

CALIBRAÇÃO DE FATOR LABORATÓRIO-CAMPO PARA PREVISÃO DE FADIGA DO CONCRETO EM PAVIMENTOS

Tatiana Cureau Cervo

José Tadeu Balbo

Pesquisador PRODOC-CAPES, Universidade Federal de Santa Maria

Professor Associado, Universidade de São Paulo

RESUMO

De 1997 a 1999 seis seções experimentais de WTUD, usando concreto de alta resistência, foram monitoradas e a partir daí desenvolvido modelo de fissuração por fadiga baseado em dados de pista. Os resultados obtidos em campo, com base na determinação das tensões pelo ILSL2 e na repetição das cargas, resultou em um critério final de ruptura de 10% de placas fissuradas. O mesmo material e traço originalmente empregado para a mistura do concreto experimental em pista foi empregado para investigação em laboratório para determinar a resistência à fadiga de vigotas prismáticas. A simulação de tensões variáveis em laboratório, conforme verificado nas tensões obtidas para o experimento em campo, possibilitou construir modelo de fadiga em laboratório que pôde ser confrontado com o modelo obtido em campo. Testes foram realizados para verificar a influência da frequência de aplicação das cargas, bem como o efeito da saturação de corpos-de-prova na resistência à fadiga do concreto de alto desempenho. O confronto entre os modelos à fadiga obtidos em campo e em laboratório determinou um fator de calibração que permite fazer previsão da resistência à fadiga do concreto em campo em função da resistência à fadiga obtida em laboratório. Os resultados obtidos permitiram concluir que em laboratório se está superestimando a real resistência à fadiga que o pavimento poderá suportar em campo; ainda, verificou-se um efeito considerável da frequência nos resultados de laboratório.

ABSTRACT

From 1997 to 1999 six experimental sections of UTW using high strength concrete for the slabs were monitored and a field-based fatigue model for corner cracking development has been developed, base on stresses predicted through ILSL2 and on loads repetition up to the threshold of 10% cracked plates. Original raw materials used for concrete mixture were recovered from the former suppliers to the field experiment and a laboratorial investigation was carried out in order to define fatigue behavior and performance of beams. The simulation of variable stress level as it were verified during the field experiment made it possible to define SSR curves to be compared to former field fatigue model. Tests were able to show the influence of frequency on fatigue behavior as well as effects of saturation in fatigue resistance of beams. The comparison between field and laboratory SSR equations allowed to define a shift-factor to convert the beam based fatigue prediction equation into expected number of load repetition for field condition which resulted dependent on the SSR relation. From the received data it was concluded for the conservativeness of laboratorial fatigue of beams and the enormous effect of frequency on laboratory results.

1. INTRODUÇÃO

As placas de concreto em serviço estão sujeitas a vários ciclos de saturação e secagem, a diferentes gradientes térmicos durante o dia e a noite, a deslocamentos laterais das cargas de rodas, a diferentes magnitudes de cargas e pressões aplicadas, etc., todos estes com conseqüências para o comportamento à fadiga do concreto. Estes fatores levaram alguns autores a perseguir o desenvolvimento de modelos de fadiga construídos a partir de experimentos em campo. Porém, esta não é uma tarefa fácil uma vez que os pavimentos de concreto apresentam normalmente vida útil longa (em torno de 20 anos ou mais) antes de sua fissuração por fadiga atingir níveis ponderáveis.

Em 1997, foram construídas seis seções de *whitetopping* ultradelgado na rodovia Castello Branco, no Estado de São Paulo, quando foram investigadas algumas peculiaridades de tal solução inovadora que serve como camada de reforço de um pavimento asfáltico antigo. As seções evoluíram para um montante relativo de 10% de placas fissuradas em um período de tempo relativamente curto: aproximadamente três meses nas seções mais espessas, como

resultado de um projeto de placa empírico e incompleto, não considerando a péssima condição do pavimento asfáltico existe (Balbo, 2003). O modelo de fadiga derivado do estudo em campo foi comparado a um estudo anterior de resistência à fadiga em campo desenvolvido nos EUA empregando dados da AASHO *Road Test* (Vesic e Saxena, 1969; Treybig *et al.*, 1977; Majidzadeh e Ilves, 1983). Contudo, os resultados de resistência à fadiga observados e modelados foram piores que resultados comuns de resistências obtidas em ensaios laboratoriais com vigotas em anos recentes em investigações estrangeiras.

Um outro estudo com base em 51 seções de teste em campo desenvolvido pelo *US Corps of Engineers* (Darter, 1990) comparou o desempenho de placas (fissuração real) com vários modelos laboratoriais de fadiga em vigotas, indicando finalmente que os modelos à fadiga para placas e para vigotas diferem expressivamente. Apesar da comparação de misturas de concreto diferentes, a investigação mencionada foi muito importante para mostrar que, tomando-se 50% de placas fissuradas na seção de teste como critério de ruptura por fadiga, o modelo de fadiga para as vigas era muito menos conservador do que o modelo para placas em pista. A investigação (Darter, 1990) especificou a variabilidade na resistência do concreto e o empenamento das placas como a principal condição para as diferenças observadas. Fatores tais como taxa de carregamento, período de relaxação e variações na espessura da placa foram estimadas com significância média; a relação entre tensões e a contração térmica foram consideradas menos importantes no meio dos efeitos possíveis.

Um programa de pesquisa em laboratório (Cervo, 2004) foi então perseguido para buscar maiores detalhes sobre o comportamento à fadiga das vigas usando o mesmo concreto utilizado no experimento brasileiro de 1997 (Balbo, 2003). Tal experimento em campo deu importante suporte para conhecer alguns fatores tais como empenamento, variação na espessura e contração térmica que poderiam interferir no comportamento das placas. Juntando-se a isto, seria possível reproduzir, com um bom grau de precisão, a mistura de concreto empregada durante a construção do teste em campo, permitindo a comparação de concretos similares com relação à sua resistência à fadiga. Uma das limitações deste estudo foi o tempo disponível para os testes de fadiga, conduzidos à frequência de 10 Hz. No entanto, foi possível realizar ensaios à tensão constante e à tensão variável, para diferentes níveis de relação entre tensões e para um número razoável de amostras, procurando entender os efeitos da frequência de aplicação das cargas e da tensão variável nos resultados dos testes.

2. INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

2.1. Materiais para Vigotas de Concreto

A construção das seções experimentais de WTUD foi concluída em setembro de 1997, sendo necessário resgatar a mistura de concreto originalmente empregada no estudo a fim de recuperar os fornecedores do cimento, agregados e outros materiais usados na época. Esta tarefa foi realizada em março de 2002, quando se iniciou o proporcionamento e os testes de medida de resistência a fim de definir não obrigatoriamente um concreto exatamente conforme aquele originalmente desenvolvido, mas um concreto similar, fabricado com os mesmos materiais e alcançando a mesma resistência à tração na flexão. As proporções da mistura empregada na investigação do concreto estão apresentadas na Tabela 1. As amostras foram preparadas em moldes prismáticos de 400 x 100 x 100 mm. Após o enchimento dos moldes, estes foram adensados em mesa vibratória durante 30 s e então arrasados, permanecendo em condição natural de laboratório por 36 h. Então, as 64 amostras de concreto

foram desmoldadas e envolvidas por um filme PCV (poli cloreto de vinila); foram posteriormente mantidas em câmara úmida por sete dias e após tal data permaneceram em condições de laboratório por 365 dias. Os testes de fadiga foram realizados durante os anos de 2003 e 2004, assim como as medidas de resistência à flexão por meio do ensaio nos terços médio da viga.

Tabela 1: Características da mistura de concreto

Materiais ou Propriedades	Valores
Cimento (kg/m ³)	440
Sílica Ativa (kg/m ³)	44
Areia (kg/m ³)	493
Brita 1 (kg/m ³)	1194
Relação a/c	0,365
Plastificante (L/m ³)	1,65
Superplastificante (L/m ³)	3,846
Incorporador de ar (mL/m ³)	119
Ar incorporado (%)	≤ 5,0
Abatimento (mm)	70 ± 10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias	6,0

2.2. Testes de Fadiga

As vigotas de concreto de alto desempenho foram testadas em um equipamento MTS com capacidade para 100 kN (Figura 1). Para todos os testes, uma tensão de tração na flexão mínima de 7% da resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) foi aplicada constantemente; esta condição não simulou os efeitos da temperatura, mas evitou deslocamentos laterais das vigas durante as cargas cíclicas. A ruptura ocorreu, para todos os corpos-de-prova ensaiados, no terço médio da vigota (Figura 2). A fim de determinar satisfatoriamente o comportamento à fadiga de vigas de concreto e desenvolver um modelo de fadiga laboratorial, foram realizados os seguintes ensaios com o concreto seco:

1. Tensão constante com frequência de 10 Hz;
2. Tensão constante com frequência de 5 Hz;
3. Teste variando a relação entre tensões ($RT = \frac{\sigma_{\max}}{f_{ct,f}}$).



Figura 1: Equipamento MTS de ensaios à fadiga



Figura 2: Ruptura do corpo-de-prova no terço médio da viga

Os testes com frequência de 5 Hz foram realizados com $RT = 0,73$. Os testes com frequência de 10 Hz foram realizados em diferentes níveis de RT : 0,65, 0,69, 0,73, 0,78, 0,80, 0,83. Nos ensaios com tensão variável, o nível de tensão aplicado nas vigas foi definido de acordo com os resultados dos estudos desenvolvidos em campo em 1997 (Balbo, 2003), considerando a história de tensões real ocorrida em pista para um respectivo número de ciclos em campo que levaram ao limiar de 10 % de placas fissuradas como critério final de ruptura. Vale a pena lembrar que os ensaios variando tensão não variaram a frequência de aplicação das cargas e que a sequência de aplicação das cargas ocorreu da tensão mais baixa para a mais alta até que se completasse um ciclo completo das tensões ocorridas em campo.

3. RESULTADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para todas as amostras ensaiadas foram realizadas análises estatísticas de normalidade por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (teste K-S), quando se verificou que todos os ensaios à fadiga realizados seguem uma distribuição normal. Para cada nível de tensão aplicado, aproximadamente 6 amostras foram ensaiadas nos testes à tensão constante (Tabela 2) e naqueles à tensão variável (Tabela 3). Os ensaios de probabilidade normal, que também representam uma distribuição normal, estão apresentados na Figura 3. Os resultados um pouco mais dispersos para baixos níveis de tensão, tais como, $RT = 0,65$ e $RT = 0,69$, ocorreram devido a uma pequena variação na resistência à tração na flexão. Contudo, os ensaios estatísticos confirmaram a normalidade dos resultados.

Na Figura 4 são confrontados os resultados de ensaios de fadiga para diferentes frequências. Ficou claro que para elevadas frequências de aplicação das cargas os resultados de resistência à fadiga em vigas são mais otimistas. A real frequência de aplicação das cargas em uma rodovia com tráfego pesado poderia atingir até 1 Hz; isto significa dizer que os ensaios em laboratório a altas frequências são incapazes de prever a real resistência à fadiga em condições de pista. Tal discrepância requer um fator de calibração entre campo e laboratório, a fim de que os resultados de resistência à fadiga obtidos em laboratório possam ser utilizados com maior segurança e racionalidade na consideração da ruptura por fadiga em projetos de pavimentos de concreto.

Contudo, a frequência é possivelmente a variável mais importante a ser definida anteriormente às investigações laboratoriais já que os materiais em pista apresentam relaxação entre aplicações de cargas sucessivas. Com base neste fato, uma investigação laboratorial anteriormente realizada por Zhang *et al.* (1996) propôs um modelo de fadiga que mostra claramente os efeitos da frequência de cargas na resistência à fadiga das vigas de concreto, indicando um aumento na vida de fadiga quando a frequência era aumentada.

3.1. Modelo de Fadiga para Função Logarítmica σ/N a 10 Hz e Tensão Constante

Considerando os resultados da Tabela 3 foi possível definir uma relação logarítmica σ/N por meio de regressões lineares dos dados obtidos. A equação abaixo apresentou, para 30 vigotas ensaiadas, um erro padrão de 0,16 e R^2 de 96%; tais valores estatísticos satisfatórios ocorreram devido à excelente homogeneidade das amostras testadas, o que recebeu cuidados especiais durante a moldagem do concreto.

$$\text{Log}N_{lab} = 14,13 - 12,41 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (1)$$

Na equação acima, σ é a tensão de tração na flexão máxima e $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão estática do concreto. Na Figura 5 a equação acima é representada graficamente e comparada a um outro modelo laboratorial anteriormente desenvolvido por Koyanagawa *et al.* (1994) para um concreto de mesma resistência (6 MPa) e empregando o ensaio em flexão no terço médio das vigotas. Os resultados, considerando possível dispersão para ambos os modelos, são próximos um do outro. Vale comentar que ambos os concretos são de alta resistência, portanto, apresentam maior resistência à tração na flexão do que o concreto convencional, mas, por outro lado, menor resistência à fadiga.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de fadiga para vigas considerando tensão constante

RT (frequência)	Amostra	Ciclos à fadiga
0.65 (10 Hz)	1	635150
	2	749080
	3	764650
	4	899530
	5	997460
	6	1165050
0.69 (10 Hz)	1 *	3730
	2	397230
	3	424430
	4	427680
	5	444650
	6	480380
0.73 (10 Hz)	7	521230
	1	104320
	2	175200
	3	181150
	4	183360
	5	199630
0.78 (10 Hz)	6	270770
	1	21050
	2	22980
	3	25970
	4	26700
	5	29430
0.80 (10 Hz)	6	32440
	1	8290
	2	8970
0.83 (10 Hz)	3	9850
	1	7230
	2	7800
0.73 (5 Hz)	3	8220
	1	6420
	2	17690
	3	17730
	4	18780
	5	19280
	6	19720

Tabela 3: Resultado dos ensaios de fadiga para vigas considerando tensão variável

σ (MPa)	RT	Número de ciclos à fadiga					
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
		Número de ciclos aplicados na Primeira série					
2,32	0,39	8779	8779	8779	8779	8779	8779
2,66	0,44	10862	10862	10862	10862	10862	10862
2,96	0,49	8773	8773	8773	8773	8773	8773
3,28	0,55	8835	8835	8835	8835	8835	8835
3,54	0,59	4242	4242	4242	4242	4242	4242
3,72	0,62	17305	17305	17305	17305	17305	17305
3,90	0,65	40470	40470	40470	40470	40470	40470
4,10	0,68	26187	26187	26187	26187	26187	26187
4,26	0,71	7654	7654	7654	7654	7654	7654
4,42	0,74	1845	1845	1845	1845	1845	1845
4,56	0,76	1399	1399	1399	1399	1399	1399
4,68	0,78	1161	1161	1161	1161	1161	1161
4,78	0,80	476	476	476	476	476	476
4,85	0,81	238	238	238	238	238	238
Número de ciclos aplicados nas Segundas, Terceiras, Quartas e Quintas séries							
Idênticos à primeira série							
σ (MPa)	RT	Número de ciclos aplicados na Sexta série (ruptura)					
2,32	0,39	8779	8779	8779	8779	8779	8779
2,66	0,44	10862	10862	10862	10862	10862	10862
2,96	0,49	8773	8773	8773	8773	8773	8773
3,28	0,55	8835	8835	8835	8835	8835	8835
3,54	0,59	4242	4242	4242	4242	4242	4242
3,72	0,62	17305	17305	17305	17305	17305	17305
3,90	0,65	40470	40470	40470	40470	40470	40470
4,10	0,68	26187	26187	26187	26187	26187	26187
4,26	0,71	5260	7654	7654	7654	7654	7654
4,42	0,74	0	740	950	1845	1845	1845
4,56	0,76	0	0	0	130	1399	1399
4,68	0,78	0	0	0	0	1161	1161
4,78	0,80	0	0	0	0	476	476
4,85	0,81	0	0	0	0	170	200
σ (MPa)	RT	Número de ciclos totais (à ruptura)					
2,32	0,39	52674	52674	52674	52674	52674	52674
2,66	0,44	65172	65172	65172	65172	65172	65172
2,96	0,49	52638	52638	52638	52638	52638	52638
3,28	0,55	53010	53010	53010	53010	53010	53010
3,54	0,59	25452	25452	25452	25452	25452	25452
3,72	0,62	103830	103830	103830	103830	103830	103830
3,90	0,65	242820	242820	242820	242820	242820	242820
4,10	0,68	157122	157122	157122	157122	157122	157122
4,26	0,71	43530	45924	45924	45924	45924	45924
4,42	0,74	9250	9990	10200	11070	11070	11070
4,56	0,76	7000	7000	7000	7130	8394	8394
4,68	0,78	5850	5850	5850	5850	6966	6966
4,78	0,80	2400	2400	2400	2400	2856	2856
4,85	0,81	1250	1250	1250	1250	1420	1450
Total		821998	825132	825342	826342	829348	829378

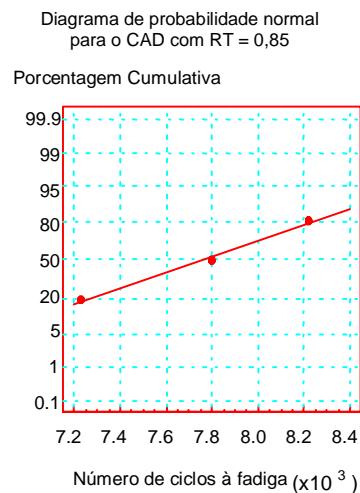
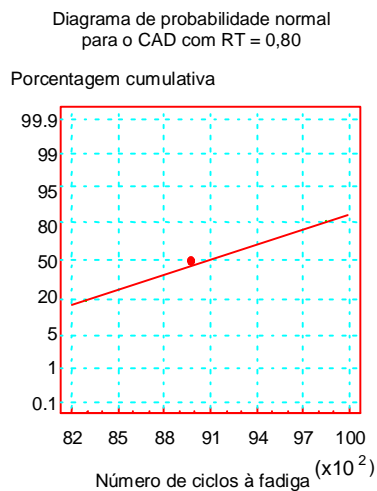
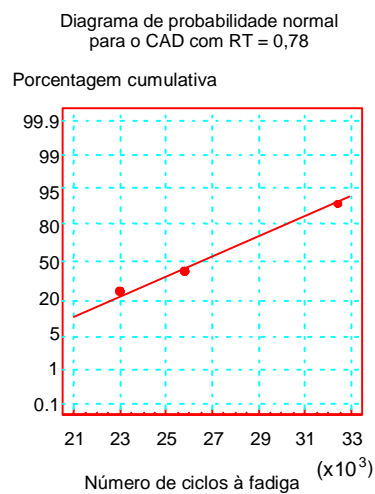
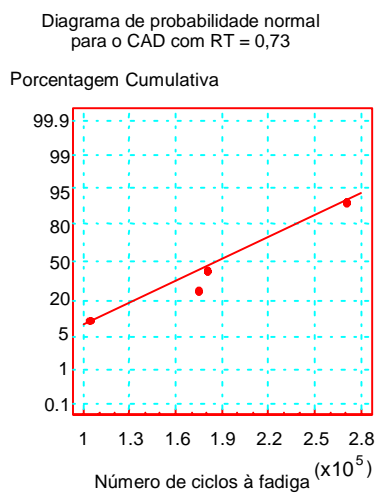
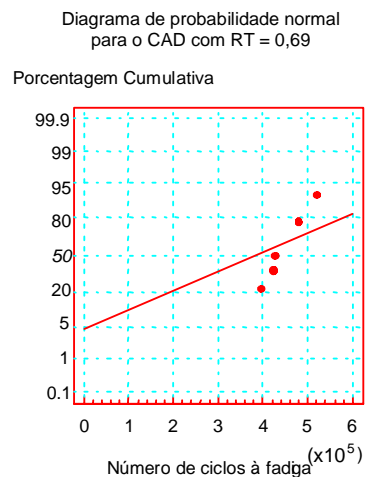
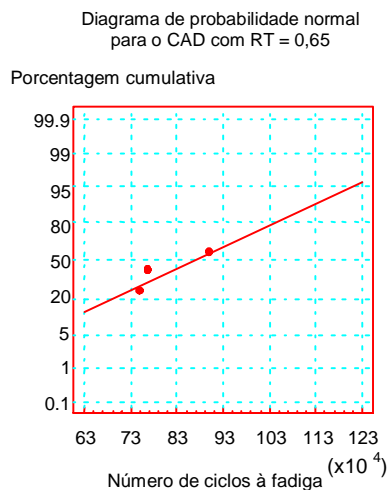


Figura 3: Testes de probabilidade normal para os resultados de ensaios

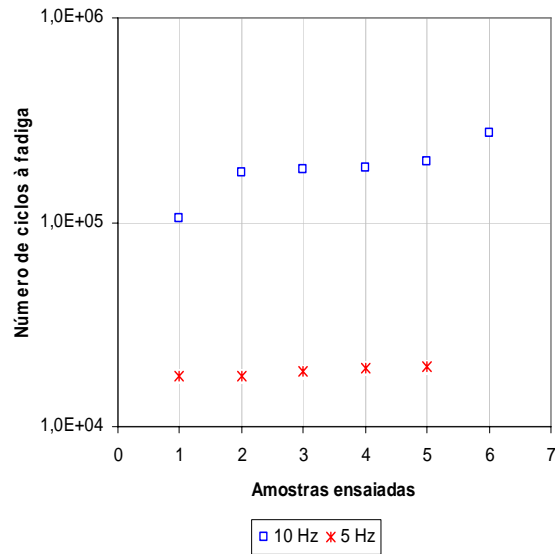


Figura 4: Número de ciclos à fadiga para diferentes frequência e RT = 0,73

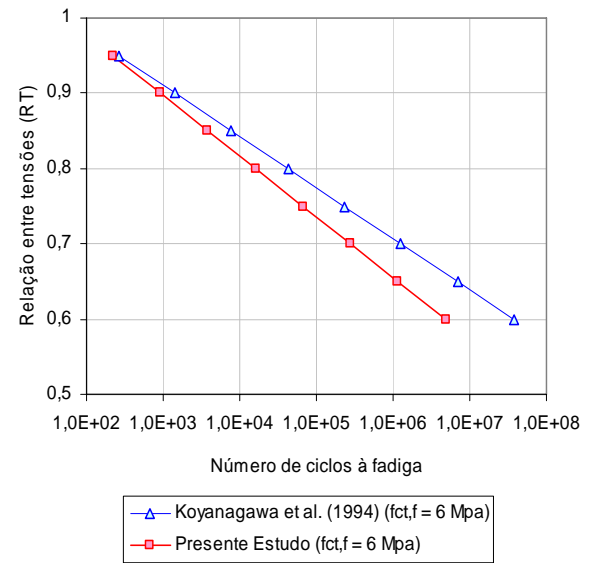


Figura 5: Modelos de fadiga para tensão constante

3.2. Descrição do Modelo de Fadiga para Ensaio à Tensão Variável

Para descrever o modelo à fadiga obtido pelos ensaios à tensão variável em vigas de concreto utilizou-se a hipótese de dano contínuo linear de Palmgren-Miner:

$$\frac{N_{1,p}}{N_{1,adm}} + \frac{N_{2,p}}{N_{2,adm}} + \dots + \frac{N_{n,p}}{N_{n,adm}} = 1 \quad (2)$$

onde $N_{i,p}$ é o número de ciclos de funcionamento para uma ação p e $N_{i,adm}$ é o número total de ciclos para o colapso de uma ação repetitiva p. Considerando que o modelo à fadiga obtido pelo estudo em campo, Balbo (2003) foi descrito por meio de uma equação potencial (não linear) com $N_{i,adm}$ como função de RT (relação σ/N), foi realizado o mesmo tipo de formulação estatística para os resultados dos ensaios com tensão variável, seguindo o modelo básico:

$$N_{i,adm} = k \left(\frac{1}{RT} \right)^c \quad (3)$$

Pela substituição da equação (3) na equação (2), pode ser escrito:

$$\frac{N_{1,p}}{k \left(\frac{f_{ct,f}}{\sigma_1} \right)^c} + \frac{N_{2,p}}{k \left(\frac{f_{ct,f}}{\sigma_2} \right)^c} + \dots + \frac{N_{n,p}}{k \left(\frac{f_{ct,f}}{\sigma_n} \right)^c} = 1 \quad (4)$$

onde $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ é a tensão máxima aplicada e $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão característica, ou seja, 6 MPa. A solução para os coeficientes k e c pode ser obtida assumindo-se um valor para um dos coeficientes e realizando um adequado ajuste na função. Foi assumido um valor

de 29745 para a constante k pela conveniência de ser o mesmo valor definido para o anterior modelo de fadiga em pista (Balbo, 2003):

$$N_{campo} = 29745 \left(\frac{f_{ct,f}}{\sigma} \right)^{3,338} \quad (5)$$

O valor da constante k na equação (3) poderia ter sido outro, por exemplo, o valor proposto em estudo anterior por Treybig *et al.* (1977) de 22209 e c resultaria em 8,275; comparando esta possibilidade com a equação (5) uma simplificação poderia ser feita entre as duas funções, o que representa em uma escolha adequada. Pela substituição de cada valor individual de tensão aplicada (σ) e número de ciclos à fadiga apresentados na Tabela 3, o modelo segundo a hipótese de Palmgren-Miner resulta, para a média de todas as amostras ensaiadas (que foram muito parecidas e homogêneas), na seguinte equação:

$$\frac{52674}{29745 \left(\frac{6}{2,32} \right)^c} + \frac{65172}{29745 \left(\frac{6}{2,60} \right)^c} + \dots + \frac{1250}{29745 \left(\frac{6}{4,85} \right)^c} = 1 \quad (6)$$

Deste modo a determinação do coeficiente c na equação (6) resulta no seguinte modelo laboratorial à fadiga:

$$N_{Lab} = N_{i,adm} = 29745 \left(\frac{1}{RT} \right)^{7,54031} \quad (7)$$

A comparação gráfica entre a equação de pista (5) e o modelo de fadiga para vigotas (7) está apresentado na Figura 6 onde se pode observar que o modelo laboratorial para os testes com tensão variável é bastante otimista quando comparado ao modelo de campo (desenvolvido para um critério final de ruptura de 10% de placas fissuradas); o modelo de laboratório apresenta-se ainda mais otimista com a redução da relação entre tensões (RT).

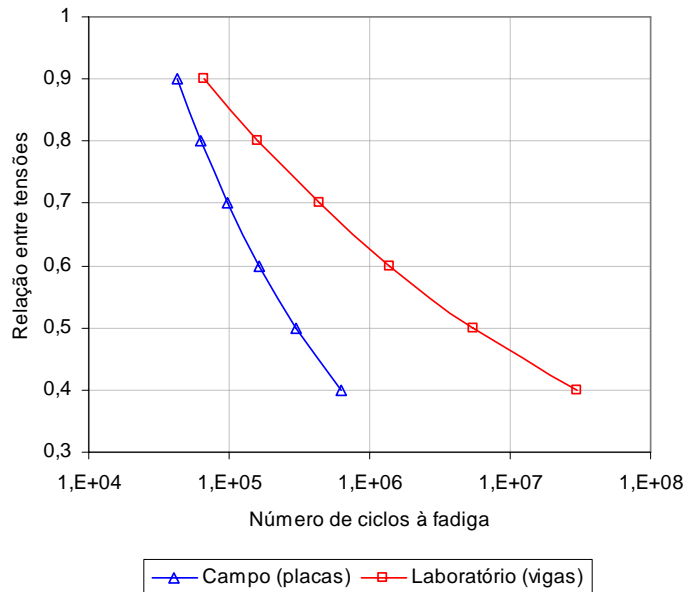


Figura 6: Modelos de fadiga para campo e laboratório para o concreto investigado

4. Fator de Calibração entre Campo e Laboratório

O confronto direto entre as equações (5) e (7) permite descrever uma relação entre o número de repetições de carga esperado em pista e aquele definido em laboratório, para um mesmo concreto, dado por:

$$SF = \frac{N_{campo}}{N_{lab}} = \left(\frac{1}{RT} \right)^{-4,20231} \quad (8)$$

A equação (8) define o chamado “fator de calibração” (*shift-factor*, SF), relacionando o comportamento à fadiga entre campo e laboratório para um mesmo concreto; de tal função de correlação fica evidente que o número de ciclos à fadiga em campo, para uma mesma história de tensões, é menor que aquele medido por meio dos ensaios com vigotas em laboratório. Todavia, tal relação não é linear e é dependente da relação entre a tensão na flexão real e a resistência à tração na flexão estática do concreto, ou seja, de RT . A equação (8) esclarece que quanto menor o valor de RT mais conservadora é a conversão alcançada pelo SF . Portanto, o comportamento à fadiga em campo é mais distante daquele apresentado em laboratório para menores relações entre tensões do que para RT mais elevadas. Para a condição $RT = 1$, a equação de fadiga laboratorial (7) superestima a resistência à fadiga do concreto; por exemplo, o número de ciclos à fadiga em campo é aproximadamente de 40% do valor obtido nos testes em laboratório para $RT = 0,8$, conforme mostra a Figura 7.

A partir dos resultados apresentados fica bastante lógico estabelecer diferenças entre o comportamento à fadiga em campo e em laboratório, quando vale a pena lembrar que projetos baseados na relação entre tensões nos limites de 0,5 a 0,45 são mais conservadores do que projetos considerando cargas reais, certamente quando usando relação baseada na prescrição de fadiga em laboratório desenvolvida em teste de alta frequência (tais como 10 Hz). Resultados otimistas para elevadas frequências podem ser observados sob o ponto de vista de fadiga, como resultado de um período de tempo pequeno de ação das cargas, e assim, induzindo a menor abertura das fissuras pré-existentes na microestrutura do concreto; portanto, é de se esperar menor progressão das fissuras, conduzindo a um elevado número de aplicações de cargas à fadiga, conforme explanado na investigação. É possível fazer uma comparação entre as frequências de cargas em campo e em laboratório: enquanto a frequência em laboratório foi em torno de 10 Hz, em pista, para as seções com 10% de placas fissuradas havia ocorrido a passagem de 146336 eixos a cada 19 s, o que representa uma frequência de 0,05 Hz.

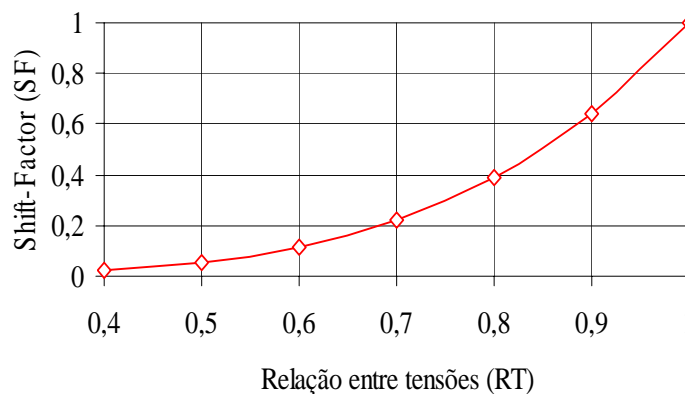


Figura 7: Shift-Factor (SF) em função de RT

5. CONCLUSÕES

Diversos métodos de projeto para pavimentos de concreto não especificam se o modelo de fadiga é representativo das condições de campo ou não. Isto implica no desempenho de estruturas de pavimentos concebidas a partir de modelos em laboratório desenvolvidos com elevadas frequências e tensão constante; tal procedimento tende a falsos resultados no dimensionamento à fadiga do pavimento de concreto, se considerado frequências de carga reais em campo e que estas têm caráter probabilístico e variável. Os fatos podem se agravar ainda mais em projetos ao empregar-se modelos importados cujas condições de similaridade ao concreto empregado em uma obra específica no Brasil são, simplesmente, indefensáveis.

Tal situação leva a questionamentos entre profissionais da área e à necessidade de se estabelecer fator de calibração para converter o número de ciclos à fadiga obtido em laboratório em uma previsão mais racional da resistência à fadiga real que ocorreria em pista. Este objetivo poderia ser determinado somente pelo confronto do comportamento à fadiga em pista e em laboratório, para concretos com uma mesma formulação de dosagem; tal tipo de investigação não é usual uma vez que os sinais de fadiga em pista, nos pavimentos de concreto, salvo exceções, tendem a levar anos para manifestar-se e alcançar um determinado padrão numérico para se definir um modelo de fadiga semi-empírico em campo.

Porém, o concreto empregado durante a presente investigação foi similar ao concreto anteriormente utilizado e testado em campo, cujo pavimento, devido a uma má concepção de projeto, foi induzido à fadiga de maneira drástica, em um espaço de tempo relativamente curto. Tal teste, ocorrido recentemente, propiciou estudos para determinação da resistência à fadiga em condições de campo, possibilitando a construção de um modelo de fadiga empírico-mecanicista para um critério final de ruptura de 10% de placas fissuradas. Assim, foi de bom senso realizar uma investigação laboratorial para confrontar o comportamento à fadiga de vigotas e placas, o que permitiu estabelecer as seguintes conclusões:

- A investigação experimental em vigotas permitiu a construção de equações para previsão da fadiga no concreto estudado. Os ensaios foram realizados a 10 Hz tanto para tensão constante quanto para tensão variável;
- A comparação entre a resistência à fadiga em ensaios com frequência de 5 e 10 Hz, a tensão constante, revelou um comportamento melhor ou mais otimista para as amostras ensaiadas a 10 Hz. O teste com alta frequência induz a menores aberturas de fissuras no interior do concreto devido a estados de tensão transientes mais rápidos, e conseqüentemente, a menor progressão de tais fissuras, acarretando em maior número de ciclos à fadiga;
- Sugere-se que os testes de fadiga em vigotas sejam, dentro de condições ideais e prazos realistas, realizados a baixas frequências, em torno de 1 ou 2 Hz, desde que o período de aplicação das cargas possa ser suficiente para desenvolver a tensão necessária para a abertura de fissuras, aproximando-se ao máximo da abertura de fissuras devido à pressão dos pneus em campo;
- Pela comparação dos modelos de fadiga desenvolvidos para vigas e para placas, no concreto analisado, foi possível definir um fator de calibração entre os modelos de campo e de laboratório;
- Tal fator de calibração (*shift-factor*, *SF*) resultou dependente da relação entre tensões (RT); quanto menor a carga aplicada (durante o ciclo repetitivo), mais otimista

resultou o modelo de fadiga em laboratório. Conseqüentemente, quanto menor for o nível de tensão aplicada, menor será a relação entre campo e laboratório.

Eventualmente alguns últimos comentários sobre as diferenças entre os dois tipos de formulação do modelo à fadiga, campo e laboratório, podem ser enfatizados. Durante a investigação laboratorial todas as amostras de concreto puderam ser ensaiadas à fadiga e mostraram-se muito mais homogêneas comparadas ao processo de construção em campo. No entanto, não somente baixas frequências de cargas, mas a heterogeneidade do concreto em pista são fatores fundamentais para entender o conservadorismo dos modelos à fadiga desenvolvidos a partir do monitoramento em campo.

O critério baseado nas condições de campo parece ser mais lógico sob estes dois aspectos, uma vez que as condições em pista sempre resultam em propriedades do concreto mais heterogêneas e, assumindo um limite de fissuração em campo, eles parecem ser mais adequados a propósitos de manutenção e questões relacionadas ao gerenciamento dos pavimentos.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balbo, J. T. (2003) Performance in fatigue of high strength concrete as ultra-thin whitetopping overlay. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Paper # 0450, (Cdrom), 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.
- Darter, M. I. (1990) Concrete slab vs. beam fatigue models. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Slabs Pavements*, Record 5, pp.472-481, CROW, Sigüenza.
- Koyanagawa, M.; Yoneya, H.; Kokubu, K. (1994) Evaluation of reliability of concrete pavement in consideration of fatigue properties. *Proceedings of the 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements*, CROW - PIARC - CEMBUREAU, pp. 207-216, Krumbach.
- Majidzadeh, K and Ilves, G.J. (1983) *Evaluation of rigid pavement overlay design procedure, development of the OAR procedure*. Final Report DTFH11-9489, Washington, D.C.
- Treybig, H.J.; McCullough, B.F.; Smith, P. and Von Quintus, H. (1977) *Overlay design and reflection cracking analysis for rigid pavements*. Vol. 1, Development of new criteria design, FHWA, Report no. FHWA-RD-77-76, Washington, D.C.
- Vesic, A.S. and Saxena, S.K. (1969) Analysis of structural behavior of road test rigid pavements. Highway Research Board, *Highway Research Record* no. 291, , pp. 156-8, Washington, D.C.
- 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, n° 177, 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