

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	2
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Comentários Preliminares	2
1.2 Chapa de Desgaste	2
1.3 Parafusos de Fixação das Chapas	3
1.4 Modelo de Dimensionamento dos Parafusos	3
1.5 Força de Aperto ou Pré-Tração	4
1.6 Características do Parafuso	4
1.7 Objetivo do Trabalho	5
CAPÍTULO 2	6
2 DISPOSITIVO DE TESTE.....	6
2.1 Comentários Preliminares	6
2.2 Componentes do Dispositivo	8
CAPÍTULO 3	12
3 MODELO MATEMÁTICO	12
3.1 Introdução	12
3.2 Equacionamento das forças da rosca sobre o parafuso	12
CAPÍTULO 4	16
4 TESTES EXPERIMENTAIS.....	16
4.1 Levantamento da constante “K” das molas	16
CAPÍTULO 5	18
5 TESTES REALIZADOS	18
5.1 Levantamento do Coeficiente de Atrito	18
CAPÍTULO 6	20
6 Conclusão.....	20
6.1 Dificuldades funcionais	20
6.2 Crítica dos Resultados.....	21
7 BIBLIOGRAFIA	22

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Preliminares

A utilização de ventiladores industriais é imprescindível no contexto das atividades siderúrgicas, especialmente no que tange o processo de pelotização, tanto por razões operacionais quanto econômicas. Os ventiladores são responsáveis pela circulação e recirculação de fluido aquecido nas diversas câmaras de que compõem a usina. No caso da Usina de Pelotização 1 da SAMARCO, são utilizados ventiladores centrífugo radiais, devido a quantidade apreciável de perda de carga existente ao longo da linha de escoamento, por conta dos particulados.

Os ventiladores centrífugos radiais são constituídos por diversos componentes como, por exemplo, a árvore, seus mancais, o rotor e seus acessórios de proteção e montagem. Tais componentes apresentam um histórico de manutenção no qual alguns problemas sérios já foram detectados por ação da alta temperatura do fluido circulante.

1.2 Chapa de Desgaste

As chapas de desgaste se incluem entre os principais acessórios do rotor dos ventiladores das Usinas de Pelotização. Protegem as pás dos choques originados pelas micro-partículas de minério suspensas no ar que escoam pelas câmaras de queima e secagem.

As condições de trabalho das pás são severas: além da sua função precípua de suportar choques de particulados em alta velocidade que desgastariam e corroeriam as pás do ventilador, atuam também sob apreciável esforço centrífugo, em condições de temperatura bastante elevadas. Devido a isto, há

um histórico de freqüentes falhas nesse componente, no qual constam a fragmentação e o desprendimento de partes das chapas, produzindo danos aos demais componentes do ventilador e ao processo produtivo.

O exame da eficiência das chapas de desgaste inclui necessariamente a análise da capacidade de fixação destas chapas ao rotor. Alguns parafusos de fixação destas placas podem ser colapsados por força das severas condições de operação, induzindo a estados anormais de deformação.

1.3 Parafusos de Fixação das Chapas

Em linhas gerais, tais parafusos atuam como elementos básicos para garantir a fixação das chapas nas pás dos rotores dos ventiladores, evitando seu desprendimento por conta do elevado esforço centrífugo proveniente da rotação experimentada em operação.

Existe também o impacto dos gases em sua superfície. No entanto, considera-se que este segundo esforço tem conseqüências estruturais reduzidas pelo fato do parafuso ter a cabeça escareada. Os maiores danos decorrentes por ação de desgaste e corrosão atacam a chapa de desgaste, pelo que um revestimento especial tem sido aplicado em sua superfície.

O dimensionamento e especificação dos parafusos devem ser feitos, então, objetivando garantir o acoplamento das chapas por sobre as pás, vencendo a tendência de deslizamento naturalmente produzida pela rotação.

1.4 Modelo de Dimensionamento dos Parafusos

Os parafusos poderiam ser dimensionados para resistir ao cisalhamento imposto pela tendência de deslizamento; no entanto, o contato entre as superfícies das chapas e das pás gera uma força de atrito, também capaz de suportar o esforço centrífugo.

É comum no projeto de parafusos conceber uma compressão suficiente nos elementos unidos que resista isoladamente ao esforço cisalhante. Assim sendo, os parafusos deveriam ser dimensionados para serem apertados com uma carga de montagem de magnitude adequada para promover aderência suficiente entre as superfícies de contato, de tal modo que a força de atrito nestas superfícies suportasse isoladamente o esforço centrífugo.

A capacidade dos parafusos em resistir ao cisalhamento seria uma espécie de reserva de resistência do conjunto.

1.5 Força de Aperto ou Pré-Tração

O fator que dá estabilidade em operação aos parafusos de fixação é a pré-carga ou carga de aperto.

Esta carga garante que, em operação, os elementos de junta ou elementos unidos continuarão a estar comprimidos, apesar das forças de trabalho tentarem separá-los, tracionando os parafusos. É fácil imaginar esse modelo, considerando o que acontece nos vasos de pressão. As pressões internas tendem a separar as tampas, janelas e portas de visita, tracionando os parafusos de fixação. No entanto, se eles forem bem apertados, serão tracionados suficientemente, sem com isso descomprimir os elementos unidos.

No caso de treliças, mão-francesas e outras estruturas de apoio, a carga de aperto garante também estabilidade.

Para se proceder ao cálculo da força de aperto necessária, é preciso conhecer bem as propriedades geométricas e físicas dos elementos de junta e dos parafusos. O valor do coeficiente de atrito também faz parte deste contexto.

1.6 Características do Parafuso

O parafuso é totalmente roscado e fixado à chapa de desgaste por porca de extremidade, apertada contra a parte inferior da pá do ventilador. A cabeça do parafuso é escareada (em forma de cunha), sem fenda e possui uma saliência de fixação - um dente de chaveta - para evitar seu deslizamento, facilitar o

aperto da porca e garantir a imposição da correta pré-carga no parafuso. Evidentemente, os orifícios da chapa de desgaste também são escareados e confeccionados com rasgo de chaveta para assentar o dente da cabeça do parafuso. Alguns dados oferecidos pela engenharia de manutenção da SAMARCO são os seguintes:

Material do parafuso: ASTM A193-B7= 700 MPa

Diâmetro do parafuso: 16 mm = 0,016 m

Comprimento do parafuso: 50 mm = 0,05 m

Material da chapa de desgaste: CREUSABRO 8000

Diâmetro do furo da chapa: 20 mm = 0,02 m

Espessura da chapa: 5/16 " = 7,937 mm = 0,007937 m

Área aproximada da chapa de desgaste: 0,81 m²

Quantidade de orifícios na chapa: 42

Frequência angular do rotor em operação: 900 rpm

1.7 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste projeto de graduação é levantar o valor do coeficiente de atrito entre a rosca e os filetes da porca, por ocasião da aplicação da força de aperto, de modo a melhor avaliar o valor do torque a ser aplicado na montagem desses parafusos.

Para cumprir tal propósito, foi construído um equipamento simples de teste, no qual os parafusos selecionados pela empresa SAMARCO para fixar a chapa de desgaste à pá do rotor do ventilador centrífugo radial foram apertados contra molas de propriedades conhecidas. Para se apertar as molas, gera-se um torque de aperto, que pode ser medido através de chave torciométrica. Este valor de torque obtido na experiência é comparado com o valor de torque estabelecido pela modelagem analítica. Nesta última, as expressões são funções do coeficiente de atrito. Pela igualdade dos valores experimentais com o analítico, retira-se o valor do coeficiente de atrito.

CAPÍTULO 2

2 DISPOSITIVO DE TESTE

2.1 Comentários Preliminares

Para se levantar o valor do coeficiente de atrito foi necessário conceber um dispositivo de teste no qual a porca de fixação do parafuso fosse gradativamente apertada e o valor do torque aplicado fosse medido através de um torquímetro ou chave torciométrica.

A literatura especializada, particularmente os livros de Elementos de Máquinas, apresenta fórmulas nas quais consegue-se relacionar o valor do torque em função do avanço axial do parafuso e do coeficiente de atrito. Estas fórmulas são detalhadas no capítulo 3, apresentado a seguir.

As características geométricas da rosca do parafuso foram levantadas no laboratório de metrologia da UFES e confirmadas pelos técnicos da SAMARCO. Para se avaliar o valor aproximado do coeficiente de atrito seria necessário, entretanto, se conhecer as propriedades físicas dos elementos de junta, no caso, da chapa de desgaste e da pá. Por conta de dificuldades operacionais, optou-se por submeter o parafuso e a porca em condições de fixação num aparato experimental mais simples, que pudesse evitar a experiência no campo, sendo levada a efeito em laboratório. Assim, foi construído um equipamento que fosse capaz de medir o torque e a força vertical aplicada em uma rosca no parafuso a partir da compressão de molas de propriedades elásticas (representadas simplificada por uma constante de rigidez K) de fácil determinação em laboratório e cujo detalhamento será objeto de outro item em capítulo seguinte.

Construiu-se, então, um dispositivo portátil composto de base com quatro pés e um quadro tipo grelha na qual se insere os discos de teste, conforme mostra o desenho esquemático a seguir (figura 1):

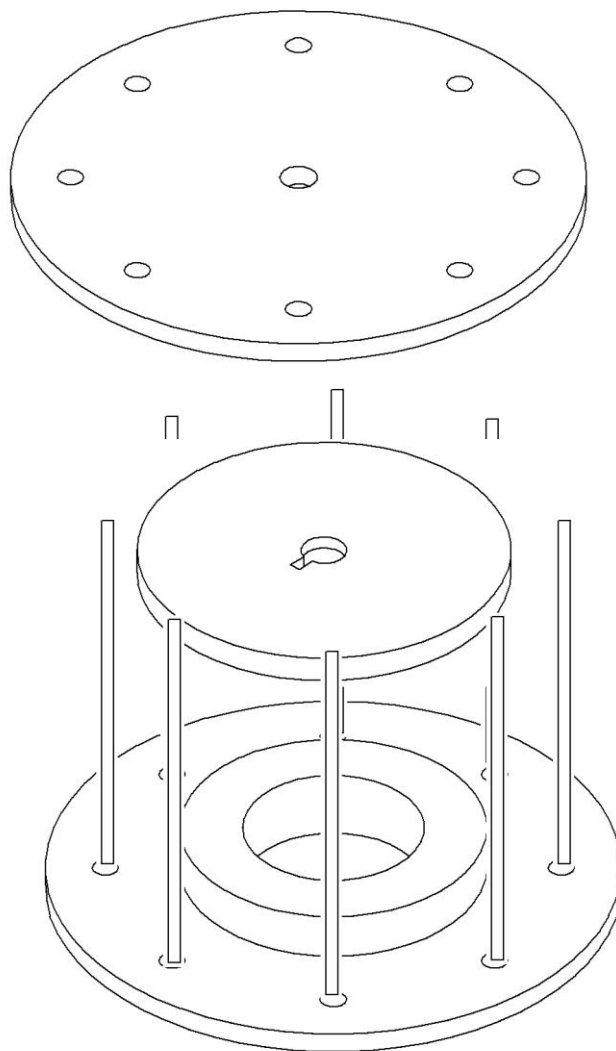


Figura 1: Modelo Esquemático do Dispositivo de Teste em Laboratório

Pelo fato do parafuso objeto do experimento possuir um comprimento muito pequeno, foi necessário conceber um mecanismo que pudesse empregar várias molas para gerar a rigidez desejada, pois que não se poderia usar molas com fios maiores.

Outro fator limitante foi o torque mínimo aferido pelo torquímetro disponibilizado pela SAMARCO, que exerce um torque mínimo de 20 N.m. Isto também impôs a necessidade de se utilizar varias molas para ampliar a rigidez do conjunto.

2.2 Componentes do Dispositivo

Neste item é descrito o modo com que foi construído o equipamento de teste. Além dos parafusos de fixação da chapa de desgaste, objeto do experimento, os demais materiais foram comprados no comércio local, especificamente na Casa dos Parafusos e em vendas de materiais de automóveis usados e afins. Os principais componentes empregados foram:

- Um disco de freio de um Uno Mille de diâmetro de 256 mm
- Uma chapa de aço com diâmetro de 256 mm e altura de 9,73 mm (chapa 1)
- Uma chapa de aço com diâmetro de 136,3 mm (chapa 2)
- 8 molas de altura 51,50 mm
- 8 barras de aço rosqueadas de 25 cm de altura e diâmetro de 9,53 mm
- 1 porca
- 1 arruela
- 1 uma cadeira escolar

Os desenhos esquemáticos a seguir mostram as partes do equipamento construído para o teste.

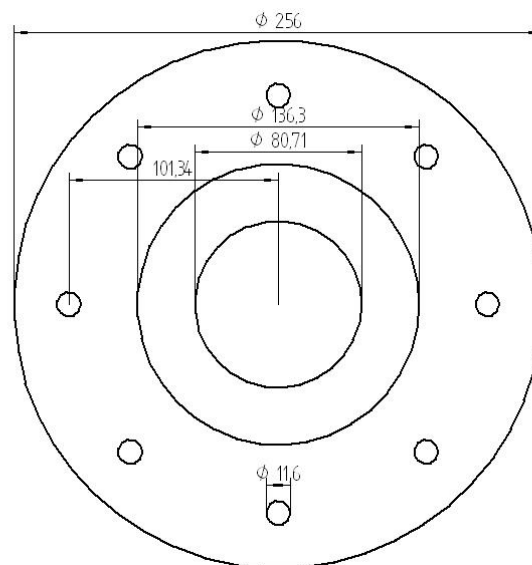


Figura 2: Visão de topo do disco de freio

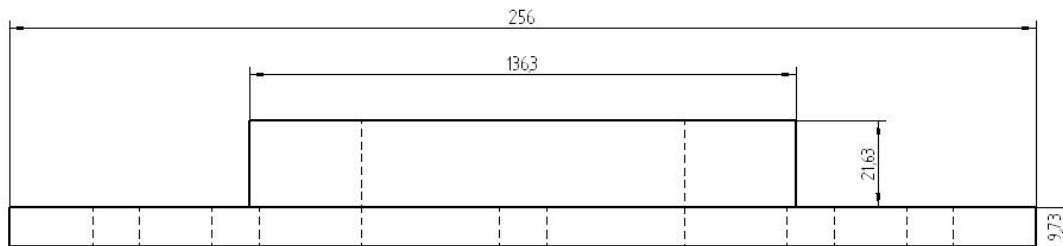


Figura 3: Visão lateral do disco de freio

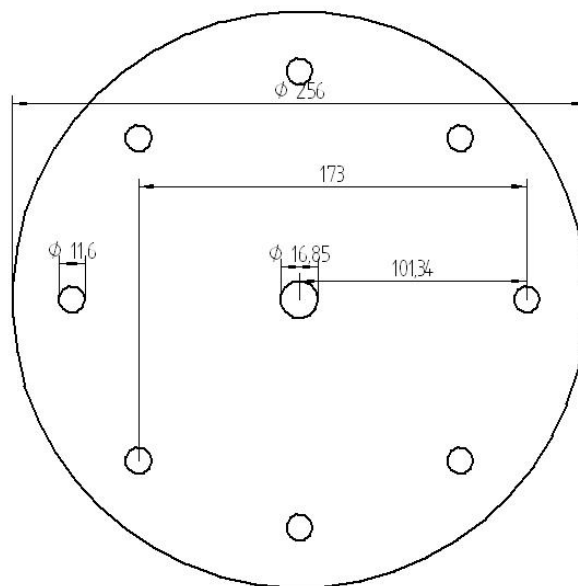


Figura 4: Visão de topo da chapa 1

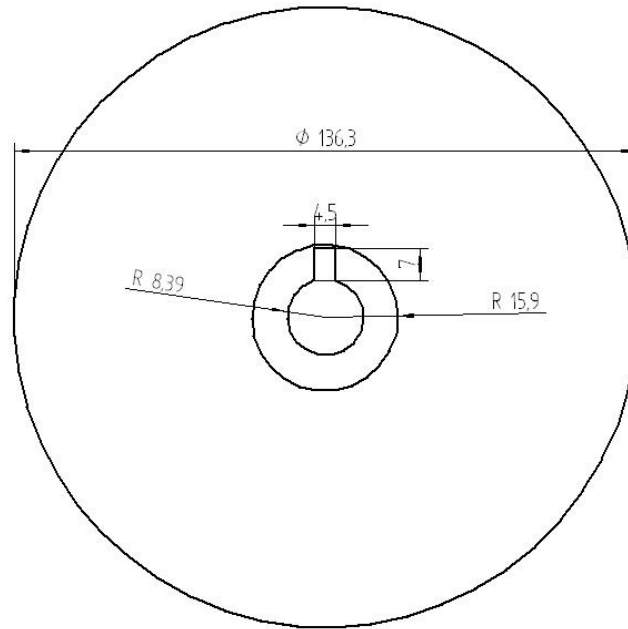


Figura 5: Visão de topo da chapa 2

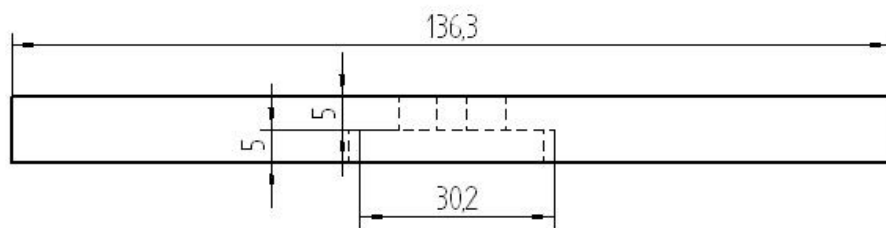


Figura 6: Visão lateral da chapa 2

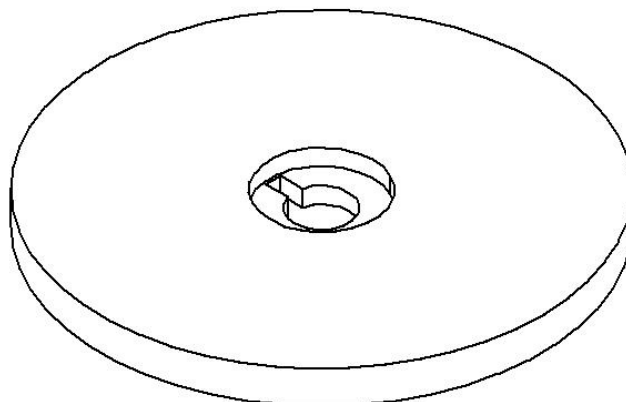


Figura 7: Vista em perspectiva da chapa 2

Com relação à montagem foram feitos 8 furos simétricos de x mm de diâmetro na chapa 1 e no disco de freio. Também foi feito um furo de 16 mm e um rasgo para que o parafuso pudesse ser fixado sem rotacionar na chapa 2. A chapa 2 foi soldada no disco de freio.

O assento da cadeira foi removido e o disco de freio (junto com a chapa 2) foi soldado em seu lugar.

As fotografias apresentadas a seguir ilustram como ficou o dispositivo de teste após a sua construção.



CAPÍTULO 3

3 MODELO MATEMÁTICO

3.1 Introdução

Fazendo uso de uma série de simplificações estruturais e cinemáticas, pode-se obter o momento de torção produzido pelo giro de um parafuso contra uma carga, tanto no caso dos parafusos de acionamento, quanto no caso dos parafusos de fixação. As expressões obtidas são deduzidas especialmente para os parafusos de rosca quadrada, usados principalmente em parafusos de acionamento ou parafusos de potência, que são máquinas para transformar o movimento angular em movimento linear.

São aplicações familiares do parafuso de potência o fuso do torno, o parafuso para torno de bancada, os parafusos para prensas e os parafusos de macacos de elevação.

No entanto, essas mesmas expressões podem ser adaptadas para o caso da rosca AMCE, empregados nos parafusos sem fim, ou ainda para rosca truncada, usada nos parafusos de fixação.

Não obstante a carga num parafuso ser distribuída sobre várias roscas, suspender uma carga por um parafuso é o mesmo que deslocar um bloco para cima sobre um plano inclinado. Assim, o mais simples arranjo para uma análise de forças consiste da análise de um bloco num plano inclinado sobre ações de diversas forças concorrentes.

3.2 Equacionamento das forças da rosca sobre o parafuso

Para calcular o binário necessário para baixar a carga considerou-se o desenrolamento de um filete de rosca. Este desenrolamento forma a hipotenusa de um triângulo cuja altura é o avanço L e a base é o perímetro πD_m corresponde ao diâmetro médio da rosca, (vide figura 9) em que N é a força

normal, μ é o coeficiente de atrito, P é a força tangencial provocada pelo aperto da rosca no parafuso, F é a força axial, λ é o ângulo da hélice e D_m é o diâmetro médio do parafuso.

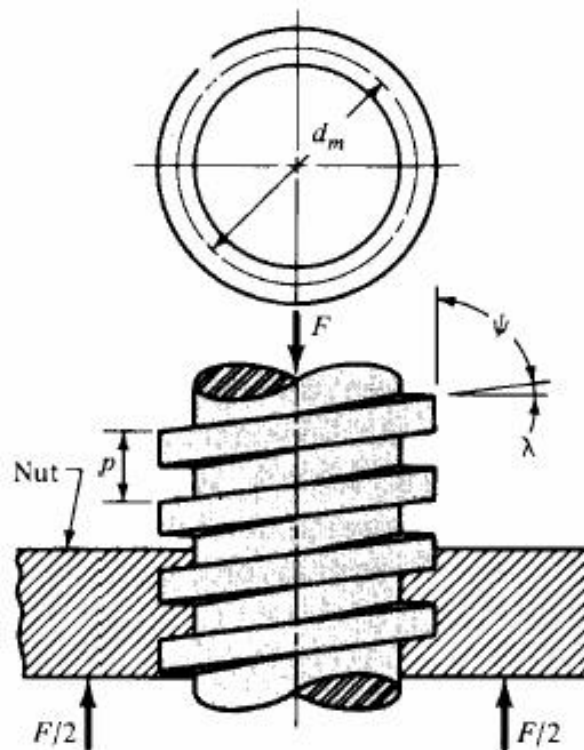


Figura 9: Modelo Geométrico de um Parafuso de Acionamento

O Diagrama de forças no aperto para um parafuso pode ser visto na figura 10, apresentada a seguir, onde a ação dos esforços distribuídos nos filetes é substituída pela ação de forças equivalentes no plano inclinado:

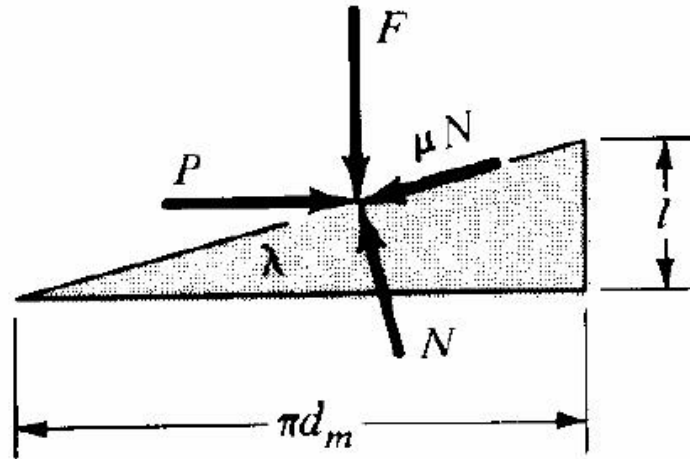


Figura 10: Equilíbrio de Forças no Plano inclinado

Fazendo o somatório de forças na horizontal e na vertical:

$$\sum F_H = P - N \sin \lambda - \mu N \cos \lambda = 0$$

$$\sum F_V = F + \mu N \sin \lambda - N \cos \lambda = 0$$

Eliminando N da equação, obtém-se a força tangencial para o aperto.

$$P = \frac{F(\sin \lambda + \mu \cos \lambda)}{\cos \lambda - \mu \sin \lambda}$$

Dividindo-se a equação por $\cos \lambda$, considerando $\tan \lambda = \frac{L}{\pi D_m}$ e sabendo que o momento tórcor a aplicar é o produto da força P pela metade do diâmetro $D_m/2$, obtém-se o momento tórcor para apertar a rosca (ou parafuso).

$$T = \frac{F \cdot D_m}{2} \beta \quad (\text{Fórmula 3.1})$$

$$\beta = \left(\frac{L + \pi \mu D_m}{\pi D_m - \mu L} \right) \quad (\text{Fórmula 3.2})$$

3.3 Equivalência entre o modelo analítico e o valor experimental

De posse da fórmula analítica do torque, apresentada no item anterior e repetida a seguir por conveniência:

$$T = \frac{F \cdot D_m}{2} \beta$$

Pode-se agora obter o valor do coeficiente de atrito, objeto deste trabalho, pois o mesmo está embutido no valor de beta. Para retirar este valor basta compará-lo com o valor do torque obtido no experimento, narrado no capítulo 5.

CAPÍTULO 4

4 TESTES EXPERIMENTAIS

4.1 Levantamento da constante “K” das molas

Foi feito o levantamento da constante “K” das molas, para que se pudesse ter as propriedades de rigidez das juntas ou elementos que são comprimidos pelo para parafuso/porca de fixação.

Realizaram-se as experiências de medição no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Espírito Santo. Seguiu-se os seguintes parâmetros:

Colocação da mola sobre uma superfície plana.

Utilização de pesos padronizados sobre a mola variando a carga de 5 a 30 kgf.

Medição da deflexão da mola utilizando um paquímetro fixo na mesa.

Criação da tabela 1

Criação do gráfico da tabela 1 traçando sua linha de tendência.

Através da equação da reta obter o coeficiente angular (“K”) da mola.

Tabela 1 – variação da altura da mola em função da Carga

Medidas (10^{-3} mm)	Deslocamento (10^{-3} mm)	Carga(N)
2,70	0	0
2,35	0,35	49,05
2,20	0,50	98,10
2,06	0,64	147,15
1,90	0,80	196,2
1,77	0,93	245,25
1,57	1,13	294,3
1,48	1,22	343,35

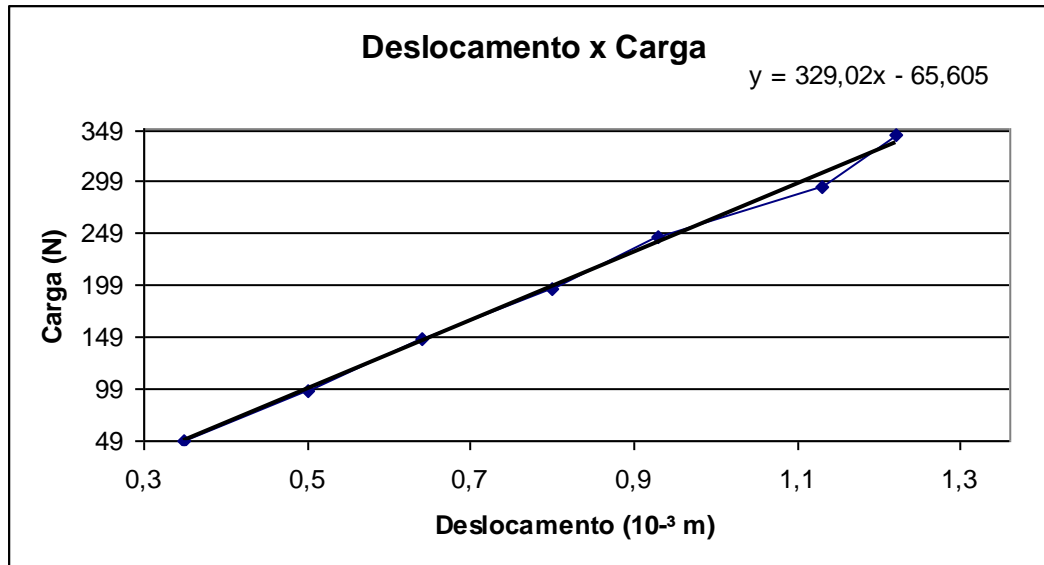


Gráfico 1 – Levantamento da constante elástica da mola

O valor da constante de cada mola calculada foi de aproximadamente 329.020 N/m. O valor do K equivalente do equipamento foi de $8 \cdot 329.020$, resultando em uma constante elástica de 2.632.160 N/m

CAPÍTULO 5

5 TESTES REALIZADOS

5.1 Levantamento do Coeficiente de Atrito

A experiência foi realizada na empresa SAMARCO, localizada em Anchieta. Os testes foram realizados na área com auxílio de um técnico, que colaborou na aplicação dos torques.

A experiência consistiu em medir o coeficiente de atrito da rosca no parafuso. Como o coeficiente de atrito é em função do torque e da força vertical (que é obtida através da deflexão das molas), foram feitas medições das deflexões das molas em função do torque aplicado.

Utilizou-se um torquímetro de estalo da marca Gedori com faixa de torque de 20 N.m a 120 N.m. Foram aplicados torques de 20 a 50 N.m acrescentando 5 N.m a cada nova amostra e medindo a deflexão das molas com um paquímetro.

Após o valor de 50 N.m não havia mais curso, pois a chapa 1 estava muito próximo na chapa 2. O teste foi realizado duas vezes para conferir os valores obtidos e obter uma média.

Observou-se que após 40 N.m a deflexão das molas não mais se comportou de maneira linear, pois as molas já estavam muito comprimidas e as relações matemáticas e físicas que resultavam na linearidade do modelo não mais eram válidas. Um fenômeno semelhante acontece em molas de tração, numa situação oposta, quando as espiras também adquirem ângulos muito grandes. Devido a este fato, os dados de torque de 45 N.m em diante foram retirados dos cálculos da constante elástica das molas. A experiência foi realizada duas vezes para obter um valor mais preciso das deflexões.

A tabela 3 mostra os resultados obtidos no experimento

Tabela 3 – Valores obtidos com a experiência na SAMARCO

Torque (N.m)	Altura das molas (mm) na 1ª amostra	Altura das molas (mm) na 2ª amostra	Média das Deflexões entre as amostras (mm)
20	40,90	41,10	41,000
25	39,00	38,55	38,775
30	37,25	37,45	37,350
35	34,35	34,55	34,450
40	32,5	32,05	32,275
45	31,8	31,05	31,425
50	30,9	30,70	30,800

Utilizando as fórmulas 3.1 e 3.2 foi calculado o coeficiente de atrito. Os valores obtidos do coeficiente de atrito são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 4 – valores de β e μ calculados

Torque (N.m)	Força do conjunto das molas (N)	β	μ
20	25005,5	0,101500431	0,060855067
25	30862,1	0,102798944	0,062145031
30	34612,9	0,109990962	0,069287259
35	42246,2	0,10513674	0,064467095
40	47707,9	0,106400452	0,065722123
45	50208,5	0,113739015	0,073007728
50	51853,6	0,122367271	0,081568222

Foi feita a média aritmética dos valores de β encontrados no experimento até o torque de 40 N.m e foi obtido o valor de 0,1051.

CAPÍTULO 6

6 Conclusão

6.1 Dificuldades funcionais

A concepção da máquina foi a parte mais complexa, pois necessitava-se de um mecanismo que gerasse uma rigidez bem elevada, porque o comprimento dos parafusos de fixação para os quais foram efetivados os ensaios era bastante curto.

Inicialmente pensou-se em utilizar apenas uma mola com o parafuso dentro dela, mas pela dificuldade de encontrar uma mola única com rigidez elevada e comprimento livre pequeno, compatível com o comprimento da rosca do parafuso, menos a altura da porca, teve-se a idéia de utilizar várias molas e com altura maior do que a do parafuso, para que ela não perdesse suas propriedades de linearidade com pequenos deslocamentos.

Encontrar um torquímetro aferido também foi um outro fator de difícil superação no trabalho, pois o laboratório de metrologia da UFES não possuía um aparelho aferido. Mesmo no setor de manutenção da SAMARCO, que gentilmente ofertou o equipamento para o teste, teve-se a dificuldade em encontrar um torquímetro com capacidade de medir torques de valores baixos. A grande maioria dos aparelhos usados por essa empresa possuíam um torque mínimo de 80 N.m., muito alto para efetivar a experiência com o dispositivo construído.

A construção da máquina também foi bastante laboriosa. Praticamente todos os componentes foram comprados em diferentes lojas e fornecedores, alguns com muita dificuldade de se adaptar aos objetivos da experiência. A solução encontrada buscou flexibilidade de montagem e ensaio, baixo custo (boa parte dos elementos são originados de automóveis, como o disco de freio) e adaptabilidade as características do parafuso de fixação empregado junto às chapas de desgaste das pás dos ventiladores centrífugos.

6.2 Crítica dos Resultados

Com relação ao valor do coeficiente de atrito obtido na experiência, pode-se tecer os seguintes comentários.

Primeiramente, a literatura especializada, conforme Faires, menciona que se as superfícies das roscas forem lisas e bem lubrificadas, o coeficiente de atrito poderá ser baixo, como o 1º, porém, para materiais de má qualidade média, recomenda-se μ igual a 0,125. Para valores bastante duvidosos, μ pode ser tomando como 0,15. Este valor, segundo Faires, deve ser aumentado em 30 por cento em situações que envolvam a partida ou acionamento de máquinas. Já Shigley recomenda o uso do valor de 0,15 em qualquer circunstância, não importando com o fato de haver movimento ou não. O valor encontrado na experiência é bem menor, situando-se em torno de 0,06.

Assim, uma primeira conclusão do trabalho é que o valor do coeficiente de atrito calculado em teste específico pode ser bem diferente do coeficiente de atrito adotado pela literatura em casos gerais.

Em função das limitações do torquímetro, não foi possível realizar testes com valores abaixo de 20 N.m. Teria sido interessante realizá-los, para calcular o β com deslocamentos menores e assim ter um intervalo de variação dos parâmetros de ensaio mais extenso.

Outra questão interessante deve-se ao fato de que para valores de carga nos quais as molas estavam bem fechadas, a linearidade do comportamento das molas não mais é obedecida, alterando a rigidez e assim comprometendo a avaliação do valor do coeficiente de atrito. Este fenômeno foi identificado para os valores de carga de ensaio a partir de 45 N.m. Nessa condição, observou-se que as espiras de extremidade, de rigidez localizada diferente, se encostavam mutuamente. Por essa razão, tais valores não foram contabilizados no cálculo do coeficiente objetivado.

7 BIBLIOGRAFIA

SHIGLEY, J.E. Elementos de Máquinas, Vol 1, Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A.

FAIRES, V. M. Elementos de Máquinas, Vol 1, Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A.

Fernandes,Silva,Dall'Orto. Equipamento de Testes em Rolamentos, ES, Vitória, 2002.