

RESISTÊNCIA À FADIGA DE CONCRETOS CONVENCIONAIS PARA PAVIMENTAÇÃO

Tatiana Cureau Cervo

José Tadeu Balbo

Pesquisador PRODOC - CAPES, Universidade Federal de Santa Maria

Professor Associado, Universidade de São Paulo

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados de uma pesquisa experimental laboratorial sobre a resistência à fadiga de um concreto de cimento Portland convencional para pavimentos, o que permitiu a construção de modelos de ruptura por fadiga para material tipicamente empregado em obras de pavimentação em São Paulo. Estudou-se o processo de fadiga do concreto por meio de ensaios conduzidos em regime de tensão constante (prática convencional) como também com ensaios em tensão variável, aferindo-se ainda os efeitos decorrentes da variação na frequência de aplicação das cargas bem como da saturação de amostras. Os resultados sugerem o emprego de estudos com concretos nacionais para supressão de modelos importados que não podem representar o comportamento de misturas locais.

ABSTRACT

Results of a laboratorial investigation concerning fatigue resistance of conventional Portland cement concrete for paving are presented herein, as well as new statistical fatigue models for concrete pavement design purposes, employing a mixture typically from São Paulo area. Constant and variable stress regimens were used for performing tests and performance of prismatic samples under several frequencies as well as under saturated (non-confined) condition were assessed. Received data strongly suggests the need for searching specific models for local materials instead of using abroad derivate equations for design.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos de concreto de cimento Portland há muitas décadas têm sido utilizados no país, seja para grandes construções como as rodovias, portos e aeroportos, seja para construções menores como corredores de ônibus e pisos industriais, tendo um impulso marcante em meados dos anos 90 quando passou a ser objeto crescente de interesse nos meios rodoviários brasileiros. Este fato talvez explique porque o desenvolvimento científico nesta área seja limitado, uma vez que até hoje existem muitos questionamentos, por exemplo, relacionados ao desempenho deste material frente ao fenômeno da fadiga, para concretos tipicamente nacionais. A inexistência de um critério de dimensionamento à fadiga, apropriado às estruturas de pavimentos de concreto no Brasil, resultou no interesse científico pelo esclarecimento desse comportamento mecânico dos concretos.

Com relação à resistência à fadiga do material, que tem sido empregada como critério de ruptura mais racional para dimensionamento de pavimentos de concreto (relacionado ao surgimento de fissuras), as normas brasileiras não fazem menção no que diz respeito aos pavimentos, que são submetidos a tensões de tração na flexão. Assim, restam como referências sobre o assunto consultas a trabalhos realizados no exterior ou a documentos brasileiros fundamentados em experiências internacionais, que em muitos aspectos diferem das condições típicas existentes no Brasil para os concretos de cimento Portland. Neste contexto, este artigo apresenta parte da pesquisa de doutorado desenvolvida por Cervo (2004) que possibilitou construir um modelo à fadiga para concreto convencional de pavimentação. Além disso, foi verificado experimentalmente o efeito de diferentes frequências de aplicação de carga na resistência à fadiga, o efeito da presença de umidade no concreto em sua resistência à fadiga, além de verificada a resistência à fadiga de um mesmo concreto submetido a diferentes níveis de tensões dinâmicas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O processo de degradação (ou danificação) por fadiga está associado à deterioração sob carregamento cíclico que leva ao surgimento e à evolução de microfissuras ou à propagação de microfissuras pré-existentes no material, podendo causar a ruptura da estrutura. A fadiga ocorre devido a um processo de degradação progressiva na microestrutura cristalina do material sujeito a condições de solicitações de magnitude inferior à capacidade resistente do material, isto é, a deformações ou a tensões impostas com magnitudes inferiores à deformação ou à tensão de ruptura. Quanto maior o nível de tensão máxima, menor o número de ciclos alcançado, e mais rapidamente o concreto se deteriorará por fadiga, para uma mesma frequência de carregamento. Se um nível relativamente alto de tensão é aplicado, um menor número de cargas repetidas será necessário para que ocorra o colapso da estrutura. A ruptura é também acelerada, pela redução da frequência de aplicação de carga (Stet e Fréney, 1998).

O tráfego ao qual o pavimento está sujeito é de extrema importância no comportamento à fadiga uma vez que a intensidade do carregamento cíclico pode acelerar o surgimento de fissuras e até mesmo o colapso da estrutura do pavimento. Como o tráfego de veículos apresenta grandes diferenças de carregamentos, as cargas nos eixos são altamente variáveis, resultando que a tensão e a frequência de carregamento não são constantes (Balbo, 2000). As cargas que solicitam os pavimentos não são idênticas em magnitude e pressões aplicadas. Ainda, em função da largura da faixa de rolamento e da bitola do eixo do veículo ocorrem deslocamentos laterais das cargas, o que pode influenciar no surgimento de fissuras. Os pavimentos estão sujeitos a um incremento de tensão devido às diferenças de temperatura entre o topo e o fundo da placa de concreto, gerando diferenciais térmicos que causam o empenamento do pavimento. O resfriamento durante a noite causa um gradiente térmico negativo no concreto, em que as tensões de tração ocorrem no topo e as tensões de compressão no fundo, reduzindo as tensões de tração no fundo da placa, embora tal condição não seja dominante para clima tropical. O gradiente de temperatura determina a magnitude da tensão que está ocorrendo. As maiores diferenças de temperatura e, conseqüentemente, maiores tensões, são obtidas em um dia quente de verão, em climas tropicais (Balbo e Severi, 2002).

A frequência de aplicação das cargas é um fator importante a se considerar no desempenho dos pavimentos de concreto e apresenta relevante influência na resistência à fadiga do concreto, uma vez que as cargas são impostas ao pavimento em frequências variadas e existe um tempo de relaxação entre a aplicação de uma carga e outra. Zhang *et al.* (1996) desenvolveram um modelo considerando a influência da frequência de aplicação de carga na resistência à fadiga em flexão realizando seis grupos de testes dinâmicos com frequências distintas. Os resultados mostraram que quanto maior a frequência de aplicação de carga, maior a resistência à fadiga, e que esta, durante o carregamento em flexão, é aproximadamente 80% da resistência estática do material.

Os ensaios dinâmicos de fadiga em laboratório consistem em testes com equipamento adequado, que consiga aplicar uma carga cíclica durante o tempo necessário para se observar a formação de fissuras e a ruptura da amostra que se está ensaiando. Como o pavimento de concreto está sujeito à ação de cargas variáveis e frequências variáveis, alguns trabalhos têm tentado se aproximar desta realidade em pista, determinando o comportamento à fadiga do concreto em ensaios laboratoriais, com tensões ou frequências variáveis. Todavia, muitos pesquisadores têm realizado ensaios experimentais em laboratório com aplicação de cargas e

freqüências constantes principalmente devido às dificuldades e limitações dos equipamentos em realizar ensaios variando a tensão e a freqüência. Os testes à fadiga realizados com tensão ou freqüência constante ou variável são realizados por meio de ensaios dinâmicos em tração pura, em compressão, alternando tração-compressão, ou em tração na flexão simples ou alternada, sendo estes dois últimos os mais comuns e também os que melhor retratam as condições do pavimento em pista. Os modelos de fadiga normalmente são apresentados em função do número de ciclos de carregamentos e da relação entre o nível de tensão atuante no pavimento e a resistência à tração na flexão estática do concreto, podendo ser descritos por meio da relação entre tensões (tensão aplicada pela resistência à tração na flexão) em função do logaritmo do número de repetições de carga (N) à fadiga.

O critério de fadiga do concreto em flexão proposto pela PCA (1984) é similar àquele previamente proposto pela PCA (1966). Uma modificação no número de ciclos de repetições de cargas de 5×10^5 para 10^7 foi realizada para eliminar a descontinuidade na curva anterior que algumas vezes levava a resultados considerados irrealistas pelos autores. Essa alteração no comportamento à fadiga do concreto em flexão determinou um limite de fadiga (o único modelo existente na literatura que sugere um limite de fadiga para pavimentos de concreto). O número permissível de repetições para uma dada carga no eixo foi determinado baseado na relação entre tensões; se inferior a 0,45, é ilimitado. Os modelos de fadiga para relações entre tensões superiores a 0,55 e para valores variando entre 0,45 e 0,55 são representados, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$\log N = 11,78 - 12,11 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (1)$$

e

$$N = \left(\frac{4,2577}{\frac{\sigma}{f_{ct,f}} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2)$$

Um modelo experimental de fadiga em flexão para pavimento de concreto simples foi desenvolvido por Darter (1977), por meio da análise de aproximadamente 140 vigas de concreto, oriundas de três estudos anteriores realizados em laboratório. Os dados obtidos estabeleceram a seguinte expressão para probabilidade de ruptura de 50%:

$$\log N = 17,61 - 17,61 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (3)$$

Pesquisando a influência tanto da resistência à tração na flexão estática do concreto quanto da utilização de agregados de dimensões distintas, Koyanagawa *et al.* (1994) determinaram modelos de fadiga aplicando resistências à tração na flexão de 4,0, 5,2 e 6,0 MPa. Para probabilidade de ruptura por fadiga 50%, a expressão obtida para $f_{ct,f} = 5,2$ MPa é representadas por:

$$\log N = 18,49 - 16,95 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (4)$$

Um modelo experimental empregado no Japão para descrever a fadiga em flexão de pavimentos de concreto utilizando agregados com dimensão máxima de 20 mm e 40 mm foi desenvolvido por Iwama e Fukuda (1986) ensaiando aproximadamente 150 amostras. Os resultados mostraram que o diâmetro máximo do agregado não influenciou no comportamento à fadiga do material, obtendo-se a expressão para probabilidade de colapso de 50% representada por:

$$\log N = 20,04 - 18,52 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (5)$$

Na tentativa de determinar as diferenças no comportamento à fadiga de concretos secos ou saturados, Cornelissen e Leewis (1986) realizaram ensaios onde a tensão máxima foi situada entre 40% e 90% da resistência à tração e a tensão mínima entre 0% e 40% da tensão de tração para ensaios em tração pura, e entre 0% e 30% da resistência à compressão para aqueles alternando tração-compressão. A frequência de aplicação de cargas foi mantida constante em 6 Hz. Aproximadamente 300 resultados foram analisados para determinar o número de ciclos para o colapso, que resultaram nos modelos a seguir apresentados. Para ensaios em tração pura, com amostras secas e saturadas, respectivamente:

$$\log N = 14,81 - 14,52 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_t} \right) + 2,79 \left(\frac{\sigma_{\min}}{f_t} \right) \quad (6)$$

e

$$\log N = 13,92 - 14,52 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_t} \right) + 2,79 \left(\frac{\sigma_{\min}}{f_t} \right) \quad (7)$$

onde, f_t é a resistência do concreto à tração pura e f_{ck} é a resistência do concreto à compressão axial.

Raithby e Galloway (1974) estudaram a influência das condições de umidade no número de ciclos à fadiga em flexão do concreto simples realizando três tipos de ensaios, quais sejam, com o concreto saturado e com o concreto seco ao ar por uma semana. Os testes foram realizados após 6 meses da moldagem dos corpos-de-prova e a relação entre tensões máxima situou-se entre 55% e 95% da resistência à tração na flexão estática. Os ensaios foram conduzidos a uma frequência de 20 Hz e os modelos à fadiga obtidos por meio dos resultados publicados pelos autores, para cada método de cura analisado, são apresentados na sequência, para amostras saturadas e secas ao ar, respectivamente:

$$\log N = 13,275 - 11,39 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_{ct,f}} \right) \quad (8)$$

e

$$\log N = 14,965 - 12,676 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_{ct,f}} \right) \quad (9)$$

Os modelos apresentados representam uma pequena porcentagem dos modelos à fadiga existentes. Muitos outros modelos foram desenvolvidos nos Estados Unidos, Holanda, Itália,

Alemanha, Japão, dentre outros. Este fato comprova a importância de estudos da resistência à fadiga para pavimentos e a necessidade do desenvolvimento de modelos específicos que considerem os materiais, técnicas, tráfego e condições climáticas para as condições de cada região.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA DE FADIGA EM CONCRETO

Para a realização dos ensaios dinâmicos à fadiga foram moldados 90 corpos-de-prova, em concreto convencional. Os corpos-de-prova moldados foram curados por 28 dias em tanque com água e posteriormente permaneceram em curando ao ar em laboratório até pelo menos 6 meses anteriormente aos ensaios de fadiga. As características do concreto utilizado estão apresentadas na Tabela 1, sendo que maiores detalhes sobre os materiais empregados foram anteriormente esclarecidos por Cervo (2004).

Tabela 1: Características do concreto empregado nas moldagens

Materiais ou Propriedades	Valores obtidos
Cimento (kg/m^3)	328
Areia (kg/m^3)	691
Brita 1 (kg/m^3)	483
Brita 2 (kg/m^3)	724
Relação a/c	0,553
Plastificante (L/m^3)	1,148
Ar incorporado (%)	2,6
Abatimento (mm)	65
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias	4,8

Os ensaios à fadiga foram realizados em uma máquina servo-hidráulica da MTS (*Material Test System*) com capacidade máxima de 10000 kN, existente no Laboratório de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), conforme se observa na Figura 1. A frequência de aplicação das cargas durante os ensaios foi de 10 Hz, com exceção dos ensaios em que se buscava verificar a influência da frequência. Em todos os ensaios uma tensão mínima a 7% da resistência à tração na flexão estática do concreto foi aplicada a fim de evitar deslocamentos laterais. A ruptura dos corpos-de-prova ocorreu sempre no terço médio, como se observa na Figura 2. Os ensaios à fadiga realizados foram os que seguem: (1) ensaios com o concreto seco; (2) ensaios com o concreto saturado; (3) ensaios com diferentes frequências de aplicação das cargas; (4) ensaios aplicando diferentes níveis de tensões sobre um mesmo corpo-de-prova. Para os ensaios com o concreto saturado, as amostras permaneceram em tanque com água por sete dias anteriormente aos ensaios à fadiga.

Durante os ensaios recorreu-se a panos encharcados com água para manter a umidade do concreto. Nos ensaios realizados para verificar o efeito da frequência na resistência à fadiga do concreto, empregaram-se três níveis de frequência, sendo eles, 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz, aplicando-se para todos os níveis uma mesma relação entre tensões ($RT = 0,83$). Os ensaios com tensão variável foram realizados de duas maneiras: (a) variando a tensão de forma crescente, quando foram aplicados três níveis de relação entre tensões (RT), quais sejam, $RT_1 = 0,75$ (50000 ciclos), $RT_2 = 0,79$ (30000 ciclos) e $RT_3 = 0,83$ (até a ruptura) e, (b) variando a tensão de forma decrescente, quando foram aplicados dois níveis de relação entre tensões, quais sejam, $RT_1 = 0,85$ (5000 ciclos) e $RT_2 = 0,83$ (até a ruptura).



Figura 1: Máquina servo-hidráulica da MTS



Figura 2: Ensaio à fadiga - ruptura da amostra

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS À FADIGA E SUA ANÁLISE

Para cada um dos ensaios à fadiga realizados foi verificado se os resultados obtidos seguem uma distribuição normal, aplicando-se o teste estatístico de Kolmogorov – Smirnov (teste K-S). Verificou-se que todos os resultados obtidos para os ensaios à fadiga realizados no concreto estudado seguem uma distribuição normal, pois aplicando-se o teste K-S obteve-se um nível de significância maior que 0,05 para todas as amostragens. A análise dos resultados de resistência à fadiga, representada pelo número de ciclos à fadiga, permitiu o desenvolvimento de modelos de fadiga laboratoriais, a partir de análises de regressão dos dados obtidos.

4.1. Concreto Seco

Os resultados dos ensaios à fadiga realizados no concreto seco, para cada nível de relação entre tensões estudado, estão apresentados na Figura 3, e foram empregados para desenvolver a regressão linear dos dados, que resultou no seguinte modelo à fadiga:

$$\log N = 25,858 - 25,142 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_{ct,f}} \right) \quad (10)$$

Na Figura 4 é possível comparar o modelo à fadiga proposto neste trabalho com o modelo atualmente empregado no Brasil (PCA, 1984), observando-se que na medida em que a relação entre tensões cresce, o modelo da PCA (1984) apresenta um número de ciclos à fadiga mais próximo daquele obtido a partir do modelo proposto neste trabalho. No entanto, na proporção em que as relações entre tensões diminuem, até alcançar $RT = 0,55$, o modelo da PCA (1984) passa a subestimar o número de ciclos à fadiga, indicando ser um modelo bastante conservador.

Porém, para valores de RT menores do que 0,55 o número de ciclos à fadiga volta a tender, a se aproximar do modelo proposto por este trabalho; quando para relações menores do que 0,45, os autores do método da PCA (1984) consideram que o pavimento suporte um número ilimitado de ciclos à fadiga (trata-se do único caso a levar em conta tal hipótese). Sendo assim, o modelo proposto nesta pesquisa apresenta-se menos conservador, deixando claro que o método de projeto utilizado (extra-oficialmente) no Brasil subestima a resistência à fadiga em uma magnitude tal que as espessuras de placas obtidas a partir deste método estariam acima daquelas realmente necessárias para suportar uma determinada tensão devido à

repetição de cargas. É importante lembrar, que o modelo proposto pela PCA em 1966 e revisto em 1984, não especifica a dosagem ou traço do concreto utilizado nos ensaios há cerca de quarenta anos atrás, bem como as dimensões dos corpos-de-prova empregados, as condições de ensaios e os critérios empregados na construção e posteriormente revisão do modelo proposto, o que dificulta a interpretação do modelo e comparação com aquele proposto neste trabalho.

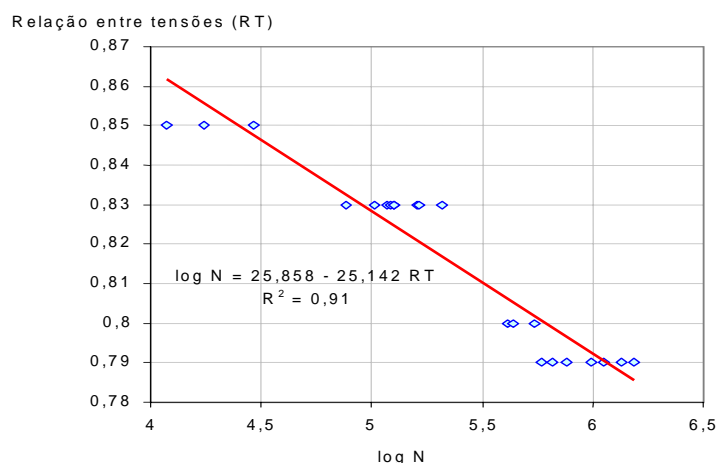


Figura 3: Resultados de ensaios em fadiga para o concreto seco

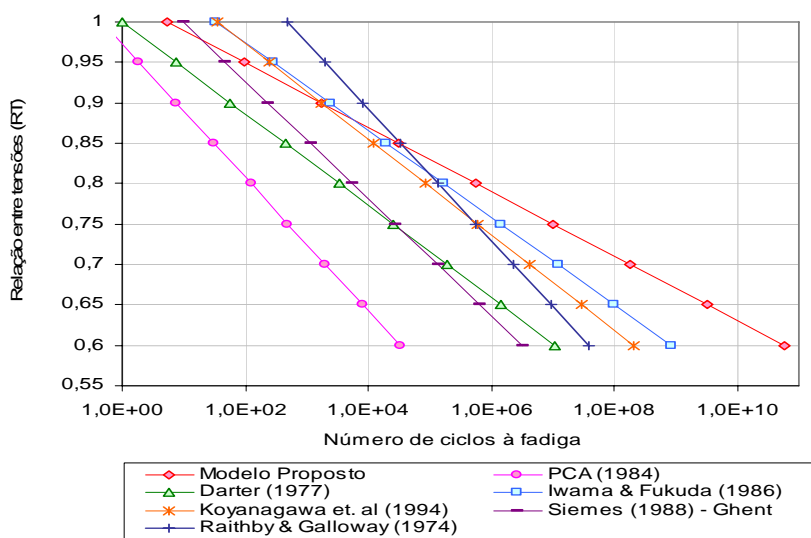


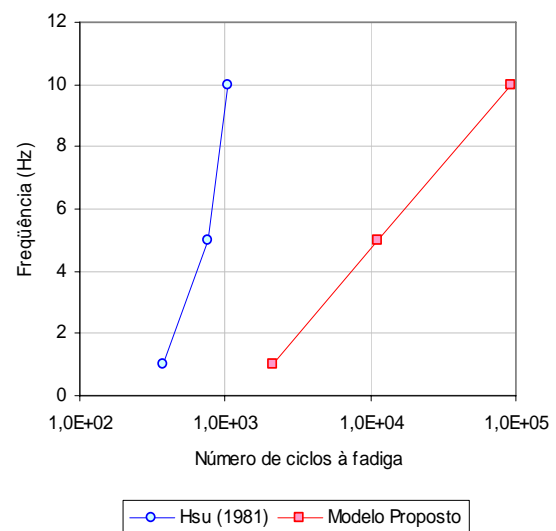
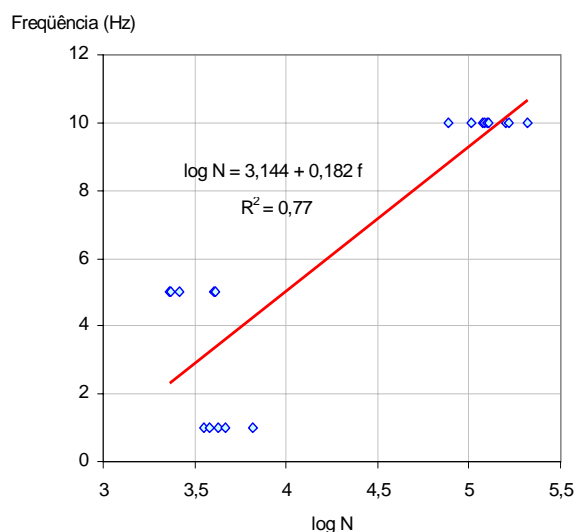
Figura 4: Modelos à fadiga sugeridos por diversos autores

Comparando-se o número de ciclos à fadiga obtido para os diversos modelos considerados, confrontando-os com aquele proposto neste trabalho, observa-se que o modelo apresentado pela PCA (1984) é o mais conservador entre todos; enquanto outros modelos alcançam de 5×10^5 a 10^7 ciclos para $RT = 0,75$, o da PCA atinge aproximadamente 8×10^2 ciclos. No outro extremo do gráfico, se situa o modelo proposto neste trabalho, apresentando-se como o menos conservador dentre os demais. Os modelos japoneses desenvolvidos por Iwama e Fukuda (1986) e Koyanagawa *et al.* (1994) situam-se bastante próximos daquele proposto, podendo-se observar que para RT igual à aproximadamente 0,90, os três modelos se cruzam, apresentando a mesma resistência à fadiga. Para relações entre tensões superiores a 0,90 o modelo proposto atinge um menor número de ciclos. Todavia, na medida em que a relação

entre tensões diminui, o modelo proposto neste trabalho apresenta um comportamento menos conservador que os demais, tendendo a uma vida de fadiga maior. O modelo apresentado por Raithby e Galloway (1974) situa-se próximo aos citados acima, sendo, contudo, aquele que alcança um maior número de ciclos à fadiga para relações entre tensões acima de 0,85 dentre todos os modelos apresentados, incluindo o proposto nesta pesquisa, quando exatamente no ponto RT igual a 0,85 eles se cruzam, indicando que atingem a mesma resistência à fadiga. Os modelos desenvolvidos por Darter (1977) e Siemes (1988) apresentam resultados muito semelhantes entre si e intermediários aos modelos da PCA e dos demais autores (incluindo aquele presentemente proposto).

4.2. Efeito da Frequência de Aplicação das Cargas

Os resultados dos ensaios à fadiga realizados para verificar o efeito de diferentes frequências na resistência à fadiga do concreto estão apresentados na Figura 5. Nesta Figura visualiza-se, ainda, o modelo obtido para o concreto seco. Contudo, uma vez que as resistências à fadiga obtidas para frequências de 1 Hz e 5 Hz não apresentaram diferença significativa na análise estatística realizada pelo teste de hipótese “t” de Student, o modelo à fadiga proposto para diferentes frequências e válido somente para RT = 0,83, poderia estar incompleto. Com o intuito de confrontar os resultados obtidos nesta pesquisa com relação à influência da frequência na resistência à fadiga de concretos para pavimentação, com aqueles encontrados por Hsu (1981), construiu-se o gráfico da Figura 6 que relaciona o número de ciclos à fadiga com a frequência de aplicação das cargas, considerando a relação entre tensões constante e igual a 0,83. Conforme aumenta a frequência de aplicação das cargas, o número de ciclos à fadiga aumenta, para uma mesma relação entre tensões, neste caso para RT = 0,83. Este fato indica que os ensaios à fadiga realizados com altas frequências (10 Hz, por exemplo) superestimam a resistência à fadiga de um pavimento de concreto, uma vez que os pavimentos (com elevados volumes de tráfego) geralmente estão submetidos a frequências em torno de 1 a 5 Hz. É possível observar que, apesar de os dois modelos (Hsu, 1981 e proposto) apresentarem um crescimento no número de ciclos com o aumento da frequência, o modelo proposto atinge uma resistência à fadiga superior, para uma mesma frequência de aplicação das cargas.



freqüências distintas

O modelo desenvolvido por Hsu (1981) parece tender a uma estabilização no número de ciclos à fadiga a partir de uma certa freqüência, enquanto o modelo proposto apresenta um crescimento contínuo na resistência à fadiga com o aumento da freqüência. Porém, para construir a Figura 6, foi preciso extrapolar o modelo de Hsu para freqüências de 1 a 10 Hz, uma vez que abrangia freqüências de 10 a 100 Hz.

4.3. Efeito da Variação de Tensões

Os resultados dos ensaios à fadiga realizados no concreto seco com tensão variável estão apresentados na Figura 7. É possível observar que o número de ciclos obtidos nos ensaios variando tensão de forma decrescente foi inferior àqueles resultantes para os ensaios à tensão constante (RT=0,83), e inferiores também àqueles obtidos para tensão variável de forma crescente. Todavia, os ensaios com tensão variável crescente resultaram em aumento na resistência à fadiga, comparado ao ensaio com tensão constante. Estes resultados levam a crer que existe maior influência da variação de tensões no número de ciclos à fadiga do concreto quando a tensão é aplicada de forma decrescente; tais conclusões são também suportadas por resultados encontrados por outros autores, e indicam que a hipótese de dano contínuo linear de Miner (1945) é segura para ensaios variando a tensão de forma crescente.

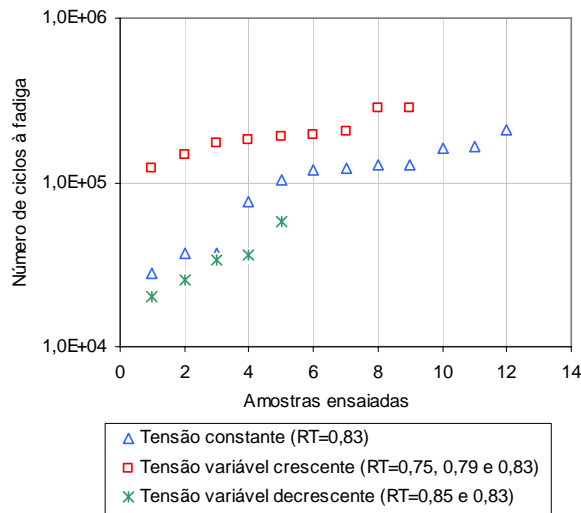


Figura 7: Resistência à fadiga com tensão variável

4.4. Concreto Saturado

Os resultados dos ensaios à fadiga realizados no concreto saturado, para cada nível de relação entre tensões estudado, estão apresentados na Figura 8, e foram empregados para desenvolver a regressão linear dos dados, que resultou no seguinte modelo à fadiga:

$$\log N = 13,408 - 12,102 \left(\frac{\sigma_{\text{máx}}}{f_{\text{ct},f}} \right) \quad (11)$$

Na Figura 9 é possível comparar o modelo à fadiga proposto para o concreto seco *versus* concreto saturado; ainda, observa-se na mesma Figura os modelos à fadiga obtidos por outros autores para o concreto seco e saturado. O modelo proposto neste trabalho aparece menos

conservador do que aquele apresentado por Cornelissen e Leewis (1986), verificando-se que este comportamento é minimizado com o decréscimo da relação entre tensões, quando os modelos tendem a se aproximar.

Apesar desta tendência à aproximação no número de ciclos à fadiga com a redução da relação entre tensões, observa-se que, por exemplo, para $RT = 0,75$, o modelo proposto apresenta uma vida à fadiga aproximadamente 93% superior que o modelo de Cornelissen e Leewis (1986). No entanto, deve-se lembrar que para desenvolver o modelo apresentado pelos referidos autores, foram realizados ensaios em tração pura e a uma frequência de aplicação de cargas de 6 Hz, o que representaria um menor número de ciclos comparado a ensaios submetidos à frequência de 10 Hz. O modelo proposto neste estudo aparece bastante próximo daquele apresentado por Raithby e Galloway (1974); porém, este último apresenta-se ainda menos conservador, indicando que para uma mesma relação entre tensões, o número de ciclos à fadiga alcançado é superior àquele obtido pelo modelo proposto. Todavia, os autores em questão realizaram ensaios à fadiga em flexão a uma frequência de 20 Hz, o que poderia justificar tais resultados.

Com relação à presença de umidade no concreto, para os modelos propostos nesta pesquisa, verifica-se que o número de ciclos à fadiga suportado pelo concreto saturado foi de 1% a 19% da resistência à fadiga do concreto seco para relações entre tensões abaixo de 0,95, havendo uma inversão no comportamento (concreto seco apresentou menor número de ciclos do que o concreto saturado), somente quando a relação entre tensões era praticamente igual a 1, ou seja, a tensão máxima aplicada era igual a resistência estática. Desta forma, pode-se dizer que o concreto no estado saturado representa a condição mais crítica para a ruptura por fadiga dos pavimentos de concreto simples. Estes resultados são bastante coerentes, uma vez que a resistência à tração na flexão estática do concreto convencional saturado foi levemente inferior à do concreto seco, o que também confirma a influência da resistência estática na resistência à fadiga. Contudo, a influência da saturação foi muito mais acentuada na resistência à fadiga.

O comportamento dos modelos à fadiga, dos concretos seco e saturado, propostos por Cornelissen e Leewis (1986) é semelhante àqueles propostos nesta pesquisa, verificando-se que o concreto saturado suporta um número de ciclos à fadiga inferior ao concreto seco. Todavia, os modelos desenvolvidos por Cornelissen e Leewis (1986) apresentam-se exatamente paralelos, indicando que o número de ciclos é ampliado na mesma proporção na medida em que a relação entre tensões diminui. Os modelos desenvolvidos por Raithby e Galloway (1974) apresentam-se também bastante paralelos, mas existindo uma tendência à aproximação na proporção em que aumenta a relação entre tensões (da mesma forma que ocorreu com o modelo proposto neste estudo), porém não ocorreu a existência de um ponto de cruzamento entre os dois modelos, ou seja, em nenhum momento os concretos seco e saturado apresentaram a mesma resistência à fadiga, como ocorreu para os modelos propostos nesta pesquisa.

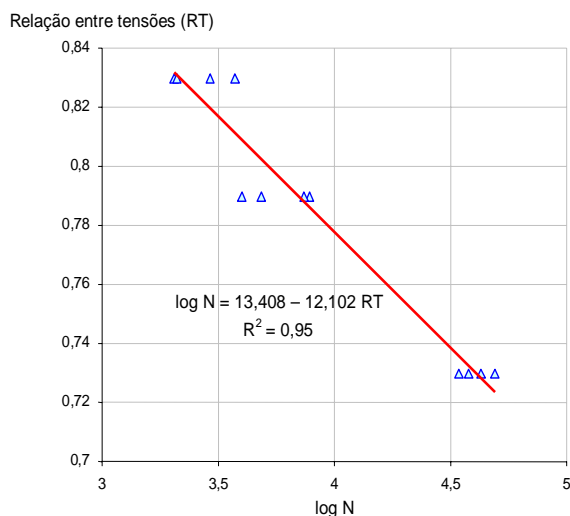


Figura 9: Resultados à fadiga para o concreto saturado

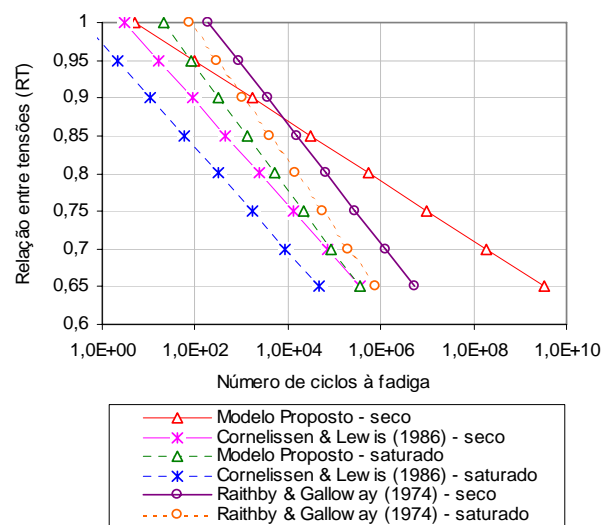


Figura 10: Modelos à fadiga de diversos autores

5. CONCLUSÕES

O trabalho permitiu desenvolver um modelo experimental à fadiga para um concreto convencionalmente empregado em pavimentação no país, por meio de regressão linear dos dados obtidos em testes dinâmicos (com cargas cíclicas). Esse modelo representa uma conquista importante, uma vez que até o momento não existiam parâmetros nacionais para projetos com dimensionamento à fadiga de concretos de cimento Portland nacionais, empregando-se comumente modelo à fadiga importado para tarefas do gênero. A análise comparativa entre o modelo proposto e aquele atualmente empregado no Brasil (PCA, 1984), permitiu concluir que o modelo desenvolvido neste trabalho apresenta-se menos conservador; isto deixa claro que o método de projeto utilizado no Brasil subestima a resistência à fadiga em uma magnitude tal que, as espessuras de placas obtidas a partir deste método estariam além daquelas realmente necessárias para suportar um determinado espectro de cargas de projeto.

Quando foram confrontados os modelos à fadiga obtidos para os concretos seco e saturado foi constatado que o número de ciclos à fadiga suportado pelo concreto saturado foi de 1% a 19% da resistência à fadiga do concreto seco para relações entre tensões abaixo de 0,95. Desta forma, pode-se dizer que o concreto convencional no estado saturado representa a condição mais crítica para a ruptura por fadiga dos pavimentos de concreto simples.

Os ensaios realizados com diferentes frequências de aplicação de carga mostraram que, quanto mais elevada é a frequência, maior o número de ciclos alcançados; para uma frequência de 10 Hz chega-se a atingir uma resistência à fadiga 96% superior àquela obtida para frequências de 1 ou 5 Hz. Face ao exposto, conclui-se que os ensaios experimentais que usualmente são empregados para determinar modelos à fadiga de concretos para pavimentação estariam superestimando a resistência à fadiga do pavimento; via de regra, os testes laboratoriais são realizados a uma frequência de 10 Hz ou superior, o que está muito acima das frequências reais ocorridas em pista. Isto por si só apontava para a necessidade de se estabelecer fatores de calibração laboratório-pista.

Com relação a variação de tensões, é possível observar que o número de ciclos obtidos nos ensaios variando tensão de forma decrescente foi inferior àqueles resultantes para os ensaios à tensão constante ($RT=0,83$), e inferiores também àqueles obtidos para tensão variável de forma crescente. Todavia, os ensaios com tensão variável crescente resultaram em aumento na resistência à fadiga, comparado ao ensaio com tensão constante. Estes resultados levam a crer que existe maior influência da variação de tensões no número de ciclos à fadiga do concreto quando a tensão é aplicada de forma decrescente.

Agradecimentos

A pesquisa apresentada foi desenvolvida como parte de uma Tese de Doutorado financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo Processo no. 01/13508-5, sendo os autores gratos à agência de fomento pela bolsa concedida para os estudos.

BIBLIOGRAFIA

- Balbo, J.T. (2000). Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga. In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação, v. 1, pp. 391-404, Brasília.
- Balbo, J. T.; Severi, A.A. (2002). Thermal gradients in concrete pavements in tropical environment: an experimental appraisal. Journal of the Transportation Research Board, TRB 1809, v.1809, p.12-22, Washington, D.C.
- Cervo, T. C. (2004). Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 220 p., São Paulo.
- Cornelissen, H. A. W.; Leewis, M. (1986). Fatigue experiments for the design of plain concrete pavements. In: Proceedings of the Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, CROW-PIARC-CEMBUREAU, Epen.
- Darter, M. (1977). Design of zero-maintenance plain jointed concrete pavement, v 1: development of design procedures. Federal Highway Administration. Report nº FHWA-RD-77-111, Washington, D.C.
- Hsu, T.C. (1981). Fatigue of plain concrete. ACI Journal, proceedings v. 78, pp.292-304.
- Iwama, S.; Fukuda, T. (1986). Design method and researches of concrete pavements in Japan. In: Proceedings of the Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements. CROW-PIARC-CEMBUREAU, Epen.
- Koyanagawa, M.; Yoneya, H.; Kokubu, K. (1994). Evaluation of reliability of concrete pavement in consideration of fatigue properties. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, CROW - PIARC - CEMBUREAU, pp. 207-216, Krumbach.
- Miner, M.A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. Trans. ASME, v. 67, pp. 159-164.
- Portland Cement Association (1966). Thickness design for concrete pavements. IS 010.03P. Skokie, Illinois.
- Portland Cement Association. (1984). Thickness design for concrete highway and street pavements. EB 109.01P, Illinois.
- Raithby, K.D.; Galloway, J.W. (1974). Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete. In: ABELES Symposium: Fatigue of Concrete, Hollywood, 1972-1973. Papers. Detroit, ACI Publication. v. 41, pp. 15-34.
- Siemes, A.J.M. (1988). Fatigue evaluation of concrete structures – Preliminary studies, procedure and examples. Heron, v. 33, nº3, pp.2-75, Netherlands.
- Stet, M. J. A.; Frénay, J. (1998). Fatigue properties of plain concrete. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads, AIPCR-CEMBUREAU, Theme I, pp. 129-136, Lisbon.
- Zhang, B; Phillips, D.V.; Wu, K. (1996). Effect of loading frequency and stress reversal of fatigue life of plain concrete. Magazine of Concrete Research, v.48, nº 17, pp. 361-375.

Tatiana Cureau Cervo (tcervo@terra.com.br)

José Tadeu Balbo (jotbalbo@usp.br)

Laboratório de Mecânica de Pavimentos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2 – Cidade Universitária – 05508-900 – São Paulo – SP

www.ptr.poli.usp.br/lmp