

# CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL NO ESTUDO DE MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO

**Marcus Flaure B. Falcão**

**Jorge Barbosa Soares**

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Universidade Federal do Ceará

## RESUMO

O presente artigo analisa a influência da largura do friso de aplicação de carga no parâmetro de resistência à tração calculado a partir do ensaio de compressão diametral. Este parâmetro não considera o efeito do estado multiaxial de tensões ao qual está submetido o corpo-de-prova. Ensaio realizados em misturas asfálticas e cimentadas revelam que a resistência à tração varia com a largura do friso. Mostra-se que o parâmetro de deformação crítica explica satisfatoriamente a variação dos resultados obtidos quando a ruptura ocorre sobre o diâmetro solicitado. Ensaio em solo-cimento mostram que a resistência ao cisalhamento influencia no padrão de ruptura do corpo-de-prova. A constatação de comportamento viscoso nas misturas asfálticas ensaiadas revela a importância da consideração dessa característica na resistência de tais materiais.

## ABSTRACT

This paper presents the analysis of the effect of the loading strip used in the indirect tensile test in diametral compression. This parameter does not take into consideration the multiaxial state of stress to which the specimen is subjected. Test results in asphalt mixtures and Portland cement concrete indicate that the tensile strength is affected by the width of the strip. The results agree with a critical deformation parameter when failure is observed in the loaded diameter. The results in a soil-cement mix also indicate that shear strength of the material has an effect on the failure mode of the specimen. Test results for the asphalt mixtures show the viscous component in the behavior of this material, indicating the importance of considering it in the determination of the strength.

## 1. INTRODUÇÃO

A resistência à tração tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto-cimento e a mistura asfáltica. Vários métodos têm sido propostos para a sua obtenção, incluindo-se técnicas e equipamentos que se estendem desde os empíricos, com resultados difíceis de se interpretar analiticamente, aos teoricamente elegantes mas difíceis de se executar na prática (Luong, 1990). Devido à dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente, diversos métodos indiretos têm sido desenvolvidos para a sua determinação (Carneiro, 1943; Hawkes & Mellor, 1970; Roberts, 1977; Lama & Vutukuri, 1978).

O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração (*RT*) foi desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro para concreto-cimento (Carneiro, 1943). A aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro gera, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro. A popularidade deste ensaio reside não somente na facilidade e rapidez de execução, mas como também no fato de utilizar o mesmo corpo-de-prova cilíndrico e equipamento usados para a obtenção da resistência à compressão do concreto-cimento. Este ensaio também tem sido adotado para a caracterização de misturas asfálticas com a aplicação das forças através de frisos de carga no corpo-de-prova cilíndrico Marshall convencional.

Embora o ensaio de compressão diametral seja recomendado há décadas em vários países como uma maneira indireta de se obter a *RT* do concreto-cimento, tentativas de medições diretas da resistência (Hughes & Chapman, 1965; Elvery & Haroun, 1968; Johnston &

Sidwell, 1968; Hannant *et al.*, 1973) têm levado a resultados diferentes daqueles obtidos indiretamente. Newman & Newman (1969) sugeriram que o sistema tensão-compressão gerado no ensaio de compressão diametral em concreto-cimento levaria a uma *RT* inferior àquela obtida diretamente. Luong (1990), no entanto, comentou que alguns estudos apresentaram valores de resistências obtidas indiretamente superiores em mais de 50% àquelas obtidas diretamente (Hawkes & Mellor, 1970; Wright, 1955). Hannant *et al.* (1973) verificaram que a força máxima obtida no ensaio de compressão diametral para o concreto-cimento é afetada pela presença do friso, sendo inferior àquela obtida diretamente quando da aplicação da carga pontual através de um friso em forma de faca, o mesmo não acontecendo quando da utilização dos frisos normatizados. Singh-Channe (1964) e Spooner (1969) mostraram que frisos menos rígidos e mais espessos do que os normatizados no ensaio de compressão diametral em concreto-cimento provocam o aumento da carga máxima.

No ensaio de resistência à compressão diametral em misturas asfálticas, a aplicação das forças se dá através de frisos metálicos de 1,27 cm de largura com curvatura adequada ao corpo-de-prova cilíndrico. A ASTM D 4123-82 (1987) e o DNER (1994) não consideram a influência destes frisos no cálculo da *RT*. De acordo com a expressão usada por estas entidades, assume-se comportamento unicamente elástico durante o ensaio e a ruptura do corpo-de-prova ao longo do diâmetro solicitado sendo devida unicamente às tensões de tração uniformes geradas.

O presente artigo analisa a influência do friso de carga utilizado no ensaio de compressão diametral através dos resultados de ensaios realizados sob frisos confeccionados com diferentes larguras, em misturas asfálticas, solo-cimento e concreto-cimento. Os resultados indicam que uma deformação crítica representa mais adequadamente o mecanismo de ruptura no ensaio em questão do que a resistência à tração. Considera-se que a deformação crítica é perpendicular ao diâmetro solicitado e pode ser calculada a partir das tensões normais que atuam no ponto submetido à deformação máxima pelas soluções analíticas de Hondros (1959) e da teoria da elasticidade. Espera-se que o presente estudo contribua para uma discussão aprofundada sobre o parâmetro adequado a se obter do ensaio de compressão diametral, uma vez que este ensaio tem sido bastante usado no dimensionamento mecânico de pavimentos. A importância desta discussão deve-se também ao fato de que, embora reveladores, os resultados obtidos, principalmente no caso de misturas asfálticas, são baseados em hipóteses ainda simplificadoras, como elasticidade e homogeneidade do material.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nos últimos anos, verificou-se uma tendência de racionalização do projeto de pavimentos devido à facilitação da resolução de equações diferenciais complexas com a popularização das análises computacionais. Vários programas baseados em métodos como o Método dos Elementos Finitos (MEF) são a base do dimensionamento mecânico que procura prever as tensões e deformações provenientes do tráfego através da simulação de um sistema de camadas submetido a um carregamento padrão e cujos materiais constituintes são caracterizados por ensaios dinâmicos de laboratório (Medina, 1997). Dessa forma, o dimensionamento mecânico tem por objetivo a determinação das espessuras das diversas camadas de modo que as tensões e deformações calculadas computacionalmente sejam compatíveis com as resistências dos materiais constituintes e alguns parâmetros de controle (Motta, 1991). Dentre os parâmetros mais utilizados no dimensionamento mecânico citam-se: deflexão elástica na superfície (*D*); tensão vertical no topo do subleito ( $\sigma_v$ ); deformação

específica de tração ( $\varepsilon_t$ ), tensão de tração ( $\sigma_t$ ) ou diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) na fibra inferior do revestimento.

Dentre os principais defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros, o trincamento resultante do fenômeno da fadiga tem sido apontado como o predominante (Pinto, 1991). Um dos parâmetros mecânicos que procura limitar este dano é a resistência à tração no revestimento, ou seja, procura-se obter computacionalmente uma tensão de tração na fibra inferior do revestimento que seja suficientemente menor do que a resistência à tração do corpo-de-prova submetido ao ensaio de compressão diametral. O ensaio de fadiga por compressão diametral também é realizado com solicitações que são função desta resistência.

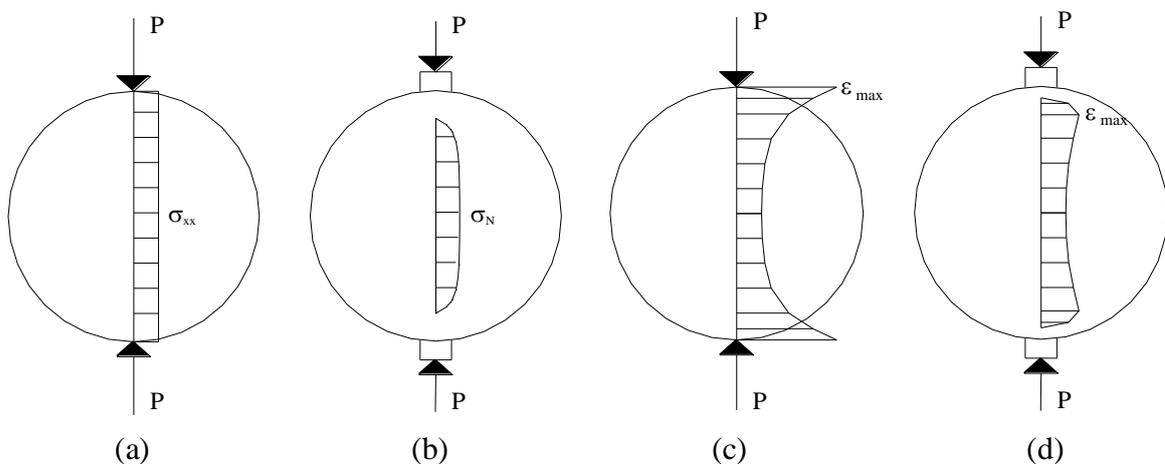
### 2.1. Estado de tensão-deformação em corpos-de-prova cilíndricos

Um cilindro solicitado diametralmente por cargas concentradas de compressão gera a seguinte tensão de tração uniforme por unidade de espessura ( $\sigma_{xx}$ ) perpendicularmente ao diâmetro solicitado (Figura 1a):

$$\sigma_{xx} = \frac{2P}{\pi D} = \frac{P}{\pi R} \quad (1)$$

em que  $\sigma_{xx}$ : tensão de tração uniforme na direção-x (positiva);  
 $P$ : força aplicada por unidade de espessura do cilindro;  
 $R$ : raio do cilindro; e  
 $D$ : diâmetro do cilindro.

A Equação 1 tem sido utilizada para o cálculo da  $RT$  das misturas asfálticas e do concreto-cimento pelas normas brasileiras e americanas. As soluções mais frequentemente usadas como base para interpretação da distribuição das tensões em um cilindro comprimido por cargas diametralmente opostas são atribuídas a Hondros (1959) (Zhang *et al.*, 1997). Pelas suas soluções analíticas, é fácil verificar que na presença do friso as tensões de tração ao longo do diâmetro solicitado diminuem seus valores (Figura 1b), ficando o centro do cilindro sob o friso com uma tensão de tração máxima ( $\sigma_N$ ) inferior àquela gerada por igual carga agindo concentradamente ( $\sigma_{xx}$ ). O aumento da largura do friso para a mesma força  $P$  aplicada reduz a tensão de tração ( $\sigma_N < \sigma_{xx}$ ), como pode ser avaliado pela Equação 2.



**Figura 1:** (a) Tensões de tração uniformes devido à carga concentrada; (b) Tensões de tração não-uniformes devido à influência do friso; (c) Deformações horizontais devido à carga concentrada; (d) Deformações horizontais devido à influência do friso

As tensões normais ao longo do diâmetro solicitado considerando-se o efeito do friso (Figura 2b) são avaliadas pelas seguintes expressões (Hondros, 1959):

$$\sigma_x(0, y) = \frac{P}{\pi t} \left[ \frac{(1 - \bar{y}^2) \text{sen} 2\alpha}{1 - 2\bar{y}^2 \cos 2\alpha + \bar{y}^4} - \arctan \left( \frac{1 + \bar{y}^2}{1 - \bar{y}^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (2)$$

$$\sigma_y(0, y) = -\frac{P}{\pi t} \left[ \frac{(1 - \bar{y}^2) \text{sen} 2\alpha}{1 - 2\bar{y}^2 \cos 2\alpha + \bar{y}^4} + \arctan \left( \frac{1 + \bar{y}^2}{1 - \bar{y}^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (3)$$

em que  $P$ : força aplicada por unidade de espessura do cilindro ( $P = 2pt$ );  
 $p$ : pressão uniformemente distribuída na área de contato friso-cilindro;  
 $2t$ : largura do friso;  
 $\alpha$ : arcsen  $t/R$ ; e  
 $y$ :  $y/R$ .

As deformações perpendiculares ao diâmetro solicitado são calculadas a partir da lei de Hooke (Timoshenko, 1951). Para os estados planos de deformação e tensão, são apresentadas as Equações 4 e 5, respectivamente. Ambos os estados já foram considerados em trabalhos que tratam do ensaio de compressão diametral (Chen & Chang, 1978; ASTM D 4123-82, 1987). A condição do cilindro durante o ensaio de compressão diametral, considerando-se inclusive a influência dos frisos, é objeto de estudo em andamento dos autores.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[ \sigma_x - \mu \sigma_y - \mu^2 (\sigma_x + \sigma_y) \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left[ \sigma_y - \mu \sigma_x \right] \quad (5)$$

em que  $E$ : módulo de elasticidade do material; e  
 $\mu$ : coeficiente de Poisson.

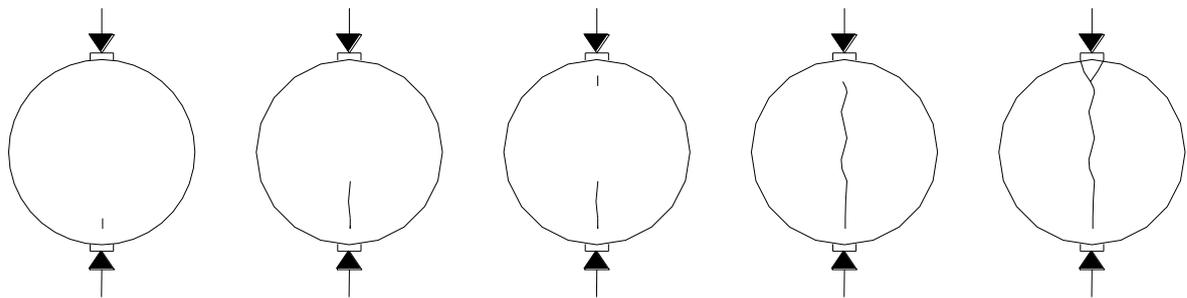
De acordo com as normas vigentes, o cálculo da  $RT$  pela Equação 1 para concreto-cimento e misturas asfálticas assume que o corpo rompe devido às tensões de tração uniformes geradas ao longo do diâmetro solicitado que se igualam à tensão máxima admissível do material ( $\sigma_{adm} = RT$ ), estando este em regime elástico durante todo o ensaio. Este parâmetro considera, portanto, que a ruptura ocorre simultaneamente em todos os pontos sobre o diâmetro solicitado devido unicamente às tensões de tração geradas e sugere que forças de rupturas menores são atingidas no ensaio de compressão diametral realizados com a utilização de frisos de larguras menores, uma vez que a tendência para a carga concentrada gera um valor maior de tensão de tração ( $\sigma_{xx} > \sigma_N$ ).

O cilindro submetido ao ensaio de compressão diametral, no entanto, se encontra em um estado multiaxial de tensões de modo que os pontos sobre o diâmetro solicitado não estão unicamente submetidos a tensões de tração. Allen & Haisler (1985) comentaram que não é possível prever diretamente de um ensaio uniaxial de tração se um material submetido a um estado multiaxial de tensões vai romper, sendo necessário estabelecer algum critério que leve em conta o real mecanismo de ruptura do material.

Embora a tensão de tração horizontal máxima ocorra no centro do corpo-de-prova (Figura 1b), o mesmo não acontece com a deformação horizontal máxima ( $\varepsilon_{max}$ ) que não depende unicamente da tensão de tração atuante (Figura 1d). Ela depende também da tensão de

compressão que atua perpendicularmente conforme pode ser visto na Equação 4. As Figuras 1c e 1d apresentam o comportamento das deformações horizontais ao longo do diâmetro solicitado para o caso da carga concentrada e sob a influência dos frisos normatizados, mostrando que o valor máximo ( $\varepsilon_{max}$ ) em ambos os casos não ocorre no centro. Somente para  $t/R = 0,66$  e  $t/R = 0,76$  pelas equações de Hondros (1959), o centro do cilindro submetido à tensão de tração máxima teria correspondente deformação máxima, considerando-se os estados planos de deformação e tensão, respectivamente. Nestes casos, as deformações horizontais seriam praticamente constantes ao longo de um trecho sobre o diâmetro solicitado.

Portanto, do ponto de vista das deformações calculadas pelas soluções analíticas para um corpo elástico durante o ensaio de compressão diametral sob o friso normatizado, não era de se esperar que a ruptura fosse iniciada no centro do cilindro. Observações visuais dos autores através de filmagem dos diversos ensaios laboratoriais realizados no concreto-cimento e nas misturas asfálticas em estudo com os frisos de diferentes larguras estão compatíveis com esta assertiva. As observações do presente estudo são corroboradas pelo trabalho de Castro-Montero *et al.* (1995) em argamassa de cimento, no qual foi utilizada a técnica da interferometria holográfica a laser, que permite a obtenção computadorizada dos campos tridimensionais de deslocamentos desenvolvidos durante o ensaio, podendo-se distinguir diferentes estágios do processo de ruptura. A Figura 2 apresenta a seqüência de propagação da trinca verificada no estudo de Castro-Montero *et al.* (1995).



**Figura 2:** Seqüência de ruptura observada por Castro-Montero *et al.* (1995)

### 3. RESULTADOS DE LABORATÓRIO

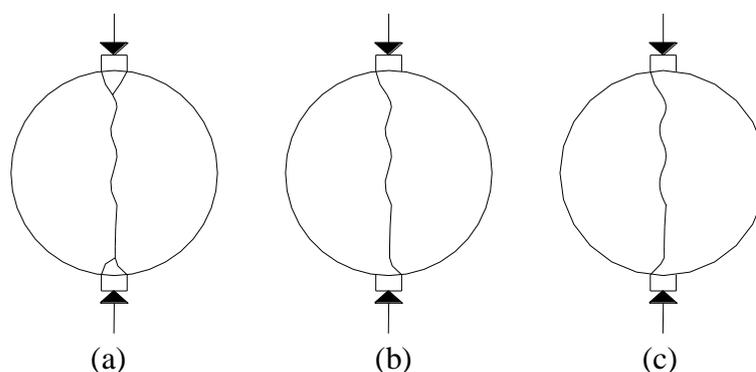
Para verificar a influência dos frisos na força máxima gerada no ensaio de compressão diametral, foram confeccionados frisos com diferentes larguras. A escolha da largura dos novos frisos foi feita de modo que um tivesse a metade da largura do friso normatizado de 1,27 cm, outro tivesse o dobro da mesma largura e um terceiro simulasse a compressão concentrada. Não foi possível a execução do ensaio com o friso confeccionado para simulação da carga concentrada devido tanto à dificuldade de operação quanto ao fato de que o mesmo penetra nas misturas à temperatura de 25°C. Para cada mistura estudada, foram ensaiados 5 corpos-de-prova, sendo apresentadas no estudo as médias de cada conjunto cujos valores tiveram variações inferiores à 15% de sua média.

#### 3.1. Ensaio de compressão diametral em misturas asfálticas

No caso das misturas asfálticas investigadas, foram moldados corpos-de-prova Marshall de uma areia asfalto usinada à quente (AAUQ) com teor ótimo de ligante de 9% e areia com granulometria enquadrada na faixa A do DNER (1997), e também de um concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) com teor ótimo de ligante de 7% e granulometria enquadrada na faixa C do DNER (1997).

Pelas filmagens do ensaio de compressão diametral nas misturas com os frisos de diferentes larguras, antes do registro da força máxima ( $F_{max}$ ) não se observa formação da trinca na superfície do corpo. A hipótese assumida no presente estudo é que a força máxima gerada no ensaio inicia o processo de ruptura pelo ponto submetido à deformação máxima. Esta hipótese não está de acordo com o estudo de Castro-Montero *et al.* (1995) anteriormente referido, em que a formação da trinca ao longo do diâmetro solicitado se inicia a aproximadamente 70% da carga de ruptura no material observado.

Após o registro de  $F_{max}$ , verificou-se pelas filmagens que a ruptura superficial se inicia sobre o diâmetro solicitado definindo, finalmente, uma cunha sob os frisos conforme apresentado na Figura 2. Esta cunha era tão maior quanto maior era a largura do friso. A realização do ensaio em diferentes misturas asfálticas mostra que a ruptura total do cilindro necessariamente passa pela região da cunha. A Figura 3 apresenta uma indicação das linhas de ruptura observadas para diferentes misturas até a ruptura total do cilindro, ressaltando-se que as mesmas passaram pela região da cunha embora não obrigatoriamente definindo-a por completo (Figuras 3b e 3c).



**Figura 3:** Linhas de ruptura observadas

Os resultados dos ensaios de compressão diametral às temperaturas de 10°C e 25°C, utilizando-se os frisos de diferentes larguras, se encontram na Tabela 1 onde é apresentada a força máxima ( $F_{max}$ ) em kgf e a  $RT$  em kgf/cm<sup>2</sup> obtidas considerando-se o efeito do friso (Equação 2). Se a  $RT$  determinada fosse de fato uma propriedade do material, não deveria variar com a largura do friso.

**Tabela 1:** Resultados do ensaio de compressão diametral em misturas asfálticas ( $F_{max}$  em kgf e  $RT$  em kgf/cm<sup>2</sup>)

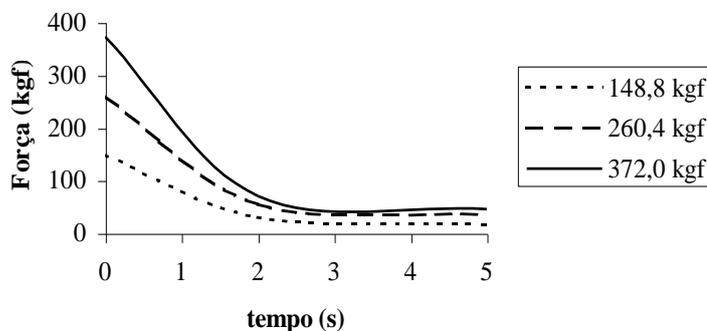
$t/R$	AAUQ (25°C)		AAUQ (10°C)		CBUQ (25°C)		CBUQ (10°C)	
	$F_{max}$	$RT$	$F_{max}$	$RT$	$F_{max}$	$RT$	$F_{max}$	$RT$
0,06	353	3,5	1375	13,4	1025	10,0	2200	21,5
0,13	534	5,2	2400	23,4	1625	15,9	3750	36,6
0,25	688	6,7	3400	33,2	1988	19,4	5500	53,7
0,13*	534	5,3	2400	23,9	1625	16,2	3750	37,3

\*  $F_{max}$  correspondente a  $t/R = 0,13$  e valores de  $RT$  obtidos pela Norma do DNER ( $D = 10,16$  cm e  $b = 6,3$  cm)

Dado que as normas vigentes para o cálculo da  $RT$  das misturas asfálticas se baseiam na teoria da elasticidade, resolveu-se investigar o comportamento viscoso das misturas durante o ensaio de compressão diametral para verificar possíveis limitações da hipótese assumida.

### 3.2. Comportamento viscoso das misturas

O componente viscoso no comportamento das misturas durante o ensaio de compressão diametral foi verificado aplicando-se uma deformação constante (0,8 mm/s) numa prensa até atingir-se uma força arbitrariamente pré-definida, após a qual o deslocamento da prensa era mantido constante, ou seja, parava-se o prato móvel do equipamento. Verificou-se o decréscimo da força registrada com o tempo conforme apresenta as curvas de tendência da Figura 4 para o AAUQ ensaiado à 25°C com o friso normatizado. Consta-se que o componente viscoso do comportamento do material é mais intenso durante os três primeiros segundos. Este tempo coincide com o tempo necessário para atingir-se  $F_{\max}$  (rompimento do AAUQ em questão) quando da realização do ensaio à deformação constante.



**Figura 4:** Comportamento do AAUQ à 25°C

Visto que as normas brasileiras e americanas para o cálculo da  $RT$  são baseadas na teoria da elasticidade, procedeu-se a realização do ensaio de compressão diametral nas misturas a baixas temperaturas. À temperatura de 10°C, verificou-se que os efeitos viscosos podem ser desprezados frente ao tempo de ensaio, o que não aconteceu para as misturas à 25°C (Figura 4). Pinto (1991) realizou ensaio de compressão diametral em misturas asfálticas sob força constante, denominando-o de *creep* estático por compressão diametral, muito embora, como se viu, este ensaio não tenha distribuição uniforme de tensões. Verificou o mesmo autor que as deformações resultantes foram devidas predominantemente ao componente viscoso no comportamento das misturas.

No presente estudo, após determinar-se  $F_{\max}$  no ensaio de compressão diametral à deformação constante para um AAUQ à 25 °C, verificou-se o comportamento desta mistura em ensaio à força constante. Primeiramente foi interessante observar que, enquanto no ensaio à deformação constante foram necessários 3 segundos para o rompimento do corpo-de-prova em  $F_{\max}$ , no ensaio a força constante ( $F_{\max}$ ) a ruptura ocorreu após 5 segundos. A ruptura ocorre em maiores intervalos de tempo a medida em que se diminui a força. Para valores inferiores à  $F_{\max}$ , os seguintes tempos até a ruptura foram observados: (i) 71%  $F_{\max} \Rightarrow 7$  segundos; (ii) 56%  $F_{\max} \Rightarrow 12$  segundos; (iii) 37%  $F_{\max} \Rightarrow 34$  segundos. Os resultados revelam o componente viscoso no comportamento da mistura e a limitação do parâmetro de  $RT$  para caracterizar materiais viscosos. Resolveu-se então investigar se a amplitude da variação de  $F_{\max}$  obtida nos ensaios à deformação constante devido à utilização dos frisos de diferentes larguras (Tabela 1) pode ser explicada pela deformação crítica.

### 3.3. Parâmetro de ruptura por deformação crítica

Perng (1989) apresentou um modelo de ruptura para o concreto asfáltico cujo conceito se baseia numa barra submetida a um carregamento uniaxial de tração responsável por manter a taxa de deformação na barra constante. Comentou o autor que, ao se atingir a resistência à tração do material, a força aplicada na barra decresce devido à formação de microfissuras e o correspondente enfraquecimento do material. Trata-se de um modelo coesivo conforme apresentado em Soares & Freitas (2002).

O parâmetro de ruptura por deformação crítica aqui discutido considera que  $F_{\max}$  gerada no ensaio de compressão diametral leva à ruptura do ponto que experimenta deformação máxima. Isto está de acordo com as observações laboratoriais verificadas no presente trabalho onde  $F_{\max}$  registrada no ensaio leva ao surgimento de uma trinca pouco perceptível pela análise superficial do corpo-de-prova, mas que se torna evidente com o aumento de sua abertura no decorrer do ensaio. É importante mencionar que esta hipótese se refere ao surgimento da trinca numa escala macro. Numa escala inferior, o início da trinca pode ocorrer mesmo antes de se atingir  $F_{\max}$ , e deve ser modelado com base na teoria da mecânica da fratura (Soares & Freitas, 2002).

A trinca se propaga até a completa ruptura do corpo, provocando desde a sua formação numa macro-escala, o decréscimo da força aplicada. Dito de outra forma, a ruptura nos pontos de deformação máxima gera sobrecarga nos pontos que têm deformações imediatamente inferiores dando continuidade à propagação da trinca uma vez que não conseguem contrabalançar a força externa aplicada.

A partir da força máxima ( $F_{\max}$ ) obtida no ensaio de compressão diametral, determinam-se as tensões no ponto que experimenta deformação máxima pelas Equações 2 e 3. A partir daí, pode-se determinar a deformação crítica pelas Equações 4 ou 5, conhecido o módulo de elasticidade do material. No presente estudo, não são apresentados valores de deformações visto que não foram determinados os módulos de elasticidade das misturas que poderiam ser consideradas elásticas (misturas asfálticas à 10°C, solo-cimento e concreto-cimento). No entanto, são apresentadas as relações entre as deformações obtidas pelos diferentes frisos, relações estas assumidas independentes de  $E$ .

Para o AAUQ e o CBUQ à 10°C e 25°C, a Tabela 2 apresenta os valores da relação  $\varepsilon_{i0}/\varepsilon_{in}$  onde  $\varepsilon_{i0}$  corresponde a deformação máxima para  $t/R = 0,06$  e  $\varepsilon_{in}$  corresponde a deformação máxima para os outros valores de  $t/R$ , considerando-se os valores de  $F_{\max}$  da Tabela 1. Os resultados revelam que a deformação máxima é aproximadamente constante na ocasião da ruptura em  $F_{\max}$  pelos diferentes frisos para a temperatura de 10°C, na qual se podem desprezar os componentes viscosos das misturas. Considerou-se o coeficiente de Poisson de 0,3 (Medina, 1997) e o estado plano de deformação.

**Tabela 2:** Relações  $\varepsilon_{i0}/\varepsilon_{in}$  para o AAUQ e o CBUQ à 10°C e 25°C

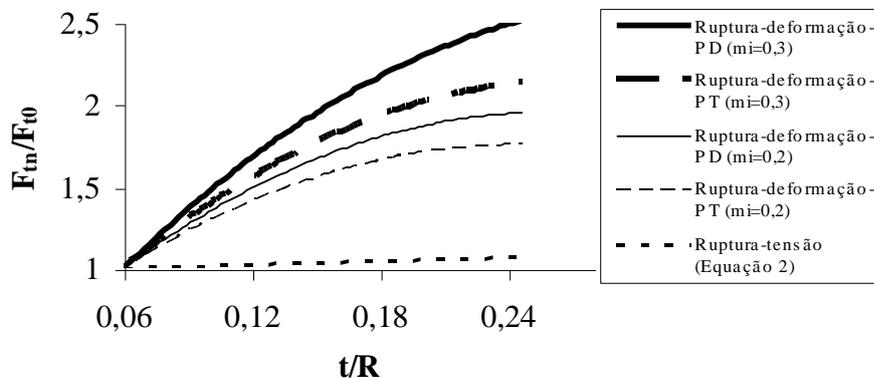
$t/R$	AAUQ		CBUQ	
	25°C	10°C	25°C	10°C
0,06	1,00	1,00	1,00	1,00
0,13	0,87	1,01	0,91	0,98
0,25	0,77	0,98	0,77	0,99

Pelos dados das Tabelas 1 e 2, o parâmetro deformação crítica parece ser mais adequado do que a resistência à tração para caracterizar o comportamento das misturas por considerar a combinação de tensões atuantes (Equações 2 e 3 no caso do cilindro submetido à compressão diametral). A adequação do parâmetro deformação crítica é limitada a situações em que o material apresenta-se aproximadamente elástico.

Outra forma de verificar a limitação da resistência à tração indireta para caracterizar a ruptura de um material elástico é a seguinte: se a ruptura se inicia no centro do corpo-de-prova por possuir tensão de tração máxima, pode-se construir uma curva para a previsão da força de ruptura do material sob frisos de dimensões diferentes através da Equação 2. Supondo-se que uma força  $F_1$  gere tensão de tração máxima  $\sigma_{N1}$  no centro do cilindro da Figura 1b correspondente à tensão admissível do material ( $\sigma_{adm} = RT$ ) quando se utiliza o friso convencional. A utilização de um friso com maior largura para a mesma força  $F_1$  faria com que a tensão diminuísse para  $\sigma_{N2}$  (Equação 2). A força  $F_2$  necessária para gerar  $\sigma_{adm}$  quando se utiliza este friso maior seria então dada por  $F_1 \times (\sigma_{N1}/\sigma_{N2})$  uma vez que as tensões geradas ao longo dos diâmetros horizontais e verticais do cilindro são proporcionais a força aplicada (Equações 2 e 3).

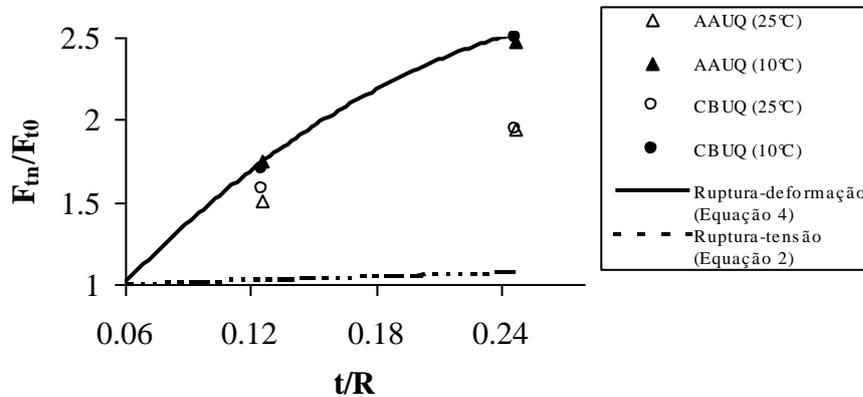
Se ao invés de se considerar que o corpo rompe à tensão de tração máxima assumir-se que ele rompe quando a deformação do ponto que experimenta seu valor máximo ao longo do diâmetro solicitado atinge um valor crítico, pode-se também construir curvas de previsão de ruptura pelas Equações 4 e 5. Observa-se que a deformação também é proporcional à força aplicada. É importante mencionar que a localização do ponto de deformação máxima bem como os valores destas deformações variam com a largura do friso, coeficiente de Poisson do material e estado de tensão em que se encontra o cilindro (plano de deformação ou de tensão).

A Figura 5 apresenta, considerando-se os parâmetros de resistência à tração (Equação 2) e deformação crítica (Equações 4 e 5), os valores de  $F_{tm}/F_{t0}$  para os diferentes  $t/R$  onde  $F_{tm}$  representa a força de ruptura utilizando-se frisos de  $t/R > 0,06$  e  $F_{t0}$ , a força correspondente à ruptura pelo menor friso confeccionado ( $t/R = 0,06$ ). As curvas que representam o critério deformação crítica foram obtidas considerando-se os estados planos de deformação (PD) e de tensão (PT). A Figura 5 apresenta ainda uma análise de sensibilidade com respeito ao coeficiente de Poisson sendo usados os valores 0,2 e 0,3. Do ponto de vista teórico, forças de ruptura maiores são necessárias para frisos com larguras maiores, sendo esta tendência bem mais acentuada quando se considera o parâmetro deformação crítica.



**Figura 5:** Variação da força de ruptura com as dimensões do friso pelos diferentes critérios

Na Figura 6, são apresentadas as relações  $F_{tn}/F_{t0}$  dos resultados da Tabela 1 que são comparadas com as relações provenientes dos parâmetros de resistência à tração e de deformação crítica considerando-se o coeficiente de Poisson de 0,3 e o estado plano de deformação. O ponto inicial ( $t/R = 0,06$ ;  $F_{tn}/F_{t0} = 1$ ) é o mesmo para as curvas e os resultados laboratoriais.



**Figura 6:** Comparação dos critérios de ruptura por resistência à tração e deformação crítica para ensaios em misturas asfálticas

Para as misturas à 10°C, a Figura 6 mostra que o parâmetro deformação crítica pode explicar a variação de  $F_{max}$  ocorrida nos ensaios realizados com os diferentes frisos. Isto é entendido pela concordância dos resultados do AAUQ e CBUQ à 10°C (comportamento praticamente elástico) com a curva do parâmetro deformação crítica. Verifica-se ainda pela Figura 6 que o maior tempo necessário para o registro da  $F_{max}$  no ensaio de compressão diametral favorece o processo de ruptura levando a menores relações  $F_{tn}/F_{t0}$  para as misturas à 25°C quando comparado às misturas à 10°C.

Com o intuito de se melhor avaliar o parâmetro de ruptura por deformação crítica, realizou-se o ensaio de compressão diametral em solo-cimento e concreto-cimento utilizando-se os frisos de diferentes larguras. Esses materiais se comportam elasticamente quando da parada do prato móvel da prensa, ou seja, não se observa decréscimo da força com o tempo como há nas misturas asfálticas à 25°C (Figura 4).

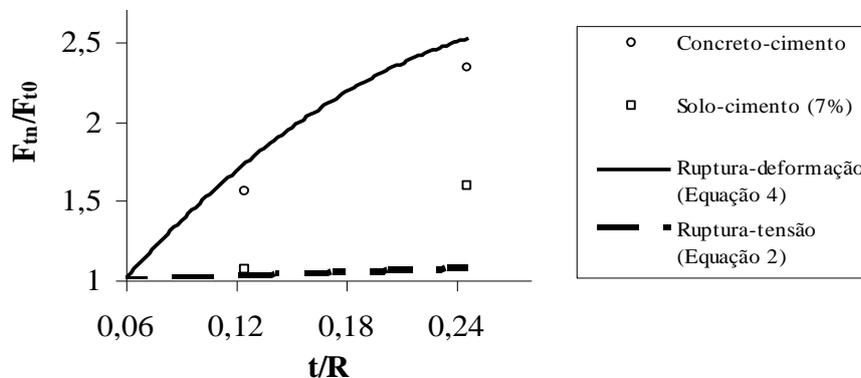
### 3.4. Ensaio de compressão diametral em misturas cimentadas

Foram moldadas misturas de solo laterítico com teor de cimento de 7% (solo-cimento) e corpos-de-prova de concreto-cimento. Os corpos-de-prova foram serrados de modo a terem a mesma espessura de 6,3 cm dos cilindros asfálticos em estudo. A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de compressão diametral nestas misturas. As linhas de ruptura observadas no concreto-cimento se deram segundo apresenta a Figura 3, indicando que o padrão de ruptura é predominantemente devido à tração.

**Tabela 3:** Resultados do ensaio de compressão diametral em misturas cimentadas ( $F_{\max}$  em kgf e  $RT$  em kgf/cm<sup>2</sup>)

$t/R$	Solo-cimento (7%)		Concreto-cimento	
	$F_{\max}$	$RT$	$F_{\max}$	$RT$
0,06	181	1,8	4500	44,6
0,13	212	2,1	7000	68,3
0,25	243	2,4	10500	96,9

Os resultados dos ensaios em concreto-cimento mostram que a  $RT$  varia consideravelmente com a largura do friso. A menor variação da  $RT$  para mistura de solo-cimento se deve ao fato de que o mesmo não rompeu ao longo do diâmetro solicitado em todos os casos ao se utilizar os frisos de diferentes larguras. Esta verificação é devida aos altos valores de tensões cisalhantes na região do cilindro em contato com as extremidades do friso uma vez que alguns planos de ruptura foram paralelos ao diâmetro solicitado ligando as extremidades dos frisos superior e inferior. Assim, parece que a trinca inicial partiu dessas extremidades, não se propagando sobre o diâmetro solicitado. Este fato foi confirmado pelos autores em simulações numéricas que serão objeto de trabalho futuro onde se pode constatar também que a formação da cunha (Figura 3) se deve às tensões cisalhantes. Em virtude dos fatos mencionados, a resistência ao cisalhamento de um material pode influenciar na força máxima necessária ao cálculo da  $RT$  pelo ensaio de compressão diametral. A Figura 7 mostra de forma análoga à Figura 6, as relações  $F_m/F_{t0}$  obtidas para as misturas cimentadas da Tabela 3.



**Figura 7:** Comparação dos critérios de ruptura por resistência à tração e deformação crítica para ensaios em misturas cimentadas

A variação dos resultados obtidos para o concreto-cimento sugere que o mesmo apresenta coeficiente de Poisson em torno de 0,3 considerando-se tanto o estado plano de deformação como o de tensão. Este valor é aceitável para o concreto-cimento em estudo que apresentou uma resistência à compressão de 26,4 MPa, visto que o coeficiente de Poisson do concreto-cimento pode variar de 0,15 para uma resistência à compressão de 10,8 MPa a 0,25 para uma resistência de 25,5 MPa (Sussekind, 1981).

#### 4. CONCLUSÕES

No ensaio de compressão diametral, os pontos do cilindro submetidos a tensões de tração horizontais ao longo do diâmetro vertical também estão submetidos a tensões de compressão.

Neste caso, as deformações horizontais são resultantes da combinação das tensões de tração com as tensões de compressão atuantes, sendo que estas últimas contribuem para o aumento da deformação horizontal. Com base em resultados analíticos e laboratoriais, concluiu-se que a ruptura inicial verificada no ensaio de compressão diametral em materiais elásticos está relacionada com uma deformação crítica em um ponto que não obrigatoriamente possui tensão de tração máxima ao longo do diâmetro solicitado, ou está relacionada com a resistência ao cisalhamento do material ensaiado. Isto é melhor entendido quando se constata que um mesmo material elástico ensaiado com frisos de diferentes larguras fornece uma resistência à tração variável que depende da largura desses frisos. Ensaio de compressão diametral em solo-cimento revelam que a resistência ao cisalhamento pode influir no padrão de ruptura do cilindro. Dessa forma, a ruptura do corpo-de-prova submetido ao ensaio de compressão diametral pode não se iniciar no diâmetro solicitado se a ruptura por cisalhamento acontece primeiramente, afetando, conseqüentemente, a força máxima registrada no ensaio necessária ao cálculo do parâmetro de resistência à tração. No caso das misturas asfálticas, verificou-se a importância da consideração do componente viscoso em seus parâmetros resistentes.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Prof. Jacques de Medina e a Profa. Laura da Motta da COPPE/UFRJ, ao Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro e ao Dr. Lucas de Melo – PETRAN/UFC pelas observações a respeito do estudo em andamento. Agradecimentos são devidos também à equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC. O primeiro autor agradece a Agência Nacional do Petróleo e o segundo autor ao CNPq pelas respectivas bolsas de pesquisa.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Allen, D. H. & Haisler, W. E. (1985) Introduction to Aerospace Structural Analysis. Texas A&M University, U.S.
- ASTM C 496 (1986) Standard Test Method For Splitting Tensile Strength of The Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM D 4123-82 (1987) Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, 2002 American Society for Testing and Materials.
- Carneiro, F. L. (1943) Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos. Comunicação, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio De Janeiro.
- Castro-Montero, A., Jia, Z., Shah, S. P. (1995) Evaluation of Damage in Brazilian Test Using Holographic Interferometry. ACI Materials Journal. Title No. 92-M29.
- Chen, W. F. & Chang, T. Y. P. (1978) Plasticity Solutions for Concrete Splitting Tests. Journal of The Engineering Mechanics Division, Proceedings of The American Society of Civil Engineering, Vol. 104.
- DNER (1994) Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem ME 138, Rio de Janeiro.
- Elvery, R. H. & Haroun, W. (1968) A Direct Tensile for Concrete under Long or Short Term Loading. Magazine of Concrete Research Vol. 20, No. 63.
- Hannant, D. J., Buckley, K. J. & Croft, J. (1973) The Effect of Aggregate Size on the Use of the Cylinder Splitting Test as a Measure of Tensile Strength, Vol. 6, No. 31, Matériaux et Constructions.
- Hawkes, I. & Mellor, M. (1970) Uniaxial Test in Rock Mechanics Laboratories. Engng Geology 4.
- Hondros, G. (1959) The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete. Australian J. Appl. Sci., 10 (3).
- Hughes, B. P. & Chapman, G. P. (1965) Direct Tensile Test for Concrete Using Modern Adhesives. Bulletin Rilem. No. 26.
- Johnston, C. D. & Sidwell, E. H. (1968) Testing Concrete in Tension and in Compression. Magazine of Concrete Research, Vol. 20, No. 65.
- Lama, R. D. & Vutukuri, V. S. (1978) Handbook on Mechanical Properties of Rock. Transportation Technology Publication, Vol. 1.

- Luong, M. P. (1990) Tensile and Shear Strengths of Concrete and Rock. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, Nos. 1/2/3
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*, 1a. ed., Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ.
- Motta, L.M.G. (1991) *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Parâmetro de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*; Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Newman K. & Newman J. B. (1969) *Failure Theories and Design Criteria for Plain Concrete*. International Conference on Structure, Solid Mechanics and Engineering Design. Paper 83, Southampton University.
- Perng, J-D. (1989) *Analysis of Crack Propagation in Asphalt Concrete Using a Cohesive Crack Model*. Tese de Doutorado, Ohio State University.
- Pinto, S. (1991) *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Roberts, A. (1977) *Geotechnology-An Introductory Text for Students and Engineers*. Pergamon Press, Oxford.
- Singh-Channe, J. (1964) *The Effect of Testing Conditions on the Apparent Indirect Tensile Strength of Concrete*. Thesis. Battersea College of Technology, London.
- Soares, J. B. & Freitas, F. A. C. (2002) *Modelagem da Formação e Propagação de Trincas em Misturas Asfálticas*. Aceito para o XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal.
- Spooner, D. C. (1969) *Measurement of the Tensile Strength of Concrete by an Indirect Method – The Cylinder Splitting Test*. Cement and Concrete Association, TRA 419.
- Sussekind, J. C. (1981) *Curso de Concreto*, Vol. 1, 2ª Ed., Porto Alegre.
- Timoshenko, S. P. & Goodier, J. N. (1951) *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.
- Wright, P. J. F. (1955) *Comments on an Indirect Tensile Test on Concrete Cylinders*. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 7, No. 20.
- Zhang, W., Drescher, A. & Newcomb, D. E. (1997) *Viscoelastic Analysis of Diametral Compression of Asphalt Concrete*. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 6, 596-603.

Endereço dos autores:

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/ N°  
Departamento de Engenharia de Transportes, DET Bloco: 703 CEP: 60.455-970  
Fortaleza - Ceará - Brasil  
e-mail: [mfbf@bol.com.br](mailto:mfbf@bol.com.br) , [jsoares@det.ufc.br](mailto:jsoares@det.ufc.br).