

# ESTUDO DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO E DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

**Manuela de Mesquita Lopes**

**Mariana Linhares**

**Kamilla Lima Vasconcelos**

**Liedi Légi Bariani Bernucci**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

**José Mario Chaves**

Grupo OHL Brasi

## RESUMO

No presente estudo três misturas asfálticas foram produzidas variando-se o Tamanho Máximo Nominal (TMN) das mesmas: SPV 9,5mm, SPV 12,5mm e SPV 19,0mm. Tais misturas foram compactadas no simulador giratório Superpave e em seguida foram submetidas ao ensaio de deformação permanente em simulador de tráfego de laboratório. Os índices de densificação (CDI e  $TDI_m$ ), obtidos a partir das curvas produzidas pelo compactador Superpave, foram utilizados para comparar com os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente. Não foram observadas fortes correlações entre os índices CDI,  $TDI_m$  e deformação permanente com o tamanho máximo nominal das misturas estudadas. Concluiu-se que o  $TDI_m$  se correlacionou com a inclinação da reta de deformação permanente e com o valor de deformação final nos 30.000 ciclos.

**Palavra-Chave:** Misturas Asfálticas, Superpave, Densificação e Deformação Permanente.

## ABSTRACT

In this study three asphalt mixtures with different Nominal Maximum Aggregate Size: 9.5mm SPV, SPV 12.5 mm and 19.0 mm were produced. The mixtures were compacted using the Superpave Gyrotory Compactor (SGC) and also subjected to the permanent deformation traffic simulator in laboratory. The rates of densification were determined through the Compaction Densification Index (CDI) and the Modified Traffic Densification Index ( $TDI_m$ ), obtained from the curves produced by the Superpave compactor. The indexes were used to compare the results of permanent deformation in the traffic simulator. From the results obtained, there were no strong correlations among CDI,  $TDI_m$  and permanent deformation, with the three nominal maximum aggregate sizes studied. It was concluded that the  $TDI_m$  correlated with the slope of the permanent deformation and with the value of final deformation after 30,000 cycles.

**Palavra-Chave:** Asphalt Mixtures, Superpave, Densification e Permanent Deformation.

## 1. INTRODUÇÃO

A deformação permanente em trilha de roda é um dos mais importantes defeitos de um pavimento, pois este provoca a degradação acelerada da estrutura do pavimento, além de reduzir a segurança do usuário. Este defeito costuma se manifestar de maneira precoce, comprometendo a serventia dos pavimentos em poucas semanas após a abertura para o tráfego. Uma das formas de se combater este tipo de defeito é a partir da escolha de um método de dosagem de misturas asfálticas que tenha como objetivo melhorar a qualidade e a durabilidade dos revestimentos.

A tecnologia de dosagem Superpave tem sido bastante utilizada e seu uso tem aumentado devido às vantagens que ela apresenta em relação ao método Marshall, que ainda é o mais utilizado no Brasil. No método Superpave, as misturas dosadas são compactadas em

compactador giratório do tipo SGC, onde é possível obter uma curva relacionando o aumento da densidade aparente da mistura com o número de giros do compactador, conhecidas como curvas de compactação. A partir dessa curva é possível obter os índices *Construction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI), que podem ser utilizados para prever a trabalhabilidade da mistura e a resistência da mesma à deformação permanente, respectivamente (Mahmoud e Bahia, 2004).

No presente estudo, os índices obtidos das curvas de compactação foram usados como indicadores da trabalhabilidade e da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Foram analisados três tipos de misturas asfálticas variando-se o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados: Superpave (SPV) 9,5mm; SPV 12,5mm e SPV 19,0mm. A variável escolhida para a determinação da resistência à deformação permanente foi o afundamento de trilha de roda obtido por meio do ensaio no simulador de tráfego de laboratório francês do tipo LCPC.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Deformação Permanente**

A deformação permanente é um dos principais defeitos encontrados nos pavimentos com revestimento asfáltico no Brasil, que podem refletir falhas na mistura asfáltica, ou mesmo no projeto estrutural do pavimento. A análise laboratorial da deformação permanente é fundamental para a avaliação do desempenho de uma mistura em campo. O afundamento da trilha de roda é o tipo de deformação permanente mais frequente. Ele é causado pela consolidação e o movimento lateral dos materiais componentes do pavimento, devido à carga de tráfego, em qualquer uma das camadas do pavimento. Em geral, a deformação permanente nos pavimentos flexíveis depende de três características da mistura: agregados, ligante e índice de vazios (Xiao *et al.*, 2010).

A análise laboratorial da deformação permanente pode ser feita através de diversos ensaios, sendo eles: o *creep* dinâmico; simulação de tráfego em laboratório; simulação de tráfego em escala real. O ensaio de *creep* dinâmico é um ensaio em que uma carga uniaxial de compressão é aplicada sobre o corpo de prova de forma cíclica, e a partir dele pode ser obtido o *flow number* da mistura. Os simuladores de tráfego, tanto em laboratório como em escala real, submetem a superfície da mistura à passagem de cargas repetidas, simulando uma situação próxima a encontrada em campo. Neste trabalho foram realizados ensaios com simulador de tráfego em laboratório do tipo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) a partir dos quais foram obtidos os resultados da deformação permanente para as misturas. Nesse simulador são utilizadas placas retangulares que são submetidas a ciclos de carga e a variação de sua altura é analisada em função do número de ciclos a que ela foi submetida.

### **2.2. Compactador Giratório**

O compactador giratório Superpave (do inglês *Superpave Gyratory Compactor* – SGC) é uma modificação do compactador giratório do Texas para o uso dos princípios franceses de compactação giratória. Esta modificação foi realizada visando à redução no ângulo de compactação e na velocidade de rotação, além de permitir o acompanhamento em tempo real das alturas das amostras durante o processo de compactação. O SGC possui uma

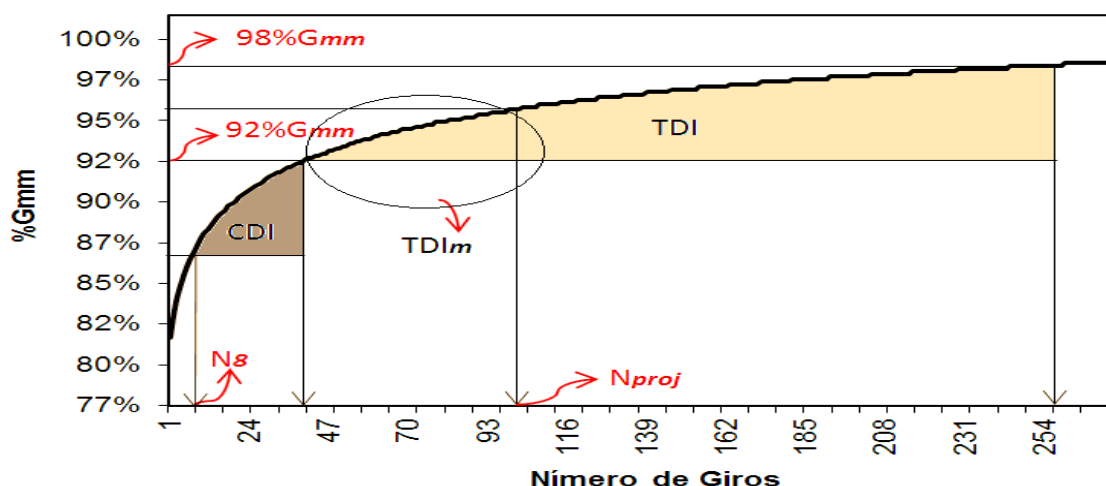
estrutura de reação constituída por um pórtico não deformável. A base do SGC está fixada nesta estrutura, de maneira a suportar o molde e permitir o seu giro. Durante o processo de compactação, a cabeça de carga aplica esforços de compressão no corpo de prova (CP), que possui diâmetro que corresponde nominalmente ao diâmetro interno do molde (100 ou 150 mm).

A escolha do número de giros (N) para a confecção dos CPs Superpave é feita em função do tráfego e variam conforme ilustrado na Tabela 1, onde se podem verificar os valores de número de giros inicial ( $N_{\text{inicial}}$ ), de projeto ( $N_{\text{projeto}}$ ) e máximo ( $N_{\text{máximo}}$ ) para diferentes volumes de tráfego. Os esforços de compactação em  $N_{\text{inicial}}$  e  $N_{\text{máximo}}$  são usados para avaliar a compactabilidade da mistura, enquanto o  $N_{\text{projeto}}$  é utilizado para selecionar o teor de asfalto (Asphalt Institute, 2001).

**Tabela 1.** Seleção do número de giros para SGC

ESALs Projeto (milhões)	Parâmetros de Compactação			Tráfego
	$N_{\text{inicial}}$	$N_{\text{projeto}}$	$N_{\text{máximo}}$	
< 0,3	6	50	75	Tráfego muito leve (vias locais e vias onde a circulação de caminhões é proibida)
0,3 a < 3	7	75	115	Tráfego médio (vias coletoras)
3 a < 30	8	100	160	Tráfego médio a alto (vias principais, algumas rodovias interestaduais)
$\geq 30$	9	125	205	Tráfego muito elevado (estação de pesagem de caminhão, rodovias interestaduais)

O registro das alturas atingidas pelo CP durante a compactação é uma importante função do SGC. Esta função permite uma estimativa da densificação da mistura asfáltica, que é calculada através dos dados da (i) massa inicial que foi inserida no molde, do (ii) diâmetro interno do molde e da (iii) altura da amostra. As medições das alturas permitem o desenvolvimento das características de compactação da mistura. Em vista disso, Bahia *et al.* (1998) afirmam que o método de dosagem Superpave não considera fatores como a trabalhabilidade da mistura, e mencionam que as informações obtidas no SGC são subutilizadas. Estes autores propuseram o uso de dois índices: *Compaction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI), como requisitos para o procedimento de dosagem de misturas asfálticas. Os índices CDI e TDI são determinados a partir das curvas de densificação e representam o comportamento das misturas durante a construção da pista e durante a vida de serviço (Figura 1). Controlando esses índices é esperado que haja uma otimização dos requerimentos de construção e tráfego.



**Figura 1:** CDI, TDI e TDI<sub>m</sub> determinados a partir da curva de compactação Superpave

O CDI é definido como a área abaixo da curva de densificação (Figura 1) obtida com o SGC a partir do giro de número 8 (N<sub>8</sub>) até o ponto equivalente a 92% da densidade máxima medida da mistura (do inglês *maximum specific gravity of the mixture* – Gmm). Este índice é visto como proporcional ao trabalho aplicado durante a compactação pelos rolos compactadores, para que as misturas atinjam a densidade requerida durante a construção. Misturas com elevado valor de CDI requerem uma grande quantidade de energia para densificar durante a compactação (construção). Portanto, valores mais baixos de CDI são desejáveis porque menor quantidade de passadas do rolo compactador seria necessária.

O TDI é a área sob a curva de densificação entre 92 e 98% do valor da Gmm, conforme ilustrado na Figura 1. Este índice baseia-se no princípio de que o pavimento continua sua densificação, mesmo após sua abertura ao tráfego (a princípio com 92% da Gmm), devido às cargas impostas pelos veículos. Misturas com elevado TDI são mais desejáveis, pois se espera que esta requeira uma grande quantidade de energia (alto volume de tráfego) para densificar. O pavimento ideal seria aquele fácil para densificar durante a construção (CDI baixo) e difícil de densificar sob o tráfego (elevado TDI) (Mahmoud e Bahia, 2004; Nascimento, 2008).

Existe ainda o chamado TDI modificado (TDI<sub>m</sub>), adotado por Nascimento (2008), que é calculado de 92% de Gmm até o giro do N<sub>projeto</sub>. O autor utiliza este parâmetro quando os CPs não são compactados até 98% da Gmm, possibilitando o aproveitamento dos corpos de prova moldados até o N<sub>projeto</sub>. Dessa forma, os CPs podem ser submetidos aos ensaios mecânicos de determinação do módulo resiliente e resistência à tração, já no procedimento de dosagem. Caso contrário, com 98% da Gmm estes CPs não estariam adequados para a realização destes ensaios mecânicos corriqueiramente adotados no Brasil (Nascimento, 2008).

Mahmoud e Bahia (2004) desenvolveram, na Universidade de *Wisconsin-Madison*, um dispositivo para ser acoplado ao SCG, a fim de mensurar a resistência da mistura asfáltica aos esforços de compactação. Com este dispositivo, foi possível medir os índices CFI

(*Construction Force Index*) e TFI (*Traffic Force Index*), que foram correlacionados aos índices CDI e TDI e aos resultados de *flow number*. Foram testadas misturas asfálticas com diferentes tipos de agregados, de granulometrias e de teores de ligante. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que o SCG pode fornecer informações importantes a respeito da estabilidade das misturas asfálticas. Os índices TDI e TFI se correlacionaram fortemente com a resistência à deformação permanente.

No Brasil, Nascimento (2008) utilizou diferentes agregados, granulometrias e teores de ligante para a compactação de CPs no SGC. Esses CPs foram submetidos a ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego LCPC Francês. O autor concluiu que os índices de compactação giratória CDI e  $TDI_m$  e o PTA (Ponto de Intertravamento dos Agregados) foram bastante sensíveis ao esqueleto pétreo, da mesma forma que a resistência à deformação permanente. Também foi observada uma forte correlação do CDI com os resultados de deformação permanente no simulador de tráfego. Segundo dados do autor, quanto maior o valor de CDI maior será a resistência da mistura à formação de trilhas de roda. Contudo, devem-se evitar valores de CDI muito elevados, pois este fato pode tornar as misturas pouco trabalháveis, podendo estas ter problemas de compactação em campo.

Em outra pesquisa feita no Brasil, Onofre *et al.* (2011) testou misturas contendo agregados com diferentes características e em diferentes proporções e os índices CDI, TDI e  $TDI_m$  foram utilizados para avaliar a compactabilidade e a resistência à deformação permanente das misturas. Para a avaliação da deformação permanente foi realizado ensaio uniaxial de carga repetida (*creep dinâmico*) e ensaio de afundamento de trilha de roda em simulador de tráfego do tipo LCPC. Além disso, essa pesquisa avaliou também a esfericidade dos agregados utilizados através do processamento digital de imagens (PDI) uma vez que essa característica dos agregados influencia a resistência à deformação permanente das misturas (Onofre *et al.*, 2011). O autor concluiu, a partir da caracterização dos agregados, que misturas contendo agregados de origem granítica possuem uma estrutura mais rígida e por consequência possuem maior resistência à deformação permanente, possivelmente devido ao fato destes agregados serem mais cúbicos do que os outros agregados analisados na pesquisa.

Agregados de forma cúbica proporcionam melhor intertravamento entre os grãos compactados quando comparados a agregados arredondados, resultando em maior resistência ao cisalhamento. Quando uma massa de agregados recebe um carregamento, uma partícula de agregado pode deslizar (ou cisalhar) em relação à outra, o que resulta em deformação permanente. Os agregados arredondados tendem a deslizar uns sobre os outros ao invés de intertravarem (Motta *et al.*, 1996).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Caracterização dos agregados**

Os agregados utilizados no presente trabalho são de origem granítica e são provenientes da pedreira Rudnik. Foram caracterizados com relação aos ensaios de granulometria (OHL T 27); abrasão Los Angeles (ABNT NBR 6465); durabilidade de agregado graúdo (OHL T 104); massa específica e absorção (OHL T 85); massa unitária solta (DNIT ME

152) e massa unitária compactada seca (DNIT ME 153). As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos para na caracterização dos agregados.

**Tabela 2.** Caracterização do agregado graúdo

	Método de ensaio	Brita 3/4"	Pedrisco	
% de Grãos com Relação > (1 : 3)	OHL D 4791	2798,3%	37,1	Máximo 20
% de Grãos com Relação > (1 : 5)	OHL D 4791	618,9%	7,5	Máximo 5
Desgaste Los Angeles (%)	ABNT NBR 6465	1620,1%	20,1	Máximo 40
Durabilidade de Agregado Graúdo (%)	OHL T 104	0,0%	0,0	Máximo 12
Absorção de Água (%)	OHL T 85	46,8%	0,9	Máximo 1,5
Massa Específica Real Seca (g/cm³)	OHL T 85	277,7%	2,732	-
Massa Específica Aparente SSS (g/cm³)	OHL T 85	274,1%	2,668	-
Massa Unitária Solta (g/cm³)	DNIT ME 152	137,5%	1,337	-
Massa Unitária Compactado Seco (g/cm³)	DNIT ME 153	150,8%	1,477	-

**Tabela 3.** Granulometria dos agregados

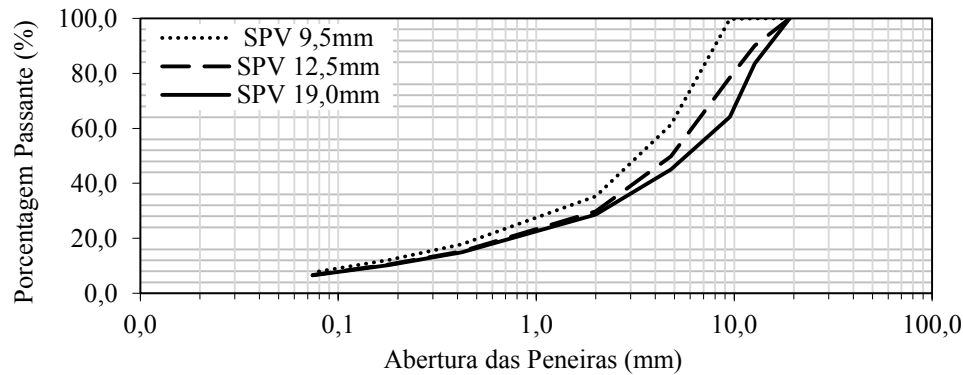
Peneiras		(%) Passante			
ASTM	(mm)	Brita 3/4"	Pedrisco	Pó-de-Pedra	Cal CH "I"
3/4"	19,1	100	100	100	100
1/2"	12,7	58,9	100	100	100
3/8"	9,5	10,7	99,6	100	100
Nº 4	4,8	1,6	27,1	99,1	100
Nº 10	2,0	1,4	4,4	68,4	100
Nº 40	0,42	1,2	1,9	33,3	99
Nº 80	0,18	1,1	1,5	21,4	97
Nº 200	0,074	0,8	1,1	12,6	80

### 3.2. Dosagem das misturas e determinação do CDI/TDI

Foram selecionadas três distribuições granulométricas Superpave: SPV 9,5mm, SPV 12,5mm e SPV 19,0mm. Na dosagem foram utilizados os valores 8, 100 e 160 para  $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{final}$ , respectivamente, considerando-se um pavimento submetido a um volume de tráfego de médio a alto. A Tabela 4 e a Figura 2 mostram a distribuição granulométrica das três misturas asfálticas que foram estudadas nesta pesquisa.

**Tabela 4:** Composição granulométrica das misturas

Materiais	Composições (% na mistura)		
	SPV 9,5mm	SPV 12,5mm	SPV 19,5mm
Brita 1	-	24,0	40,0
Pedrisco	52,5	36,0	21,0
Pó-de-Pedra	46,0	38,5	37,5
Cal CH "I"	1,5	1,5	1,5



**Figura 2:** Curva granulométrica das misturas

Com o objetivo de avaliar a influência do tamanho máximo nominal (TMN) dos agregados no desempenho mecânico das misturas asfálticas, três misturas com diferentes granulometrias foram dosadas pelo método Superpave e posteriormente ensaiadas no simulador de tráfego de laboratório. As curvas de densificação do Superpave foram utilizadas para determinar as propriedades volumétricas das misturas (densidade e percentagem de vazios) em função do número de giros, assim como para os cálculos dos índices de construção e de densificação. Após a determinação do teor de projeto, amostras foram compactadas até o número de giros 200, com o objetivo de se atingir um %Gmm igual a 98%, para o cálculo do TDI das misturas asfálticas. Como não foi possível atingir este valor, decidiu-se por trabalhar com o  $TDI_m$ , que requer %Gmm somente até  $N_{projeto}$ . Os resultados dos parâmetros volumétricos encontram-se resumidos na Tabela 5.

**Tabela 5.** Parâmetros volumétricos das três misturas

Parâmetros	Misturas		
	SPV 9,5mm	SPV 12,5mm	SPV 19,0mm
Teor ótimo de ligante (%)	4,6	4,8	3,9
Densidade aparente ( $G_{mb}$ )	2,474	2,459	2,494
Densidade máxima medida ( $G_{mm}$ )	2,577	2,561	2,598
Volume de vazios (VV, %)	4,0	4,0	4,0
Vazios no agregado mineral (VAM, %)	14,6	15,3	13,1
Vazios cheio de betume (VCB, %)	72,5	73,8	69,6
Relação pó/asfalto	1,5	1,2	1,4

### 3.3. Simulação de Tráfego

Neste trabalho, as misturas foram submetidas ao ensaio de deformação permanente no Simulador de Tráfego de Laboratório do tipo LCPC Francês. Trata-se de um equipamento de carga de roda capaz de realizar ensaios de deformação permanente para a caracterização de misturas betuminosas. Os corpos de prova fabricados têm o formato de uma placa retangular com dimensões 50x18x5cm. Essa placa é submetida ao tráfego de uma roda com um pneu (frequência: 1Hz, carga: 5kN, pressão: 6 bars) a uma temperatura de 60°C. A profundidade da deformação obtida é dada em função do número de ciclos. As especificações determinam uma deformação máxima para um número de ciclos pré-

estabelecido, variando de acordo com o tipo de material e a sua classe. Para cada tipo de mistura do estudo em questão, foram compactadas e simuladas duas placas no formato de prisma retangular (50x18x5cm).

O sistema de medição do afundamento é efetuado durante o ensaio de simulação, ao final de cada um dos seguintes ciclos: 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000. As medidas são realizadas em 15 pontos distribuídos em toda a área solicitada pelo pneu, sendo o resultado referente à média destas medições. O ensaio termina quando a placa é submetida a um número máximo de 30.000 ciclos (60.000 passadas) ou quando a mistura asfáltica se deforma excessivamente de maneira a prejudicar as leituras de afundamento. As diretrizes francesas para o problema de deformação permanente têm limitado o valor obtido no simulador de tráfego em 5% como sendo o limite aceitável para camadas de concreto asfáltico utilizadas como revestimentos, com espessuras entre 6 a 8cm e submetidas a tráfego pesado. O leitor é direcionado ao estudo de Moura (2010) para maiores detalhes a respeito do ensaio.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 4.1. Relação entre o %Gmm@N<sub>inicial</sub> e a deformação permanente no ciclo inicial

A Tabela 6 apresenta os resultados de %Gmm obtidos no N<sub>inicial</sub> (número de giros no SCG igual a 8) comparados aos resultados de deformação permanente (DP) obtidos no N<sub>inicial</sub> do simulador de tráfego (referente a 100 ciclos). Observa-se, neste ponto, que quanto maior o valor de %Gmm, mais densificada está a mistura e, por conseguinte, maior é o percentual de deformação, ou consolidação, da mesma.

<b>Tabela 6. Relação entre o %Gmm@N<sub>inicial</sub> e a %DP@N<sub>inicial</sub></b>		
	<b>%Gmm</b> <b>(N<sub>inicial</sub> = 8 Giros)</b>	<b>% DP</b> <b>(N<sub>inicial</sub> Simulador = 100 Ciclos)</b>
SPV 9,5mm	84%	0,96%
SPV 12,5mm	87%	1,41%
SPV 19,0mm	86%	1,19%
<b>Conclusão</b>	<b>↑</b>	<b>↑</b>

A mistura SPV 12,5mm apresentou maiores valores de %Gmm no N<sub>8</sub> e menor resistência à deformação permanente no estágio inicial da simulação do tráfego. Relações contrárias foram obtidas para o número de giros final (160 giros), conforme será apresentado adiante.

##### 4.2. Relação entre o %Gmm@N<sub>final</sub> e a deformação permanente no ciclo final

A Tabela 7 apresenta os resultados de %Gmm obtidos no N<sub>final</sub> (número de giros no SCG igual a 160) comparados aos resultados de deformação permanente também no N<sub>final</sub> do simulador de tráfego (referente a 30.000 ciclos). Observa-se que o comportamento das misturas no estágio final é contrário ao comportamento no estágio inicial, conforme ilustrado através das setas nas Tabelas 6 e 7. Os resultados na Tabela 7 mostram que a mistura de 12,5mm está mais densificada (%Gmm igual a 99%), mas possui menor deformação permanente (DP igual a 3,8%), quando comparada às demais misturas.



**Tabela 7.** Relação entre o %Gmm@N<sub>final</sub> e a %DP@N<sub>final</sub>

	<b>%Gmm</b> (N <sub>final</sub> = 160 giros)	<b>% DP</b> (N <sub>final</sub> Simulador = 30.000 ciclos)
SPV 9,5mm	95%	4,4%
SPV 12,5mm	99%	3,8%
SPV 19,0mm	97%	4,3%
<b>Conclusão</b>	<b>↑</b>	<b>↓</b>

A explicação de tal comportamento foi justificada por meio da análise destas mesmas misturas ao longo dos processos de compactação (SGC) e de simulação de tráfego (LCPC). Os resultados nos momentos inicial e final dos dois processos são considerados pontuais e unilaterais e, portanto, não retratam o comportamento global da mistura.

Dessa forma, foram determinados os valores de CDI e de TDI<sub>m</sub>, que se referem à área sob a curva de densificação, retratando o comportamento das misturas durante todo o processo de compactação das mesmas. Além disso, foram calculadas as inclinações das curvas de deformação permanente, retratando também o comportamento das misturas ao longo dos diversos ciclos de passagem do pneu e não somente ao final dos 30.000 ciclos, conforme abordado a seguir.

#### 4.3. Relação entre CDI/ TDI<sub>m</sub> e a inclinação da reta de deformação permanente

A Tabela 8 apresenta os resultados de CDI e de TDI<sub>m</sub> para as três misturas estudadas, que são comparados aos resultados obtidos para a inclinação da curva de deformação permanente. Acredita-se que esta inclinação possa retratar o comportamento da mistura ao longo do ensaio no simulador de tráfego. Uma inclinação elevada pode indicar que a mistura sofre deformações sucessivas e crescentes ao longo do ensaio, necessitando de um maior desprendimento de energia. Quando a inclinação da reta é mais suave, acredita-se que a maior parte da deformação permanente já acontece nos ciclos iniciais.

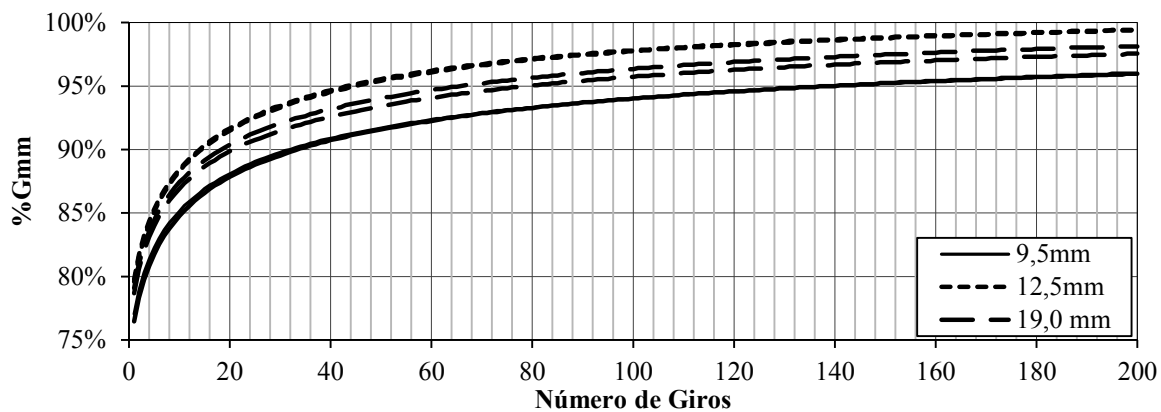
**Tabela 8.** Relação entre CDI/TDI<sub>m</sub> e a inclinação da reta de deformação permanente

	<b>CDI</b>	<b>TDI<sub>m</sub></b>	<b>Inclinação</b>
SPV 9,5mm	258%	49%	26,9%
SPV 12,5mm	43%	204%	17,6%
SPV 19,0mm	89%	168%	22,3%
<b>Conclusão</b>	<b>↑</b>	<b>↓</b>	<b>↑</b>

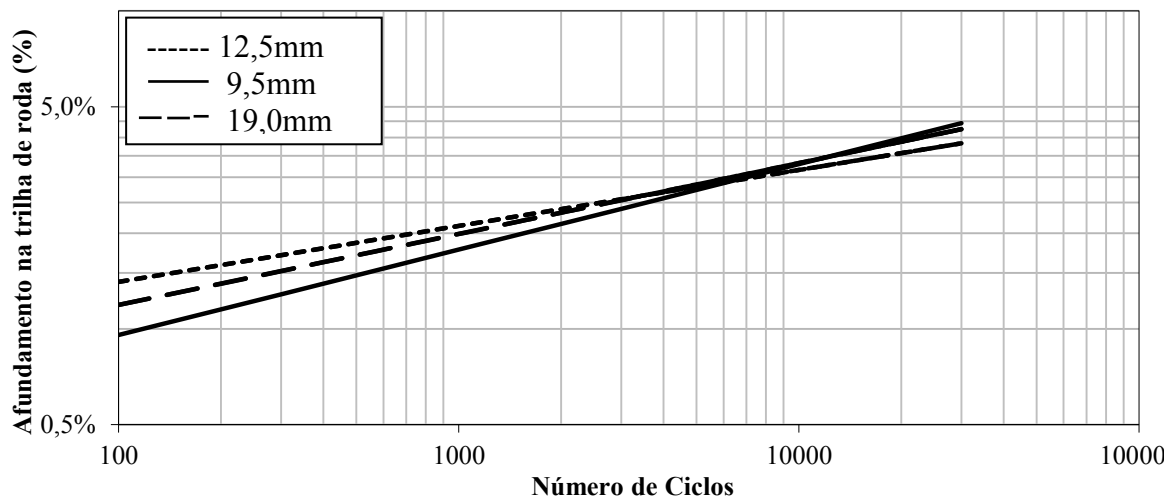
Neste contexto, observa-se na Tabela 8 e nas Figuras 3 e 4, que a mistura SPV 12,5mm apresentou menor valor de CDI, indicando vantagem com relação à trabalhabilidade da mistura e maior valor de TDI<sub>m</sub>, indicando comportamento superior às demais misturas à resistência à deformação permanente. Além disso, a mistura SPV 12,5mm apresentou menor inclinação da reta de deformação permanente e menor percentual de deformação

permanente ao final de sua vida útil (conforme apresentado na Tabela 7), o que vem confirmar os dados apresentados na Tabela 8.

A partir dos dados apresentados, pode-se então concluir que o comportamento da mistura ao longo de sua compactação pode ser um indicativo do comportamento com relação à deformação permanente ao final da sua vida útil (representado pelos 30.000 ciclos). As análises com relação a estes parâmetros não devem ser unilaterais ou pontuais, deve-se analisar não só o estado da mistura no início e ao final de sua vida útil (representado pela deformação no ciclo 100 e no ciclo 30.000), mas também o comportamento da mistura durante todo o período no pavimento (representado pela evolução da deformação ao longo do ensaio). Tal comportamento pode ser explicado pelo fato que o comportamento mecânico de materiais asfálticos depende do histórico de carregamento ao qual foram submetidos, haja vista que se trata de materiais com características viscoelásticas. Outros estudos vêm sendo realizados no sentido de compreender melhor esse processo de deformação ao longo do ensaio no simulador de tráfego de laboratório e os efeitos que isso pode acarretar quando a mistura asfáltica é aplicada em campo.



**Figura 3.** Curvas de densificação das três misturas



**Figura 4.** Curvas de deformação permanente das três misturas

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudadas três misturas asfálticas densas e contínuas variando o tamanho máximo nominal: SPV 9,5mm, SPV 12,5mm e SPV 19,0mm. Estas misturas foram compactadas no compactador giratório Superpave, para determinação de índices de densificação e deformação. As mesmas misturas foram submetidas ao ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego tipo LCPC Francês. Foi observado que o comportamento das misturas no estágio inicial da compactação Superpave e da simulação de tráfego foi contrário ao comportamento no estágio final destes dois processos. No estágio inicial, a  $DP@N_{inicial}$  (100 ciclos) aumenta com o aumento do  $\%Gmm@N_{inicial}$  (8 giros). No estágio final, a  $DP@N_{final}$  (30.000 ciclos) diminui com o aumento do  $\%Gmm@N_{final}$  (160 giros). Também foram determinados os valores dos parâmetros de densificação ( $CDI$  e  $TDI_m$ ) e a inclinação das curvas de deformação permanente, a fim de retratar o comportamento das misturas ao longo dos diversos giros de compactação e ciclos de simulação de tráfego. A mistura SPV 12,5mm obteve um valor de  $TDI_m$  superior às demais misturas e apresentou um resultado final de deformação permanente melhor, deformando menos que as outras duas misturas analisadas (SPV 9,5mm e 19,0mm). Além disso, a mistura SPV 12,5mm obteve menor inclinação da reta de deformação permanente, indicando que a maior parte da deformação permanente aconteceu nos ciclos iniciais. Dessa forma, acredita-se que o  $TDI_m$  tem boa correlação com a inclinação da reta de deformação permanente e com o valor de deformação final nos 30.000 ciclos. Não foram observadas fortes correlações entre  $CDI$ ,  $TDI_m$  e deformação permanente, com o tamanho máximo nominal das misturas. Mahmoud e Bahia (2004) também não encontraram fortes correlações entre os índices de tráfego e o *flow number*, alegando que esta correlação não se baseia no teor de ligante, graduação ou outra característica que diferencie uma mistura de outra.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo OHL Brasil – Autopista Litoral Sul pelo financiamento dessa Pesquisa e ao Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Paulista Infraestrutura pela parceria na execução do procedimento laboratorial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Institute (2001) Superpave Mix Design. Superpave Series N°2 (SP-2), Third Edition, USA.
- Bahia, H. U.; P. P. Friemel e J. Russel (1998) Optimization of constructability and resistance to traffic: a new design approach for HMA using the Superpave gyratory compactor. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 67, p. 189–232.
- Mahmoud, A. F. F.; Bahia, H. (2004) Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-01-02, 2004.
- Motta, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M.; Constantino, R. S. (1996) Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Tradução Comentada. Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras. Rio de Janeiro, RJ.
- Moura, E. (2010) Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP.
- Nascimento, L.A.H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- Nascimento, L.A.H.; Chacur, M.; Leite L.F.M. (2008) Uso do Compactador Giratório na Previsão do Desempenho de Misturas Asfálticas. In: 19º Encontro de Asfalto - IBP, Rio de Janeiro, RJ.

- NF P 98-250-2 (1991) Préparation des Mélanges Hydrocarbonés. França.
- NF P 98-253-1 (1991) Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbons. França.
- Onofre, F.C., Bessa, I.S., Castelo Branco, V.T.F., Soares, J.B. (2011) Manuscrito recebido em 27/5/2010 e aprovado para publicação em 6/4/2011. Este artigo é parte de TRANSPORTES v.19, n.1, 2011. p. 13–22. ISSN: 2237-1346.
- Xiao, F.; Amirkhania, S. N.; Putman, B. J. (2010) Evaluation of Rutting Resistance in Warm-Mix Asphalts Containing Moist Aggregate. Publisher: Transportation Research Board ISSN: 0361-1981, Issue Number: 2180.

---

**Manuela de Mesquita Lopes (manuelalopes@usp.br)**

**Mariana Linhares (mariana.linhares@gmail.com)**

**Kamilla Lima Vasconcelos (kamilla.vasconcelos@gmail.com)**

**Liedi Légi Bariani Bernucci (liedi@usp.br)**

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, Laboratório de Tecnologia de Pavimentação. Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, nº 83. Cidade Universitária - São Paulo – SP

**José Mario Chaves (jmariochaves@uol.com.br)**