

PROJETO MECÂNICO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS DO TIPO PINO DISCO

MECHANICAL DESIGN OF A BENCH FOR PIN DISC TYPE TRIBOLOGICAL TESTS

Douglas Carvalho da Silva¹

RESUMO

A tribologia tem por objetivo estudar e analisar as resistências ao atrito de um material em relação a outro, observando os resultados do desgaste provocado nos mesmos, podendo haver ou não a presença de lubrificação durante o ensaio que varia conforme a necessidade da aplicação. O projeto a seguir buscou aprofundar os conhecimentos à área voltada a tribologia, tendo como objetivo de projetar mecanicamente uma bancada para ensaios tribológicos de baixo custo, para a utilização em laboratórios acadêmicos. Para contextualizar o tema, foi elaborada uma revisão bibliográfica acerca da tribologia, seus conceitos e tipos de tribômetros mais utilizados. Para a elaboração do projeto do tribômetro, de primeiro momento foi elaborado as principais etapas do projeto através de um fluxograma, partindo para o projeto conceitual, onde é identificado os sistemas que deve compor o equipamento, desde a estrutura de base até o sistema de acionamento controlando a rotação do motor através de um sistema eletrônico.

Palavras-chave: Tribômetro, ensaio Pino Disco, tribologia.

ABSTRACT

Tribology aims to study and analyze the frictional resistance of one material in relation to another, observing the results of wear caused to them, whether or not there is the presence of lubrication during the test, which varies according to the needs of the application. The following project sought to deepen knowledge about the external area of tribology, aiming to mechanically design a bench for low-cost tribological tests, for use in academic laboratories. To contextualize the topic, a bibliographical review was prepared on tribology, its concepts and types of most used tribometers. To prepare the tribometer project, the main stages of the project were initially drawn up using a flowchart, moving on to the conceptual project, where the systems that should make up the equipment are identified, from the base structure to the drive system. controlling engine rotation through an electronic system.

Keywords: Tribometer, Pin Disco test, tribology.

INTRODUÇÃO

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Alto Vale do Rio do Peixe (UNIARP).

A tribologia é o estudo do atrito e do desgaste de materiais. Os tribômetros são equipamentos utilizados para realizar ensaios tribológicos, que podem ser configurados para diferentes parâmetros, como tipo de movimento, pressão e presença de lubrificação.

O projeto de um tribômetro do tipo pino disco, que será utilizado para ensaios práticos em aulas de engenharia mecânica. O objetivo do projeto é fornecer um equipamento acessível e didático para o estudo do comportamento dos materiais em aplicações tribológicas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tribologia combina conhecimentos adquiridos em física, química, mecânica e ciência dos materiais com a finalidade de descrever e prever o comportamento de sistemas físicos usados em sistemas mecânicos. O que une a tribologia não é o conhecimento básico, mas a área de aplicação. O estudo dos fenômenos de lubrificação, fricção e desgaste remonta a 1966, assim como as áreas de conhecimento que compunham a tribologia antes disso (Sinatora, 2005).

De uma forma geral, o ramo de estudo da tribologia eleva grande interesse, principalmente no que tange a diminuição de custos, além de haver a necessidade de levantar os impactos ambientais provenientes da extração e utilização de materiais. A combinação da tribologia e cautelas com o meio ambiente é um foco da indústria do futuro, assim, a busca de materiais de desempenho elevado que causem menos impacto ao meio ambiente deve ser priorizado (Castro et al.. 2019)

IMPORTÂNCIA DA TRIBOLOGIA

Embora a definição desse vocábulo seja relativamente nova, a humanidade vem usando práticas relacionadas à tribologia há séculos. Por exemplo, a invenção da roda ressalta o interesse humano em reduzir a fricção durante a locomoção (Halling, 1975). Segundo Dowson (1979), talvez a evidência mais antiga da tribologia remonta ao Paleolítico, quando o homem descobriu o fogo a partir do calor gerado por faíscas provenientes do atrito entre pedaços de madeira ou da colisão de pedras. O autor também menciona que os antigos egípcios utilizavam lubrificantes a base de gorduras animais para os rolamentos das rodas de suas carruagens.

Segundo Suski (2004) O desgaste por fadiga pode gerar falhas graves em componentes mecânicos que trabalham com movimentos relativos como rodas, mancais, rolamentos, trilhos e rodas dentadas, podendo também afetar bombas hidráulicas onde há atrito e impacto de elementos suspensos no meio do fluido, podendo gerar cavitação e ainda em processos de conformação tendo como exemplo prensagem, estampagem, martelamento, etc.

O entendimento e aplicação da tribologia vem se tornando cada vez mais necessário àquelas aplicações que precisam de movimento relativo. Dentro desse tema, merecem ser destacados os aviões, automóveis e elementos de máquinas que transmitem movimento e vedação, entre outras (França, 2019).

TRIBÔMETRO

Para realizar os testes de tribologia, tem-se o equipamento tribômetro, sendo um dispositivo versátil para mensurar as propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob carga, velocidade, temperatura e condições atmosféricas especificadas. A caracterização tribológica inclui estudos sobre as condições reais de uso do material, bem como pesquisas sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e resistência do filme lubrificante. Esses estudos podem ser aplicados em diversas áreas como de automóveis, aeronaves, eletrônica na área da saúde temos exemplo a biomédica e ótica. Vários testes podem ser realizados, como o de riscamento (útil para avaliar a adesão e medir a dureza de filmes finos), indentação (permite a determinação do módulo de Young e dureza) e fadiga (para analisar durabilidade e resistência do material) (Cardoso, 2020).

Os tribômetros podem possuir as mais variadas configurações, com a função de reproduzir diversos tipos de contatos encontrados no ramo da engenharia. Dessa forma, os tribômetros visam proporcionar e realizar a medição do atrito e do desgaste entre dois componentes (Silva, 2021).

Isso é importante cientificamente e para o desenvolvimento de sistemas de frenagem, visto que o conhecimento dos mecanismos de fricção que determinam o funcionamento e a vida útil dos materiais de fricção ainda é incipiente em comparação com a evolução apresentada em outras áreas de conhecimento da engenharia

automotiva. Além disso, até os dias atuais materiais de fricção são desenvolvidos, a partir da aplicação de regras empíricas pelos fabricantes, conforme afirmam alguns pesquisadores (Desplanques et al., 2006; Ostermeyer, 2001).

Segundo Halling (1975), um veículo possui mais de 2000 pontos de contato tribológicos, indicando um alto grau de dissipação de calor.

PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TRIBOLOGIA

Um dos principais aspectos dos estudos tribológicos é o desgaste. Tradicionalmente, quatro formas de desgaste são admissíveis. De acordo com Rosas e Oliveira (2021), desgaste é a perda progressiva e microscópica de partículas de um material, devido a ação de movimento de atrito ou de corte.

O desgaste trata-se de um processo de degradação de um material quando está em serviço ou operação. Está sujeito em diferentes ocasiões em que ocorre a perda de forma progressiva de material, proveniente da superfície de contato ou movimento relativo de um corpo em relação a outro, podendo ser líquido ou gasoso (Santana et al., 2022). É importante mencionar que tal definição não exclui os danos do corpo sem a remoção de material, mesmo que possua apenas a deformação plástica, é classificado como desgaste (Barros Junior, 2019).

O desgaste adesivo acontece quando a resistência ao deslizamento é gerada por uma união adesiva entre as duas faces forte o bastante para resistir ao movimento relativo entre elas. O resultado dessa adesão é capaz de deformar o material na área de contato, ocasionando trincas que podem se difundir, trazendo à formação de um terceiro corpo ocasionando uma transferência completa do material. No desgaste abrasivo o material é removido da superfície. Esse desgaste ocorre devido ao formato e dureza dos dois materiais em contato. Quando o desgaste é causado por muitos movimentos repetitivos, é chamado de desgaste por fadiga. Finalmente, o desgaste corrosivo, este ocorre quando os materiais estão em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Nesse tipo de desgaste, produtos de reação são formados devido a interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e formam uma camada intermediária na superfície, que posteriormente é removida (Kato, 2001).

O modo de desgaste pode ser acionado por vários mecanismos. Os

mecanismos de desgaste são definidos considerando mudanças complexas de superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre em mais de um modo portanto, entender cada mecanismo de desgaste em cada modo torna-se importante (Kato, 2001). Os principais mecanismos de desgaste são: adesão, abrasão, fadiga e reação triboquímica (Carvalho, 2019).

Resistência ao desgaste e ao atrito não são propriedades específicas dos materiais, porém remetem a aspectos do sistema de engenharia (tribosistema), sendo capaz de causar redução do material e perdas de energia, respectivamente. O atrito pode ser definido como a resistência ao movimento e, esta aumenta proporcionalmente com a área de contato real dos corpos (Suski, 2004).

CONCEITO E MECANISMOS DE ATRITO

Segundo Rabinowicz (1995), o atrito é a resistência ao movimento que existe quando um objeto sólido se move tangencialmente a uma superfície de contato, ou quando se tenta produzir esse movimento relativo. Além disso, segundo o autor, a fricção é expressa em termos quantitativos como uma força (força de fricção), que é proporcional à carga normal existente entre os corpos.

Segundo Halliday et al. (1996), a relação entre força de atrito e força normal resulta em uma quantidade adimensional conhecida como coeficiente de atrito. Segundo os autores, o coeficiente de fricção é dividido em estático e dinâmico. O coeficiente de atrito estático foi determinado no momento do movimento relativo entre as superfícies de atrito, enquanto o coeficiente dinâmico de atrito ocorre no momento do movimento relativo entre as superfícies.

O coeficiente de atrito é a relação entre a força de atrito e a força normal aplicada, podendo ser dividida entre estática e cinética (dinâmica), sendo a estática correspondente à máxima força de atrito requerida para que um movimento macroscópico aconteça, e a dinâmica é caracterizada como o coeficiente sob condições macroscópicas de movimento relativo decorrente das superfícies com atrito e define o atrito que se opõe à continuidade do movimento, a partir de seu inicial (Alves, 2021).

Pouco progresso na tribologia foi feito antes de Leonardo da Vinci (1452-1519), que formulou pela primeira vez a hipótese científica da fricção. Ele percebeu que a

força de atrito é proporcional à carga normal aplicada. A Revolução Industrial (por volta de 1700) estimulou avanços significantes na tribologia, devido ao desenvolvimento de novas máquinas e equipamentos industriais (Halling, 1975).

Além disso, durante este período houve um aumento do interesse no processo de atrito em condições não lubrificadas, devido a problemas no sistema de travões e na aderência entre trilhos e rodas das locomotivas recém-construídas. Os rolamentos de esferas, um componente amplamente utilizado atualmente, emergiram durante esse período (Dowson, 1979).

No final do século XVIII, Charles Augustin Coulomb fez uma distinção clara entre o coeficiente de atrito estático e o coeficiente de atrito dinâmico ou cinético. Neste trabalho, Coulomb também assumiu que o coeficiente de fricção não depende da velocidade (MÄKI, 2005). Em um segundo momento, porém, Coulomb percebeu que a força de atrito não é apenas um componente cujo valor era constante no início do movimento, mas também um componente que muda com a velocidade (Armstrong, 1988). Embora Coulomb já tivesse observado uma relação entre o coeficiente de fricção estática e o tempo de adesão entre as superfícies antes de começar a deslizar entre as superfícies, a base teórica que sustenta esse fenômeno pode ser encontrada em publicações posteriores à pesquisa realizada por ele (Dieterich; Kilgore, 1994; Segu et al., 2021). De acordo com estes estudos, na posição estacionária, o reforço entre as juntas é maior ao longo do tempo, o que, juntamente com o relaxamento plástico da carga de contato, resulta em um aumento da área real de contato entre as superfícies, levando ao aumento do coeficiente de atrito estático.

ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

De acordo com Czichos (1979), a fricção é definida como a resistência ao movimento relativo de dois corpos em contato. Essa resistência pode ser causada pelo movimento de deslizamento, rolamento ou balanço entre dois sólidos, ou pelo fluxo de um fluido sobre um sólido, com ou sem partículas. O desgaste, por sua vez, é definido como a remoção de material das superfícies de contato devido à fricção.

Os testes tribológicos são realizados em diferentes níveis. Depende do objetivo do teste. A norma DIN 50 322 os classifica de acordo com o grau de realismo da aplicação. À medida que o realismo da aplicação aumenta, o custo associado e o controle do sistema são maiores, porém, o realismo sobre os modos de desgaste e atrito presentes no equipamento é maior (AXÉN, 2001).

Segundo Blau e Budinsky (1999), a grande variedade de testes laboratoriais e as características tribológicas dificultam a comparação de resultados entre instituições. Dessa forma, a padronização por parte de entidades como a American Society for Testing Materials (ASTM) responde à necessidade de pesquisadores e manufaturas de obter resultados reproduzíveis em qualquer laboratório.

Alguns testes padronizados são direcionados a componentes específicos, como anéis de cilindro e britadores de mandíbula, enquanto outros são projetados para determinar a resistência de um determinado material a um mecanismo de desgaste em condições específicas (Bayer, 2004).

Ao escolher uma máquina de teste, é importante levar em consideração o desgaste sob o qual o material é exposto durante a aplicação, de modo com que a máquina de teste deve fornecer resultados muito próximos ou exato. De acordo com Kassim (2000 apud Ribeiro, 2004) é estabelecido que de todos os diferentes tipos de desgaste, o desgaste abrasivo ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado o mais grave e mais comum na indústria, e o mais fraco. O desgaste abrasivo sob tensão é o tipo de desgaste que ocorre com mais frequência em equipamentos e peças industriais.

BANCADA PARA ENSAIOS DE DESGASTE

Usualmente, os dispositivos utilizados para testes de fricção e desgaste que são compostos por um suporte que segura o pino, que fica em contato com a amostra de base e no mesmo suporte está o controle de carga, que pode ser ensaiado. Podem ser classificados de duas formas: pinos em um disco e pinos em uma placa. Em geral, o aparelho de teste deve ser robusto e com precisão suficiente para promover condições de desgaste estáveis e repetíveis (ASTM G 190, 2006). É interessante que o aparelho seja colocado sobre uma mesa ou bancada, o que evita vibrações e perturbações externas para manter a integridade dos resultados (ASTM G 190, 2006).

METODOLOGIA

Durante o desenvolvimento do projeto mecânico de máquinas e equipamentos uma das principais etapas é a escolha dos requisitos do projeto, dados esses que norteiam as necessidades que a máquina ou equipamento precisa atender para alcançar o pleno funcionamento, em casos como teste da bancada, o equipamento precisa satisfazer as especificações de pressão aplicada sobre os corpos de prova, assim como a velocidade aplicada durante o teste sendo ela linear ou de rotação, considerando ainda a aplicação ou não de lubrificação durante o ensaio. Portanto a partir dessas informações é possível definir os valores de resistência necessária para suportar os esforços que a bancada estará sujeita durante os ensaios.

PROJETO DETALHADO

A etapa do projeto detalhado é uma extensão do projeto conceitual somado às montagens dos componentes dentro dos sistemas e subsistemas. Para chegar nessa etapa, é necessário ter todos os componentes já determinados e o sistema de montagem dos subconjuntos já definidos. A partir disso, é necessário buscar por materiais mais adequados para a fabricação do tribômetro e de sua estrutura, visando um bom custo-benefício.

A apresentação dos desenhos dos componentes com suas especificações e as montagens dos sistemas é realizada através do *software* Inventor® de desenvolvimento de projetos e montagem 2D e 3D, permitindo agrupar os subconjuntos a fim de entregar o projeto final. ⁽³⁾

Para os cálculos dos pesos dos componentes foi levado em consideração os catálogos de fabricantes e dimensões dos componentes previamente definidos, comparando os resultados obtidos através do Inventor®, onde calcula os pesos dos materiais conforme selecionado dos esboços.

Sistema estrutural de base

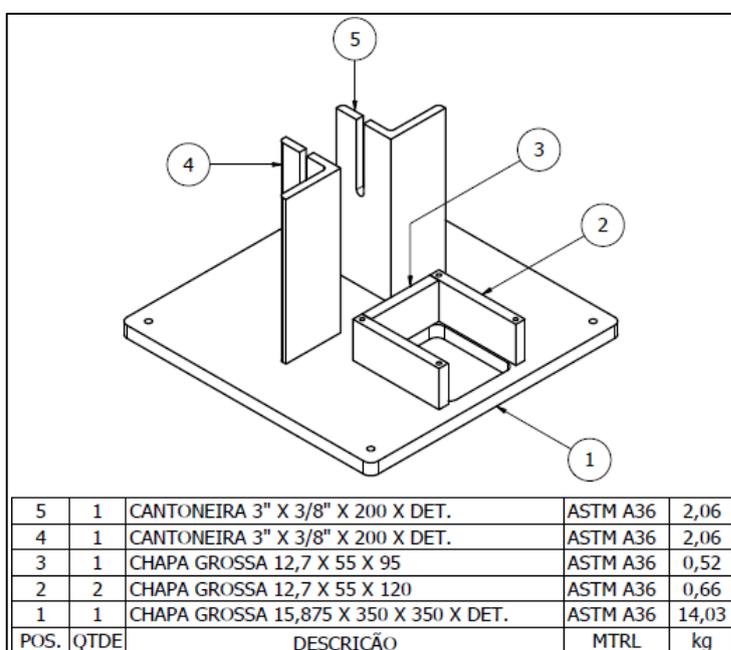
O sistema estrutural de base deve ser constituído de material maciço metálico, pois deve possuir propriedades compatíveis para uma bancada de laboratório, suportando vibrações do motor de acionamento e da rotação do disco. Além disso,

deve suportar a massa da carga que é aplicada durante os ensaios.

Algumas características primordiais devem ser levadas em conta na escolha do material, devendo ter boa resistência e facilidade de se encontrar o produto no mercado local e com baixo custo relacionado à aplicação.

Dessa forma, tem-se a estrutura base conforme Figura 1, com os componentes e material utilizado, que deve ser rígida e estável de forma que evite que as vibrações comprometam os resultados dos testes. Além disso, possui quatro absorvedores de vibração na base o que evitam a vibração decorrente do motor em funcionamento e do atrito gerado durante os ensaios.

Figura 1 – Sistema estrutural de base



Fonte: O autor (2023).

Foi definido que o sistema do tribômetro será suportado por quatro bases antivibratórias do modelo comercial Vibrastop Micro 2, onde cada uma pode suportar até 2000N, sendo mais que suficiente para o tribômetro em questão, sem sofrer esforços.

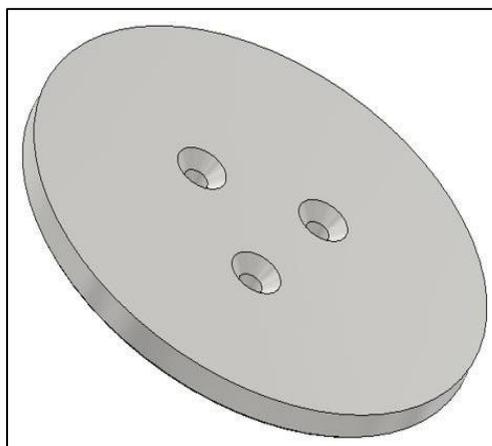
Segundo a ABNT (2016), o aço ASTM A36 (equivalente a NBR 7007) possui a resistência à tração de aproximadamente 400 MPa e resistência ao escoamento aproximado de 250 MPa. Essas qualidades fazem com que esse tipo de aço seja uma boa escolha para aplicações de estruturas de edificações, plataformas petroleiras,

pontes, automóveis e um range diversificado de construções.

Sistema de fixação do disco

Existem diversas formas de fixar o disco através de elementos de fixação de duas peças de superfície paralelas. Portanto, pode ser definido então que o corpo de prova (Figura 2) é fixado no suporte por meio de três parafusos M5 x 15 cabeça chata, dispostos no centro do suporte (Figura 3). O disco deve se manter seguro e firme durante os testes, a fim de que o desgaste ocorra de maneira correta, formando uma circunferência homogênea.

Figura 2 – Corpo de prova (disco)



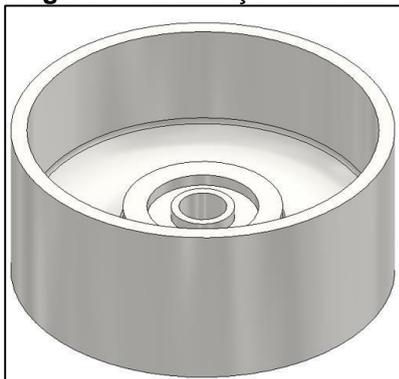
Fonte: O autor (2023).

Figura 3 – Suporte do corpo de prova



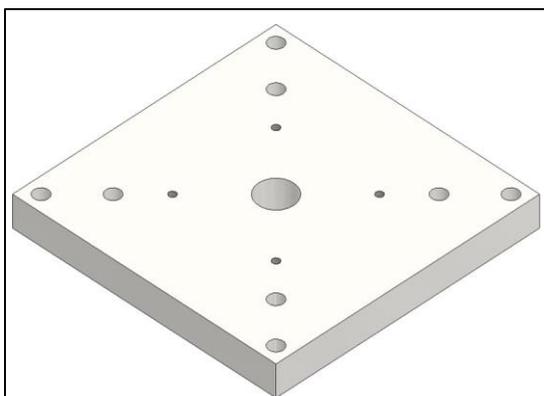
Fonte: O autor (2023).

Na Figura 4, é ilustrado o sistema de contenção do óleo, para quando os ensaios são realizados com presença de fluido lubrificante.

Figura 4 – Contenção de fluido lubrificante

Fonte: O autor (2023).

Essa contenção é fixada em uma base (Figura 5) por meio de quatro parafusos M6 x 10 cabeça cilíndrica sextavado interno. Dentro dessa contenção fica o suporte com o disco fixado. Já a base da contenção é fixada na estrutura por meio de 04 parafusos M4 x 12 cabeça cilíndrica sextavado interno.

Figura 5 – Base de fixação da contenção

Fonte: O autor (2023).

O sistema de fixação do disco deve ser acoplado ao eixo do motor, possibilitando um movimento de rotação para o disco. O motor de acionamento deve ser fixado na base da estrutura, para que o sistema de fixação fique estável o suficiente durante os ensaios. Tal estabilidade necessária para que o desgaste gerado no disco gere uma trilha regular e conforme.

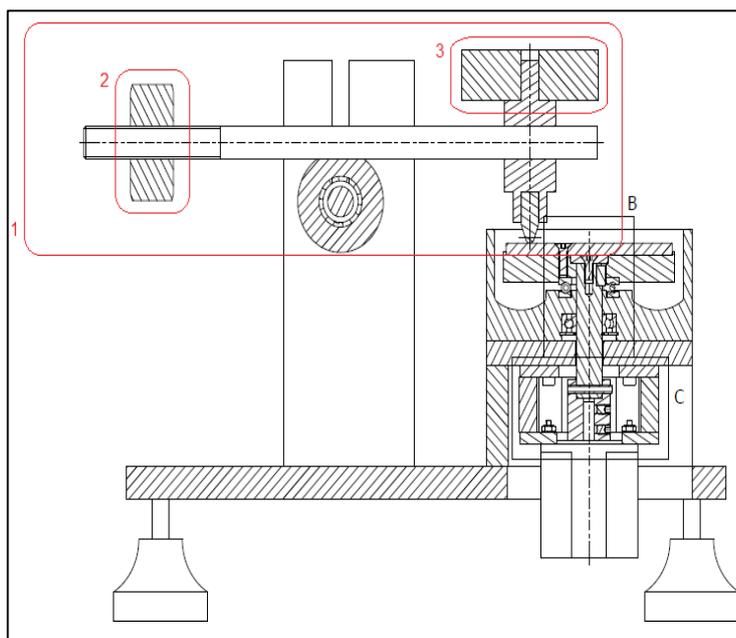
Sistema de controle de carga

O sistema de controle de carga é a parte do conjunto do equipamento que

possibilita a aplicação de cargas normais sobre o sistema, com valores pré-determinados de 01 a 10 Newtons, para que haja as alterações dos comportamentos de desgastes para cada força durante os ensaios no tribômetro. A aplicação de carga é adicionada por meio de pequenos blocos de massa padrão, inseridos manualmente sobre a haste. Para compensar as forças aplicadas no sistema durante os ensaios, o equipamento possui um princípio de funcionamento de balanças mecânicas, no qual numa das extremidades da haste está o pino e na outra se encontra um peso que se desloca ao decorrer da haste, chegando ao equilíbrio do conjunto.

Na Figura 6 está a representação lateral do conjunto, onde pode-se observar o pino em contato com o corpo de prova, suportados pela haste, recebendo a aplicação da carga equilibrada com a porca contrapeso, conforme itens 1 e 2. Já o item 3 está o peso calibrado na extremidade superior do pino, que se refere à aplicação de carga.

Figura 6 – Vista lateral do equipamento



Fonte: O autor (2023).

Na articulação da haste é posicionado dois rolamentos rígidos de esferas 6002 ZZ, com a função de reduzir o atrito entre as partes móveis dos componentes, transmitindo a ação de rotação entre os componentes. Já no eixo é posicionado um rolamento 6002 ZZ e na outra extremidade um rolamento axial de esfera 51104 ZZ. A tabela da Figura 7 apresenta as principais propriedades desses rolamentos.

Figura 7 – Propriedades dos rolamentos 6002 e 51104

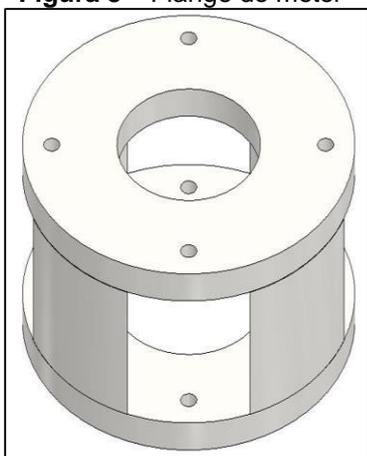
Designação	Tipo de rolamento	Dimensões principais			Capacidades de carga básica			Classificação de velocidade
		Furo	Diâmetro externo	Largura	Dinâmico	Estática	Carga limite de fadiga	Limitante
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	P _u (kN)	n _{lim} (r/min)
6002	Rolamento rígido de esferas	15	32	9	5.85	2.85	0.12	32000
51104	Rolamento axial de esferas	20	35	10	15.1	29	1.08	10.000

Fonte: SKF (2023).

Sistema de acionamento

Para realizar o acionamento do sistema é necessário um motor de passo, promovendo a rotação do disco em um range de 60 a 600 rpm. O motor é um modelo de passo de corrente contínua com capacidade de controle por meio de arduínos.

O motor deve ter uma dimensão pequena devido a estrutura de ensaios de tribologia ser de pequeno porte (Figura 8), devendo possuir um tamanho suficiente para estar alocado dentro do compartimento abaixo do disco, por meio do flange. O motor é fixado no flange por meio de quatro parafusos M4 x 15 cabeça chata.

Figura 8 – Flange do motor

Fonte: O autor (2023).

Para atender aos requisitos do projeto conceitual, foi definido que pode se um modelo comercial de motor de passo Nema 23 da marca BENSER, compatível para as dimensões do equipamento, sendo fixado por meio de chapa metálica por parafusos. O motor possui bom custo-benefício e suas características técnicas

atendem as demandas do projeto.

Sistema de controle de rotação

Para realizar o controle de rotação é necessário um sistema eletrônico para definir a rotação em que o motor de passo vai atuar sob o disco. A aplicação desse sistema possibilita aumentar a precisão dos resultados dos ensaios.

O sistema elétrico é composto por uma fonte que faz a alimentação do drive, interligado com a controladora que faz o controle de rotação do motor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação de esforços é uma ferramenta importante para garantir a segurança e a confiabilidade de uma estrutura. Neste tópico, é apresentado a simulação de esforços realizada na estrutura do tribômetro.

Para realizar a simulação, foi utilizado o *software* Inventor, a partir da utilização do critério de tensão Von Mises, sendo possível realizar a análise de elementos finitos. Os resultados da simulação indicam que a estrutura da bancada de ensaios é capaz de suportar as cargas aplicadas sem falhas. Através do *software* também é possível realizar a a simulação de deslocamento do equipamento aplicado sob o peso calibrado, onde o pino é posicionado.

É possível identificar que a maior deformação observada foi de 0,04958 mm na ponta da haste onde está alocado o peso padrão, essa deformação é considerada pequena e não afeta a confiabilidade dos ensaios, pois como é possível observar os demais componentes da estrutura não sofrem deformações consideráveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse projeto surgiu da necessidade de elaborar um equipamento aplicado em laboratórios universitários, a fim de realizar ensaios tribológicos. Na etapa inicial, foi realizado um estudo de forma a permitir um embasamento teórico sobre o tema. Em seguida foi apresentado um estudo sobre o tribômetro do tipo pino disco, objeto de base para o projeto detalhado.

Sendo como objetivo geral elaborar um projeto mecânico de uma bancada de

ensaios tribológicos do tipo pino disco, pode-se afirmar que este foi realizado com êxito. Entretanto, é necessário realizar um estudo aplicado de funcionalidade prática do mesmo, aprimorando os conceitos e sistemática sobre os componentes elétricos que pertencem ao equipamento.

Com a elaboração desse projeto, foi analisado que com o aprimoramento das áreas de tribologia, pode-se encontrar mais oportunidades para aplicação de diferentes tipos de materiais, não só para esse projeto em específico, mas em outros tipos de projetos. Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a elaboração do projeto em forma física, aplicando as etapas do projeto conceitual e detalhado. Além disso, sugere-se realizar ensaios tribológicos de forma real, utilizando discos de diferentes materiais e dimensões, validando a eficácia do projeto. Tem-se também a opção de elaborar um projeto com materiais diferentes, tanto para a estrutura quanto para os componentes, a fim de buscar diminuir os custos com os materiais e validar a aplicação de outros tipos de aços.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aço carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural – Requisito. **NBR 7007**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ALVES, W. P. R. **Estudo sobre o desgaste abrasivo causado por lubrificantes contaminados com minério de ferro em aço 1020**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3649/1/MONOGRAFIA_EstudoSobreDesgaste.pdf. Acesso em: 20 nov. 2023.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Developing and Selecting Wear Tests, **G190-06**. West Conshohocken: ASTM, 2006.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, **G133-05**. West Conshohocken: ASTM, 2005.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, **G99-00**. West Conshohocken: ASTM, 2000.

AXÉN, N.; JACOBSON, S.; HOGMARK, S. Friction and Wear Measurement Techniques. **Modern Tribology Handbook**, Wiley, v. 2, p. 493–510, 2001.

BARROS JUNIOR, J. J. **Análise do desgaste do contato seco/lubrificado entre metais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/43019/1/TCC%20JURANDIR%20VERSO%20FINAL.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BAYER, G. R. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. 2. ed. USA: Kindle, 2004.

BLAU, P. J.; BUDINKSY, K. G. Development and use of ASTM standards for wear testing. **Wear**, [S. l.], v. 225-229, ed. 2, p. 1159-1170, 1999.

BLAU, P.J.; MCLAUGHLIN, J.C. Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials. **Tribology International**, [S. l.], v. 36, ed. 10, p. 709-715, 2003.

CARDOSO, P. H. M. **Caracterização de peças à base de nanocompósitos híbridos de poli (ácido láctico)/alumina/negro de fumo fabricadas utilizando tecnologia de impressão 3d**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/teses/2020-3/716--650/file>. Acesso em: 09 out. 2023.

CARVALHO, F. L. **Estudo do desgaste de ferramentas de conformação de tubos nitretadas a plasma**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/5797/TCC%20Filipi%20Ligabue%20Carvalho.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CASTRO, R. M. *et al.* Avaliação tribológica de óleos hidráulicos biodegradável e mineral com deslizamento entre as ligas de Cu-Zn e WC-CoCr. **Revista Matéria**, [S. l.], v. 23, ed. 4, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Ff4L73tntqTVbJxjrj33qCzC/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CZICHOS, H. **Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. 1. ed., Amsterdam: Elsevier, 1978, v. 1.

DESPLANQUES, Y.; ROUSSETTE, O.; DEGALLAIX, G.; COPIN, R.; BERTHIER, Y. Analysis of Tribological Behaviour of Pad–Disc Contact in Railway Braking. Part 1. Laboratory Test Development, Compromises between Actual and Simulated Tribological Triplets. **Wear**, [S. l.], v. 262, ed. 5, p. 582-591, 2007.

DIETERICH, J. H.; KILGORE, B. D. Direct Observation of Frictional Contacts: New Insights for State-Dependent Properties. **Pure and Applied Geophysics**, [S. l.], v. 143, p. 283- 302, 1994.

DOWSON, D. **History of Tribology**. 1. ed., England: Longman Group Limited, 1979, v. 1.

FRANÇA, T. S. **Avaliação de um tribômetro portátil fabricado na configuração pino-disco**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/48280/1/TCC%20>

HALLIDAY, D.; RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 1. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1996, v. 1.

HALLING, J. **Principles of Tribology**. 1. ed., London: Macmillan Press Ltd, 1975.

KATO, K. ADACHI, K., 2001. **Modern Tribology Handbook**. 1. ed., [S. l.]: CRC Press, 2000, v. 2.

MÄKI, R. **Wet Clutch Tribology - Friction Characteristics in Limited Slip Differentials**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Tecnologia de Lulea, Suécia, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286974385_Wet_clutch_tribology_-_Friction_characteristics_in_all-wheel_drive_differentials. Acesso em: 08 set. 2023.

OSTERMEYER, G.P. Friction and wear of brake systems. **Forschung im ingenieurwesen**, [S. l.], v. 66, p. 267-272, 2001.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. 2. ed. USA: John Wiley and Sons, 1995.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo fe-c-cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90838/ribeiro_r_me_ilha.pdf?se. Acesso em: 21 abr. 2023.

ROSAS, G. A.; OLIVEIRA, R. L. S. **Estudo comparativo do desgaste de flanco com e sem uso do fluido de corte na usinagem do aço SAE 4140 laminado a quente utilizando ferramenta de metal duro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/787/TCC%20finalizado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SANTANA, A. W. *et al.* **Desenvolvimento de um tribômetro com configuração mecânica “pin-on-disc” acessível, para implementação em laboratórios de universidades e centros educacionais**. Artigo de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/23890/9/Artigo%20Cientifico%20-%20DESENVOLVIMENTO%20DE%20UM%20TRIB%20METRO%20COM%20ONFIGURA%20MEC%20NICA%20PIN-ON->

DISC%20ACCESS%c3%8dVEL%2c%20PARA%20IMPLEMENTA%c3%87%c3%83O%20EM%20LABORAT%c3%93RIOS%20DE%20UNIVERSIDADES%20E%20CENTROS%20EDUCACIONAIS%20%28PDFA%29.pdf. Acesso em: 20 nov. 2023.

SEGU, D. Z. *et al.* Experimental characterization of friction and wear behavior of textured Titanium alloy (Ti-6Al-4V) for enhanced tribological performance. **IOP Science**, Korea, v. 8, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ac1ae6/pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

SILVA, L. M. C. **Projeto, fabricação, construção e testes de um tribômetro FZG reduzido com carregamento variável.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/32968>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte.** 1. ed. São Paulo: USP, 2005.

SKF. Rolamento 51104. **SKF®.** [S. l.]: 2023. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51104>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SKF. Rolamento 6002. **SKF®.** [S. l.]: 2023. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6002>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87073/212040.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 out. 2023.