

UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE ENERGIA DE DENSIFICAÇÃO NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Thiago Teixeira Ramiro

Universidade Federal de Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia

Laura Maria Goretti da Motta

Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Programa de Engenharia Civil

RESUMO

Uma das principais modificações introduzida pelo sistema SUPERPAVE para projeto volumétrico de misturas asfálticas foi a utilização da compactação giratória na densificação dos corpos-de-prova. Os índices de energia de densificação (Índice de Energia de Compactação - CEI e Índice de Densificação de Tráfego - TDI) são obtidos das variações de volume das amostras compactados no compactador giratório como função do número de giros. Estes índices passaram a ser utilizados como indicadores de características de densificação e usados como novas medidas para descrever o desempenho de misturas tanto durante a construção (compactação) quanto em serviço. Este trabalho faz uma abordagem destes índices obtidos dos resultados das primeiras dosagens SUPERPAVE feitas no Brasil. Os resultados mostraram que os índices CEI e TDI podem ser usados como critério para selecionar misturas que possam ser suficientemente trabalháveis durante a construção (baixos valores de CEI) e também fortes o suficiente para resistirem à densificação sob tráfego (altos valores de TDI).

ABSTRACT

One of the main modifications introduced by system SUPERPAVE for volumetric design of asphalt mixes was the use of gyratory compaction in the densification of the samples. The densification energy indices (Compaction Energy Index - CEI and Traffic Densification Index - TDI) are obtained by volume change of the compact samples in gyratory compactor as function of the gyrations number. These indices have been used as indicator of densifications characteristics and as new measurements to describe the performance of mixtures during the construction (compacting) and in service. This work makes a boarding of these indices obtained from the results of first SUPERPAVE designs made in Brazil. The results had shown that CEI and TDI indices can be used as criterion to select mixtures that can be workable enough during construction (low values of CEI) and also strong enough to resist densification under traffic (high values of TDI).

1. INTRODUÇÃO

As metodologias tradicionais de projeto de misturas asfálticas (Marshall, por exemplo) são focadas principalmente no uso de um esforço padronizado de compactação para analisar propriedades volumétricas e mecânicas da mistura estudada.

O sistema SUPERPAVE para projeto volumétrico de misturas asfálticas difere dos métodos tradicionais por utilizar as características gerais de densificação. O compactador giratório SUPERPAVE (aqui chamado de SGC) possibilita a análise das características de densificação de misturas asfálticas.

Segundo Harman et al (2002) uma ramificação do conceito de compactação giratória adotada pelos americanos foi uma série de equipamentos desenvolvidos anteriormente pelo LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) da França. O equipamento francês era usado na fase inicial do processo de dosagem para otimizar a composição da mistura.

O conceito de índices de energia de compactação foi introduzido por Bahia et al (1998) através do uso das medições das variações do volume das amostras com uma função do número de giros obtidas do SGC e passaram a ser usados como indicadores das características

de densificação de misturas asfálticas. Estes autores acreditam que os dados fornecidos pelo compactador giratório SUPERPAVE são subutilizados num projeto de mistura asfáltica.

O índice de energia de compactação (CEI) e o índice de densificação de tráfego (TDI), mostrados adiante, são usados como indicadores do desempenho de misturas durante o processo construtivo de compactação e em serviço através do uso da curva de densificação.

Uma das principais recomendações do trabalho de Bahia et al (1998) foi o uso do CEI e TDI como critério para selecionar misturas que são sejam suficientemente trabalháveis durante a construção (baixos valores de CEI) e também fortes o suficiente para resistirem à densificação sobre tráfego (altos valores de TDI).

Os estudos realizados durante o programa SHRP concluíram que para aceitar um projeto de misturas os giros a 89%, 96% e 98% do Gmm (Densidade Máxima da Mistura) devem alcançar certos valores limites e foi tomado como um critério de projeto para a seleção do teor de asfalto de projeto. Este critério foi simplificado mais adiante em que o número de giros é baseado numa simples relação entre o número de giros inicial (N_{ini}), de projeto (N_{proj}) e máximo ($N_{máx}$). O foco principal do critério SUPERPAVE é a obtenção de 4% de vazios no N_{proj} . Esta condição está relacionada ao desempenho de misturas asfálticas depois da construção.

Segundo Bahia et al (1998), a exigência de densificação abaixo de 89% do Gmm no N_{ini} é contraditória ao conceito intuitivo de que a construção de uma mistura asfáltica é mais eficiente se o esqueleto mineral permitir rápidas reduções nos vazios durante a construção. Segundo estes autores, este critério para o N_{ini} foi adotado para eliminar misturas frágeis que possam se compactar muito rapidamente.

A razão de densificação tem sido considerada como um indicador alternativo da rigidez do esqueleto mineral. Ironicamente uma alta inclinação da curva de densificação é considerada representativa de uma forte (boa) estrutura de agregados. Seguindo os conceitos da resistência dos materiais a conclusão seria oposta, uma vez que, sendo o esqueleto mineral forte, este resistirá à densificação sobre carga repetida e então mostrará baixa razão de densificação para um dado número de giros. Assim, uma pequena inclinação da curva de densificação seria um indicativo de uma mistura mais forte (rígida).

Desta forma, as curvas de densificação podem representar comportamento de material sobre duas condições de campo muito diferentes:

- A compactação durante a construção através de rolos compactadores trabalhando a altas temperaturas com o objetivo de reduzir vazios de ar a um nível aceitável com um mínimo esforço.
- A densificação sobre tráfego à temperaturas ambientes com o objetivo de manter os vazios de ar dentro de faixas aceitáveis para muitas repetições eixos de tráfego.

Aparentemente, estas duas condições têm exigências contraditórias uma vez que uma mistura ideal deve ter facilidade para compactar durante o processo construtivo mas deve mostrar resistência suficiente para promover densificação sobre a ação do tráfego. Segundo Bahia et al (1998) isto é certamente um desafio ao ser alcançado por meio de um delicado balanço entre o

esforço requerido para compactar as misturas a uma densidade inicial exigida e a resistência à densificação em serviço sob tráfego.

Em Marques et al (2004) foi desenvolvido um extenso planejamento de experimentos fatoriais em que o objetivo principal foi o estudo da influência de alguns fatores tais como granulometria, tipo de ligante, teor de ligante, tipo de compactação e temperatura no valor do módulo de resiliência de misturas asfálticas. Na verificação da influencia do tipo de compactação foi abordado dois tipos: a compactação Marshall (por impacto) e a compactação giratória. Esta foi uma das primeiras aplicações do procedimento SUPERPAVE de dosagem de misturas asfálticas no Brasil e consequentemente do uso do compactador giratório.

No presente trabalho serão mostrados os resultados preliminares a respeito da análise dos dados da densificação dos corpos-de-prova obtidos durante os procedimentos de compactação giratória das misturas asfálticas utilizadas por Marques (2004). Como destaque, serão mostrados os conceito dos índices de energia de densificação e uma análise dos resultados destes índices obtidos para as misturas estudadas.

2. CONCEITO DOS ÍNDICES DE ENERGIA DE DENSIFICAÇÃO

O compactador giratório SUPERPAVE (SGC) é constituído por uma estrutura de reação através de um pórtico não deformável cuja base é afixada nesta estrutura que suporta o molde de compactação e permite seu giro. Durante a compactação a cabeça de carga faz a compressão do corpo-de-prova e o seu diâmetro corresponde nominalmente ao diâmetro interno do molde (100 ou 150 mm). O ângulo de compactação é de $1,25^\circ$ e a velocidade constante de giro é de 30 rpm sendo acionada por um motor elétrico que atua sobre a base rotativa. A pressão de compactação no corpo-de-prova é de 600 kPa e é fornecida por um sistema hidráulico ou mecânico que aplica a carga na cabeça de carga. A pressão da cabeça de carga é medida durante a compactação e à medida que o corpo-de-prova vai se adensando durante a compactação o sistema de carregamento é acionado para ajustar a posição da cabeça de carregamento para que a pressão de compactação constante seja mantida durante o processo. A variação vertical da posição da cabeça de carga é igual à altura do corpo-de-prova. Esta altura vai diminuindo à medida que o corpo-de-prova vai sendo compactado e esta variação é registrada continuamente a cada giro. A variação da altura do corpo-de-prova versus o número de giros é processada através de uma conexão serial conectada a um micro-computador e impressora. A figura 1 mostra as configurações do molde SGC e dos parâmetros de compactação adotados pelo SHRP.

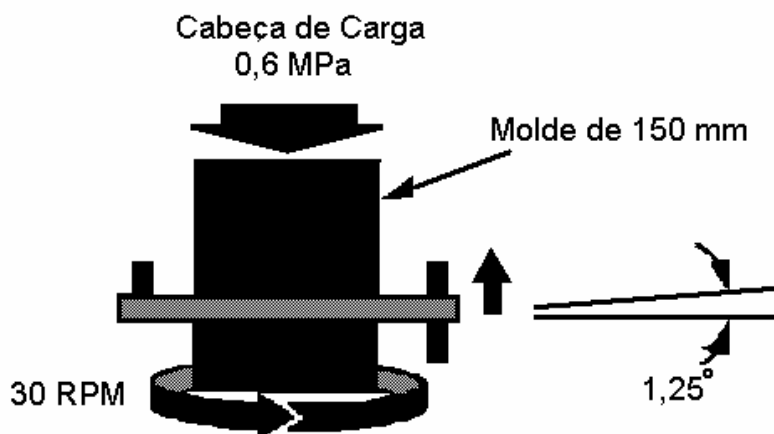


Figura 1: Configurações do SGC e Parâmetros de Compactação (MOTTA et al, 1996)

O arquivo de dados de saída gerado pelo processamento interno do SGC é simplesmente uma tabela que relaciona a altura total do corpo-de-prova dentro do molde de compactação a cada giro. Ou seja, para cada giro efetivado tem-se a altura registrada do corpo-de-prova. Ao final do último giro tem-se a altura final do corpo-de-prova.

Como a altura do corpo-de-prova é registrada a cada giro pode-se determinar a densidade aparente da amostra a um dado nível de giros. A densidade aparente da amostra deve ser corrigida porque o volume calculado no giro "x" é baseado no diâmetro do molde e na altura da amostra, não representando o volume verdadeiro da amostra. Isto é devido aos erros resultantes das irregularidades superficiais ao longo dos lados e das extremidades da amostra. O volume verdadeiro é levemente menor que o volume calculado.

Dos parâmetros volumétricos adotados pelo procedimento SUPERPAVE pode-se destacar o conceito de Densidade Máxima da Mistura (aqui chamada de "Gmm") como sendo a densidade máxima possível desconsiderando a presença de vazios. A diferença percentual entre esta densidade e a densidade aparente é o teor de vazios.

Desta forma, convencionou-se registrar a redução volumétrica que ocorre durante a compactação giratória através da relação entre a densidade aparente da mistura (Gmb) a cada giro e a densidade máxima da mistura (Gmm). À medida que o número de giros vai aumentando, a amostra vai se densificando e consequentemente o valor da densidade aparente vai crescendo. Se fosse possível compactar a amostra até o limite da densidade máxima, ou seja, sem a presença de vazios, o valor da densidade aparente seria igual ao da densidade máxima. Este crescimento de densificação é representado pelo parâmetro %Gmm que significa a diminuição progressiva de vazios dentro da amostra compactada.

A figura 2 mostra uma curva de densificação típica obtida do procedimento de compactação giratória. Neste exemplo a redução volumétrica é expressa através da porcentagem da densidade máxima (%Gmm) que é obtida em cada giro.

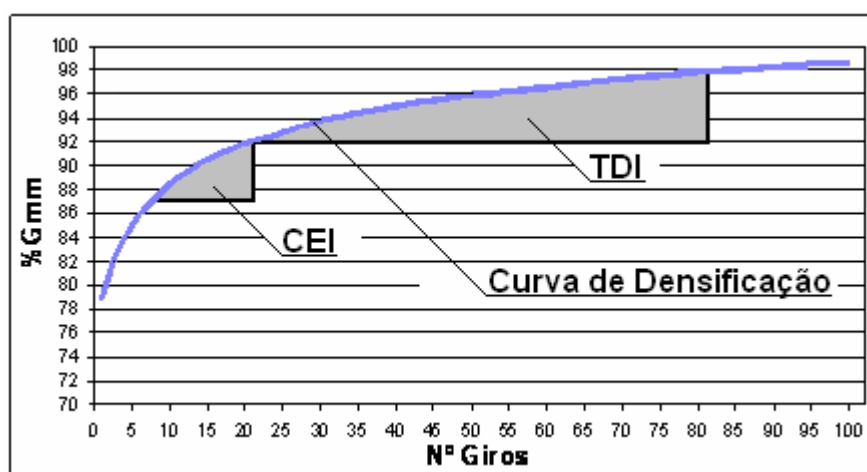


Figura 2: Curva de densificação típica obtida da compactação giratória

A tensão vertical é constante e igual a 600 KPa. A deformação resultante do esforço de compactação é vertical e resulta da carga aplicada pelo movimento decrescente para manter a pressão em 600 KPa. A tensão cisalhante é desconhecida uma vez que ela dependerá do coeficiente de atrito específico da graduação dos agregados.

Um esqueleto mineral forte com alto coeficiente de atrito, exigirá mais energia para inclinar o molde. Como a carga é mantida constante, a deflexão medida pelo SGC é proporcional ao trabalho efetivamente usado na compactação da mistura. Sendo assim, um esqueleto mineral forte dissipará mais energia no atrito, conseqüentemente, menos energia estará disponível durante cada ciclo. O esqueleto forte será mais resistente a densificação então menos deflexão será medida pelo SGC a cada ciclo. Um número maior de ciclos será exigido para alcançar densidade requerida. Entretanto mais energia total será exigida para alcançar esta densidade.

Um esqueleto mineral fraco dissipará menos energia no cisalhamento, e conseqüentemente, mais energia será disponibilizada para densificação vertical. Mais deflexão vertical será obtida para cada ciclo. Isto indica que menos energia total será exigida.

Ao plotar o número de ciclos versus a quantidade de redução de volume (%Gmm) como mostrado na figura 2, a área sob a curva representará a quantidade de trabalho que é exigido para alcançar uma mudança na densidade. Por exemplo, se é exigida uma mudança na densidade de 87% da Gmm para 92% da Gmm, um esqueleto mineral mais forte exigirá mais giros por causa da redução em volume por giro ser pequena. Como o número de giros é maior, a área sob a curva para alcançar a mesma mudança em porcentagem de Gmm é maior. Para um esqueleto mineral fraco, um número menor de giros é exigido e então uma área menor para a mesma mudança em porcentagem de Gmm é obtida sob a curva de densificação.

Os índices de energia são obtidos pela integração da área sob a curva de densificação entre dois pontos determinados. Esta área representa o trabalho requerido para reduzir os vazios de ar da mistura sob as condições do compactador giratório e que dependem da graduação dos agregados, teor de asfalto, temperatura. Desta forma, uma determinada mistura pode mostrar mais perda de energia no cisalhamento sem variação de volume ou mais energia usada efetivamente na variação de volume.

2.1. O Índice de Energia de Compactação (CEI)

O Índice de Energia de Compactação (CEI) representa o trabalho aplicado pela acabadora ou pelos rolos para compactar a mistura na densidade requerida para a construção. É assumido que acabadoras convencionais aplicam aproximadamente a mesma quantidade de esforços de compactação após o espalhamento da mistura. Em virtude dessa consideração, também é assumido que o esforço de compactação promovido pela acabadora é representado por uma energia aplicada constante equivalente a 8 giros no SGC.

A maioria das especificações construtivas americanas exige que o pavimento seja compactado aproximadamente a 92% do Gmm para a aceitação. A energia que se deve desprender ao compactar uma mistura desde o início (atrás da acabadora), até a densidade no final da rolagem será estimada pela área sob a curva de compactação entre esses dois pontos (densidade equivalente a 8 giros e a densidade de 92% da Gmm).

O CEI é definido pela área sob a curva de densificação entre os pontos correspondentes à % de Gmm no número de giro 8 até 92 %Gmm, conforme pode ser visto na Figura 2. Misturas que exigirem baixa energia de compactação nesta faixa (baixo CEI) serão mais desejáveis. Ou seja quanto menor for este índice, melhor tende a ser a densificação inicial de trabalho desta mistura.

2.2. O Índice de Densificação de Tráfego (TDI)

O Índice de Densificação de Tráfego (TDI) representa a quantidade de esforços requeridos para densificar a mistura asfáltica entre 92 e 96% do Gmm e é definido pela área sob a curva de densificação entre estes dois pontos.

Após a abertura ao tráfego a 92% Gmm o pavimento continua se densificando continuamente sob a ação da carga de tráfego. O procedimento de dosagem SUPERPAVE requer que a mistura seja compactada a 96% do Gmm no teor de projeto no número de giros de projeto (N_{proj}). Esta densidade de 96% do Gmm (ou 4% de vazios) é o valor que é esperado alcançar sob tráfego na vida inicial do pavimento.

Uma outra alternativa proposta por Bahia et al (1998) foi o uso do TDI a 2% de vazios, que pode ser considerado como a densidade terminal (TDI terminal). Este índice representa o esforço total exigido para compactar uma mistura na densidade terminal de 98% do Gmm. A densidade de 98% do Gmm é considerada a condição de densidade crítica na qual a mistura esta dentro da zona plástica de ruptura.

Neste trabalho, o TDI foi adotado seguindo a segunda alternativa apresentada em que é definido pela área sob a curva de densificação entre os pontos correspondentes a 92% e 98% do Gmm. Este índice também está representado na figura 2. Misturas com altos valores de TDI são mais desejáveis uma vez que alimentam a expectativa de requererem mais tráfego para se densificar até a condição limite de 2% de vazios. Ou seja quanto maior for este índice, mais demorada tende a ser o processo de densificação final de trabalho desta mistura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

3.1. Os materiais

Os materiais e métodos usados neste trabalho referem-se aos utilizados na pesquisa de Marques (2004). Neste presente trabalho é feita uma análise de alguns resultados obtidos por Marques (2004) durante os procedimentos da compactação giratória dos corpos-de-prova utilizados naquela pesquisa. Maiores detalhes dos materiais e métodos empregados também podem ser obtidos nos trabalhos de Marques e Motta (2006a) e (2006b).

Para o entendimento das análises feitas e dos resultados analisados neste presente trabalho será mostrado a seguir um breve resumo de como foram obtidos os corpos-de-prova compactados pelo compactador giratório e que constituíram o objeto desta pesquisa.

Utilizaram-se três agregados pétreos (“Brita 1”, “Brita 0” e “Pó de Pedra”.) e uma areia natural. Os ligantes asfálticos utilizados foram de três tipos: CAP20 e CAP40 provenientes da REDUC e CAP 50/60 proveniente da LUBNOR.

Da interação entre estes materiais foram estudadas três misturas diferentes, com o objetivo de cobrir as três faixas granulométricas preconizadas pela especificação do DNIT para concreto asfáltico e também as faixas da especificação SUPERPAVE. Na época da pesquisa se utilizou a especificação DNER ES 313/97.

A Mistura designada por “Mistura 1” apresenta uma granulometria contínua e grossa, se enquadrando próximo ao limite inferior da faixa B da especificação do DNIT para Concreto

Asfáltico (DNER ES 313/97). Na metodologia SUPERPAVE a granulometria da Mistura 1 enquadra-se na especificação para o tamanho nominal máximo de 25mm.

A Mistura designada por “Mistura 2” apresenta granulometria contínua, mais fina que a granulometria da Mistura 1, com curva granulométrica próxima da região central da faixa B da especificação do DNIT para Concreto Asfáltico e passando dentro da zona restrita estabelecida pelas especificações SUPERPAVE para o tamanho nominal máximo de 25mm.

A Mistura designada por “Mistura 3” também apresenta granulometria contínua, bem mais fina que as duas anteriores, enquadrando-se na região superior da faixa B da especificação do DNIT para Concreto Asfáltico. Em relação à metodologia SUPERPAVE esta mistura foi enquadrada na especificação para diâmetro nominal máximo de 12,5mm (1/2”). As curvas granulométricas das três misturas podem ser vistas na Figura 3.

Foi estabelecida uma programação de ensaios de laboratório que envolveu ensaios de caracterização, em que agregados e ligantes usados na pesquisa foram devidamente identificados e ensaios definitivos para a quantificação de propriedades de engenharia de misturas asfálticas, com destaque especial para o ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral.

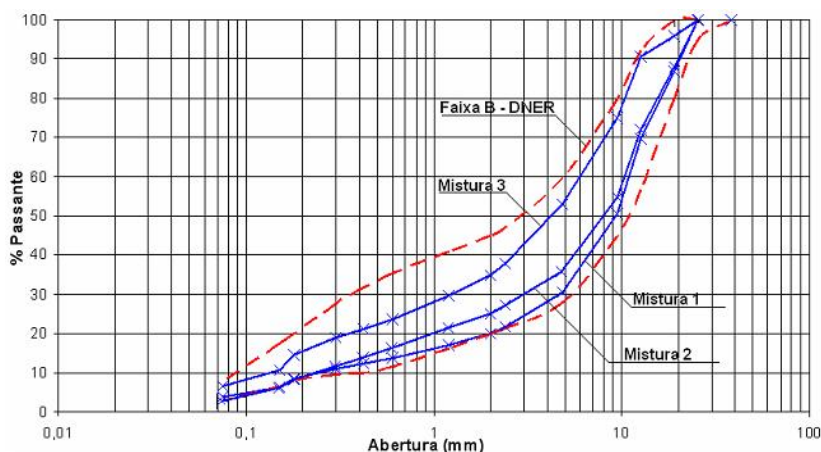


Figura 3: Granulometria das três misturas estudadas (Marques e Motta, 2006a)

No desenvolvimento da pesquisa trabalhou-se com três níveis de teores de asfalto (%) para a mistura 1 e 2 e com quatro teores de asfalto pra a mistura 3. Foram abordados dois procedimentos de dosagem distintos (Marshall e SUPERPAVE). Nos ensaios relacionados ao procedimento Marshall foi analisado apenas um nível de tráfego, caracterizado por 75 golpes do soquete por face. Nos ensaios do procedimento SUPERPAVE trabalhou-se com dois níveis de tráfego: 75 giros e 100 giros, uma vês que o tipo de compactação é a giratória.

Foi exatamente sobre os corpos-de-prova moldados através da compactação giratória que se desenvolveu a análise de dados deste trabalho. Como na pesquisa original foram moldados corpos-de-prova para a determinação do Módulo de Resiliência e da Resistência à Tração por Compressão Diametral, utilizou-se os dados destes corpos-de-prova. Em Marques (2004) e Marques e Motta (2006b) pode ser visto o esquema da confecção de todos os corpos-de-prova envolvidos na pesquisa. Neste trabalho não serão considerados os corpos-de-prova moldados segundo a metodologia Marshall (Impacto).

3.2. Amostragem utilizada

Os índices CEI e TDI foram obtidos para os corpos-de-prova moldados no compactador giratório que posteriormente foram utilizados nos ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT).

Nas misturas 1 e 2 foram moldados 6 corpos-de-prova para cada teor de asfalto (3 para determinação do MR e 3 para a RT). Trabalhou-se com 3 teores diferentes de asfalto (3,5%, 4,5% e 5,5%) e 3 tipos diferentes de ligantes (CAP 20, CAP 40 e CAP 50/60). Conforme já descrito anteriormente, foram utilizados dois níveis de energia de compactação giratória (75 e 100 giros).

Na mistura 3 foram moldados apenas 3 corpos-de-prova para cada teor de asfalto. Nesta mistura trabalhou-se com 4 teores diferentes (4,5%, 5%, 5,5% e 6%). Os tipos de ligantes foram os mesmos 3 (CAP 20, CAP 40 e CAP 50/60) e os mesmos 2 níveis de compactação giratória (75 e 100 giros).

Desta forma, o número total de corpos-de-prova (NC) obtidos e sobre os quais se trabalhou nestas análises foi o seguinte:

$$NC = 2 \text{ Misturas} \times 3 \text{ ligantes} \times 3 \text{ teores} \times 2 \text{ energias} \times 6 \text{ CPs} + 1 \text{ Mistura} \times 3 \text{ ligantes} \times 4 \text{ teores} \times 2 \text{ energias} \times 3 \text{ CPs} = 288 \text{ unidades}$$

4. DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE ENERGIA

Para cada corpo-de-prova fornecido pelo compactador giratório foram obtidos os parâmetros de densificação: N° de giros x Altura do Corpo-de-prova. A partir dos valores da densidade aparente (Gmb) e densidade máxima da mistura (Gmm) foi estabelecida a curva de densificação para cada corpo-de-prova no formato daquela apresentada na figura 2 (N° de Giros x %Gmm).

De posse das curvas de densificação foram calculados os valores do Índice de Energia de Compactação (CEI) e do Índice de Densificação de Tráfego (TDI) para todos os corpos-de-prova confeccionados.

Para facilitar as análises, os dados foram agrupados pelo tipo de mistura, tipo de asfalto, tipo energia de compactação e teor de ligante. Os valores de CEI e TDI apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 representam as médias das réplicas dos corpos-de-prova para cada combinação estudada de cada mistura. Também são apresentados os valores dos teores de projetos obtidos para cada combinação de acordo com o procedimento de dosagem SUPERPAVE e extraídos de Marques (2004).

Tabela 1: Valores de CEI e TDI para a Mistura 1

	Mistura 1																	
	Tipo de Ligante: CAP 20						Tipo de Ligante: CAP 40						Tipo de Ligante: CAP 50/60					
	Energia: 100 Giros			Energia: 75 Giros			Energia: 100 Giros			Energia: 75 Giros			Energia: 100 Giros			Energia: 75 Giros		
Ta	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%
CEI	347,0	169,5	33,4	326,4	120,1	42,1	239,2	85,4	33,8	167,4	91,5	24,2	261,9	93,1	19,7	200,1	71,9	21,3
TDI	22,0	113,8	242,4	1,5	65,5	172,0	46,5	178,0	249,4	23,6	86,2	215,4	37,9	187,3	221,5	19,1	104,9	205,1
Tp	4,60%			5,00%			4,40%			4,70%			4,40%			4,60%		

OBS.: Ta: Teor de asfalto; CEI: Índice de Energia de Compactação; TDI: Índice de Densificação de Tráfego; Tp: Teor de Projeto

Tabela 2: Valores de CEI e TDI para a Mistura 2

Mistura 2																		
Tipo de Ligante: CAP 20							Tipo de Ligante: CAP 40						Tipo de Ligante: CAP 50/60					
Energia: 100 Giros				Energia: 75 Giros			Energia: 100 Giros			Energia: 75 Giros			Energia: 100 Giros			Energia: 75 Giros		
Ta	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%	3,5%	4,5%	5,5%
CEI	212,2	52,7	13,5	212,4	36,5	5,9	242,5	37,7	10,9	255,4	22,9	4,5	171,9	31,3	9,6	137,0	15,3	1,6
TDI	31,2	204,2	229,7	5,5	130,7	199,0	24,9	233,2	208,6	5,9	169,5	163,2	54,9	276,3	171,3	27,8	197,9	149,6
Tp	4,40%			4,60%			5,35%			4,50%			4,15%			4,20%		

OBS.: Ta: Teor de asfalto; CEI: Índice de Energia de Compactação; TDI: Índice de Densificação de Tráfego; Tp: Teor de Projeto

Tabela 3: Valores de CEI e TDI para a Mistura 3

Mistura 3																									
Tipo de Ligante: CAP 20									Tipo de Ligante: CAP 40									Tipo de Ligante: CAP 50/60							
Energia: 100 Giros				Energia: 75 Giros					Energia: 100 Giros				Energia: 75 Giros					Energia: 100 Giros				Energia: 75 Giros			
Ta	4,5%	5,5%	5,5%	6,0%	4,5%	5,5%	5,5%	6,0%	4,5%	5,5%	5,5%	6,0%	4,5%	5,5%	5,5%	6,0%	4,5%	5,5%	5,5%	6,0%	4,5%	5,5%	5,5%	6,0%	
CEI	31,5	31,1	5,3	1,0	34,0	9,1	2,0	0,0	26,2	13,2	5,6	0,0	50,5	30,5	10,7	2,4	13,5	3,3	0,2	0,0	20,8	5,5	1,0	0,0	
TDI	215,1	238,6	274,5	207,5	121,7	211,6	212,6	105,2	249,8	326,9	230,9	157,9	98,3	159,6	234,5	132,8	300,5	238,2	165,5	95,9	159,7	262,0	194,1	119,1	
Tn	4.45%				4.55%				4.05%				4.75%				3.60%				4.20%				

OBS.: Ta: Teor de asfalto; CEI: Índice de Energia de Compactação; TDI: Índice de Densificação de Tráfego; Tp: Teor de Projeto

Para facilitar o entendimento dos valores mostrados nas tabelas 1 a 3 pode-se recorrer aos gráficos apresentados na Figura 4. Nela é mostrada a variação do CEI e TDI para mistura 1 em que os gráficos posicionados na coluna esquerda representam as dosagens feitas na energia de 100 giros e os da direita na energia de 75 giros. Cada linha representa um tipo de ligante utilizado. Os gráficos da figura 4 representam os dados da tabela 1. Os dados das tabelas 2 e 3 não foram representados graficamente devido às limitações físicas deste texto porém teriam o mesmo aspecto. As linhas verticais que aparecem no interior de cada gráfico representam o valor do teor de projeto de cada combinação e foram utilizadas para se calcular os valores correspondentes do CEI e TDI no teor de projeto.

Para se analisar o desempenho de cada mistura estudada quanto à eficiência para a compactação, os valores de CEI e TDI foram resumidos na Tabela 4. Esta tabela foi montada a partir dos gráficos apresentados na figura 4 e similares. Em cada mistura foi obtido o valor do CEI e TDI correspondente ao teor de projeto de cada combinação. Em seguida foram calculados os valores médios para cada mistura levando em consideração os dois tipos de energia de compactação. Por exemplo, o valor do CEI obtido para a mistura 1 na energia de 100 giros (122) foi obtido pela média dos valores de CEI tirados dos gráficos da esquerda da figura 4 que representam as dosagens feitas na energia de 100 giros para todos os tipos de asfalto da mistura 1. Com isto, foram obtidos valores médios finais para cada mistura de acordo com os dois níveis de energia de compactação utilizados. Por meio destes valores é possível se fazer uma análise geral de cada mistura em relação à variação dos índices de densificação CEI e TDI

Tabela 4: Resumo dos valores de CEI e TDI para todas as misturas

	Mistura 1		Mistura 2		Mistura 3	
	100 Giros	75 Giros	100 Giros	75 Giros	100 Giros	75 Giros
CEI	122	75	72	36	39	35
TDI	155	115	196	152	240	114

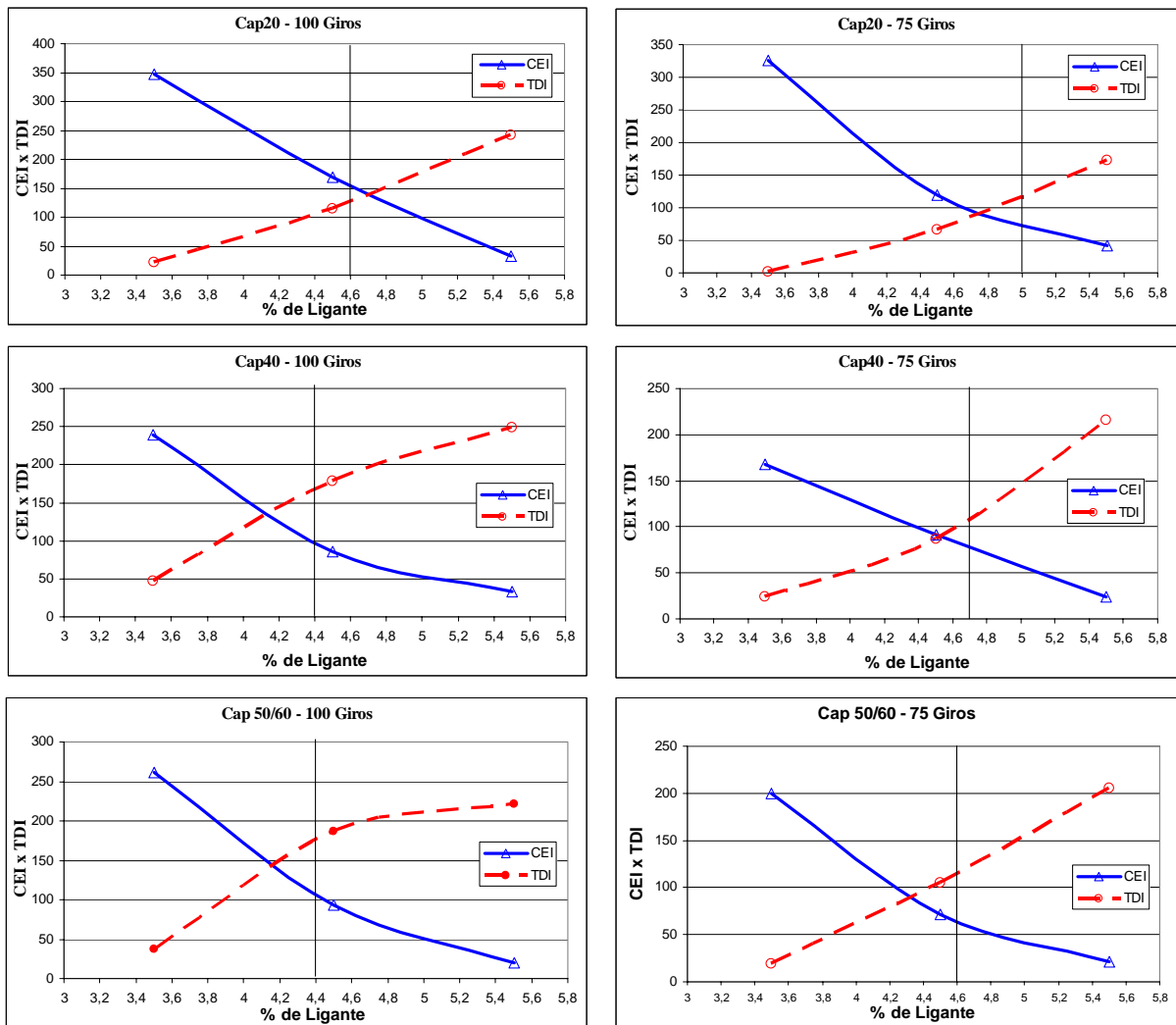


Figura 4: Variação do CEI e TDI para todas as combinações da Mistura 1

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pelos resultados apresentados para os valores de TDI e CEI das misturas estudadas e analisando os gráficos da figura 4 e os dados das tabelas 1 a 4 podemos observar as seguintes características:

5.1. Correlação entre os Índices de Energia e as misturas

a) À medida que a energia de compactação aumenta, os valores dos parâmetros CEI e TDI aumentam. Analisando-se os parâmetros a 75 giros percebe-se que tanto o CEI quanto o TDI são menores quando comparados aos da energia de 100 giros para as três misturas. Como estes parâmetros representam a energia para densificar estas misturas, é de se esperar que com o aumento do esforço de compactação (de 75 para 100 giros) também seja necessário mais energia para se obter os dois pontos desejados (energia inicial e energia final).

b) Ao se comparar as três misturas, percebe-se que os valores de CEI vão diminuindo à medida que a granulometria vai se tornando mais fechada e o TDI vai aumentando. Esta tendência é observada principalmente para a energia de 100 giros.

c) A observação anterior indica que as misturas mais abertas (Mistura 1) tem maiores dificuldades de se densificarem na fase inicial da compactação (compactação de campo) uma vez que o CEI foi diminuído. A Mistura 3 é portanto a mais densa e a que apresentou menores valores de CEI.

d) Ao se analisar o TDI observa-se que ele é crescente à medida que a granulometria vai diminuindo, ou seja, a Mistura 3 é a que apresenta uma maior energia de compactação final (pelo tráfego) uma vez que apresentou os maiores valores de TDI.

e) A mistura 1, a mais aberta, mostrou maior dificuldade para a densificação de campo (maior CEI) e a maior dificuldade para a densificação final (pelo tráfego) (menor CEI). A mistura 2 ficou numa posição intermediária entre as outras.

f) Do trabalho de Marques (2004) pode-se verificar que os valores de MR e RT foram crescentes à medida que as misturas foram se tornando mais densas. Esta tendência também foi observada em relação ao parâmetro TDI.

5.2. Correlação entre os Índices de Energia e os teores de ligante

a) Em todos os gráficos da Figura 4 percebe-se que à medida que o teor de asfalto aumenta o valor do CEI diminui e o valor do TDI aumenta. Esta tendência é esperada uma vez que para teores abaixo dos teores de projeto, a mistura está “seca” apresentando grande dificuldade de densificar devido à falta de ligante para lubrificar as partículas de agregados, daí vêm os altos valores para CEI. À medida que o teor vai aumentando, o entrosamento entre os grãos vai facilitando a densificação, então o CEI vai diminuindo. Para uma quantidade excessiva de ligante a facilidade de compactação inicial é grande, ou seja, a mistura atinge rapidamente a densificação (baixos CEI) porém necessita de muita energia para a fase final da compactação, tarefa esta que é dificultada pelo excesso de ligante e falta de vazios. Então os valores do TDI são elevados.

b) Ao se fazer estas análises somente para o teor de projeto (tabela 4), pode-se comparar o desempenho de misturas diferentes, porque sendo a quantidade de ligante aquela considerada ideal para cada mistura, é possível comparar a influência do esqueleto mineral para a maior facilidade ou dificuldade de compactação.

c) Para a mistura 1 percebe-se que as curvas do CEI e TDI se cruzam próximas do teor de projeto o que leva os valores de CEI serem bem próximos numericamente dos valores de TDI. Nesta condição, os valores de CEI foram os maiores obtidos e os valores de TDI foram os menores em comparação com as outras duas misturas. Este fato dá a mistura 1 o pior desempenho quanto a facilidade de compactação inicial e final.

d) Na mistura 2 também é observado o cruzamento das linhas do CEI e TDI porém este cruzamento se dá para pequenos teores de ligante, o que fez com que haja uma diferença numérica maior entre os valores do CEI e TDI. Neste caso os valores de CEI são mais baixos e os do TDI maiores, comparando-se com a mistura 1. O comportamento da mistura 2 pode ser considerado intermediário entre as outras duas.

e) Na mistura 3 não se observou o cruzamento das linhas do CEI e TDI, uma vez que os valores de CEI são sempre baixos e constantes e os valores de TDI elevados para todos os

teores. Esta observação leva a considerar a mistura 3 como sendo aquela que apresenta os menores valores para CEI, indicando que ela tem grande facilidade para se densificar na pista. Por outro lado, apresenta os maiores valores de TDI, indicando que ela vai requerer mais energia (tráfego) para se densificar na fase final da vida de serviço.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a estudar as características de densificação de misturas asfálticas fornecidas pelo procedimento de compactação giratória e as principais conclusões obtidas deste estudo podem ser assim resumidas:

- a) Os índices CEI e TDI apresentam-se como bons indicadores do desempenho das misturas estudadas com relação à facilidade de densificação inicial e final. Estes índices podem ser usados como critério para selecionar misturas que possam ser suficientemente trabalháveis durante a construção (baixos valores de CEI) e também fortes o suficiente para resistirem à densificação sob tráfego (altos valores de TDI). Com isso, abre-se mais uma perspectiva de utilização dos dados fornecidos pela compactação giratória de laboratório.
- b) Dentre as 3 misturas estudadas pode-se perceber que a facilidade de densificação foi maior para a mistura mais densa (número 3) e que a mistura mais aberta (M1) foi a que apresentou maior dificuldade de compactação.
- c) Como a condição necessária para a obtenção dos parâmetros CEI e TDI é a confecção de corpos-de-prova através da compactação giratória, tais parâmetros são automaticamente obtidos nos procedimentos de estudos e pesquisas em misturas asfálticas. Dos resultados aqui apresentados pode-se vislumbrar a possibilidade de correlações entre características volumétricas oferecidas pelo método da compactação giratória e características mecânicas.
- d) O desempenho de misturas asfálticas quanto à densificação inicial (compactação de campo) e a densificação final (compactação do tráfego) indicado pela interpretação dos índices CEI e TDI deve ser comparado com o desempenho real de campo em misturas que venham a ser dosadas por métodos que empregam a compactação giratória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bahia, H. U., Frieme, T. P., Peterson, P. A., et al, 1998, "Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, volume 67, pp. 189-232.
- Harman, T.; Bukowski, J. R; Montier F., et al, 2002, The History and Future Challenges of Giratory Compaction 1939 to 2001. In: Transportation Research Board - TRB, Washington, USA.
- 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 D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Marques, G. L. O. e L. M. G. Motta (2006a) Estudo da Influência de Alguns Fatores na Determinação do Módulo de Resiliência de Concretos Asfálticos. *Anais do 18º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás*, IBP, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Marques, G. L. O. e L. M. G. Motta (2006b) Utilização do Módulo de Resiliência de Mistura Asfáltica como Critério de dosagem. *37ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação*, ABPv, Goiânia, GO, Brasil.
- Motta, L. M. G.; I. Tonial,.; L. M. Leite (1996) Princípio do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Tradução comentada da publicação FHWA-SA-95-003, Federal Highway Administration, Instituto Brasileiro do Petróleo.