

1. Objetivo

Realizar o planejamento dos testes de vida acelerados, tendo como produtos os roletes de correias transportadoras de minério de ferro. Os testes de vida acelerados têm por finalidade determinar a vida útil destes roletes em condições normais de uso.

2. Introdução

A confiabilidade é um aspecto importante que aparece nos requisitos da qualidade de produtos, estando associada à capacidade dos mesmos de “funcionarem de maneira satisfatória durante um longo período de tempo”(Freitas and Colosimo, 1997). Uma das ferramentas utilizadas para medir a confiabilidade de produtos é o Teste de Vida Acelerado, no qual estes são submetidos a testes em condições diferentes das condições de uso, e permitem que a falha ocorra mais rapidamente. Para garantir a validade das informações obtidas nestes testes é necessário cuidado no planejamento e na realização dos experimentos, sendo necessária atenção para os aspectos práticos, tais como normas técnicas de engenharia e disponibilidade de máquinas, e condições ótimas, levando sempre em consideração critérios estatísticos.

No presente trabalho é realizado o planejamento dos testes de vida acelerados para determinação do tempo até a ocorrência de falhas de roletes de correias transportadoras de minério de ferro. Os roletes são considerados elementos-chave das correias transportadoras de minério de ferro (Figura 1 (a)), por serem responsáveis pela movimentação das correias e pelo seu funcionamento eficiente. Os roletes (Figura 1 (b)) são cilindros metálicos montados sobre eixos circulares fixos, por meio de mancais de rolamentos. Os defeitos em roletes são geralmente causados por falhas nos rolamentos, acúmulo de material (como minério de ferro, poeira, entre outros) e desgastes em final de vida útil (Nascimento et al., 2006).



Figura 1. Em (a) Roletes em correias transportadoras, em (b) detalhe dos roletes.

Para realização dos testes acelerados nos roletes é utilizada uma bancada, vista na Figura 2, desenvolvida pela parceria do Grupo de Dinâmica de Rotores (GDR), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, com empresa de mineração. Para reduzir

o tempo até a falha dos roletes, a bancada projetada permite operá-los em velocidades de rotação e cargas mais elevadas do que aquelas normalmente experimentadas em campo.

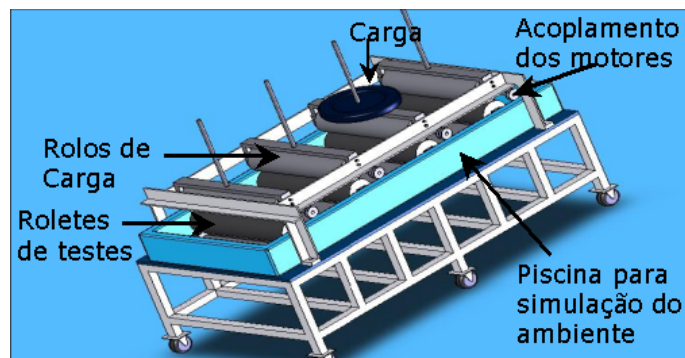


Figura 2. Bancada de Ensaio de Roletes.

O planejamento dos testes de vida acelerados é importante neste estudo por garantir a confiabilidade dos resultados obtidos para vida útil de roletes, dados estes indisponíveis na literatura e na norma padronização de roletes de correias transportadoras, a ABNT NBR 6678, de janeiro de 1988.

3. Revisão Bibliográfica de testes de vida e testes acelerados

O sucesso de determinado experimento depende do planejamento adequado dos testes de vida acelerados, sendo necessárias especificações corretas: das condições de uso, da forma de teste e do planejamento experimental. O planejamento e realização dos testes acelerados deve ser desenvolvido de forma conjunta, por engenheiros e estatísticos (Freitas and Colosimo, 1997).

A forma de teste consiste na determinação de (Freitas and Colosimo, 1997):

1. **Medida de performance:** variável que se deseja obter como resposta do teste de vida acelerado.
2. **Condições de teste:** é desejável que as condições de teste sejam ao máximo similares às condições reais de uso.
3. **Variável de estresse:** quantas e quais são a(s) variável(is) a ser(em) utilizada(s) para acelerar a vida do produto.
4. **Forma de aplicação da carga de estresse:** a aplicação do estresse pode ser constante, em escada, progressiva, cíclica ou aleatória.
5. **Mecanismo de censura:** o mecanismo pode ser do tipo I (por tempo), do tipo II (por falha) ou aleatório.

Existem três propostas de planos experimentais: Plano Tradicional, com níveis de estresse igualmente espaçados e mesmo número de unidades para cada nível; Planos Ótimos, dois níveis de estresse com alocações desiguais de unidades; e, Plano de Compromisso, três níveis de estresse (alto, intermediário e baixo). O plano experimental consiste na determinação de (Freitas and Colosimo, 1997):

1. **Número de níveis da variável de estresse:** quantos níveis de estresse serão utilizados. O número de níveis não deve ser pequeno (<3), pois torna difícil avaliar o modelo utilizado e conseqüentemente fazer a extrapolação para as condições de uso. O número não deve ser grande, pois se torna um complicador em termos práticos e inviabiliza os cálculos para a escolha de um plano ótimo.
2. **Proporção de alocação em cada nível:** dado o número de níveis de estresse e o tamanho da amostra, deve-se definir quantas amostras serão alocadas em cada nível. Os níveis baixo e intermediário são escolhidos de forma a minimizar a variância assintótica do estimador.
3. **Níveis de estresse:** quais níveis serão utilizados. Sendo que o menor nível de estresse precisa estar próximo da condição normal de uso, e o maior nível não pode ser escolhido de forma que ocorram falhas que não ocorreriam normalmente, tornando a extrapolação imprecisa. Sendo o segundo nível um valor intermediário.
4. **Tamanho da amostra:** quantas unidades serão submetidas a teste. O livro (Freitas and Colosimo, 1997) fornece algumas formas para cálculos de tamanhos de amostras para dois tipos de testes: testes acelerados e testes de vida.
 - Testes acelerados: cálculo para estimação dos percentis (t_p) da distribuição do tempo até a falha (Equação 1).

$$n = \left[\frac{z_\gamma \sigma}{\ln(r)} \right]^2 V \quad (1)$$

onde, z_γ é o $100\gamma\%$ percentil da distribuição normal padrão sendo γ a probabilidade que indica o nível de confiança desejado; σ é o valor assumido para o parâmetro de escala; $r = m+1$, onde $m \times 100\%$ é o erro especificado para a estimativa do percentil; e, V é a variância assintótica da estimativa do percentil de interesse, multiplicada por $n\sigma^2$. Para obtenção de V , são necessários valores de: percentil($100P\%$) da distribuição do tempo de falha do produto que é de maior interesse para o estudo (P); probabilidade de falha no nível alto de estresse durante o período de teste (p_a); e, probabilidade de falha nas condições de projeto durante o período de duração do teste (p_o).

- Testes de vida: tamanho da amostra para estimação da taxa de falha ($\lambda(t)$) em um determinado tempo (Equação 2) e estimação dos percentis (t_p) da distribuição do tempo até a falha para a Distribuição Weibull (Equação 3).

$$n = \left[\frac{z_\gamma}{\ln(r)} \right]^2 V(\varepsilon_e; \varepsilon_c) \quad (2)$$

onde, $V(\varepsilon_e; \varepsilon_c)$ é o fator de variância.

$$n = \left[\frac{z_\gamma}{\delta \ln(r)} \right]^2 V \quad (3)$$

onde, δ é o valor do parâmetro de forma da Distribuição Weibull.

A Distribuição Weibull descreve adequadamente a vida de mancais (Freitas and Colosimo, 1997), sendo a aceleração por alta taxa de uso a mais indicada para estes produtos, de tal forma que a velocidade de rotação dos mancais pode ser aumentada em três ou mais vezes para testes de vida acelerados (Escobar and Meeker, 2006).

Ainda, de acordo com Colosimo e Freitas (1997), deve-se atentar durante os testes para outras variáveis, tais como:

- Experimentais: são controláveis e são investigadas com o objetivo de estudar seus efeitos.
- Fixas: devem ser mantidas constantes durante o teste (mesmo lote, mesmo operador, etc).
- Não controláveis mas observáveis: seus valores devem ser anotados para que se aprenda a respeito do seu efeito.
- Não controláveis e não observáveis: podem se confundir com o efeito do estresse, podendo-se utilizar a aleatorização.

4. Condições de uso e de projeto

As condições de uso dos roletes na mina são:

- Carga: 160 Kg
- Velocidade: 600 rpm

Nestas situações os fornecedores garantem 15.000 horas (~21 meses) de funcionamento. Durante o projeto da bancada foram propostos os seguintes valores para carga e velocidade.

- Carga: 260 Kg
- Velocidade: 0 a 1600 rpm

A velocidade máxima é de 1600 rpm, afinal a velocidade nominal do motor é 3380 rpm, e como a relação de polias foi projetada para reduzir aproximadamente à metade a velocidade para os roletes, devido ao processo de aquecimento do motor. Espera-se que o aumento de carga e velocidade reduzida a vida útil dos roletes. Para calcular essa redução, de forma analítica, pode-se utilizar conhecimentos físicos do processo. Sabe-se que o desgaste em discos são função da pressão exercida sobre eles (P) e da velocidade linear aplicada (v). A pressão (P) pode ser reescrita como função da força aplicada (F) e da área de contato (A), e a velocidade linear como função da velocidade angular (ω) e do raio do rolete (r), como visto na Equação 4.

$$Desgaste \cong P * v \cong \frac{F}{A} * \omega r \quad (4)$$

A área (A) e o raio (r) é igual em todos os roletes, podendo ser desconsiderado no cálculo teórico do modelo determinístico da resposta da relação entre o aumento da velocidade e a redução no tempo de vida dos roletes. Este modelo é calculado por meio da física do processo, não sendo capaz de explicar a variabilidade para a variável resposta em um mesmo nível de estresse. Tornando-se necessário o acréscimo do componente probabilístico, afinal em cada nível de estresse os tempos de falha dos roletes seguem uma certa distribuição de probabilidade (Freitas and Colosimo, 1997).

Os valores obtidos para o cálculo do modelo físico do processo são vistos na Figura 3. Neste modelo considera-se uma utilização similar à da mina, ou seja, 24 horas por dia durante 30 dias por mês, o que é viável de ser realizado na bancada. Assim, obtém-se uma estimativa de:

- 1000 rpm : 7 meses e 21 dias (~ 5540 horas)
- 1300 rpm : 5 meses e 28 dias (~ 4260 horas)
- 1600 rpm : 4 meses e 24 dias (~ 3460 horas)

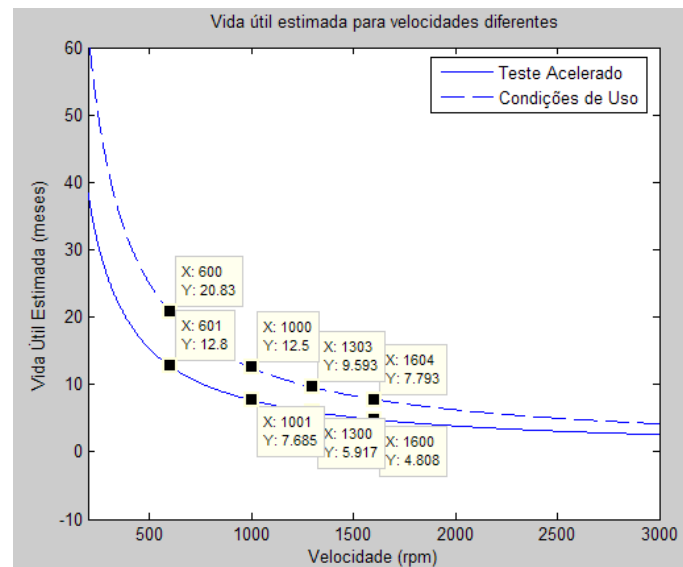


Figura 3. Resposta teórica para a relação Estresse-Resposta.

5. Planejamento dos Testes Acelerados

5.1. Forma do Teste

1. Medida de performance:

O percentil 5% ($t_{0,05}$) é uma medida de performance interessante, afinal determina o tempo no qual se espera que 5% dos roletes colocados em operação venham a falhar, havendo a possibilidade de danos nas correias transportadoras caso não haja substituição destes componentes.

2. Condições de teste:

A bancada foi projetado para que o teste acelerado se aproxime ao máximo das condições reais de uso. Para simulação do ambiente de operação dos roletes, foram propostos: um sistema de gotejamento de uma solução com água e minério de ferro nas extremidades dos eixos dos roletes e o revestimento dos rolos de carga com material polimérico, similar ao utilizado em correias.

Devido a impossibilidade de controlar todas as fontes de variabilidade envolvidas no experimento, tais como as de variáveis não controláveis e não observáveis, foi

proposta a alternativa de testes aleatórios, onde: serão retirados dois dados e a numeração indicará qual dos fornecedor e qual nível de velocidade será utilizado em cada rolete.

3. Variável de estresse:

Quantas? 1 variável de estresse

Qual? Velocidade

obs: A carga também foi alterada de 160 Kg para 260 kg, mas é mantida constante para todos os roletes, não sendo considerada variável de estresse.

4. Forma de aplicação do estresse:

Constante (Figura 4), pois é mais próxima da realidade e permite que o teste seja mais simples.

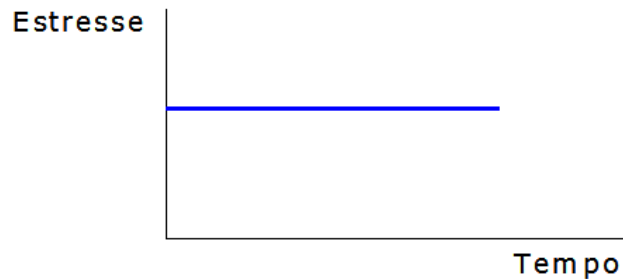


Figura 4. Forma de aplicação de carga de estresse.

5. Mecanismo de Censura:

Tipo I (por tempo), uma vez que temos uma estimativa do tempo de falha para cada nível de estresse. Além disso, este tipo de censura torna possível prever o término dos testes.

5.2. Planejamento do Experimento

Para o planejamento experimental serão utilizados os Plano de Compromisso.

1. Número de níveis de estresse:

Quantos? 3 níveis

2. Proporção de alocação em cada nível:

Plano de Compromisso: Baixo (4) : Intermediário (2) : Alto (1), como indicado pelo Plano de Compromisso.

3. Determinação dos níveis de estresse:

Baixo: 1000 rpm

Intermediário: 1300 rpm

Alto: 1600 rpm

A velocidade mais baixa de 1000 rpm foi selecionada de forma que seja próxima à velocidade nas condições normais de uso (600 rpm), mas permita acelerar a vida dos roletes. O valor máximo de 1600 rpm foi escolhido devido a limitações mecânicas, como visto na Seção 4. Os níveis de estresse são vistos na Figura 5.

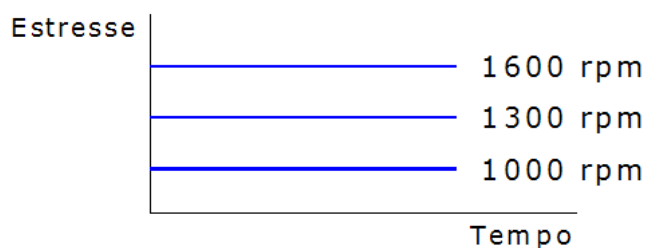


Figura 5. Níveis de estresse.

4. Tamanho da amostra:

Deseja-se calcular o tamanho da amostra em testes acelerados necessária para estimar o percentil de 5% da distribuição do tempo até a falha para as condições de uso com a probabilidade γ de 95%, e o mínimo erro cometido (m).

Como visto, estão sendo utilizados três níveis de estresse, sendo o nível mais alto 1600 rpm. Está sendo utilizada a Distribuição Weibull para os tempos de falha nos níveis de estresse, e a alocação de acordo com o Plano de compromisso, que é de 4:2:1. Foram estabelecidos os seguintes valores para cálculo do tamanho da amostra, de acordo com a Equação 1:

- 18 meses de testes : disponibilidade para os primeiros resultados com a bancada
- $\gamma = 95\% \therefore z_\gamma = 1,96$
- $\sigma = 1/\delta = 1/1,5$ ($\delta > 1$ quando há efeito gradual de envelhecimento)
- $t_{0,05}$: foi escolhido um percentil baixo para evitar danos nas correias
- $p_0 = 0,01$
- $p_a = 0,80$
- $r = 1,1$ a $1,5$ (5 a 50% de erro) o percentil encontrado terá uma estimativa entre $(t_{0,05}/r)$ e $(t_{0,05} \cdot r)$, ou seja, o aumento de r aumenta a imprecisão da medida de performance
- $V = 61,83$ (para o Plano de Compromisso)

O tamanho da amostra, neste caso varia de acordo com o erro, como visto na Figura 6, e mais detalhadamente na Tabela 1, na qual pode ser visualizada a alocação nos níveis de estresse de acordo com o Plano de Compromisso. Como visto, para valores menores de erro, o tamanho da amostra cresce significativamente, ou seja, são necessários tamanhos grandes de amostra quando se deseja obter maior

precisão na estimativa. O Plano de Compromisso calculado para um erro de 40% de erro é visto na Tabela 2. Os valores dos níveis baixo (p_b) e do nível médio (p_M) vistos nesta tabela foram adquiridos na Tabela B.3c do Anexo B do livro (Freitas and Colosimo, 1997).

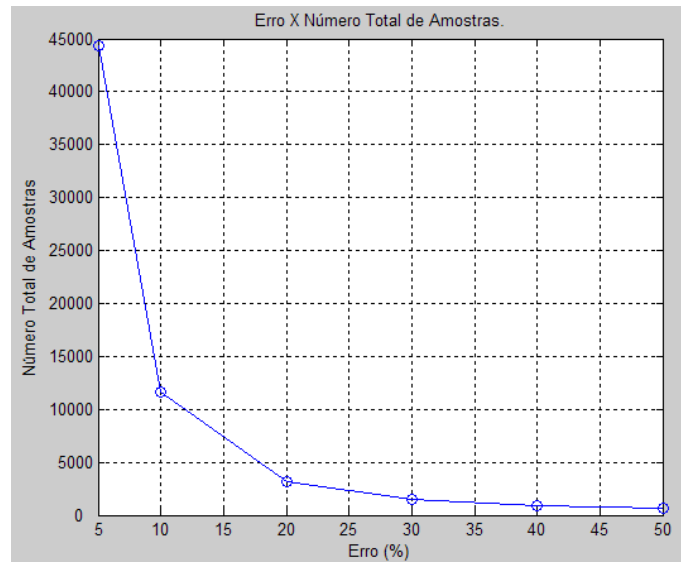


Figura 6. Variação do número de amostras com aumento do erro.

Tabela 1. Resultado do número de amostras para valores variados de erro.

Erro	Tamanho da Amostra	4	2	1
5%	44345	25340	12670	6335
10%	11621	6640	3320	1660
20%	3176	1815	907	454
30%	1534	876	438	219
40%	932	533	266	133
50%	642	367	183	92

Tabela 2. Plano de Compromisso para 40% de erro.

Velocidade(rpm)	Nº Alocado	Prob de falha	Nº estimado de falhas
600	-	1% (p_0)	-
1000	533	6,9% (p_b)	57
1300	266	28,8% (p_M)	119
1600	133	80,0% (p_a)	166

Para que seja viável realizar os testes com o tamanho de amostra calculado, seria necessário pensar em dois fatores: aumento do tempo de teste ou construção de

mais bancadas, que permitam a realização de testes simultâneos com um número maior de roletes. Afinal, com a estrutura da bancada, seria impossível, mesmo aceitando um erro de 40%, ensaiarmos 932 roletes em 18 meses, para garantirmos a confiabilidade do resultado.

Levando em consideração os dados determinísticos, há possibilidade de realizar testes em aproximadamente 12 roletes no período de 18 meses, afinal pela estimativa apresentada na Figura 3, pode-se realizar um ensaio com cada velocidade utilizando quatro roletes, levaria 18 meses. Esta diminuição no número de roletes ocasionaria uma diminuição da confiança dos resultados de 95% para aproximadamente 17,42%, considerando o erro de 40%, sendo reduzida a 4,78% caso admitíssemos um erro apenas de 10%.

Como que só levou-se em consideração valores determinísticos para estimar o número de falhas em 18 meses, ou seja, vários roletes podem falhar antes ou após o previsto, de acordo com uma distribuição de probabilidade,

Considerando um fator estatístico, ou seja, vários roletes podem falhar antes ou após o previsto, de acordo com uma distribuição de probabilidade, pode-se prever um aumento no número de roletes a serem testados em 18 meses, e verificar o aumento na probabilidade. Como visto na Figura 7, se for possível ensaiar 20 roletes, pode-se obter probabilidade de 22,82%. Este valor só aumenta com o aumento de tamanho de amostra, chegando a 47,78% no caso de testarmos 100 roletes, e 95% para 932 roletes.

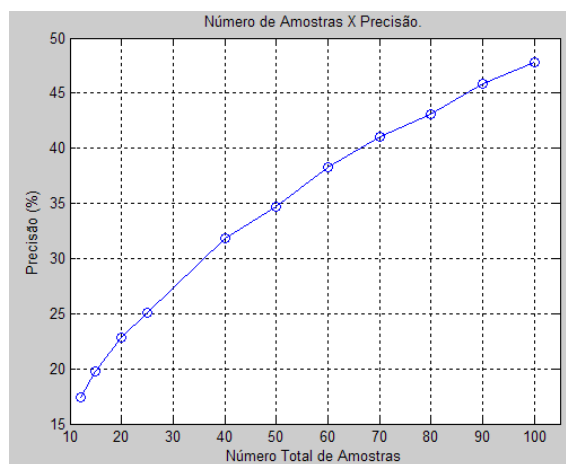


Figura 7. Variação da precisão com aumento do tamanho da amostra.

6. Considerações Finais

Neste trabalho foi realizado o planejamento de testes acelerados de roletes de correias transportadoras de minério de ferro. Para a elaboração do plano de testes foram necessárias informações técnicas sobre os roletes e obtenção das condições normais de uso dos mesmos em correias transportadoras. Como não foram realizadas simulações de

dados preliminares, todas informações técnicas foram obtidas com fornecedores e com o cliente.

Constatou-se a inviabilidade de se obter resultados precisos para a extrapolação dos dados de testes de vida acelerados para as condições de uso se não houver construção de mais bancadas ou aumento no tempo total do teste acelerado, devido ao grande tamanho de amostra necessário.

O planejamento experimental é muito importante para garantia de testes confiáveis, mas precisa de ser realizado em parceria entre engenheiros e estatísticos.

Referências

Escobar, L. A. and Meeker, W. Q. A review of accelerated test models. *Statistical Science*, 21(4):552–557, 2006.

Freitas, M. A. and Colosimo, E. A. *Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados*, volume 12. Escola de Engenharia da UFMG - Belo Horizonte, 1 edition, 1997.

Nascimento, G. H., Pimenta, A. S., de Faria, M. T. C., and Colosimo, E. A. Procedimentos para avaliação de desempenho de roletes em correias transportadoras utilizando uma bancada de testes em condições de operação. *61º CONGRESSO ANUAL DA ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, Julho 2006.