



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

**ISEL**

## **Wells Turbine: Fiberglass Flanges**

**André Pedro dos Santos**

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no Ramo de Manutenção e Produção

### **Resumo:**

A introdução desta tese começa por realizar um enquadramento do projecto em mão, apresentando a central de energia das ondas em que se encontram os componentes em fibra de vidro a projectar. Esta central usa o princípio de variação de coluna de água, e encontra-se localizada na ilha do Pico, Açores. São de seguida apresentados os objectivos deste trabalho, que consistem na selecção de materiais de fabrico dos componentes, desenvolvimento de uma metodologia para projectar juntas aparafusadas em materiais compósitos, dimensionamento e comparação de duas juntas concorrentes em materiais compósitos: junta solicitada à tracção e junta solicitada ao corte, validação da análise e estudo das causas dos vários tipos de falha destas juntas.

A parte I deste trabalho é o resultado da pesquisa bibliográfica efectuada para levar a cabo os objectivos definidos. Assim, começa por se fazer uma descrição dos materiais e processos de fabrico que mais se adequam ao presente projecto, nomeadamente fibra de vidro, resinas, tecidos, impregnação manual, RTM e infusão por vácuo. Daqui resultou que os materiais mais adequados para esta aplicação são fibra de vidro do tipo E e resina polyester devido ao seu baixo custo e larga utilização em aplicações estruturais marinhas. O processo de fabrico mais eficiente é a infusão por vácuo devido á sua vocação para pequenas séries de produção, a poupança que permite em termos de mão-de-obra, a complacência com normas de emissão de voláteis e as boas propriedades das partes produzidas.

No capítulo II da parte I são discutidos os tópicos relacionados com juntas em materiais compósitos. Da pesquisa levada a cabo conclui-se que as grandes vantagens das juntas aparafusadas são a sua facilidade de montagem e desmontagem, facilidade de inspecção e capacidade de ligar quaisquer tipos de materiais. Quanto à furação de compósitos é importante referir a necessidade de utilizar ferramentas resistentes e parâmetros de maquinaria que minimizem o dano infligido aos laminados. Isto é possível através da selecção de ferramentas com passos baixos que reduzam igualmente a dimensão do seu centro estático responsável pela força axial exercida sobre o laminado - principal factor causador de dano. Devem-se igualmente utilizar baixas velocidades de avanço e elevadas velocidades de rotação. É importante salientar a importância da realização de pré-furação, de utilização de um prato de suporte na superfície de saída do laminado e a existência de ferramentas especialmente concebidas para a furação de compósitos. Para detectar e quantificar o dano existente num furo destacam-se os métodos de inspecção ultrasónica e a radiografia.

Quanto aos parâmetros que influenciaram o comportamento de juntas aparafusadas destacam-se os rácios largura/diâmetro, distância ao bordo/diâmetro, espessura/diâmetro, pré-tensão, fricção, sequência de empilhamento e respectivas proporções, dimensão das

anilhas e folga entre o parafuso e o furo. A pesquisa efectuada visando metodologias de projecto fiáveis ditou a necessidade de utilizar métodos que permitiram determinar o parafuso mais carregado de uma junta, efectuar o cálculo de tensões no mesmo, e ainda métodos que permitam determinar a primeira falha que ocorre no laminado bem como a falha final no mesmo.

O capítulo III da primeira parte descreve os métodos de análise de tensões necessários para as metodologias de projecto utilizadas. Aqui é apresentada a teoria clássica da laminação, um método para determinação do parafuso mais carregado, um método analítico baseado na teoria da elasticidade anisotrópica de um corpo e o método dos elementos finitos. O método para determinar o parafuso mais carregado - análise global - consiste num modelo bidimensional de elementos finitos em que 2 laminados coincidentes são modelados com elementos lineares de casca com 4 nós, sendo a extremidade de um laminado restringida em todos os graus de liberdade e a extremidade oposta do segundo laminado carregada com a carga pretendida. Os laminados são ligados através de elementos mola que simulam os parafusos, sendo a sua constante de rigidez previamente calculada para este fim. O método analítico modela o contacto assumindo uma distribuição de pressão cosinoidal ao longo de metade do furo, e é válido para laminados simétricos e quasi-isotrópicos. O método dos elementos finitos é o que mais factores permite ter em conta, sendo os modelos tridimensionais com um elemento por camada os que melhor modelam o estado de tensões experienciado por uma junta aparafusada em materiais compósitos.

O tópico de análise de falha é abordado no capítulo 4 da primeira parte. Aqui são apresentados os resultados do *world wide failure exercise* que compara vários critérios de falha existentes até 2004, fazendo-se referência a desenvolvimentos recentes que têm ocorrido nesta área. O critério de Puck surge como aquele que permite previsões de falha mais exactas. O critério de falha de Hashin 3D foi o escolhido para o presente trabalho, devido à sua facilidade de implementação num modelo de elementos finitos, à sua capacidade para detectar modos de falha subcríticos e à sua utilização em trabalhos anteriores que apresentaram previsões de falha muito próximas dos dados experimentais. Também neste capítulo se apresentaram os vários tipos de falha de uma junta aparafusada em materiais compósitos, apresentando as causas de cada uma.

Por fim, na última secção, apresenta-se o método de dano progressivo que se desenvolveu para prever a primeira falha final do laminado. Este é muito interessante tendo permitido previsões de falha muito próximas dos resultados experimentais em trabalhos anteriores. Este método é iterativo e encontra-se dividido em 3 passos: Análise de tensões, análise de falha utilizando o critério de Hashin 3D e degradação de propriedades, de acordo com o tipo de falha detectada. Para além dos passos referidos, existe ainda um quarto responsável pelo fim da análise que consiste na aferição da existência ou não de falha final e respectivo tipo de falha (por pressão de contacto, por tensão ou por esforços de corte).

No capítulo V da primeira parte é apresentado o resultado de uma pesquisa das normas de teste necessárias para obter as propriedades dos materiais requeridas para a aplicação dos métodos descritos neste trabalho.

A parte II deste trabalho consiste na aplicação dos métodos apresentados na parte I ao caso concreto em estudo. Os softwares Microsoft Excel, Matlab e ANSYS foram utilizados para este fim. A junta começa por ser dimensionada estimando a espessura necessária do componente e o número e características dos parafusos. De seguida foi feita uma análise global à flange em estudo determinando a força suportada pelo parafuso mais carregado. Após esta análise desenvolveu-se um modelo tridimensional de elementos finitos da zona em que se encontra o parafuso mais carregado, utilizando elementos sólidos lineares e isoparamétricos de 8 nós e uma malha gerada pelo método directo. Aplicou-se a este modelo o algoritmo de dano progressivo descrito na primeira parte. Começou por se incluir explicitamente o parafuso, anilhas, pré-tensão e a modelação dos vários contactos com fricção posteriormente

simplificado o modelo restringindo radialmente os nós da porção carregada do furo, excluindo os factores mencionados inicialmente.

Procurou-se validar o modelo utilizando o método de cálculo de tensões descrito na primeira parte, desenvolvendo um programa em Matlab para o efeito. Tal não foi possível tendo-se incluído a tentativa realizada em anexo.

Para efeitos de dimensionamento, desenvolveu-se um modelo de elementos finitos de duas dimensões da junta em causa, utilizando elementos de casca lineares de quatro nós isoparamétricos com uma espessura unitária. Através da análise de tensões efectuada com este modelo, e utilizando um método combinado programado em linguagem paramétrica, foi possível dimensionar as duas juntas concorrentes pretendidas. Este método combinado consistiu no cálculo de tensões em pontos localizados sobre uma curva característica e utilização de um critério de falha quadrático para cálculo da espessura necessária para a junta. O dimensionamento ditou que a junta solicitada à tensão necessita de pelo menos 127% das camadas e do custo de uma junta solicitada ao corte equivalente.

**Palavras-Chave** – Juntas aparafusadas em compósitos, Dimensionamento de juntas aparafusadas em compósitos, Junta à flexão, Junta ao corte.

**Outubro de 2010**