

1 Introdução

1.1. Motivação – Um pano de fundo histórico sobre fadiga e concentradores de tensão

O desenvolvimento das estradas de ferro na Europa foi marcado por acidentes causados por colisões e falhas de mecânicas, e em 1870 aconteceram mais catástrofes ferroviárias do que em qualquer outra década anterior. O primeiro acidente ferroviário registrado ocorreu na linha Liverpool-Manchester, literalmente no dia de sua abertura em 1830 [1]. Doze anos depois, no dia 8 de maio de 1842, a França estava comemorando o aniversário do rei Louis Philippe em Versalhes. Depois da festa, muitas pessoas correram para pegar o trem para retornar a Paris. O trem estava tão densamente lotado e era tão longo que duas locomotivas eram necessárias para rebocá-lo. Quando o trem passava pela cidade de Meudon, viajando em alta velocidade, o eixo da locomotiva principal quebrou e o trem descarrilou. Os vagões empilharam-se e os motores das locomotivas pegaram fogo. Pelo menos 55 passageiros morreram presos nos destroços. Esse acidente é conhecido na França como a catástrofe ferroviária de Meudon [1] e foi retratado por A. Provost em sua pintura, mostrada na figura 1.1, que está em exposição no castelo de Sceaux, na França.



Figura 1.1 – Acidente de Meudon retratado por A. Provost

Lardner [2], um pesquisador irlandês, compilou dados estatísticos sobre as viagens de trem em Paris e seus arredores durante os anos de 1834 e 1840, como mostrados na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Dados estatísticos de acidentes de trem em Paris e seus arredores [2]

| Ano | Mortos | Feridos |
|------|--------|---------|
| 1834 | 4 | 134 |
| 1835 | 12 | 214 |
| 1836 | 5 | 220 |
| 1837 | 11 | 361 |
| 1838 | 19 | 366 |
| 1839 | 9 | 384 |
| 1840 | 14 | 394 |

Stretton [3], um engenheiro do século XIX, compilou o número total de vários tipos de eixos que quebraram em serviço entre os anos de 1878 e 1885. Estes dados estão apresentados na tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Eixos quebrados em serviço entre os anos de 1878 e 1885 [2]

| Ano | Eixo de motor | | Eixo de locomotiva | Eixo de carruagem | Eixo de carroça | Eixo de vagão | Total |
|------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------|
| | <i>Crack or driving</i> | <i>Leading or trailing</i> | | | | | |
| 1878 | 266 | 21 | 19 | 3 | 221 | 10 | 540 |
| 1879 | 48 | 24 | 23 | 3 | 190 | 8 | 496 |
| 1880 | 251 | 27 | 25 | 1 | 192 | 18 | 514 |
| 1881 | 262 | 21 | 37 | 3 | 200 | 17 | 540 |
| 1882 | 242 | 22 | 32 | 2 | 140 | 13 | 451 |
| 1883 | 247 | 28 | 21 | 2 | 141 | 11 | 450 |
| 1884 | 200 | 23 | 24 | 6 | 113 | 19 | 385 |
| 1885 | 190 | 31 | 17 | 4 | 130 | 5 | 377 |

Apesar do grande número de acidentes e vítimas fatais, o sistema ferroviário era considerado seguro. É interessante comparar os registros do século XIX de Gillespie [4], professor de engenharia civil no *Union College*, Estados Unidos, sobre a segurança das estradas de ferro com o sistema de transporte atual. Gillespie defendia a segurança das viagens de trem. Ele mencionou que viajar em estradas de ferro era mais seguro do que viajar em carruagens, pois seus eixos eram menos expostos a choques violentos e, portanto, menos propensos a quebrar. Ele compilou dados estatísticos de acidentes, para confirmar esta afirmação.

Tabela 1.3 – Dados sobre acidentes de trem [4]

| | Inglaterra | Bélgica | França |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| Período | 1840 - 1845 | 1835 - 1839 | Primeira metade de 1843 |
| Passageiros transpostados | 120.000.000 | 6.609.215 | 1.889.718 |
| Feridos | 324 | 16 | 0 |
| Mortos | 66 | 15 | 0 |

Gillespie também mencionou que entre os anos de 1834 e 1840, 74 pessoas morreram e 2073 ficaram feridas em acidentes de carruagens na França. Comparando este número com os mostrados na tabela 1.3, torna-se claro que viajar de trem no século XIX era muito mais seguro do que viajar de carruagem, como é muito mais seguro hoje viajar de avião do que de carro, apesar do grande número de vítima fatais, quando um avião cai.

Os acidentes de trem que ocorreram no século XIX ajudaram a desenvolver a segurança do sistema ferroviário e a tecnologia por trás dele. Infelizmente, um número considerável de pessoas perdeu suas vidas nesses acidentes, o que obrigou as empresas ferroviárias a investigarem as suas causas e corrigir o problema. Sobre este assunto, Adams [1] mencionou que:

As causas de desastres são muito investigadas por homens engenhosos, novos equipamentos são inventados e são impostas novas regras de segurança. Como resultado, a cada ano, como consequência de uma nova catástrofe, viajar de trem tem se tornado cada vez mais seguro até o ponto de poder-se dizer que o lugar mais seguro que uma pessoa pode estar é dentro de um vagão de primeira classe em pleno movimento.

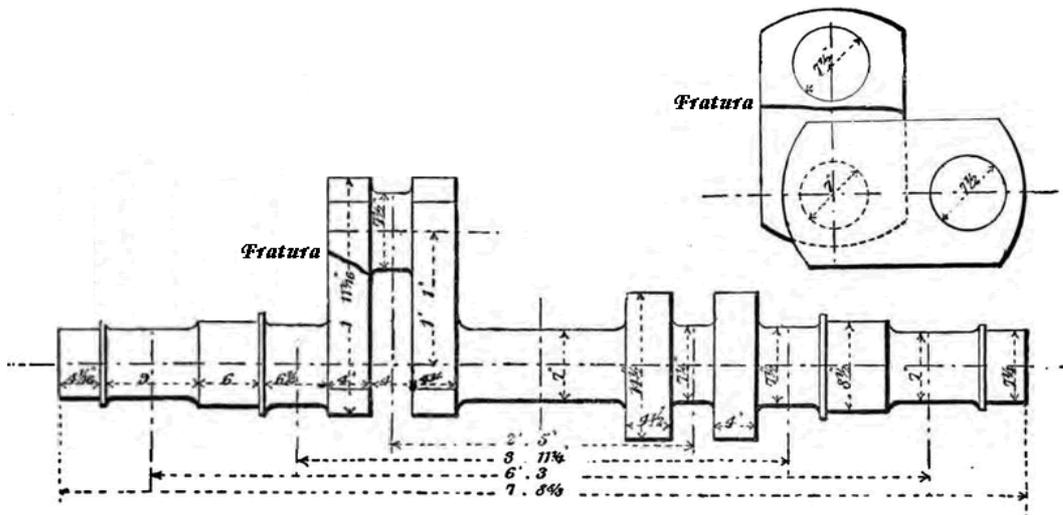
Esses acidentes resultaram num grande desenvolvimento tecnológico. O primórdio do estudo da fadiga dos materiais metálicos é comumente relacionado a essas numerosas falhas de eixos durante o desenvolvimento das estradas de ferro, especialmente no caso da catástrofe de Meudon, que é considerado um marco no desenvolvimento da fadiga dos metais, como mencionado por Smith [5]. R. Wohler, um engenheiro alemão, que gerenciava uma oficina ferroviária em Hanover durante o terceiro trimestre do século XIX, enfrentou muitos problemas relacionados a propriedades dos materiais que o levou ao desenvolvimento de seus trabalhos notórios sobre fadiga dos metais. A maior parte destes trabalhos concentra-se na ocorrência de fraturas de eixos de locomotivas de uma ferrovia

alemã. Sua posição de destaque nessa oficina lhe permitiu concretizar suas teorias e ajudou-o a reconhecer que cantos vivos devem ser removidos de componentes mecânicos através de curvas mais suaves como o filete [6].

O problema das falhas de fadiga de eixos de locomotivas tornou-se muito importante com a rápida expansão do sistema ferroviário. Um dos primeiros artigos sobre fadiga escritos em inglês foi apresentado por Rankine [7] em 1843. Rankine investigou eixos fraturados e revelou o efeito deletério da concentração de tensão, mostrando que os eixos haviam falhado devido ao crescimento progressivo de uma trinca frágil nucleada a partir de um ombro ou outra fonte de concentração de tensão, como por exemplo, um rasgo de chaveta. Ele escreveu:

A fratura parece ter iniciado como uma fissura suave de formato regular, estendendo-se ao longo de todo pescoço do eixo, penetrando aproximadamente $\frac{1}{2}$ polegada em direção ao centro do eixo. A trinca parece ter avançado gradualmente a partir da superfície em direção do centro até que a espessura de ferro, no centro, tornou-se insuficiente para suportar aos choques que o eixo era exposto.

Preocupações com concentradores de tensão e práticas de inspeção logo se tornaram muito comuns entre os engenheiros. Morin [8] mencionou que engenheiros franceses encarregados dos trens dos correios sugeriram inspeção cautelosa dos eixos depois de 70.000 km de serviço. Eles observaram que, após este período, trincas poderiam aparecer em locais onde os eixos sofriam alterações geométricas bruscas, ou seja, onde a tensão se concentra. A figura 1.2 mostra um exemplo de um eixo de manivela do motor de um trem que quebrou quando viaja a 50 km/h, resultando na morte de 24 pessoas em 1884. Este acidente ficou conhecido como o desastre de Penistone [3].



Engenheiros ferroviários do final do século XIX foram os primeiros a reconhecer o problema da fadiga. A fadiga é um tipo de falha mecânica, causada principalmente pela aplicação de cargas que variam no tempo. Sua principal característica é a quebra progressiva do componente, ou seja, é um processo gradual de nucleação e crescimento da trinca que eventualmente pode levar a ruptura do componente. Este processo de fratura pode ser causado por baixas variações nas cargas de serviço e pode ser bastante lento, levando milhares e milhares de ciclos até a ocorrência de uma falha. A falha por fadiga é muito perigosa, pois um determinado componente que está em serviço há vários anos pode falhar abruptamente sem aviso e levar a um acidente catastrófico com grande perda pessoal e material. A fadiga é um processo cumulativo e localizado. A trinca inicia-se na posição crítica do componente, onde a relação máxima entre a tensão atuante e resistência à fadiga ocorre, ou seja, onde a tensão se concentra. A resistência à fadiga depende, portanto, do material e de detalhes geométricos no local crítico [11].

Entalhes são detalhes geométricos tais como furos, ranhuras, rasgos de chapeta, ombros e roscas, inevitavelmente encontrados em componentes estruturais. Apesar de serem necessários para a sua funcionalidade, tais detalhes alteram localmente a distribuição de tensão, aumentando as tensões nominais em torno de suas raízes. A importância deste conceito é tal que, se negligenciada, pode levar a falhas mecânicas e até resultar em causalidades fatais. Desta maneira, esta dissertação pretende investigar maneiras de melhorar e otimizar estes entalhes para reduzir a concentração de tensão em componentes reais.

1.2. Organização dessa dissertação

Esta dissertação está organizada conforme descrito abaixo:

No capítulo 2, os conceitos de fadiga dos metais serão brevemente introduzidos com o estudo de dois acidentes de aéreos: Aloha vôo 243 e BOAC vôo 781, com base em relatórios governamentais oficiais. Será mostrado que dobrar uma fuselagem de avião e um clipe de papel não são tão diferentes assim, e que o fator de concentração de tensão (FCT) desempenha um papel importante em falhas de fadiga. Em seguida, o FCT será quantificado, mostrando que Inglis provou que esse fator está fortemente relacionado com quão afiado entalhe é, ou

seja, quanto menor for seu raio, maior será o FCT. Algumas maneiras simples e eficientes de melhorar a geometria e reduzir o FCT de um determinado componente mecânico serão apresentadas, apoiadas por várias publicações internacionais e modelos numéricos. Será mostrado, ainda, que é possível reduzir o FCT simplesmente suavizando-se a forma de um entalhe de filete de ombro sob tração e carregamento remoto de flexão. Um conceito muito interessante e paradoxal será explorado: é possível reduzir o FCT removendo-se material do componente.

O capítulo 3 mostra que, em ao invés de se apenas melhorar a geometria, como proposto no capítulo 2, o contorno geométrico pode ser otimizado numericamente para reduzir ainda mais o FCT. Para isso, uma vasta revisão da literatura sobre otimização geométrica será apresentada a fim de mostrar o que foi estudado sobre este assunto nas últimas décadas. Será introduzido, um algoritmo para ANSYS APDL que otimiza numericamente geometrias para reduzir o FCT. Será mostrado que é possível obter uma tensão quase constante ao longo de praticamente toda borda do entalhe, reduzindo o FCT para um valor muito baixo.

No capítulo 4, serão avaliadas, através do método de elementos finitos, as melhorias do FCT possíveis através da otimização de entalhes de raio variável para corpos-de-prova típicos de tração, flexão rotativa, flexão alternada e tração/torção. Os corpos-de-prova da ASTM serão estudados e melhorias geométricas serão propostas.

No Apêndice, o algoritmo APDL ANSYS descrito no capítulo 3 é apresentado detalhadamente.