

---

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

---

### **1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

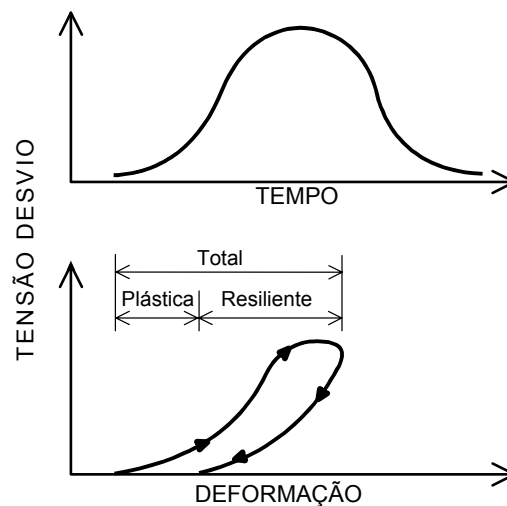
Pavimentos têm sido dimensionados através de métodos empíricos derivados de resultados de ensaios como o índice suporte Califórnia (CBR) e de experiências em pistas de testes como a da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Várias deficiências são verificadas quando esses métodos são aplicados para diferentes ambientes ou quando os materiais são diferentes daqueles usados na experiência original. Outro fator de relevância é que os métodos empíricos de dimensionamento não consideram explicitamente o efeito da repetição das cargas veiculares na fadiga dos materiais.

A causa principal da fadiga nas camadas de misturas betuminosas é a magnitude das deformações resilientes do subleito e das camadas do pavimento, causadas pelo movimento dos veículos.

O termo “resiliência” foi adotado por FRANCIS HVEEM (1955), um dos precursores no estudo racional dos pavimentos como uma estrutura em camadas, para se entender que os deslocamentos nos pavimentos sob a ação das cargas do tráfego são muito maiores que para vários sólidos elásticos como o vidro, concreto, aço, etc. Resiliência significa, a rigor, energia armazenada num corpo deformado elasticamente, sendo devolvida, imediatamente, quando cessam as tensões causadoras das deformações.

Segundo PORTER (1950)<sup>1</sup> *apud* BERNUCCI (1995), a espessura insuficiente do revestimento e a existência de material granular sobre um subleito de baixa capacidade de suporte (tanto pelas características físicas do solo como pela falta de compactação) são, de modo geral, os fatores responsáveis pela ruptura à fadiga. São dois os indicadores mais importantes relacionados à vida de fadiga de um pavimento: a deflexão na superfície e a deformação de tração na fibra inferior do revestimento.

Quando o veículo passa por uma seção do pavimento é verificado, inicialmente, um aumento da tensão desvio combinado ao desenvolvimento de deformações crescentes. Quando as tensões e deformações atingem a situação máxima, as tensões começam a diminuir até se anularem, porém nem toda deformação conferida é recuperada. Assim, verifica-se, que os materiais, em pavimentação, apresentam dois tipos de deformação, uma permanente, não recuperável e a outra resiliente, recuperável. Este comportamento é ilustrado pela figura 1.1.



**FIGURA 1.1 – Relação tensão-deformação típica nas camadas dos pavimentos (Fonte: ELLIOT & THORNTON, 1988)**

<sup>1</sup> PORTER, O.J. (1950). "Development of the Original Method for Highway Design." Development of CBR Flexible Pavement Design Method for Airfields. Transactions of American Society of Civil Engineers. Vol. 115. pp 461-467. New York.

A partir da década de 60, a mecânica dos pavimentos teve um grande desenvolvimento com a aplicação de métodos numéricos de análise e com o surgimento de novas ferramentas computacionais. As análises efetuadas sob o enfoque mecanístico utilizam, na maioria das vezes, a teoria da elasticidade e consideram a estrutura do pavimento como um sistema de várias camadas.

O dimensionamento usando as teorias elásticas possibilita compatibilizar as espessuras das camadas com as características dos materiais, organizando a estrutura de forma a obter a distribuição de tensões mais favorável para os materiais disponíveis.

O comportamento tensão-deformação dos materiais de pavimentação pode ser expresso através do módulo de resiliência ( $M_R$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\mu$ ). O módulo de resiliência corresponde à deformabilidade elástica das camadas do pavimento e do subleito que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais mais rígidas e é semelhante ao módulo de elasticidade ( $E$ ), parâmetro da lei de Hooke, que representa a relação entre deformações resilientes e os carregamentos dinâmicos que os causaram. Porém, é válido salientar que o módulo de resiliência difere do módulo de elasticidade no tocante à aplicação das cargas, pois o  $M_R$  é determinado para carregamentos cíclicos.

O módulo de resiliência pode ser determinado, em laboratório, através de ensaios triaxiais cíclicos, sendo calculado através da expressão 1.1:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (1.1)$$

onde:

$M_R$  = módulo de resiliência;

$\sigma_d$  = tensão desvio;

$\epsilon_R$  = deformação resiliente.

A AASHTO, a partir de 1986, em seu *Guide for the Design of Pavements Structures*, recomenda a utilização do módulo de resiliência como um dos parâmetros na avaliação da qualidade dos materiais para a construção de pavimentos, principalmente aqueles que compõem o subleito.

Logo, o ensaio para a determinação do  $M_R$  é usado para obtenção dos parâmetros que caracterizam a resposta elástica dos materiais componentes do pavimento, podendo-se assim, prever o desempenho do pavimento frente à atuação repetitiva das cargas veiculares e da ação das intempéries.

Segundo ELLIOT & THORNTON (1988)<sup>2</sup> apud CUNTO, a AASHTO reconhece que o desempenho de um pavimento está associado à magnitude das deformações superficiais, que são devidas, principalmente, às deformações do subleito. Por isso, a AASHTO exige que se conheça o módulo de resiliência ao se projetar um pavimento, pois o seu conhecimento é necessário para o cálculo das tensões resilientes, das deformações e das deflexões nas várias camadas bem como para a análise do desempenho do sistema.

O desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a determinação do  $M_R$  é, portanto, de grande importância, tendo em vista que este parâmetro é essencial para as análises que estimam as tensões, as deformações e deflexões nas várias camadas do pavimento e no seu subleito, quando da ação do tráfego.

Ensaio de campo e laboratório podem ser realizados para se estimar as propriedades resilientes dos solos. Porém, os ensaios de laboratório apresentam a vantagem de possibilitar maior controle das condições da amostra, dos sistemas de aplicações de carregamento e de medida dos deslocamentos, o que seria difícil no campo.

---

<sup>2</sup> ELLIOTT, R.P.; THORNTON, S.I. (1988). Resilient modulus and AASHTO pavement design. *Transportation Reserch Record*, v.1192, p.1-7.

O módulo de resiliência, em laboratório, pode ser obtido através de ensaios, tais como: compressão diametral, ensaio de viga, coluna de ressonância e o triaxial cíclico, sendo este último o de maior utilização entre os pesquisadores.

Pela complexidade e relativo alto custo dos ensaios, há a necessidade de pesquisas que forneçam expressões para a determinação do  $M_R$  a partir de resultados de ensaios mais simples que os ensaios dinâmicos e usuais na área de pavimentação, como: CBR (MEDINA & PREUSSLER, 1980; CARDOSO, 1988), compressão simples (THOMPSON & ROBNETT, 1979; LEE *et al.* 1995), ensaio triaxial convencional (SWEERE & GALJAARD, 1988; ZAMAN, 1994).

E como o  $M_R$  é muito variável com a natureza, estado físico do solo, condições de carregamento e o estado de tensão a que o solo se encontra submetido são propostos modelos matemáticos que o relacionam com tais fatores (ALLEN & THOMPSON, 1974; BERNUCCI, 1985; SANTHA, 1994; MOHAMMAD *et al.* 1995; etc). A este respeito, existem modelos desenvolvidos especialmente para solos arenosos ou argilosos, nos quais o aspecto que tem maior influência é a tensão confinante, ou a tensão desvio, respectivamente.

## 1.2 – OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo desta pesquisa é determinar, através de ensaios triaxiais cíclicos, o módulo de resiliência de três solos oriundos de Campo Grande, no Estado do Mato Grosso do Sul, modelar a variação de seus valores com o estado de tensão e obter relações que permitam estimá-los a partir do módulo tangente inicial determinado em ensaios de compressão simples.

## 1.3 – MÉTODOS

Para que os objetivos da pesquisa fossem alcançados foram ensaiados três solos utilizados na construção de rodovias em Campo Grande-MS. Inicialmente, os materiais foram coletados nas respectivas jazidas. Logo depois, foram realizados os ensaios de caracterização (granulometria, Limites de Atterberg e determinação da

massa específica dos sólidos), compactação mini-mcv e perda de massa por imersão, possibilitando assim a classificação destes materiais segundo as classificações HBR, USCS e MCT.

Foram realizados ensaios triaxiais cíclicos em corpos de provas compactados nas energias normal, intermediária e modificada do ensaio Proctor de modo que os resultados permitissem a investigação da variação do módulo de resiliência com o estado de tensão, para cada um dos solos.

Foi ainda investigada a existência de expressões matemáticas que relacionam os valores de módulo de resiliência com resultados de ensaios de compressão simples, analisando conjuntamente os três solos compactados nas respectivas energias de compactação.

Finalmente, com o propósito de se obter uma relação matemática para um universo maior de solos foram englobados, além dos solos estudados nesta pesquisa, os solos estudados anteriormente por Cunto (1998) e Carmo (1998), na EESC-USP.

#### **1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos da seguinte maneira:

O Capítulo 1 apresenta as considerações que procuram justificar o objetivo da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica efetuada na literatura, apresentando alguns trabalhos que tiveram como principal enfoque a variação do módulo de resiliência em função da variação do estado de tensão a que o solo se encontra submetido, bem como, são mostradas algumas relações matemáticas usadas para estimar o módulo de resiliência a partir de resultados de ensaios mais simples que o triaxial cíclico.

O Capítulo 3 discorre sobre a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa e descreve os equipamentos e procedimentos laboratoriais que foram adotados para a caracterização, determinação do módulo de resiliência e do módulo tangente inicial destes materiais.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos na fase experimental do trabalho. São analisados, nesse capítulo, os módulos de resiliência dos solos estudados e a variação desses com o estado de tensão. Analisa-se ainda neste capítulo a possibilidade de desenvolvimento de uma expressão matemática relacionando estes valores de  $M_R$ , o estado de tensão e o  $E_0$  (módulo tangente inicial) obtido a partir dos ensaios de compressão simples.

Finalmente, no capítulo 5 encontram-se as principais conclusões pertinentes aos diversos aspectos abordados na pesquisa, bem como as recomendações para trabalhos futuros.