

FADIGA EM VENTILADORES COM ACIONAMENTO DE VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO¹

José Roberto Mendes Morán²

Resumo

Normalmente a vida esperada pelos usuários de ventiladores de processo e de grande porte é de aproximadamente 20 anos para tais equipamentos. Na área de processo de pelletização, com ventiladores operando com rotação constante, este tempo de vida tem sido alcançado sem grandes dificuldades. Nos últimos tempos, com a introdução de sistemas de acionamentos com variação de rotação, novos obstáculos relacionados à fadiga tiveram que ser analisados no projeto mecânico do rotor. O uso de sistemas de variação de rotação tem crescido devido à redução dos custos destes sistemas e também pela economia de energia que estes sistemas proporcionam na operação dos ventiladores. Estruturas com solda que sejam submetidas a tensões cíclicas acima de 40 MPa certamente terão sua vida afetada quanto à fadiga. Danos de fadiga são cumulativos e irreversíveis. É importante que os usuários destes ventiladores tenham o entendimento das implicações quanto à segurança, confiabilidade e redução da vida do equipamento pelo uso da variação de rotação. O projetista do ventilador deve elaborar uma análise de fadiga que considere as variações de rotação em função do tempo e a vida esperada do equipamento. Este trabalho apresenta um resumo dos princípios atualizados de projeto de um ventilador submetido ao processo de fadiga devido à variação de rotação.

Palavras-chave: Ventiladores para pelletização; Ventiladores com rotação variável; Fadiga; Cargas cíclicas em ventiladores.

FATIGUE IN FANS WITH VARIABLE SPEED DRIVE

Abstract

Normally the life expected by the users of heavy duty process fans is approximately 20 years for those equipments. In the area of Pelletizing process, with fans operating with constant speed, this life time has been reached with no major difficulties. Over the last time, with the introduction of the variable speed drive systems, new obstacles related to fatigue had to be analysed in the rotor mechanical design. The use of variable speed system has been increasing due to the reduction of such systems and also due to the energy cost savings that these systems bring for the fan operation. Welded structures that are submitted to cyclic stress higher than 40 MPa certainly will have its life affected by the fatigue process. Fatigue damage are cumulative and irreversible. It is important that the users of these process fans understand the implications regarding the safety, reliability and reduction of equipment life with the use of variable speed system. The fan designers must carry out a fatigue analysis taking into account the speed variation with the time and the fan expected life time. This paper presents a summary of the current design principles for a fan submitted to fatigue process due to variable speed operation.

Key words: Pelletizing fans; Variable speed fans; Fatigue; Cyclic loads in fans.

¹ *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Mestre em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica, USP, Diretor Técnico Howden South América, Itatiba, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os engenheiros de ventiladores não tem tido dificuldades quanto ao projeto de rotores de ventiladores submetidos a esforços estáticos. A expressão “esforços estáticos” se refere a esforços causados por rotação constante. O aumento do uso de variadores de velocidade tem causado sérios problemas de fadiga levando algumas vezes à redução significativa da vida útil dos rotores e em outras vezes a acidentes graves. Um rotor em operação armazena um valor significativo de energia cinética, que é liberada se o rotor chega a quebrar em partes. Devido a este cenário o custo de manutenção tem crescido devido à necessidade de inspeções periódicas e, quando necessário, de recuperação dos rotores que sofreram falhas. Este trabalho discute o projeto de rotores de ventiladores centrífugos quanto ao aspecto de fadiga causada pela variação de rotação. Pelo fato de que os rotores de ventiladores centrífugos para processos de pelotização são fabricados com o processo de solda de chapas de aço de alta resistência, este trabalho está associado ao estudo de fadiga em estruturas soldadas.

2 FADIGA EM ESTRUTURAS COM SOLDA

2.1 Generalidades

Problemas de fadiga estão associados a pequenos defeitos no material, às características geométricas que levam a concentração de tensão e aos pequenos defeitos de solda que também resultam em concentração de tensão.

A aplicação de cargas cíclicas nas regiões com as características acima citadas podem fazer com que os pequenos defeitos se transformem em fissuras que podem crescer e se propagar na medida em que os ciclos vão se acumulando.

No caso de ventiladores as falhas por fadiga estão mais comumente associadas ao processo de propagação de fissuras nas regiões da solda.

A Figura 1 ilustra casos não incomuns de fissura na região da solda entre a pá e o disco traseiro de rotores submetidos a cargas cíclicas.



Figura 1. Fissuras na região da solda entre a pá e o disco lateral do rotor.

2.2 Estruturas Com Solda e Sem Solda

É necessário muito cuidado ao se utilizar dados de fadiga de materiais uma vez que existem grandes diferenças entre materiais com solda e sem solda. O motivo está no processo de iniciação e propagação de fissura. Existem dois estágios básicos no processo de fadiga: o estágio da iniciação e o estágio de propagação da fissura. Numa estrutura sem solda a maior parte do tempo no processo de fadiga é despendida na fase de iniciação da fissura. O estágio de propagação é menor. Em juntas soldadas o estágio da iniciação é muito curto e a propagação pode se iniciar rapidamente. O motivo é que existem defeitos no pé da solda já com o aspecto de microfissuras e, dependendo do nível das tensões cíclicas aplicadas, a fissura começa a se propagar com rapidez.

A Figura 2 ilustra a diferença entre as curvas S-N para componentes soldados e componentes sem solda. Nota-se que a vida à fadiga de um componente sem solda é significativamente maior do que a de um componente com junta soldada para a mesma faixa de variação de tensão. Observa-se também que existe uma faixa de variação de tensão abaixo da qual a vida à fadiga se torna infinita. Nos casos de componentes sem solda esta faixa de tensão cresce com o aumento da resistência mecânica do aço. Nos casos de juntas soldadas, esta faixa de tensão não varia com o aumento da resistência do aço e, dependendo da geometria da junção e da direção das forças, pode ser de aproximadamente 40 MPa.

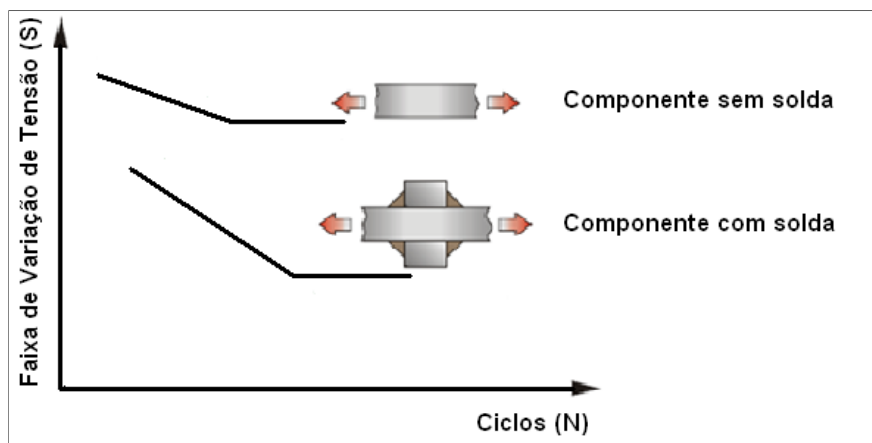


Figura 2. Ilustração sobre diferença de Curva S-N para componente com e sem solda.

As explanações acima mostram que as verificações quanto à fadiga em estruturas soldadas não podem ser feitas com dados dos materiais não submetidos à solda. Por este motivo foram desenvolvidas normas internacionais que descrevem procedimentos para o projeto de estruturas soldadas.⁽¹⁾

A presença de solda reduz a vida à fadiga de uma estrutura. A atenção para minimizar esta redução de vida está relacionada ao projeto mecânico da solda, à qualidade do processo de soldagem e também aos aspectos geométricos do projeto que precisam ser verificados com cuidado para minimizar a presença de locais com concentração de tensão que pode estimular a propagação de fissuras.

3 FADIGA NOS ROTORES DE VENTILADORES

Fissuras de fadiga podem se propagar insidiosamente sem avisos externos de existe um problema. Em alguns casos fissuras significantes podem ser desenvolvidas sem

que ocorra uma distorção no rotor que causasse sinais de desbalanceamento de forças. Em outros casos sinais de desbalanceamento podem ocorrer e o usuário toma a iniciativa de promover um balanceamento no rotor e colocá-lo novamente em operação sem se dar conta da existência de fissuras. Inspeções periódicas evitam as situações citadas e, caso fissuras sejam encontradas, elas podem ser cuidadosamente reparadas. Nestes casos uma análise das causas do aparecimento das fissuras precisa ser efetuada.

O procedimento de solda de massa de balanceamento precisa ser feito de modo apropriado, pois, do contrário, pode também ser causa de propagação de fissuras devido à fadiga como mostrado na Figura 3.

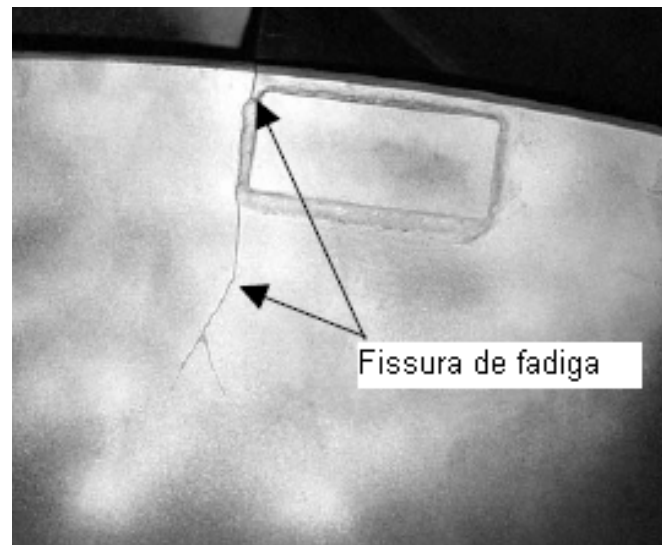


Figura 3. Fissura na solda da massa de balanceamento.

O que é importante é que qualquer fissura seja encontrada antes que atinja um tamanho crítico que, se excedido, pode resultar em fratura rápida com consequências que podem ser catastróficas.

Se fosse possível, todos os rotores deveriam ter uma vida infinita em relação à fadiga. Contudo este objetivo é raramente alcançável. A razão principal é que os rotores de ventiladores são sujeitos a cargas centrífugas significantes que resultam em tensões nominais que normalmente se situam entre 60% a 80% do limite de escoamento do material utilizado. Por exemplo, um rotor fabricado com chapa de aço USI SAC 350, que possui um limite de escoamento à temperatura ambiente de 350 MPa, pode ter tensões da ordem de 280 MPa. A norma BS 7608:1993⁽¹⁾ estabelece o limite de fadiga para a classe de solda apropriada como sendo de 40 MPa. Cada vez que o ventilador é submetido a partida e parada o rotor é submetido a ciclos de 100% de variação de tensão, isto é, 280 MPa, bem acima do valor de 40 MPa. Portanto este rotor não terá vida infinita. Caso o mesmo ventilador seja submetido a variações de rotação entre a rotação máxima e, por exemplo, 85% da rotação máxima, as tensões - que variam com o quadrado da rotação - vão variar entre 280 MPa e 202 MPa. A faixa de variação de tensão será de 78 MPa. Este valor também é superior a 40 MPa. Assim, só por esta variação da rotação a vida do rotor também não será infinita quanto à fadiga.

Durante a fase de projeto é necessário se conhecer a quantidade de partidas e paradas e os ciclos de variação de rotação ao longo da vida do rotor. Com estes dados é possível verificar se o rotor poderá tolerar as consequentes variações de tensão ao longo da vida do rotor.

4 ESTIMATIVA DA VIDA QUANTO À FADIGA

A regra de Palmgren-Miners de danos cumulativos é a mais comumente utilizada para se estimar a vida à fadiga quando existem diferentes ciclos com diferentes faixas de variação de tensão. Ela estabelece que:

$$n_1/N_1 + n_2/N_2 + n_3/N_3 + \dots = \sum (n_i/N_i) = 1 \text{ quando ocorre a falha.}$$

n é a quantidade de ocorrências para uma determinada variação de tensão e N é a vida à fadiga para aquela variação de tensão.

Para o uso desta regra é necessário que o projetista identifique o elemento com o maior nível de tensão nas regiões com presença de solda. O Método de Elementos Finitos é fundamental na determinação das tensões. Os dados sobre a variação de rotação e a frequência de operação em cada rotação devem ser obtidos junto ao cliente com a maior precisão possível.

Um exemplo da regra de Palmgren-Miners está mostrado a seguir. As variações de rotação ao longo de cada dia estão mostradas na Figura 4.

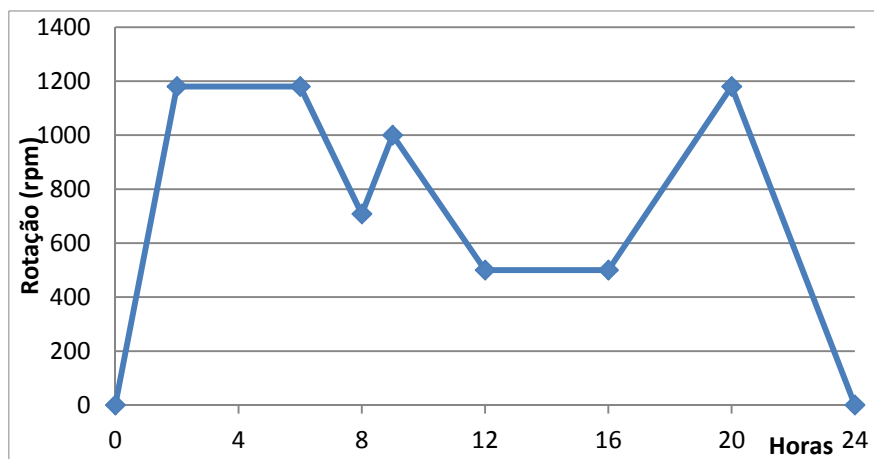


Figura 4. Perfil de variação de rotação para o exemplo em análise.

A rotação máxima do ventilador é de 1180 rpm e a máxima tensão identificada no estudo de tensões é de 450 MPa na rotação máxima. As tensões nas outras rotações são calculadas considerando-se que elas variam com o quadrado da rotação. A vida à fadiga para cada faixa de variação de tensão foi calculada para uma classe de solda F2 e com probabilidade de 97,7% de acerto conforme norma BS 7608:1993.⁽¹⁾ Os resultados estão mostrados na Tabela 1. A contagem de ciclos foi feita pelo método do reservatório que está descrito na BS acima mencionada.

Tabela 1. Resumo dos dados de fadiga

Perfil	Varição de rotação (rpm)	Número de vezes (n)	Tensão na rot. maior (N/mm ²)	Tensão na rot. menor (N/mm ²)	Faixa de tensão (N/mm ²)	Número de ciclos p fadiga na faixa de tensão (N)
1	0 a 1180	1	450	0	450	4719
2	1180 a 500	1	450	81	369	8558
3	1000 a 708	1	450	323	127	209922

Tabela construída com base no estudo de tensões do rotor. O número de ciclos foi calculado com base na BS 7608.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 3.34E-04$$

A vida prevista para o rotor é de $1/3.34E-04 = 2994$ dias.

Notar que as faixas de variação de tensão mais elevadas são as que mais reduzem a vida à fadiga.

5 CONSIDERAÇÕES QUANTO AO PROJETO, FABRICAÇÃO E INSPEÇÕES

O uso qualificado do Método de Elementos Finitos é mandatório para o estudo das tensões.

O projeto do rotor deve ser tal a se evitar geometrias que causem concentrações de tensões.

A fabricação de rotores envolve corte de chapas, soldas e, algumas vezes, usinagem. Todas estas operações causam micro fissuras e um procedimento de inspeção rigoroso é imprescindível durante as fases da manufatura. Do mesmo modo, soldas temporárias necessitam ser removidas com procedimentos adequados com inspeção subsequente da região afetada.

Massas de balanceamento soldadas de modo incompetente tem causado também propagação de fissuras.

Mesmo com todo o cuidado nas fases de projeto, fabricação e operação do ventilador, é altamente recomendável que inspeções periódicas sejam efetuadas nas soldas do rotor. Caso alguma fissura seja identificada, ela deve ser avaliada pelo projetista da máquina e, muitas vezes, um reparo competente tem que ser providenciado.

6 CONCLUSÕES

O uso de sistemas de acionamento com variação de rotação para ventiladores é muito atraente pelo fato de que proporciona significativa economia de energia. No entanto estas variações de rotação, e/ou partidas e paradas frequentes, apresentam sérios riscos de acidentes que podem ser catastróficos.

Atualmente existem métodos reconhecidamente qualificados para a elaboração de estudos de fadiga no projeto mecânico de ventiladores. É fundamental que a análise de fadiga seja efetuada para os casos onde haverá variação de rotação e/ou partidas e paradas frequentes. Para isto, se faz necessário que o projetista tenha disponível, com a maior precisão possível, os dados de variação de rotação com o tempo para o ventilador em análise.

As consequências de danos de fadiga podem ser minimizadas através de projeto e fabricação qualificados e também de rigorosas inspeções periódicas nas regiões de solda do rotor.

Agradecimentos

Agradeço aos colegas da Howden South America pela contribuição no elaboração deste trabalho e também à Howden Technology pelo suporte que tem proporcionado para o desenvolvimento tecnológico quanto ao projeto estrutural de ventiladores utilizados em processos de alta exigência de engenharia.

REFERÊNCIAS

- 1 British Standard: BS 7608:1993 – Code of Practice for Fatigue design and assessment of steel structures.