

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será abordado o processo de ruptura por fadiga de pavimentos asfálticos e o trincamento por reflexão de trincas, além de breve introdução de conceitos da Mecânica da Fratura, por se tratar da área que busca interpretar de modo mais racional tais processos. Também será abordado o uso de geossintéticos como forma de inibir o trincamento em pavimentos flexíveis, especialmente nos reforços de revestimentos.

2.1.

Ruptura de pavimentos asfálticos

A vida útil de um pavimento, em termos de serventia e desempenho, está relacionada ao seu correto dimensionamento, que busca evitar a ocorrência de defeitos estruturais: trincamentos e afundamentos. Estes dois são os principais defeitos nos pavimentos asfálticos, tradicionalmente chamado de pavimentos flexíveis. O trincamento pode ter origem em fenômenos como a fadiga, nos quais cargas intermitentes originam as trincas, que é um dano progressivo. Os afundamentos são decorrentes do mecanismo denominado deformação permanente ou plástica. Estes defeitos são originados por dois distintos modos de solicitação mecânica: flexão repetida (responsável pela fadiga do material) e compressão simples.

No dimensionamento de pavimentos flexíveis (seja empírico ou mecanístico), os mecanismos de ruptura são considerados como critério para a verificação se determinada estrutura de um pavimento atende às solicitações oriundas do tráfego e do meio ambiente (climáticas). No método de dimensionamento empírico do DNER (atualmente, DNIT), a estrutura é obtida a partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR ou ISC) e do número N (número de operações do eixo padrão rodoviário), protegendo excessivamente o pavimento à ruptura por cisalhamento ou às deformações permanentes oriundas do subleito e não se

considera a fadiga no revestimento asfáltico. Todavia, qualquer pavimento, mesmo projetado por este critério, não está livre do fenômeno da fadiga, que resultará em trincamento das camadas de sua estrutura (PINTO, 1991).

Numa metodologia mecânica de dimensionamento de pavimentos, calculam-se as tensões e deformações que solicitam a estrutura e comparam-se com as tensões e deformações admissíveis dos materiais a serem empregados, que são obtidas através de ensaios laboratoriais ou de equações mecânico-empíricas (MOTTA, 1991). Assim, ao se evoluir da abordagem empírica para uma racional ou mecânica-empírica, torna-se possível calcular tensões e deformações que conduzirão ao bom funcionamento dos pavimentos frente aos defeitos que antes eram desconsiderados ou pouco entendidos.

O trincamento por fadiga e a deformação permanente são os principais critérios de aceitação/avaliação da estrutura do pavimento, correspondem aos defeitos que ocorrem mais comumente e mais afetam a serventia de um pavimento ao longo de sua vida de serviço. No Brasil, o trincamento por fadiga constitui-se como o critério mais importante, na maioria dos casos, pois é o principal mecanismo de ruptura verificado nos revestimentos asfálticos, diferente do que ocorre em países de clima frio ou temperado. Aqui não ocorre a condição de saturação dos solos em geral nem do subleito, o que é típico da estação de primavera nos países frios e temperados (GONÇALVES, 1999). Portanto, nos pavimentos rodoviários brasileiros, o trincamento é principal fator responsável pela redução no desempenho ou nos níveis de serventia (RODRIGUES, 1991; PINTO, 1991).

A deformação permanente reflete-se em afundamentos nos pavimentos, que se manifestam na superfície dos revestimentos asfálticos, principalmente sob a forma do afundamento de trilha de roda. Algumas vezes considera-se (erroneamente) este defeito como unicamente devido à contribuição da camada de subleito. Sabe-se que, principalmente a partir da interpretação do funcionamento de um pavimento como um sistema de múltiplas camadas, os afundamentos são oriundos da contribuição de todas as camadas. É óbvio que uma das camadas pode eventualmente ser a principal responsável pela evolução das deformações. Entretanto deve-se considerar o pavimento como um conjunto de camadas em que

todas estas contribuam para resistir às tensões e deformações decorrentes de suas solicitações.

Tanto o trincamento por fadiga, quanto os afundamentos oriundos de deformação permanente, são resultados da atuação do tráfego que são, na verdade, ações de carregamentos repetidos ou cíclicos. Assim, ambos os mecanismos são originados a partir da alteração, sob ponto de vista estrutural, do pavimento, considerado como um sistema de camadas monolíticas. Entretanto, tais mecanismos são diferentes. O trincamento por fadiga é resultante de deslocamentos recuperáveis do pavimento, denominados de deformações elásticas. Já os afundamentos são decorrentes das parcelas de deslocamento não-recuperáveis, sendo acumulativos ao longo da vida do pavimento, por isto denominadas de deformação permanente. Outras formas de deterioração que ocorrem em pavimentos flexíveis são o trincamento por retração, associado à variações de temperatura, as quais induzem tensões de tração na massa asfáltica (ROSO, 2007); e o trincamento por reflexão, cuja origem e mecanismos se relacionam com os decorrentes do trincamento por fadiga. Este tipo de trincamento é proveniente de possíveis trincas de camadas subjacentes ao revestimento mais superficial, que devido às solicitações do tráfego, tendem a propagar atingindo a superfície do pavimento (POLETI, 2005).

As misturas asfálticas, especialmente aplicadas em forma de concreto asfáltico, constituintes de um pavimento, em sua utilização, obedecem a leis de comportamento mecânico intrínseco, que na verdade são leis fenomenológicas específicas: lei de fadiga e lei de deformação permanente (PINTO, 1991). Logo, seus comportamentos podem ser descritos qualitativamente e quantitativamente por aqueles fenômenos.

2.1.1.

Fadiga

A ação do tráfego sobre os pavimentos rodoviários provoca deformações que se compõem basicamente de uma parcela recuperável e outra não-recuperável. O deslocamento recuperável que cessa após a retirada da carga que o originou,

indica a deformabilidade ou o comportamento elástico (resiliente) de um pavimento. Este deslocamento, que é repetitivo durante a utilização de uma rodovia, ao longo do tempo provoca uma flexão das camadas do pavimento. Ora, sabe-se que em qualquer peça estrutural solicitada por esforços de flexão surgem tensões internas de compressão e de tração. Com isso, devido à alternância ou repetição destes esforços, os materiais constituintes do pavimento, principalmente os revestimentos asfálticos, perdem progressivamente sua resistência, chegando a um instante em que as tensões atuantes se tornam superiores àquelas tensões que o material já enfraquecido poderia suportar e ocorre a fadiga do concreto asfáltico.

O fenômeno de fadiga significa um processo de deterioração estrutural o qual um determinado material sofre quando sujeito a um estado de tensões e de deformações repetidas ou oscilantes, ocasionando surgimento de fissuras cuja progressão resulta na fratura completa, depois de determinado número de repetições do carregamento (PINTO e PREUSSLER, 2002).

A fadiga ocorre devido às solicitações dinâmicas (ou repetitivas), em que níveis de tensão inferiores aos que provocariam a ruptura de um material sob carregamento estático, conduzem ao colapso estrutural. Assim, a fadiga seria um fenômeno de surgimento de trincas oriundas da ação intermitente das cargas móveis do tráfego, em que a sucessão de estados de tensão e deformação inferiores ao estado último de tensão e deformação do material ocasiona tal ruptura (YODER e WITCZAK, 1975).

A partir do século XIX, iniciaram-se estudos de caráter científico sobre a ruptura de materiais devido à fadiga. Inicialmente, pretendia-se compreender as razões pelas quais máquinas industriais rompiam, mesmo sob solicitações inferiores às de projeto. Em 1829, na Alemanha, foram estudados os efeitos de cargas repetidas em peças de máquinas. Seguiram-se outros estudos na tentativa de entender e interpretar os efeitos de cargas repetidas em componentes estruturais. Em 1849, na Inglaterra, foram executados ensaios de flexão repetida em peças metálicas para analisar o fenômeno da redução da resistência destas, após certo número de repetições. Em 1852, na Alemanha, foram realizados os primeiros ensaios laboratoriais para o estudo da fadiga de metais, com equipamentos especiais para

simular os efeitos dos carregamentos repetidos. Em 1867, formularam-se as primeiras leis fundamentais da fadiga para os metais (GONTIJO, 1980):

O ferro e o aço podem romper-se sob esforços unitários inferiores não somente à carga de ruptura estática, mas também ao limite elástico, desde que esses sejam repetidos um número suficiente de vezes.

A ruptura não terá lugar, qualquer que seja o número de solicitações, se a amplitude máxima entre os esforços máximos e mínimos for inferior a um determinado valor limite (Limite de Fadiga – Endurance Limit).

Este fenômeno, que em outras áreas da ciência (materiais e metalurgia, por exemplo) é considerada nos projetos há bastante tempo, no meio rodoviário, para misturas asfálticas, é de compreensão e aplicação relativamente recentes. Por volta da metade do século XX, é que se iniciaram os estudos considerando o fenômeno da fadiga na pavimentação asfáltica. Porter, em 1942, publicou um trabalho em que afirmava que os trincamentos que ocorriam nos revestimentos asfálticos se originavam das repetições de carga, as quais provocavam deformações reversíveis. Também afirmava que repetições de deflexões da ordem de 0,50 a 0,75 mm acarretariam a ruptura por trincamento dos pavimentos flexíveis. Outros trabalhos prosseguiram no estudo da fadiga na deterioração dos pavimentos, como as pesquisas de Hennes e Chen, em 1950, consideradas como os primeiros experimentos em materiais betuminosos, ensaios de cargas repetidas realizados em corpos-de-prova prismáticos suportados por molas foram submetidos a deformações de amplitude constante, e de Nijboer e Van Der Poel, em 1953 (GONTIJO, 1980).

Neste período, engenheiros rodoviários americanos, procurando melhor entendimento do comportamento dos pavimentos sob diferentes condições (tráfego, características das camadas do pavimento, etc), conceberam e construíram pistas experimentais em alguns estados dos E.U.A. (Maryland, Illinois e Idaho) para mostrar através de dados experimentais como, diferente das metodologias empíricas de projetos, um pavimento pode apresentar comportamento distinto sob diferentes situações de solicitação. Com a cooperação de departamentos rodoviários, indústrias de veículos de carga, companhias de óleo combustível, entre outros, construíram pistas experimentais sob a supervisão do HRB (*Highway Research Board*).

Destaca-se, neste sentido, o empreendimento da pista experimental construída em Malad, no estado Idaho. A WASHO (*Western Association of State Highway Officials*) patrocinou a construção de quase dois quilômetros de pavimento flexível, no qual se constatou que a ruptura ocorria por fadiga: elevadas deformações reversíveis seriam responsáveis por tal defeito, pois não se apresentavam significativas ocorrências de deformações permanentes nas camadas do pavimento (HRB, 1955).

Ainda na década de 50, Francis Hveem ressaltava que os pavimentos deveriam ser projetados embasados em alguma técnica que considerasse a repetição de carregamento. Entendia-se que mesmo os deslocamentos elásticos (ou deflexões) sendo relativamente pequenos, seriam estes os responsáveis pelos trincamentos observados nos revestimentos asfálticos (PREUSSLER, 1983).

GONTIJO (1980) realizou um excelente trabalho que apresenta e discute com maior embasamento o fenômeno da fadiga em materiais asfálticos. Realizando ensaios de flexão em placas apoiadas continuamente em lâminas metálicas sob atuação de cargas rolantes, o autor caracterizou o processo de fadiga em misturas asfálticas, apresentando relações entre modos de solicitação e parâmetros que interferem no comportamento destas em relação ao processo de fadiga.

O principal fator responsável pela consolidação da abordagem deste processo de fadiga nos projetos de pavimentos foi o surgimento da Mecânica dos Pavimentos, que, em poucas palavras significa o entendimento do pavimento como um sistema de múltiplas camadas, aplicando teorias da Mecânica dos Meios Contínuos, Mecânica dos Solos e Mecânica da Fratura, que possibilitam o estudo do comportamento deste meio estratificado, em termos de tensões e deformações. No Brasil, um marco para a concretização deste tipo de análise nos pavimentos foi o Convênio de Cooperação Técnica entre a COPPE/UFRJ e o IPR/DNER que, em 1977, introduziu equipamentos com funcionamento pneumático para a realização de ensaios de cargas repetidas (PINTO e PREUSLER, 2002). A partir de então, foram desenvolvidas teses, não somente na COPPE/UFRJ como em outras instituições do país, e foram publicadas pesquisas que vieram a contribuir para o

estudo da fadiga nos revestimentos asfálticos, principalmente em modelos laboratoriais através de equipamentos de cargas repetidas.

A Mecânica dos Pavimentos permite a análise do estado de tensões e deformações e considera a fadiga dos materiais constituintes no estudo da deterioração do pavimento sob a ação das cargas do tráfego (RODRIGUES, 1991).

O trabalho pioneiro no país sobre estudo em laboratório do comportamento do mecanismo de fadiga em misturas asfálticas e os modelos de fadiga de concretos asfálticos publicados por MEDINA *et al* (1981) contribuíram para o início da compreensão deste mecanismo responsável pelo principal defeito que ocorre nas rodovias nacionais. Esta pesquisa ressaltou a necessidade de se estabelecer modelos de fadiga para materiais de pavimentação não somente para a compreensão deste fenômeno, mas também como ferramenta nas análises e dimensionamentos.

Atualmente, há diversos modelos de fadiga que podem ser empregados nos projetos de pavimentos. A formulação de modelos consiste numa tentativa mais racional de previsão do comportamento das misturas asfálticas, entretanto, deve-se ter cuidado quando da aplicação de um modelo ou outro numa avaliação ou projeto de pavimento. Como geralmente tais modelos são de origem experimental, deve-se ter uma conveniente calibração para emprego em projetos. Há de se ter clareza das condições de modelagem antes da adoção de qualquer modelo, pois cada modelo resulta de processo cercado de fatores limitantes e seus fundamentos podem diferir (e muito) da situação real na pista: forma de aplicação de carga, temperatura, alterações de parâmetros de deformabilidade considerando o tempo, materiais utilizados (dosagem da mistura), entre outros aspectos (BALBO, 2000).

Durante muito tempo, o trincamento dos revestimentos asfálticos era atribuído às excessivas deformações plásticas do solo ou das camadas subjacentes à capa betuminosa: base ou sub-base (SANTOS, 2005). As pesquisas rodoviárias, na metade do século XX, demonstraram que os deslocamentos recuperáveis medidos nos pavimentos são os responsáveis pelo processo de fissuração dos revestimentos, mesmo não se observando deformações plásticas significativas.

O tráfego dos veículos automotores sobre os pavimentos é o principal responsável por sua deterioração. A atuação do tráfego origina deformações de caráter transitório em um pavimento, sendo que a magnitude de tais deformações é variável e depende de alguns fatores: geometria do carregamento, valor da carga, pressão de inflação dos pneus e posição do ponto de medida em relação à posição da carga (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Na Figura 2.1 está representada a distribuição das tensões no interior de um pavimento: devido ao carregamento oriundo do tráfego, surgem tensões de compressão e de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico. Devido ao caráter transiente das cargas do tráfego, as tensões apresentam um instante de pico e, após a passagem da carga, anulam-se. A partir da consideração deste estado de tensões repetidas é que se pode ter melhor compreensão do fenômeno da fadiga nos revestimentos asfálticos.

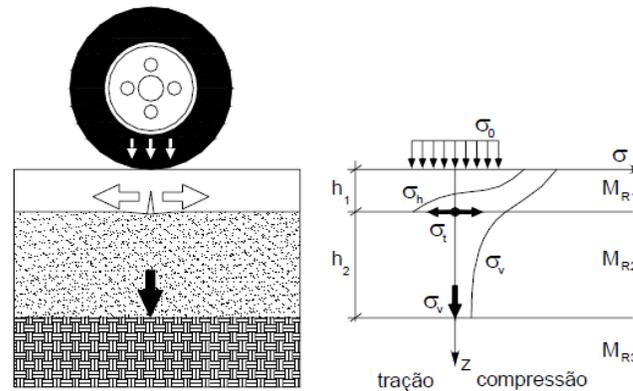


Figura 2.1: Tensões no interior de um pavimento (MEDINA e MOTTA, 2005)

A seguir, para explicar o mecanismo que governa o fenômeno da fadiga, recorrer-se-á a alguns fundamentos, explicados brevemente em algumas áreas do conhecimento como a ciência dos materiais e a metalurgia, que foram pioneiras no estudo deste fenômeno; em seguida retorna-se ao foco principal, que é a ocorrência em misturas asfálticas.

O estudo do processo de fadiga de peças estruturais iniciou-se no século XIX. Porém, estes eram de fundamentação empírica baseada em experimentos, o que

não permitia generalização dos resultados em relação às condições submetidas (carregamentos, materiais, etc). Só houve evolução em tais pesquisas quando se entendeu que os componentes estruturais seriam projetados com segurança e economia se a fadiga fosse entendida sob ponto de vista microscópico, de modo a permitir conhecimento e compreensão de seus estágios.

A partir daí, chegou-se à conclusão de que a fadiga é condicionada por deformações plásticas, microscópicas, que alteram a subestrutura do material: a plastificação localizada que gera pontos de “fraqueza” no interior da estrutura, o que pode conduzir à fratura. A fadiga é um problema que afeta qualquer componente estrutural submetido à solicitação dinâmica (de amplitude constante ou variável). A ruptura por fadiga é precedida por complexas variações microscópicas na estrutura de um material, que são de caráter cumulativo e irreversível (LUKÁS e KLESNIL, 1992).

Numa peça submetida a um esforço qualquer, a tensão total é, teoricamente, distribuída de modo homogêneo pela seção, e a peça resistiria a toda tensão que fosse inferior à máxima permitida. Todavia, falhas deste princípio ocorrem sob condições dinâmicas, mesmo sem que as tensões ultrapassem o limite superior da resistência em qualquer seção. FULLER (1977 *apud* MELLO, 2003) diz o seguinte:

“Tais fraturas, caracterizadas pela ausência de deformação plástica excessiva, mesmo nos materiais dúcteis, são chamadas de falhas por fadiga e causadas por deformação localizada. Na verdade, existe a formação de trincas muito pequenas que, sob a ação de uma anormal concentração de tensões cíclicas, crescem com o tempo e diminuem a vida útil do material que, não resistindo às solicitações, rompe-se bruscamente. A fadiga, portanto, tem origem em qualquer ponto de concentração de tensões e é sempre causada por uma fratura progressiva”.

Os principais fatores que influenciam a resistência à fadiga de um material são: solicitação (ou seja, os estados de tensão, frequências de carregamento e intensidade); geometria (do qual depende o gradiente de tensões); propriedades que descrevam o comportamento do material e o ambiente externo (a temperatura, por exemplo).

A amplitude da tensão aplicada faz em muito variar a vida de fadiga (N – número de ciclos de carga para a ruptura) de um material. Geralmente, quando as tensões aplicadas são altas, a peça ou componente estrutural rompe após poucas repetições de cargas. Porém, no caso de níveis baixos de tensões, a vida de fadiga torna-se “longa”. Teoricamente, há um nível de tensão (σ_0) abaixo do qual a vida de fadiga seria “infinita”, sendo denominada de “Endurance Limit” ou Limite de Fadiga (SANDOR, 1978; SHANLEY, 1967).

A Figura 2.2 ilustra o Limite de Fadiga numa relação entre tensões e número de ciclos, chamada de curva S-N (ou diagrama de Wöhler), que corresponde ao trecho assintótico de tal curva. Aproximadamente 90% da vida de fadiga de componentes metálicos, submetidos a carregamentos cíclicos, é consumida na fase de propagação estável da trinca. Este fenômeno ocorre em função da nucleação e propagação da trinca.

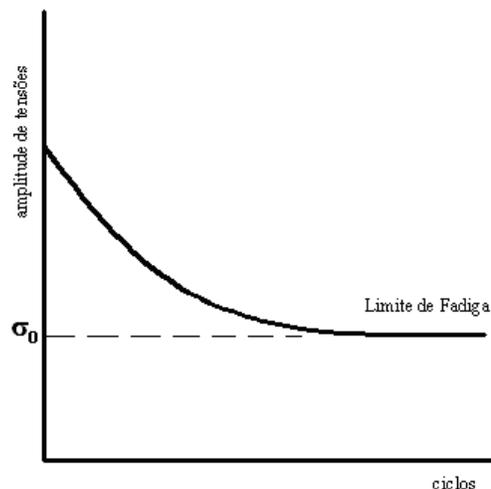


Figura 2.2: Limite de Fadiga (curva S-N) (SANDOR, 1978)

A nucleação da trinca ocorre em pontos de descontinuidade da massa em consideração, ou pode ser resultado de planos de deslizamentos (deslizamento de planos cristalográficos). É controlada por deformações plásticas cíclicas, sendo geralmente iniciada em locais em que haja concentrações de tais deformações, associadas a concentrações de tensões. Como a nucleação é afetada por heterogeneidades do material, pode haver uma dispersão significativa na vida de fadiga de amostras de um mesmo material. No entanto, para níveis mais elevados

de tensões há menor dispersão de resultados, devido a plastificação mais generalizada que “homogeneiza” o material.

As descontinuidades originam variedade de concentrações de tensões que podem ser de origem interna (resultado de microporosidades, macroporosidades, bolhas e vazios) ou externa (resultados de furos, chanfros, filetes, etc). São focos de concentrações de tensões e, por terem dimensões reduzidas, não influenciam a resistência do material sob ação de cargas estáticas. Por outro lado, solicitações repetidas ou cíclicas podem induzir aumento na área da descontinuidade, visto que uma fratura progressiva pode ocorrer. Com isto, uma tensão localizada pode superar a tensão média da seção do material, resultando no aumento da descontinuidade e conseqüente redução na seção resistente do material, gerando a fratura.

Os deslizamentos de planos cristalinos podem ocorrer sem que o material apresente qualquer defeito, o que significa, a princípio, que não há concentrações de tensões. O surgimento destes planos está associado à estrutura da massa ou a alguma movimentação oriunda da solicitação dinâmica; e buscam acomodar as deformações plásticas, as quais ocasionam um rearranjo na estrutura cristalina do material, provocando alterações nas suas propriedades mecânicas.

A trinca de fadiga, no caso de ausência de defeitos internos, inicia-se na superfície livre onde grãos cristalinos se encontram com menor restrição à deformação plástica. A ação do carregamento induz a formação de linhas de deslizamento, que por serem zonas de concentrações de tensão apresentam deformações plásticas intensas. Assim, surgem tensões cuja magnitude dá origem a trincas localizadas (microfissuras) que resultam na diminuição da seção resistente, o que conduz à fratura da peça ou material (CARVALHO, 1984 *apud* MELLO, 2003; BELTRÃO, 2005).

Estas microfissuras, sob o carregamento cíclico, crescem e unem-se. Porém, a maioria destas microfissuras interrompem seu crescimento quando atingem um comprimento da ordem de apenas algumas dezenas de micra. Geralmente, somente uma trinca propaga-se até a ruptura; esta trinca assume uma direção de

propagação perpendicular ao eixo da tensão que a resultou (LUKÁS e KLESNIL, 1992).

Logo, podem ser agrupados os dois principais micromecanismos de fratura como segue:

- dúctil, em que ocorre a nucleação, crescimento e coalescência de microfissuras internas, ou pela nucleação de microfissuras decorrentes da formação de planos de deslizamento;
- frágil, que é chamada de fratura por clivagem, onde ocorre a separação dos planos cristalinos. A fratura frágil pode ser precedida de processo de plastificação e crescimento de trinca dúctil.

Quanto ao tempo de falha, existem três fases principais em que a ruptura por fadiga se processa (LUKÁS e KLESNIL, 1992; MELLO, 2003; MIRANDA, 2003):

- **Fase I:** este primeiro estágio se processa com lentidão considerável, apresentando formação de núcleo de concentrações de tensões e conseqüente início da fratura. Caracteriza-se pelas variações iniciais na subestrutura do material, possui um limiar de propagação abaixo do qual os carregamentos não causam danos à peça trincada e a trinca não se propaga. Nesta fase, o crescimento da trinca ocorre de modo descontínuo, resultado de micro-mecanismos intergranulares que são sensíveis principalmente à carga média, microestrutura do material e ambiente.

- **Fase II:** caracteriza-se pela nucleação das microfissuras, sendo que este estágio se processa de forma mais rápida em relação ao I, com intensidade de fratura progressivamente maior. Porém, o crescimento da trinca é aproximadamente contínuo, sendo pouco sensível aos fatores que influenciam na Fase I (microestrutura, carga média, ambiente e espessura da peça). A peça ainda apresenta uma área resistente suficientemente adequada para suportar as tensões atuantes. A propagação da trinca ocorre em um plano perpendicular ao eixo da tensão de tração.

- **Fase III:** consiste na propagação da fissura, resultando na ruptura final. Este estágio se processa de forma extremamente rápida, com acentuada redução da área resistente. Caracteriza-se pela propagação instável da trinca, controlada pelas deformações plásticas concentradas na região da sua extremidade. Esta propagação é sensível à carga média e aos fatores que afetam a tenacidade do material (microestrutura, ambiente e espessura da peça).

Na Figura 2.3 estão ilustrados de forma esquemática os estágios da ruptura por fadiga. Observa-se, nesta figura, as estrias que são características do crescimento da trinca, principalmente resultantes da Fase II.

A falha por fadiga caracteriza-se basicamente por três áreas distintas: formação de microfissuras; propagação da fissura e fratura súbita. Enquanto as falhas de origem estáticas são visíveis e fornecem indicações aparentes da ruptura, pois a tensão precisa ultrapassar o limite de escoamento do material, as falhas por fadiga são súbitas e resultam na perda total do componente estrutural. Evitar uma falha relativa ao primeiro caso citado é algo amplamente dominado pela ciência da Mecânica, porém as rupturas por fadiga são fenômenos complexos, cujo conhecimento ainda não é completamente dominado (SANTOS, 2008).



Figura 2.3: Representação esquemática da fratura por fadiga

(CARVALHO, 1984 *apud* MELLO, 2003)

As misturas asfálticas são uma combinação proporcionada de ligante betuminoso com agregados (geralmente, pétreos), e, por vezes, algum aditivo ou material modificador (dope, polímeros, entre outros). O asfalto é um material termo-visco-elástico e esta característica se manifesta no comportamento mecânico,

influenciado principalmente pela temperatura de serviço e pelas cargas atuantes (intensidade, velocidade e tempo de carregamento). Os agregados utilizados nos revestimentos asfálticos devem apresentar propriedades que lhe confirmem capacidade de resistir às solicitações impostas, de maneira a apresentarem adequado nível de desempenho em serviço. Assim, esta combinação (agregado e ligante) deve resultar em estruturas duráveis, capazes de atender aos critérios de projeto: deformações plásticas e trincamento por fadiga (BERNUCCI *et al*, 2008).

O problema do trincamento dos revestimentos asfálticos por fadiga se deve à solicitação mecânica por flexão alternada das camadas do pavimento. Esta flexão repetida, principalmente nos casos em que as camadas granulares subjacentes apresentem baixos níveis de tensões confinantes atuantes, altera lenta e progressivamente o estado de tensões e deformações do meio estratificado, iniciando um processo de deterioração estrutural que resulta numa redução do nível de desempenho do pavimento (PINTO, 1991; PINTO e PREUSSLER, 2002).

Há também que se considerar a influência de alguns fatores que levam em conta a ação do tempo, pois à medida que a mistura asfáltica envelhece, torna-se paulatinamente mais frágil. Com isso, torna-se mais susceptível à ocorrência de ruptura por algum mecanismo como a fadiga (RODRIGUES, 1991).

A ruptura por fadiga nos revestimentos asfálticos é conseqüência de três processos básicos: **início do fissuramento** que consome apenas pequena parcela da vida de fadiga; **crescimento estável da trinca** que corresponde à maior parcela da vida de fadiga e **propagação instável da trinca**, que culmina na ruptura (MAJIDZADEH e RAMSAMOOJ, 1973).

Diferente do que pressupõem alguns modelos de previsão de fadiga, as misturas asfálticas apresentam, desde o início de seu carregamento, microfissuras que se distribuem em seu volume sendo visíveis apenas através de difração de Raios-X. Ou seja, tais modelos não se preocupam com o que ocorre internamente à mistura. Estas microfissuras, ao decorrer da ação das cargas repetidas, absorvem energia de deformação. Pela teoria de ruptura frágil de Griffith, de 1920, um material rompe

sob energia média de deformação bem menor que o valor requerido teoricamente para a ruptura, pois a energia de deformação se apresenta sob distribuição desuniforme, o que é atribuído às concentrações de tensões resultantes da presença das microfissuras, as quais por consequência resultam nas concentrações de energia de deformação. Aquelas que apresentarem acúmulo de energia acima de um valor mínimo terão seu comprimento aumentado a cada ciclo de carga, sendo que a primeira trinca a se tornar visível será aquela que resultou de alguma microfissura cuja orientação relativa às tensões solicitantes foi mais propícia ao crescimento por fadiga. Geralmente, em pavimentos flexíveis o surgimento desta primeira trinca ocorre em algum ponto onde o valor da deformação de tração, ϵ_t , for máximo. Este processo ocorre em função do crescimento de uma trinca que apresenta um comprimento infinitesimal até atingir a superfície do revestimento (RODRIGUES, 2003).

A caracterização do comportamento à fadiga dos materiais utilizados em pavimentação tem-se fundamentado na abordagem da Mecânica do Contínuo, predominantemente através dos modelos fenomenológicos (aqueles em que, através de resultados obtidos de ensaios, busca-se formulações para a interpretação do fenômeno), uma simplificação, cuja predominância pode ser explicada, em parte, pelo fato de o concreto asfáltico ser um material heterogêneo e haver uma grande quantidade de variáveis envolvidas. Entretanto, estes modelos apresentam limitações: seus parâmetros têm grande variabilidade em função do tipo de ensaio ou material, ou a grande limitação já citada anteriormente, de não considerar o trincamento em suas fases.

A Mecânica da Fratura (que será abordada no item 2.3) têm sido utilizada na busca de estimativa da fadiga mais coerente com a vida de serviço dos revestimentos, pois considera a natureza localizada do problema, as condições geométricas e de fronteira, e ainda se conforma tanto quanto possível à microestrutura do material. Fornece uma compreensão mais fundamentada da fadiga como mecanismo resultante de processos de deterioração e propagação da trinca, dando previsão da vida de fadiga mais consistente (RODRIGUES, 1991).

Como a fadiga em misturas asfálticas resulta da propagação de fissuras existentes, a vida de fadiga pode ser estimada a partir de alguma relação que exprima sua taxa de propagação. O crescimento destas fissuras ocorre devido às tensões de tração que provocam sua abertura, tornando-as arredondadas à medida que a zona plastificada se origina no entorno da extremidade; quando esta tensão é removida, o material sofre processo de contração induzindo tensão residual de compressão naquela zona plástica o que provoca seu refinamento. A ocorrência deste processo, de forma alternada (arredondamento e refinamento), resulta no crescimento da fissura que, conseqüentemente, atinge um tamanho crítico, no qual a ruptura acontece de forma brusca (RODRIGUES, 1991).

Um balanço energético na extremidade da trinca pode explicar mais formalmente seu crescimento nesta região: o trabalho das forças externas subdivide-se em energia elástica armazenada, energia superficial (formação de trincas) e energia de deformação (distorções estruturais irreversíveis). Portanto, a trajetória e velocidade de propagação da trinca dependem inteiramente deste balanço de energia.

Estudos propuseram modelos para a previsão da vida de fadiga em misturas betuminosas baseados na Mecânica da Fratura. Tais modelos utilizaram dados experimentais para efetuar a análise dos parâmetros, sendo ensaios de flexão em vigas os mais utilizados até então. Exemplos de tais estudos são: FOLIAS (1970); MAJIDZADEH *et al* (1976); ELMITINY (1980); JAYAWICKRAMA e LYTTON (1987) e RODRIGUES (1991). Entretanto, tais modelos ainda necessitam de calibração para serem aplicáveis às condições de determinada região, pois os parâmetros pertinentes às misturas asfálticas apresentam ampla variabilidade de características (RODRIGUES, 1995; PINTO, 1991).

A análise do trincamento por fadiga pode ser realizada por diversos modelos, sendo aqueles que buscam uma interpretação do fenômeno através de ensaios de laboratório, os mais comumente utilizados. Os dados obtidos desta forma são ajustados para se chegar a uma formulação que forneça uma previsão da vida de fadiga do material. No entanto, a tensão de tração (σ_t) na camada betuminosa não

é um parâmetro suficiente para descrever o comportamento à fadiga dos revestimentos devido a que não considera a evolução de trincas e/ou estado de tensões que se modifica durante tal trincamento.

A análise através da Mecânica da Fratura permite uma interpretação do processo do ponto de vista mais condizente com a realidade, na medida em que fornece ferramentas analíticas para a modelagem do trincamento, considerando sua progressão. Pelo fator de Intensidade de Tensões (K) se consideram os efeitos do modo de carregamento e da geometria do corpo-de-prova, bem como considera a modificação no estado de tensões resultante da progressão do trincamento. Mesmo assim, por mais racional que seja esta análise, há necessidade de calibração dos modelos à realidade onde venham a ser aplicados, pois alguns parâmetros são sensíveis às condições de ensaios. Como exemplo, MEDINA e RODRIGUES (1991) afirmam que “os parâmetros de fratura – A e n – da Lei de Paris se correlacionam aos parâmetros de ensaios de fadiga de misturas asfálticas em compressão diametral, sob cargas repetidas [...] para as misturas asfálticas estudadas no Brasil”.

Os carregamentos cíclicos produzem um dano que possui caráter intermitente e apenas na aplicação das cargas este dano aumenta. O processo de fadiga de uma mistura asfáltica depende de um número relativamente grande de variáveis, assim busca-se uma interpretação quantitativa do fenômeno através de ensaios laboratoriais.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica corresponde ao número de solicitações para que atinja determinado critério predefinido: no campo, corresponde ao trincamento conhecido como “couro-de-jacaré”; em laboratório, pode corresponder a um critério muitas vezes arbitrário, relacionado à capacidade de desempenho da amostra sob o carregamento repetido. Assim pode-se definir a vida de fadiga em termos de fratura (N_f), onde o critério é a ruptura total da amostra, ou em termos de vida de serviço (N_s), em que o critério corresponde à redução de algum parâmetro pertinente ao material, tal como redução da rigidez (MONISMITH, 1966).

A vida de fadiga da mistura asfáltica é influenciada por: características do material e do corpo-de-prova, condições ambientais e características do ensaio (carregamento, critério estabelecido no próprio ensaio, entre outros). Três grupos principais que englobam estes fatores:

- Fatores da mistura asfáltica: características dos agregados (origem, forma, granulometria) e do ligante asfáltico (teor, penetração, viscosidade, etc.), temperatura, compactação da mistura, quantidade de vazios e rigidez;
- Fatores do ensaio: carregamento (magnitude, tipo, frequência, duração, intervalo entre aplicações de carga, forma de carregamento, entre outros);
- Fatores ambientais: temperatura e umidade.

Um fator que é dos mais influentes na vida de fadiga das misturas é a rigidez do material. Geralmente, aumentos no valor do módulo de resiliência resultam em vida de fadiga maiores dependendo da forma do ensaio e da estrutura. Entretanto, não se deve considerar este fator isoladamente. Pesquisas indicam que misturas asfálticas diferentes, mas com valores de módulos de resiliência semelhantes apresentam diferentes expressões de vida de fadiga (MORILHA, 2004).

Outras pesquisas indicam que alguns ligantes asfálticos modificados (como por polímeros SBS ou borracha de pneu) possuem rigidezes relativamente menores que as dos ligantes convencionais, mas apresentam melhoria nas propriedades reológicas das misturas asfálticas, aumentando sua elasticidade e, por consequência, melhorando a vida de fadiga (BERNUCCI *et al*, 2002).

Há grande variabilidade de tipos e formas de carregamentos de ensaios de fadiga em misturas asfálticas, o que influencia e cria certa dificuldade de interpretação dos resultados. Algumas definições de tipos, modos, formas, condições de solicitação são importantes de serem feitas para melhor compreensão dos modos de previsão da vida de fadiga em laboratório (GONTIJO, 1980). Apresentam-se a seguir estas variantes, de modo a permitir esclarecer as diferenças entre estes.

Quanto à condição de aplicação de carga, têm-se os ensaios dinâmicos que são os que melhor reproduzem as condições de carregamento induzidas pelo tráfego de veículos. Estes são feitos sob duas formas principais de carregamento: senoidal e

pulsante. Existem ainda os ensaios sob carregamento estático, como os de fluência estática à compressão diametral (*creep*). Ensaios realizados sob esta forma de carregamento mostraram que é possível prever o desempenho da mistura asfáltica por meio de carregamentos estáticos, sendo que os modelos de fadiga obtidos por ensaios dinâmicos e estáticos mostraram concordância aceitável, em relação à dispersão experimental que ocorre em estudos laboratoriais (PINTO, 1991).

Os ensaios realizados através de cargas dinâmicas podem ser subdivididos de acordo com o processo empregado para desenvolver tensões e deformações. Alguns tipos de ensaios de fadiga e equipamentos mais comumente utilizados em laboratório são (TRICHÊS, 1994; PINTO, 1991; LOUREIRO, 2003; MORILHA, 2004; SANTOS, 2005 e ROSO, 2007: compressão diametral, flexão, tração direta, rotação, *Wheel Tracking Test* (WTT) e *Asphalt Pavement Analyzer* (APA).

Em relação ao tipo de carregamento, agrupam-se os ensaios de vida de fadiga em duas principais classes de solicitação: **Simples** e **Complexa**. A **Simples** é aquela em que os parâmetros de carga (forma, modo duração, nível, velocidade média, distribuição geométrica e intervalo entre solicitações sucessivas) são constantes durante a execução do ensaio. Já na **Complexa**, um ou mais parâmetros de carga podem variar, sendo que a maneira como estes parâmetros variam é denominada de História do Ensaio.

No caso de Solicitação Complexa em que apenas o nível de solicitação é variável, têm-se ensaios a níveis múltiplos ou níveis variáveis, dos quais são exemplos: ensaio **ordenado** (um nível constante é aplicado até determinada quantidade de solicitações N_1 , após a qual passa-se a outro nível de solicitações até um número de solicitações N_2 , e assim sucessivamente até a ruptura); ensaio em blocos **repetidos** (sequência de níveis é aplicada de maneira repetitiva até a ruptura, cada sequência contém dois ou mais níveis de solicitação); e o ensaio a **níveis múltiplos pseudo-aleatórios** (a probabilidade de um dos níveis de solicitação ser selecionado entre dois valores limites é constante e independente da ordem em que as solicitações anteriores foram aplicadas).

Apesar de, na prática, os pavimentos estarem submetidos à forma de solicitação complexa, os ensaios de laboratório de estudo da fadiga são, na maioria das vezes, realizados por solicitações simples, principalmente pela maior facilidade de execução, por ser facilmente reproduzível e por exigir custos menores em relação aos equipamentos necessários.

Os ensaios de fadiga também podem ser divididos quanto aos modos de solicitação que permitem impor ao material estudado: uma força cíclica cuja amplitude, constante ou variável, pode ser controlada (TC), ou uma deformação controlada (DC). Estes constituem os dois modos de solicitação mais comumente utilizados naqueles ensaios, que ainda podem apresentar outro modo de carregamento, chamado intermediário em que ocorrem variações de tensões e deformações.

O ensaio à tensão controlada (TC) caracteriza-se pela aplicação de tensão nominal (ou carga) mantida constante ao longo do ensaio. Porém, as deformações resultantes no corpo-de-prova aumentam no decorrer do ensaio: há aumento lento na amplitude da deformação durante a maior parte do ensaio, pouco antes da ruptura completa do corpo-de-prova verifica-se um aumento brusco nestas deformações. O critério de ruptura por fadiga, para este ensaio, é a fratura completa do corpo-de-prova; assim a fadiga é definida em termos de vida de fratura (N_f). A vida de fadiga é bastante influenciada pela temperatura e frequência de solicitação, que influenciam na rigidez.

Já os ensaios a deformação controlada (DC), um determinado nível de deformação é mantido constante ao longo do ensaio, sendo que a carga aplicada ao corpo-de-prova é reduzida ao longo do tempo. No início do ensaio, a tensão sofre uma redução acentuada, após o qual esta redução torna-se mais suave durante a maior parte do ensaio. O critério de fadiga, neste modo de ensaio, não está associado a fratura completa do corpo-de-prova, ou seja, não apresenta um critério manifesto. Usualmente é definido um número de solicitações necessário para provocar um arbitrário estágio de ruína; assim o ensaio se correlaciona com uma determinação de vida de serviço (N_s). Alguns critérios utilizados são: redução do módulo de rigidez (com diminuição em torno de 50%); redução da carga (necessária para

manter a deformação constante) à metade do valor inicial aplicado ou aparecimento da primeira fissura (GONTIJO, 1980; LOUREIRO, 2003; MORILHA, 2004).

GONTIJO (1980) afirmou que: “uma idéia intuitiva da diferença entre os tipos de ensaio pode ser feita imaginando o que se passa após a aparição de uma primeira fissura no corpo-de-prova: enquanto num ensaio à tensão controlada, esta fissura enfraquece o material e as cargas repetidas subseqüentes provocam uma rotura extremamente rápida, num ensaio à deformação controlada, a presença de uma fissura não implica necessariamente um aumento de tensão nas partes do corpo-de-prova que permanecem ‘intactas’. Neste último tipo de ensaio, a fissura se propaga mais lentamente”.

Outras considerações acerca destes dois tipos de ensaios são:

a) apesar dos níveis iniciais de tensão e deformação serem praticamente os mesmos em ambos os ensaios, após um número qualquer de aplicações de carga, os níveis para o ensaio sob tensão controlada serão superiores. Isso implica que este ensaio representa uma condição mais severa para a fadiga (à tensão controlada tem-se uma avaliação mínima da vida de fadiga, enquanto que à deformação controlada tem-se maior estimativa da vida de fadiga);

b) o comportamento para os dois modos de solicitação depende da espessura e módulo de rigidez do revestimento asfáltico, como do módulo das camadas subjacentes: o ensaio à tensão controlada relaciona-se aos pavimentos que apresentam revestimentos asfálticos espessos ou que possuam rigidezes elevadas em relação às camadas subjacentes, pois estes resistindo às cargas aplicadas controlam a magnitude das deformações. Já o ensaio à deformação controlada, representa uma situação referente aos revestimentos menos espessos (inferiores a 5 centímetros) ou que possuam rigidez não tão superior às camadas inferiores do pavimento; tais revestimentos têm suas deformações condicionadas pela deformação das camadas de suporte (PINTO, 1991; HUANG, 2004).

MONISMITH (1966) afirma que independente da rigidez do concreto asfáltico, quando a espessura do revestimento é da ordem de 1 polegada (2,54 centímetros),

a deformação de tração é praticamente constante. Revestimentos asfálticos delgados têm pouca influência sobre as deformações a que está sujeito. Também afirma que quando a espessura do concreto asfáltico aumenta, a sua rigidez tem efeito reduzido sobre as tensões, mas influencia significativamente a magnitude das deformações de tração desenvolvidas. Sugere que: ensaios à tensão controlada sejam utilizados para definir o comportamento de misturas em pavimentos que apresentem revestimento em concreto asfáltico de espessura de 4 polegadas (cerca de 10 centímetros) ou superior; ensaios à deformação controlada sejam utilizados em revestimentos de espessuras iguais ou inferiores a 2 polegadas (cerca de 5 centímetros); e que espessuras de revestimento entre 2 a 4 polegadas, sejam interpretadas por algum ensaio intermediário a esses dois modos principais;

c) no ensaio sob tensão controlada, algumas vezes, admite-se erroneamente que a tensão que atua no corpo-de-prova é constante. À medida que se aplicam golpes, o material sofre dano progressivo traduzido na formação e crescimento de trincas. Com isso, as tensões internas no corpo-de-prova são alteradas com redução na sua rigidez. Corresponde a complexa evolução do estado de tensões interno, que é bastante diferente daquele formulado através da Teoria da Elasticidade, utilizada para o cálculo das tensões por simplicidade. Deve-se salientar que o carregamento é sim constante durante todo este ensaio, mas as tensões oriundas de tais cargas sofrem variações à medida que o processo de fadiga altera a estrutura interna do material.

d) no caso de ensaios cujo critério de fadiga é o número de repetições de carga necessário ao aparecimento da primeira fissura, os resultados sob tensão controlada e deformação controlada agrupam-se numa mesma reta, no gráfico de vida de fadiga ($N = f(\epsilon)$) (SOLIMAN, 1976 *apud* PINTO, 1991).

e) COOPER e PELL (1974 *apud* JACOBS, 1995) afirmam que para amostras idênticas, mas com rigidezes diferentes, ensaiadas sob tensão controlada, a vida de fadiga é maior para aquelas amostras com maiores rigidezes; para ensaios a tensão controlada o envelhecimento da mistura asfáltica atua de modo a aumentar a rigidez e a vida de fadiga, enquanto que para ensaios a deformação controlada, o

aumento da rigidez devido à oxidação do ligante asfáltico resulta numa redução da vida de fadiga;

f) os ensaios de tensão e deformação controladas representam situações particulares de carregamento nas rodovias. Geralmente, o que ocorre na prática é um carregamento intermediário entre estas solicitações. Assim, pode-se definir outro modo de solicitação denominado intermediário.

2.2.

Trincas em pavimentos asfálticos

As trincas em pavimentos asfálticos constituem um dos defeitos que mais contribuem para a redução de níveis de serventia das rodovias. Apesar do trincamento em si não constituir defeito que mais ponha em risco o conforto e a segurança do usuário quando em pequena porcentagem da área, as trincas podem progredir dando origem a defeitos mais graves, como as panelas. Pelo fato de permitirem também a entrada de água nas camadas inferiores pode propiciar afundamentos localizados. O trincamento indica um comprometido estrutural do pavimento, na medida em que sua ocorrência não se deve meramente a um problema localizado no revestimento asfáltico, mas sim à deficiência no conjunto de camadas que constituem o pavimento.

A determinação da gravidade das trincas existentes no revestimento asfáltico constitui um dos critérios para se avaliar o projeto de reforço de um pavimento. Como já mencionado, uma fissura pode evoluir, com o tempo, para um defeito que represente um comprometimento ainda maior do pavimento. Isto constitui a principal razão para a busca da compreensão do trincamento, de maneira a se adotar práticas que sejam realmente eficazes para evitá-lo ou, pelo menos retardar o máximo possível sua ocorrência, o que se almeja num projeto de restauração ou reforço de pavimento.

2.2.1.

Origens

Um revestimento asfáltico é concebido de modo a ter uma flexibilidade suficiente para minimizar a ocorrência de trincas, sob ação do tráfego e das intempéries. Porém, o grau de flexibilidade deste revestimento sofre influência constante de diversos fatores endógenos e exógenos, como os ciclos de variação da temperatura ambiente, características dos agregados, rigidez do concreto asfáltico, teor de ligante na mistura, compactação das camadas subjacentes, etc. (DOMINGUES, 1993).

O surgimento de trincas nos revestimentos, na maioria das vezes, está relacionado a questões estruturais do pavimento, em que este apresenta, com o passar do tempo, redução na capacidade de suportar as cargas do tráfego ou pode estar relacionado à própria composição da mistura asfáltica. Entretanto, há de se ter cautela na identificação de prováveis causas deste defeito, pois o aparecimento das trincas num revestimento pode depender de diferentes fatores, pois reside no conhecimento das causas do defeito a chave para o estabelecimento da prática adequada de reabilitação do mesmo.

Como dois dos fatores de maior influência no trincamento dos revestimentos asfálticos estão: a rigidez da mistura asfáltica e a sensibilidade do ligante asfáltico às variações de temperatura. Ligantes considerados “duros” ou de elevada viscosidade são mais susceptíveis ao surgimento de fissuras, e o envelhecimento da mistura pela oxidação do ligante asfáltico, causa um aumento na sua rigidez resultando na diminuição da flexibilidade, com perda da capacidade de absorção ou distribuição das tensões decorrentes das solicitações impostas ao pavimento.

A origem do trincamento condiciona o seu tipo, assim diferentes trincas podem ser oriundas de causas diferentes, dentre as quais se podem citar (DOMINGUES, 1993):

- colapso da capa asfáltica que pode ser devido à solicitação repetida dos veículos, comprometimento da capacidade de suporte de alguma camada do pavimento, rigidez elevada e envelhecimento do ligante asfáltico;

- contração da capa asfáltica por variação térmica (baixas temperaturas);
- propagação de trincas existentes numa camada até a camada asfáltica mais superficial;
- defeitos construtivos, principalmente em acostamentos; ação erosiva da água devido à drenagem ineficiente ou diferença de rigidez entre materiais de faixas contíguas;
- deficiência na aderência entre o revestimento asfáltico superficial e a camada imediatamente inferior do pavimento.

A origem das trincas num pavimento flexível está condicionada às deformações de tração na camada asfáltica. MOLENNAR (1984 apud RODRIGUES, 1991), mostra que a deformação máxima de tração na camada asfáltica superior de um pavimento, carregado somente por uma carga vertical distribuída ocorre em qualquer ponto desta camada, através da expressão:

$$\frac{E_2}{E_1} * h_1 > 0,133 \quad \text{eq. (2.1)}$$

Onde:

- E_1 : módulo de elasticidade da camada asfáltica;
- E_2 : módulo de elasticidade da camada de base;
- h_1 : espessura da camada asfáltica, em metros.

O trabalho citado afirma ainda que um tipo de trincamento superficial longitudinal prematuro, que se origina na superfície próximo às trilhas-de-roda, eventualmente é observado nos pavimentos, novos ou recapeados, e que isto não pode ser explicado pelos métodos tradicionais de cálculo de tensões e deformações, pois estes levam em conta apenas forças verticais, desprezando as forças cisalhantes. Procurando estudar a influência das forças cisalhantes, bem como a localização da deformação máxima de tração, MOLENAAR (1984) realizou pesquisa que evidencia as forças cisalhantes centrípetas, sob os pneus dos veículos, como uma das principais causas de trincamentos originados na superfície dos pavimentos. Algumas conclusões desta pesquisa:

- o trincamento em pavimentos que possuem base granular e revestimento asfáltico com espessura inferior a 0,20 m, pode ser considerado como originado na fibra inferior da capa (camada asfáltica) até o topo;
- o trincamento em pavimentos que possuem base granular e revestimento asfáltico com espessura superior a 0,20 m, pode ser considerado como originado no topo da capa e progredindo até a base;
- o trincamento longitudinal observado em pavimentos que possuem uma camada de base que apresente módulo de resiliência elevado (cimentada) é mais provável que tenha se iniciado no topo do revestimento;
- o trincamento transversal observado em pavimentos que possuem camada de base cimentada pode ser devido a efeitos climáticos ou à fadiga da base cimentada, sendo geralmente trincamento por reflexão.

FREITAS (2002) aponta três principais causas do trincamento das camadas asfálticas de pavimentos:

- processo de fadiga;
- reflexão de trincas, provenientes de defeitos de camadas subjacentes ao revestimento;
- baixas temperaturas (ou variação térmica), em que as misturas asfálticas apresentam um comportamento frágil, e as trincas se propagam relativamente rápido. Sob temperaturas elevadas, as trincas se propagam apresentando deformações plásticas na sua extremidade.

O trincamento também pode ter origem a partir de defeitos construtivos ou de projeto: recalques diferenciais ou expansão do terreno de fundação (POLETI, 2005).

O fenômeno da fadiga constitui uma das principais origens (senão a principal) do trincamento em pavimentos no Brasil, onde a maior parte do território não registra temperaturas muito baixas (ou fortes variações térmicas), como em países de clima temperado, o que induziria trincas térmicas. O trincamento por reflexão é continuidade do processo de fadiga, com diferença de que nova capa betuminosa é sobreposta à camada asfáltica envelhecida e trincada, com função de aumentar a

vida útil do pavimento, aproveitando a estrutura existente, mas que fica sujeita à concentração de tensões nas trincas existentes na camada antiga.

RICARDO (2003) relata muitos estudos desde a primeira metade do século XIX propondo modelos de interpretação do trincamento de corpos elásticos ou elasto-plásticos tais como: WESTERGAARD (1939) estudou o campo de tensões na extremidade de uma trinca; HEAD (1951) propôs a primeira lei de propagação de trinca; IRWIN (1957) apresentou considerações incorporadas ao modelo proposto por Head, apresentando uma definição de taxa de liberação de energia G , que quantifica a energia disponível para promover um incremento numa trinca. Outros importantes trabalhos sobre este tema se seguiram: FROST e DUGDALE (1958); PARIS (1960); IRWIN (1960); BARENBLATT (1962) e ELBER (1968; 1970 e 1971), etc.

BIRGISSON *et al* (2003) afirmam que o crescimento de trincas em concreto asfáltico ocorre de maneira descontínua. Na Figura 2.4 está apresentado um padrão típico de crescimento descontínuo de trincas em misturas asfálticas. Durante a fase de formação do dano, nas microfissuras (onde o dano não é associado ao início do trincamento ou processo de propagação de trinca) pode ocorrer um processo de recuperação (*healing*) após um período de repouso. Na Figura 2.4, **a** representa o comprimento da trinca e **N** corresponde ao número de aplicações de carga no ensaio. No processo de propagação da trinca, esta recuperação (ou resselagem) não é observada. Este mesmo trabalho ilustra a distribuição da tensão de tração na vizinhança de uma trinca sujeita a uma tensão unidimensional (Figura 2.5).

Na Figura 2.5 mostra-se que a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) assume que as tensões na extremidade da trinca são infinitas (nesta figura: σ_0 é o limite máximo de tensão; **a** corresponde à metade do comprimento da trinca; **r** corresponde ao comprimento da chamada zona de processo e σ_{FA} é uma tensão uniforme). Segundo modelo desenvolvido na Universidade da Flórida, para melhor entendimento da propagação de trincas em misturas asfálticas, baseado na Mecânica da Fratura, denominado de “HMA Fracture Mechanics”, as tensões são

distribuídas de modo a não ultrapassarem a tensão limite da mistura, considerada como sua resistência à tração.

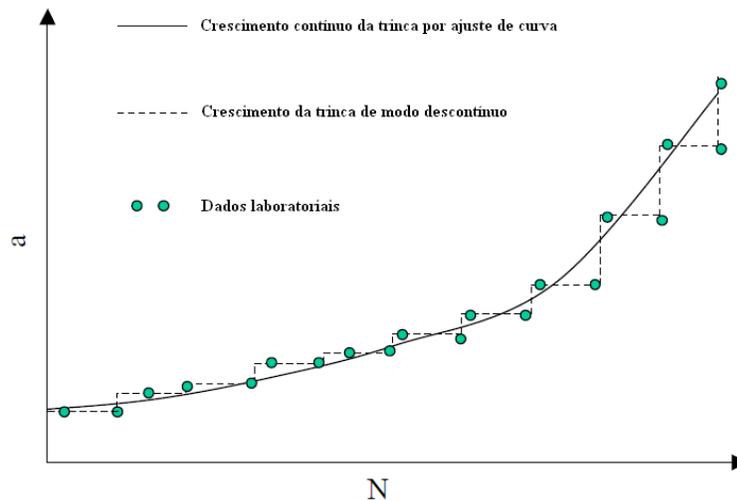


Figura 2.4: Propagação de trincas em mistura asfáltica (BIRGISSON et al, 2003)

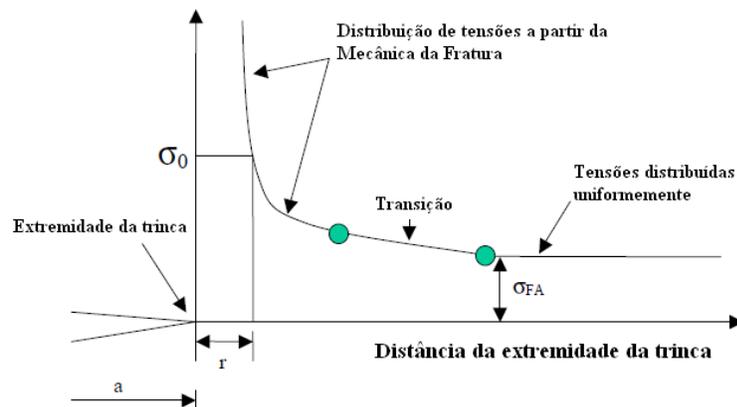


Figura 2.5: Distribuição de tensões na extremidade da trinca (BIRGISSON et al, 2003)

JACOBS *et al* (1995) afirmam que o crescimento de trincas em concreto asfáltico é descrito por três processos que são paralelos no tempo: crescimento da trinca na região coesiva (ligante asfáltico), crescimento na interação agregado-ligante (ou seja, separando o agregado do ligante) e um processo de retardo no crescimento, cuja explicação é a presença de agregados ou de vazios na região da propagação da trinca. De acordo com LYTTON *et al* (2002), este processo de “recuperação” e retardo no crescimento da trinca (*healing*, em inglês ou *resselagem*, em português)

ocorre devido ao período de repouso (seja intervalo entre cargas), quanto maior este intervalo de tempo maior será a resselagem e maior a vida de fadiga. A significância da resselagem tem sido demonstrada através de investigações em campo onde pode ser verificada alguma recuperação da rigidez durante o período de repouso. As diferenças no crescimento de trincas em concreto asfáltico são decorrentes das contribuições de cada um destes subprocessos em relação ao processo global, que é o trincamento.

O entendimento dos processos que ocasionam o trincamento em revestimentos asfálticos teve sua fundamentação originada em estudos de outras áreas da ciência. Entretanto, leis utilizadas para descrever o fenômeno são aplicáveis às misturas asfálticas por simplificações ou adaptações, introduzindo-se parâmetros condizentes com o comportamento destes, obtidos experimentalmente. Com isso, têm-se leis obtidas por modelos racionais, mais realísticos que provêm de uma fundamentação embasada teoricamente, mas que ainda fazem uso de parâmetros obtidos em laboratório para adequar tais modelos ou leis ao comportamento das misturas asfálticas (JACOBS, 1995; JACOBS, MOLENAAR, HOPMAN, 1995; RICARDO, 2003).

2.2.2.

Tipos de trincamento

JACOBS (1995) afirma que em geral ocorrem dois tipos de trincamentos em pavimentos:

- trincas que se iniciam na fibra inferior do concreto asfáltico e crescem em direção à superfície do revestimento;
- trincas superficiais, que são causadas por forças cisalhantes que ocorrem no contato entre o pavimento e os pneus.

A norma DNIT (005/2003 TER) apresenta a seguinte definição para o defeito chamado de fenda em pavimentos flexíveis: “Qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que conduza a aberturas de menor ou maior porte, apresentando-se sob diversas formas [...]”.

Tais formas são classificadas em fissuras e trincas, sendo a diferença entre estas, estabelecida através de critério visual: as fissuras são aquelas de largura capilar, somente perceptível à vista desarmada a uma distância inferior a 1,50 m, e que não causam problemas funcionais ao pavimento. Já as trincas são fendas facilmente visíveis a vista desarmada, podendo-se apresentar sob a forma isolada ou interligada.

Dentre os tipos de trincas existentes em pavimentos flexíveis, DOMINGUES (1993); e MENEZES e MENEZES (1996) e BELLINGER e MILLER (2003) listam:

a) trincas por fadiga: são devidas às repetições do tráfego. Inicialmente ocorrem trincas de pequena severidade, na direção do eixo da rodovia, e geralmente aparecem nas trilhas-de-roda. Nas severidades média e alta, estas trincas se interconectam, formando malhas de formato irregular denominada de couro-de-jacaré. No estágio final de evolução, tem-se a origem do defeito conhecido como panela. É considerado um defeito estrutural. Como causas têm-se: tráfego excessivo; comportamento plástico do ligante ou deformabilidade das camadas subjacentes (Figuras 2.6, 2.7 e 2.8);

b) trincas tipo bloco: este defeito divide a superfície do revestimento em peças retangulares, causado pela contração da camada asfáltica devido à alternância diária de temperatura, revelando o enrijecimento desta camada. Também podem ser de reflexão. Os blocos retangulares geralmente apresentam áreas entre 0,1 a 10 m²;



Figura 2.6: Trinca de fadiga de baixo nível de severidade (BELLINGER e MILLER, 2003)

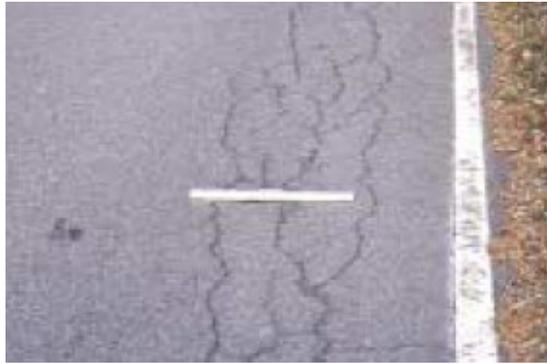


Figura 2.7: Trinca de fadiga de médio nível de severidade
(BELLINGER e MILLER, 2003)



Figura 2.8: Trincas de fadiga (tipo “couro-de-jacaré”) de alto nível de severidade
(DNIT 005/2003)

c) trincas de borda: geralmente ocorrem em rodovias cujos acostamentos não são pavimentados. Consiste na ruptura, normalmente situada ao longo de uma faixa de 30 a 60 cm da borda do pavimento ou da junção onde o pavimento sofreu alargamento. Caracteriza-se por trinca retilínea ou por área trincada que ocorre próximo da junção entre pista e acostamento (ou alargamento). Como causas principais estão: construção defeituosa do acostamento (ou alargamento); diferença de rigidez entre materiais constituintes do alargamento e do pavimento antigo; compactação insuficiente; ação erosiva da água, drenagem deficiente;

d) trincas longitudinais: são aquelas paralelas à linha central do pavimento, tendo como prováveis causas recalques diferenciais ou a contração da capa

asfáltica; não sendo associadas às cargas do tráfego. Geralmente, quando originadas a partir do efeito de contração da camada asfáltica, estas trincas iniciam-se a partir da face superior desta camada, propagando-se em direção à face inferior;

e) trincas transversais: apresentam direção perpendicular à linha central do pavimento, podendo ter como causa principal a contração da capa asfáltica, devido a baixas temperaturas ou enrijecimento do asfalto. É classificado como defeito tanto funcional (origina irregularidades e compromete a qualidade em relação ao conforto e segurança dos usuários) como estrutural (relacionada à capacidade de carga do pavimento);

f) trincas parabólicas: apresentam o formato de meia-lua ou quarto crescente, geralmente com extremidades indicando a direção do tráfego. Causas principais: baixa resistência da mistura asfáltica e deficiência na aderência entre capa e camada subjacente do pavimento. Resultam, geralmente, das forças cisalhantes oriundas das cargas do tráfego, principalmente em trechos de frenagem ou aceleração.

g) trincas de reflexão: serão discutidas no item 2.2.3, a seguir.

2.2.3.

Trincamento por reflexão (mecanismo)

PAIS e PEREIRA (1999) afirmam que o dimensionamento de reforço de pavimentos é realizado considerando como critérios de ruína o aparecimento de trincas por fadiga nas misturas betuminosas e o aparecimento de deformações permanentes na zona de passagem das rodas dos veículos, não sendo habitual a consideração da reflexão das trincas. Assim, o pavimento reforçado que contém trincas prévias, apresenta reduzida resistência estrutural. Quando uma seção é solicitada à flexão ou ao cisalhamento, as camadas de reforço estão particularmente mobilizadas para resistir aos esforços resultantes. Um pavimento reforçado apresenta inúmeras zonas com reduzida capacidade resistente e não

contempladas nos métodos habituais de dimensionamento de reforço, mas que são as responsáveis pela ruína prematura de tais reforços.

O trincamento por reflexão ocorre em situações de restauração de pavimentos onde a camada asfáltica antiga apresenta trincas, que elevam localmente as tensões, dissipando energia sobre uma área bastante reduzida. Devido a estas concentrações de tensões, a velocidade da propagação destas trincas torna-se gradualmente maior na medida em que, com o tempo, o revestimento envelhece e perde sua flexibilidade, devido ao aumento de rigidez do asfalto. Fatores ambientais também influenciam o surgimento de trincas por reflexão, principalmente em regiões com intensas variações de temperatura, mais pronunciado para locais que apresentam baixas temperaturas, com enrijecimento das misturas asfálticas (BERNUCCI et al, 2008).

De acordo com MENEZES e MENEZES (1996), trincas de reflexão são reaparecimentos do padrão de trincamento antigo na superfície do revestimento asfáltico novo. Afirmam que: “quando o revestimento é solicitado, as cargas são dissipadas por atrito interno. Ocorrerão zonas de tração, onde o ligante será altamente tracionado, fazendo com que haja um escorregamento das mistelas de asfalto (mistela é um aglomerado de moléculas em uma solução coloidal), umas em relação às outras. Retirada a carga, o ligante sofrerá um fluxo plástico (ou elasto-plástico), no sentido contrário, sendo que as mistelas não retornam à sua posição original, o que ocorreria se o ligante tivesse comportamento elástico, havendo sempre uma deformação residual, da ordem de 10^{-8} mm. Na sucessão de aplicações de cargas, haverá um aumento progressivo no deslocamento das mistelas de asfalto, dentro dos óleos maltenos, produzindo um enfraquecimento e o conseqüente rompimento das fibras. Novas fibras de asfaltos sofrerão este processo, refletindo essas trincas gradativamente até a superfície. À medida que as trincas aumentam, diminui a resistência à aplicação de novas cargas, o que aumenta a deflexão na camada, gerando novas trincas com mais rapidez”.

Uma breve conceituação de alguns termos mencionados na citação anterior: o ligante asfáltico (CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo) apresenta como componentes os asfaltos, maltenos e as resinas. Os asfaltos são a parte sólida

do CAP e confere a este rigidez e coloração típicas (marrom ou preta). A quantidade de asfaltenos presentes no ligante asfáltico tem grande efeito nas características reológicas do CAP: quanto maior o seu percentual, mais duro e mais viscoso será o ligante. Em geral, os asfaltenos correspondem de 5 a 25% do CAP. Os maltenos correspondem à parte oleosa do CAP, sendo responsável pelas propriedades plásticas e viscosidade. Em geral, os maltenos constituem de 45 a 85% do CAP. As resinas são sólidas ou semi-sólidas marrom-escuras, tendo característica de forte adesividade. Envolvem os asfaltenos e impedem que estes floculem (BERNUCCI *et al*, 2008; BOTARO *et al*, 2006).

LUTHER *et al* (1976 apud RODRIGUES, 1991) através de ensaios de laboratório em placa de concreto asfáltico apoiada em um pavimento rígido com juntas, submetida a cargas repetidas indicam que a reflexão de trincas é resultado de ruptura por fadiga do material asfáltico, sobre uma região enfraquecida (trinca ou junta).

O processo de reflexão é um processo de fadiga, onde deformações plásticas sucessivas e cumulativas enfraquecem o material, e a perda de resistência da camada asfáltica se revela superficialmente no aumento das deformações elásticas, ocorrendo o crescimento e interligação de fissuras existentes devido à repetição de ciclos de carga-descarga. Por simplicidade, no meio técnico rodoviário se afirma que são os deslocamentos recuperáveis que condicionam a vida de fadiga de um revestimento asfáltico.

A ocorrência do trincamento por reflexão está associada à incapacidade das misturas asfálticas suportarem elevadas concentrações de tensões e deformações a que são submetidas nas extremidades das trincas subjacentes, pelos movimentos diferenciais, na direção horizontal e vertical, quando da passagem das cargas ou em decorrência de movimentações de natureza térmica (ciclos de contração e retração térmica). A reflexão de trincas é um processo de crescimento gradual de microfissuras que já existem na mistura asfáltica desde a construção, e que se transformam em trincas por meio do crescimento induzido pelas movimentações geradas a cada ciclo de cargas (PAIS e PEREIRA, 1999; HAAS e JOSEPH, 1989; VIERA *et al*, 2000).

VILCHEZ (2002) afirma que o mecanismo de reflexão de trincas é o seguinte: através do descolamento da camada asfáltica da camada trincada subjacente, há propagação horizontal, até que haja um redirecionamento vertical da trinca. Existindo uma perfeita ligação entre as camadas, a propagação será vertical desde o início pelo fato de ocorrer concentração de tensões na região da extremidade da trinca, provocando a abertura de uma nova trinca por fadiga na camada de reforço.

RODRIGUES (1991) afirma que uma trinca subjacente a uma camada asfáltica pode atuar de duas formas independentes para provocar a sua reflexão: numa se existe ligação razoável entre a camada de reforço e o pavimento existente, ocorrerá concentração de tensões na região da extremidade da trinca, provocando a abertura de nova trinca por fadiga na camada de reforço. Mesmo que tal concentração não ocorra, a deflexão máxima sob a roda se dará na posição da trinca, fazendo as tensões máximas de tração sob o reforço ocorrerem neste ponto, tornando-o o lugar mais provável para o surgimento e propagação de trincas, como efeito indireto da trinca existente.

MARONI et al (1992) afirmam que a reflexão de trincas existentes para uma camada superior está ligada ao fato que, sob efeito de solicitações diversas, as bordas da trinca existente movimentam-se e transferem este movimento ou criam concentrações de tensões dele proveniente à camada superior, por processo de fadiga inicia ali uma trinca que cresce rapidamente em direção à superfície. O estudo da reflexão das trincas requer um conhecimento adequado de como e qual a natureza da movimentação das bordas da trinca. A reflexão de trincas é bastante complexa, influenciando não só o tipo de solicitação sobre o pavimento já trincado, mas também o tipo de estrutura que compõe o pavimento, a natureza e a forma da trinca existente, a distância entre as bordas da trinca, velocidade, amplitude, etc.

VILCHEZ (2002) afirma que estudos teóricos e evidências experimentais indicam que a reflexão de trincas é afetada pelos seguintes parâmetros:

- espessura da camada asfáltica de recapeamento e suas propriedades mecânicas, em função da temperatura;

- cargas do tráfego (frequência e pressões dos pneus) e a distribuição das solicitações com a hora do dia e com a temperatura;
- tensões e deformações a que a camada de recapeamento está submetida em função da movimentação térmica da camada trincada subjacente;
- configuração das trincas do pavimento existente e a sua severidade;
- estrutura do pavimento existente: espessuras e propriedades resilientes das camadas;
- condição de interface entre a camada de recapeamento e o pavimento trincado subjacente, incluindo a presença eventual de camadas especiais intermediárias (membranas de asfalto-borracha, asfalto-polímero, geossintéticos, entre outras).

A passagem da carga do tráfego sobre uma trinca do pavimento antigo gera três pulsos de alta concentração de tensões, que se propagarão através da camada de reforço: um pulso correspondente à máxima tensão cisalhante; outro correspondente ao máximo momento fletor (tração) e o último, novamente correspondente às tensões cisalhantes, tendo direção oposta àquela primeira. Tais pulsos ocorrem durante pequeno intervalo de tempo, aproximadamente 0,05 s (PEREIRA, 2002).

O fenômeno da reflexão de trincas pode ser explicado pela mecânica da fratura. Através do conceito do fator de intensidade de tensões, o comportamento da trinca pode ser representado por três movimentos cinemáticos independentes com relação às bordas da trinca, segundo os deslocamentos resultantes: abertura (associado a esforços de tração, resultado de carga aplicada normalmente ao plano da trinca), cisalhamento (movimentação de corte normal à trinca, as faces da trinca deslocam-se uma em relação a outra perpendicularmente à sua borda) ou rasgamento (deformação por corte paralelo à fenda, deslocamento das faces da trinca paralelamente à sua borda), denominados respectivamente de modos I, II e III de carregamento ou propagação de trincas.

Cada um dos movimentos da trinca é associado a um campo de tensões na vizinhança imediata da extremidade da trinca, que gera o fator de intensidade de

tensões, que determina a taxa e velocidade de propagação da trinca. Este Fator está relacionado à carga, geometria e configuração da trinca e rigidez do material. Na Figura 2.9 estão ilustrados os modos I, II e III de movimentações de trinca.

O trincamento de reflexão produzido pelo tráfego é provavelmente uma combinação dos modos I e II de deslocamento da trinca, embora o modo III possa também acontecer se, por exemplo, a trinca não é normal à direção do fluxo do tráfego. Por simplificação, o modo III é muitas vezes desconsiderado nas análises de trincamento. O principal fator responsável pelos movimentos das bordas das trincas, para uma determinada solicitação, é a estrutura do pavimento onde aquelas se encontram, definida pela rigidez dos materiais e espessuras das camadas.

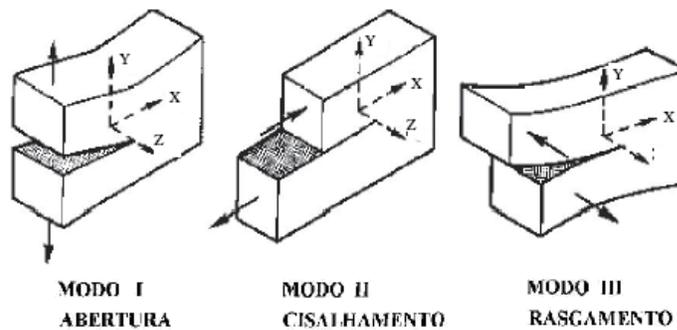


Figura 2.9: Movimentações possíveis de uma trinca (O'DOWD, 2003)

Portanto, a reflexão de trincas pode ser considerada como um processo de trincamento por fadiga. Nas rodovias brasileiras a principal causa de sua ocorrência são associadas ao tráfego e surgem nas trilhas de rodas do pavimento, espalhando-se após atingirem a superfície, nas direções laterais. A interface entre a camada de reforço e o pavimento existente é o local preferencial para se aplicar um tratamento visando o controle da reflexão de trincas (RODRIGUES, 1991). Como exemplo de soluções utilizadas para tal objetivo tem-se: camadas intermediárias de absorção de tensões; modificação na composição da camada asfáltica de recapeamento, com uso de ligantes modificados ou pela combinação de ambas as soluções (DEGEIMBRE e RIGO, 1989).

2.3. Mecânica da Fratura

A Mecânica da Fratura, que é a mecânica do contínuo aplicada a sólidos elásticos trincados, tem sido utilizada com sucesso para a análise de ensaios de ruptura (fadiga) em misturas asfálticas.

MONTEIRO (2003) afirma que a mecânica da fratura difere da abordagem tradicional da mecânica dos meios contínuos por considerar a existência de imperfeições ou falhas no elemento estrutural. Na Figura 2.10 estão representados esquematicamente os conceitos nos quais tais análises se baseiam, quando aplicadas ao estudo de revestimentos de pavimentos, sendo que: a) o material é considerado satisfatório se sua resistência à tração for superior às tensões geradas devido ao carregamento externo; b) a resistência à fratura substitui a abordagem tradicional, levando em consideração variáveis como tamanho, forma e localização, além das cargas externas aplicadas.

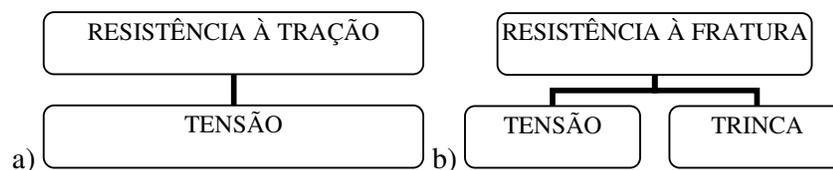


Figura 2.10: Comparação entre a Mecânica dos Meios Contínuos e a Mecânica da Fratura (ANDERSON, 1995 apud MONTEIRO, 2003)

IRWIN, em 1957, propôs um modelo global baseado na conservação de energia do corpo, onde definiu um termo G denominado de taxa de liberação de energia, determinada pela razão entre a energia potencial, oriundas de deformações sofridas pelo corpo, e a área da trinca (MONTEIRO, 2003) dada por:

$$G = \frac{d\pi}{dAB} \quad \text{eq. (2.2)}$$

Onde:

- G : taxa de liberação de energia;

- $d\pi$: energia potencial de deformação;
- dA : área da trinca;
- B : largura do corpo.

Então, uma fratura ocorre quando o valor de G atinge um valor considerado como crítico, G_c , que pode ser uma medida da resistência à fratura de um corpo.

De acordo com RODRIGUES (1991), a moderna Mecânica da Fratura teve seu desenvolvimento a partir dos trabalhos de Irwin (1957), através do conceito do Fator de Intensidade de Tensões. Com base num dos trabalhos de Griffith, constatou que todo o comportamento de uma trinca poderia ser interpretado por meio de três movimentos cinemáticos independentes em relação às faces da fratura. Estes seriam os modos de deslocamentos que descreveriam o comportamento de uma trinca no estado mais geral de tensões elásticas, cada movimento da trinca é associado a um campo de tensões no entorno da extremidade da trinca (RODRIGUES, 1991). Tais modos de ruptura foram apresentados na Figura 2.9 e uma breve conceituação dos princípios básicos da Mecânica da Fratura é:

- Modo I, em que as superfícies são separadas na direção y , com deformações simétricas em relação aos planos xz e xy ;
- Modo II, em que as superfícies se deslocam uma em relação à outra na direção x e as deformações são simétricas em relação ao plano xy e anti-simétricas em relação ao plano xz ;
- Modo III, em que as superfícies se deslocam uma em relação à outra na direção z e as deformações são anti-simétricas em relação aos planos xy e xz .

A presença da trinca colabora para aumento significativo das tensões na região circunvizinha, podendo acarretar para materiais dúcteis deformações plásticas como forma de dissipação de energia antes de ocorrer a propagação da trinca. Para materiais frágeis, observa-se a propagação da trinca com pouca ou nenhuma deformação plástica.

ARAÚJO (1991 apud BRAZ, 1997) afirma que a Mecânica da Fratura surgiu a partir do trabalho de Irwin que utilizou equação que descreve o campo de tensões à frente de uma trinca achatada e vazante, contida numa chapa infinita, sob ciclos de cargas remoto uniforme, deduzidas por WESTERGAARD em 1958, expressa por:

$$K = \sigma_t \sqrt{\pi c} \quad \text{eq. (2.3)}$$

Onde: K é o Fator de Intensidade de tensão, σ_t é a tensão de tração atuante, c é o comprimento da trinca e $\pi = 3,14159\dots$

Foram definidos três fatores de intensidade de tensão: K_I , K_{II} e K_{III} correspondentes àqueles modos de movimentação da trinca (modos I, II e III). Os Fatores de Intensidade de Tensões governam a magnitude das tensões locais na vizinhança da extremidade da trinca. Sua utilidade está em que dois corpos, com trincas de diferentes tamanhos e sob diferentes formas de carregamento, mas, que sejam idênticos nos demais aspectos, terão campos de deformação idênticos próximo à extremidade da trinca se os fatores de intensidades de tensões forem iguais, ou seja, tais fatores consideram, de modo implícito, as cargas aplicadas, além da geometria do problema.

Para um plano cujo ângulo de abertura (θ) seja igual a 0° , a tensão (τ) para a qual a trinca se propaga nos modos I, II e III será:

$$\tau_\theta = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \tau_{r\theta} = 0 \text{ (correspondente ao modo I)} \quad \text{eq. (2.4)}$$

$$\tau_\theta = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}, \tau_{r\theta} = 0 \text{ (correspondente ao modo II)} \quad \text{eq. (2.5)}$$

$$\tau_\theta = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}, \tau_{r\theta} = 0 \text{ (correspondente ao modo III)} \quad \text{eq. (2.6)}$$

Sendo r a distância do ponto considerado à extremidade da trinca.

O mecanismo de crescimento de trincas por fadiga pode ser explicado em termos clássicos do balanço de energia na extremidade da trinca. O trabalho das forças externas é dividido, na região da extremidade da trinca, em energia elástica armazenada, energia superficial requerida para se formar trincas e energia de deformação requerida para distorções estruturais irreversíveis. A velocidade da trinca se propagar e o caminho por ela seguido dependem inteiramente deste balanço de energia na sua extremidade.

PARIS e ERDOGAN (1963) estabeleceram uma lei de propagação de trinca por meio de trabalhos experimentais, na qual consideram para a taxa de crescimento de uma trinca o fator de intensidade de tensões e característico de um material como segue:

$$\frac{da}{dN} = \frac{(\Delta K)^4}{M} \quad \text{eq. (2.7)}$$

ou

$$\frac{dc}{dN} = A(\Delta K)^n \quad \text{eq. (2.8)}$$

Onde:

- a ou c: comprimento da trinca;
- N: número de ciclos de carga;
- A ou M: parâmetros ou constantes do material considerado;
- ΔK : variação do Fator de Intensidade de Tensões ($\Delta K = K_{MÁX} - K_{MÍN}$);
- n: expoente numérico, inicialmente encontrado por valor igual a 4.

RODRIGUES (1991) afirma que o valor de n pode variar entre 2 a 100, dependendo do material, das condições ambientais e do nível de deslocamento.

ARAÚJO (1991 apud BRAZ, 1997) afirma que a Equação 2.8 tem sido aplicada com sucesso a diversos materiais, porém falha na capacidade de representação de

toda extensão da curva de propagação, mostrada esquematicamente na Figura 2.11, sendo aplicável somente na região II da curva.

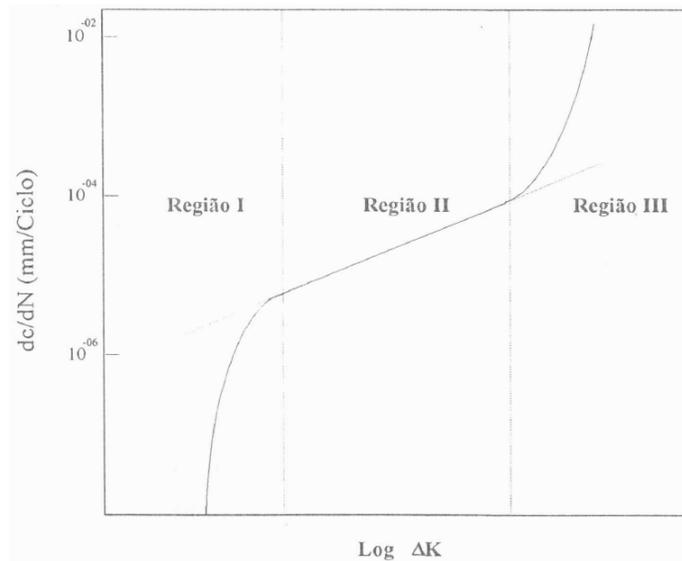


Figura 2.11: Curva esquemática de dc/dN versus K (ARAÚJO, 1991 apud BRAZ, 1997)

BRAZ (1997) aplicando a Mecânica da Fratura no estudo de misturas asfálticas com emprego de técnicas da tomografia computadorizada encontrou discrepâncias entre os valores obtidos através da modelagem realizada com os valores experimentais, explicadas pela propagação aleatória da trinca dentro dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios. Através da tomografia observou que a trinca, no ensaio de compressão diametral, sempre passa pela região central, sem ter tendência definida ao longo do diâmetro total, condicionada pelos agregados maiores, o que dificulta a obtenção do comprimento real, ocasionando imprecisão nas medidas das constantes da lei de Paris estimadas por modelagem.

2.4.

Métodos de combate à reflexão de trincas em pavimentos

2.4.1.

Camadas de reforço de pavimentos flexíveis

Em pavimentos a serem restaurados, principalmente aqueles em que o revestimento se apresenta muito degradado, um dos principais objetivos é controlar ou retardar o trincamento por reflexão, visto que trincas existentes nas camadas antigas subjacentes ao novo revestimento a ser executado condicionarão a vida de serviço deste. Muitas vezes, o revestimento antigo trincado origina defeitos até de severidades maiores, o que pode comprometer o pavimento como um todo, sendo necessária, em casos extremos, a reconstrução do mesmo. Também o reforço de pavimento de concreto degradado com misturas asfálticas se enquadra nesta condição, visto a presença das juntas das placas como elemento de reflexão.

Têm-se buscado alternativas de restauração de modo a aumentar a vida útil de pavimentos, através de técnicas que inibem ou retardam o trincamento das novas camadas de revestimento asfáltico. Aumento na espessura do revestimento asfáltico, otimização da rigidez e da resistência das misturas asfálticas por adição de fibras ou ligantes modificados por polímeros, sistemas de alívio de tensões ou sistema composto de reforço são utilizados para tal objetivo (BONDT, 2000). Algumas técnicas serão descritas neste capítulo, de modo apresentar, de forma sucinta, alguns dos métodos mais utilizados no combate ao defeito do trincamento por reflexão em pavimentos.

2.4.1.1.

Recapeamento convencional

A técnica mais simples de restauração de pavimentos flexíveis é através do recapeamento asfáltico convencional, onde se procura limitar a reflexão das trincas com aumento da espessura da camada de revestimento. É recomendado a

fresagem da camada antiga de revestimento de modo a buscar reduzir a severidade e a energia de propagação das trincas existentes (BERNUCCI *et al*, 2008). Por esta técnica não se busca impedir a ocorrência da reflexão de trincas, mas apenas retardar sua chegada à superfície do novo revestimento: o aumento da espessura da camada asfáltica diminui a velocidade de propagação e a severidade das trincas que eventualmente atinjam o recapeamento, pois a maior espessura aumenta a rigidez do revestimento, reduzindo as tensões (VILCHEZ, 2002; BERNUCCI *et al*, 2008).

Entretanto, o aumento da espessura do recapeamento asfáltico é, na maioria das vezes, ineficaz principalmente em pavimentos em que o revestimento antigo esteja severamente trincado com estrutura do pavimento comprometida ou sob ação de tráfego pesado. O aumento da espessura, segundo RODRIGUES (1991), é mais eficaz para atrasar o espalhamento horizontal das trincas do que para atrasar a ascensão através de sua espessura. Assim, o potencial para a reflexão das trincas existentes seria alto, e a nova camada de revestimento não é capaz de suportar a propagação das trincas por muitos ciclos de carga, sendo alternativa de restauração economicamente ineficaz (HAAS e JOSEPH, 1989).

2.4.1.2.

Materiais com característica inibidora ou retardadora das trincas

As misturas asfálticas em geral devem apresentar características capazes de fornecer uma resposta adequada à solicitação. Por exemplo, devem ser suficientemente flexíveis para prevenir trincas de origem térmicas em temperaturas baixas, e serem rígidas para prevenir deformações plásticas excessivas. Para condições agressivas de serviço (tráfego intenso e crescente e condições adversas de clima), os asfaltos convencionais nem sempre apresentam desempenho desejável. Na tentativa de aperfeiçoar ou melhorar o desempenho dos asfaltos várias técnicas e materiais estão sendo desenvolvidos, sendo incorporados aos ligantes, como modificadores de asfaltos ou como camada intermediária de modo a trabalhar solidariamente à camada do pavimento na qual forem inseridos (AMARAL, 2000; BERNUCCI *et al*, 2008).

Como alternativa ao recapeamento simples, na conservação e restauração de pavimentos, deve-se adotar medidas que sejam eficazes à reflexão das trincas, pois esta afeta significativamente o desempenho dos pavimentos.

HAAS E JOSEPH (1989) apontam duas alternativas:

- uso de camadas intermediárias de baixo módulo (ou rigidez baixa), visto que a Mecânica da Fratura estabelece que qualquer tentativa de reduzir a reflexão de trincas deve focar a redução da concentração de tensões na extremidade da trinca, e teoricamente um meio de baixo módulo (camada de alívio de tensões) acima do trincamento existente reduziria a velocidade de propagação da trinca;
- uso de geogrelhas ou geotêxteis com potencial para controlar a propagação de trincas e,
- uso de camadas intermediárias de materiais compósitos, que envolvem a combinação de material de baixa rigidez com geossintéticos, sendo que a camada de material compósito atua como uma espécie de atenuador das tensões entre o pavimento existente e a camada asfáltica sobrejacente e o geossintético suporta as tensões remanescentes.

Os sistemas anti-reflexão de trincas atuam inibindo, retardando ou impedindo a propagação de trincas já existentes na estrutura do pavimento restaurado. Especialmente o uso de camadas intermediárias (usualmente entre a camada antiga e nova de revestimento, ou entre sub-base e base) atua absorvendo e/ou redistribuindo tensões, ou mesmo impedindo que as trincas atinjam a camada de revestimento novo.

2.4.1.2.1.

Revestimento asfáltico com uso de ligantes modificados

Pode-se prevenir a ocorrência prematura de defeitos em pavimentos flexíveis através da consideração, no projeto de dimensionamento, de revestimentos que proporcionem melhores características de deformação e durabilidade, o que aumenta a vida útil. Uma forma é a utilização de misturas asfálticas modificadas,

aumentando a vida de serviço de pavimentos através da: inclusão de fibras (diversos materiais têm sido usados, como vidro e metal); adição de agentes antioxidantes; adição de polímeros e borracha de pneus moída (BONDT, 1999; VILCHEZ, 2002; BERNUCCI *et al*, 2008).

Um dos objetivos da modificação das misturas asfálticas é diminuir sua capacidade de absorção de tensões, tornando tais misturas menos rígidas (com módulos de resiliência relativamente baixos), aumentando a capacidade de recuperação elástica e a resistência à tração e em consequência melhorando suas propriedades reológicas e a durabilidade (VILCHEZ, 2002; BERNUCCI *et al*, 2008).

Apresentam-se a seguir alguns destas modificações ou modificadores:

a) Polímeros

A norma DNER EM-396/99 define polímero como: “[...] substância macromolecular que resulta da união de moléculas simples (monômeros)”. É uma macromolécula constituída por unidades estruturais repetidas ao longo da sua cadeia, resultado da união seqüenciada de moléculas menores, os monômeros, que podem ter origem natural (madeira, cortiça, lã, por exemplo) ou origem artificial (BERNUCCI *et al*, 2008).

Estudos vêm demonstrando que a incorporação de polímeros ao asfalto melhora seu comportamento elástico, contribuindo de forma significativa para a resistência à deformação permanente e fadiga, além de melhorar a resistência à oxidação (BRINGEL *et al*, 2005).

A classificação dos polímeros pode ser feita em função de vários critérios. É apresentada a seguir a classificação em função do comportamento às variações térmicas (AMARAL, 2000):

- termorrígido: quando submetido a ação do calor sofre endurecimento irreversível; temperatura depende da estrutura química. São exemplos: resina epóxi e poliuretano;

- termoplástico: quando submetido a ação do calor, amolece de forma reversível, endurecendo por resfriamento. São exemplos: polietileno e PVC;
- elastômero: sofre processo de decomposição antes de amolecer, sob ação do calor; apresenta propriedade elástica. São exemplos: SBR E BAN;
- elastômero-termoplástico: sob ação do calor apresenta comportamento do termoplástico, e para temperaturas baixas apresenta comportamento elástico. São exemplos: SBS e EVA.

O uso de polímeros em ligantes asfálticos melhora as propriedades das misturas, em relação principalmente à (AMARAL, 2000; VILCHEZ, 2002):

- susceptibilidade térmica: adequar a rigidez da mistura às variações de temperatura (nas temperaturas elevadas aumenta a resistência a deformação permanente, e nas baixas reduz a tendência ao trincamento por retração);
- aumento da vida de fadiga: favorece a menor absorção de tensões pela camada asfáltica, melhora o comportamento elástico reduzindo o trincamento por fadiga, aumentando a vida de serviço do pavimento;
- melhoria da aderência asfalto-ligante: alguns agregados apresentam características hidrofílicas elevadas e o asfalto tem propriedades hidrofóbicas. A aderência do sistema agregado-asfalto é afetada pelo fato do agregado estar seco ou não, o que é melhorado com o uso de polímeros nas misturas.

A utilização de polímeros em asfaltos deve ser criteriosa, respeitando-se as características dos materiais envolvidos na mistura. Cada polímero possui características peculiares que podem melhorar ou não as propriedades dos ligantes, devendo-se conhecer a compatibilidade do sistema para sua adequada utilização, o que pode ser feito do seguinte modo, segundo CONSTANTINO *et al* (1995):

[...] pela colocação de uma série de amostras em tubos de alumínio com uma das extremidades fechada, e mantidos a temperatura de cerca de 170°C durante 48 horas. Após este período, o tubo é retirado do forno e resfriado subitamente, para a retirada de pequenas porções para análise do ponto de amolecimento. Uma dispersão de polímero é dita monodispersa, e

portanto, compatível, quando o grau de separação de fase, expresso pela diferença de ponto de amolecimento entre as partes superior e inferior do material, se aproxima de zero. As misturas que possuem diferenças superiores a 2°C não atendem a este critério e são ditas incompatíveis.

Dois dos polímeros mais utilizados como modificadores de asfalto, no Brasil, são:

- SBS (Estireno-Butadieno-Estireno): é um polímero industrial (elastômero-termoplástico) que apresenta comportamento linear no processamento a quente e atua como borracha vulcanizada a temperatura ambiente, propiciando ao ligante asfáltico aumento na resistência ao craqueamento e de adesão. Sua composição (relação estireno-butadieno) influencia bastante as propriedades do ligante, geralmente o aumento da proporção de estireno dificulta a incorporação ao betume (VILCHEZ, 2002; BRINGEL, 2007).

- EVA (Etileno-Acetato de Vinila): suas propriedades são influenciadas pelo peso molecular e pelo teor de acetato de vinil, sua compatibilidade com o asfalto melhora com o aumento no teor de acetato de vinil, e é dificultada em meio com altos teores de asfaltenos. Principais vantagens como modificador de ligante asfáltico são: a resistência à flexão e estabilidade térmica (BRINGEL et al, 2005).

b) Asfalto-borracha

Resultado da mistura do asfalto com determinados tipos de borracha, havendo dois processos de incorporação às misturas asfálticas: seco e o úmido. No processo seco, as partículas de borracha são utilizadas em substituição parcial de agregados pétreos, originando o denominado “agregado-borracha” ou concreto asfáltico modificado com adição de borracha (rubber modified asphalt concrete). No processo úmido, a borracha é triturada e as partículas finas são adicionadas ao ligante aquecido, de modo a reagir com este, resultando no denominado asfalto-borracha (rubber-asphalt) (AMARAL, 2000; BERTOLLO e FERNANDES JÚNIOR, 2002).

A adição de pequenas quantidades de borracha às misturas asfálticas reduz o módulo de resiliência, porém não se observa redução proporcional em relação a resistência à tração, o que pode indicar maior resistência à fadiga de tais misturas (BERTOLLO e FERNANDES JÚNIOR, 2002).

Um dos maiores benefícios do asfalto-borracha está relacionado a questões ambientais, pois tais borrachas são em geral provenientes de pneus inservíveis. Isto representa um grande avanço na tentativa de se solucionar problemas de disposição de resíduos sólidos. Só no ano de 2008 foram produzidos 61,5 milhões de unidades de pneus no país (ANIP, 2008).

Outras vantagens obtidas pela utilização dos sistemas asfalto-borracha:

- aumento da resistência à oxidação, da durabilidade e da flexibilidade, com melhorias na resistência a reflexão de trincas;
- aumento na resistência às deformações permanentes e ao trincamento por fadiga e térmico;
- redução de ruído pela passagem de veículos (BERTOLLO e FERNANDES JÚNIOR, 2002; VILCHEZ, 2002).

2.4.1.2.2.

camadas intermediárias

Esta técnica envolve a execução de uma camada com características apropriadas a resistirem às movimentações no revestimento (antigo e novo, a ser executado) ou em outras camadas do pavimento, que geram tensões que são responsáveis pela reflexão de trincas em pavimentos. Estas camadas intermediárias promovem uma verdadeira quebra de vínculo entre as camadas (subjacente e sobrejacente) do pavimento, funcionando de modo análogo a uma barreira de proteção. São descritos alguns exemplos a seguir: Sami, camada de alívio de trinca e camada de desvio,

a) SAMI

Dá-se o nome de “SAMI” (Stress Absorbing Membrane Interlayer - Camada Intermediária de Alívio de Tensões) à camada que apresenta característica de absorção ou alívio de tensões devido ao emprego de ligante modificado, que melhora a recuperação elástica do revestimento sobrejacente, minimizando as deformações que resultariam na propagação das trincas existentes. A principal finalidade é gerar uma interface que apresente baixa rigidez cisalhante, com baixo

valor de módulo, o que reduz as tensões acima das trincas existentes de modo a transmitir menores deformações à camada superior de revestimento. Sua função é absorver boa parte da energia gerada no processo de propagação das trincas (HAAS et al, 1989; BONDT, 2000; PEREIRA, 2002; BERNUCCI *et al*, 2008).

O mecanismo deve-se à capacidade de armazenamento dos níveis elevados de energia de deformação distorcional (relacionada às deformações cisalhantes) induzidos pelas cargas nas extremidades das trincas do pavimento existente (RODRIGUES, 1991). Esta técnica de controle do trincamento por reflexão pode ser constituída por: microrrevestimentos asfálticos e tratamentos superficiais, com asfalto-borracha ou com polímeros (BERNUCCI *et al*, 2008).

MOLENAAR (1989) afirma que o asfalto-borracha, bem como os geotêxteis não atuam como um reforço da camada asfáltica do pavimento, mas como uma camada de separação e a prevenção da propagação de trincas à camada de recapeamento, ocorre porque esta passa a comportar-se independente da estrutura antiga.

b) Camada de alívio de trincas

São camadas de misturas asfálticas ou granulares, de granulometria aberta com poucos finos, sobre as quais é executado o reforço asfáltico. Apresentam grandes vazios interconectados que dissipam o movimento oriundo das camadas subjacentes. Devido a este elevado volume de vazios, essas camadas reduzem as tensões na camada sobrejacente de reforço, interrompendo a propagação das trincas (HENSLEY, 1980 apud PEREIRA, 2002; BERNUCCI *et al*, 2008).

c) Camada de desvio, bloqueio de trincas ou camada dissipadora de tensões

Esta camada funciona como barreira à propagação das trincas do revestimento antigo ao mais recente ou podem atuar de modo análogo às armaduras em concreto armado, absorvendo tensões e resistindo aos deslocamentos que provocariam a reflexão das trincas existentes. As camadas de desvio de trincas atuam de modo a redirecionar a trinca existente, para a direção horizontal. Isto ocorre devido ao desligamento localizado entre tal camada e os revestimentos existentes em ambos os lados da trinca.

Contudo, há de se ressaltar que apesar de serem geralmente reconhecidos os benefícios da inserção de camadas intermediárias para melhorar o desempenho de pavimentos, deve-se ter cautela no seu emprego. Cada sistema intermediário a ser utilizado em pavimentos deve ser adotado para objetivos específicos. Nem todos produtos ou materiais possuem, por exemplo, função de reforço. São encontrados relatos contraditórios dos benefícios desta utilização: alguns revelam grandes vantagens no emprego destes sistemas, outros apontam que os benefícios alcançados não são relevantes a ponto de justificar o emprego. Usos inadequados podem originar impactos negativos no desempenho do pavimento, por isso deve-se ter o conhecimento do mecanismo de contribuição de cada sistema (AL-QADI, 2008).

BONDT (1999) avalia o efeito da inserção de reforço de geossintéticos em camadas de revestimento através de análise estrutural por esforços em vigas. Considerando um comprimento inicial de trinca existente na estrutura, deduz equações de esforços solicitantes, na seção transversal da viga, em duas componentes: uma devido à capacidade de suporte da seção remanescente (acima da trinca) e outra devido à contribuição do reforço. Este deve ter elevada rigidez axial por unidade de comprimento de modo a proporcionar considerável redução das tensões de tração no material asfáltico, e boa aderência entre o reforço e o meio circundante é fundamental. A aderência entre tais camadas é quantificada através da resistência ao arrancamento.

BAEK e AL-QADI (2006) simularam situações de reforço em vigas através do método de elementos finitos, considerando a inserção de fibras de aço, utilizando o modelo de zona coesiva, aceito como realístico na abordagem do trincamento em misturas asfálticas. Sob análise elástica, o tempo para o início do trincamento para a viga reforçada foi cinco vezes maior que para a mesma situação sem reforço, além de ser constatada significativa redução na velocidade de propagação da trinca (cerca de duas a seis vezes). Para análise sob o ponto de vista da viscoelasticidade, o ganho no controle da reflexão de trincas foi de aproximadamente duas vezes.

O principal material empregado com tais finalidades, atualmente, são os geossintéticos, que podem ser de vários tipos, geralmente compostos à base de polímeros ou fibras de vidro (PEREIRA, 2002). Na utilização do geossintético, há de se considerar previamente a severidade dos defeitos existentes e suas causas. Cada tipo de geossintético apresenta características diferentes, sendo adequados ou não para cada situação. Deve-se analisar a situação funcional e estrutural do pavimento para proceder à escolha do tipo mais apropriado ao tratamento, aumentando satisfatoriamente a vida útil do pavimento, em termos econômicos e de serventia ao tráfego.

Dentre os geossintéticos existentes no mercado, os mais utilizados para fins de reforço de pavimentos rodoviários são os geotêxteis e as geogrelhas. Este assunto será abordado no item 2.5, a seguir.

Independente do tipo de solução adotada como camada intermediária, de combate à reflexão de trincas em pavimentos flexíveis, deve ser respeitada as características dos materiais a serem empregados e instalá-los de forma conveniente. Sem a adequada aderência entre a o revestimento existente e o sobrejacente, a camada anti-reflexão não absorve tensões nem inibe deformações que potencialmente originarão ou permitirão a propagação de trincas (YAMAOKA *et al*, 1989).

2.5.

Geossintéticos como camada de reforço de pavimentos

2.5.1.

Histórico

A utilização, em escala comercial, de geossintéticos na Engenharia ocorreu após o desenvolvimento da indústria de polímeros, especialmente a partir da década de 1920. Na primeira metade do século XX, alguns tipos de tecidos, precursores dos geotêxteis, foram aplicados em obras hidráulicas.

A guerra tem sido uma das molas do desenvolvimento tecnológico. No campo da pavimentação, é bem patente esse fato. Durante a Segunda Guerra Mundial, a Engenharia Militar Britânica, a título de experiência, utilizou na construção da estrada Tamu-Kalewa - Burma, tecido de juta impregnado com asfalto para isolar a camada superficial de solo contra a penetração de água, com bom desempenho. Na mesma época, pesquisadores do Corpo de Engenheiros dos EUA no Mississippi, comprovaram que o sistema utilizado pelos britânicos era válido e que uma camada de argila compactada em condições ótimas de umidade e impermeabilizada tinha condições de suportar o tráfego de caminhões por vários meses.

Algumas pesquisas nos Estados Unidos, posteriormente, visaram a exploração da potencialidade deste sistema de pavimento envolvido com membranas, denominado por “Membrane Encapsulated Pavement-Sections” (MEPS), ou “Seção de Pavimento Envolvida em Membrana”. Essa foi uma das primeiras tentativas de utilizar um material para melhorar o desempenho de pavimentos, uma das pioneiras no desenvolvimento de geossintéticos aplicados à pavimentação (PEREIRA, 1978).

A introdução dos geossintéticos como camadas intermediárias em pavimentos deveu-se principalmente ao desempenho inadequado dos materiais tradicionais expostos ao crescente aumento das cargas do tráfego nas rodovias, nas décadas de 50 e 60 do século XX. A rápida deterioração das rodovias mostrou a necessidade de metodologias mais eficazes de reabilitação de pavimentos. O uso de camadas intermediárias como reforço de pavimentos foi iniciado em 1930, com emprego de fibras de algodão nos estados da Carolina do Sul e do Norte, EUA (AL-QADI, 2008).

No caso específico de reforço à tração de camadas asfálticas, BÜHLER (2007) relata que há utilização desde 1950, nos Estados Unidos, Canadá e Reino Unido com grelhas metálicas. Nesta mesma década, nos EUA, foram empregados tecidos como elemento de reforço de pavimentos. A partir de 1960, produtos utilizados como camadas intermediárias têm sido criados: das grelhas metálicas até os diferentes tipos de geossintéticos (AL-QADI, 2008).

Na França, Inglaterra e Estados Unidos foram fabricados geotêxteis não-tecidos de filamentos contínuos, e em 1966 foi pela primeira vez utilizado geotêxtil não-tecido em recapeamento asfáltico, em pistas experimentais: mantas de polipropileno impregnadas com emulsão asfáltica catiônica. Esta aplicação fez parte do programa experimental WES (Waterways Experiment Station), e os resultados satisfatórios levaram a outros programas para desenvolvimento da técnica (AGUIAR et al, 2004).

Em 1970, o *Federal Highway Administration* (FHWA) iniciou o *National Experimental and Evaluation Program (NEEP) – Reducing Reflection Cracking in Bituminous Overlays*, que contou com a participação de 14 estados americanos e avaliou seis tipos de geossintéticos e outras soluções (DYKES, 1980 *apud* PEREIRA, 2002).

A partir de 1970 houve progressivo avanço na fabricação e desenvolvimento de técnicas envolvendo geossintéticos, nas diversas obras geotécnicas: aterros rodoviários em solos moles; contenções de taludes; barragens e em obras de recapeamento de pavimentos (VIERA *et al*, 2000). No Brasil, em 1971, houve as primeiras aplicações de geossintéticos. Destaca-se, neste ano, o emprego de geossintéticos em obras rodoviárias utilizados primordialmente como reforço de aterros, na BR-101 (Angra dos Reis – RJ) e na rodovia Transamazônica.

Em 1977, foi realizada a *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, em Paris, França. Na década de 1980 foi criada a *International Geosynthetic Society* (IGS) e foram criados diversos comitês de geossintéticos na Europa e EUA. Ainda nesta década, no Brasil, foram criadas a Comissão de Estudos de Geossintéticos, pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil da ABNT, a Associação Brasileira das Indústrias de Não-Tecidos e Tecidos Técnicos (ABINT) e a Comissão Técnica de Geossintéticos da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).

LUTHER *et al* (1976 *apud* HAAS e JOSEPH 1989) realizaram estudos laboratoriais para determinar o potencial uso de um geossintético em

recapeamento de pavimento e concluíram que a resistência última da camada de revestimento não varia com reforço do geossintético. No entanto, amostras com geossintéticos exibiam significativa melhoria na vida de fadiga em relação a amostras não-reforçadas. O geossintético atuava como verdadeira barreira à trinca, e, apesar de não prevenir o início, retardou o crescimento após sua formação. Também o local de aplicação do geossintético como camada intermediária teve influência no desempenho: colocação do geossintético próximo ao terço inferior da camada de recapeamento foi mais eficiente.

A partir de 1980, houve forte e crescente avanço de caráter técnico-científico da aplicação de geossintéticos na América do Sul, com a realização de diversas pesquisas de campo e de laboratório (MARONI e MONTEZ, 1995). Houve intensificação do emprego de grelhas poliméricas para incrementar a vida de serviço das rodovias.

YAMAOKA *et al* (1989) realizando ensaios à flexão em corpos-de-prova com camadas intermediárias de geotêxteis, concluíram que o crescimento das trincas de fadiga através do concreto asfáltico foi atrasado pela presença do geossintético e que os corpos-de-prova apresentavam após propagação da trinca, uma parcela de resistência à flexão.

Segundo HENDRIKS e VAN DE GRIEND (1989), os geotêxteis possuem uma estrutura densa e quando saturados com betume, formam camada impermeável. Possuem, entretanto, baixo módulo de elasticidade e deformação máxima relativamente alta. São muito flexíveis e espessuras que variam entre poucos milímetros a dezenas de milímetros. As geogrelhas são elementos de reforço de estrutura aberta, possuindo módulo de elasticidade mais elevado que os dos geotêxteis. Apresentam deformações, quando solicitadas, relativamente pequenas; absorvem parcialmente as tensões induzidas pelo tráfego. Devido ao baixo módulo de rigidez, os geotêxteis comportam-se como camada intermediária de absorção de tensões. Pequenas trincas da camada subjacente têm sua propagação interrompida quando atingem o geotêxtil, mas quando estas trincas atingem uma largura mínima, continuam se propagando através da camada de recapeamento. As trincas ao atingirem a camada de geotêxtil serão redirecionadas para a

horizontal, devido a processo de dissipação de energia e as trincas não conseguem ultrapassar esta camada devido ao descolamento localizado entre o geotêxtil e a camada asfáltica. Com isso, a densidade de energia de distorção, que é o mecanismo que governa a origem e propagação da trinca, é reduzida neste local, pois a transferência das tensões concentradas da trinca existente para a camada de reforço é reduzida, devido ao atrito na direção horizontal (RODRIGUES, 1991).

Os geotêxteis são eficazes em situações em que padrão denso de trincas delgadas é originado por alguma causa que não seja a insuficiência na capacidade de suporte. As geogrelhas são indicadas para situações em que o trincamento tem origem na insuficiência da capacidade de carga da estrutura do pavimento e atuam reduzindo as deformações horizontais no concreto asfáltico.

Na década de 1990, verifica-se maior emprego de geossintéticos em obras civis, impulsionado pelo grande avanço de técnicas e variedades de produtos, o que multiplicou significativamente a possibilidade de aplicação, bem como a variabilidade de características de interesses, sobretudo geotécnica. Na VI *International Conference on Geosynthetics*, realizada em 1998, na cidade de Atlanta (E.U.A.), empregou-se definitivamente o termo geossintético, agrupando os termos “geotêxteis, geomembranas e produtos relacionados” (AGUIAR, *et al*, 2004).

AL-QADI *et al* (2008) relatam algumas pesquisas sobre o uso de geossintéticos como reforço de camada de revestimento asfáltico como segue:

- Chen e Frederick, em 1992, pesquisaram a eficácia de geotêxteis não-tecidos como camada intermediária de alívio de tensões entre o revestimento degradado e uma camada asfáltica sobrejacente, sob duas técnicas: cobertura de todo o revestimento pelo geossintético e cobertura apenas sobre áreas restritas com trincas. Concluíram que a primeira alternativa representa melhor solução, apesar de não haver custo-benefício atraente em relação ao recapeamento convencional;

- Steinberg, em 1992, afirma que o Departamento de Transportes de Minnesota (MDOT) ensaiou três tipos de grelhas, sendo duas grelhas de fibra de vidro. As

grelhas de fibra de vidro apresentaram problemas na instalação, o que não ocorreu com outro tipo de geogrelha;

- Komatsu et al, em 1998, mostraram que misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas apresentaram desempenho notável quando comparadas a amostras não-reforçadas. Relatam melhoria na durabilidade alcançada com redução no tamanho da malha da geogrelha devido ao melhor intertravamento entre a grelha e o material ao redor;

- Steen, em 2004, relata o uso de geotêxteis para reduzir o trincamento por reflexão, originado de base estabilizada com cimento. Neste caso, geotêxteis são utilizados como camada de alívio de tensões, aumentando a vida de serviço em relação à reflexão das trincas. Tal emprego foi bem-sucedido nos casos estudados.

É cada vez mais crescente a quantidade de materiais geossintéticos que surgem com novas finalidades e características, tornando possível seu uso nos mais diversos tipos de obras, com propriedades adequadas para viabilizar seu emprego.

2.5.2.

Tipos de geossintéticos

O termo geossintético pode ser definido como:

denominação genérica de um produto polimérico (sintético ou natural), industrializado, cujas propriedades contribuem para melhorias de obras geotécnicas, desempenhando umas ou mais das seguintes funções: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle da erosão superficial (NBR 12553/03).

Existe no mercado brasileiro variedade muito grande de geossintético, relacionados às funções (IGS, 2009): controle de erosão superficial; bloqueio de fluxo; drenagem; filtração; impermeabilização; proteção; reforço e separação. De acordo com tais funções, os tipos mais utilizados de geossintéticos são (NBR12553/03):

a) Geogrelha: “Produto com estrutura em forma de grelha com função predominantemente de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, constituído por elementos resistentes à tração. É considerado unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas”.

b) Geotêxtil: “Produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica.”

c) Geotira: sua função principal é a de reforço, e, como sua própria designação sugere, apresenta formata de tira;

d) Geotubo: sua função principal é de drenagem. Apresenta formato tubular;

e) Geobarra: sua função principal é a de reforço. Apresenta formato de barra;

f) Geocélula: apresenta estrutura tridimensional aberta, constituídas por células interligadas. Sua função principal é de reforço e controle de erosão;

g) Geocomposto: é constituído pela associação ou superposição de um ou mais geossintéticos, ou entre estes e outros materiais, podendo desempenhar funções de impermeabilização, drenagem ou reforço, de acordo com o objetivo de seu uso;

h) Geoespaçador: apresenta elevado volume de vazios, com estrutura tridimensional. Sua principal função é a de drenagem;

i) Geoexpandido: é fabricado a partir de um polímero expandido, tendo estrutura tridimensional leve. Tem função drenante;

- j) Geofôrma: tem por finalidade conter materiais, sendo portanto verdadeiras fôrma constituídas por geossintéticos;
- l) Geomanta: apresenta estrutura tridimensional, tendo função de drenagem, devido à sua permeabilidade;
- m) Geomembrana: apresenta permeabilidade muito pequena, tendo função de controle de fluxo e de separação.
- n) Georrede: apresenta formato de grelha, porém tem função principal de drenagem, diferente da geogrelha.

2.5.3.

Utilização de geogrelhas em pavimentos

Será dada ênfase ao geossintético do tipo geogrelha por ter sido material de estudo na presente pesquisa. Apresentam-se aspectos relevantes, essenciais para a escolha e emprego deste geossintético em pavimentação: características, mecanismo de atuação e utilização.

LAO e RAMOS (2009) afirmam que no Rio de Janeiro muitos materiais e técnicas estão sendo empregados para retardar ou bloquear a reflexão de trincas: aumento da espessura do recapeamento, modificação das propriedades de misturas asfálticas, emprego de SAMI, etc. Mas, os melhores resultados são as aplicações de grelhas poliméricas de alto-módulo. Relatam o emprego de grelha de fibra de vidro, e concluem que tal alternativa constitui excelente solução, e a reflexão de trincas não foi totalmente bloqueada, mas apresentou poucas e isoladas, com redução nas deflexões do pavimento.

A principal função de uma geogrelha utilizada em pavimento flexível é a de reforço. O termo reforço refere-se à capacidade da camada intermediária compensar uma deficiência na resistência à tração dentro do pavimento.

As geogrelhas utilizadas em pavimentos têm por finalidade o reforço estrutural, sendo utilizadas, como: restauração, diminuição da espessura da camada de revestimento, ou mesmo complementar às características de outras camadas, como o subleito.

Neste contexto, há diferentes formas de utilização de geogrelhas nos pavimentos flexíveis, o que é definido pela finalidade de seu emprego. Assim, tem-se basicamente, três localizações de geogrelhas dentro de um pavimento flexível mais comumente utilizadas (AL-QUADI, 2008; KAKUDA, 2009):

- como camada intermediária em recapeamentos asfálticos;
- como reforço de camada de base, instalada entre esta e o revestimento asfáltico, melhorando aspectos como intertravamento, tensão de tração, confinamento e separação;
- como reforço de subleito, principalmente em casos de presença de solos moles.

No caso de subleito, a geogrelha aumenta a habilidade de obtenção de compactação de agregados utilizados em sistemas em camadas, como em pavimentos rodoviários, ao mesmo tempo reduz o montante de material a ser removido e reposicionado (ANTUNES, 2008).

AL-QADI e TUMTULUER (2009) dizem que o uso de geogrelha em camada de base restringe o deslocamento lateral dos materiais desta camada, proporciona intertravamento que melhora a rigidez do sistema, reduzindo deformações cisalhantes, além de melhorar o pavimento quanto à fadiga. O uso de camadas intermediárias de geogrelhas pode reduzir a espessura do pavimento para determinada vida de projeto ou aumentar a sua vida de serviço.

KOHLER e REYES (2006) relatam ensaios de carregamento acelerados (por meio de equipamento tipo “carrossel” que aplica carga equivalentes a 150 kN) realizados em quatro seções de pavimentos experimentais, sendo três utilizando geogrelha e uma sem geogrelha, como seção de referência. Cada seção possuía uma determinada localização para a geogrelha: topo do subleito, metade da camada de base e outra configuração incluindo as duas situações anteriores. Como

conclusões: a ruptura das seções ocorreu devido à fadiga da mistura asfáltica, ao invés da compressão do subleito; melhores desempenhos foram para geogrelha na camada de base e dupla configuração (topo do subleito em conjunto com o meio da camada de base) e que o desempenho à fadiga é melhorado pelo posicionamento da geogrelha mais próxima à camada superior.

LAO e RAMOS (2009) afirmam que as grelhas poliméricas amenizam os esforços que levam ao trincamento sendo indicadas nas seguintes utilizações: capeamento asfáltico sobre pavimento rígido com placas fissuradas, sobre pavimento flexível com revestimento com trincas por fadiga e em alargamento de pista para evitar a reflexão da trinca longitudinal proveniente da junção de revestimentos com idades diferentes.

RODRIGUES (1991) afirma que: “A interface entre a camada de reforço e o pavimento existente é o melhor lugar para se aplicar um tratamento com a finalidade de controlar a reflexão de trincas”, devido a promover desligamento ou funcionar como armadura à propagação das trincas existentes na estrutura subjacente.

As geogrelhas apresentam-se como solução eficiente e eficaz no combate do trincamento por reflexão em recapeamentos asfálticos. Entretanto, para este objetivo ser alcançado deve-se respeitar características e procedimentos de instalação adequados.

A instalação da geogrelha exige conhecimento do pavimento, do local de aplicação, das características do material sobrejacente (camada de recapeamento), além das próprias propriedades das geogrelhas. Por exemplo, um método que é adequado para geogrelha de polipropileno pode não ser conveniente à geogrelha de poliéster (ARMITAGE *et al*, 1989). Além disso, o tipo de estrutura (flexível, rígida ou semi-rígida) na qual a geogrelha será instalada, apesar de não constituir fator limitante à sua utilização, é condicionante à decisão do correto posicionamento do geossintético na estrutura, para cumprir adequadamente sua função de reforço estrutural (BÜHLER, 2007).

Um dos principais fatores que influenciam o funcionamento das geogrelhas como reforço de pavimentos é sua aderência ao concreto asfáltico. Para que esta aderência seja obtida de maneira correta, há de se observar a compatibilidade entre a geogrelha e o asfalto (VILCHEZ, 2002):

1. os coeficientes de dilatação da geogrelha e do asfalto devem ser compatíveis de modo a não gerar acréscimos de tensões devido às contrações ou expansões, e resultar em deslocamentos entre estes. Caso haja diferença a aderência poderá ser reduzida sensivelmente;
2. os módulos de elasticidade da geogrelha e da mistura asfáltica devem ser compatíveis; por exemplo, geogrelha muito deformável provavelmente não será adequada à função de reforço se a deformação é relativamente baixa, o que pode não mobilizar sua resistência para absorver tensões adequadamente. Assim, o concreto asfáltico e o geossintético devem funcionar como um sistema solidário.

Esta aderência entre a geogrelha e a mistura asfáltica faz com que o geossintético esteja ancorado dentro do pavimento, e para cumprir sua finalidade não deve escorregar em relação ao concreto asfáltico, para haver a absorção de tensões deve ocorrer o estímulo à sua deformação.

A instalação efetuada de maneira correta, de acordo com características e exigências de cada tipo de geogrelha permite que sua utilização no pavimento seja eficaz em aumentar a vida de serviço destes. Instalações mal executadas e não de acordo com especificações de cada material, podem comprometer o bom funcionamento da geogrelha em conjunto com o pavimento. Há geogrelha destinada a pavimento que apresenta instalação simplificada e facilitada, como a que possui camada betuminosa e elemento não-tecido, que não impede o contato, tendo função apenas de facilitar a instalação.

Cada geogrelha geralmente é fornecida com manuais de instalação, que devem ser de conhecimento do executor antes da aplicação do material. Alguns procedimentos geralmente são comuns à maioria das geogrelhas (AL-QADI et al, 2008; ARMITAGE, 1989; BÜHLER, 2007):

- limpeza do terreno a ser aplicada;

- emprego de taxas de emulsão asfáltica, geralmente emprega-se um mínimo de 0,5l/m², para se executar a pintura de ligação, de modo a promover a aderência mecânica entre as camadas;
- emprego de sobreposições mínimas (geralmente, mínimo de 15cm) para emendas nas geogrelhas;
- evitar exposição ao tráfego até que seja executado o revestimento ou a restauração;
- as geogrelhas devem ser instaladas de modo a permanecerem esticadas, sem apresentar dobras, podendo-se, para isto, fixá-las antes do lançamento da mistura asfáltica;
- algumas geogrelhas apresentam uma camada de não-tecido, que facilita sua instalação, eliminando a necessidade de fixação do reforço à camada asfáltica existente. Este geotêxtil não-tecido previamente impregnado com betume facilita a instalação, pois a aderência com as camadas asfálticas é melhorada.

O comportamento das geogrelhas e dos geossintéticos de modo geral, é condicionado pelas matérias-primas, que são polímeros e aditivos. Os polímeros utilizados para fabricação são sintéticos, a maioria fabricados a partir do petróleo; os aditivos são produtos que modificam características dos polímeros ou o processo de fabricação (AGUIAR, 2004).

Uma das principais características das geogrelhas são as elevadas resistência à tração e rigidez. Essa propriedade confere elevado potencial de utilização das geogrelhas em pavimentos, visto que há aumento na rigidez. Algumas das principais características das geogrelhas utilizadas em pavimentos são (AGUIAR, 2004; BÜHLER et. al., 2006):

- são constituídas principalmente por polímeros (poliéster, polietileno, polipropileno, poliamido), fibras de vidro e metálicas;
- possuem elevado módulo de elasticidade, comparado a outros geossintéticos (como geotêxteis) e com a maioria dos concretos asfálticos;
- resistência à tração igual ou maior a 50 kN/m sob deformação de 12%;

- resistência à fadiga igual ou superior a 90%¹;
- ponto de amolecimento superior a 180°C;
- abertura de malha entre 2 a 10 vezes o diâmetro máximo de agregados na mistura asfáltica utilizada;
- algumas geogrelhas são fornecidas com revestimento betuminoso, o que favorece a aderência ao revestimento asfáltico;
- são capazes de suportar as altas temperaturas de execução dos concretos asfálticos, cujos valores são da ordem de 180°C.

Segundo LAO e RAMOS (2009), para que uma grelha introduzida entre camadas de revestimento possa cumprir sua função de reforço, é necessário que:

- resista aos esforços impostos pelo tráfego, pelos equipamentos durante a execução da obra, e à temperatura de aplicação da mistura asfáltica;
- apresente elevada resistência à tração, absorva tensões do revestimento;
- possua perfeita aderência com camadas asfálticas, de forma que permita a distribuição e transferência de esforços de tração entre a grelha e o revestimento asfáltico;
- resista à fadiga, absorvendo os esforços impostos pelas cargas dinâmicas, ao longo da vida útil do recapeamento.

BÜHLER (2007) relata que a princípio considerava-se que o material ideal para ser utilizado como reforço de pavimentos seria aquele que apresentasse maior rigidez, pois proporcionaria maior durabilidade. Entretanto algumas pesquisas contradizem tal lógica, sendo a aderência o principal fator de escolha de grelha: o vínculo proporcionado na região de interface da camada asfáltica seria o critério preponderante. Ensaando amostras à fadiga observou que determinado tipo de grelha que apresentava rigidez superior (70 kN) às demais, mostrou efetividade menor que outra de menor rigidez (50 kN) que apresentava melhor aderência ao concreto asfáltico.

O principal objetivo da inserção de geogrelha em pavimentos restaurados, sobretudo entre a camada antiga e nova de revestimento, é aumentar a vida de

¹ Relação entre a resistência após determinado número de ciclos de carga e descarga (100.000 ciclos, neste caso) e sua resistência nominal.

fadiga deste, combatendo a reflexão de trincas, proporcionando melhor serventia, desempenho e condição estrutural ao pavimento. VILCHEZ (2002) realizou ensaios em laboratório em vigotas com e sem geogrelha. A presença da geogrelha incrementou a vida de fadiga da amostra solicitada dinamicamente, e o efeito benéfico da sua presença na mistura asfáltica pode variar com o tipo de material que constitui este geossintético.

Os geossintéticos utilizados como camadas intermediárias em revestimentos têm efeito e atuação diferentes, conforme suas características. As geogrelhas essencialmente atuam como armadura no concreto asfáltico, impedindo ou inibindo a reflexão de uma trinca única. Ao contrário, faz com que a trinca de reflexão dissipe energia num volume maior do novo revestimento, diminuindo assim a energia específica, originando microfissuras de menores severidades e velocidades de propagação, apresentando configuração sem distribuição de trincas definida. É diferente dos geotêxteis cujo efeito principal é retardar a reflexão do trincamento, direcionando a trinca para a horizontal e melhorando a estanqueidade do pavimento com melhoria das características de impermeabilidade, e até impedindo eventual ocorrência de bombeamento de finos (VILCHEZ, 2002).

Entretanto, sistema geotêxtil-asfalto não se apresenta como alternativa eficaz do combate às trincas por reflexão em situações que envolvem elevadas movimentações relativas (entre os dois lados da trinca). As geogrelhas por apresentarem características favoráveis a suportar grandes deformações (módulo e resistência à tração elevados) são mais convenientes à esta utilização, sobretudo em condições mais severas, como rodovias de tráfego intenso, pois têm o efeito de reduzir a concentração de tensões no concreto asfáltico, o que implica também numa redução da deformação, fazendo com que as trincas se desenvolvam muito mais lentamente (HENDRIKS e VAN DE GRIEND, 1989).

KASSNER (1989) afirma que a principal função de uma geogrelha é reforçar o pavimento contra forças laterais induzidas por movimentos horizontais. Logicamente, as geogrelhas podem somente reforçar o pavimento no próprio plano, e movimentos verticais não podem ser resistidos pela sua presença, apesar

de algumas evidências que este reforço também contribui para aumentar a resistência do pavimento à deflexão.

JACOB (1993) afirma que uma geogrelha utilizada como reforço em recapeamento possui dois efeitos principais: reforçar o revestimento aumentando a resistência à tração do sistema de camadas e variar a linha neutra dentro do recapeamento durante as deflexões do pavimento, num processo de “proteção” da camada asfáltica subjacente ao pavimento trincado, reduzindo as suas tensões de tração.

A geogrelha como camada intermediária em recapeamentos asfálticos permite que esta camada suporte maior momento fletor em relação à alternativa convencional, o que aumenta a capacidade de absorver tensões de tração maiores (BONDT, 1999).

BUTTON e LYTTON (1987 *apud* AL-QADI *et al*, 2008) resumem o processo de ruptura do reforço de pavimentos: as trincas iniciam a propagação (devido ao carregamento do tráfego ou de variações de temperatura) de sua posição original em direção à superfície do recapeamento, até atingir a camada de reforço. Se a camada é suficientemente rígida, a trinca sofre um desvio e move-se ao longo da interface até que sua energia seja dissipada. A ruptura do reforço somente ocorrerá após o “descolamento” entre a camada intermediária e a camada subjacente. Logo, o reforço deverá ser mais rígido que o material ao redor (a rigidez da interface é igual ao produto entre o módulo elástico do material e sua espessura).

ARMITAGE *et al* (1989) através de ensaios laboratoriais concluíram que geogrelhas que apresentem elevada rigidez podem ser muito eficazes na redução ou ainda eliminação do trincamento devido a cargas transientes, desde que corretamente instaladas. Ensaios com diferentes tipos de geogrelhas mostraram que para todas as amostras com geogrelhas houve significativa redução do comprimento da trinca propagada, além de se observar redução também na sua largura (severidade).

MONDOLFO *et al* (2003) relatam que durante serviços de implantação de camada de rolamento foram utilizadas alternativas, e aquela com emprego de geogrelha de poliéster de alto módulo solucionou o problema da reflexão de trincas. Foi constatado que o desempenho global do pavimento restaurado foi melhorado, não só devido ao bloqueio da reflexão das trincas subjacentes à camada asfáltica de recapeamento, mas também devido à eliminação ou menor incidência de trincas severas na superfície. Também constataram menores graus de severidade nos afundamentos de trilhas-de-roda e irregularidade longitudinal, pois a contribuição da camada asfáltica nas deformações plásticas da estrutura é reduzida ao mesmo tempo em que o geossintético melhora a capacidade de atenuar tensões transmitidas às camadas subjacentes.

VILCHEZ (2002) relata que após o início do trincamento, a presença da geogrelha no revestimento asfáltico melhora o desempenho em vista da mudança do padrão de trincamento: pode-se passar de situação com trincas com grande comprimento e abertura para outra, onde a camada se torne apenas microfissurada. Ocorrem muitas trincas de pequeno comprimento e pequena abertura, sem que haja uma trinca dominante que concentre a dissipação de energia em sua extremidade, o que conduziria a uma rápida propagação. Trincas de menor severidade são menos nocivas, por manter elevado grau de entrosamento do agregado em suas paredes. As trincas que surgiram, no decorrer dos ensaios, foram aleatórias (padrão errático de propagação), ocorrendo não devido ao fenômeno da reflexão, mas pelo processo de fadiga da própria massa asfáltica, e apresentam-se espalhadas em volume relativamente grande dentro da camada asfáltica. A geogrelha de reforço pode ter efeito similar ao aço em pavimentos rígidos, ou seja, manter as trincas mais fechadas.

A inserção da geogrelha no revestimento melhora o seu desempenho na medida em que o pavimento passa a ter um incremento na vida de serviço (ou de fadiga). Uma forma de se quantificar esta melhoria é através do Fator de Eficiência do Geossintético (FEG):

$$FEG = \frac{N_{f(c / geogrelha)}}{N_{f(s / geogrelha)}} \quad \text{eq. (2.9)}$$

Onde:

- $N_{f(c/ \text{ geogrelha})}$: número de ciclos de carga suportados pelo pavimento com geogrelha;
- $N_{f(s/ \text{ geogrelha})}$: número de ciclos de carga suportado pelo pavimento sem a presença de geogrelha.

VILCHEZ (2002) realizou ensaios de fadiga em vigas prismáticas reforçadas ou não com geogrelhas que apresentavam pré-trinca para permitir o estudo do processo de reflexão. Através de ensaios sob carregamento nos modos I e II (flexão e cisalhamento, respectivamente) quantificou a eficácia do reforço por:

$$N_f = \frac{1}{c_f} \quad \text{eq. (2.10)}$$

Sendo:

$$c_f = \frac{1}{N_{f(B)}} + \frac{2}{N_{f(S)}} \quad \text{eq. (2.11)}$$

Onde:

- c_f : consumo por fadiga;
- $N_{f(B)}$: vida de fadiga, modo I (flexão);
- $N_{f(S)}$: vida de fadiga, correspondente ao modo II (cisalhamento).

O citado autor encontrou valores de FEG variando entre 3 a 16. Esta variação deveu-se aos diferentes tipos de geogrelhas utilizados e aos critérios de término dos ensaios.

BÜHLER (2007) também realizou ensaios de fadiga em vigotas prismáticas com e sem a inserção de camada de geogrelhas, e encontrou fatores de efetividade que variavam entre 2,7 e 5. Estes valores também sofreram a influência do tipo de geogrelha, que apresentavam composição e características mecânicas distintas.

O mecanismo principal da geogrelha é de absorver tensões e melhor distribuí-las para o novo revestimento, exatamente como atua uma armadura. Para o geotêxtil, a atuação ocorre no sentido de formar uma barreira à reflexão da trinca já existente na camada de revestimento antiga, que passa a ter direção de propagação

preferencialmente horizontal; ou seja, o geotêxtil busca aumentar a vida útil do novo revestimento atrasando a reflexão da trinca.

2.6.

Considerações sobre o ensaio de tração em disco circular com fenda

O ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda constitui uma forma de avaliar a resistência à fratura de misturas asfálticas, e sua metodologia foi especificada internacionalmente em 2007. Trata-se, portanto, de ensaio muito recente, tendo como especificação principal, a norma ASTM D7313-07 (*Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry*).

No Brasil, este método de ensaio foi introduzido por HIRSCH (2009), e foi necessário desenvolver procedimentos para a preparação dos corpos-de-prova visto que a Norma ASTM é bastante sucinta neste aspecto. O autor afirma que umas das principais dificuldades na determinação dos parâmetros de fratura de qualquer material, sobretudo das misturas asfálticas é a obtenção de uma geometria que resulte em reprodutibilidade adequada. A geometria dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de fratura em misturas asfálticas é influenciada por dois fatores: dificuldade de preparação da amostra e compatibilidade com os equipamentos empregados na moldagem e execução de ensaios mecânicos já existentes. Na Tabela 2.1 apresentam-se as vantagens e desvantagens de algumas das configurações de corpos-de-prova utilizados em ensaios de fratura.

A configuração em forma de disco (*Disk-Shaped*) inicialmente utilizada em ensaios para materiais metálicos foi adaptada para concretos asfálticos. Entretanto, algumas falhas localizadas próximas aos furos de carregamento durante o desenvolvimento dos primeiros testes levaram à modificação do arranjo de modo a minimizar a ocorrência de tal tipo de falha.

Algumas pesquisas, como a de WAGONER *et al* (2005), apontaram que a geometria em forma de disco circular seria a mais conveniente na determinação da

energia de fratura em misturas asfálticas. Esta foi analisada comparativamente a outros formatos de corpos-de-prova, chegando-se à conclusão de que seria a mais adequada por apresentar facilidade de obtenção de corpos-de-prova (em extração em campo ou moldagem em laboratório) e por possuir área superficial de ruptura relativamente adequada às análises, sendo maior que as utilizadas nas geometrias semi-circulares de ensaios à flexão (SEB). Assim, esta foi escolhida para normalização do ensaio de fratura em misturas asfálticas.

WAGONER *et al* (2005) utilizando o ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) para determinar a energia de fratura de concreto asfáltico, sob diferentes temperaturas e velocidade de carregamento, concluíram que: a espessura das amostras influencia a energia de fratura e que: para temperaturas utilizadas (0° C, -10° C e -20° C), a energia de fratura aumenta com a temperatura e a trajetória da trinca também é afetada pela temperatura; a energia de fratura é melhor indicador para determinar a resistência à fratura do material que outros parâmetros, como a resistência à tração; e as misturas estudadas mostraram-se sensíveis à velocidade de carregamento.

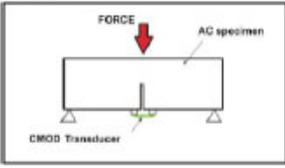
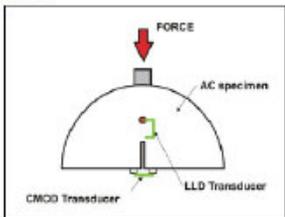
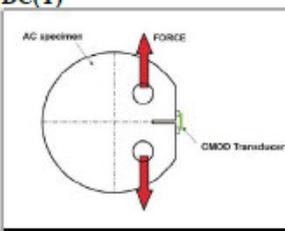
WAGONER (2004 *apud* HIRSCH, 2009) percebeu durante alguns ensaios, através de corpos-de-prova em formato de disco circular, que ocorria desvio na direção da propagação da trinca, e algumas explicações para este desvio foram: estrutura do esqueleto mineral da amostra com presença de agregados maiores que “forçam” a trinca a contorná-los e eventual carregamento excêntrico. Realizando ensaios com amostras de formato de disco circular com fenda, com diferentes tamanhos, encontrou a geometria que considerou a que melhor define a energia de fratura de misturas asfálticas: 150 mm de diâmetro e 50 mm de espessura.

Esta configuração foi incorporada à norma ASTM E399-90, resultando no método de ensaio prescrito pela recente normalização ASTM D7313-07. Na Figura 2.12 está representada esta configuração do corpo-de-prova para ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda, sendo mostradas: dimensões e formato circular com chanfro, furos de carregamento e pré-trinca, permitidas pequenas tolerâncias nestas dimensões.

BUTTLAR *et al* (2006) realizaram simulação numérica da propagação de trincas em corpos-de-prova de misturas asfálticas, através dos Métodos dos Elementos Discretos, utilizando modelo heterogêneo, e comparando com resultado experimental, utilizando o ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda. Concluíram que as trajetórias da trinca obtidas nas duas situações apresentam diferenças, o que pode ser explicado por várias causas: devido à modelagem ter sido feita em duas dimensões (modelo 2D) e a propagação da trinca ser um processo tridimensional; pequenos agregados e vazios de ar podem afetar a trajetória da trinca significativamente; possíveis condições de carregamentos excêntricos no ensaio e a trajetória de propagação da trinca não pode ser obtida de maneira determinística, preferencialmente aproximada por análise estatística; ao contrário da modelagem sob abordagem homogênea do material. A modelagem realizada mostrou suficientemente bem o comportamento microestrutural, e a potencialidade da aplicação da Mecânica da Fratura para a interpretação do complexo processo de trincamento. Porém há necessidade de considerar muitos outros fatores (modelagem 3D, efeitos de imperfeições e de vazios de ar internos, etc.) para interpretação mais aprimorada do fenômeno do trincamento.

KIM *et al* (2009) relatam um estudo experimental, em que foram extraídas amostras de campo em três projetos, sendo realizados os seguintes ensaios em laboratório: creep, módulo complexo e tração em disco circular com fenda (DC(T)). Num destes projetos, o IL29 Mossville-Chillicote, existia dois trechos: um com recapeamento em concreto asfáltico modificado por polímero e outro com recapeamento convencional, como seção de referência. Em ambos havia camada intermediária de geotêxtil não-tecido. Os resultados de campo, no entanto, divergiram daqueles obtidos nos ensaios de creep e módulo complexo: o trecho com camada de asfalto polímero no campo teve desempenho inferior ao da seção de referência. Mas, pelo ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) foi detectada esta diferença de comportamento, por meio da interpretação dos resultados das energias de fraturas, este parâmetro apresentou razoável correlação com o desempenho de campo das duas seções.

Tabela 2.1: Comparação entre diferentes geometrias de corpos-de-prova para ensaio de fratura (WAGONER *et al*, 2004; MARASTEANU *et al*, 2007 *apud* HIRSCH, 2009)

Geometria	Vantagens	Desvantagens
SE(B) 	<ul style="list-style-type: none"> - Configuração de carregamento simples; - Modo I – carregamento; - Flexibilidade para investigar outros parâmetros (efeito do tamanho do corpo-de-prova etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade de obtenção de corpos-de-prova em campo.
SCB 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de extração de corpos-de-prova em campo; - Carregamento simples de flexão em três pontos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado de tensão complexo; - Tamanho do corpo-de-prova.
DC(T) 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de extração de corpos-de-prova em campo; - Configuração do ensaio de fratura padrão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Carregamento excêntrico; - Preparação dos corpos-de-prova; - Desvio da trinca nos agregados.

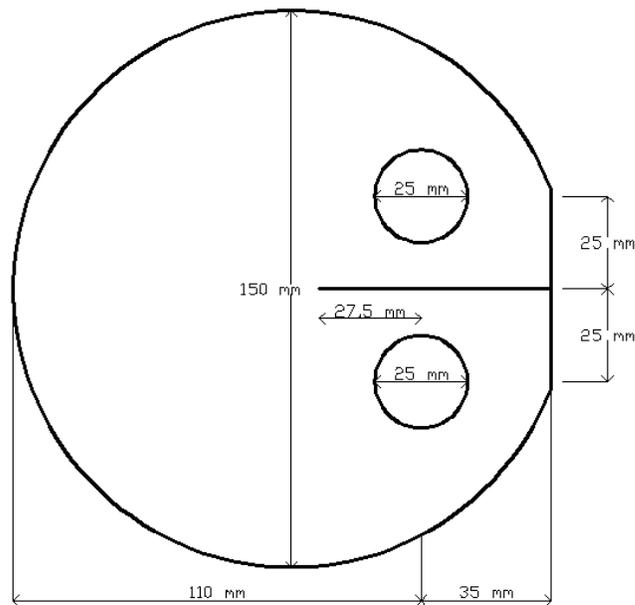


Figura 2.13: Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (ASTM 7313-07)

Kuai *et al* (2009) realizaram ensaios de tração em disco circular com fenda (DC(T)) em três diferentes misturas asfálticas, sob vários níveis de carga, frequências e temperaturas. Empregaram conceitos da Mecânica da Fratura Viscoelástica para modelar o crescimento de trinca no concreto asfáltico e concluíram que: o ensaio de tração em disco circular com fenda é conveniente para estimar a propagação de trincas por fadiga. Diferente da Lei de Paris, a integral ΔJ pode considerar a dependência da mistura asfáltica em relação ao nível de carga e à frequência, na velocidade de trincamento, entretanto não é possível eliminar por completo a dependência da temperatura; e a previsão da vida de fadiga por propagação de trinca mostrou ter boa correlação com resultados experimentais.

BRAHAM e ZOFKA (2009) realizaram três ensaios laboratoriais para avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas, sob baixas temperaturas, cujos resultados foram correlacionados com dados de campo. Os ensaios realizados em amostras, obtidas a partir de dez seções de pavimentos em Minnesota e Illinois, foram: tração indireta (IDT); flexão em geometria semi-circular (SCB) e tração em disco circular com fenda (DC(T)). Da comparação com resultados experimentais, mostrou-se que há boa correlação dos dois ensaios de fratura (SBC e DC(T)), especialmente para baixas temperaturas; as divergências entre estes são devidas às diferentes geometrias e velocidades de carregamento utilizadas nos ensaios; a correlação entre a energia de fratura e o ensaio de tração indireta não foi boa, pois são conceitualmente diferentes: a energia de fratura mede a capacidade do material resistir ao trincamento durante todo ensaio, enquanto a resistência à tração fornece apenas o valor correspondente à carga de pico; os ensaios SBC e DC(T) fornecem boas avaliações em termos qualitativos do desempenho ao trincamento das misturas asfálticas, em relação ao ensaio de tração indireta (IDT) e para previsões quantitativas, é recomendado aplicar modelos analíticos ou numéricos, que considerem as propriedades do material, condições ambientais e de carregamento.

2.7.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou alguns conceitos considerados importantes na compreensão desta pesquisa. O processo de fadiga é uma das principais origens das trincas em pavimentos flexíveis. O fenômeno de reflexão de trincas constitui um processo de fadiga e exige a compreensão do seu mecanismo de modo a buscar soluções para os defeitos gerados por tal processo.

Os geossintéticos atuam interferindo no mecanismo que origina o trincamento em misturas asfálticas, incrementando a sua vida de serviço, pois inibem a propagação de trincas, absorvendo ou dissipando as concentrações de tensões que ocorrem nas suas extremidades. Como principal material para bloqueio ou inibição da propagação de trincas em misturas asfálticas tem-se as geogrelhas, que possuem estrutura aberta, mas apresentam resistência e capacidade de deformar quando solicitadas, o que constitui um material de reforço propriamente dito.

Os conceitos abordados fornecem o embasamento para o presente trabalho, visto que todo o programa realizado visou uma metodologia que, baseada nos mecanismos de trincamento em misturas asfálticas, pudesse avaliar a alternativa de uso da geogrelha para combater este processo, que é o principal defeito em rodovias nacionais.