

1. Introdução

1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa

No Brasil, bem como em muitos países do mundo, as rodovias têm um papel fundamental na economia do país. A importância das rodovias nas trocas econômicas entre as diversas regiões plenamente justifica a busca de uma melhor compreensão do comportamento de pavimentos rodoviários.

Para Souza (1980), pavimento é uma estrutura construída após o terraplenagem, por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Assim, o pavimento rodoviário constitui-se numa estrutura multicamadas de espessuras constantes transversalmente ao eixo da estrada, submetida a tensões e deformações que derivam do tráfego e das condições ambientais, que devem ser compatibilizadas com a resistência de cada material empregado em cada uma das camadas e em relação ao terreno de fundação (subleito) - Figura 1.1. Sob o ponto de vista de engenharia, esta estrutura deve ser obtida com a máxima qualidade e o mínimo custo possível.

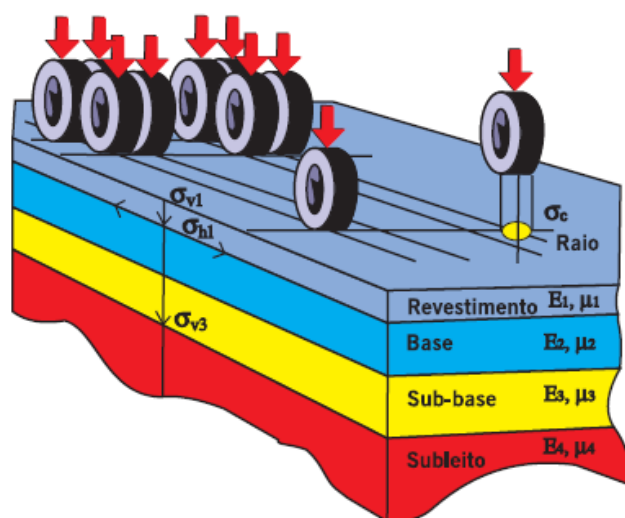


Figura 1.1 – Sistema de camadas de um pavimento e carregamentos solicitantes (Albernaz, 1997)

Dentre as principais causas de mecanismos de degradação dos pavimentos asfálticos destacam-se: o trincamento, deformações permanentes excessivas, envelhecimento do material, fadiga por carregamentos repetidos, etc. Tais defeitos são condicionados por diversas variáveis, como as características do tráfego, condições climáticas, processos construtivos, planos de manutenção e materiais empregados.

Motta (1991) e Pinto (1991) indicam o trincamento da camada asfáltica como o principal e mais comum defeito das rodovias brasileiras. Os trincamentos que se estendem através da espessura do revestimento reduzem sua capacidade estrutural e aumentam significativamente a permeabilidade e a possibilidade de infiltração de umidade na fundação do pavimento. O trincamento das camadas asfálticas pode ser classificado em três tipos: trincas por fadiga (Figura 1.2(a)), trincas por reflexão devido à propagação de trincas existentes através do recapeamento (Figura 1.2(b)) e trincas térmicas devido a baixas temperaturas (gelo) como na Figura 1.2(c). Em virtude das condições climáticas brasileiras, apenas as trincas por fadiga e reflexão ocorrem com frequência no país.

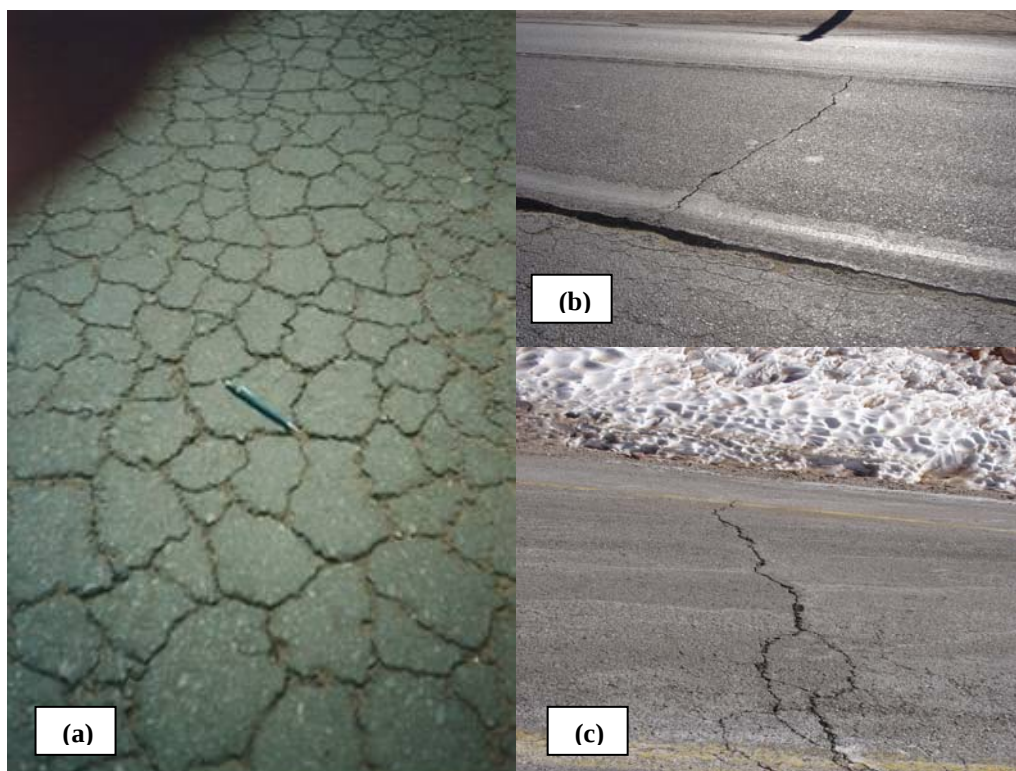


Figura 1.2 - (a)Trincas interligadas chamadas “Jacaré” com erosão nas bordas por fadiga, (b) Trinca por reflexão da base. (c) Trinca térmica, que ocorre somente em países frios, geralmente sob temperaturas inferiores a -10°C (Motta, notas de aula)

Como a vida útil de um pavimento e sua posterior reabilitação por meio de tratamentos, para sua recuperação funcional e estrutural, necessita de investimentos consideráveis, é importante, como já mencionado, uma investigação das causas e mecanismos fundamentais de propagação de trincas por fadiga (Figura 1.3) e reflexão. Esta é a proposta deste trabalho, procurando analisar sob ponto de vista de modelagens numéricas, o comportamento de trincas em corpos de prova de misturas asfálticas ensaios em laboratório considerando um ensaio de compressão diametral, de baixa tensão controlada, utilizado no Brasil desde 1980 para investigação de fadiga em pavimentos asfálticos.



Figura 1.3 – Longa trinca longitudinal causada pelo tráfego.

A modelagem por métodos numéricos de materiais suscetíveis a trincamentos pode ser feita sob dois pontos de vista, diretamente relacionados com a escala de observação: (a) abordagem da mecânica dos meios contínuos; (b)

abordagem da micromecânica. Na engenharia de materiais a nano escala (10^{-9} m) não representa (ainda) uma área de grande interesse para materiais cimentícios. Em microescala (10^{-6} m) o cimento e grãos de agregado individuais em pavimentos podem ser distinguidos, enquanto em mesoescala (10^{-3} m) os agregados e o masticque podem ser identificados. Na macroescala (10^0 m) um corpo de prova de laboratório ou uma estrutura de campo são geralmente modelados, porém sem preocupação do reconhecimento interno da composição do material.

Vários tipos de ensaios existem para a avaliação das propriedades de fratura de concretos asfálticos, como o ensaio de compressão diametral em corpos de prova cilíndricos e o ensaio de fadiga em vigotas sujeitas à flexão, como ilustrado na Figura 1.4(a).

Na busca de geometria de corpos de prova que possam ser capazes de avaliar as propriedades de fratura de concretos asfálticos, diversos pesquisadores experimentaram várias geometrias sob formas de vigota - Figura 1.4(a) - semi-circular - Figura 1.4(b) - e cilíndrica - Figura 1.5. No caso de vigotas sujeitas à flexão a preparação do corpo de prova é complicada, enquanto que no caso da geométrica semi-circular a área em geral é muito pequena para o estudo da propagação de trinca restringindo, por vezes, o processo de fraturamento.

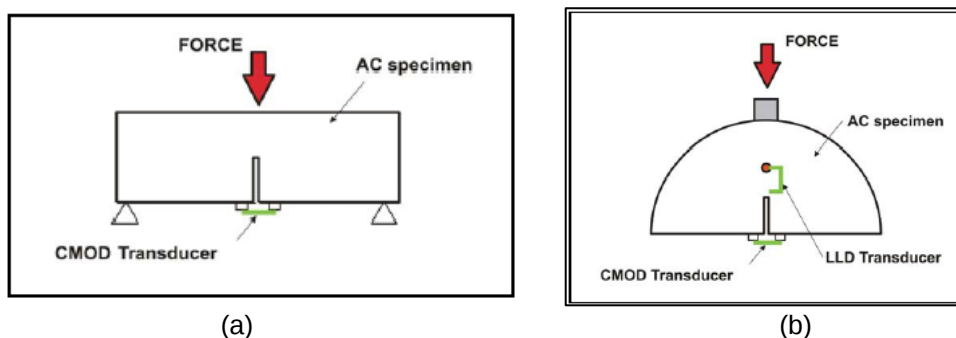


Figura 1.4 - (a) Vigota de asfalto submetida à flexão; (b) Corpo de prova semicircular (Marasteanu et al., 2007; Wagoner et al., 2004).

A geometria cilíndrica é uma das mais utilizadas para ensaios de fratura, por permitir o ensaio de corpos de prova tanto extraídos de campo quanto moldados em laboratório. Também proporciona a confecção de corpos de prova mais homogêneos, de mais fácil manipulação, facilitando assim a execução de ensaios físicos de volumetria.

Bazan e Planas (1998) são de opinião de que um ensaio de laboratório com propagação de trincas deve ser realizado em corpo de prova com trinca previamente iniciada. A geometria de disco com chanfro e pré-trinca, apresentada na Figura 1.5, é considerada a mais adequada para ensaios de trincamento com tração direta **DC(T)** em misturas asfálticas. Este ensaio foi utilizado no Brasil por Hirsch em 2009, sendo conhecido nos Estados Unidos por *Disk Shaped Compact Test*, normalizado pela ASTM D7313 - Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt- Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry, de 2007.

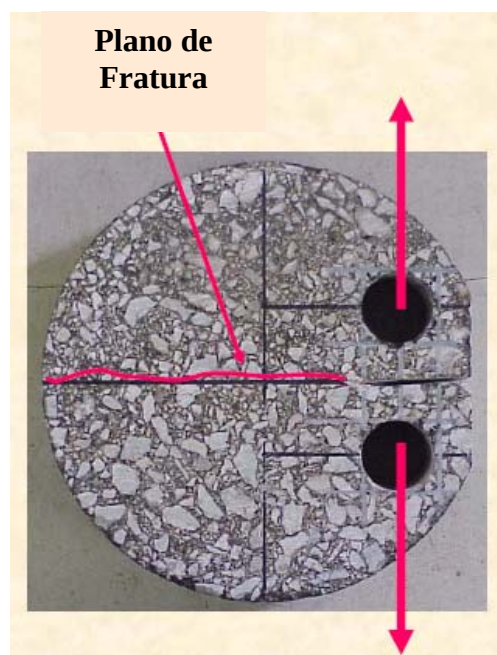


Figura 1.5 - Corpo de prova com trinca previamente iniciada (Wagoner, 2006)

O objetivo desta pesquisa é a simulação do **DC(T)** numérica através do método dos elementos discretos de resultados da propagação de trincas em pavimentos asfálticos obtidos em laboratório através da execução de ensaios de trincamento com tração direta.

A investigação numérica do comportamento de trincas em pavimentos pode ser realizada por uma abordagem da mecânica dos meios contínuos, sendo geralmente empregado o método dos elementos finitos – Soares (1997), Freitas (2002), Paulino et al. (2004), Soares et al. (2007), Song et al. (2006), Franco (2007) - onde o revestimento, em macroescala, é identificado como material único, com suas propriedades mecânicas determinadas em laboratório, refletindo propriedades médias dos seus diversos materiais componentes. Na modelagem em

mesoescala, o material contínuo é considerado, via método dos elementos discretos, como um conjunto de partículas, com ligações entre si eventualmente desfeitas durante a simulação da propagação da trinca. A modelagem pelo método dos elementos discretos, como será discutido mais adiante, apresenta algumas desvantagens, como maiores tempos de processamento, mas também importantes vantagens pois, mesmo com número limitado de partículas e leis de contato simples, é possível obter respostas de materiais envolvendo ocorrência de grandes deformações, com ocorrências de danos e propagação de trincas.

Métodos numéricos têm sido empregados para obtenção de soluções aproximadas em problemas sob condições de contorno complexas e relações constitutivas não-lineares. O sucesso da modelagem numérica pode ser testemunhado pela grande popularidade do método dos elementos finitos desde sua introdução como ferramenta de pesquisa, na década de 1960, e na prática da engenharia, desde a década de 1980 com o surgimento de microcomputadores. Mais recentemente, também em consequência da maior capacidade de processamento dos equipamentos de informática, o método dos elementos discretos introduziu a vantagem adicional de permitir o estudo da interação entre as propriedades do material em mesoescala. Evidentemente, a experiência adquirida neste tipo de modelagem, embora promissora, pode ser considerada apenas em seu estágio inicial. Como aplicação do método dos elementos discretos (MED) em estudos de propagação de fraturas podem ser citados Rothenburg et al. (1992), Chang e Meengoda (1997), Cheung et al. (1999), Shashidhar et al. (2000), You e Buttlar (2001), Abbas et al. (2005), Collop et al. (2006), Kim et al. (2007), Wang et al. (2008), dentre outros.

Segundo Soares et al. (2007), a maneira mais comum usada na modelagem de trincas em pavimentos é através dos modelos de zona coesiva, introduzidos por Dugdale (1959) e Barenblatt (1962) para investigação do comportamento de materiais frágeis e dúteis, respectivamente. O conceito de trinca coesiva foi estendido por Hillerborg et al. (1971) no estudo de processos de fraturas não-lineares em cimento Portland. Tvergaard (1990) sugeriu uma equação quadrática para representação da relação tração-deslocamento na análise do comportamento de interfaces, enquanto que Goubelle et al. (1998) empregou o modelo de zona coesiva bilinear para simulação da iniciação espontânea e propagação de fissuras transversais em placas finas submetidas a impactos de baixa velocidade, na

investigação da propagação de trincas em diversos materiais, como polímeros (Rahulkumar et al., 2000).

Em todos os modelos propostos na literatura de zona coesiva (MZC), a relação tração-deslocamento nas interfaces atinge um valor máximo, com a tração decrescendo em seguida e eventualmente desaparecendo, possibilitando a completa decoesão do material.

1.2.

Objetivo da Pesquisa

A presente dissertação tem como objetivo geral procurar melhor compreender a propagação de trincas em revestimentos de pavimentos flexíveis, através da realização de modelagens numéricas para simulação da propagação de trincas observadas em laboratório no ensaio de Tração Direta **DC(T)** (*Disk-Shaped Compact.*), pelo método dos elementos discretos, incorporando o modelo de zona coesiva bilinear. Pesquisas diretamente relacionadas com o tema foram feitas por Kim (2007), sob ponto de vista numérico, Hirsch (2009) e Bastos (2010), sob ponto de vista experimental.

Como objetivos secundários podem também ser mencionados os seguintes:

- Maior experiência em aplicações do método dos elementos discretos na modelagem de problemas de engenharia, que é no Brasil ainda bastante limitado. As modelagens serão realizadas com a utilização do software PFC2D (*Particle Flow Cod 2D*) desenvolvido pela companhia Itasca Engineering Consulting and Software.
- Análise da sensibilidade dos parâmetros do material, em mesoescala, em relação à resposta mecânica do pavimento e na propagação da trinca.
- Estudo e utilização do modelo constitutivo MZC (Modelo de Zona Coesiva) para simulação da propagação de trincas pelo método dos elementos discretos.

1.3.

Organização da Dissertação

O presente trabalho está organizado nos seguintes 6 capítulos:

Capítulo 1 que introduz o tema e os objetivos da pesquisa, ora apresentados.

Capítulo 2 que apresenta uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de trincamento em misturas asfálticas, com considerações sobre a teoria da mecânica da fratura.

Capítulo 3 que é dedicado a uma exposição geral do método dos elementos finitos e uma apresentação, em particular, das características, vantagens e limitações do programa computacional PFC2D (Itasca, 2003) utilizado nesta investigação.

Capítulo 4 onde as simulações numéricas são descritas e o capítulo 5 onde resultados de ensaios de laboratório (*Disk-shaped Compact*), bem como análises de sensibilidade das previsões numéricas, são interpretados e discutidos.

Capítulo 6 que apresenta as conclusões do presente estudo e sugere tópicos e recomendações para futuras pesquisas.