

1. Introdução

1.1. Objetivo

O objetivo desta tese é avaliar modelos de plasticidade incremental em fadiga multiaxial. Para isso, nesta, desenvolveu-se uma máquina biaxial tração-torção servindo-se de atuadores eletromecânicos de baixo custo, com o intuito de viabilizar-se uma máquina para o estudo dos modelos de plasticidade incremental. O desenvolvimento da máquina biaxial inclui seu projeto, a construção, o desenvolvimento da célula de carga e torque e a implementação das técnicas de controle.

1.2. Considerações iniciais

As máquinas tradicionais de testes de fadiga geralmente baseiam-se em sistemas servo-hidráulicos, e têm como propósito fazer ensaios uniaxiais nos materiais para prever a vida útil em serviço. Estas máquinas servo-hidráulicas têm um elevado custo, portanto em muitos casos não é possível adquiri-las unicamente para os propósitos de pesquisa. As máquinas multiaxiais têm ainda um custo mais elevado, dado que requerem dois ou mais atuadores, e uma estrutura mais rígida.

As cargas reais de serviço geralmente podem atuar em diferentes pontos da peça, as quais podem vir de uma, ou de múltiplas fontes. Estas cargas podem induzir forças de torção, flexão, normais e cortantes que combinadas podem gerar tensões bi, ou tri-axiais variáveis nos pontos críticos da peça, causando o problema conhecido como “fadiga multiaxial” [1].

Muitos destes componentes mecânicos críticos experimentam cargas cíclicas multiaxiais durante sua vida útil. O problema de fadiga multiaxial torna-se assim mais complexo devido à distribuição de esforços e das diferentes direções da

iniciação de trinca dos componentes [2].

Neste trabalho desenvolveu-se uma máquina biaxial tração-torção, com atuadores elétricos, incluindo sua análise estrutural, sua modelagem e o desenvolvimento dos transdutores de força e torção. Posteriormente foram implementadas diversas técnicas de controle robusto para superar as não-linearidades da dinâmica da máquina biaxial e pôde se verificar, experimentalmente, sua exatidão no controle de trajetória de força e torque 90° fora de fase. Finalmente avaliaram-se, experimentalmente, alguns modelos de plasticidade incremental para prever fluência cíclica (*Ratcheting*) e encruamento não proporcional.

1.3. Motivação

Os ensaios de materiais são realizados com duas finalidades: uma é a de permitir a obtenção de informações rotineiras do produto (ensaios de controle) no recebimento de materiais dos fornecedores e no controle final do produto acabado. A outra finalidade é a de desenvolver novas informações sobre os materiais, como no desenvolvimento de novos materiais, de novos processos de fabricação e novos tratamentos. O ensaio de fadiga é capaz de fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente a suportar cargas repetitivas e/ou cíclicas, por longos períodos, sem se romper. A Figura 1.1 apresenta um ensaio de iniciação de trincas de fadiga.

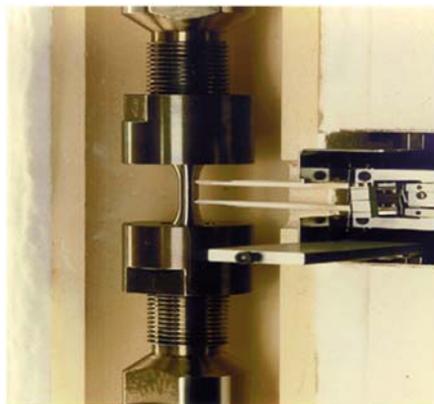


Figura 1.1. Ensaio de Fadiga

Os ensaios mecânicos multiaxiais permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando submetidos à ação de esforços reais. Elas são expressas em função de tensões e/ou deformações. O ensaio de fadiga multiaxial consiste, por exemplo, na aplicação de duas cargas cíclicas independentes, e.g. uma tração e um torçor fora de fase em um corpo de prova apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado, gerando assim uma variação nas direções principais ao longo do tempo.

Há diversos modelos a serem propostos para a modelagem de dano por fadiga multiaxial. A maioria deles limita-se aos materiais específicos ou às condições de carga. Alguns não conseguem prever a orientação da trinca, o que vem a ser outra característica distintiva do dano por fadiga multiaxial, em comparação ao problema da fadiga uniaxial. Assim, não existe um modelo de dano por fadiga multiaxial universalmente aceito [2].

Outra motivação desta tese é a construção de uma máquina biaxial tração-torção no Laboratório de Fadiga da PUC-Rio para ensaios de fadiga multiaxial a baixo custo, a qual permitirá a avaliação de modelos mais reais na previsão da vida à fadiga. Esta máquina também pode permitir o estudo de modelos de plasticidade incremental para prever a fluência cíclica multiaxial (*Ratcheting* multiaxial), encruamento não proporcional e encruamento cinemático.

1.4. Revisão bibliográfica

Nos primeiros trabalhos relacionados à fadiga multiaxial, os critérios de fadiga utilizados basearam-se essencialmente nos extensos trabalhos experimentais, como os desenvolvidos por Nishihara e Kawamoto [3] e por Gough [4]. Existe um grande número de autores que propuseram diferentes critérios de fadiga multiaxial, os quais, segundo Gonçalves [5], podem ser classificados em critérios empíricos, baseados em tensão, em deformação, energia, planos críticos, nível mesoscópico e tensões medias no interior de volumes elementares, mas ainda não existe um critério universalmente aceito.

Existem muitos trabalhos de modelos de dano a fadiga multiaxial na literatura, tais como os modelos propostos por Sines, Crossland, Findley, McDiarmid, Brown–Miller, Fatemi–Socie e Smith-Watson-Topper (SWT) [6]. Estes requerem conhecimento da amplitude das tensões, ou deformações, muitas vezes difíceis de obter-se nos casos de história de carregamento multiaxiais não proporcionais.

A partir do trabalho pioneiro de *Bauschinger* compreendeu-se que a deformação plástica é associada ao dano da fadiga. Geralmente os componentes são projetados na faixa elástica, mas eventualmente possuem regiões de concentração de tensões, onde localmente as tensões excedem a resistência ao escoamento. Neste caso é necessário uma análise da plasticidade [6].

No estudo dos modelos de plasticidade incremental, Mróz [7] propôs um modelo multi-linear de encruamento cinemático de múltiplas superfícies. Zeng [8] melhorou este modelo incorporando um efeito Bauschinger mais realista para o carregamento cíclico. Já Garud [9], baseando-se nas modernas teorias de plasticidade e uma nova regra de encruamento, propôs um procedimento para o cálculo do trabalho plástico envolvendo considerações explícitas da relação constitutiva do material. O desempenho deste novo procedimento foi avaliado experimentalmente e previu a resposta cíclica de tensão-deformação para um carregamento multiaxial fora de fase. Contudo, estes modelos não são capazes de reproduzir fenômenos não lineares como a fluência cíclica (*Ratcheting*).

No estudo do fenômeno de *Ratcheting* podem-se mencionar os trabalhos feitos por Jiang [10] [11], que propôs uma regra de encruamento cinemático utilizando o conceito de superfícies limitante para as componentes de translação da superfície de escoamento (*Backstress*). Este modelo prevê bem o fenômeno de ratcheting para carregamento proporcionais e não proporcionais.

Dentre os principais trabalhos encontrados na literatura e relacionados ao estudo dos modelos de encruamento não proporcional podem-se citar os feitos por Itoh [12], que estudou a microestrutura do aço inox-304, submetido a trajetórias de deformação não proporcional tração-torção e à temperatura ambiente. Em um outro

trabalho, Itoh [13] estudou a vida à fadiga em baixo ciclo da liga de alumínio 6061, submetido a 14 trajetórias de deformação tração-torção e, posteriormente, estudou o comportamento de cargas não proporcionais para uma liga Ti-6Al-4V [14].

As máquinas para ensaios de fadiga geralmente são utilizadas nos trabalhos de ensaio em laboratório e nas diversas pesquisas. Cada uma delas têm diversas características específicas que dependem do tipo de ensaio, do tamanho da amostra e do tipo de carregamento solicitado. Ao longo dos anos foram desenvolvidas por pesquisadores diversas máquinas, as quais operam de forma mecânica, eletromecânica, pneumática, eletromagnética e hidráulica [15].

Segundo Weibull, no projeto das máquinas de fadiga devem-se levar em conta as seguintes características: a) o mecanismo que produz o carregamento constante e/ou alternado; b) os mecanismos de transmissão de carga (garras, juntas de flexão, guias de fixação, etc.); c) os transdutores de medição que permitem medir cargas, deformações, e ajustar seus limites de carga ou deformação; d) o dispositivo de controle para manter carregamentos, ou deformações nas trajetórias desejadas requeridas pelo ensaio; e) uma estrutura rígida que suporte os componentes da máquina e evite problemas de vibração. Weibull propôs uma classificação das máquinas de ensaio de fadiga de acordo com o propósito do ensaio, os tipos de carga, os meios de produzir a carga, as características operacionais, etc; Destacou, também, a importância da calibração como um fator indispensável para a obtenção de resultados confiáveis. Todos estes detalhes devem ser levados em consideração, já que podem influenciar nos resultados [16].

A seguir, apresentam-se as principais máquinas de ensaios de fadiga multiaxial utilizados na atualidade. Uma máquina tração-torção para ensaios de fadiga dinâmico 8802TT foi desenvolvida pela empresa Instron [17], a qual tem como atuador principal sistemas servo-hidráulicos, com opções de capacidade desde 2 kN até 100 kN em tração e compressão e desde 100 N.m até 1000 N.m na torção. Estes sistemas utilizam um controle do tipo PID, otimizando seus parâmetros de controle durante o ensaio a mudanças nas características do corpo de prova.



Figura 1.2 Máquina Instron 8802TT para ensaios de fadiga multiaxial [17]

Outras máquinas desenvolvidas pela Instron para ensaios de fadiga multiaxial são a série eletroPlus E10000, os sistemas cruciformes biaxiais planares 8800, INSTRON 8874 e INSTRON 8850. Outro fabricante de máquinas de fadiga multiaxial é a MTS, que desenvolveu máquinas servo-hidráulicas tração-torção série MTS-BIONIX [18], modelo MTS 809, MTS 858 e sistema de ensaio planar biaxial [19].



Figura 1.3 Máquina MTS tração torção modelo 370.02 [19]

No uso de máquinas para ensaios multiaxiais apresentaram-se trabalhos orientados na área de fadiga na previsão de vida, cálculo do dano, propagação de trinca, modelos de plasticidade incremental, dentre outros temas. Um trabalho com máquinas multiaxiais foi desenvolvido para a previsão de vida em componentes de engenharia e estruturas com um alto grau de precisão [20]. A vida à fadiga foi determinada pelas sequências de tensão-deformação nos locais críticos, as quais foram calculadas para um carregamento não-proporcional cíclico arbitrário.

Outro trabalho [21] estuda, mediante simulação, a evolução e a redistribuição cíclica da tensão-deformação, e a avaliação dos parâmetros de fadiga adequados para estimar a vida sobre carregamentos multiaxiais. Foi verificado experimentalmente, através de uma série de testes de fadiga de baixo ciclo biaxial composto da tração-compressão, torção estática e cíclica, realizados em uma máquina de ensaio biaxial servo-hidráulico (Instron 8800).

Em relação às máquinas de ensaios de fadiga, a maioria dos sistemas envolve sistemas hidráulicos. O uso de atuadores elétricos, como dos motores de corrente contínua (DC) é vantajoso pela redução de custos e dimensões da máquina, ao dispensar um pressurizador hidráulico. O controle de sistemas elétricos, como dos motores DC apresenta muitos trabalhos de pesquisa aplicados, como atuadores industriais que desempenham tarefas nas quais são necessárias forças e torques relativamente altos. O esquema de controle muitas vezes utiliza sinais medidos localmente, não requerendo a computação da dinâmica não-linear dos sistemas eletromecânicos.

Os atuadores de corrente contínua (DC) estão entre os mais utilizados no controle de velocidade em aplicações industriais (máquinas ferramentas, sistemas flexíveis de produção, robótica, etc.), e frequentemente são substituídos por atuadores de corrente alternada (AC), a fim de evitar o problema associado à manutenção mecânica dos comutadores [22]. Por outro lado, os atuadores AC requerem uma estratégia de controle muito mais complexa para obter um alto desempenho estático e dinâmico. No entanto, a modelagem baseada no campo orientado permite modelar a dinâmica de um atuador AC de modo quase similar ao de um atuador DC. Consequentemente, algumas das estratégias de controle de

posição robusta desenvolvidas para atuadores DC podem ser utilizadas no controle de atuadores AC.

Outro trabalho [23] apresentou um esquema de controle baseado na metodologia de perturbações singulares e técnicas tipo *sliding* (deslizamento) aplicados a um motor de passo. A estratégia projetada permite o controle da velocidade angular e a posição do motor para o seguimento de uma determinada trajetória de referência, e baseia-se na reconstrução do sinal medido diretamente da corrente e tensão elétrica do estator.

Um modelo de controle de seguimento de posição por campo orientado foi desenvolvido para um motor de indução com incertezas nos parâmetros e perturbações no torque. No projeto do controlador foram utilizados um sistema *fuzzy* para aproximar as não-linearidades e uma técnica adaptativa *backstepping* [24]. Assim, um controlador Fuzzy adaptativo permite a convergência do erro a uma pequena vizinhança da origem e, comparado ao controle *backstepping* convencional, apresenta uma estrutura muito mais simples.

1.5. Conteúdo da tese

O conteúdo desta tese encontra-se organizado da seguinte forma. No capítulo dois, apresenta-se a revisão bibliográfica da formulação utilizada no estudo de plasticidade incremental e alguns modelos de plasticidade incremental de interesse para a pesquisa, tais como modelos de ratcheting uniaxial e multiaxial e modelos de encruamento cinemático, isotrópico e não proporcional. No capítulo três, descreve-se a implementação do simulador para os modelos de plasticidade incremental. No capítulo quatro apresenta-se o projeto, a análise da integridade estrutural, a construção e a modelagem da máquina tração-torção. O capítulo cinco trata do projeto e desenvolvimento da célula de carga e torque e calibração dos transdutores. Apresenta também o desenvolvimento do sistema experimental da máquina tração-torção, e as conexões elétricas do sistema de controle. No capítulo seis estudam-se as técnicas de controle implementadas na máquina tração torção, tais como controle *sliding* e controle PID *sliding*. No capítulo sete, apresentam-se

os resultados experimentais da máquina tração-torção com as técnicas de controle estudadas no capítulo cinco. Além disso, apresentam-se os resultados experimentais dos modelos de plasticidade incremental estudados no capítulo dois. E, finalmente, no capítulo oito, encontram-se as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros na continuação desta tese.