

**Universidade Federal de Uberlândia  
Campus Santa Mônica**

Faculdade de Engenharia Civil

Andher Paulo Capanema Santana

**APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA  
RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS  
COM CAP CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:  
Prof. Dr. Nassau de Nogueira Nardez

UBERLÂNDIA  
2019

# APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM CAP CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO

**Andher Paulo Capanema Santana**

**Nassau de Nogueira Nardez**

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Civil

## RESUMO

Um dos tipos de defeitos mais comuns de pavimentos asfálticos é o trincamento por fadiga. Com o aumento do volume de veículos, diversas opções para melhorar o desempenho de misturas asfálticas surgiram e se tornou cada vez mais difícil fazer uma análise simplificada da resistência à fadiga destas misturas. Ainda hoje não há um ensaio simples consolidado para a realização desta análise. Normalmente, os ensaios para análise do comportamento à Fadiga exigem equipamentos sofisticados e a utilização de corpos de prova que precisam ter suas dimensões ajustadas. Nesse cenário Zhou (2019) propõe o *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT). O ensaio busca cumprir 7 requisitos desejados em um ensaio deste tipo simplicidade, praticidade, eficiência, baixo custo do equipamento de teste, repetitividade, sensibilidade e correlação com o desempenho ao trincamento no campo. Com o surgimento de uma nova opção para avaliação do comportamento de misturas asfálticas à fadiga, é necessária uma validação desta opção, para possível implementação no contexto brasileiro. Este trabalho apresenta os resultados da dosagem e teste de IDEAL-CT de misturas asfálticas com asfalto convencional e modificado com polímero. A partir dos resultados verificou-se que apesar da repetitividade relativamente baixa, a utilização do ensaio em conjunto da dosagem da mistura agrega racionalidade ao projeto de pavimentação.

## ABSTRACT

One of the most common types of defects in asphalt pavements is fatigue cracking. With the increase in vehicle volume, several options to improve the performance of asphalt mixtures have emerged and it has become increasingly difficult to make a simplified analysis of the fatigue strength of these mixtures. Within today there is no simple consolidated test for this analysis. Fatigue tests are performed on sophisticated equipment in cut samples. In this scenario Zhou (2019), proposes the *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT). The essay seeks to fulfill 7 desired requirements in a test like this simplicity, practicality, efficiency, low test equipment cost, repeatability, sensitivity and correlation with field cracking performance. With the emergence of a new option to evaluate the behavior of asphalt mixtures to fatigue, a validation of this option is necessary, for possible implementation in the Brazilian context. This work presents the results of the dosage and fatigue test of asphalt mixtures with conventional asphalt and modified with polymer. From the results an analysis was made, which showed that despite the relatively low repeatability, the use of the test together of the dosage of the mixture adds rationality to the paving project.

## 1. INTRODUÇÃO

A performance da estrutura de um pavimento depende de diversas características ligadas à sua condição. O tipo de material utilizado, a dosagem da mistura asfáltica, as condições de compactação, o processo construtivo, o tráfego e o clima, são fatores que influenciam no desempenho de um pavimento.

Com o passar dos anos, houve um aumento do volume de veículos circulantes, bem como do peso por eixo, o que dificultou que os pavimentos construídos com materiais convencionais atingissem um desempenho satisfatório. Assim, os Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP) surgiram como uma alternativa técnica para melhorar o desempenho dos pavimentos em situações de tráfego pesado e condições adversas de clima. Um dos tipos de polímeros usualmente adicionado no ligante asfáltico é o estireno-butadieno-estireno (SBS). Adicionado por modificação química de outro polímero, este composto possui um comportamento elastomérico termoplástico, ou seja, possui comportamento elástico a baixa temperatura, e termoplástico conforme a temperatura aumenta. (Mano, 1985; Leite, 1999).

Um dos principais tipos de defeitos dos pavimentos asfálticos é o trincamento por fadiga. Fatores externos como as condições climáticas e o carregamento repetitivo influenciam o aparecimento de trincas que possibilitam a entrada de água na estrutura. Com a presença da água, as camadas inferiores do pavimento desestabilizam-se, reduzindo a rigidez do sistema e aumentando o nível de deflexão que reduzem a vida de fadiga da estrutura.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados sob diferentes condições de carregamento, temperatura, dimensões de corpos de prova e à tensão ou deformação controlada. Os ensaios caracterizam-se pela aplicação de uma carga repetida que leva ao aumento das deformações de tração até o rompimento da amostra. Normalmente, os ensaios exigem a utilização de equipamentos sofisticados e de corpos de prova que precisam ter suas dimensões ajustadas para o padrão de ensaios escolhido (corpos de prova em forma trapezoidal ou de vigotas). O ensaio mais simples é o de fadiga por compressão diametral por tensão controlada que gera um estado biaxial de tensão em um corpo de prova cilíndrico. Um dos problemas relacionado a este tipo de ensaio é a combinação dos efeitos de compressão e de tração no centro do corpo de prova (Leandro, 2016). Zhou (2016) estabelece sete requisitos desejados para um ensaio de laboratório simples de avaliação de trincamento por fadiga:

- Simplicidade: desnecessidade de corte, colagem, perfuração ou entalhamento de corpos de prova;
- Praticidade: mínimo de treinamento necessário para realizar o ensaio;
- Eficiência: realização do teste em um minuto;
- Equipamento: custo abaixo de 10 mil dólares;
- Repetitividade: coeficiente de variação menor que 25 %;
- Sensibilidade: sensibilidade à composição do concreto asfáltico (agregado, ligante e outros);
- Correlação com o comportamento em campo: boa correlação com o trincamento por fadiga no campo.

Neste contexto, Zhou (2019) propôs o *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT) que integraria os sete requisitos supracitados. O ensaio é realizado com corpos de prova cilíndricos convencionais, à temperatura ambiente, utilizando uma prensa que aplica duas forças de compressão diametralmente opostas – causando tensões de tração ao longo do diâmetro perpendicular a esse, a uma velocidade de 50 milímetros por minuto.

Por ser um ensaio proposto recentemente, ainda é necessário um estudo mais aprofundado da validade do mesmo. Se mostrando viável, o teste em questão será útil na comparação de misturas asfálticas de diferentes tipos quanto à tolerância de trincamento por fadiga, de forma simples e com custo baixo. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento ao trincamento de misturas asfálticas densas utilizando o ensaio de IDEAL-CT.

## **2. MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL**

Neste item serão descritos os materiais utilizados na produção dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa. Também serão especificados os métodos e ensaios necessários para atingir o objetivo almejado.

### **2.1. Materiais utilizados**

Os agregados utilizados para a produção das misturas asfálticas foram pó de pedra, brita 0 e 1, oriundas de rocha basáltica, provenientes da cidade de Uberlândia - MG. Esse tipo de agregado

foi escolhido por ser o mais comumente utilizado em misturas na região. A caracterização dos agregados foi realizada por Santos (2019) e está indicada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Caracterização dos agregados utilizados

Ensaio	Resultado do Ensaio	Valores de referência	Norma
Abrasão <i>Los Angeles</i>	12,45%	< 50%	ABNT NBR NM 51
Índice de forma	2	≤ 2	ABNT NBR 7809
Equivalente de areia	83%	> 35%	ABNT NBR 12052
Durabilidade	26%	≤ 30%	ASTM C88

Foram utilizados dois tipos de ligantes, um convencional 50/70 proveniente da Refinaria Landulpho Alves – RLAM (São Francisco do Conde - BA), e outro modificado por polímero elastomérico (SBS), fornecido pela empresa Greca Asfaltos. A Tabela 2 e 3 apresentam as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes do CAP 50/70 e do AMP 65/90, respectivamente.

**Tabela 2:** Caracterização física do CAP 50/70

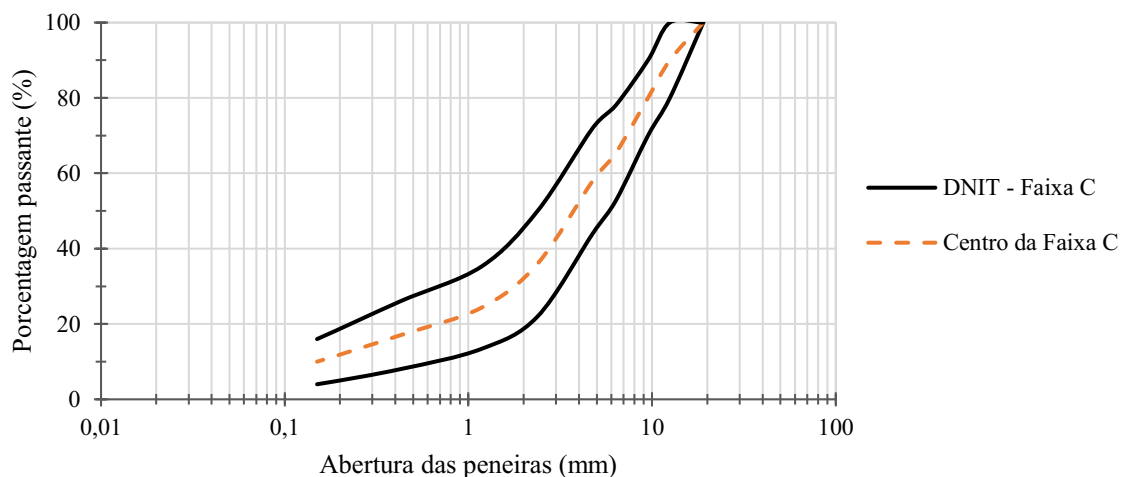
Característica	Método	Resultado
Penetração	D 5	53
Ponto de amolecimento - °C	D 36	53,0
Viscosidade Brookfield, a 135°C - cP	D 4402	434
Viscosidade Brookfield, a 150°C - cP	D 4402	222
Viscosidade Brookfield, a 177°C - cP	D 4402	96
Ductibilidade a 25°C - cm	D 113	84
Ponto de fulgor - °C	D 92	350
Densidade relativa a 20°C	D 70	0,997

**Tabela 3:** Caracterização física do AMP 65/90

Característica	Método	Resultado
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45
Ponto de amolecimento - °C	NBR 6560	81,5
Viscosidade Brookfield, a 135°C - cP	NBR 15184	1883
Viscosidade Brookfield, a 155°C - cP	NBR 15184	566
Viscosidade Brookfield, a 175°C - cP	NBR 15184	220
Ductibilidade a 25°C - cm	NBR 15086	93,3
Ponto de fulgor - °C	NBR 11341	338
Densidade relativa a 25°C	NBR 6296	1,006

## 2.2. Dosagem Marshall

Para a realização da dosagem Marshall da mistura densa, optou-se pela utilização de uma mistura de agregados que se enquadrasse no Centro da Faixa C do DNIT (2006) por ser comumente utilizada em obras de pavimentação rodoviária no Brasil. A composição dos agregados foi obtida por fracionamento dos agregados peneira a peneira. Na Figura 1 observa-se a distribuição granulométrica utilizada nesse trabalho.



**Figura 1:** Curva granulométrica utilizada nas dosagens das misturas – Centro da Faixa C

Os teores de ligante de teste utilizados na dosagem variaram de 0,5 % dentro da faixa de 4 a 6 %, totalizando cinco teores diferentes de asfalto. Para cada teor foram moldados 3 corpos de prova, utilizando compactador fixo mecânico com base plana, seguindo as orientações da ASTM (2016b). Foram aplicados 75 golpes por face dos corpos de prova.

A temperatura de usinagem e compactação das misturas com CAP convencional foram obtidas a partir da caracterização da Viscosidade Brookfield do ligante (ASTM, 2016a). Para a moldagem utilizando o AMP foram seguidas as temperaturas sugeridas pelo fabricante. Na Tabela 4 são apresentadas as temperaturas de trabalho para os dois tipos de asfalto.

**Tabela 4:** Temperaturas de trabalho do CAP e AMP

	CAP 50/70	AMP 65/90
Temperatura de Usinagem (°C)	160	180
Temperatura dos Agregados (°C)	170	190
Temperatura de Compactação (°C)	145	170

Foi também realizado ensaio para a obtenção da massa específica aparente dos corpos de prova (Gmb) conforme a ASTM (2019b). Considerando as duas dosagens, um total de 30 amostras foram utilizadas. A densidade máxima medida (Gmm) das misturas foi obtida seguindo os procedimentos da ASTM (2019a). Foram utilizadas amostras de cerca de 1.500 gramas, sendo duas para cada um dos cinco teores de asfalto, para cada tipo de ligante, totalizando 20 amostras.

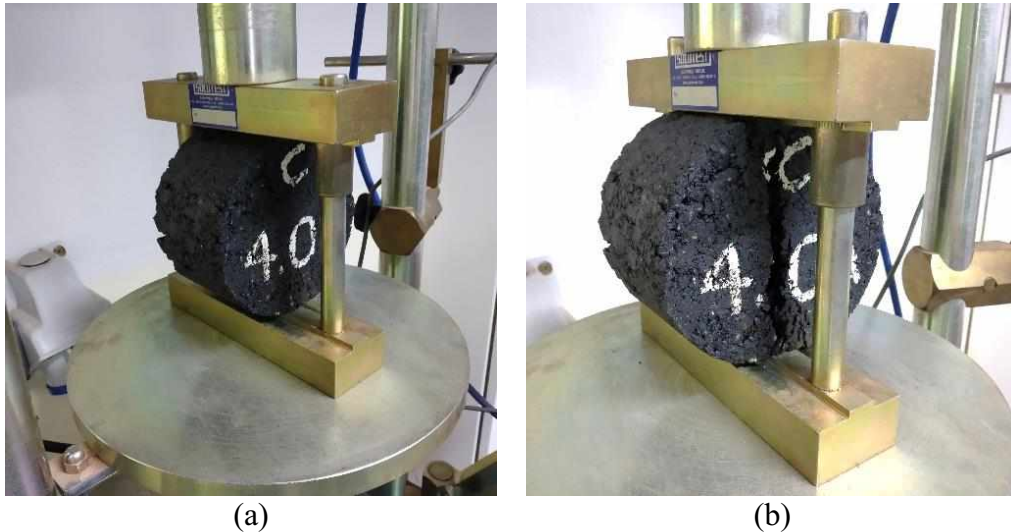
Com o intuito de determinar a densidade aparente (*oven-dry*) da mistura dos agregados (Gsb,od), foram feitos ensaios conforme determinam a ASTM (2015a) e ASTM (2015b). As frações de agregado graúdo foram ensaiadas separadamente, enquanto as frações miúdas compuseram uma mistura proporcional a utilizada na dosagem. Para o material passante na peneira nº 200, foi considerada a mesma densidade aparente que a porção miúda, em concordância com a ASTM (2015b). Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 5.

**Tabela 5:** Densidade aparente (*oven-dry*) e absorção dos agregados

Peneira Nº	% Retida / Peneira	Gsb,od	Absorção %
1/2"	10,00	2,846	1,3
3/8"	10,00	2,842	1,3
1/4"	14,82	2,817	1,3
Nº 4	7,18	2,804	1,3
Nº 8 - Nº 200	52,00	2,846	1,2
Fundo	6,00	2,846	1,2
Mistura de agregados		2,838	1,2

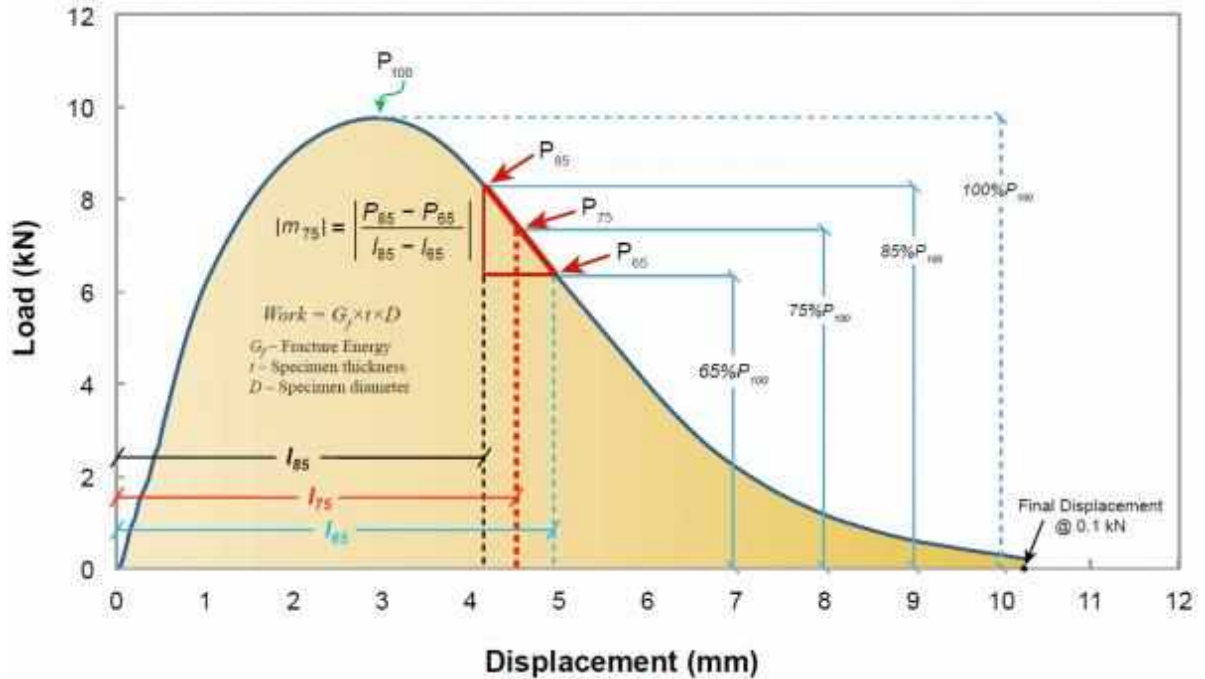
## 2.2. Ensaio IDEAL-CT

O ensaio IDEAL-CT seguiu as recomendações de Zhou (2019), com exceção de que foram utilizados corpos de prova de 101,64 milímetros de diâmetro em média, diferente da indicação de 150 milímetros de Zhou (2019). Na realização do experimento, foram usadas as 30 amostras moldadas durante as dosagens Marshall. A Figura 2 ilustra um exemplo de realização dos ensaios de IDEAL-CT de um corpo de prova Marshall à temperatura de 25 °C.



**Figura 2:** Configuração do corpo de prova antes (a) e após (b) o ensaio

Para que fossem calculados os índices de resistência ao trincamento por fadiga, foram produzidos gráficos de força aplicada por deslocamento de cada corpo de prova testado, conforme a Figura 3 de Zhou (2019).



**Figura 3:** Deslocamento por carga aplicada no ensaio de fadiga

Com o arranjo dos pontos de dispersão, foi selecionada a parte do gráfico utilizada nos cálculos, na qual foi ajustada uma curva de tendência. Esta região se inicia após o pico de carregamento, quando a carga aplicada no corpo de prova atinge 85 % da máxima e termina com o alcance de 65 % da carga de pico. Com os valores de carga e deslocamento destes pontos, foi possível calcular a tangente da curva em  $P_{75}$  ( $|m_{75}|$ ), por meio da Equação 1.

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (1)$$

em que  $|m_{75}|$ : tangente da curva em que a carga atinge 75 % do pico [N/mm];  
 $P_{85}, P_{65}$ : 85 e 65% da carga de pico, respectivamente [N]; e  
 $l_{85}, l_{65}$ : deslocamento correspondente às cargas de 85 e 65 % da carga de pico, respectivamente [mm].

Calculou-se também o trabalho até a falha de cada corpo de prova ( $W_f$ ), como a área abaixo da curva carga-deslocamento. Disposto deste valor, da espessura e do diâmetro da amostra, foi possível calcular a energia de falha ( $G_f$ ) através da Equação (2), na qual o valor de  $10^6$  tem função apenas de ajuste de unidades.

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6 \quad (2)$$

em que  $G_f$ : energia de falha [J/m<sup>2</sup>];  
 $W_f$ : trabalho até a ruptura [J];  
 $D$ : diâmetro do espécime [mm]; e  
 $t$ : espessura do espécime [mm].

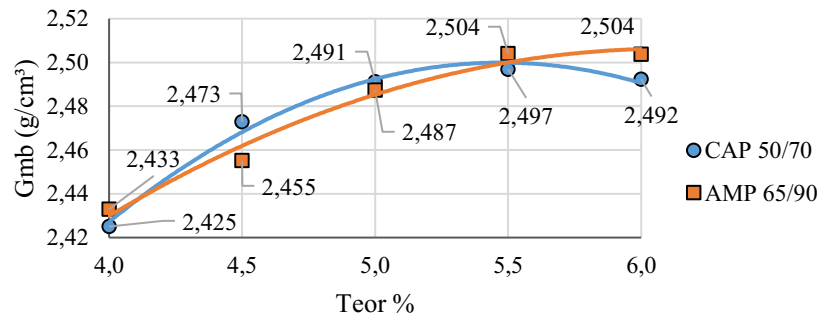
O índice de resistência ao trincamento por fadiga ( $CT_{index}$ ) de cada corpo de prova foi calculado por meio da Equação 3. O valor  $10^6$  tem função de correção de unidades, enquanto  $t/62$  é um fator de correção para a espessura da amostra.

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times 10^6 \quad (3)$$

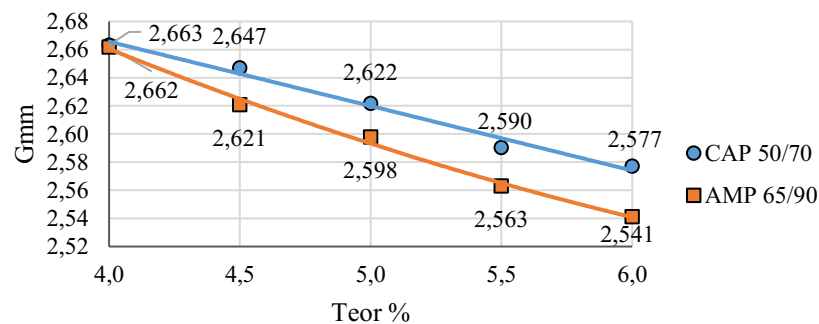
em que  $CT_{index}$ : índice de resistência ao trincamento por fadiga;

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica aparente, enquanto a Figura 5 apresenta os valores de densidade máxima medida resultantes, para os dois tipos de ligante.



**Figura 4:** Gmb médio de cada teor de cada tipo de ligante



**Figura 5:** Gmm médio de cada teor de cada tipo de ligante

Uma vez que a mistura de agregados e o método de moldagem utilizados foram os mesmos, os resultados semelhantes foram esperados. Foram calculados os parâmetros volumétricos de cada dosagem, de acordo com o *Asphalt Institute* (1997). A Tabela 6 apresenta os resultados das dosagens realizadas.

**Tabela 6:** Parâmetros volumétricos da dosagem com CAP 50/70 e AMP 65/90

TEOR %	CAP 50/70			AMP 65/90		
	V <sub>v</sub> %	VAM %	RBV %	V <sub>v</sub> %	VAM %	RBV %
4,0	8,94	17,98	50,27	8,60	17,72	51,46
4,5	6,58	16,80	60,83	6,32	17,39	63,68
5,0	4,98	16,62	70,05	4,25	16,75	74,60
5,5	3,61	16,87	78,63	2,30	16,63	86,16
6,0	3,29	17,46	81,17	1,47	17,08	91,40

V<sub>v</sub>: Volume de vazios

VAM: Volume de vazios do agregado mineral

RBV: Relação betume-vazios

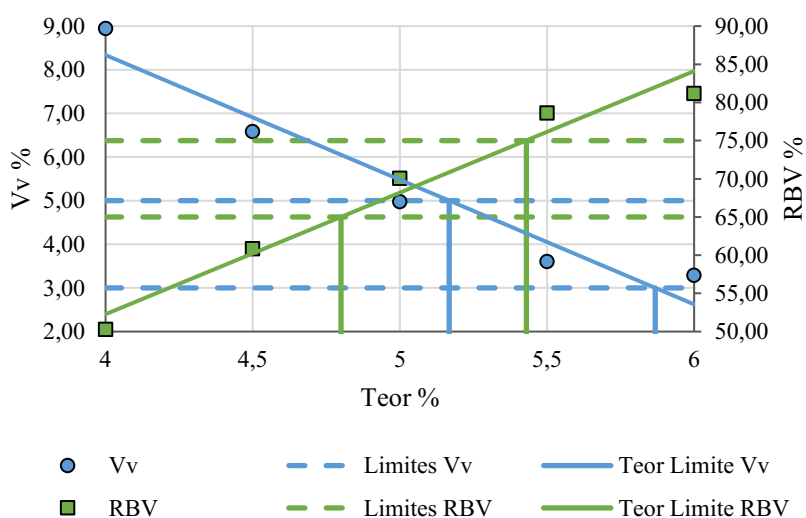


Observa-se que todos os parâmetros seguiram o padrão esperado – volume de vazios decrescente, volume de vazios do agregado mineral decrescendo até um mínimo e crescendo novamente e relação betume-vazios crescente. Os valores para o ligante modificado apresentaram uma variação média 26 % maior que os valores para o asfalto convencional, o que indica uma maior sensibilidade da mistura com AMP à variação do teor de ligante. O volume de agregado mineral é maior que o mínimo estabelecido pelo *Asphalt Institute* (1997) para todos teores de ligantes analisados, exceto 4,0 %, para ambos tipos de asfalto. Os valores mínimos para os teores de 4 a 6 % estão expressos na Tabela 7.

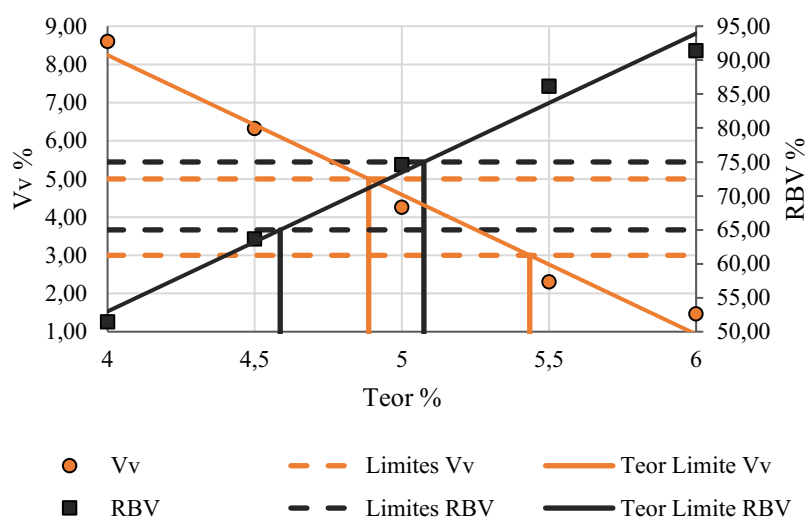
**Tabela 7:** Volume de vazios do agregado mineral mínimo por teor de ligante

TEOR %	VAM, mínimo %	
	CAP 50/70	AMP 65/90
4,0	18,94	18,60
4,5	16,58	16,32
5,0	14,98	14,25
5,5	13,61	12,30
6,0	13,29	11,47

Para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, optou-se por ponderar os parâmetros volume de vazios e relação betume-vazios (Soares *et al.*, 2000). Para isso, foi feito um gráfico com os valores encontrados para ambos parâmetros, juntamente com os limites determinados pelo *Asphalt Institute* (1997) (Figuras 6 e 7). Com base nas interseções das linhas de tendência com os limites, determinou-se quatro teores, o teor de projeto foi a média dos dois teores centrais.



**Figura 6:** Teor de asfalto por volume de vazios e relação betume-vazios CAP 50/70



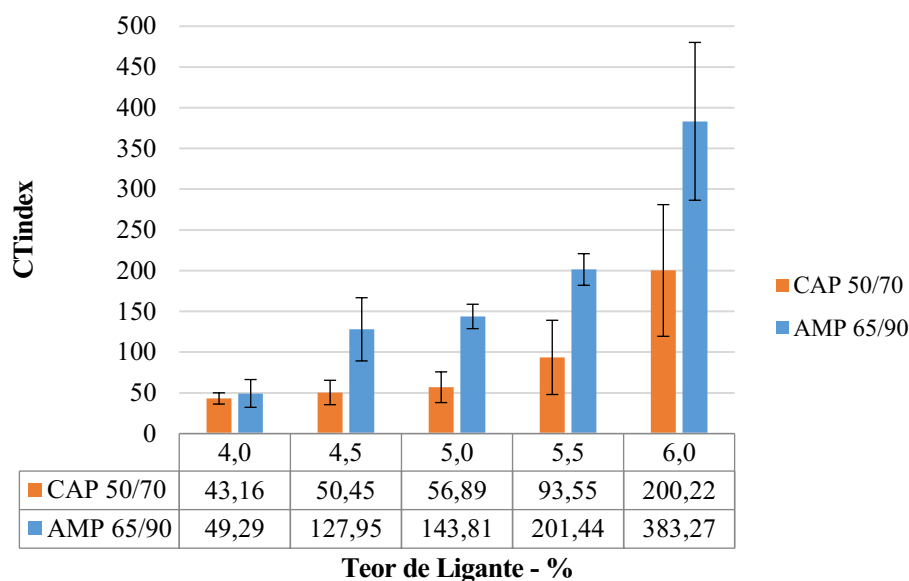
**Figura 7:** Teor de asfalto por volume de vazios e relação betume-vazios AMP 65/90

A relação betume-vazios atinge valores aceitáveis (65 – 75 %) entre 4,8 e 5,4 % para o CAP e 4,6 e 5,1 % para o AMP. Já o volume de vazios alcança a faixa de 3 – 5 % para o CAP entre 5,2 e 5,9 %, e para o AMP entre 4,9 e 5,4 %. Desta forma, o teor de projeto é de 5,3 % para o ligante convencional, e de 5,0 % para o ligante modificado. Considerando a tolerância máxima de  $\pm 0,3$  % no teor de ligante na produção de misturas asfálticas, não houve diferença significativa na taxa de projeto, o que era esperado, visto que o procedimento para a realização das dosagens foi o mesmo.

Na Tabela 8 é possível visualizar os resultados dos cálculos do índice CT realizados para cada amostra, enquanto na Figura 8 estão organizadas as médias para cada teor e tipo de ligante.

**Tabela 8:** Resultados dos cálculos do índice CT por corpo de prova

Ligante	CP	t (mm)	I75 (mm)	D (mm)	Wf (J)	Gf (J/m2)	m75	CTindex	CTindex,médio	Desvio Padrão	CV %
CAP 50/70	4,0% - A	63,72	3,36	101,75	41,55	6.409,10	6,24E+06	34,91	43,16	6,87	15,93
	4,0% - B	64,02	3,74	101,74	45,98	7.059,23	5,17E+06	51,74			
	4,0% - C	64,08	3,16	101,76	39,72	6.091,51	4,56E+06	42,82			
	4,5% - A	64,09	3,41	101,73	50,53	7.749,35	5,30E+06	50,64	50,45	14,99	29,70
	4,5% - B	63,04	3,56	101,70	64,11	10.000,57	5,19E+06	68,71			
	4,5% - C	62,58	2,86	101,70	50,12	7.876,25	6,99E+06	32,01			
	5,0% - A	62,86	4,49	101,81	60,63	9.473,17	5,17E+06	81,92	56,89	18,82	33,07
	5,0% - B	62,36	4,18	101,72	61,05	9.624,96	7,62E+06	52,23			
	5,0% - C	62,89	3,57	101,65	59,37	9.287,30	9,05E+06	36,54			
	5,5% - A	61,53	3,32	101,69	57,88	9.250,07	1,00E+07	29,85	93,55	45,57	48,71
	5,5% - B	63,10	4,53	101,71	61,32	9.554,83	3,70E+06	116,95			
	5,5% - C	63,28	5,12	101,65	60,86	9.462,08	3,63E+06	133,84			
	6,0% - A	64,49	5,82	101,67	72,78	11.099,79	2,11E+06	313,43	200,22	80,83	40,37
	6,0% - B	64,07	4,61	101,60	67,80	10.415,14	3,10E+06	157,35			
	6,0% - C	64,07	4,16	101,60	60,74	9.331,11	3,04E+06	129,87			
AMP 65/90	4,0% - A	62,26	4,15	101,58	46,40	7.336,76	4,21E+06	71,43	49,29	17,06	34,61
	4,0% - B	61,45	4,13	101,62	45,35	7.261,73	6,29E+06	46,53			
	4,0% - C	62,37	3,61	101,58	45,55	7.188,67	8,59E+06	29,92			
	4,5% - A	62,28	4,53	101,75	62,52	9.866,30	2,42E+06	182,57	127,95	38,81	30,34
	4,5% - B	63,30	4,16	101,54	68,30	10.626,50	4,22E+06	105,36			
	4,5% - C	63,73	4,27	101,55	64,33	9.940,92	4,48E+06	95,92			
	5,0% - A	62,08	4,59	101,57	75,12	11.913,43	4,39E+06	122,74	143,81	14,99	10,43
	5,0% - B	63,37	5,44	101,50	67,32	10.467,10	3,67E+06	156,43			
	5,0% - C	63,85	5,66	101,53	74,57	11.503,56	4,34E+06	152,25			
	5,5% - A	64,48	5,11	101,70	72,20	11.009,65	2,53E+06	227,61	201,44	19,38	9,62
	5,5% - B	62,56	5,66	101,61	65,04	10.231,43	2,94E+06	195,42			
	5,5% - C	63,37	4,92	101,60	75,21	11.681,11	3,19E+06	181,29			
6,0% - A	63,04	5,95	101,58	91,06	14.220,86	1,64E+06	517,48	383,27	96,84	25,27	
6,0% - B	63,97	5,36	101,63	86,40	13.288,42	2,13E+06	339,81				
6,0% - C	63,97	5,05	101,63	82,34	12.664,86	2,22E+06	292,52				



**Figura 8:**  $CT_{index}$  médio de cada teor por tipo de ligante

Pela análise da Figura 8 evidencia-se uma dispersão relativamente alta dos resultados. As amostras com CAP 50/70 apresentaram um coeficiente de variação (CV) máximo de 50 %, enquanto as com AMP 65/90 tiveram um CV de até 35 %. Esta dispersão pode ser proveniente da dificuldade de moldar corpos de prova semelhantes, principalmente em relação ao controle das temperaturas de trabalho para cada tipo de ligante.

Apesar da dispersão nos resultados, observou-se uma relação direta do teor de ligante na mistura asfáltica com o índice de resistência a fadiga. Os espécimes com 6 % de ligante apresentaram uma melhoria em proporção aos com teor de 4 %, de 364 % para o CAP convencional e 678 % para o AMP. Esta era uma constatação esperada, uma vez que com o aumento da quantidade de asfalto da mistura, ocorre um aumento na resistência a formação de trincas por fadiga. Isso ocorre uma vez que com um teor de ligante mais alto, uma maior parcela da mistura asfáltica possuirá características elásticas, em detrimento da rigidez da parcela de agregados.

O melhor desempenho do asfalto modificado com polímero em relação ao  $CT_{index}$  é notável, principalmente em teores acima de 4,0 % de ligante. O AMP 65/90 possui resistência ao trincamento por fadiga em média 105 % maior que o CAP 50/70, a Tabela 8 indica a relação dos resultados por teor e tipo de ligante. Shell (2003) aponta que asfaltos modificados com polímeros elastoméricos possuem benefícios ao aparecimento de trincas por fadiga. Assim, a utilização do método de ensaio IDEAL-CT possibilita a comparação de misturas quanto ao comportamento de resistência ao trincamento.

**Tabela 8:** Relação do  $CT_{index}$  em função do tipo de ligante por teor de asfalto

TEOR %	$CT_{index}$ AMP/CAP
4,0	1,14
4,5	2,54
5,0	2,53
5,5	2,15
6,0	1,91
MÉDIA	2,05

Comparando os resultados da dosagem Marshall com o IDEAL-CT, é constatado que os teores de asfalto de projeto apresentam resistência intermediária ao trincamento por fadiga. Seria possível aumentar o teor de projeto para o limite do volume de vazios ou relação betume-vazios para atingir uma resistência máxima ao trincamento, porém isso poderia comprometer o comportamento das misturas à deformação permanente.

#### 4. CONCLUSÕES

A principal conclusão deste trabalho é que a utilização do ensaio IDEAL-CT se mostrou promissora para a categorização de misturas asfálticas quanto ao seu potencial de trincamento. Com uma amostra de três corpos de prova não foi possível fazer uma análise comparativa apropriada, é recomendado o uso de mais corpos de prova para tornar possível um trabalho estatístico mais elaborado. Mesmo com uma variação alta, as tendências esperadas tanto em relação ao teor de ligante, quanto ao tipo de ligante utilizado, se confirmaram. A sensibilidade dos resultados à composição da mistura alinhado à simplicidade, praticidade, eficiência e baixo custo dos equipamentos utilizados, apontam o IDEAL-CT como um teste promissor para análise da resistência ao trincamento.

Vale ressaltar que os resultados não apresentaram repetitividade satisfatória, visto que ultrapassam o limite de 25 % sugerido por Zhou (2016). Coeficientes de variância de até 50 % indicam uma amostra heterogênea ou possíveis inconstâncias no ensaio. A correlação com o comportamento em campo e com outros ensaios sofisticados de fadiga não foram explorados, estes seriam os pontos de investigação para trabalhos futuros.

A utilização do método de ensaio IDEAL-CT possibilita a categorização das misturas quanto a resistência ao trincamento. Em termos da relação dos resultados do IDEAL-CT com os resultados de dosagem é importante que o projetista investigue de maneira associada os efeitos na deformação permanente. Além disso, recomenda-se a ponderação das condições de contorno onde a mistura asfáltica será aplicada para se definir o teor de asfalto de projeto: volume e tipo de tráfego, clima local, características geométricas da via e estrutura do pavimento.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte na realização dos ensaios.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2014) *NBR 16273 – Misturas asfálticas – Propriedades volumétricas de concreto asfáltico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Asphalt Institute (2014) *Asphalt Mix Design Methods*. Manual Series MS-2. 7ª ed., Bagdade.
- ASTM (2015a) *C127 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2015b) *C128 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2016a) *D2493/D2493M – Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2016b) *D6926 – Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2019a) *D2041/D2041M – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2019b) *D2726/D2726M – Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- DNIT (2006) *ES 031 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento

Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

- Leandro, R. P. (2016) *Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação*. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Leite, L. F. M. (1999) *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros*. Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Mano, E. B. (1985) *Introdução a polímeros*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- Santos, M. A. Z. (2019) *Análise do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- SHELL (2003) *The Shell bitumen handbook*. 5. Ed. Cambridge.
- Soares, J.B., F. A. Freitas e J. V. Branco (2000). *Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ*. Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília.
- Zhou, F., D. Newcomb, C. Gurganus, S. Banihashemrad, E. S. Park, M. Sakhaeifar, and R. L. Lytton. (2016) *NCHRP 9-57: Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures*. College Station.
- Zhou, F. (2019) *Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance*. College Station.

---

Andher Paulo Capanema Santana (andher@ufu.br)  
Nassau de Nogueira Nardez (nardeznassau@ufu.br)  
Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia  
Av. João Naves de Ávila, 2121 – Uberlândia, MG, Brasil