

DOSAGEM DE MISTURA TIPO *LARGE STONE ASPHALT MIXTURE* NO DISTRITO FEDERAL

Igor Amorim Beja
Márcio Muniz de Farias
Universidade de Brasília
Lucas Yuri da Silva Barbosa
Universidade do Distrito Federal

RESUMO

Patologias nos pavimentos são objeto de constante estudo na área de infraestrutura rodoviária e englobam a avaliação dos diversos materiais constituintes das camadas de uma estrutura e suas características no tocante a comportamento mecânico. Nos pavimentos ditos flexíveis, o revestimento constitui-se de mistura asfáltica e esta demanda maior investigação e análise, uma vez que responde pelo maior custo operacional da obra. Alguns tipos de misturas asfálticas foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas surgindo novas tecnologias como *GAP Graded*, *Stone Matrix Asphalt*, *Open Graded* etc, com as devidas aplicações no combate a esforços e melhoria de condições de conforto e segurança. Em meados dos anos 1980 nos Estados Unidos, técnicos estudaram um tipo de mistura, denominada *Large Stone Asphalt Mixture* (LSAM), com intento de diminuir ou até mesmo eliminar os efeitos de afundamentos de trilhas de rodas. Tal tipo de mistura preconiza o uso de tamanhos de agregados de máxima dimensão iguais ou superiores a 25 mm. Pesquisas realizadas mostram que procedimentos de dosagem tradicionais Marshall devem ser adaptados para tais tipos de misturas. Neste contexto, o presente trabalho investiga aspectos relativos à dosagem de mistura LSAM com a metodologia *Superpave* de 25 mm e uma mistura de controle SPV 19 mm. São utilizadas as seguintes rotinas: (i) dosagem Marshall convencional, (ii) dosagem por compactação giratória a 100 giros e, (iii) dosagem por compactação giratória (CCG) a 120 giros. O conceito do *Locking Point* (LP), definido por Vavrck (2000), também foi estudado no contexto das rotinas de dosagem CCG, com o interesse de determinar um número de giros para dosagem em que esta mistura não sofresse densificação adicional. O estudo indica que há maior eficiência na densificação da mistura quando utilizado procedimento de dosagem *Superpave* em comparação com a dosagem Marshall. O LP da mistura LSAM se situou próximo a 100 giros (LP=97), o que pode indicar que dosagens, considerando energias superiores podem resultar em índices volumétricos indesejados.

Palavras chave: *Large Stone Asphalt Mixture*, dosagem Marshall, dosagem *Superpave*.

ABSTRACT

A distress in pavements is the subject of constant study in the road infrastructure area and includes the evaluation of various constituent materials of pavement layers and yours characteristics in relation with mechanical behavior approaches. In the so-called flexible pavements, the surface layer consists of asphalt mix material and demand for further investigation and analysis, since it significantly impacts the operational cost of the infrastructure project. Various types of asphalt mixtures have developed over the last decades, emerging new technologies like *GAP graded*, *Stone Matrix Asphalt*, *Open Graded*, etc. with the appropriate applications to avoid distress, efforts and improvement of safety conditions. In the 1980's on United States technicians studied a type of mixture with the intention of reducing or even eliminating the effects of rutting, called *Large Stone Asphalt Mixture* (LSAM). Such a type of asphalt mixture recommends the use of maximum nominal aggregate sizes equal to or greater than 25 mm. The literature investigated commented that traditional Marshall dosing procedures should be adapted for such types of mixtures. In this context, this work has the interest to investigate aspects of LSAM mixture dosage *Superpave* (SPV) methodology of 25 mm, and a control mixture SPV 19 mm with the following routines: (i) conventional Marshall dosage, (ii) *Superpave* compaction at 100 turns, and (iii) *Superpave* compaction at 120 turns. The study indicates that there is a greater efficiency in the densification of the *Superpave* procedures when compared to the Marshall design procedure. The *Locking Point* (LP) concept as defined by Vavrck (2000) has also been studied with respect to the CCG dosing routines, in the interest of determining a number of turns for dosing in which this mixture did not undergo additional densification. The *Locking Point* (LP) concept as defined by Vavrck (2000) has also been studied with context to the CCG design routines, in the interest of determining a number of turns for dosing in which this mixture did not undergo additional densification. The LP LSAM mixture remained close to 100 revolutions (LP = 97), which may indicate that higher energy dosages turns result's in undesired volumetric parameters.

Key words: *Large Stone Asphalt Mixture*, Marshall dosage, *Superpave* dosage.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil o modal rodoviário é o mais utilizado historicamente e tem sua relevância incrementada devido às sucessivas políticas públicas de fomento, expansão e manutenção da malha viária existente com a administração e aplicação de recursos como Fundo Rodoviário Nacional, o Fundo Nacional do Desenvolvimento, CIDE (Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico), e contribuições privadas junto a instituições financeiras e a investimentos do Banco Mundial. A malha viária passou a ser mais solicitada e desgastada gerando a necessidade de programas de intervenção e recuperação com maior intensidade e menor intervalo de tempo, ao passo que novos estudos sobre patologias e o comportamento dos materiais necessitam de investigação. Segundo dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2017) a malha viária nacional foi aperfeiçoada na última década, porém ainda há gargalos a serem equacionados, como o nível de investimentos por ano, políticas de regulação punitivas quanto à carga circulante, correção de geometria de rodovias com mais de 50 anos, entre outras medidas.

Misturas asfálticas têm sido comumente utilizadas como camadas de revestimento asfáltico para rolamento de veículos desde os anos 1880, com o emprego ainda incipiente de misturas do tipo areia asfalto sob a patente americana da companhia *Barber Asphalt* (Leahy; McGennis, 1999). O primeiro procedimento de dosagem formal que se têm conhecimento nos Estados Unidos foi o intitulado *Hubbard-Field*, inicialmente desenvolvido para a dosagem de misturas areias asfalto e posteriormente modificado para misturas com agregados graúdos. Já em 1927 o antigo *California Division of Highways* estabeleceu um procedimento de dosagem de misturas entre agregados e emulsões a frio que postulava a dependência no estabelecimento do teor de ligante ótimo em função da superfície específica da mistura de agregados (Roberts *et al.*, 2002; Roberts *et al.*, 1996). Na França, uma proposta similar na obtenção de teores de ligante para misturas a quente foi desenvolvida pelo engenheiro Marius Duriez do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) em meados dos anos 1950. Esta se baseia no conceito do módulo de riqueza e na influência da superfície específica da mistura de agregados para proposição do teor ótimo de ligante (LCP, 2007; Moura, 2010).

Mais tradicionalmente difundido no mundo, o método Marshall por sua vez resulta da tentativa dos engenheiros do *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE) em reproduzir no laboratório corpos de prova com mesmas densidades estabelecidas em campo, considerando o efeito da distribuição de pressões dos aeródromos da época da II Guerra Mundial (Leahy; McGennis, 1999; Roberts *et al.*, 2002). Em meados dos anos 1980, foi conduzido nos Estados Unidos o programa de pesquisas rodoviárias SHRP com o interesse de promover um aperfeiçoamento na previsibilidade de desempenho mecânico e climático das misturas asfálticas em longo prazo. O objetivo central foi identificar e definir melhores procedimentos de ensaios, rotinas e especificações para estudo das propriedades dos ligantes, agregados e misturas asfálticas. Como resultado surgiu uma nova metodologia de dosagem e ensaios de desempenho mecânico, intitulada metodologia *Superpave* (*SUPERior PERforming asphalt PAVements*) (Bernucci *et al.*, 2006; Roberts *et al.*, 1996). Uma das principais mudanças decorreu do processo de compactação das misturas em laboratório, sendo atualmente compactadas via uso do compactador de cisalhamento giratório (CCG), sob condições de carregamento e pressão que se assemelham ao campo.

Por outro lado, a evolução dos tipos de misturas asfálticas também ocorreu a contento, surgindo novas tecnologias no âmbito de mudanças granulométricas (aberta, densa ou descontínua), bem como os materiais que envolvem a confecção da mistura asfáltica em si (melhoradores de adesividade, ligantes com uso de polímeros, etc). Nos anos de 1980 nos EUA, em função das novas cargas circulantes, a exemplo dos caminhões com pneus *supersingles*, surgiram pesquisas com as misturas do tipo *Large Stone Asphalt Mixture* (LSAM) que combatessem as patologias geradas por tais tipos de cargas, principalmente deformação permanente acumulada. Kandhal (1990) comenta que a maioria dos técnicos e especialistas em tecnologias das misturas asfálticas à época creditavam a mudança significativa da granulometria da mistura de agregados (como tamanho, forma, e graduação) como primeiro efeito promotor de benefícios a combate de esforços. As misturas LSAM segundo este, consiste em mistura asfáltica com tamanho nominal máximo do agregado igual ou superior a 25 mm, ou uma polegada.

Grande parte destas misturas é aplicável a bases betuminosas, ou como camadas de ligação (*binder*) de pavimentos flexíveis. Historicamente, a sua aplicação faz menção de utilização de asfaltos convencionais de alta ou baixa viscosidade, com empregos de CAP 20, CAP 40/50 ou CAP 80/100. Em geral, tais tipos de misturas conduzem a teores de asfalto menores que as misturas convencionais utilizadas para a mesma aplicação (de 2,5 – 4% de ligante), o que acarreta em diminuição de custos. Por outro lado, há evidências de problemas ao recobrimento da superfície do agregado, trabalhabilidade da mistura e a possibilidade de segregação no campo, necessitando de maior controle operacional da mesma quando produzida e executada. Há a necessidade também do aumento da espessura da camada final executada, para acurácia do processo executivo (Hingley *et al.*, 1976; Mahboub e Williams, 1990; Newcomb *et al.*, 1993). Zaniwski e Nallamothu (2003) estudaram misturas LSAM com alguns tipos de ligantes e comentam que a deformação permanente é o parâmetro mecânico fundamental a ser caracterizado.

No Brasil, os revestimentos flexíveis empregam camadas betuminosas de ligação do tipo faixa B do DNIT, ou equivalente a misturas *Superpave* com agregados de até no máximo 19 mm de dimensão. Estas misturas têm demonstrado insucesso como soluções de engenharia rodoviária, principalmente no combate a deformações permanentes quando há um tráfego canalizado com baixa velocidade de fluxo (caso dos corredores e terminais de parada de ônibus), bem como em traçados geométricos onde há existência de rampas e contra rampas elevadas. Neste sentido, as misturas LSAM podem ser uma alternativa de solução de projetos com tais características, a depender do traçado, e das condições de volume e canalização do tráfego no combate a esforços de deformações acumuladas.

Com base neste tipo de mistura, o presente artigo aborda as principais características de dosagem de uma mistura LSAM SPV 25 mm em comparação com uma mistura de controle SPV 19 mm, ambas aplicáveis como camada de ligação, oriunda do Distrito Federal. Foram selecionados os procedimentos de dosagem convencional Marshall, e o processo de dosagem utilizando o compactador por cisalhamento giratório (CCG). Por fim, foi investigada a condição de densificação das misturas mediante o conceito do *Locking Point* (Vavrick, 2000) com o interesse de detectar a energia necessária para aferição das características volumétricas de dosagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceituação de misturas LSAM

Misturas asfálticas são definidas por características específicas, como tamanho dos agregados, tipo e insumos utilizados, perfil granulométrico, e espectro de cargas aplicadas sobre estas. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) define as misturas quanto ao comportamento granulométrico, a exemplo das especificações ES-031 e ES-385 (DNIT, 2006; DNER, 1999) que versam sobre os concretos asfálticos convencionais e concretos asfálticos com uso de polímero, respectivamente. A Tabela 1 apresenta o resumo das granulometrias para uso em concreto asfáltico convencional e modificado por polímero no Brasil.

Tabela 1: Faixas granulométricas ES-031 e ES-385

Abertura (mm)	Concreto asfáltico convencional (Faixas)			Concreto asfáltico com polímero (Faixas)		
	A	B	C	A	B	C
50,8	100	-	-	100	-	-
38,1	95 - 100	100	-	95 - 100	100	-
25,4	75 - 100	95 - 100	-	75 - 100	95 - 100	-
19,1	60 - 90	80 - 100	100	60 - 90	80 - 100	100
12,7	-	-	80 - 100	-	-	85 - 100
9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	35 - 65	45 - 80	75 - 100
4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	25 - 50	28 - 60	50 - 85
2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	20 - 40	20 - 45	30 - 75
0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	10 - 30	10 - 32	15 - 40
0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	5 - 20	8 - 20	8 - 30
0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	1 - 8	3 - 8	5 - 10
TM (mm)	50,8	38,1	19,1	50,8	38,1	19,1
TMN (mm)	38,1	25,4	-	38,1	25,4	-

em que TM: Tamanho Máximo;
TMN: Tamanho Máximo Nominal.

No Brasil, é típico o uso de misturas faixa C para a pavimentação urbana como camada de revestimento. No entanto, do ponto de vista granulométrico e de tamanho máximo do agregado esta não é classificada como uma mistura LSAM, tendo em vista possuir partículas na mistura com dimensões inferiores a 25 mm. A faixa A e a faixa B podem ser elencadas como misturas LSAM, uma vez que podem assumir agregados de grandes dimensões em suas composições, principalmente nos limites inferiores das especificações.

No início dos anos 1960, a *Federal Highway Administration* (FHWA) introduziu o conceito de ábaco de graduação de agregados, baseado nos estudos de curvas granulométricas de máxima densidade. Decorre deste conceito a definição de parâmetros que designam os tipos de misturas nos Estados Unidos, principalmente as misturas desenvolvidas pela metodologia *Superpave* e o Instituto de Asfalto norte americano (Roberts *et al.*, 1996). Basicamente, estas são definidas quanto ao tamanho máximo (TM), e ao tamanho máximo nominal (TMN). Segundo a ASTM C125, ambos podem ser definidos como:

- Tamanho máximo: designado como a menor abertura de malha de peneira em que passam 100% das partículas ensaiadas por peneiramento.

- Tamanho máximo nominal: designada como a maior abertura de malha de peneira em que há retenção de agregados, mas não mais que 10%.

Com base nas definições acima, as últimas linhas da Tabela 1 mostram os valores de TM e TMN de algumas misturas brasileiras. As classificações *Superpave* designam o tipo de mistura asfáltica densa conforme a peneira de tamanho máximo nominal em SPV 9,5 mm, SPV 12,5 mm, SPV 19 mm, SPV 25 mm, e SPV 37 mm. Na França pesquisadores relatam o uso de mistura com característica parecida ao LSAM comumente conhecida como *Grave Bitume*, empregadas como camada de base e *binder* em pavimentos flexíveis (Hingley *et al.*, 1976). Possuem baixo teor de ligante quando dosadas e graduação granulométrica densa ou contínua com TMN igual ou superior a uma polegada.

As misturas passaram a serem dosadas com uso de compactação giratória, similar ao compactador do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (USACE) de Vicksburg, reduzindo o conteúdo de asfalto dosado, aumentando a proporção de agregado graúdo na mistura, a quantidade de finos (da ordem de 7% em peso), e diminuindo a penetração do ligante (comumente empregando o 40/50). Nos EUA misturas tipo LSAM podem ser elencadas como misturas *Superpave* LSAM SPV 25 mm e SPV 37,5 mm em função da dificuldade de serem dosadas com os moldes convencionais da metodologia Marshall, necessitando o emprego, por exemplo, da compactação giratória.

2.2 Dosagem de misturas LSAM

O processo de dosagem das misturas asfálticas no laboratório fornece parâmetros e subsídios teóricos para aferição prévia de certas características que este material possa vir a desempenhar no futuro em sua aplicação em serviço. Os parâmetros volumétricos como, volume de vazios ou vazios de ar incorporados à mistura (V_{ar}), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), relação *filler* e ligante, massa específica aparente compactada (G_{mb}) e outros são parâmetros gerais que são considerados no cômputo e análise das dosagens Marshall e *Superpave*.

O volume de vazios, a exemplo, indica diretamente a quantidade de ar incorporado numa mistura a depender da quantidade de ligante asfáltico, temperatura e energia de compactação empregada. Roberts *et al.* (1996) comentam que misturas compactadas em campo de características granulométricas densas, com valores inferiores a 3% em sua volumetria apresentam grande suscetibilidade ao surgimento de trilhas de roda, e que por sua vez, misturas que apresentam volume de vazios acima de 8%, estão mais propensas à percolação de água e ao fenômeno do trincamento por fadiga e dano devido à presença de umidade.

A dosagem Marshall por constituição decorre do processo de compactação por impacto de um soquete padronizado, com 75 golpes por face em corpos de prova cilíndricos de dimensões 63,5 x 100 mm (espessura x diâmetro) e limita a utilização de agregados com TMN de 25,4 mm, o que é verificado de forma clara no DNER-ME 043/95. Kandhal (1989) comenta que ocorreram adaptações no aparato de dosagem Marshall com o objetivo de utilizar agregados com diâmetro máximo igual ou acima de uma polegada (LSAM). Newcomb *et al.* (1993) e Mahboub (1990) por sua vez, reportam que no departamento de transportes de Kentucky o método Marhsall adaptado foi o escolhido para dosagem das misturas. Por outro lado, com o surgimento da metodologia *Superpave* e emprego do CCG, possibilitou-se a utilização de

agregados de maiores dimensões com certa facilidade, uma vez que as dimensões dos testemunhos podem ser de 100 ou 150 mm de diâmetro de espessura, sendo facilmente aplicável a misturas com agregados de grandes dimensões, a exemplo do LSAM. A metodologia *Superpave* emprega três níveis de densificação no CCG em função do nível de uso da via e características de tráfego conforme Tabela 2 abaixo (AI, 2001).

Tabela 2: Número de giros em função

N _{ESAL} (Milhões)	Parâmetros de compactação em função do tráfego			Características do tráfego
	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	
< 0,3	6	50	75	Rodovias vicinais, baixo volume de tráfego
0,3 a < 3	7	75	115	Rodovias coletoras, médio volume de tráfego
3 a < 30	8	100	160	Rodovias estaduais e municipais, volume meio pesado de tráfego
> 30	9	125	205	Rodovias federais e interestaduais com alto volume de tráfego

em que N_{ESAL}: Número de solicitações por eixo padrão com 8,2 toneladas e 80 lb/pol² de pressão nos pneus;
 N_{ini}: Número de giros iniciais;
 N_{des}: Número de giros de projeto;
 N_{max}: Número de giros máximo.

Segundo Roberts *et al.* (1996) as misturas no N_{ini} devem possuir no mínimo 11% de vazios (ato inicial de compactação das misturas em campo), no N_{des} devem ter 4% de vazios (processo de densificação final decorrente da compactação), e 2% de vazios no N_{max} (final da vida útil do da camada, menor índice de vazios). Por outro lado, quando o VAM é baixo, além dos limites especificados pelo manual (Tabela 3), não há adequada formação de filme de ligante e agregado, que pode proporcionar misturas suscetíveis à percolação de água e ao dano por umidade (Nascimento, 2008). Segundo o *Asphalt Institute* (AI, 2001) estes limites para misturas de características *Superpave* devem ser admitidos conforme Tabela 3.

Tabela 3: Recomendações para enquadramento dos parâmetros volumétricos de dosagem *Superpave* (AI, 2001)

N _{ESAL} (Milhões)	% da Gmm requerida			Vazios no agregado mineral (%) mínimo					Relação Betume Vazios (%)	Relação filler/betume
	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	Tamanho máximo nominal (TMN), mm						
				37,5	25,0	19,0	12,5	9,5		
< 0,3	≤ 91,5	-	-	-	-	-	-	-	70 - 80	
0,3 a <3	≤ 90,5								65 - 78	
3 a <10										0,6 - 1,2
10 a <30	≤ 89,0	96	≤ 98	11	12	13	14	15	65 - 75	
	≥ 30									

2.3 O conceito *Locking Point*

O processo de densificação de misturas com uso do compactador giratório não coleta às informações relativas ao aumento da resistência ao cisalhamento a cada giro aplicado na dosagem, porém descreve a redução de altura a cada número de giro, que pode ser utilizado para previsão das características de densificação de misturas e o desenvolvimento do intertravamento do esqueleto mineral. O conceito de *Locking Point* (LP) ou ponto de

travamento foi originalmente desenvolvido por William J. Pine em trabalhos realizados no Departamento de Transportes de Illinois e consiste na definição de uma máxima densidade aparente do testemunho durante o processo de construção da curva compactação com o CCG, %Gmm vs. altura do corpo de prova. Neste processo, é definido um número de giro ideal para o travamento mineral da mistura. Conceitualmente Vavrck (2000) define como sendo o primeiro giro de uma sequência de três giros sem alteração da altura, precedido de duas sequências de dois giros sem alteração da altura (Figura 1).

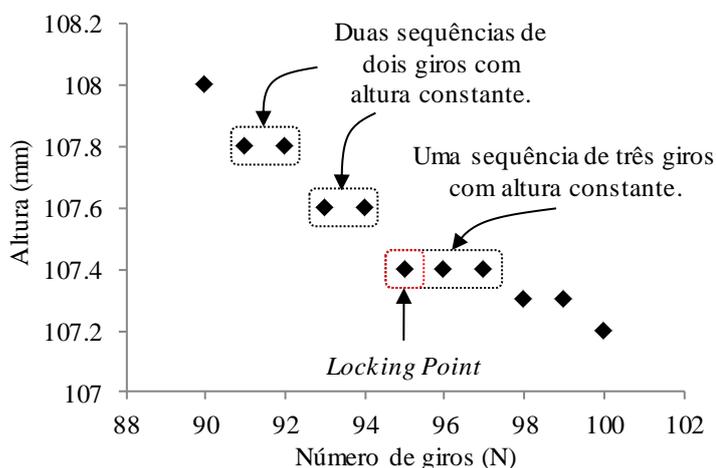


Figura 1: Caracterização do *Locking Point* mediante a observação da redução da altura pelo número de giros

Segundo Vavrck (2000), giros adicionais à mistura após o LP podem propiciar a quebra do agregado mineral utilizado na dosagem, o que acarretaria em densidades aparentes maiores, menores vazios de ar incorporado e consequentemente parâmetros volumétricos de dosagem superestimados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os agregados utilizados para o experimento são de origem calcária, oriundos do Distrito Federal, e foram caracterizados conforme especificações correntes (Tabela 4) para uso em misturas asfálticas que atendessem a rotina de dosagem do *Superpave* (AI, 2001).

Tabela 4: Recomendações *Superpave* para certificação dos agregados para dosagem de misturas asfálticas

Parâmetros avaliados	Valores médios	Limites segundo AI	Normas
Forma da partícula 1:3, % de along. e lamelares	34,5	< 10	ASTM D4791 (2010)
Forma da partícula 1:5, % de along. e lamelares	2,4	< 10	ASTM D4791 (2010)
Desgaste Los Angeles, %	18	< 45	ASTM C131 (2014)
Sanidade, após 5 ciclos %	0,01	< 12	AASHTO T 104 (2011)
Equivalente de areia, %	70,8	> 50	AASHTO T 176 (2008)
Deteção de argilas reativas pelo método do azul de metileno, mg/g	2	≤ 6	AASHTO T 330 (2011)
Carga pontual de partícula, $I_s(50)$ N/mm ²	0,8	-	ASTM 5731 (2016)

O ligante utilizado é proveniente da REGAP (Refinaria Gabriel Passos, em Betim-MG) adquirido na empresa Centro Oeste Asfaltos e de características físicas convencionais, classificado como 30/45. Este foi caracterizado conforme as especificações de dosagem de

misturas asfálticas norte americanas (Tabela 5).

Tabela 5: Caracterização física do ligante 30/45

Parâmetros avaliados	Valores médios	Limites por Norma	Normas
Ductilidade a 25°C, cm	95	≥ 60	ASTM D113 (2017)
Viscosidade Brookfield - cP a 135 °C	455	≥ 374	
Viscosidade Brookfield - cP a 150 °C	229	≥ 203	ASTM D4402 (2015)
Viscosidade Brookfield - cP a 177 °C	83	76 – 285	
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1 mm	44	30 – 45	ASTM D5/D5M (2013)
Ponto de Amolecimento, °C	58	≥ 52	ASTM D36/D36M (2014)
Ponto de fulgor, °C	315	≥ 235	ASTM D92 (2016)
Densidade real (20°C), g/cm ³	1,004	-	NBR 6296 (2004)

O procedimento de dosagem da mistura LSAM SPV 25 mm e de controle SPV 19 mm foi realizado no Infralab UnB adotando os seguintes processos: (i) definição da curva granulométrica de projeto, (ii) dosagem Marshall, (iii) dosagem CCG com 100 giros, (iv) dosagem CCG com 120 giros. Nas compactações por cisalhamento giratório, todas as amostras foram preparadas no molde com diâmetro de 150 mm. Por fim, em ambos os procedimentos, foram plotados gráficos dos parâmetros volumétricos de dosagem médios (V_{ar} , VAM , RBV e G_{mb}) em função dos teores de projeto. Abaixo, a Figura 2 apresenta-se a curva granulométrica da mistura LSAM SPV 25 mm e da mistura de controle, comparadas às especificações nacionais.

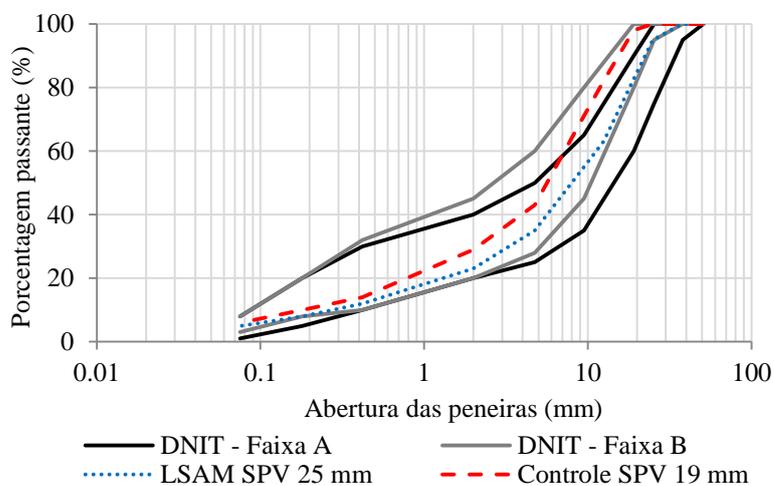


Figura 2: Curva granulométrica adotada para dosagem das misturas

Para a dosagem Marshall, foram dosados três os corpos de prova por teor, compactados com 75 golpes por face em molde de 100 mm de diâmetro, sendo para cada teor, estimada a massa específica aparente máxima da mistura G_{mm} . O cálculo dos parâmetros volumétricos de dosagem como vazios de ar (V_{ar}), vazios do agregado mineral (VAM), e relação betume vazios (RBV), foram estabelecidos segundo a especificação D6926 (ASTM, 2016). A dosagem *Superpave* foi conduzida para dois testemunhos conforme recomendam os manuais do *Asphalt Institute* (AI, 2001), sendo os parâmetros volumétricos de dosagem interpretados conforme as características de compactação do processo de compactação por cisalhamento

giratório. O compactador da marca Troxler foi utilizado para tal procedimento, com 600 kPa de pressão de contato e ângulo de giro equivalente a 1,25°. A mistura de controle SPV 19 mm ainda foi novamente dosada, de maneira a verificar os efeitos dos aspectos volumétricos, em função do *Locking Point* desta mistura ter atingido aproximadamente 90 giros.

4. RESULTADOS

Para todas as amostras foram avaliadas as propriedades considerando parâmetros da estatística descritiva, como: (i) médias (X), (ii) desvios padrões (σ), (iii) e coeficiente de variação (CV). Em todos os casos, os CV foram inferiores a 30%. A Figura 3 e a Figura 4 abaixo apresentam o resumo de resultados médios dos parâmetros volumétricos V_{ar} e VAM em função do teor de ligante. A Tabela 6 apresenta o resumo de resultados das dosagens realizadas.

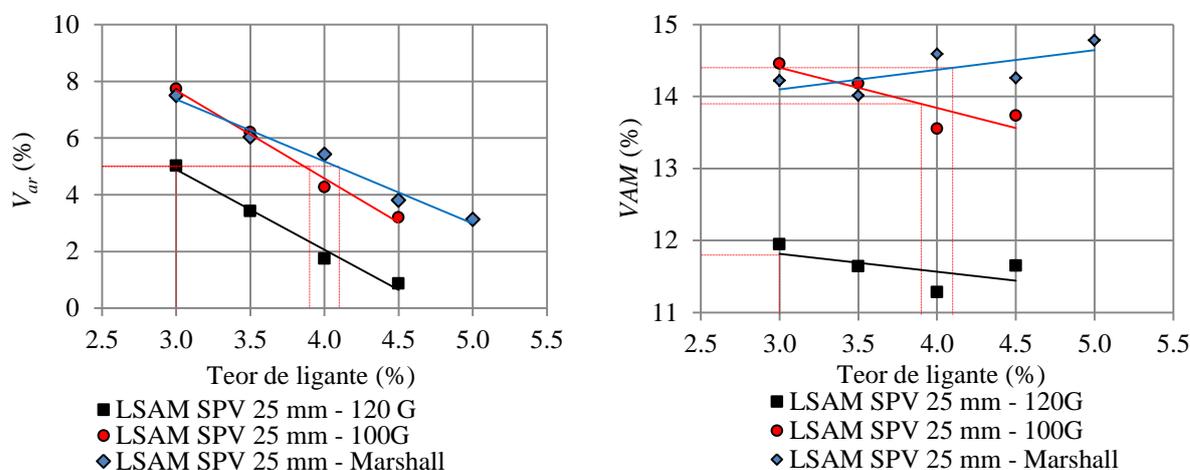


Figura 3: V_{ar} vs. teor e VAM vs. teor mistura LSAM SPV 25 mm

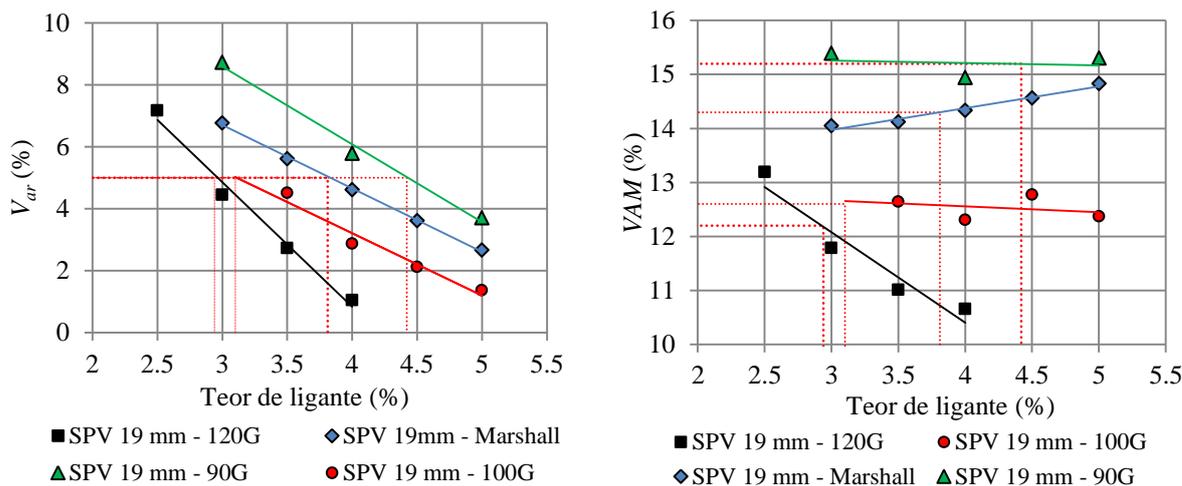


Figura 4: V_{ar} vs. teor e VAM vs. teor mistura de controle SPV 19 mm

Tabela 6: Parâmetros volumétricos de dosagem LSAM SPV 25 mm e SPV 19 mm para 5% de V_{ar}

Dosagem	LSAM SPV 25 mm			Controle SPV 19 mm		
	Teor de projeto (%)	VAM (%)	RBV (%)	Teor de projeto (%)	VAM (%)	RBV (%)
Marshall	4,1	14,4	65,5	3,8	14,3	65,0
CCG 100 giros	3,9	13,9	65,5	3,5	12,7	58,0
CCG 120 giros	3,0	11,8	58,0	2,9	12,2	59,0
CCG 90 giros	-	-	-	4,4	15,2	67,5
Limites AI, 2001	-	> 12	65 - 75	-	> 13	65 - 75

O objetivo dos vários procedimentos de compactação em laboratório é definir um teor de projeto adequado, para que as misturas dosadas sejam trabalháveis quando lançadas em campo, assim como resistentes aos carregamentos e intempéries a que estarão sujeitas em serviço. O processo de compactação em laboratório influencia os parâmetros volumétricos de dosagem, sendo que misturas compactadas com CCG geralmente resultam em menores volumes de vazios se comparadas às obtidas no compactador Marshall. A dosagem da mistura LSAM apresentou teor de projeto maior que a mistura de controle, sendo tal fato não esperado, tendo em vista que, segundo o conceito de Duriez, a mistura que apresenta maior superfície específica deve possuir o maior conteúdo de asfalto. Talvez um valor diferente de módulo de riqueza deve ser aplicado a misturas de maior tamanho nominal.

Percebe-se ainda que a dosagem a 120 giros para mistura LSAM apresentou *VAM* e *RBV* inferiores ao recomendado, bem como a dosagem da mistura de controle apresentou deficiências quanto aos mesmos parâmetros em ambas as energias. Isto pode estar associado a uma energia de compactação excessiva aplicada à mistura, o que afeta consequentemente os parâmetros volumétricos de dosagem. Watson *et al.* (2008) comentam que a NCHRP no projeto 9-9 recomendou refinar o N_{des} uma vez que este poderia resultar em energia de compactação excessiva para as misturas, gerando dificuldades de compactação em campo.

Decorre de tal fato que as densidades aparentes de campo poderiam ser encontradas com menores números de giros. Portanto, ao se avaliar o conceito de *Locking Point* por Vavrick (2000) para cada corpo de prova da dosagem, percebe-se que em média a mistura LSAM atinge a densificação máxima à aproximadamente 100 giros (LP=97 em média). A mistura de controle apresentou um LP médio de 90 giros, o que pode indicar que a mistura quando compactada nas condições iniciais (100 e 120 giros) densificou em demasia, podendo ter ocorrido a quebra de agregados, propiciando a redução do V_{ar} e a por consequência, menor teor de projeto (Tabela 7).

Neste contexto, justificou-se uma nova dosagem a 90 giros de energia para mistura de controle SPV 19 mm, em que fica evidente o reenquadramento do *VAM* e *RBV* nos parâmetros da especificação, bem como um maior teor de projeto quando comparada à mistura LSAM com energia compatível (100 giros) para não geração de densificação adicional. Beja *et al.* (2015) comentam sobre tal característica e a importância em se considerar o efeito do LP nas dosagens, demonstrando que uma mistura LSAM com agregados de natureza granítica e basáltica, dosadas com CAP 30/45, atingiram LP de 90 giros aproximadamente.

Tabela 7: Resumo de resultados de *Locking Point* de ambas as misturas avaliadas

Teores (%)	LSAM SPV 25 mm				SPV 19 mm			
	100 giros		120 giros		100 giros		120 giros	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
2.5	NE	NE	NE	NE	NE	NE	90	93
3	-	-	100	104	NE	NE	95	88
3.5	-	93	98	100	-	-	96	100
4	-	-	94	95	97	-	99	94
4.5	-	-	86	99	89	85	NE	NE
5	NE	NE	NE	NE	74	87	NE	NE

em que NE: Não ensaiado;
- : Não obteve *Locking Point*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compactação CCG resulta em teores de projeto menores que os teores da compactação Marshall tradicional. O procedimento de dosagem Marshall apresentou-se compatível com os critérios de dosagem, porém, as dimensões dos moldes Marshall, quando comparadas aos moldes da dosagem CCG propiciam menor espaço para acomodação das partículas, o que pode acarretar em parâmetros volumétricos enviesados.

No tocante à dosagem CCG, o N_{des} fixado pelo manual *Superpave* pode resultar em supercompactação na dosagem racional de misturas, fato previamente observado por Watson *et al.* (2008), e confirmado na atual pesquisa.

A necessidade da verificação do *Locking Point* para as energias definidas demonstrou-se importante, uma vez que a compactação a 120 giros foi excessiva para mistura LSAM. Para a mistura de controle, as compactações a 100 e 120 giros também geraram densificação adicional da mistura. A repetição da dosagem da mistura de controle, considerando o número de giros igual ao da definição do LP médio permitiu constatar que a volumetria final obtida foi afetada pelo excesso de energia nas dosagens anteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing Materials-ASTM. (2016) D6926. *Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus*. p. 7.
- Asphalt Institute-AI (1989) *The Asphalt Handbook*. Manual Series N° 4 (MS-4). College Park. p. 629.
- Asphalt Institute-AI (2001) *Superpave mix design series n° 2 (SP-2)* Asphalt Institute Research Center, Lexington.
- Beja, I.A.; Florencio, H. A.; Chaves, J. M.; Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. B.; Mascarenhas, Z. (2015). *Large Stone Asphalt Mixture (25mm) - avaliação do procedimento de dosagem*. In: XVIII Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto, 2015, Bariloche. Anais do XVIII Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto. p. 12.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2006) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 1. ed. Rio de Janeiro.
- Confederação Nacional do Transporte-CNT (2017). *Revista CNT Transporte Atual*, Brasil, n°262. p. 84.
- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes-DNIT (2006) ES 031 *Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço*. IPR, Rio de Janeiro, p. 14.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER (1999) ES 385 *Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero*. IPR, Rio de Janeiro, p. 15.

- Hingley, C. E.; Peattie, K. R.; Powell, W. D. (1976) *French experience with grave-bitume a dense bituminous road base*. Report 242. Transport and Road Research Laboratory (TRRL), p. 10.
- Leahy, R. B.; McGennis, R. B. (1999). *Asphalt mixes: materials, design and characterization*. 75th Anniversary Volume of the Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists. Illinois, USA, Volume 68A. p. 70 – 127
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2007) *Manuel LCP d'aide à la formulation des enrobés*. Groupe de travail RST "Formulation des enrobés". Paris, p. 199.
- Kandhal, P. S. (1989) *Testing and evaluation of Large Stone Mixes using Marshall mix design procedures*. NCAT Report 89-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn, p. 50.
- Kandhal, P. S. (1990) *Large Stone Asphalt Mixes: design and construction*. NCAT Report 90-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn, p. 38.
- Mahboub, K. (1990) *Large-Stone Mixes for reducing rutting*. Report 90-12. Kentucky Transportation Center, University of Kentucky. p. 30.
- Mahboub, K.; Williams, E. G. (1990) *Construction of Large-Stone Asphalt Mixes (LSAMs) in Kentucky*. Transportation Research Record 1282. p. 41 – 44.
- Moura, E. (2010) *Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 299.
- Nascimento, L. A. H. (2008) *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 204.
- Newcomb, D. E.; Wei, Z.; Gardiner, M. S. (1993) *Investigation of Large Stone Mixtures*. Report Number 94-09. Minesota Department of Transportation, St. Paul, p. 107.
- Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D.; Kennedy, T. W. (1996) *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. National Asphalt Pavement Association Education Foundation 2 ED Maryland, p. 585.
- 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, Vol. 14, No. 4, p. 279 – 293.
- Vavrik, W. R. (2000) *Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock*. Thesis (Doctor of Philosophy) – Civil Engineering in The Graduate College of University of Illinois at Urbana-Champaign. p. 189
- Zaniewski, J. P.; Nallamothu, S.H. *Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance*. Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, 2003.
- Watson, D. E.; Moore, J.; Heartsill, J.; Jared, D.; Wu, P. (2008) *Verification of Superpave Number of Design Gyration Compaction Levels for Georgia*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, p. 75 – 82.