



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Andher Paulo Capanema Santana¹ & Rodrigo Pires Leandro²

RESUMO

O trincamento por fadiga é um dos defeitos mais comuns em pavimentos asfálticos de comportamento flexível e torna-se ainda mais relevante com o aumento do volume de veículos. Além disso, a avaliação desse tipo de fenômeno, em laboratório, exige a realização de ensaios em equipamentos sofisticados e de elevado custo, dificultando o acesso a esse tipo de investigação em obras de menor nível de tráfego e em regiões isoladas. Nesse cenário, surge o ensaio *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT) como uma alternativa simples, rápida, eficiente e de baixo custo. Com o surgimento de uma nova opção para avaliação do comportamento de misturas asfálticas à fadiga, é necessária a sua validação para a possível implementação no contexto brasileiro. Desse modo, este artigo apresenta os resultados da primeira fase de um trabalho mais amplo de validação, caracterizado pelas seguintes etapas experimentais: i. Dosagem das misturas e ensaios de IDEAL-CT; ii. Realização dos ensaios de fadiga diametral; iii. Realização dos ensaios de fadiga em vigotas e; iv. Avaliação do trincamento por fadiga em campo. O objetivo da primeira etapa, apresentada nesse trabalho, foi a dosagem das misturas asfálticas e análise dos resultados de IDEAL-CT em função do tipo e do teor de asfalto. Nesse artigo, são apresentados os resultados da primeira etapa. A utilização do ensaio IDEAL-CT mostrou-se promissora para a categorização de misturas quanto ao seu potencial de trincamento. Mesmo com uma variação alta, as tendências esperadas em relação ao teor e ao tipo de ligante confirmaram-se. A sensibilidade dos resultados à composição da mistura, aliada à simplicidade, praticidade, eficiência e baixo custo dos equipamentos utilizados, sugerem o IDEAL-CT como um teste promissor para categorização da resistência ao trincamento de misturas asfálticas densas.

PALAVRAS-CHAVE: IDEAL-CT; Fadiga; Mistura Asfáltica.

ABSTRACT

The fatigue cracking is one of the most common defects in flexible pavements and becomes more relevant with the increase in traffic volume. Moreover, evaluating fatigue in the laboratory requires sophisticated devices with high costs, which makes access to this investigation difficult in pavement construction for low-traffic volume roads and in isolated areas. In this scenario, the Ideal Cracking Test (IDEAL-CT) could be a simple, fast, efficient, and low-cost alternative. With the emergence of a new option to evaluate the behavior of asphalt mixtures to fatigue, validation of this option is necessary for possible implementation in the Brazilian context. Therefore, this paper presents the results of the first step of a more comprehensive study, which is characterized by: i. Hot mix asphalt design and IDEAL-CT tests; ii. Fatigue tests on diametral specimens; iii. Fatigue tests on beams and; iv. Field evaluation of fatigue cracking. The main objective of the first step was to design hot mix asphalt and evaluate IDEAL-CT results based on binder content and type. The results of the first step of the work are presented in this paper. The use of the IDEAL-CT test proved promising for categorizing mixtures based on their cracking potential. Despite a high variation, the expected trends regarding binder content and type were confirmed. The sensitivity of the results to the mixture composition, combined with the simplicity, practicality, efficiency, and low cost of the equipment used, indicates IDEAL-CT as a promising test for categorizing the resistance to cracking of hot mix asphalt.

KEY WORDS: IDEAL-CT; Fatigue; Hot Mix Asphalt.

¹ Universidade Federal de Uberlândia, andherpaulo@gmail.com; rodrigo.leandro@ufu.br.



INTRODUÇÃO

O desempenho de um concreto asfáltico depende de diversas características relacionadas à sua condição, incluindo o tipo e a proporção dos materiais utilizados, o nível e o método de compactação, o processo construtivo, o tráfego e o clima. Nas últimas décadas, o Brasil tem apresentado um aumento recorrente no volume de tráfego de caminhões, bem como no peso por eixo, o que tem dificultado o alcance de um desempenho satisfatório para os pavimentos construídos com materiais convencionais.

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 adicionados ao ligante asfáltico é o estireno-butadieno-estireno (SBS). Este composto, adicionado por modificação química de outro polímero, possui um comportamento elastomérico termoplástico, ou seja, é elástico em baixas temperaturas e termoplástico à medida que a temperatura aumenta. (MANO, 1985; LEITE, 1999).

Independentemente do tipo de ligante utilizado, um dos principais efeitos da aplicação de cargas dinâmicas, associada às condições climáticas, nos revestimentos asfálticos de pavimentos flexíveis, é o surgimento de trincas por fadiga. A formação desse tipo de trinca permite a entrada de água na estrutura, desestabilizando as camadas subjacentes, o que resulta na redução da rigidez do sistema e no aumento do nível de deflexão, diminuindo a vida útil da estrutura. Nesse contexto, também deve-se considerar a influência das características e proporções dos materiais constituintes das misturas asfálticas, tornando necessário que o projeto dessas misturas inclua a avaliação do comportamento quanto à fadiga em laboratório.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados sob diferentes condições de carregamento, temperatura, dimensões de corpos de prova (CPs) 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 CPs que precisam ter suas dimensões ajustadas para o padrão de ensaio escolhido (CPs em forma de vigotas ou trapezoidal). O ensaio mais simples é o de fadiga por compressão diametral por tensão controlada, que gera um estado biaxial de tensão em um CP cilíndrico. Um dos problemas relacionado a este tipo de ensaio é a combinação dos efeitos de compressão e de tração no centro do CP (LEANDRO, 2016).

As complexidades envolvidas nos ensaios de fadiga dificultam a investigação de qualquer parâmetro relacionado a esse tipo de efeito em projetos de pavimentos com menor volume de tráfego ou em regiões distantes dos centros urbanos. Portanto, a proposição de ensaios simples, rápidos e de baixo custo pode facilitar a avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas e o controle de obra, especialmente em cenários de baixo a médio volume de tráfego e em regiões técnica e economicamente menos desenvolvidas. Nesse sentido, Zhou (2016) estabeleceu sete requisitos desejados para um ensaio de laboratório simples de avaliação de trincamento por fadiga:

- a. Simplicidade: desnecessidade de corte, colagem, perfuração ou entalhamento de CPs;
- b. Praticidade: mínimo de treinamento necessário para realizar o ensaio;
- c. Eficiência: realização do teste em um minuto;
- d. Equipamento: custo abaixo de 10 mil dólares;



- e. Repetitividade: coeficiente de variação menor que 25 %;
- f. Sensibilidade: sensibilidade à composição do concreto asfáltico (agregado, ligante e outros);
- g. Correlação com o comportamento em campo.

Assim, em 2019, Zhou propôs o *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT) que integra os sete requisitos supracitados. O ensaio foi normatizado pela norma ASTM D8225 (ASTM, 2019b) e é realizado com CPs cilíndricos convencionais à temperatura de 25° C. Utiliza-se uma prensa que aplica duas forças de compressão diametralmente opostas, causando tensões de tração ao longo do diâmetro perpendicular. A velocidade de execução do ensaio é de 50 milímetros por minuto.

No Brasil, Raffler (2023) estudou o comportamento à fadiga de misturas asfálticas fabricadas com diferentes ligantes asfálticos. Os ensaios utilizados foram de carga repetida em amostras diametrais e também por meio do IDEAL-CT. Os resultados do índice de resistência ao trincamento (CT_{Index}) variaram de 75 a 187 para misturas elaboradas com ligantes modificados e convencionais, apresentando relação com os resultados de fadiga diametral. A mesma tendência de comportamento foi observada nos trabalhos de Zhou (2019), Zhou et al. (2020) e Bennert et al. (2023).

De acordo com Zhou et al. (2019), misturas asfálticas com maiores valores de CT_{Index} apresentam melhor desempenho à fadiga. Contudo, no estudo de Raffler (2023), nota-se que as misturas elaboradas com ligantes modificados por polímeros (AMP 65/90E) e altamente modificados por polímeros (HiMA AMP 65-90E) apresentaram resultados de CT_{Index} menores do que os de ligantes convencionais. Por outro lado, nos ensaios de fadiga por compressão diametral, percebeu-se que as misturas elaboradas com ligantes modificados foram as que mostraram maior vida de fadiga.

Segundo Raffler (2023), a discrepância entre as tendências verificadas nesses ensaios deve-se, provavelmente, ao nível de tensão aplicado nos CPs. No ensaio de fadiga diametral por carga repetida, o nível de tensão atinge um pico máximo de 40% da resistência à tração por compressão diametral estática, sendo um ensaio relacionado ao início e à propagação de trincas nas amostras em tensões menores que a máxima de ruptura. Por outro lado, o IDEAL-CT está relacionado à capacidade dos CPs de resistir à propagação de trincas, ou seja, a análise ocorre após o rompimento inicial da amostra. Portanto, tratam-se de ensaios de concepções distintas que devem ser observadas no momento da análise e interpretação dos resultados.

Os trabalhos de Seitllari et al. (2020), Yan et al. (2020) e Chowdhury et al. (2022) mostraram que os resultados de IDEAL-CT podem ser relacionados ao desempenho à fadiga, apesar de não ser conceitualmente um ensaio de fadiga, uma vez que não há aplicação de cargas repetidas. Nesse sentido, 14 departamentos de transporte americanos utilizam esse tipo de ensaio como uma ferramenta para a avaliação do potencial de trincamento das misturas (TTE, 2021).

Por ser um ensaio proposto recentemente, principalmente no Brasil, ainda são necessárias avaliações sob diferentes condições de campo para a validação dos ensaios a longo prazo. Se mostrando viável, o teste em questão será útil na comparação de misturas asfálticas de diferentes tipos quanto à tolerância ao trincamento por fadiga, de forma simples e com custo baixo. O objetivo principal desse trabalho foi avaliar o comportamento de diferentes misturas asfálticas densas sob a luz dos ensaios de IDEAL-CT em função do teor e do tipo de asfalto. Esse trabalho é parte de um projeto mais amplo, constituindo a sua primeira etapa. Nas demais etapas, serão avaliados os resultados de IDEAL-CT com outros ensaios de laboratório e com o monitoramento de pista experimental.



MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste item, serão descritos os materiais utilizados na produção dos CPs utilizados nesta pesquisa. Também serão especificados os métodos e ensaios necessários para atingir o objetivo proposto.

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>	12,5%	< 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

Para a fabricação das misturas asfálticas 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). As Tabelas 2 e 3 apresentam as especificações técnicas do ligante puro (CAP 50/70) e do ligante modificado por polímero (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
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



Preparo das amostras

Para a definição do teor de asfalto, utilizou-se o método de dosagem Marshall. Optou-se pela utilização de uma distribuição granulométrica densa fina com tamanho máximo nominal (TMN) de 19mm por ser essa a mistura que será utilizada na construção do trecho experimental. A distribuição granulométrica escolhida está apresentada na Figura 1 e está dentro da Faixa C do DNIT (2006).

Considerando que o objetivo deste trabalho é investigar a sensibilidade do ensaio de IDEAL-CT em relação ao tipo e teor de ligante, foram utilizados dois CAPs (cimento asfáltico de petróleo) de origens distintas: asfalto puro de alta penetração (CAP 50/70) e asfalto modificado por SBS (AMP 65/90). Para a confecção dos CPs, realizou-se o fracionamento dos agregados peneira por peneira, assegurando controle na proporção de cada fração em cada uma das amostras moldadas.

Os teores de ligante de teste utilizados na dosagem variaram de 0,5% dentro da faixa de 4 a 6%, totalizando cinco teores diferentes. Para cada teor, foram moldados 3 CPs, utilizando compactador fixo mecânico com base plana, seguindo as orientações da ASTM (2016b). Foram aplicados 75 golpes por face dos CPs. As temperaturas de usinagem e compactação foram obtidas a partir da caracterização da Viscosidade Brookfield dos ligantes (ASTM, 2016a). Na Tabela 4 são apresentadas as temperaturas de trabalho para os dois tipos de asfalto.

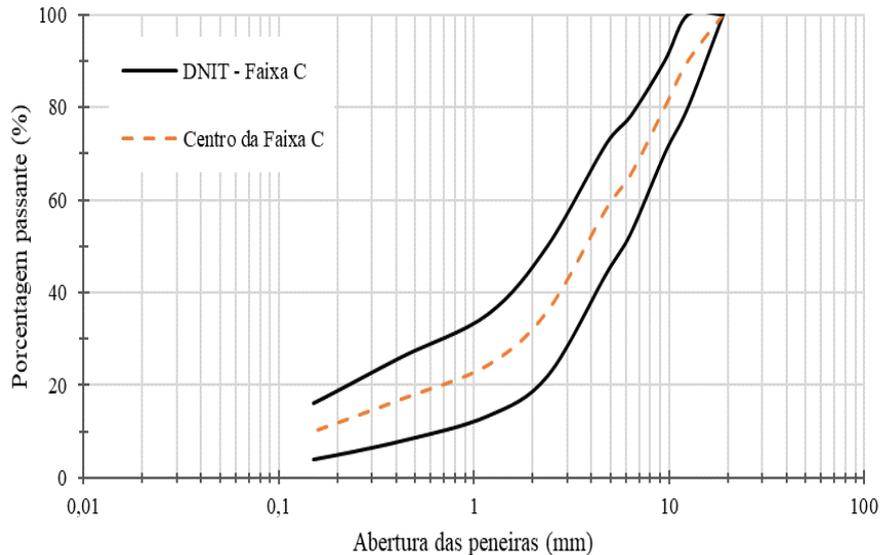


Figura 1: Distribuição granulométrica utilizada e da Faixa C do DNIT (2006).

Tabela 4: Temperaturas de trabalho do CAP e AMP

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



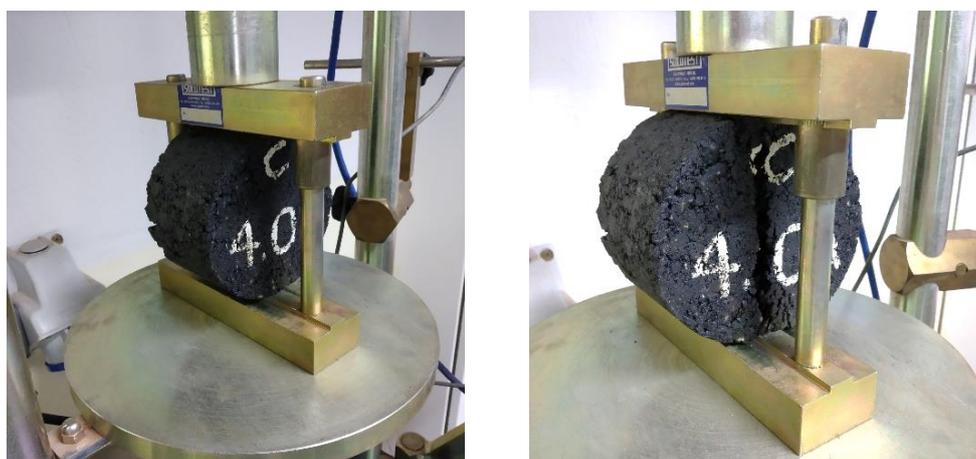
A massa específica aparente dos CPs (G_{mb}) foi determinada segundo as recomendações da ASTM (2019b) e a densidade máxima medida (G_{mm}) foi obtida seguindo os procedimentos da ASTM (2019a). Com o intuito de determinar a densidade aparente (*oven-dry*) da mistura dos agregados ($G_{sb,od}$), foram 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 à utilizada na dosagem. Para o material passante na peneira n.º 200, foi considerada a mesma densidade aparente que a porção miúda, em concordância com a ASTM (2015b). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

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

Peneira N°	% 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
N° 4	7,18	2,804	1,3
N° 8 - N° 200	52,00	2,846	1,2
Fundo	6,00	2,846	1,2
Mistura de agregados		2,838	1,2

Ensaio de IDEAL-CT

Os ensaios realizados de IDEAL-CT seguiram as recomendações de Zhou (2019), com exceção de que foram utilizados CPs de 101,64 milímetros de diâmetro em média, diferente da indicação de 150 milímetros. Na realização do experimento, foram usadas as 30 amostras moldadas durante as dosagens Marshall. Na Figura 2 é mostrado um exemplo de realização dos ensaios de IDEAL-CT de um CP Marshall à temperatura de 25 °C. Para que fossem calculados os CTIndex, foram produzidos gráficos de força aplicada por deslocamento de cada amostra testada, conforme apresentado na Figura 3.



(a)

(b)

Figura 2: Configuração do CP antes (a) e após (b) o ensaio.

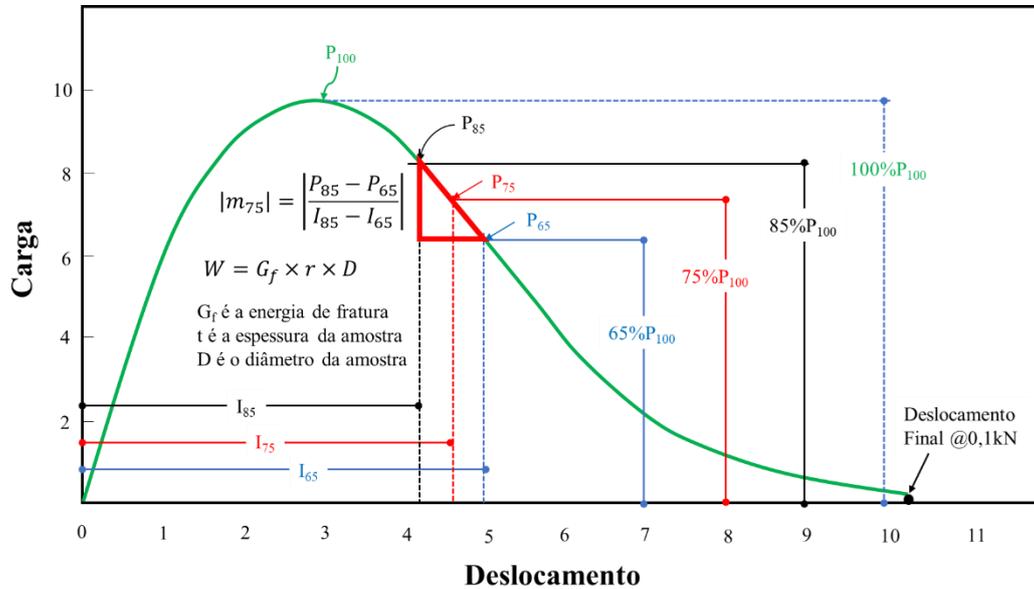


Figura 3: Deslocamento por carga aplicada no ensaio de fadiga (adaptado de ZHOU, 2019).

Com o arranjo dos pontos de dispersão, foi selecionada a parte do gráfico carga-deslocamento referente à região que se inicia após o pico de carregamento, quando a carga aplicada no CP 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 determinar a tangente da curva em P_{75} ($|m_{75}|$) (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 CP (W_f), definido 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) por meio da Equação 2.

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

em que G_f : energia de falha [J/m²];
 W_f : trabalho até a ruptura [J];
 D : diâmetro do CP [mm]; e
 t : espessura do CP [mm].



O índice de resistência ao trincamento por fadiga (CT_{index}) de cada um dos CPs 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.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, os resultados das dosagens das misturas asfálticas são apresentados, seguidos pelos resultados dos ensaios de IDEAL-CT. Na Tabela 6, estão apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas elaboradas com os dois tipos de asfalto.

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

TEOR %	CAP 50/70					AMP 65/90				
	Vv %	VAM %	RBV %	G _{mb}	G _{mm}	Vv %	VAM %	RBV %	G _{mb}	G _{mm}
4,0	8,94	17,98	50,27	2,425	2,663	8,60	17,72	51,46	2,433	2,662
4,5	6,58	16,80	60,83	2,473	2,674	6,32	17,39	63,68	2,455	2,621
5,0	4,98	16,62	70,05	2,491	2,622	4,25	16,75	74,60	2,487	2,598
5,5	3,61	16,87	78,63	2,497	2,590	2,30	16,63	86,16	2,504	2,563
6,0	3,29	17,46	81,17	2,492	2,577	1,47	17,08	91,40	2,503	2,541

Vv é o volume de vazios; VAM é o volume de vazios no agregado mineral; RBV é a Relação betume-vazios; G_{mb} é a densidade aparente; G_{mm} é a densidade máxima medida.

Considerando que foram utilizados os mesmos agregados e a mesma distribuição granulométrica, juntamente com o controle das frações realizado peneira a peneira, os parâmetros volumétricos para ambas as dosagens mostraram resultados semelhantes. Isto levou a um teor de asfalto de projeto de 5,3% para a mistura com CAP convencional e 5,0% para a mistura com asfalto modificado. Levando em conta a tolerância máxima de $\pm 0,3\%$ no teor de ligante na produção de misturas asfálticas, não houve diferença significativa no teor de projeto. A partir dos CPs das dosagens, foi possível avaliar a sensibilidade do ensaio de IDEAL-CT em relação ao tipo e ao teor de asfalto. Na Figura 4 são apresentados os valores de CT_{index} de acordo com o tipo e a quantidade de asfalto e nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados de CT_{index} e da energia de fratura por amostra para as misturas com CAP convencional e modificado, respectivamente.

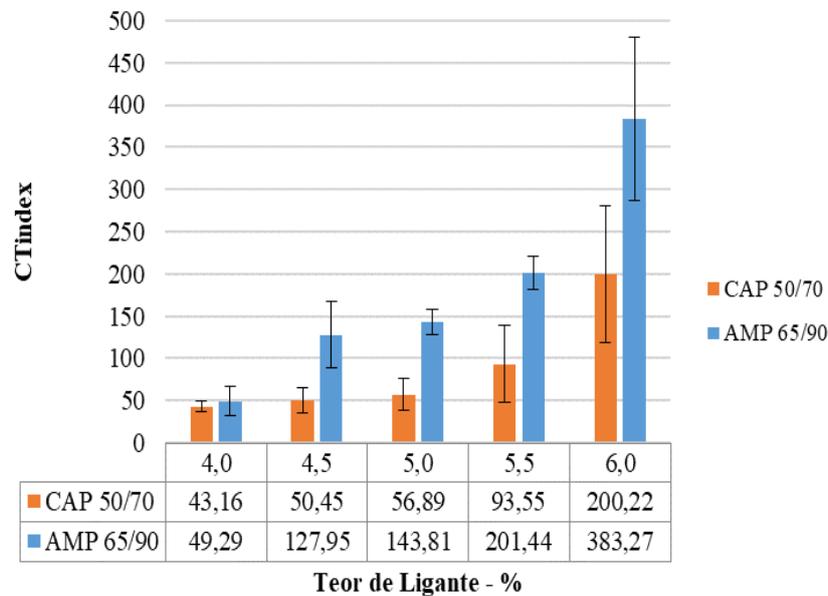


Figura 4: CT_{Index} médio de cada teor por tipo de ligante.

Tabela 7: Resultados de CT_{Index} e da energia de fratura (G_f) para misturas com CAP convencional.

Ligante	CP	t (mm)	175 (mm)	D (mm)	Wf (J)	G_f (J/m ²)	m75	CT_{index}	$CT_{index,médio}$	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			
	4,0% - B	64,02	3,74	101,74	45,98	7.059,23	5,17E+06	51,74	43,16	6,87	15,93
	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			
	4,5% - B	63,04	3,56	101,70	64,11	10.000,57	5,19E+06	68,71	50,45	14,99	29,70
	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			
	5,0% - B	62,36	4,18	101,72	61,05	9.624,96	7,62E+06	52,23	56,89	18,82	33,07
	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			
	5,5% - B	63,10	4,53	101,71	61,32	9.554,83	3,70E+06	116,95	93,55	45,57	48,71
	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			
	6,0% - B	64,07	4,61	101,60	67,80	10.415,14	3,10E+06	157,35	200,22	80,83	40,37
	6,0% - C	64,07	4,16	101,60	60,74	9.331,11	3,04E+06	129,87			



Tabela 8: Resultados de CT_{Index} e da energia de fratura (G_f) para misturas com CAP modificado.

Ligante	CP	t (mm)	l75 (mm)	D (mm)	Wf (J)	G_f (J/m ²)	m75	CT_{index}	$CT_{index,médio}$	Desvio Padrão	CV %
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			

A análise da Figura 4 e das Tabelas 7 e 8 revela uma dispersão considerável nos resultados. As amostras com CAP 50/70 exibiram um coeficiente de variação (CV) máximo de 49%, enquanto as amostras com AMP 65/90 registraram um CV de até 35%. Essa variação pode ser atribuída à dimensão reduzida dos CPs Marshall. Apesar da variabilidade nos resultados, é evidente uma relação direta entre o teor de ligante e o índice de resistência à fadiga. Os CPs moldados com 6% de ligante convencional apresentaram um aumento no CT_{Index} de 364% em comparação com aqueles com 4% de asfalto. Mesmo comportamento foi observado ao usar o CAP modificado, onde um teor de 6% de asfalto resultou em um aumento de 678% no valor de CT_{Index} em relação ao menor teor de ligante. Essa constatação era esperada, uma vez que o aumento na quantidade de asfalto na mistura leva a uma maior resistência à formação de trincas por fadiga. Isso ocorre porque um teor de ligante mais elevado proporciona uma maior elasticidade à mistura asfáltica em detrimento da rigidez dos agregados. Nesse contexto, destaca-se a capacidade do ensaio IDEAL-CT na categorização quanto ao provável comportamento à fadiga em função do teor de asfalto. Quanto à influência do tipo de asfalto, na Tabela 9, são apresentados os resultados da relação entre os valores de CT_{Index} das misturas elaboradas com CAP modificado e convencional.

Tabela 9: Relação do CT_{Index} em função do tipo de ligante por teor de asfalto

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



Analisando-se a Tabela 9, percebe-se o melhor comportamento das misturas elaboradas com asfalto modificado, principalmente para teores acima de 4% asfalto. O AMP 65/90 apresenta resistência ao trincamento por fadiga, em média, 105% superior ao do CAP 50/70. A Shell (2003) observa que os asfaltos modificados com polímeros elastoméricos resultam no aumento da vida de fadiga, reduzindo o aparecimento de trincas desse tipo. Portanto, o uso do ensaio IDEAL-CT não apenas possibilita a classificação do comportamento à fadiga com base no teor de asfalto, mas também com relação ao tipo de ligante utilizado.

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 CPs, não foi possível fazer uma análise comparativa apropriada, e recomenda-se o uso de mais CPs para permitir uma análise estatística mais elaborada. Mesmo com uma variação alta, decorrente das dimensões das amostras, as tendências esperadas tanto em relação ao teor de ligante, quando ao tipo de ligante utilizado, se confirmaram. A sensibilidade dos resultados à composição da mistura, alinhado à simplicidade, praticidade, eficiência e baixo custo, apontam o IDEAL-CT como um teste promissor para análise da resistência ao trincamento.

A correlação com o comportamento em campo e com outros ensaios sofisticados de fadiga não foram explorados nessa etapa do projeto. Essas investigações constituem as próximas fases do trabalho.

Por fim, a utilização do ensaio IDEAL-CT possibilita a categorização das misturas quanto à resistência ao trincamento com base no teor e tipo de asfalto. Desse modo, vislumbra-se seu potencial para utilização no controle de obras em regiões distantes dos principais centros tecnológicos e em projetos de menor recurso financeiro.

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 (2019) *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.



- ASTM (2019b) *D8225 – Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- Bennert, T, Garg, N., Ericson, C., Cytowicz, N. (2023) *Evaluation of test methods to identify asphalt binders prone to surface-initiated cracking*. Transportation Research Record, v. 2677, n. 3, p. 897-910, 2023. doi: 10.1177/03611981221119191.
- Chowdhury, P. S., Noojilla, S. L. A., Reddy, M. A. (2022) *Evaluation of fatigue characteristics of asphalt mixtures using cracking tolerance index (CT_{Index})*. Construction and Building Materials, v. 342, 128030, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128030.
- DNIT (2006) *ES 031 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura 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.
- Raffler, A. (2023) *Análise do desempenho à fadiga de ligantes e misturas asfálticas densas em função da origem da modificação por polímero*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- 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.
- Seitllari, A., Boz, I., Habbouche, J., Diefenderfer, S. D. (2020) *Assessment of cracking performance indices of asphalt mixtures at intermediate temperatures*. International Journal of Pavement Engineering. 23:1, p. 70-79, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1730838.
- 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.
- Texas Transportation Researcher - TTR (2021) *IDEAL-CT — Simple, Reliable, Efficient, Repeatable, Cost Effective*. Texas Transportation Researcher. Volume 57, Number 1.
- 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.
- Zhou, F., Hu, S., Newcomb, D. (2020) *Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests*. Construction and Building Materials. v. 261, 120549, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120549.