

EFEITO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM NO TEOR DE PROJETO E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Kamilla Lima Vasconcelos¹

Materials & Pavement Division
Texas Transportation Institute – TTI
Texas A&M University – TAMU

Jorge Barbosa Soares²

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – Petran
Universidade Federal do Ceará – UFC

RESUMO

A dosagem de misturas asfálticas a quente vem sofrendo mudanças ao longo de algumas décadas, sendo o método Marshall o procedimento ainda mais adotado e difundido no Brasil. O procedimento de dosagem desenvolvido pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), denominado de dosagem Superpave, vem mostrando ser uma metodologia que produz amostras mais semelhantes à realidade encontrada em campo quando comparadas com as amostras obtidas pela dosagem Marshall. A primeira grande diferença entre os dois procedimentos de dosagem é o processo de compactação dos corpos-de-prova (CP), onde o método Marshall adota a compactação por impacto e o Superpave por amassamento. A segunda diferença é o envelhecimento de curto prazo das misturas, adotado apenas pela metodologia Superpave. Para o presente trabalho foram selecionadas três granulometrias contínuas, todas com 12,5mm de tamanho máximo nominal (TMN), que passaram pelos dois procedimentos de dosagem. Os CPs no teor de projeto das misturas foram caracterizados mecanicamente por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e resistência a tração retida por umidade induzida.

ABSTRACT

In Brazil, the Marshall procedure remains the most used asphalt mixture design methodology. The Strategic Highway Research Program (SHRP) has developed another design procedure known as Superpave Mix Design. Previous research results indicate that the Superpave Mix Design can produce specimens more similar to field cores when compared to the specimens from the Marshall procedure. A considerable difference between the two design procedures is the compaction process. While in the Marshall procedure compaction is by impact, in the Superpave, it is by gyration. Another difference is the short-term aging of the mixture used in the Superpave methodology. In the present study three continuous dense graded mixtures were investigated (below, above and through the restricted zone). All of them have aggregates with 12.5mm maximum nominal size and were designed using both methodologies. The mechanical behavior of the mixtures was evaluated by: (1) the indirect tensile strength, (2) resilient modulus, (3) fatigue life (stress controlled), and (4) resistance to moisture damage.

1. INTRODUÇÃO

O primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método *Hubbard-Field*. Este foi originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia asfalto e depois modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos (ASPHALT INSTITUTE, 1965 *apud* ROBERTS *et al.*, 2002). Após este procedimento, vários outros já foram formulados, porém para misturas asfálticas a quente os mais utilizados foram os métodos de dosagem Hveem e Marshall. Segundo ROBERTS *et al.* (1996), 75% dos departamentos de transportes americanos utilizavam o método Marshall e 25% o método Hveem, entre a década de 40 e metade da década de 90.

Alguns autores crêem que o teor de projeto de ligante asfáltico é maior para as misturas dosadas pela metodologia Marshall (WANG *et al.*, 2000), outros acreditam que irá depender da temperatura para qual o pavimento está sendo projetado, tráfego ao qual será submetido e tipo de mistura (HAFEZ e WITCZAK, 1995). Durante a década de 80, várias rodovias americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Muitos engenheiros acreditavam que

o impacto na compactação das misturas durante a dosagem Marshall produzia corpos-de-prova (CP) com densidades que não condiziam com as densidades do pavimento em campo. Esse assunto foi abordado no estudo realizado nos EUA sobre materiais asfálticos, denominado *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem denominado Superpave.

A forma de compactação dos corpos-de-prova foi uma das maiores mudanças propostas pelo Superpave. Os pesquisadores do SHRP desejavam um dispositivo que compactasse a amostra de mistura betuminosa mais próxima da compactação em campo, de forma que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento (MOTTA *et al.*, 1996). O compactador giratório Superpave (SGC) é um dispositivo mecânico composto do seguinte sistema de componentes:

- Estrutura de reação, base rotativa e motor;
- Medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão; e
- Molde e placa base.

Durante a evolução dos procedimentos de dosagem, diversas formas de compactação de amostras vêm sendo desenvolvidas. Dependendo do sistema, as amostras podem ser cilíndricas, trapezoidais, ou retangulares em forma, e a compactação pode ser realizada através de impacto, amassamento ou vibração (HARMAN *et al.*, 2002). A compactação giratória aplica um esforço de amassamento na fabricação de amostras cilíndricas, que foi o processo escolhido pelo SHRP.

No Brasil, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas (DNER ME 043/95) ainda é o mais utilizado, porém este sofreu algumas alterações, como a exclusão dos parâmetros estabilidade e fluência como pré-requisitos na dosagem das misturas. Atualmente o teor de projeto de ligante asfáltico na dosagem Marshall para misturas a quente é determinado baseado em parâmetros volumétricos, geralmente volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV). O procedimento de dosagem adotado pela 3ª UNIT/DNIT encontra-se detalhado em SOARES *et al.* (2000).

O intuito do presente trabalho foi de avaliar a influência de diferentes métodos de dosagem de misturas asfálticas a quente no teor de projeto e, conseqüentemente, no comportamento mecânico das mesmas. Para tal, foram selecionadas três misturas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e dois procedimentos de dosagem. Os CBUQs foram todos de 12,5mm de tamanho máximo nominal (TMN), sendo um com granulometria passando por cima da zona de restrição (AZR), outro por baixo (BZR) e um pelo meio da mesma (TZR). Os procedimentos de dosagem selecionados foram o Marshall (SOARES *et al.*, 2000) e o Superpave.

2. DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE

2.1. Dosagem Marshall

O método Marshall ainda é o procedimento mais usado para determinação do teor de ligante no Brasil. A norma DNER-ME 43-64 recomenda o esforço de compactação de 50 golpes por face para pressão de pneu até 7kgf/cm² e de 75 golpes por face para pressão entre 7 e 14kgf/cm² (ALDIGUERI *et al.*, 2001). Não existe, porém, nenhuma recomendação na norma

com relação à frequência de aplicação dos golpes, da mesma forma que não existe na norma da ASTM (D 5581-89). Existe crítica de alguns autores com relação à dispersão dos resultados obtidos para teor de projeto de ligante asfáltico, apesar da existência de normas padronizando o método Marshall (COELHO e SÓRIA, 1992; FRANKEN *et al.*, 1997 *apud* MOTTA, 1998). Pode ainda ser observada diferença de resultados quando da adoção de compactação automática, ou manual, conforme reportado por KANDHAL e KOEHLER (1985) e ALDIGUERI *et al.* (2001).

O procedimento de dosagem Marshall pode apresentar diferentes métodos para escolha do teor de projeto de ligante asfáltico. Segundo NAPA (1982), a escolha do teor de ligante asfáltico é baseado somente no volume de vazios (V_v), correspondente a 4%, ou o V_v correspondente à média das especificações. ROBERTS *et al.* (1996) baseiam essa escolha na estabilidade Marshall, peso específico e V_v . Nesse caso, o teor de projeto é uma média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, ao peso específico máximo da amostra compactada e a um V_v de 4% (ou média das especificações). A dosagem das misturas adotadas nesse trabalho porém, seguiu o procedimento descrito em SOARES *et al.* (2000). Este é o método convencionalmente adotado pela 3ª Unidade de Infra-estrutura Terrestre (UNIT) do Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre (DNIT) e é baseado em dois parâmetros volumétricos: V_v e relação betume-vazios (RBV).

O procedimento usado consta da moldagem de corpos-de-prova (CPs) em cinco direfentes teores de ligante asfáltico. Desses CPs são determinados o V_v e o RBV de forma a traçar uma gráfico onde a abscissa é dada pelo percentual de CAP, a ordenada y_1 pelo V_v e a ordenada y_2 pelo RBV, conforme ilustrado na Figura 1. O teor de projeto (TP) é dado pela média dos dois valores centrais de CAP, obtidos pelas retas verticais provenientes das especificações de V_v e RBV.

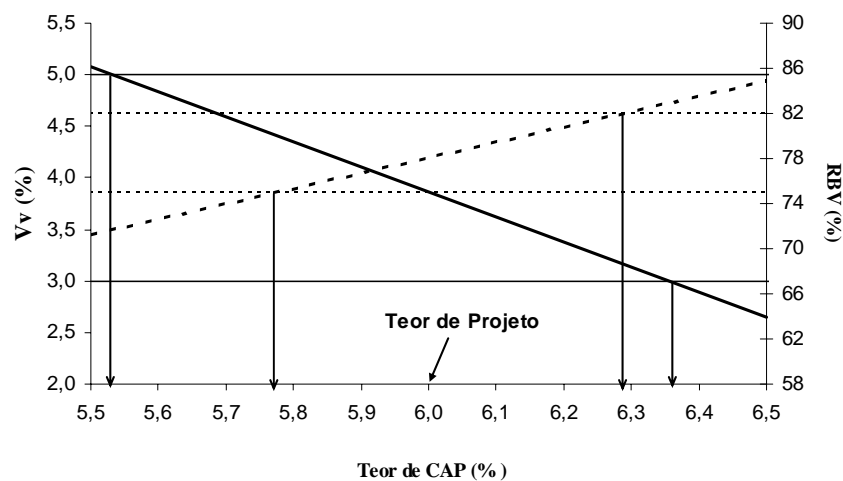


Figura 1: Exemplo de obtenção do teor de projeto

Para este trabalho convencionou-se chamar esse procedimento de Marshall, devido basicamente ao processo de compactação, apesar de este não contemplar a determinação da estabilidade e da fluência, conforme especificado na norma DNER ME 043/95. Adotou-se 75 golpes por face com soquete Marshall e decidiu-se pela não adoção do envelhecimento de curto prazo das misturas antes da compactação.

2.2. Dosagem Superpave

A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos EUA entre 1940 e 1990, foi dosada utilizando a metodologia Marshall ou Hveem (ROBERTS *et al.*, 1996). Desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transporte americanos vêm utilizando a metodologia Superpave, ainda em fase de testes no Brasil. Na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas. Foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. A maior diferença entre os dois procedimentos de dosagem analisados é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros).

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas sobre detalhes envolvendo o SGC e, entre os temas abordados, estão as possíveis variações obtidas através de SGC de diferentes marcas. YILDIRIM *et al.* (2000) avaliaram sete diferentes SGC e concluíram que todos os compactadores analisados apresentaram os mesmos resultados, assumindo as tolerâncias apresentadas no protocolo AASHTO PP35. BUCHANAN e BROWN (2001) e HINRICHSSEN (2001) também realizaram testes a fim de verificar possíveis diferenças entre marcas/modelos distintos de SGC, porém os resultados indicaram diferenças significativas entre as marcas analisadas. No presente trabalho, utilizou-se o compactador giratório existente no LMP/UFC, um Troxler modelo 4140.

O tamanho do molde a ser usado na dosagem Superpave é outro ponto importante da investigação. O molde de 150mm de diâmetro é o requerido nas especificações Superpave, porém o SGC dispõe também de capacidade para moldagem de CPs com 100mm. No estudo realizado por JACKSON e COZOR (2003) não foi observada diferença significativa no percentual da densidade máxima teórica (%Gmm) para os CPs moldados com o cilindro de 100 e 150mm. Os autores não citam os tamanhos máximos nominais das quarenta misturas analisadas, porém advertem que a adequação dos dois tamanhos de molde é limitada a misturas com tamanho máximo de agregado de 25,4mm, ou menor.

O tamanho do molde, porém, não é um consenso entre os pesquisadores. KANDAHN e BROWN (1990) avaliaram a dosagem de misturas tipo *large-stone* com os dois tamanhos de molde e a recomendação foi do uso do molde de 150mm. De forma semelhante, McGENNIS *et al.* (1996) concluíram não ser possível de forma satisfatória a dosagem de misturas asfálticas pela metodologia Superpave com o molde de 100mm. Neste trabalho utilizou-se apenas o molde de 100mm de diâmetro, a fim de facilitar a comparação dos resultados obtidos através da dosagem Marshall, além de possibilitar a utilização dos mesmos equipamentos para os ensaios mecânicos.

3. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

3.1. Seleção dos Materiais

A seleção dos agregados foi feita de forma a enquadrar as misturas nas especificações Superpave para misturas com 12,5mm de TMN e na Faixa C do DNIT para CBUQs. Foi utilizada brita ¾” como agregado graúdo e pó de pedra como agregado miúdo, com densidades reais 2,658 e 2,655, respectivamente. Todos os agregados são provenientes da pedreira de Itaitinga – CE e de origem granítica. Para a realização dos ensaios, bem como

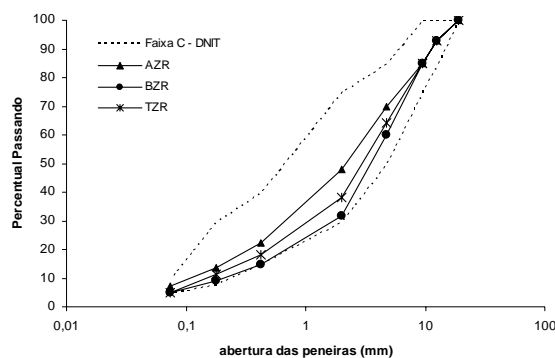
para a moldagem dos corpos-de-prova, os materiais foram fracionados da peneira ¾” à peneira N°200, passando por toda a série especificada pelo DNIT, de forma a assegurar a menor variação possível das granulometrias originais. Como ligante, utilizou-se o CAP 50/60 produzido do petróleo Fazenda Alegre refinado na Lubrificantes do Nordeste (Lubnor)/Petrobras.

3.2. Curvas Granulométricas

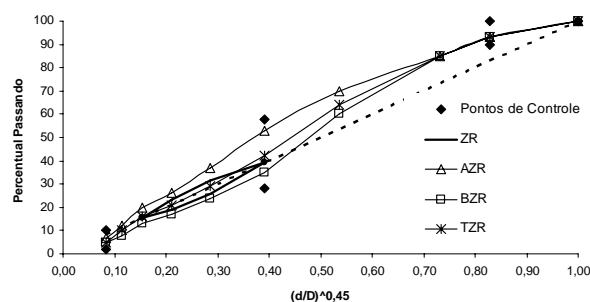
Foram selecionadas três distribuições granulométricas, todas do tipo (CBUQ). Optou-se por selecionar uma curva que passasse abaixo da ZR (BZR), conforme sugerido por diversos autores, uma acima da ZR (AZR) e uma através da mesma (TZR). A Tabela 1 apresenta as distribuições granulométricas das misturas. Todas apresentam TMN de 12,5mm e a mesma granulometria até a peneira de 4,76mm, de forma que a variação entre as três curvas se deu quase totalmente na fração miúda. A Figura 2 ilustra as três granulometrias segundo especificações do DNIT e Superpave.

Tabela 1: Granulometria das misturas densas e contínuas

Peneira	Abertura (mm)	Granulometrias		
		AZR	BZR	TZR
¾”	19,1	100,0	100,0	100,0
½”	12,5	93,0	93,0	93,0
3/8”	9,5	85,0	85,0	85,0
N° 4	4,76	70,0	60,0	64,0
N° 10	2,00	48,1	31,6	38,0
N° 40	0,42	22,4	14,6	18,0
N° 80	0,18	13,6	9,0	11,2
N° 200	0,075	7,0	5,0	5,0



(a)



(b)

Figura 2: Distribuição granulométrica das misturas segundo (a) especificações do DNIT para Faixa C de CBUQ e (b) Superpave para misturas com 12,5mm de TMN

3.3. Densidade Máxima Teórica

No presente trabalho foi adotado o procedimento através da aplicação de vácuo (ASTM D 2041) para a determinação da densidade máxima teórica (DMT), aqui denominada de densidade máxima medida (DMM). A correta interpretação da norma ASTM D 2041 é que a pressão a ser aplicada é a pressão residual $\Delta = 30\text{mmHg}$ (diferença entre 760 e 730mmHg). A

bomba utilizada para essa pesquisa não apresentava capacidade para aplicação da pressão acima mencionada, de forma que uma pressão abaixo da exigida em norma foi de fato aplicada. A Tabela 2 ilustra os resultados da DMM obtidas para os diferentes percentuais de CAP durante as dosagens das misturas, todas determinadas através do mesmo procedimento.

Tabela 2: Resultados de DMT e DMM obtidos para as dosagens das misturas estudadas

% CAP	Misturas		
	AZR	BZR	TZR
5,0	2,451	2,446	2,446
5,5	2,434	2,430	2,430
6,0	2,416	2,413	2,408
6,5	2,390	2,391	2,387
7,0	2,373	2,373	2,373

3.4. Parâmetros Volumétricos e Teor de Projeto

Conforme observado na Tabela 3, os valores de teor de projeto foram superiores para as dosagens Superpave, em relação às dosagens Marshall para todas as misturas, fato que não era esperado. Como mencionado anteriormente, durante a década de 80, muitos engenheiros americanos passaram a questionar o teor de ligante obtido durante a dosagem Marshall. Eles atribuíram ao excesso de ligante, a responsabilidade pelas deformações permanentes prematuras nas rodovias americanas, de forma que se passou a acreditar que misturas asfálticas dosadas pela metodologia Marshall apresentavam teores de projeto superiores aos encontrados seguindo a metodologia Superpave.

Tabela 3: Parâmetros volumétricos dos CPs moldados no teor de projeto

	AZR		BZR		TZR	
	M	S	M	S	M	S
Da	2,329	2,318	2,344	2,313	2,331	2,337
Vv (%)	3,6	3,6	3,0	2,4	4,1	2,9
VCB (%)	13,7	14,3	13,3	14,3	12,6	13,7
VAM (%)	17,3	17,9	16,3	16,7	16,6	16,7
RBV (%)	79,3	80,0	81,7	85,5	75,6	82,4
TP (%)	6,0	6,3	5,8	6,3	5,5	6,0

Diante dos resultados obtidos, selecionou-se uma mistura (BZR) para que a dosagem Marshall fosse refeita, porém considerando o envelhecimento de curto prazo de 2h na temperatura de compactação, não considerado no procedimento Marshall inicial. O teor de projeto foi então de 6,5%, superior ao encontrado pela metodologia Superpave (6,3%), sendo provável que o processo de compactação isoladamente seja o fator responsável pelo aumento do teor de projeto nas misturas Marshall. No trabalho realizado por MARQUES (2004) também foram avaliados os dois processos de compactação. Os resultados obtidos mostraram que se mantendo todas as variáveis constantes e variando-se apenas o processo de compactação (para o caso de 75 giros e 75 golpes), a compactação por impacto apresenta Vv bem superior em relação à compactação giratória, sendo dessa forma necessária uma maior quantidade de ligante durante o procedimento de dosagem.

Outro fato que levantou alguns questionamentos foi a questão da variação dos Vv dos CPs moldados no TP. Enquanto a variação absoluta do Vv para as misturas dosadas pela

metodologia Marshall foi de 1,1%, a das misturas pelo Superpave foi de 2,4%. Essa maior variação pode ser devido ao fator de correção adotado durante o procedimento de dosagem Superpave. A obtenção dos parâmetros volumétricos para 96 giros ($N_{projeto}$) durante a dosagem pode ter sido obtida de forma diferente para as três misturas, o que foge ao controle do operador. A organização dos agregados durante o processo de compactação das misturas pode variar, levando a fatores de correção que deveriam ser distintos.

3.5. Ensaios Mecânicos

O comportamento mecânico das misturas moldadas no teor de projeto foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), fadiga por compressão diametral à tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida. Os ensaios de RT e MR foram realizados a 25°C. A Tabela 4 apresenta a média dos resultados obtidos para as duas misturas, que podem ser melhor visualizados nas Figuras 3 e 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência

Mistura	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	MR/RT
AZR Marshall	1,13	2.660	2.254
AZR Superpave	1,72	6.003	3.490
BZR Marshall	1,07	3.506	3.277
BZR Superpave	1,47	6.421	4.368
TZR Marshall	1,28	3.326	2.598
TZR Superpave	1,43	4.181	2.924

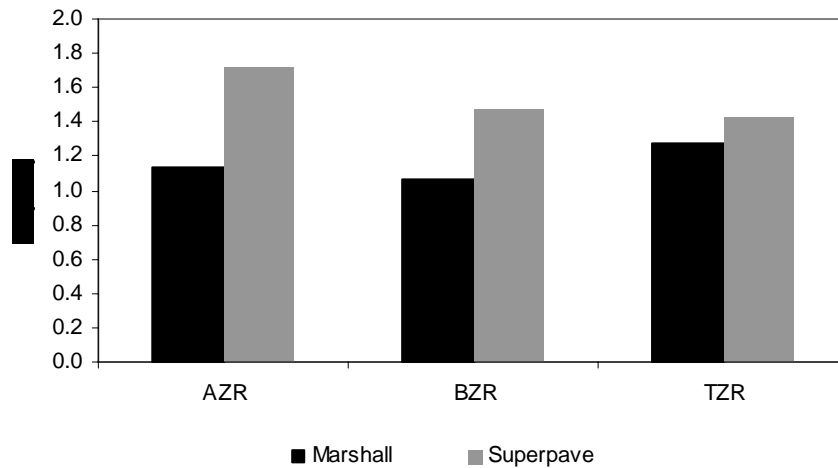


Figura 3: Média dos resultados de resistência à tração

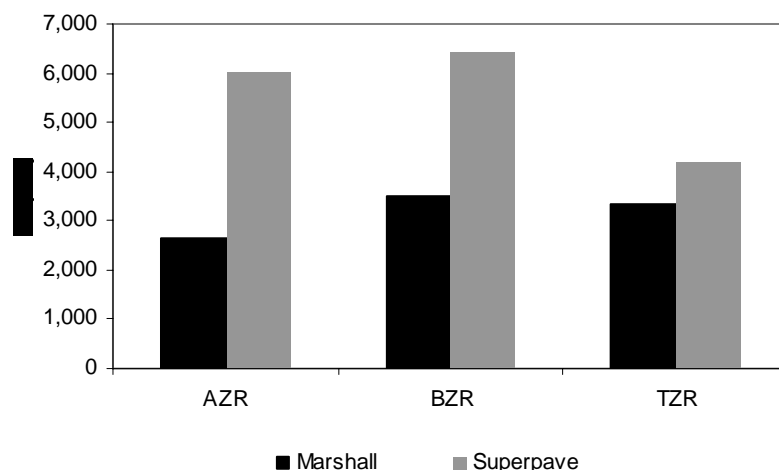


Figura 4: Média dos resultados de módulo de resiliência

Para a determinação da vida de fadiga adotou-se o procedimento utilizado na COPPE/UFRJ descrito por MOURÃO (2003) (fadiga por compressão diametral à tensão controlada). Foram realizados ensaios com apenas três níveis de tensão (30, 40 e 50% de RT), devido ao tempo disponível para execução dos ensaios. Para cada nível de tensão foram ensaiados de três a cinco CPs, a depender da dispersão dos resultados. O nível de tensão aqui referido diz respeito a tensão de tração no centro do CP não danificado submetido a compressão diametral. A carga no CP é ajustada de forma a produzir o nível de tensão desejado. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos para as duas misturas e a Tabela 5 apresenta os valores de k , n e R^2 para as linhas de tendência das cinco misturas, grafadas de acordo com a equação 1.

$$N = k \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (1)$$

Onde:

N : vida de fadiga;

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de compressão e tração no centro da amostra;

k e n : constantes determinadas a partir dos resultados experimentais.

Tabela 5: Valores dos coeficientes k , n e do coeficiente de determinação (R^2)

Mistura	k	n	R^2
AZR Marshall	14.084	4,79	0,95
AZR Superpave	229.465	4,50	0,72
BZR Marshall	9.705	3,73	0,93
BZR Superpave	843.810	6,60	0,95
TZR Marshall	8.705	3,97	0,95
TZR Superpave	67.297	4,66	0,86

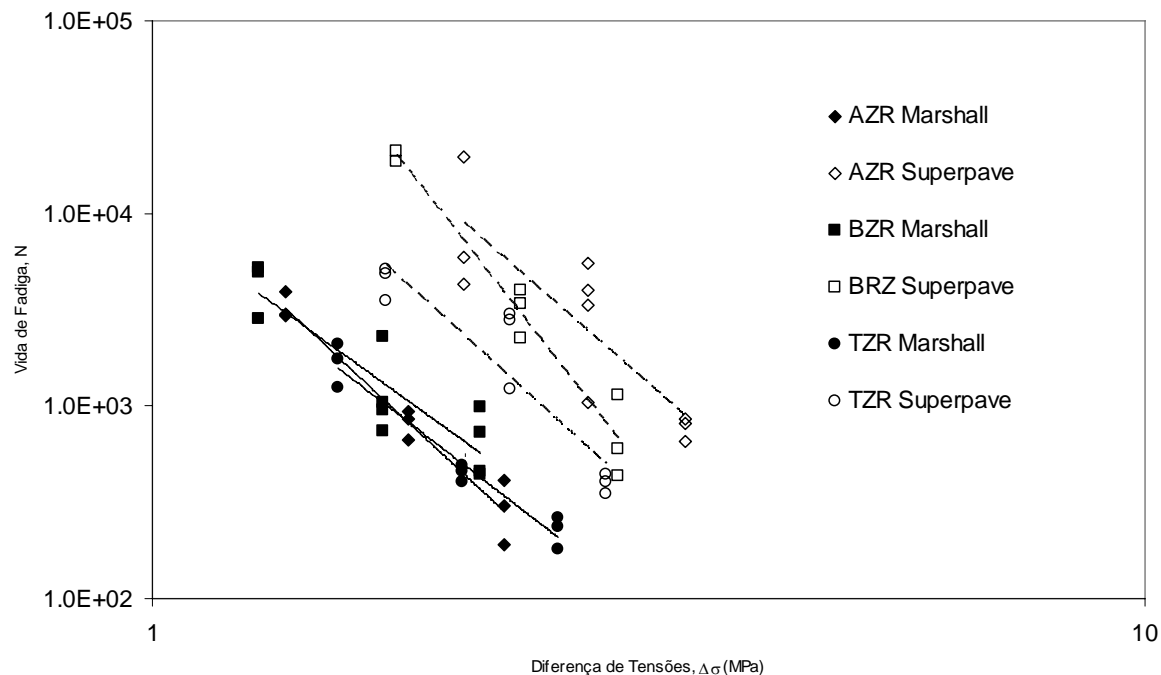


Figura 5: Vida de fadiga versus diferenca de tensão para as seis misturas

O teste de sensibilidade à ação deletéria da água foi realizado seguindo o procedimento descrito em AASHTO T 283. Este procedimento de ensaio foi elaborado baseado no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e um posterior trabalho realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project 10-17) (EPPS *et al.*, 2000; MOURA, 2001). O ensaio tem por objetivo calcular a resistência à tração retida por umidade induzida, que é a razão entre a resistência à tração dos CPs após o ciclo de condicionamento (RT_u) e a resistência à tração sem o ciclo de condicionamento (RT). Os resultados obtidos para as misturas investigadas encontram-se ilustrados na Figura 6.

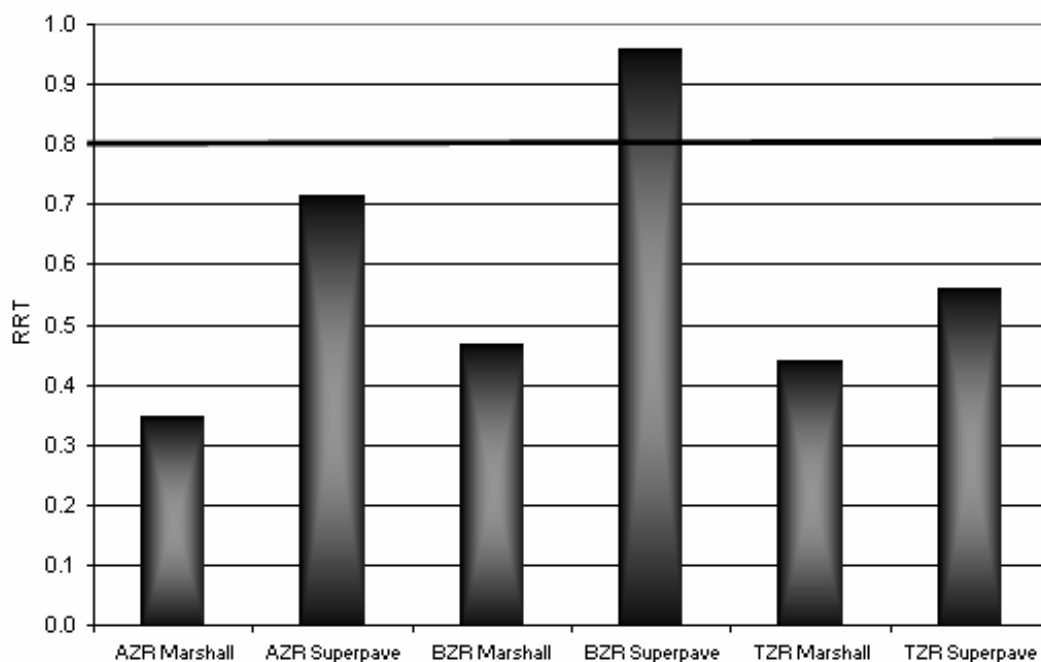


Figura 6: Valores de RRT para as seis misturas

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesse estudo foi possível concluir:

- O maior teor de projeto atribuído às dosagens Marshall é influência do processo de compactação, quando mantidas constantes as outras variáveis;
- A maior dispersão nos parâmetros volumétricos dos CPs resultantes da dosagem Superpave em relação a Marshall, pode ser devido ao fator adotado para correção da densidade aparente durante o procedimento de compactação, que é assumido constante ao longo de todos os giros;
- A resistência à tração das misturas dosadas pela metodologia Marshall apresentaram valores inferiores em relação às misturas dosadas pela metodologia Superpave, o mesmo ocorrendo para os valores de módulo de resiliência. Esses resultados devem-se provavelmente ao envelhecimento de curto prazo sofrido pelas misturas Superpave;
- Foi observada uma tendência de maior vida de fadiga das misturas dosadas pela metodologia Superpave com relação à dosagem Marshall, que pode ser influência da distribuição dos agregados obtida durante o processo de compactação, bem como do envelhecimento de curto prazo;
- A maioria das misturas contínuas apresentou valor de RRT inferiores a 80%, que segundo MOURA (2001) deve ser o limite para que a amostra seja aprovada. As misturas dosadas pela metodologia Superpave, mesmo com valor inferior ao limite de 80%, apresentaram valores maiores que as misturas dosadas pela metodologia Marshall. Esse fato deve-se provavelmente ao maior percentual de ligante nas misturas Superpave, havendo assim uma maior película de asfalto sobre os agregados.

Diante do exposto, observa-se que as misturas dosadas seguindo a metodologia Superpave apresentaram melhores resultados na caracterização mecânica realizada. Uma comparação entre os resultados obtidos em laboratório com resultados de CPs extraídos de campo levariam a conclusões mais realistas do procedimento de dosagem mais adequado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/DET/UFC, e à ANP e ao CNPq pelas respectivas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation – *T 283 – Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*.
- ALDIGUERI, D.R.; SILVEIRA, M.A.; SOARES, J.B. (2001) Estudo Comparativo entre Compactação Manual e Automática de Misturas Asfálticas. 33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, v.I, p. 804 -813.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2000) *D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*.
- BUCHANAN, M.S.; BROWN, E.R. (2001) Effect of Superpave Gyratory Compactor Type on Compacted Hot Mix Asphalt Density. 80º Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC.
- COELHO, V; SÓRIA, M.H.A. (1992) Variabilidade dos Resultados do Método Marshall. 11º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) *ME 43 – Misturas Betuminosas a Quente – ensaio Marshall*.
- EPPI, J.A.; SEBAALY, P.E.; PENARANDA, J.; MAHER, M.R.; McCANN, M.B.; HAND, A.J. (2000) *Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design*. NCHRP Report 444. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

- HAFEZ, I.H.; WITCZAK, M.W. (1995) *Comparison of Marshall and Superpave Level I Mix Design for Asphalt Mixes*. Transportation Research Record, N° 1492, Materials and Construction, Hot-Mix Asphalt Design, Testing, Evaluation and Performance, USA.
- HARMAN, T.; BUKOWSKI, J.R.; MOUTIER, F.; HUBER, G.; McGENNIS, R. (2002) The History and Future Challenges of Gyratory Compaction 1939 to 2001. *81th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- HINRICHSEN, J. (2001) A Comparison of Four Brands of Superpave Gyratory Compactors. *80th Annual Meeting of Transportation Research Board*. Washington, DC.
- JACKSON, N.M.; CZOR, L.J. (2003) 100-mm-Diameter Mold Used with Superpave Gyratory Compactor. *Journal of Materials in Civil Engineering*, USA.
- KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R. (1990) *Comparative Evaluation of 4-inch and 6-inch Diameter Specimens for Testing Large Stone Mixes*. NCAT Rep. N° 90-5, National Center for Asphalt Technology, Auburn.
- McGENNIS, R.B.; ANDERSON, R.M.; PERDOMO, D.; TURNER, P. (1996) *Issues Pertaining to use of Superpave Gyratory Compactor*. Transportation Research Record, N° 1543, Transportation Research Board, Washington, DC, p. 117-125.
- MARQUES, G.L.O. (2004) *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.M.F.; CONSTANTINO, R.S. (1996) *Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas*. Tradução comentada, Rio de Janeiro, RJ.
- MOTTA, L.M.G. (1998) Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas. *14^o Encontro de Asfalto*, IBP, Rio de Janeiro, RJ.
- MOURA, E. (2001) *Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas*. Tese de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP.
- MOURÃO, F.A.L. (2003) *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, R.E.; LEE, D.; KENNEDY, T.W. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA. Maryland, USA.
- ROBERTS, F.L.; MOHAMMAD, L.N.; WANG, L.B. (2002) History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, July/August, American Society of Civil Engineers, 150th Anniversary Paper.
- SOARES, J.B.; FREITAS, F.A.C.; CASTELO BRANCO, J.V.; MOTTA, L.M.G. (2000) Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. *32^a Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Brasília, v. I, p. 148-160.
- VASCONCELOS, K.L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometria*. Dissertação de M.Sc., PETRAN/UFC, Fortaleza, CE.
- WANG, J.N.; KENNEDY, T.W.; McGENNIS, R.B. (2000) Volumetric and Mechanical Performance of Superpave Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, August, USA.
- YILDIRIM, Y.; SOLAIMANIAN, M.; McGENNIS, R.B.; KENNEDY, T.W. (2000) Comparative Analyses of Volumetric Properties for Superpave Gyratory Compactors. *79th Annual Meeting of Transportation Research Board*. Washington, DC.

¹ Texas A&M University
Texas Transportation Institute
Materials & Pavement Division
501 J, CE/TTI building
College Station, TX 77840-3135
email: kamilla@ttimail.tamu.edu

² Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Departamento de Engenharia de Transportes
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703 s/n
Fortaleza, CE 60.455-760
email: jsoares@det.ufc.br