

Roberta Amorim de M. M. Gonçalves

**Contribuição na avaliação da vida útil de
eixo virabrequim sob fadiga multiaxial**

TESE DE DOUTORADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
DE MATERIAIS**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos



Roberta Amorim de Magalhães Monteiro Gonçalves

**CONTRIBUIÇÃO NA AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE
EIXO VIRABREQUIM SOB FADIGA MULTIAXIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira



Roberta Amorim de Magalhães Monteiro Gonçalves

**CONTRIBUIÇÃO NA AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE
EIXO VIRABREQUIM SOB FADIGA MULTIAXIAL**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia
PUC-Rio

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Universidade Federal Fluminense

Arnaldo Freitas Camarão

SAE Brasil

Prof. Gilvania Terto Alves

CEFET-RJ

Prof. Ricardo Ponce Weber

Instituto Militar de Engenharia

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC Rio

Rio de Janeiro, 19 de setembro de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Roberta Amorim de Magalhães Monteiro Gonçalves

Graduou-se em Odontologia pela Universidade Federal Fluminense em 2009. Entre 2012 e 2015, cursou na Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, e na Associação Brasileira de Polímero diversos cursos na área de Falhas. Possui Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2013).

Ficha catalográfica

Gonçalves, Roberta Amorim de Magalhães Monteiro

Contribuição na avaliação da vida útil de eixo virabrequim sob fadiga multiaxial / Roberta Amorim de Magalhães Monteiro Gonçalves ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – 2017.

122 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais – Teses. 2. Engenharia Química – Teses. 3. Fadiga de alto ciclo. 4. Carregamentos em fase e fora de fase. 5. Aços estruturais. 6. Eixos virabrequins. 7. Usinas termoelétricas. I. Pereira, Marcos Venicius Soares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

Para os melhores pais do mundo, Elbio e Lucia, para sempre.

Para o grande amor da minha vida, Pedro.

Agradecimentos

Ao Prof. Marcos Venicius Soares Pereira por sua orientação, atenção e carinho durante esses seis anos de convivência.

Ao Prof. Fathi Darwish, por toda dedicação, conhecimento passado e ajuda que, sem dúvida, foram essenciais durante a confecção da tese.

Ao Paulo Petrassi pela oportunidade dada em trabalhar com o tema de Fadiga Multiaxial.

A todos do PIUES, em especial, à Daiana, por toda simpatia e atenção durante todo esse período.

À minha família por todo carinho e apoio sempre.

A todos os amigos da PUC e da vida, por toda força e incentivo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos e auxílio financeiro.

Resumo

Gonçalves, Roberta Amorim de Magalhães Monteiro Gonçalves; Pereira, Marcos Venicius Soares. **Contribuição na avaliação da vida útil de eixo virabrequim sob fadiga multiaxial.** Rio de Janeiro, 2017.122 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As previsões de falhas por fadiga tornam-se críticas sob condições multiaxiais de carregamento, uma vez que a complexidade do estado de tensões requer uma análise com base em modelos mais avançados do que aqueles adotados para carregamentos uniaxiais. Neste contexto, alguns critérios foram desenvolvidos para tentar prever a falha de componentes submetidos a carregamentos cíclicos multiaxiais. Um exemplo de componente mecânico sujeito a fadiga multiaxial quando em serviço são os eixos virabrequim de unidades geradoras de plantas termoelétricas. Usualmente projetados segundo o critério de Findley, falhas recentes de eixos virabrequim ocorridas no parque termoelétrico nacional, tem provocado o questionamento da eficiência de tal critério. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo analisar a aplicabilidade de seis modelos (Papadopoulos, Findley, Mataka, McDiarmid, Carpinteri & Spagnoli e Liu & Mahadevan) de fadiga multiaxial de alto ciclo, baseados no plano crítico, para prever a falha de eixos virabrequim de unidades geradoras. Para aplicação dos modelos, adotaram-se diferentes parâmetros de carregamento (tensão média e defasagem de aplicação das tensões normais e cisalhantes) e propriedades de material (resistência à fadiga), partindo de valores encontrados na literatura. Observou-se uma divergência entre os resultados de cada modelo estudado, sendo uns mais conservadores do que os outros, em função do carregamento e propriedades do material. Entretanto, o modelo de Papadopoulos, com base na facilidade de aplicação e sensibilidade de previsão da falha, mostrou-se mais adequado.

Palavras-chave

Fadiga de alto ciclo; carregamentos em fase e fora de fase; aços estruturais; eixos virabrequins; usinas termoelétricas.

Abstract

Gonçalves, Roberta Amorim de Magalhães Monteiro Gonçalves; Pereira, Marcos Venicius Soares (Advisor **Contribution in the useful life evaluation of crankshaft under multiaxial fatigue**. Rio de Janeiro, 2017.122 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The fatigue failure prediction becomes critical under multiaxial loading conditions, since the complexity of the stress state requires analysis based on models more advanced than those adopted for uniaxial loads. In this context, some criteria were developed in an attempt to predict the failure of components subjected to multiaxial cyclic loads. An example of mechanical component subject to multiaxial fatigue is the crankshaft of thermoelectric plants. It is usually projected according to the Findley criterion. However, recent failures of crankshafts occurring in the national thermoelectric park, put on doubt the efficiency of such criterion. In this way, the present study aimed to analyze the applicability of six models (Papadopoulos, Findley, Mataka, McDiarmid, Carpinteri & Spagnoli and Liu & Mahadevan) of high cycle multiaxial fatigue, based on the critical plane, to predict failure on crankshaft of generating units. For the models' application, different loading parameters (medium stress and out-of-phase stresses) and material properties (fatigue limit) were adopted, starting from values found in the literature. A divergence between the results of each model was observed, some of them were more conservative than the others, depending on the loading and material's properties. However, the Papadopoulos model, based on easy application and failure prediction sensitivity, proved to be more suitable than the others.

Keywords

High cycle fatigue; in phase and out-of-phase loading; structural steels; crankshafts; thermoelectric plants.

Sumário

1 Introdução	12
2 Revisão de Literatura	15
2.1 Fadiga	15
2.1.1 Tipos de fadiga	15
2.1.2 Mecanismo de fadiga	16
2.2 Fadiga multiaxial	19
2.2.1 Carregamento proporcional e não proporcional	19
2.2.2 Critérios de fadiga multiaxial	20
2.2.2.1 Modelo de Findley	22
2.2.2.2 Modelo de Mataka	23
2.2.2.3 Modelo de McDiarmid	23
2.2.2.4 Modelo de Papadopoulos	24
2.2.2.5 Modelo de Carpinteri & Spagnoli	28
2.2.2.6 Modelo de Liu & Mahadevan	29
2.2.3 Índice de Erro	30
2.2.4 Efeitos das tensões médias	31
3 Metodologia	33
3.1. Primeira Etapa	33
3.1.1 Processos matemáticos dos modelos de análise de fadiga	33
3.1.1.1 Cálculo dos modelos pela análise de tensões	34
3.1.1.2 Cálculo dos modelos pelas equações gerais	40
3.1.2 Análise do plano de fratura	44
3.1.3 Análise do plano crítico	44
3.1.4 Comparação dos seis critérios e validação da metodologia	46
3.1.5 Exemplos matemáticos para cada modelo	49
3.2 Segunda etapa	69
4 Resultados e Discussão	74
4.1 Primeira etapa	74
4.1.1 Análise do plano de fratura	74
4.1.2 Análise do plano crítico	77

4.1.3 Comparação dos modelos para diferentes materiais	80
4.1.4 Influência das tensões médias e da defasagem	86
4.2 Segunda etapa	90
4.2.1 Análise do plano de fratura	90
4.2.2 Análise do plano crítico	92
4.2.3 Comparação dos diferentes modelos para DIN 34CrNiMo6	93
5 Conclusão	97
6 Sugestões para trabalhos futuros	98
7 Referências bibliográficas	99
Apêndice I	102
Apêndice II	114
Apêndice III	120

Lista de símbolos

C_a : amplitude da tensão cisalhante dos modelos

N : número de ciclos para fadiga

$\beta_{L\&M}$: propriedade do material definida para o modelo de Liu e Mahadevan

β_{pap} : propriedade do material definida para o modelo de Papadopoulos

β : diferença de fase entre as tensões normal e cisalhante

N_{max} : tensão normal máxima dos modelos

N_m : tensão normal média dos modelos

N_a : amplitude da tensão normal dos modelos

k : propriedade de material em função dos limites de resistência à fadiga

f : constante referente à propriedade do material para o modelo de Findley

σ_a : amplitude da tensão principal

σ_m : tensão principal média

σ_{max} : tensão principal máxima

$\sigma_{H,max}$: tensão hidrostática máxima

$\sigma_{H,a}$: amplitude da tensão hidrostática

σ_u : limite de resistência mecânica

σ_y : limite de escoamento

σ'_f : coeficiente de resistência à fadiga

τ_a : amplitude da tensão cisalhante

τ_m : tensão cisalhante média

f_{-1} : limite de resistência à fadiga em flexão

t_{-1} : limite de resistência à fadiga em torção

ψ_f : ângulo que o plano de fratura faz com a horizontal

ψ_c : ângulo que o plano crítico faz com a horizontal

T_a : amplitude da tensão cisalhante resolvida

ψ_{pap} e θ : coordenadas esféricas do vetor unitário

φ : ângulo entre o plano de fratura e tensão de carregamento axial

α : constante associada à propriedade do material para Papadopoulos

δ : ângulo entre o plano crítico e o plano de fratura

l: índice erro

b: expoente de resistência à fadiga

η : parâmetro de material no modelo de Liu & Mahadevan