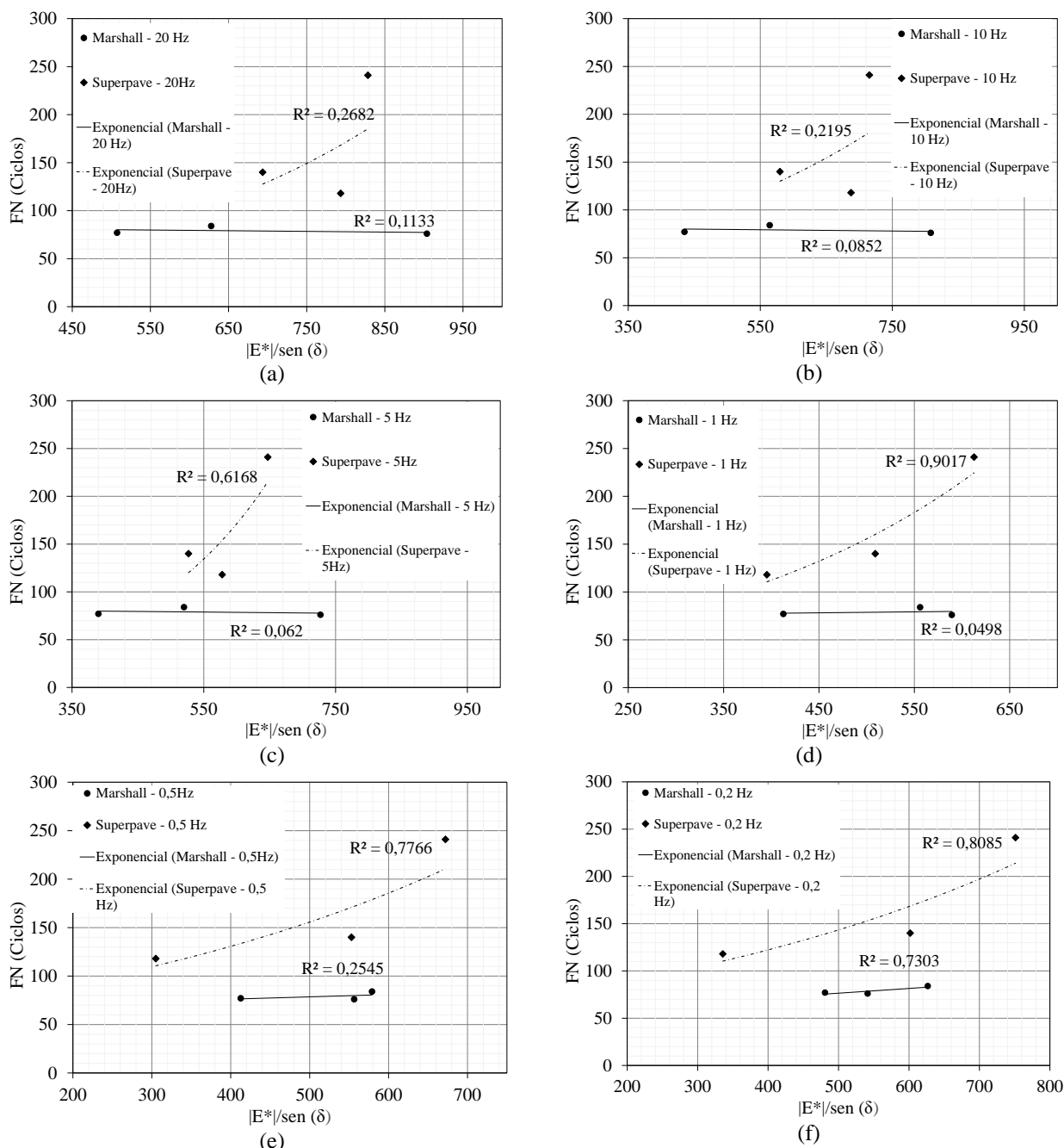


(b)

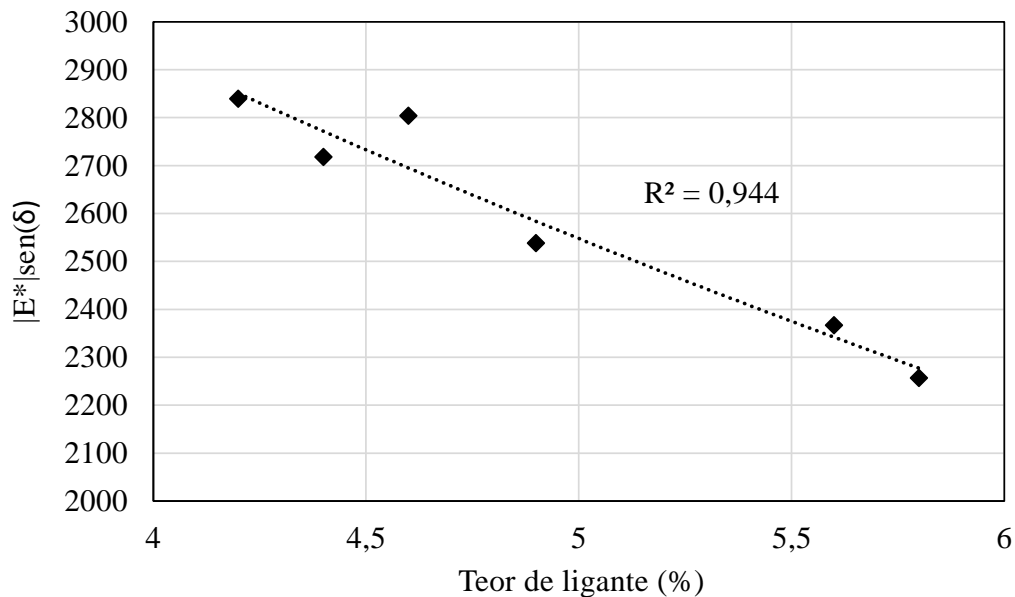
**Figura 5:** Correlação entre  $|E^*|/\text{sen } \delta$  e teor de ligante: (a) Todas as misturas; (b) Misturas com gnaise granítico.



Em termos de vida de fadiga, Witczack *et al.* (2002) aponta que baixos valores de  $|E^*|sen(\delta)$  para temperatura de 25°C e 10 Hz podem indicar um bom comportamento da mistura em termos de vida de fadiga, mas é importante destacar que o módulo dinâmico pode não ser conclusivo para esse tipo de análise. A correlação entre o parâmetro  $|E^*|sen(\delta)$  e o teor de ligante apresentou bom resultado, como mostrado na Figura 7, ou seja, a que medida que o teor de ligante aumenta, a relação  $|E^*|sen(\delta)$  tende a melhorar, independentemente do tipo de agregado e dosagem da mistura, diferentemente dos resultados observados para o parâmetro de deformação permanente que apontou melhor correlação somente para os agregados de mesma origem.



**Figura 6:** Correlação entre  $|E^*|sen(\delta)$  e FN para ambas dosagens e frequências: (a) 20 Hz; (b) 10 Hz (c) 5 Hz (d) 1 Hz (e) 0,5 Hz e (f) 0,2 Hz.



**Figura 7:** Teor de ligante *versus* parâmetro de fadiga para todas as misturas.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi possível observar que o tipo de agregado apresentou grande influência nos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas para a previsão do comportamento à deformação permanente de misturas asfálticas.

A relação  $|E^*|/\text{sen}(\delta)$  pode ser utilizada como uma medida auxiliar para indicar o comportamento a deformação permanente de misturas asfálticas. Neste caso, os parâmetros obtidos pelas propriedades viscoelásticas dos materiais, principalmente para frequência de 20 Hz, podem ajudar a definir qualitativamente o comportamento à deformação permanente de concretos asfálticos, mesmo que estas possuam granulometrias distintas.

O tipo de agregado apresentou maior influência nas respostas à deformação permanente quando comparada com a granulometria da mistura, visto uma tendência de comportamento quando a relação foi realizada com as misturas de mesmo agregado, gnaisse granítico, não verificada para as misturas com mesma faixa granulométrica, Faixa C, e agregados distintos. Quanto à dosagem, este indicou ser um melhor parâmetro para as misturas dosadas pelo método do *Superpave*, principalmente para a frequência de 1 Hz, mesma frequência utilizada para a determinação do parâmetro FN das misturas.

De maneira geral, não se verificou uma correlação eficiente entre os parâmetros de rigidez com o resultado de *Flow Number* para as misturas estudadas nesta pesquisa, demonstrando que para a compreensão do comportamento mecânico de misturas asfálticas o indicado é a utilização de ensaios para específicos. Deve-se considerar que as deformações produzidas durante a determinação do MD são pequenas e ocorrem na região de comportamento linear das misturas, não considerando o comportamento das mesmas quando levadas ao dano, como ocorre nos ensaios de comportamento mecânico. Isso ocorre, pois vários fatores podem influenciar o

comportamento mecânico das misturas diante do dano, tais como as propriedades do ligante, dos agregados e o intertravamento dos grãos.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Petrobras.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2011). *American Association of State Highway and Transportation Officials*. T 342 **Determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures**. Washington, DC.
- ALI, Y., IRFAN, M. AHMED, S., AHAMED, S. (2017). Permanent deformation prediction of asphalt concrete mixtures –A synthesis to explore a rational approach. *Construction And Building Materials*, 153, 588-597.
- ALMEIDA JUNIOR, P. O. BOEIRA, F. D.; SPECHT, L. P.; CERVO, T. C.; PEREIRA, D. S; CENTOFANTE, R.; BARBOZA JR., V.; SILVA, C. C. Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas. *Transportes*. v. 26, n. 2, p.1-15, 2018.
- ASPHALT INSTITUTE. (2001) SUPERPAVE Mix Design Series No. 2 (SP-2). Asphalt Institute Research Center, Lexington.
- APEAGYEI, A. K. (2011). Rutting as a Function of Dynamic Modulus and Gradation. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 23 (9), 1302-1310.
- BARROSO, L. X. (2018) **Avaliação da dosagem e do comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos em Goiás**. 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- DNIT (2017). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Projeto de norma- Pavimentação – Misturas asfálticas –Ensaio Uniaxial de carga repetida para determinação da Resistencia à deformação permanente – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: Brazil.
- FHWA (2001). *Superpave Mixture Design Guide: WesTrack Forensic Team Consensus Report* (Report FHWA-RD-02-052). Washington: U.S. Department of transportation.
- GEORGOULI, K., PLATI, LOIZOS, A. (2016). Assessment of dynamic modulus prediction models in fatigue cracking estimation. *Materials And Structures*, 49 (12), 5007-5019.
- GOUVEIA, B. C. S. (2016). **Métodos de previsão e determinação de modulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- HASAN, M. M., BAIRGI, B. K., FAISAL, H. M., RAHMAN, A. S. M, TAREFDER, R. (2017). **Evaluation of fatigue life of asphalt concrete from dynamic modulus test**. Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Tampa, United States American
- MOHAMMAD, L. N., WU, Z. OBULARREDY, S., COOPER, S., ABBADIE, C. (2006). Permanent Deformation Analysis of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Simple Performance Tests and 2002 Mechanistic-Empirical Pavement Design Software. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1970, 133-142.
- NASCIMENTO, L.A.H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- REDE TEMÁTICA DE ASFALTO. **Manual de execução de trechos monitorados**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2010. 95 p.
- SAFIDDIUN, M., TIGHÉ, S. L. ISLAM, R. (2013). **Evaluation of stiffness to predict fatigue life of hot mix Asphalt – A Canadian case study**. 3rd specialty conference on material engineering & applied mechanics. Montreal, Québec.
- WITCZACK, M. W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., EL-BASYOUNY, M., VON QUINTUS, H. (2002). **Simple Performance Test For Superpave Mix Design**. (Report No. 465). Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program.
- ZHANG, J.; ALVAREZ, A. E.; LEE, S. I.; TORRES, A.; WALUBITA, L. Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, v. 44, p.391-398, 2013.