

8. Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1. Conclusões

No presente trabalho foi desenvolvida uma máquina tração-torção, com atuadores eletromecânicos que geram cargas axiais na faixa de ± 200 kN e torque na faixa de ± 1300 N.m. Esta máquina permitiu avaliar experimentalmente modelos de plasticidade incremental que modelam fenômenos tais como ratcheting multiaxial e encruamento NP.

Desenvolveu-se, também, uma célula de carga e torque de baixo custo para ensaios de fadiga multiaxial tração/torção, com carregamentos na faixa de ± 200 kN e torque na faixa ± 1300 N.m. O transdutor foi usinado em um torno CNC pela complexidade do perfil de seus entalhes, os quais foram otimizados, visando minimizar-se o fator de concentração de tensões e aumentar, assim, sua vida à fadiga até 240 milhões de ciclos. O material escolhido para a estrutura do LTC foi uma liga de aço 4340, devido a sua fácil usinagem, pouca distorção e boa resposta ao tratamento térmico. As configurações dos extensômetros para formar as conexões da ponte *Wheatstone* de tração e torção levaram em consideração a compensação das cargas excêntricas, os efeitos de temperatura e a influência da torção nas medições de tração e vice-versa.

Implementou-se uma técnica *PID Sliding Control* para o controle de trajetória da força e/ou torque, aplicados ao corpo de prova. Esta técnica de controle não-linear conseguiu superar as não linearidades do sistema, tais como atrito, backlash e zona morta, como foi apresentado nos resultados experimentais.

A independência dos laços de controle de força e torque, e sua robustez a perturbações, permitiu controlar a trajetória da história de carregamentos complexos requerida pelos ensaios.

O controle de torque apresentou maior incerteza devido à excessiva rigidez da MTT, gerando grandes variações do torque causadas por pequenas variações na rotação do motor. Para atingir estas pequenas variações no torque é necessário micro rotações, com uma caixa de redução com maior razão de redução, ou flexibilização do sistema eletromecânico.

Os motoredutores do atuador de torção apresentaram problemas de aquecimento para os ensaios com grandes gamas de torque (acima de ± 200 N.m) e após 6 horas de ensaio. Este problema se dá devido à elevada corrente requerida pelo motor para alcançar o torque desejado, e pelos pequenos deslocamentos angulares do eixo do motor para se atingir o torque desejado. Ficando, assim, praticamente travado durante quase todo o ensaio.

As medições das deformações nos ensaios foram feitas utilizando-se um módulo de correlação de imagens VIC-3D da *Correlated Solutions*, o qual é sensível a vibração, motivo pelo qual devemos tomar cuidado com a vibração da MTT gerada pelos motores nos pontos de inversão (pico e vale da história do carregamento).

O alinhamento da MTT é um aspecto importante a levar em consideração para se evitar problemas de flexão indesejados no corpo de prova e/ou flambagem, invalidando o ensaio. Além disso, verificar e ajustar a calibração dos transdutores no início do ensaio é fundamental para a obtenção de medições confiáveis.

A representação 5D da tensão e deformação é altamente recomendada, já que reduz a dimensionalidade das relações tensão-deformação a partir de 6D para 5D. Em corpos de prova sem entalhes, submetido às histórias NP tração-torção ou uniaxial, pode-se utilizar um subespaço 2D ou 1D respectivamente da representação 5D.

Finalmente, o simulador desenvolvido para modelar o comportamento dos modelos de plasticidade incremental, modela satisfatoriamente os fenômenos de

encruamento NP e ratcheting uniaxial e multiaxial para cargas reais, desde que ajustados corretamente aos parâmetros do simulador para o material testado.

8.2. Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros na continuação desta tese, pode-se apontar:

Ampliar a modelagem da dinâmica da máquina tração-torção, a qual deverá considerar a modelagem do corpo de prova, transdutores, e as não linearidades do sistema eletromecânico tais como: folgas, zona mortas, atrito, etc. O ajuste do modelo ao comportamento real da MTT permitirá o projeto e avaliação de novas técnicas de controle.

Implementação de novas técnicas de controle para o controle de torque capaz de lidar com as não linearidades e a excessiva rigidez da MTT. A implementação de técnicas de controle mais robustos permitirá realizar ensaios multiaxiais com história de carregamentos NP complexos.

Analisar o projeto da MTT e incorporar componentes que permitam aumentar sua flexibilidade principalmente na torção. Este aumento da flexibilidade ajudaria melhorar o controle de torque e evitaria os problemas relacionados com o aquecimento dos motorreduzores.

Avaliação experimental de novos modelos plasticidade incremental tais como, encruamento cinemático, encruamento NP, ratcheting multiaxial, tensão média de relaxamento. Além disso, ensaios de iniciação de trinca sobre história de carregamento NP, a avaliação experimental do fator de intensidade de tensão e a avaliação da vida à fadiga multiaxial.