

**Article:** Avaliação da Capacidade Estrutural dos Pavimentos a Partir dos Dados Deflectométricos - Proposição de Metodologia

**Conference name:** Terceiro Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos E Projetos de Reforço (3º SINAPPRE)

**Conference dates:** 28 de Novembro a 03 de Dezembro de 1999

**Conference place:** Belém, Brazil

**Authors:** Reus Salini

## Cite

Copy and paste a formatted citation or import into a bibliography manager

**MLA 7th edition** Salini, Reus. "Avaliação da Capacidade Estrutural dos Pavimentos a Partir dos Dados Deflectométricos - Proposição de Metodologia." *3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (3º SINAPPRE)*. Belém, Brazil: N.p., 1999. Print.

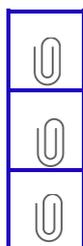
**APA 6th Edition** Salini, R. (1999). Avaliação da Capacidade Estrutural dos Pavimentos a Partir dos Dados Deflectométricos - Proposição de Metodologia. In *3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (3º SINAPPRE)*. Belém, Brazil.

**Chicago 16th edition** Salini, Reus. 1999. "Avaliação da Capacidade Estrutural dos Pavimentos a Partir Dos Dados Deflectométricos - Proposição de Metodologia." In *3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (3º SINAPPRE)*. Belém, Brazil.

**Harvard (author-date)** Salini, R., 1999. Avaliação da Capacidade Estrutural dos Pavimentos a Partir dos Dados Deflectométricos - Proposição de Metodologia. In *3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (3º SINAPPRE)*. Belém, Brazil.

**Vancouver** Salini R. Avaliação da Capacidade Estrutural dos Pavimentos a Partir dos Dados Deflectométricos - Proposição de Metodologia. In: *3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (3º SINAPPRE)*. Belém, Brazil; 1999.

Import citation to:



BIBTEX

.BIB file

RefMan

.RIS file

THOMSON REUTERS  
ENDNOTE

.XML file (EndNote v8, X1, X2)

Right-click the paperclip and select [save embedded file as](#)  
or check the [Attached Files tab](#) in your PDF reader software.

Uma versão mais avançada da metodologia proposta neste artigo foi publicada sob o título "SALINI METHOD 2004" e é acompanhada de um software gratuito para uso do método.

**3º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS  
E PROJETOS DE REFORÇO – 3º SINAPPRE  
BELÉM – PARÁ – BRASIL  
28 de Novembro a 03 de Dezembro de 1999**

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS  
A PARTIR DOS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS - PROPOSIÇÃO  
DE METODOLOGIA**

**REUS SALINI  
salini@gmx.net**

## **1. RESUMO**

O presente trabalho apresenta uma pequena revisão do estado da técnica com relação às metodologias de avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos betuminosos a partir dos dados deflectométricos e metodologias de cálculo do raio do arco circular que descreve a bacia de deflexão. Também é apresentado o “Método Salini”, elaborado por este autor, que permite o cálculo da deformação específica de tração na fibra inferior na camada betuminosa a partir da análise da geometria da bacia de deflexão.

## **2. ABSTRACT**

The present work presents a small revision of the state of the technique related to the methodologies for evaluation of the structural capacity of the asphalt pavements based on the deflection data and methodologies for calculation of the radius of the circular arch that describes the deflectometric basin. The "Salini Method" is also presented, elaborated by this author, allows the calculation of the specific deformation of traction in the inferior fiber in the asphalt layer by the analysis of the geometry of the deflectometric basin.

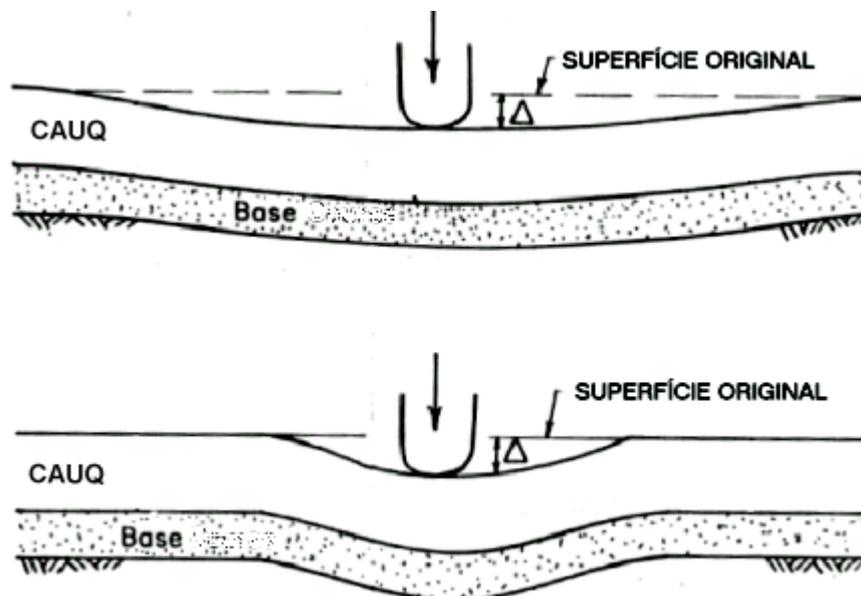
## **3. INTRODUÇÃO**

Os pavimentos rodoviários são estudados já há muitas décadas mas, apesar disso, ainda existem grandes lacunas nos conhecimentos. Uma destas lacunas está na avaliação da deformação específica de tração na fibra inferior da camada betuminosa a partir dos dados deflectométricos, ou seja, a partir do raio da bacia de deflexão e da deflexão vertical máxima. A correta determinação desta deformação específica (horizontal) é de fundamental importância para a avaliação da vida útil do pavimento, constituindo-se em uma informação imprescindível para ser utilizada a curva de vida de fadiga da mistura asfáltica.

Sem ter o objetivo de ser uma revisão completa, mas apenas lembrar o atual estágio de desenvolvimento técnico sobre o assunto, este trabalho apresenta algumas das formas já publicadas para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos a partir da bacia de deflexão medida em campo. Adicionalmente é apresentada uma nova proposta de metodologia para o cálculo da deformação

específica na fibra inferior da camada betuminosa através de um processo baseado na análise geométrica do formato da bacia. Esta nova metodologia é denominada “Método Salini”.

O emprego do raio da bacia de deflexão neste tipo de análise é de fundamental importância pois, a consideração apenas da deflexão máxima normalmente conduz a erros devido ao fato de poderem existir inúmeros comportamentos estruturais para uma mesma deflexão máxima (**Figura 1**). Os dados deflectométricos do pavimento podem ser levantados com o emprego de qualquer equipamento válido, sendo que o Dynaflect, FWD (Falling Weight Deflectometer) e a Viga Benkelman são os mais conhecidos.



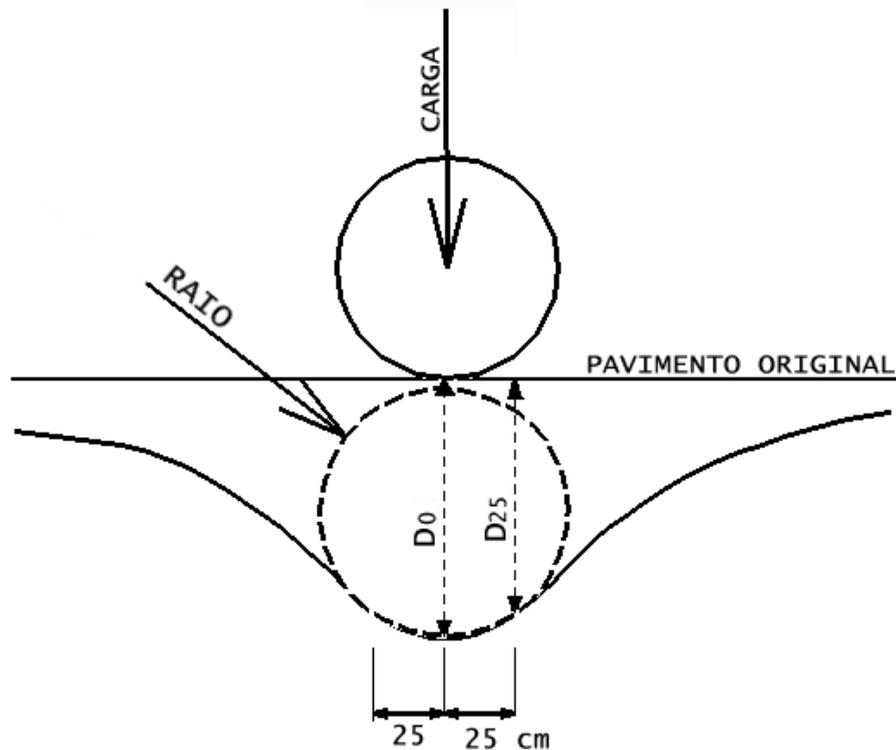
**Figura 1 – Para uma mesma deflexão máxima podem existir diversos formatos de bacias de deflexão e diversas deformações específicas de tração na fibra inferior da camada betuminosa**

#### **4. CÁLCULO DO RAIOS DE CURVATURA DA BACIA DE DEFORMAÇÃO NA REGIÃO DE MÁXIMA DEFLEXÃO**

A literatura técnica nos traz um grande número de funções matemáticas que procuram ajustar um segmento circular na região de máxima deflexão da bacia deflectométrica. São funções circulares, polinomiais e trigonométricas entre outras. A seguir são apresentadas algumas destas expressões.

#### 4.1. FÓRMULA DO DNER

No Brasil a norma DNER - ME 024/94 baseia-se na suposição de que a bacia de deflexão pode ser descrita como uma parábola de segundo grau até a distância de 25 cm do ponto de aplicação da carga. A partir desta hipótese é ajustado um arco circular equivalente no ponto de máxima deflexão, ou seja, quando a distância em relação ao ponto de aplicação da carga é nula (**Figura 2**).



**Figura 2 - Hipótese adotada pelo DNER**

A fórmula adotada pelo DNER é:

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})}$$

Onde:

R = em metros

$D_0$  = Deflexão a 0 cm do ponto de aplicação da carga, em centésimos de milímetros

$D_{25}$  = Deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga, em centésimos de milímetros

## 4.2. EQUAÇÃO GENÉRICA

$$R = \frac{(1 + (y')^2)^{\frac{3}{2}}}{y''}$$

Onde:

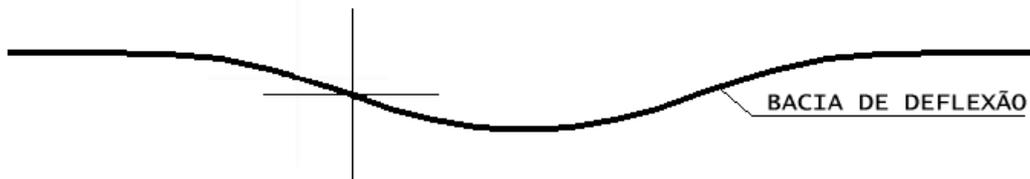
$y'$  = 1ª derivada do polinômio que representa a linha de deformada

$y''$  = 2ª derivada

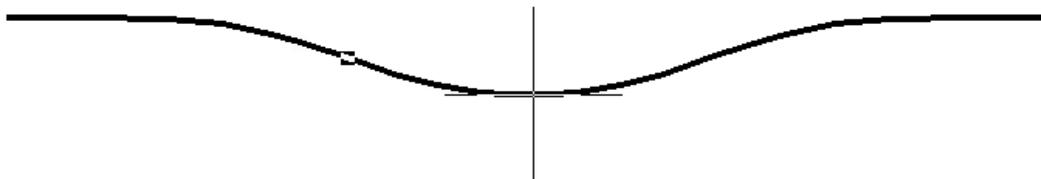
## 4.3. SOFTWARES DE DESENHO AUXILIADO POR COMPUTADOR (CAD)

Com o advento e popularização dos softwares de CAD surgiu uma nova ferramenta para a determinação do raio circular que melhor descreve a região de máxima deflexão de uma bacia de deformação. A partir do desenho digital da bacia deflectométrica é possível desenhar (com o software de CAD) um círculo que passa por três pontos, conforme os passos descritos a seguir:

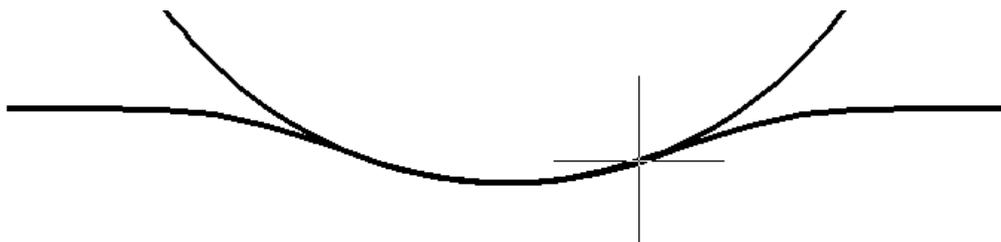
No software, é selecionada a ferramenta de desenho de círculos e esta é configurada para “círculo passando por três pontos” (existe um único círculo que passa por três pontos), então é selecionado o primeiro ponto...



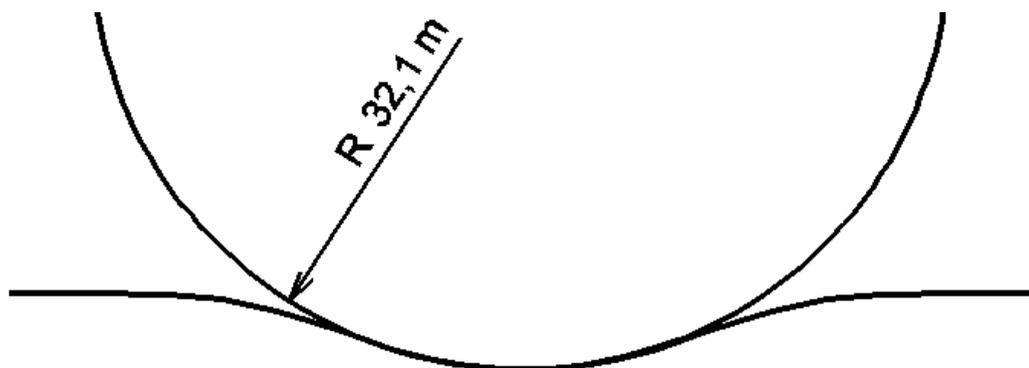
Em seguida é selecionado o segundo ponto...



E então o terceiro e último ponto...



Com o círculo já desenhado é então utilizada a ferramenta apropriada para “escrever” o valor do raio.



Podem haver dificuldades com o emprego deste método devido ao fato das deflexões serem valores muito pequenos em relação à distância horizontal entre os pontos onde foram realizadas as medições das deflexões, exigindo a utilização constante da ferramenta de “zoom”.

## 5. ALGUNS MÉTODOS JÁ PUBLICADOS PARA A AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE ESTRUTURAL E VIDA DE FADIGA A PARTIR DOS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS

### 5.1. DNER-PRO 11/79

A norma do DNER-PRO 11/79, sobre avaliação de pavimentos, traz uma metodologia bastante simples para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos a partir do raio de curvatura da bacia de deformação.

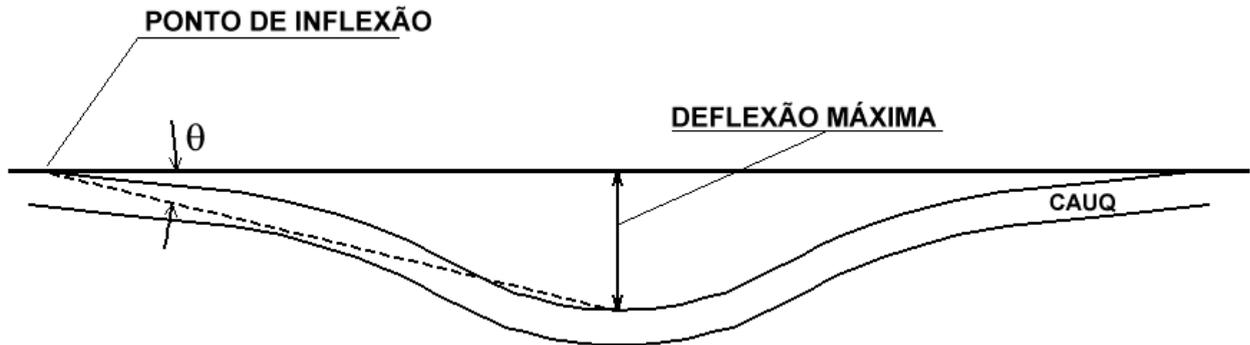
A norma estabelece os seguintes conceitos:

Raio	conceito
< 100 m	pavimentos com problemas estruturais nas camadas superiores
> 100 m	pavimentos bons

A norma estabelece que quanto maior o raio formado na bacia de deformação melhor é o estado do pavimento. Obviamente trata-se de uma análise simplória, mas que pode ser válida em várias situações e representa um avanço em relação à análise “pura” da deflexão máxima.

## 5.2. DECLIVIDADE DA DEFLEXÃO

Segundo Kung (1967) a declividade da deformação vertical reversível corresponde à tangente trigonométrica do ângulo formado pela superfície horizontal original (não deformada) do pavimento e a reta definida pelo ponto de inflexão e pelo ponto de máxima deformação da linha elástica (**Figura 3**).



**Figura 3 - Esquema geométrico da declividade da deflexão**

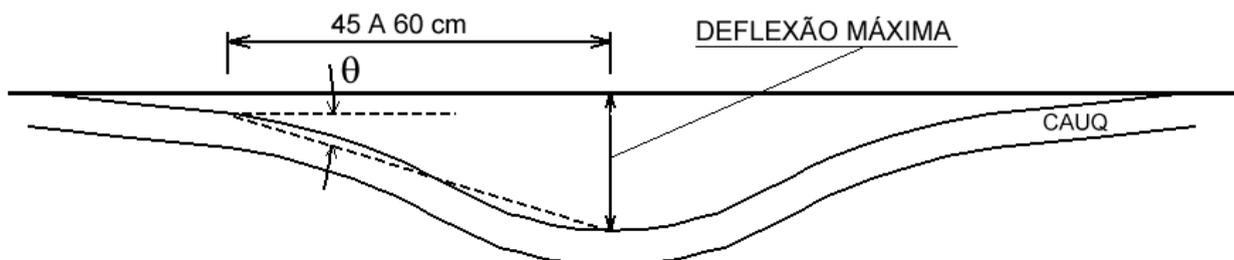
Entretanto pela dificuldade na determinação do ponto de inflexão KUNG sugere que este ponto seja arbitrado a uma distância de 45 a 60 cm (**Figura 4**) do ponto de máxima deflexão. Considerando 60 cm teríamos a seguinte expressão:

$$\tan \theta = \frac{D_0 - D_{60}}{60000}$$

Onde:

$D_0$  = Deformação máxima (ponto de aplicação da carga), em  $10^{-2}$  mm

$D_{60}$  = Deformação a 60 cm do ponto de máxima deflexão, em  $10^{-2}$  mm



**Figura 4 - Esquema da declividade da deflexão simplificada**

Considerando o critério da declividade da deflexão, Kung definiu da seguinte forma o comportamento dos pavimentos:

<b>tan q</b>	<b>conceito</b>
$< 0,75 \times 10^{-3}$	Pavimento bom
$> 0,75 \times 10^{-3}$	Pavimento ruim

Segundo Belisário (1995) dos 40 trechos estudados por Kung, 39 foram enquadrados com sucesso neste critério.

### **5.3. RAI0 DA BACIA DE DEFORMAÇÃO x DEFLEXÃO VERTICAL RECUPERÁVEL**

Na França o LCPC empregou durante algum tempo o produto **R x D** para avaliar a capacidade estrutural dos pavimentos.

Conforme cita Belisário [1] Leger e Autret (1972) apresentam, para pavimentos flexíveis com base estabilizada granulometricamente, como parâmetros de avaliação os seguintes valores:

<b>R x D</b>	<b>conceito do pavimento</b>
$> 5500$	Pavimento bom
$< 5500$	Pavimento ruim

Onde:

R = Raio da bacia de deformação, em metros

D = Deflexão máxima vertical, em  $10^{-2}$  mm

No caso de bases ou sub-bases estabilizadas ou tratadas com cimento portland os autores sugerem a substituição do valor limite de 5500 para 15000.

Também foi proposta a relação **R/D** como forma de aumentar a sensibilidade dos valores resultantes da análise pois, para pavimentos em bom estado o raio é elevado ao mesmo tempo em que a Deflexão máxima é baixa, enquanto para pavimentos ruins a relação seria contrária. Entretanto nenhum valor limítrofe indicativo do bom ou mau desempenho foi estabelecido para a relação R/D.

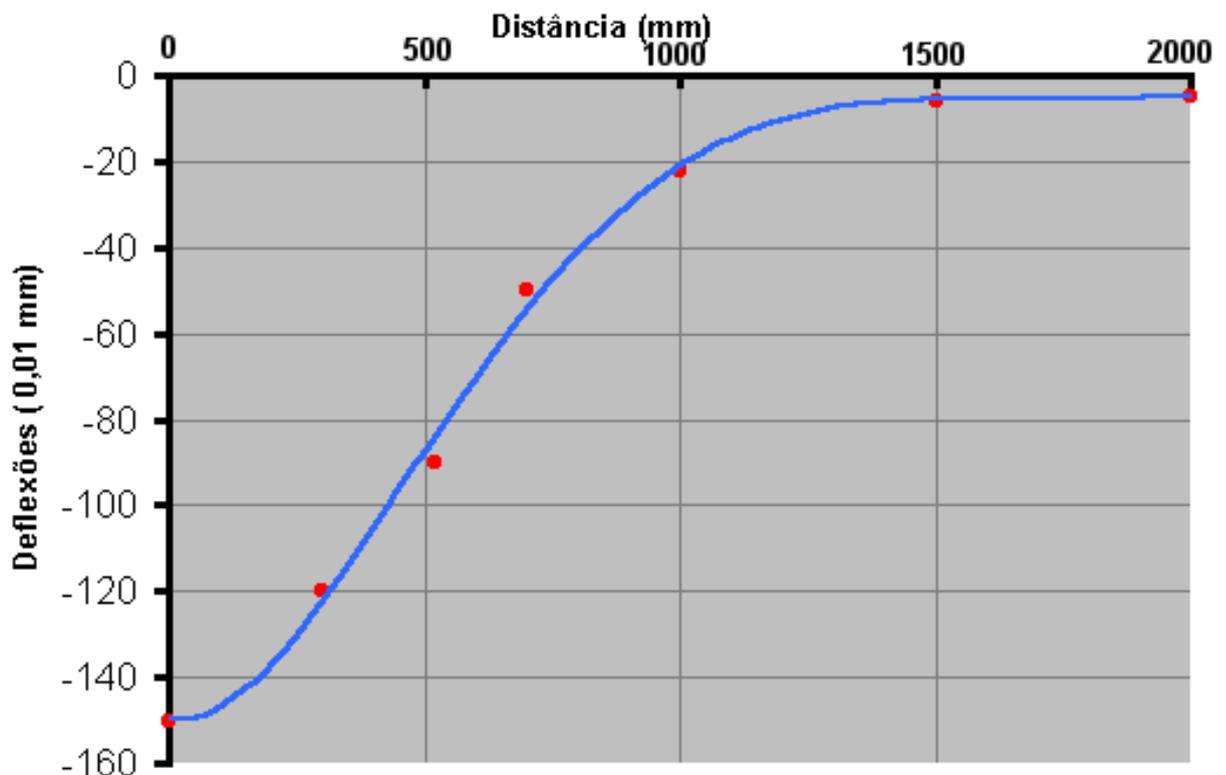
### **5.4. ANÁLISE COMPUTACIONAL**

Mediante o emprego de softwares de análise (ex.: Elsym5) ou, preferencialmente, de retroanálise de estruturas é possível, além de calcular os

Módulos (E) da estrutura, reproduzir a bacia de deformação e então verificar a deformação específica de tração a que o pavimento está sujeito. Com o aumento da capacidade de processamento e simulação dos computadores já é possível utilizar softwares que testam um elevado número de combinações de estruturas até conseguir ajustar a bacia de deformação calculada à bacia medida em campo.

Como ponto de partida para a análise alguns destes softwares adotam valores "sementes" para o Módulo (E) da camada betuminosa e granular calculados a partir de metodologias empíricas e/ou modelos teóricos, como as equações publicadas por Thompson em 1982 [5] e 1989 [4].

Para que a simulação seja possível o usuário precisa definir as espessuras das camadas constituintes bem como quais são os materiais, após, o software, por processo iterativo, faz o ajuste entre a bacia de deformação calculada e a medida. Exemplo dos dados de saída de um software de retroanálise é apresentado na **Figura 5**, onde podem ser observados os pontos medidos em campo e a bacia deflectométrica ajustada.



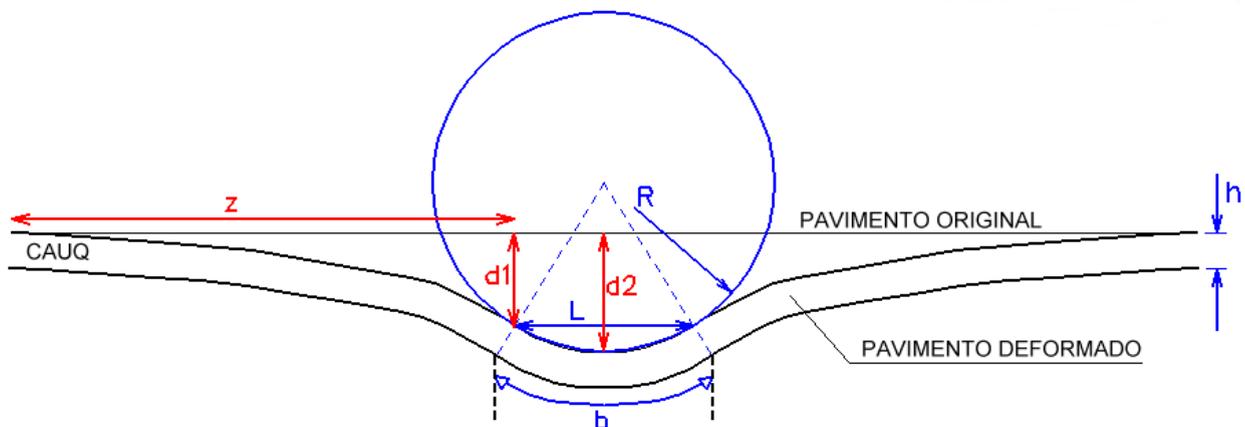
**Figura 5 - Tela contendo a curva de deformação calculada e os pontos de deflexão medidos em campo**

## 6. MÉTODO SALINI

O método elaborado por este autor permite, de forma simples e eficaz, o cálculo da deformação específica de tração na fibra inferior da camada betuminosa, informação de suma importância para possibilitar a utilização da curva de vida de fadiga da mistura asfáltica e, desta forma, determinar o valor do número “N” (número de solicitações admissíveis do eixo padrão).

Este método baseia-se em uma análise geométrica da bacia deflectométrica e parte da premissa que a região próxima ao ponto de máxima deflexão pode ser descrita como um arco circular de raio “R”, sendo este modelo, desta forma, válido prioritariamente nestes casos. Neste arco circular a deformação horizontal específica de tração na fibra inferior da camada betuminosa é considerada constante.

Outra premissa do método é que a deformação horizontal específica produzida pela deflexão “d1” (**Figura 6**) está distribuída na extensão indicada por “z”, assim, teremos a diferença das deflexões (d2 – d1) distribuída na região de máxima deflexão, ou seja, na extensão “L”, que, por sua vez, sob a ação da carga "deforma" até o valor “b”. Como pode ser observado no esquema do método, “d2” representa a deflexão máxima e “d1” é a deflexão na extremidade da região definida por “L”.



**Figura 6 - Esquema geométrico do Método Salini**

O comprimento “L” é definido pelo usuário e requer uma análise criteriosa da forma da bacia de deformação, onde deve-se procurar identificar a região (extensão “L”) próxima à deformação máxima que pode ser descrita como um segmento circular. O raio “R” pode ser determinado por qualquer metodologia e precisa ser válido dentro

da extensão delimitada por “L”, enquanto “h” representa a espessura da camada betuminosa.

Adaptando a fórmula empregada para o cálculo do comprimento de arcos circulares podemos estabelecer que:

$$b = \frac{\pi}{180} \cdot (R + h) \cdot \left[ 2 \cdot \arcsen \left( \frac{L}{2 \cdot R} \right) \right]$$

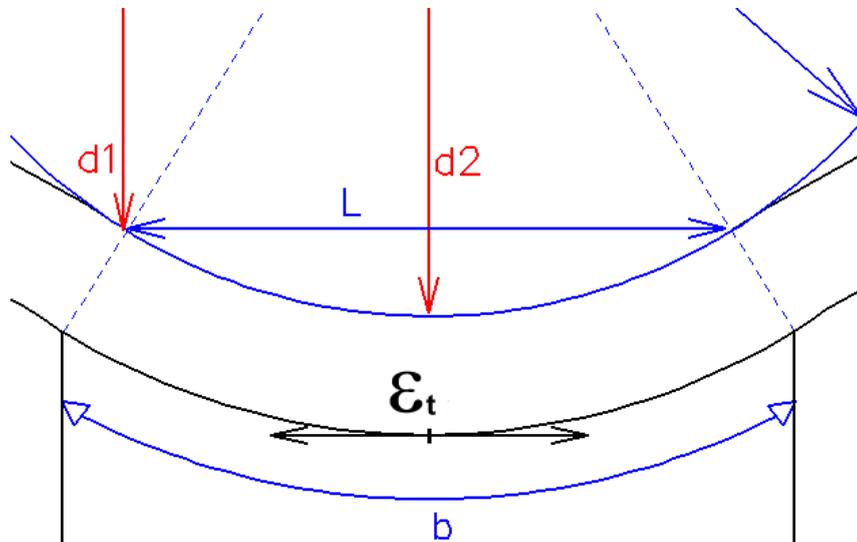
As variáveis “R”, “h” e “L” devem ser expressas em uma mesma unidade e, por conseqüência, o valor de “b” também é encontrado na mesma unidade. A função trigonométrica **arco seno (arcsen)** deve ser calculada em **graus**.

A deformação específica (**Figura 7**) pode ser calculada a partir do quociente entre “b” e “L”, ou seja:

$$\epsilon_t = \frac{b}{L} - 1$$

Onde:

$\epsilon_t$  = Deformação específica de tração, adimensional (mm/mm, m/m, ...)



**Figura 7 – Detalhe da região de máxima deflexão do pavimento**

## 7. CONCLUSÃO

A consideração de que a bacia de deformação na região de máxima deflexão pode ser descrita por um arco circular é uma aproximação aceitável, mas a determinação da validade de uma determinada fórmula de cálculo do raio para uma bacia de deformação específica é bastante difícil. Esta análise seria facilitada se estivesse disponível um software específico para este fim e que permitisse efetuar a análise visual, desenhando a bacia de deformação e o raio calculado para descrevê-la com escala vertical ampliada em relação à horizontal, permitindo com isso o aumento da sensibilidade dos dados.

Após uma rápida revisão de algumas metodologias empregadas para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos a partir dos dados deflectométricos pode-se observar claramente uma elevadíssima carga de empirismo nos conceitos adotados.

O **MÉTODO SALINI**, aqui apresentado, não tem por objetivo substituir as metodologias até agora empregadas, mas é apresentado com o objetivo de ampliar as possibilidades de análise, podendo constituir-se em uma atrativa alternativa para o cálculo da deformação específica de tração em pavimentos betuminosos a partir dos dados deflectométricos.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] SOUZA, Paulo Roberto Belisário Soares de. **Considerações sobre a Utilização de Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação para Avaliação Estrutural de pavimentos**. São Paulo: 1996, 106 p.
- [2] **Setra / Auscultation des infrastructures routières** [on-line]. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.groupets.com/francais/setra/auscultation.html>. Arquivo consultado em 02 de Agosto de 1999 às 19:19 hs (GMT -03:00).
- [3] **Falling Weight Deflectometers** [on-line]. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.pavement-consultants.com/fwd.htm>. Arquivo consultado em 02 de Agosto de 1999 às 18:55 hs (GMT -03:00).
- [4] THOMPSON, M.R. **ILLI-PAVE Based NDT Analysis Procedures, Nondestructive testing of pavements and Backcalculation of moduli**. In: American Society for Testing and Materials, Philadelphia, ASTM STP 1026, 1989, p. 487-501.

- [5] THOMPSON, M.R. **Discussion**. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Struct. Design of Asphalt Pavements, Vol. II. In: DAPS [on-line]. 1982. p. 293-294. Arquivo consultado em 02 de Agosto de 1999 às 18:58 hs (GMT -03:00).
- [6] **Dynatest Falling Weight & Heavy Weight Deflectometer Test Systems** [on-line]. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.dynatest.com/fwdhwd.htm>. Arquivo consultado em 02 de Agosto de 1999 às 18:38 hs (GMT -03:00).
- [7] **Automated Data Collection for Pavement Management Programs** [on-line]. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.ims-terracon.com/photo.htm>. Arquivo consultado em 02 de Agosto de 1999 às 19:10 hs (GMT -03:00).