

PREVISÃO DO CRESCIMENTO DE TRINCAS EM VIGAS DE PONTES DE AÇO SOB CARREGAMENTO DE AMPLITUDE VARIÁVEL ¹

Marcos Fábio Veríssimo ²
Enio Pontes de Deus ³

Resumo

Componentes mecânicos quando sujeitos a aplicações repetidas de carregamentos variáveis podem sofrer fratura por fadiga. No caso de componentes com grandes dimensões, como vigas de pontes de aço, o estágio de propagação pode tomar grande parte da vida devido às dimensões da peça. Neste caso, o projeto deve ser tolerante a defeitos que podem estar presentes na estrutura em função da probabilidade de detecção dos mesmos. Após determinar a localização e a amplitude da falha, tem-se de imediato a preocupação com a previsão de propagação da mesma a fim de ter-se um tempo conveniente de reparo. Os conceitos de mecânica da fratura e fadiga tornam-se uma ferramenta essencial para o estudo da propagação de trincas. Um modelo computacional é elaborado para análise de vigas de pontes de aço trincadas. A entrada de comprimentos iniciais de trincas e de histórias de carregamentos variáveis estacionários e não-estacionários com respectivas contagens *rain-flow*, é utilizada como dado essencial para o cálculo do crescimento da trinca. Dessa forma pôde-se avaliar a dispersão dos resultados de previsão de vida da estrutura com a variação dos diferentes parâmetros de entrada.

Palavras-Chave: Pontes de aço; Propagação de trincas por fadiga; Carregamento variável; Previsão de vida.

PREDICTION CRACK GROWTH ON STEEL BEAM BRIDGES UNDER VARIABLE-AMPLITUDE LOADING

Abstract

Steel bridges are normally subjected to random loads with different traffic frequencies. In this way, steel bridges are structures of dynamic behavior and are subjected to fatigue failure process. After localize and determine the amplitude of an existing flaw, it is important to predict crack propagation and the convenient time to repair. Likewise, fracture mechanics and fatigue concepts are essential to the right approach to the problem. At this work, the fatigue crack propagation on steel beam bridges has been studied under different spectrum of variable-amplitude loading. To study the fatigue crack growth, it was developed a computational code, by using the root-mean-square model. One observe the variable-amplitude loading influence on the life structural prediction. Different loads histories and initial crack length were considered as input variables. Thus, it was evaluated the dispersion of results of the expected structural life choosing different initial parameters.

Key words: Steel bridges; Fatigue crack propagation; Variable-amplitude loading; Life prediction.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Engº Mecânico da Petrobras Distribuidora S.A., e-mail marcosfv@br-petrobras.com.br, End. Av. Dom Luis, 300, 5º Andar, Sala 529, CEP 60.160-230, Fortaleza-CE, Brasil.

³ Prof. Dr. do Deptº de Engª Mecânica da Universidade Federal do Ceará – UFC, Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga (Lameff), e-mail: epontes@ufc.br, End. Campus do Pici, Centro de Tecnologia - Bloco 715, Fortaleza-CE, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Pontes de aço são estruturas muito comuns em todos os países e, por terem um comportamento dinâmico, estão sujeitas a falhar pelo processo de fadiga. Os principais fatores que contribuem para o desenvolvimento de trincas de fadiga em pontes de aço são: a idade da estrutura; carregamentos alternados; tipos de detalhes estruturais concentradores de tensão; frequência de tráfego com amplitude variável; defeitos do material; tenacidade à fratura do material; defeitos de soldagem e defeitos de projeto.

As rupturas por fadiga são perigosas, uma vez que se produzem sem o aviso prévio de deformações exageradas. As trincas de fadiga podem propagar-se até um certo limite, onde chega um ponto que a inexistência de um caminho alternativo para o carregamento atuante certamente conduzirá ao colapso total da estrutura. Dessa maneira, a segurança estrutural de uma ponte está associada à resistência local de seus elementos ou ligações e, por essa razão, detectar uma trinca durante um procedimento de inspeção, permite ao projetista determinar a gravidade do problema.

Após determinar a localização e a amplitude de uma falha existente, tem-se de imediato a preocupação com a previsão de propagação da mesma, a fim de ter-se um tempo conveniente de reparo. Os conceitos de mecânica da fratura e fadiga são fundamentais para o correto entendimento do problema.

Neste trabalho, desenvolve-se um modelo computacional para a análise do crescimento de trincas de fadiga utilizando-se o modelo do Valor Médio Quadrático (RMS). Nas simulações realizadas, observa-se a influência dos carregamentos de amplitudes variáveis sobre a previsão de vida da estrutura. Verifica-se também como a variação da amplitude de tensão influencia nos resultados de propagação das trincas.

2 METODOLOGIA

O modelo físico proposto por Deus⁽¹⁾ considera uma viga com perfil I, bi-apoiada nas extremidades, na qual assume-se inicialmente uma trinca de comprimento a_0 em Modo I de abertura na alma da viga, transpassando a mesa inferior e posicionada na metade do comprimento do vão (Figura 1). O processo de fadiga e crescimento da trinca se desenvolverá na viga devido a um carregamento P de amplitude variável. Como as normas brasileiras em certos casos são inexistentes ou omissas, adota-se os procedimentos de projeto da norma americana AASHTO.⁽²⁾

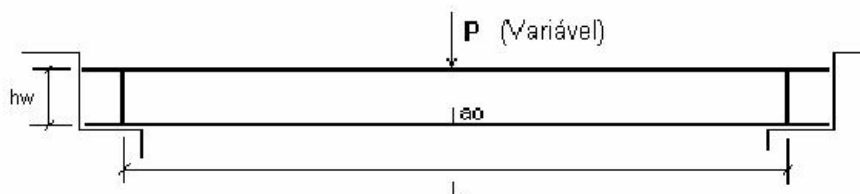


Figura 1. Modelo de viga bi-apoiada trincada em Modo I

A taxa de crescimento da trinca por ciclo, da/dN , pode ser expressa como uma função da variação do fator de intensidade de tensão ΔK na ponta da trinca (*crack tip*) e este depende primariamente da gama de tensões aplicadas, $\Delta\sigma$, do comprimento da trinca, a , e da geometria da peça trincada, $f(a/w)$.

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot (\pi a)^{0.5} \cdot f(a/hw) \quad (1)$$

Para a previsão da vida residual à fadiga, Paris sugeriu que a taxa de crescimento da trinca por fadiga poderia ser descrita pela seguinte regra:

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m \quad (2)$$

onde N é o número de ciclos e C , m são constantes numéricas que representam as propriedades do material. Esta regra é aceita como uma relação geral que descreve a fase de propagação de trincas por fadiga.

Para encontrar uma expressão apropriada para o cálculo do fator de intensidade de tensão, observa-se que a altura da alma é bem superior à sua espessura. Para esta geometria, a alma se encontra em estado plano de tensões. Dessa forma, o fator de intensidade de tensão K_I de vigas com trincas simples de borda sob flexão, pode ser desenvolvido da seguinte expressão:

$$K_I = (Mc/J) \cdot (\pi a)^{0.5} \cdot f(a/hw) \quad (3)$$

onde M é o momento fletor, c é a distância da ponta da trinca à linha neutra, J é o momento de inércia da seção transversal e $f(a/hw)$ é o fator de geometria. No caso da trinca existente na alma da viga, a equação (3) pode ser desenvolvida com base nas definições geométricas da Figura 2, como se segue:

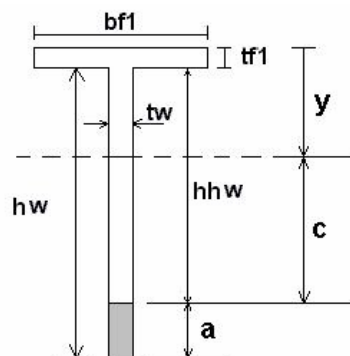


Figura 2. Definições geométricas do modelo de viga trincada.

Reescrevendo a expressão (3) para o fator de intensidade de tensão, temos:

$$K_I = \left(\frac{P \cdot L}{4} \right) \cdot (hw + tf1 - (a+y)) / \left(\frac{bf1 \cdot tf1^3}{12} + (bf1 \cdot tf1 \cdot (hhw + tf1/2 - y))^2 + \frac{tw \cdot hhw^3}{12} + (tw \cdot hhw \cdot (hw/2 - y))^2 \right) \cdot f(a/hw) \cdot (\pi a)^{0.5} \quad (4)$$

onde, $hhw = hw - a$ e $y = (bf1 \cdot tf1 \cdot (hhw + tf1/2) + hhw \cdot tw \cdot (hhw/2)) / (bf1 \cdot tf1 + hhw \cdot tw)$.

Segundo Barsom & Rolfe,⁽³⁾ o fator de geometria $f(a/hw)$ de vigas com trincas simples de borda sob flexão, pode ser relacionado com (a/hw) de acordo com a Figura 3:

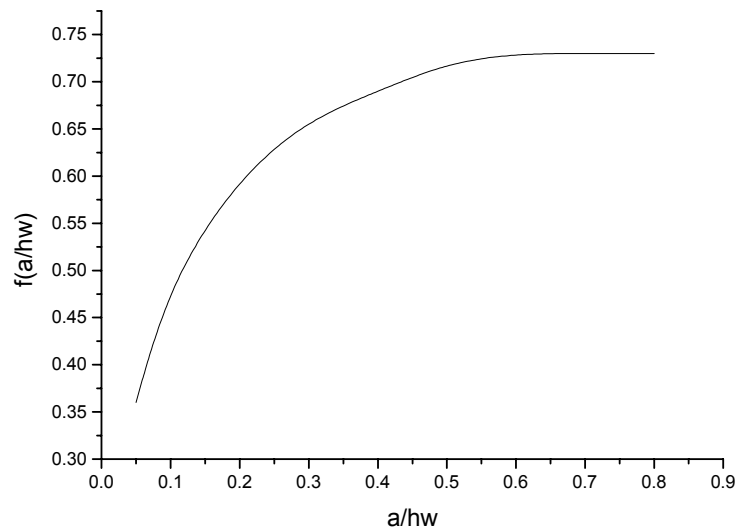


Figura 3. Gráfico $f(a/hw) \times (a/hw)$

O tamanho máximo aceitável da trinca pode ser estimado através do fator de intensidade de tensão crítico (K_{Ic}), que é uma propriedade do material. Através de uma análise de tensões pode-se avaliar a tensão nominal máxima na ponta da trinca através dos limites de carregamentos aceitáveis no projeto. Dessa forma, o tamanho crítico da trinca, a_c , pode ser dado pela seguinte expressão:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{\max} \sqrt{\pi f(a/hw)}} \right)^2 \quad (5)$$

Para se estimar a vida de fadiga sob carregamento de amplitude variável, pode-se utilizar o modelo de crescimento de trincas do Valor Médio Quadrático (RMS) (*root-mean-square*).

Segundo Hudson,⁽⁴⁾ pode-se tratar o problema de previsão da vida à fadiga de uma peça sujeita a um carregamento de amplitude variável substituindo este por um carregamento de amplitude constante que lhe seja equivalente, no sentido de causar o mesmo crescimento de trinca.

Então, o valor de ΔK_{rms} pode ser calculado a partir dos valores (RMS) dos picos e dos vales das tensões atuantes sobre a peça. Considerando que a parte negativa dos carregamentos deve ser desconsiderada, pode-se obter:

$$\sigma_{\max,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (\sigma_{\max_i})^2}{p}} \quad e \quad \sigma_{\min,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (\sigma_{\min_i})^2}{q}} \quad (6)$$

onde p e q são respectivamente, o número de picos e vales do carregamento. Logo, a previsão do número de ciclos que a trinca leva para crescer do comprimento inicial a_o até o final a_f é dada por:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K_{rms})} \quad (7)$$

Para analisar a vida de crescimento da trinca por fadiga, os carregamentos são descritos e representados como uma sucessão de picos e vales. Neste trabalho utilizam-se nas simulações de propagações de trincas os seguintes tipos de carregamentos de amplitude variável e suas respectivas denominações:

- Carregamento de Amplitude Variável Estacionário (CAVE);
- Carregamento de Amplitude Variável Randômico (CAVR).

Os carregamentos CAVE são caracterizados pela repetição das mesmas seqüências de ciclos de carregamentos, enquanto que nos carregamentos CAVR não são observadas repetições nos ciclos de carregamentos e a amplitude varia aleatoriamente com o tempo (Figura 4).

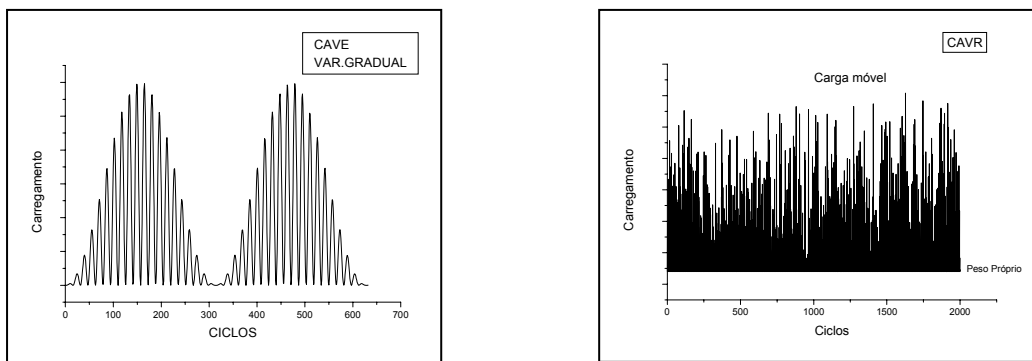


Figura 4. Representação de Carregamentos de Amplitude Variável Estacionário e Randômico

Na simulação destes tipos de carregamentos utilizam-se funções matemáticas cuja amplitude de carregamento pode ser controlada numericamente. As funções de origem dos carregamentos são expressas por:

$$P = [P_{\text{médio}} + P_{\text{ampl}} \text{sen}(\omega_1 N) \text{sen}(\omega_2 N)] \quad (8)$$

$$P = [P_p + (\text{rand})P_{\text{ampl}}] \quad (9)$$

onde;

P = função de carregamento;

$P_{\text{médio}}$ = carregamento médio de solicitação;

ω_1 e ω_2 = variáveis de controle;

N = número de ciclos;

P_p = peso próprio;

P_{ampl} = amplitude de carregamento;

rand = número aleatório gerado pelo programa a cada ciclo, onde $(0 \leq \text{rand} \leq +1)$.

Antes de quantificar o crescimento da trinca, torna-se necessário reduzir a história de carregamento a uma seqüência de eventos que possam ser estimados como compatíveis com dados de fadiga de amplitude constante.

3 SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As simulações foram realizadas em uma viga modelo, projetada de acordo com as normas da AASHTO. Todas as propagações, foram realizadas assumindo trincas de tamanhos iniciais iguais a 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm. A vida da estrutura foi relacionada ao número de ciclos que a trinca leva para crescer do tamanho inicial a_0 até o tamanho final crítico calculado $a_c = 95\text{mm}$. Resultados de simulações realizadas em modelos simplificados foram comparados com resultados apresentados por outros autores, validando o método numérico aqui utilizado nas simulações.

Os carregamentos utilizados nas simulações de propagação das trincas foram divididos em 6 Blocos de 10 carregamentos cada, compreendendo um total de 60 carregamentos diferentes. Cada Bloco caracteriza-se por ter um diferente espectro de carregamento de amplitude variável e pelo aumento gradativo da amplitude de carregamento, desde o 1º ao 10º carregamento. Deve-se observar que o espectro que mais se aproxima de um modelo real é aquele onde o carregamento é totalmente ao acaso. Espectros bem comportados são utilizados aqui a título de comparação dos resultados e podem ser aplicados em estruturas de maneira controlada e monitorada. O espectro de cada bloco de carregamento pode ser visualizado na Figura 5.

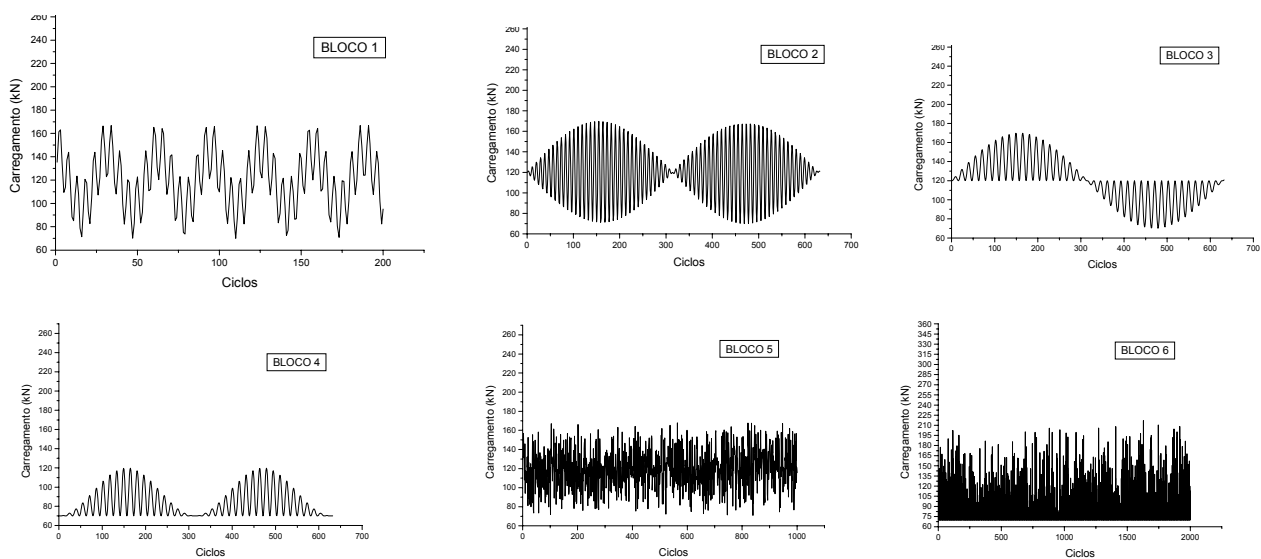


Figura 5. Espectros de carregamentos de amplitudes variáveis dos Blocos 1 a 6

A seguir são apresentadas as curvas de crescimento das trincas de tamanho inicial a_0 até o valor crítico a_c para cada um dos blocos de carregamentos definidos (Figura 6). Analisando-se o comportamento do crescimento das trincas através dos gráficos plotados, observa-se uma tendência natural da vida da estrutura diminuir com o aumento do tamanho das trincas iniciais e também com o aumento da amplitude de tensão ($\Delta\sigma_{rms}$), como deve ser esperado. Observa-se ainda, que trincas de tamanhos diferentes podem levar o mesmo tempo para crescer até um valor a_c , se estiverem sujeitas a níveis de amplitudes de tensões diferentes.

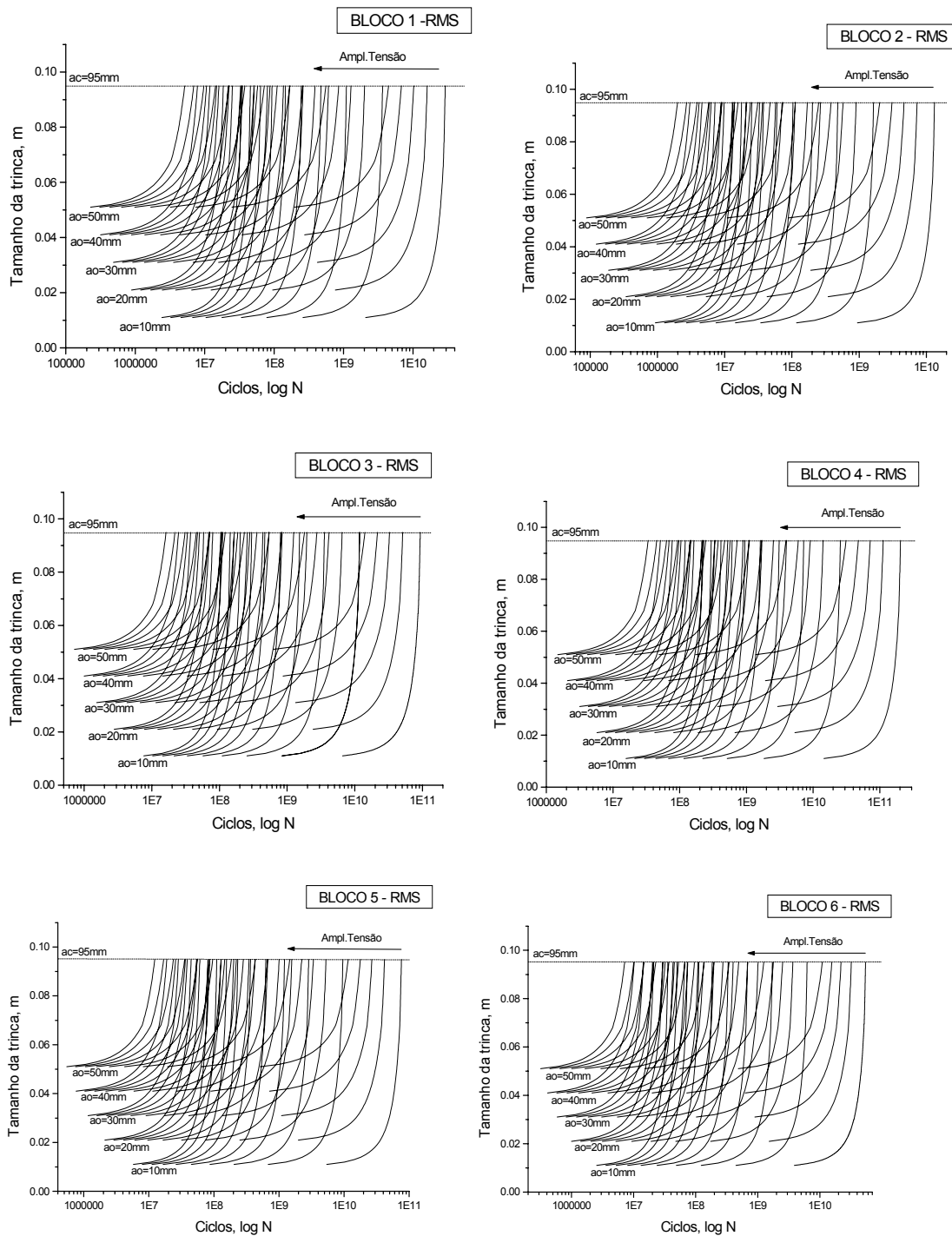


Figura 6. Tamanho da trinca x Número de ciclos para diversos comprimentos iniciais de trincas – BLOCO 1 a 6 de carregamentos

Uma outra observação que pode ser feita em relação às simulações realizadas, é em relação à dispersão dos resultados de previsão de vida da estrutura para diferentes níveis de tensões, quando sujeitas a diferentes tipos de carregamentos. A Figura 7 mostra o desvio padrão de cada bloco desde o 1º ao 10º carregamento. Através desta Figura observa-se que uma população de trincas sujeita a níveis de tensões diferentes pode ter previsões de vida com bastante dispersão quando estão sujeitas a baixos níveis de tensões. Para elevados níveis de tensões a dispersão das previsões de vida se torna reduzida, tendendo a se manter constante.

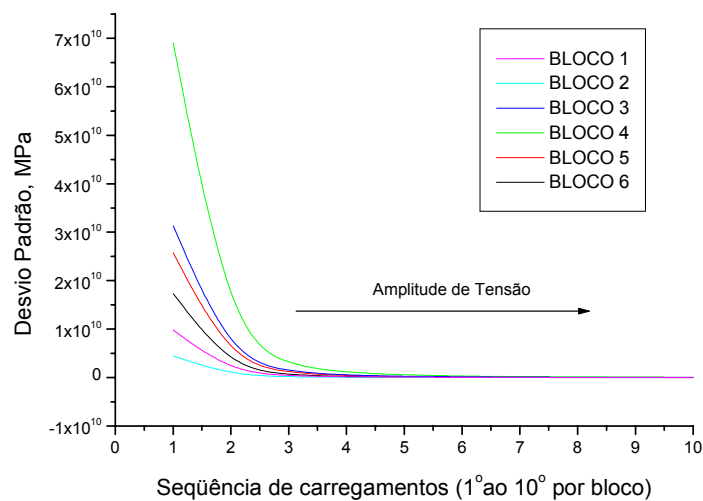


Figura 7. Desvio Padrão x Seqüência de Carregamentos para blocos de carregamentos 1 a 6

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, procurou-se observar o comportamento da propagação de trincas em vigas de pontes de aço quando sujeitas a diferentes espectros de carregamentos de amplitudes variáveis. Desenvolveu-se um modelo numérico computacional com base na teoria da Mecânica da Fratura e Fadiga, e observou-se a influência dos níveis de tensões sobre a dispersão dos resultados de vida esperada através do modelo do Valor Médio Quadrático (RMS). O trabalho apresenta uma metodologia de previsão de vida da estrutura que pode ser adaptada a outros tipos de elementos estruturais, com as devidas mudanças relativas às suas particularidades.

REFERÊNCIAS

- 1 E.P.Deus, Análise do processo de fraturamento em vigas de pontes de aço sob efeito de fadiga, São Carlos. 263p. Tese (Doutorado) - EESC, (1997), Universidade de São Paulo.
- 2 AASHTO, Standard specifications for highway bridges (1989). 14rd ed. Washington.
- 3 J.M.Barson, S.T.Rolfe, Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics (1999), 3rd ed. Philadelphia, ASTM.
- 4 Hudson, C.M. A root-mean-square approach for predicting fatigue crack growth under random loading, (1981), ASTM STP 748, p. 41-52.