

PROJETO DE UM TRIBÔMETRO LINEAR RECÍPROCO UTILIZANDO CONCEITO DE ANÁLISE DE FALHA E SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Maikon da Silva Emerim¹

Elvys Isaías Mercado Curi²

Resumo: No ambiente acadêmico é de grande importância a área de estudo da tribologia, que envolve o atrito e desgaste. Para medir estes fenômenos, é necessário um equipamento que gere movimentos que provoquem o atrito e desgaste, chamado de tribômetro. Porém, se torna difícil a aquisição deste, devido ao alto custo no mercado. Um tribômetro do tipo pino sobre disco projetado na instituição se mostrou útil para vários trabalhos de acadêmicos de Engenharia Mecânica trazendo bons resultados. Assim veio a necessidade de projetar um tribômetro para atender outro tipo de desgaste. Com o intuito de projetar um tribômetro linear *reciprocating* do tipo esfera sobre plano, é necessário utilizar variadas ferramentas de engenharia para realizar um projeto bem estruturado. Neste trabalho foram utilizadas ferramentas como: Análise de Modo de Falha (FMEA); Desenho Assistido por Computador (CAD); Análise pelo Método de Elementos Finitos (FEA). O objetivo deste trabalho é projetar um tribômetro linear *reciprocating* do tipo esfera sobre plano que tenha boa funcionalidade e atenda os requisitos da norma ASTM G133. Foram realizados cálculos para seleção de alguns componentes e foram utilizadas ferramentas para determinar as características do projeto. Também se utilizou o método de elementos finitos com o *software* Ansys® para validação dos componentes realizando análises estruturais e análises modais para verificar as frequências naturais. Os resultados obtidos foram satisfatórios e as ferramentas se mostraram úteis para as etapas do projeto. Futuramente pode-se dar sequência neste trabalho, construindo o tribômetro e realizando a instrumentação do mesmo.

Palavras-chave: Tribômetro. Tribologia. Projeto. Elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

A Tribologia estuda o comportamento do atrito, lubrificação e desgaste dos materiais em um sistema, que se delimita do meio ambiente com um volume de controle, determinando o 'tribosistema' (CZICHOS, 2009). Muitas vezes estas análises não são possíveis de serem realizadas onde elas ocorrem, portanto, se simula a realidade nos laboratórios usando diferentes tipos de máquinas de ensaios chamados de tribômetros. A dificuldade de obter as propriedades de atrito e desgaste dos materiais, de modo semelhante aos analisados, é um tema que traz à

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: maikon_emerim@hotmail.com

² Prof. Dr. Eng. Elvys Isaías Mercado Curi. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

tona várias discussões na indústria de equipamentos. Os materiais se comportam de diferentes maneiras em muitos casos depende de suas propriedades mecânicas: tais como dureza, deformação elástica e tensão de escoamento, em outros casos mais de como são produzidos seus movimentos, mecanismos de desgaste etc. Por isso, se torna difícil prever como se comportará cada material quando seu uso for exigido, devido ao fato de que nem sempre é possível reproduzir com muita fidelidade no laboratório a realidade do fenômeno a ser estudado. Para avaliar os fenômenos tribológicos com alta confiabilidade, são construídos diferentes tipos de tribômetros seguindo as recomendações das normas, estas orientam os requisitos que devem ter as máquinas para reproduzir as condições do tribosistema e gerar os mecanismos de desgastes e deslizamentos de modo que se consiga validar os experimentos que reproduzem na realidade com resultados confiáveis.

O desenvolvimento de uma bancada, que avalie o desgaste e atrito produzidos em movimentos com deslizamentos recíprocos, será de ampla utilidade para o laboratório de tribologia da Faculdade SATC, já que permitirá que os acadêmicos consigam ter resultados qualitativos e quantitativos do atrito e desgaste de diferentes materiais em deslizamento reto e recíproco.

Segundo a norma ASTM G133 (2016), o tribômetro de deslizamento recíproco, consiste em um pino que se desliza sobre um corpo de prova que está fixo na estrutura. O sistema em movimento recíproco é monitorado com instrumentos e/ou sensores que medem as forças, velocidade, temperatura, fim do curso e contabilizam as idas e voltas do pino. Uma bancada que reúna os requisitos da norma, e conte com instrumentos de medida confiáveis não teria dificuldade de construir com um projeto bem estruturado.

O projeto de um tribômetro que cumpra com as exigências da norma ASTM G133 é o objetivo desta pesquisa. O projeto considera a viabilidade de ser fabricado nas instalações da SATC, sendo que uma parte dos componentes pode ser usinado e o restante deve ser adquirido, tais como guias lineares mancais e motores elétricos, além dos elementos eletrônicos e elétricos. O projeto deve considerar alguns aspectos de automação em seu funcionamento. O produto permitirá viabilizar futuras pesquisas na área de tribologia.

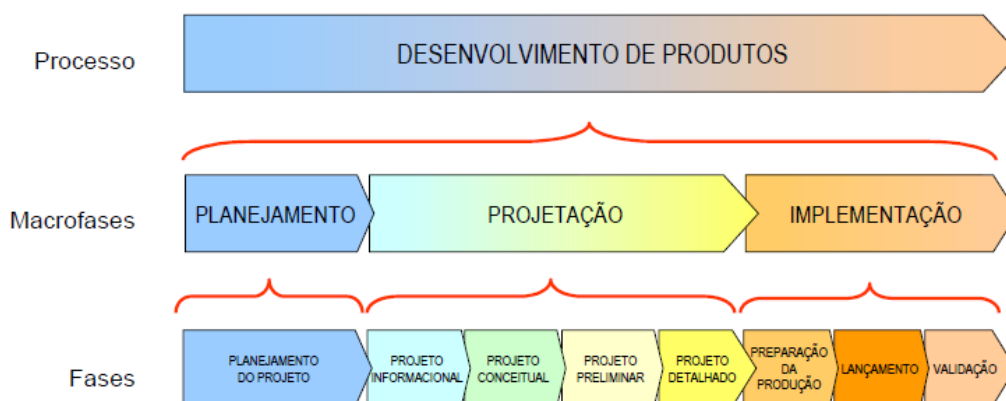
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos tópicos a seguir serão apresentadas informações de maior relevância para este trabalho.

2.1 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Segundo Romano (2003), o projeto é temporário e único, ou seja, um projeto é um esforço temporário realizado para criar um produto único. Por ser temporário, não significa que terá uma curta duração, mas terá um tempo finito, uma data de início e uma data em que será finalizado. O fim de um projeto pode ser alcançado de duas maneiras, quando os objetivos esperados foram atingidos ou quando se conclui que estes não podem ser alcançados, então o projeto é então interrompido. As fases do processo de desenvolvimento de produtos são apresentadas na Fig. 1.

Figura 1: Fases do processo de desenvolvimento de produtos.



Fonte: Adaptado de Romano (2003, p. 60)

De acordo com Romano (2003) o propósito da primeira fase é estabelecer as especificações de projeto do produto a ser desenvolvido. Na segunda fase, o objetivo é o desenvolvimento de concepções alternativas que atendam ao problema a ser resolvido, sendo esta fase denominada, em grande parte dos trabalhos, de 'projeto conceitual'.

O processo de desenvolvimento de produtos é caracterizado por sua complexidade principalmente devido ao aumento da quantidade de informações a serem utilizadas. Existem diferentes ferramentas usadas no desenvolvimento de produto, como por exemplo: *Computer-Aided Design*, CAD; *Computer-Aided*

Engineering, CAE; *Computer-Aided Manufacturing*, CAM; *Quality Function Deployment*, QFD; Teoria da Resolução Inventiva de Problemas, TRIZ. Na avaliação da eficiência de três tipos de modelos computacionais, o modelo de síntese de infraestrutura baseada em CAE, foi considerado o mais eficiente para a fase de concepção do projeto (HYO-SIG et al. 2009 apud ROSA, 2013).

A Teoria Inventiva Para a Solução de Problemas, TRIZ é um método inovador utilizado para a otimização do desenvolvimento. Enfatiza a real necessidade da definição do problema, para depois aplicar sua solução. Consiste em montar uma matriz morfológica ou tabela de problemas que visa estabelecer as possíveis e respectivas soluções para as necessidades dos clientes, determinadas previamente. Quando as avaliações mostraram diferentes estratégias para a solução dos problemas de simulação, para estes casos, é proposto a utilização de conceitos da matriz de Pugh, que avalia a melhor estratégia de solução (ROSA, 2013).

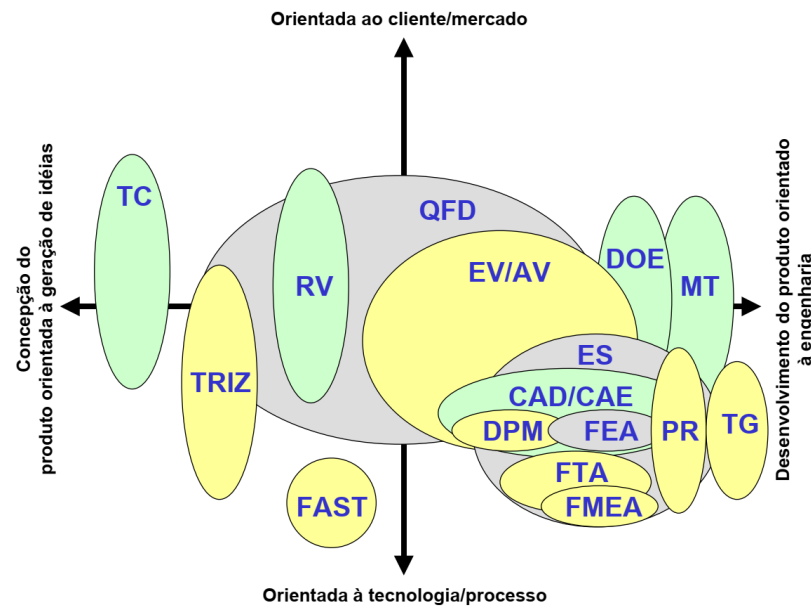
De acordo com Moura (2000), uma empresa em melhoria contínua de seus produtos, usa um programa de *Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA como uma técnica disciplinada para identificar e ajudar a eliminar problemas potenciais. A FMEA deve ser uma ação “antes do evento”, no momento oportuno de sua execução, e não um exercício “após o fato”, por isso deve ser realizada antes, no projeto ou processo do produto. Quando as alterações de processo/projeto são implementadas com maior facilidade e com menores custos, serão aliviadas as crises provocadas por alterações tardias. A FMEA é um resumo dos pensamentos da equipe de como um componente, subsistema ou sistema é projetado. Esta abordagem sistemática acompanha, formaliza e documenta a linha de pensamento que é normalmente percorrida durante o desenvolvimento de um projeto. A FMEA de projeto dá suporte ao desenvolvimento do projeto reduzindo os riscos de falhas.

A aplicação das técnicas CAE, CAD, CAM, incluindo métodos de simulação por *Finite Element Analysis*, FEA, reduziram esforços e custos no desenvolvimento de processos e a melhoria e otimização da qualidade das peças na cadeia de processos. A transformação dos dados CAD do componente no modelo FEA das peças em formação é de última geração, assim como a simulação coerente dos diferentes passos para a fabricação de componentes (DOHMANN, 2004).

Em 1997, Mañà realizou uma pesquisa em duzentas empresas americanas e europeias, com o objetivo de caracterizar a concepção moderna do

desenvolvimento de produtos a partir da identificação de técnicas, metodologias e métodos utilizados. A Fig. 2 mostra seus resultados, onde o tamanho da área identifica sua dimensão como característica de modernidade.

Figura 2: Foco de ação de diferentes técnicas, metodologias e métodos de desenvolvimento de produto.



Fonte: Adaptado de Mañà (1998) apud Silva (2001)

Com base em outros resultados das pesquisas se identifica como o principal fator de sucesso do processo de desenvolvimento de produtos o virtuosismo dos funcionários, é oportuno focar as competências de gestão e monitorá-las a partir de um sistema de medição de desempenho (SILVA, 2001).

2.2 TRIBOLOGIA

A tribologia define-se como a ciência e tecnologia da interação entre as superfícies em movimento e o estudo do atrito, desgaste e lubrificação. O movimento de uma superfície de um sólido sobre outra é muito importante para o funcionamento de vários tipos mecanismos (HUTCHINGS, 1992). O custo das deficiências relacionados ao atrito e desgaste são causados principalmente pela energia e material desperdiçados em praticamente todos os dispositivos mecânicos em operação. Se analisar em apenas uma máquina seu custo pode ser baixo, porém se somar todas as máquinas, pode somar um custo altíssimo. Por este motivo o

estudo da tribologia deve ser estudado profundamente, pois qualquer redução no atrito ou no desgaste gera uma economia significativa (STACHOWIAK et al., 2001).

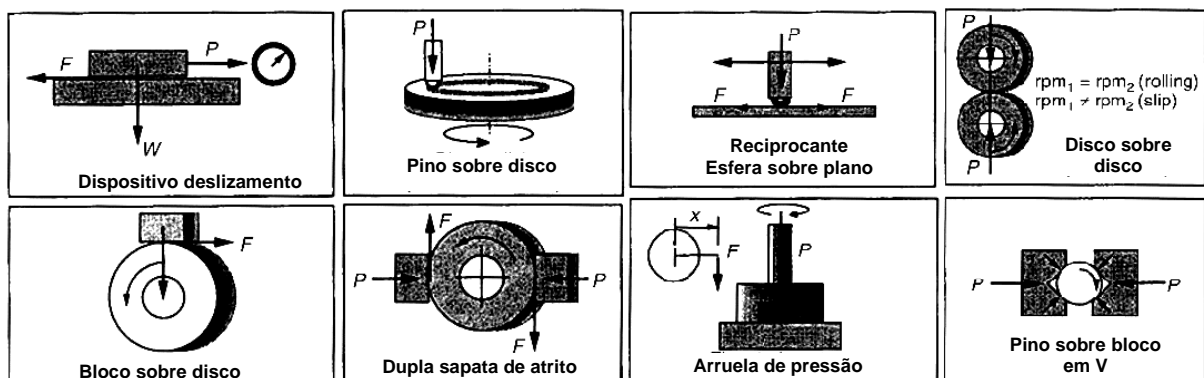
2.3 TIPOS DE TRIBÔMETROS

Segundo Chlum et al. (2010) o estudo do desgaste e atrito geralmente é feito por um instrumento conhecido como tribômetro, o qual cria um movimento entre dois corpos de prova que estão em contato. Este movimento gera um atrito e conseqüentemente um desgaste que será analisado posteriormente.

Blau (2008) reporta que em 1976, o agora chamado de Sociedade de Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação, STLE publicaram os resultados de uma extensa pesquisa de dispositivos de atrito e desgaste. A publicação continha 234 estudos de casos que classificadas baseadas na macro geometria de contato são: múltiplas esferas; cilindros cruzados; pino sobre plano; plano sobre plano; pinos rotativos sobre disco (face carregada); pino sobre disco rotativo (face carregada); cilindro sobre cilindro (face carregada); cilindro ou pino sobre cilindro rotativo (carregado pela extremidade); plano retangular sobre cilindro rotação (carregado pela extremidade); disco sobre disco; entre outros.

Os tribômetros de atrito estático caracterizam a resistência ao movimento iminente, os de medida do atrito cinéticos compreendem uma ampla gama de condições de operação, variando de deslizamento unidirecional de velocidade constante até máquinas de articulação com uma série complexa de acelerações, desacelerações e mudanças de direção (BLAU, 2008). Oito tipos comuns de tribômetros são mostrados na Fig. 3.

Figura 3: Exemplo de tribômetros usados para a medida do coeficiente de atrito



Fonte: Adaptado de Blau (2008).

Os tribômetros disponíveis são variados e em alguns casos, os procedimentos de ensaios não são regidos por normas específicas. Na Tab. 1 se descreve os principais tribômetros de laboratório para testes simplificados básicos, mas são capazes de simular os diferentes mecanismos de desgaste. A lista dos tribômetros considera o processo e mecanismo de desgaste a simular. Para os ensaios é necessário verificar a validade dos ensaios executados, ou seja, se o mecanismo de desgaste evidenciado pela amostra e ensaio é o mesmo que o encontrado nos componentes reais.

Tabela 1: Tribômetros e mecanismos de desgaste

Nome do ensaio	Norma	Processo realizado	Mecanismo de desgaste	Tipo do atrito realizado
Pino sobre disco	ASTM G99	Medida do desgaste por deslizamento	Desgaste adesivo, desgaste Tribo-oxidativo.	Seco e lubrificado
Bloco - disco	ASTM G77	Medida do desgaste por deslizamento	Desgaste adesivo, desgaste Tribo-oxidação	Seco
Bloco - disco	ASTM D 2714	Medida do coeficiente de atrito lubrificado	Desgaste Tribo-oxidação	lubrificado
Disco sobre disco	-	Medida do desgaste por rolamento deslizante	Fadiga por contato, aderência tribo-oxidação	Seco e lubrificado
4 esferas	D 5183 – 05	Desgaste por rolamento	Fadiga por contato	Coefficiente de atrito do lubrificante
Teste de abrasão de pinos		Abrasão em alta tensão	Desgaste do abrasivo	Seco
Teste de desgaste de roda de borracha e areia seca	ASTM G65	Desgaste abrasivo em baixa tensão	Desgaste do abrasivo	Seco
Linear recíprocante esfera sobre plano	ASTM G133	Desgaste por deslizamento	Desgaste adesivo, desgaste Tribo-oxidativo.	Seco e lubrificado

Fonte: Adaptado de Straffelini (2015) e Blau (2008)

De acordo com a norma (ASTM G133, 2010) um tribômetro com movimento recíproco linear é definido como um aparelho que contém um corpo de prova de formato esférico que desliza sobre outra plana com um movimento de ida e volta

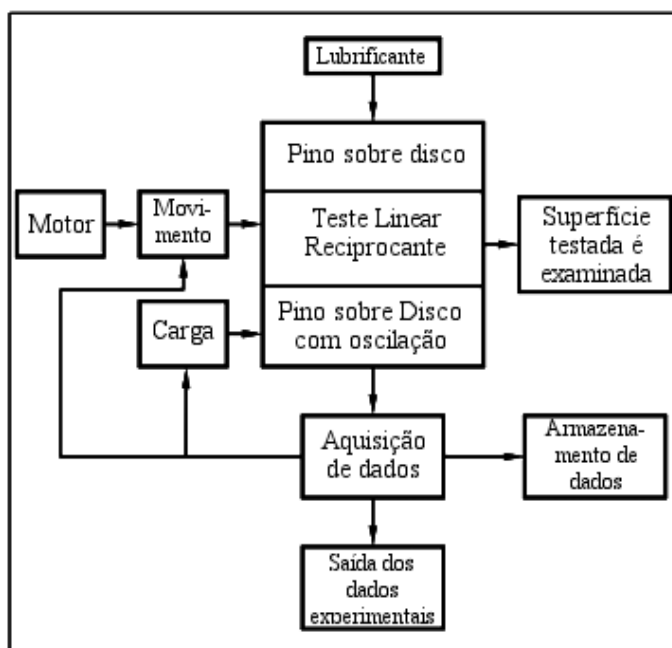
percorrendo uma linha reta sobre a superfície plana. Exemplos de possibilidades de desgaste de alguns corpos de prova após do teste são mostrados na Fig. 4.

Segundo Druet et al. (2001) O princípio fundamental do tribômetro recíproco é gerar atrito e observar seu comportamento e resultados. Três elementos caracterizam o método experimental:

- O modelo físico;
- O dispositivo usado para gerar o atrito;
- O procedimento experimental.

O projeto e construção de um Tribômetro com movimento circular e alternativo é proposto por Marjanovic et al. (2006) considerando uma concepção moderna a qual permite três tipos de ensaios de desgaste: pinos no disco, ensaios alternativos circulares recíprocos e também lineares, para o estudo do atrito e desgaste com e sem lubrificante. O equipamento tem um motor de passo DC, que suporta o pino que ocasiona movimentos parciais na parte superior e outro motor na parte inferior que complementa com outros movimentos aos corpos de prova. A Fig. 4 e a Fig. 5 mostram o esquema de funcionamento do equipamento que funciona para três tipos de ensaios.

Figura 4: Concepção e imagem do tribômetro a) esquema do funcionamento, b) foto da parte superior,



(a)



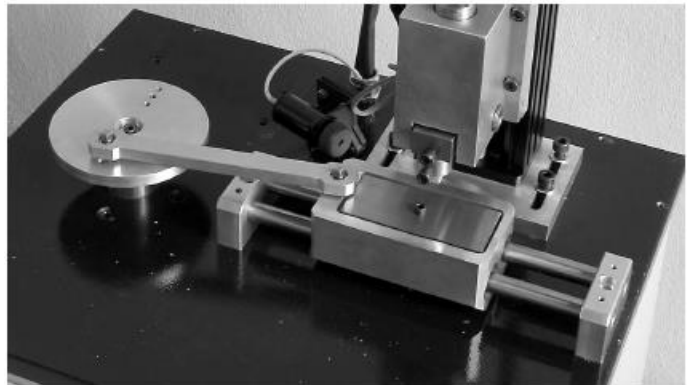
(b)

Fonte: Adaptado de Marjanovic et al. (2006).

Figura 5: Concepção e imagem do tribômetro a) motor na parte inferior, b) mecanismo de movimento



(a)

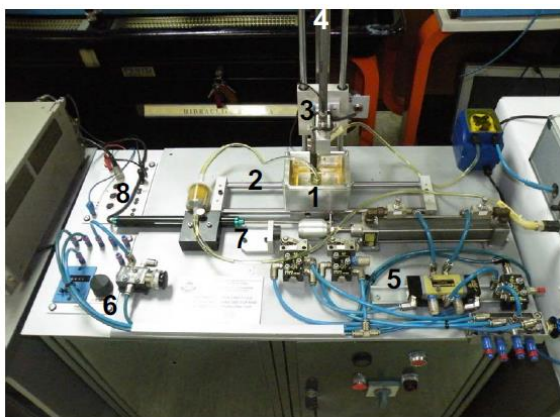


(b)

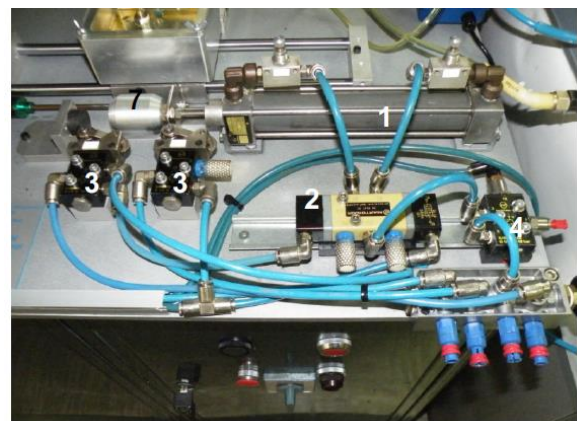
Fonte: Adaptado de Marjanovic et al. (2006).

Segundo Macuzic *et al.* (2011) o estudo da contaminação do óleo em sistemas hidráulicos pode ser estudado com um tribômetro, para aprimorar os sistemas hidráulicos usados em processos de produção e controle de transmissão de energia. Os parâmetros mais importantes são força de atrito, deslocamento, velocidade e vibração, os resultados mostram que o coeficiente de atrito se modifica entre um ensaio e outro, de modo que é necessário determinar o valor médio e desvio padrão para interpretar seu funcionamento. A importância destes parâmetros será considerada no projeto. A Fig. 6 mostra o tribômetro recíprocante para sistemas hidráulicos.

Figura 6: Esquema hidráulico pneumático de um tribômetro, (MACUZIC *et al.*, 2011).



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Macuzic *et al.* (2011).

De acordo com a repetição periódica dos sinais medidos, se fez necessário determinar os parâmetros que descrevem a tendência de mudança na força de atrito (coeficiente de atrito). Para cada ciclo, o valor máximo do atrito (parte positiva e negativa) foi determinado. Os valores para cada ciclo foram a média para medir intervalos de 50 segundos ou cerca de 100 ciclos. Estes três parâmetros se utilizaram para definir a tendência do coeficiente de atrito durante experimentos tribológicos.

No estágio atual de desenvolvimento, os sistemas hidráulicos são frequentemente utilizados em processos de produção e controle de transmissão de energia. Para realizar investigações laboratoriais de fenômenos que caracterizam os processos, desenvolve-se uma forma especial de tribômetro, que permite a simulação de diferentes condições reais em sistemas hidráulicos e outros sistemas similares que utilizam óleos de lubrificação, bem como monitoramento de um grupo definido de parâmetros de diagnóstico.

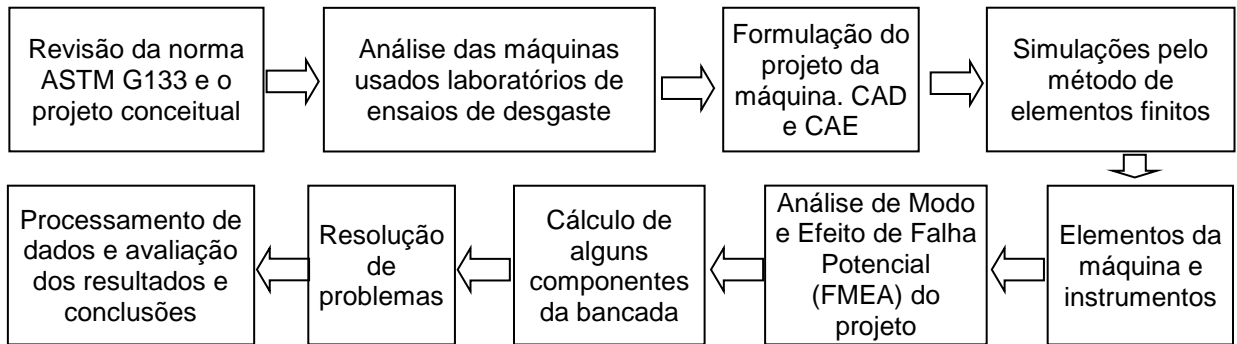
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a proposta conceitual se utiliza as ferramentas para desenvolvimento de produtos como a desenho assistido por computador, CAD, criando a geometria inicial das peças e componentes da máquina em 2D e 3D. Para dimensionar os componentes é utilizado o método de engenharia assistido por computador, CAE, realizando-se as análises de tensão estática e dinâmica com o método de elementos finitos, FEA utilizando o *software* Ansys®, para verificar as tensões e frequências dos componentes do projeto. Na sequência, são considerados os aspectos relacionados aos instrumentos de medida e funcionamento. Para verificar o funcionamento com maior confiabilidade se utiliza o método FMEA, com o propósito de identificar e eliminar problemas potenciais.

O diagrama da Fig. 6, mostra a sequência das atividades que foram realizadas durante o processo de desenvolvimento de produtos e formulação do projeto. O processo de desenvolvimento se inicia com a pesquisa de outras máquinas que funcionam com movimentos alternativos e a norma ASTM G133, logo é analisado o funcionamento para formular as propostas iniciais da forma e dimensão da máquina usando conceitos de CAD e cálculos básicos. A proposta é

avaliada com conceitos de FMEA, FEA e cálculos estáticos assim como cálculos dinâmicos fazendo alterações quando é detectada uma possibilidade de falha ou mau funcionamento, concluindo com a resolução dos problemas detectados.

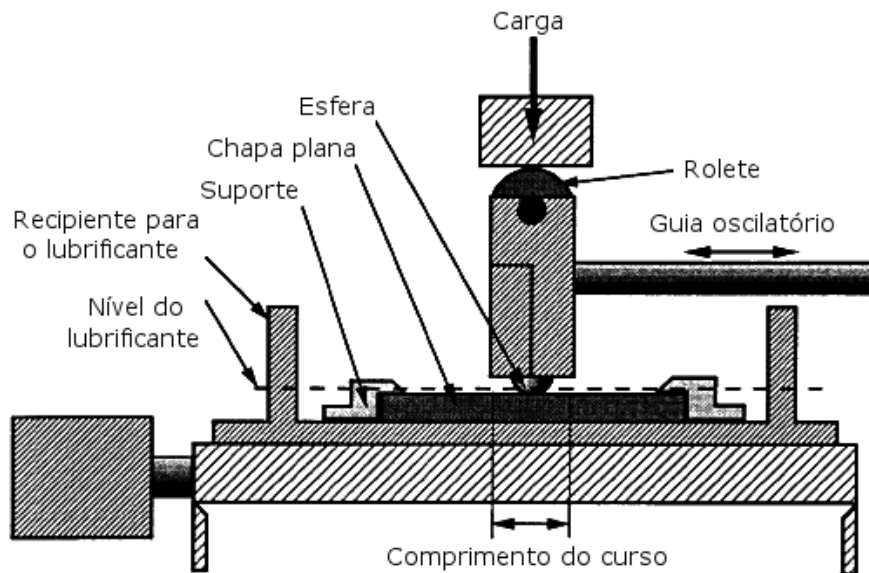
Figura 6: Sequência das atividades para o desenvolvimento do projeto.



Fonte: Do autor (2018).

Para desenvolver o projeto da bancada do tribômetro recíprocante, seguindo as indicações da norma ASTM G133, se tem o modelo padrão dos componentes o qual é mostrado na Fig. 7.

Figura 7: Componentes do tribômetro segundo a norma ASTM G133.



Fonte: Adaptado da norma ASTM G 133

O tribômetro, segundo a norma (ASTM G133, 2010) consiste em um pino que desliza linearmente sobre um corpo de prova suportado na estrutura que tem seu sistema recíprocante instrumentado com sensores e elementos em movimento

os quais estão interconectados como um projeto bem estruturado. Para o projeto conceitual se complementa a informação de outros modelos de tribômetros observados na revisão bibliográfica. O projeto considera a estrutura, componentes mecânicos, hidráulicos e instrumentos de medida, procurando ter uma máquina eficiente e funcional.

De acordo com a pesquisa realizada, foram observados na revisão bibliográfica e em catálogos e sites de fabricantes com o equipamento em operação, diferentes mecanismos de funcionamento para o tribômetro recíprocante, com a possibilidade de colocar sistemas com uma parte em movimento com pino ou com disco, e a outra parte sem movimento. Foram analisados e comparados cada um dos tribômetros descritos anteriormente para o projeto em estudo, considerando cada opção, abordando qual seria a melhor proposta para cada elemento do projeto, utilizando-se a Teoria Inventiva Para a Solução de Problemas, TRIZ, e chegou-se à conclusão de qual utilizar conforme indicado no Qd. 1.

Quadro 1 – Análises dos mecanismos para a formulação do projeto da bancada.

Proposta 1		Proposta 2	
Pino fixo e base em movimento, com célula de carga quem mede a força de atrito na base.	Sim	Base fixa e pino em movimento, com célula de carga quem mede a força de atrito entre o pistão e o suporte do corpo de prova.	Não
Suporte do corpo de prova para ensaios apenas em seco.	Não	Suporte do corpo de prova para ensaios apenas em seco e lubrificado com base hermética.	Sim
Carga com alavanca que apoia uma parte da barra no pino e no extremo a carga.	Não	Carga direta acima do corpo de prova.	Sim
Movimentado com um mecanismo de motor rotativo e biela e curso graduável com o raio da biela.	Não	Movimentado com um sistema pneumático com curso graduável no dispositivo de funcionamento e fim de curso.	Sim
Sistema de fixação do corpo de prova com parafusos no corpo de prova.	Não	Fixação com aperto exterior nos extremos com chapas que mordem o corpo de prova.	Sim
Funcional para converter em ensaios com movimentos recíprocantes e circulares do tipo pino sobre disco.	Não	Funcional apenas para realizar ensaios com movimentos recíprocantes.	Sim
Sem célula de carga na base para a medida da carga normal, já que o peso é constante.	Não	Com célula de carga na base para a medida da carga normal.	Sim
Sem medida da posição espacial do elemento em movimento em função do tempo.	Não	Com medida da posição espacial do elemento em movimento em função do tempo.	Sim
Funcionamento manual controlado com interruptores para seu funcionamento	Não	Funcionamento automatizado controlado pelo computador com um software.	Sim

Fonte: Do autor (2018)

Como apresentado no Quadro 1, foram selecionadas as propostas que melhores se adequariam ao projeto, tendo como objetivo uma bancada com bom funcionamento e que atende os requisitos descritos na norma.

Para os testes com o tribômetro, existem dois tipos procedimentos descritos na norma ASTM G133, o ensaio não-lubrificado e o ensaio lubrificado, apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Procedimentos de ensaios do tribômetro recíproco.

Descrição	Procedimento A:	Procedimento B
Tipo de ensaio	Teste de desgaste não lubrificado na temperatura ambiente.	Teste de desgaste lubrificado em temperatura elevada.
Raio do pino,	4,76 mm	4,76 mm,
Força normal	25,0 N	200,0 N
Comprimento do curso	10,0 mm	10,0 mm,
Frequência de oscilação	5,0 Hz	10,0 Hz
Duração do teste	16 min 40 s (distância de deslizamento 100 m)	33 min 20 s (distância de deslizamento 400 m)
Temperatura ambiente	22 ± 3°C	150 ± 2°C
Umidade relativa	40 até 60 %,	40 até 60 %
Lubrificação	Não aplicado	Imersão total no lubrificante selecionado.

Fonte: Adaptado da norma ASTM G133

Considerando os dados indicados na norma ASTM G133 da carga, percurso, velocidade, condição lubrificada e não lubrificada se seleciona os equipamentos a ser usados. Foram tomadas as dimensões das células de carga e suas capacidades, cilindro pneumático e os demais componentes. Foram utilizados catálogos para definir os componentes a serem utilizados avaliando as dimensões apropriadas. Para ser possível definir o motor que será utilizado, foi realizado o cálculo da rotação e torque necessário a partir da carga e velocidade que ensaio poderia suportar. Para calcular a velocidade foi utilizado a Eq. 1 mostrada abaixo.

$$v = \frac{x}{t} \quad (1)$$

Onde:

v = velocidade (m/s);

x = deslocamento por ciclo (m);

t = tempo para realizar o ciclo (s).

Definindo a velocidade do ensaio, foi calculada a rotação que se deveria aplicar para atingir está velocidade. Sabendo o passo do fuso que realizará o movimento, que é igual ao avanço, foi possível calcular a rotação do motor. Neste projeto foi selecionado o fuso de esferas de avanço rápido com um passo de 16 (mm) para a velocidade máxima de 0,2 (m/s). Para o cálculo foi utilizada a Eq. 2.

$$n = \frac{v}{f \times 60} \quad (2)$$

Onde:

n = rotação por minuto (rpm);

v = velocidade (m/s);

f = avanço (m/rev).

O projeto da máquina se dividiu em três áreas: mecânica, eletroeletrônica e informática. Como parte mecânica, se realizou o projeto computacional a partir de um *software* CAD usando como referência outros modelos já existentes e baseando-se na norma que determina os parâmetros deste tipo de tribômetro. Após se utilizou o método de análise por elementos finitos FEA para a melhoria do projeto, o análise estática e dinâmica da proposta original. Continua-se a avaliar o funcionamento com o método de FMEA, para avaliar potenciais falhas enquanto o projeto é realizado, fazendo melhorias quando for necessário, para que não ocorram problemas no funcionamento do tribômetro.

Para definir a força de atrito foi estimado um coeficiente de atrito de 0,8 de acordo com dados encontrados em outros experimentos sobre atrito entre dois aços. Para o cálculo da força de atrito deve ser utilizada a Eq. 3.

$$F_{at} = \mu \times N \quad (3)$$

Onde:

F_{at} = força de atrito (N);

μ = coeficiente de atrito;

N = força normal (N).

Utilizando o método FEA com o *software* Ansys® é possível obter as frequências naturais através da análise modal. Para determinar a frequência natural é utilizada a Eq. 4, onde o *software* realiza os cálculos e apresenta as frequências naturais.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Onde:

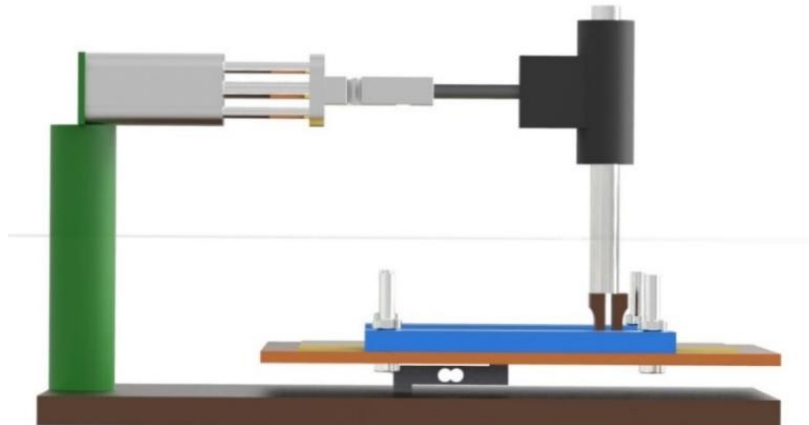
ω = frequência natural (rad/s);

k = constante elástica da mola (N/m);

m = massa (kg).

A Fig. 8 descreve uma primeira proposta de bancada, onde o pino tem o movimento recíprocante e sua força é medida com uma célula de carga de tração e o corpo de prova é fixado sobre um suporte com sua respectiva célula de carga que mede a força normal da superfície.

Figura 8: Primeira proposta conceitual do tribômetro recíprocante.



Fonte: Do autor (2018)

Durante os testes os dados da força de atrito, coletados pelas células de carga, serão transmitidos para um computador, do mesmo modo outros sensores serão incluídos no projeto para medir os parâmetros mais relevantes do ensaio. Para gerar o movimento do corpo de prova, será utilizado um motor elétrico ou um sistema de acionamento pneumático. Para gerar a força normal à superfície em deslizamento se aplicará cargas com o peso acima da superfície, com alavanca, com molas graduáveis, com sistemas hidráulicos ou pneumáticos.

Utilizando a ferramenta de FMEA logo no projeto é possível prever quais falhas podem ocorrer durante o funcionamento e visualizar melhorias que podem ser empregadas. Este método foi aplicado e pode ser visto na Tab. 3.

Tabela 3: Matriz morfológica

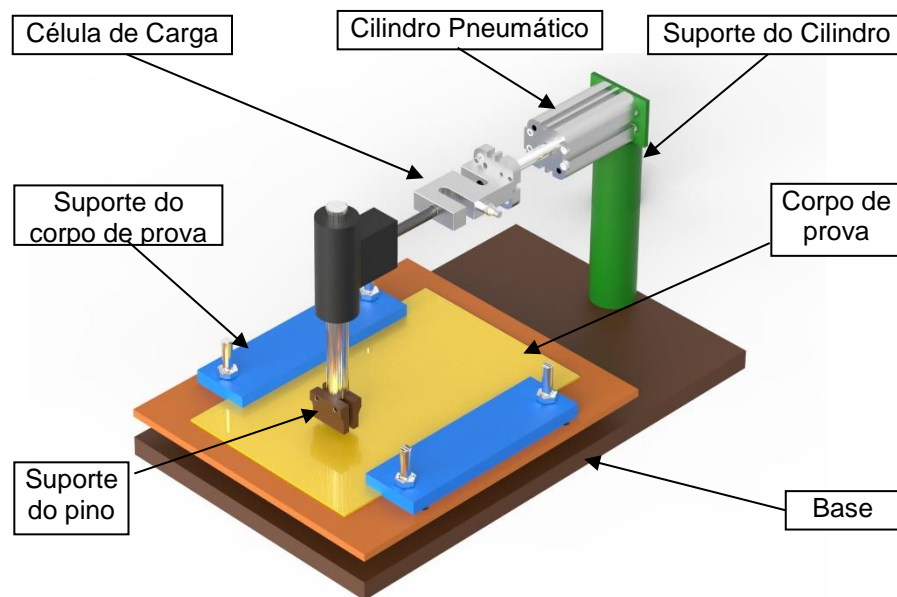
Requisitos	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Evitar colisões no eixo X do tribômetro	Sensor de parada	Programar para parar quando exceder uma corrente	Instalar dispositivo mecânico de fim de curso
Segurança do usuário contra risco de choque elétrico	Implementar disjuntor residual contra choque elétrico	Utilização de conectores isoladores em cabos elétricos	
Segurança do usuário contra risco de acidentes físicos	Instalar grade de proteção no tribômetro	Instalar sensor que detecta grade de proteção fechada	
Garantir movimento sem grandes variações	Motor com acionamento elétrico	Acionamento pneumático	
Evitar quebra da célula de carga por meio de sobrecarga	Programar célula de carga para não ligar com excesso de carga		
Indicar a capacidade máxima do acionamento na elevação do atrito do fuso e guia linear	Instalar sensores de corrente no sistema eletroeletrônico		

Fonte: Do autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A proposta do projeto conceitual, considerando as recomendações da norma ASTM G133 e os observados nos modelos de tribômetros alternativos, permitiu propor um protótipo que se apresenta na Fig. 9.

Figura 9: Concepção inicial do projeto do Tribômetro com movimento relativo no pino no Solid Edge®.

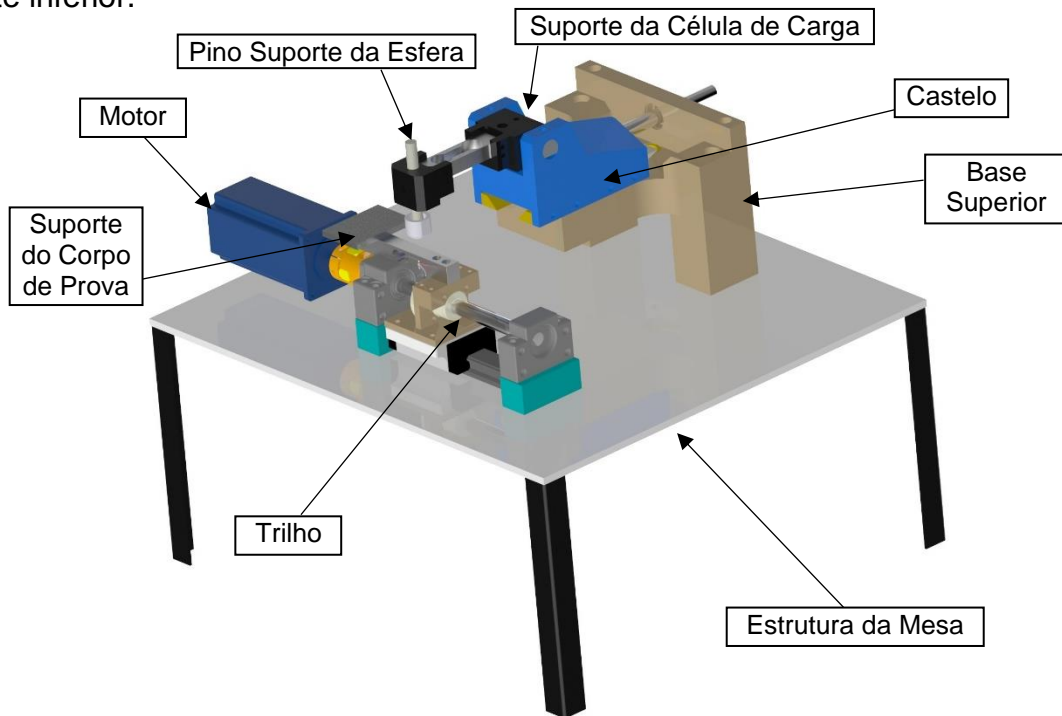


Fonte: Do autor (2018)

Usando conceito de FMEA se observou que se o movimento recíproco se realiza no pino com um braço comprido, o suporte do pino torna-se mais instável, pelo que se produziria vibrações que afetariam os resultados dos ensaios. De acordo o que foi observado em outros tribômetros com o mesmo conceito poderia ocorrer uma instabilidade criada pelo movimento da esfera, que em contato com as rugosidades, provocariam pequenos e permanente impactos. O tribômetro do tipo pino sobre disco tem o pino fixo e seu disco em movimento, com a célula de carga instalada no suporte do pino.

O projeto conceitual modificado se mostra na Fig. 10, onde o sistema de movimento recíproco se produziria no corpo de prova, ficando o pino fixo e a base em movimento, facilitando a medida da força de atrito devido à célula de carga estar diretamente ligada à direção do movimento. O movimento da base se produziria com um motor de passo que transfere seu movimento através de um acoplamento para um fuso de esferas e um patim guiado em um trilho.

Figura 10: Projeto modificado do Tribômetro com movimento relativo na parte inferior.



Fonte: Do autor (2018)

Para a mesa suporte o projeto considera uma chapa de 6 mm de espessura e cantoneiras de 22x22x6 (mm) com aço ASTM-A36. Para a validação do modelo foi utilizado o método de elementos finitos com o *software* Ansys®. Primeiramente foi realizada uma análise modal livre, para verificar se o modelo estava com os contatos corretos no *software*, foi verificado que as peças estavam corretamente desenhadas e posicionadas. O próximo passo realizar a análise modal pelo método FEA utilizando o *software* Ansys® para avaliar os modos de vibrar da bancada, onde foram analisadas as frequências naturais para verificar se ocorreria o fenômeno da ressonância. A Tab. 4 apresenta os valores da simulação para os modos de vibrar do modelo.

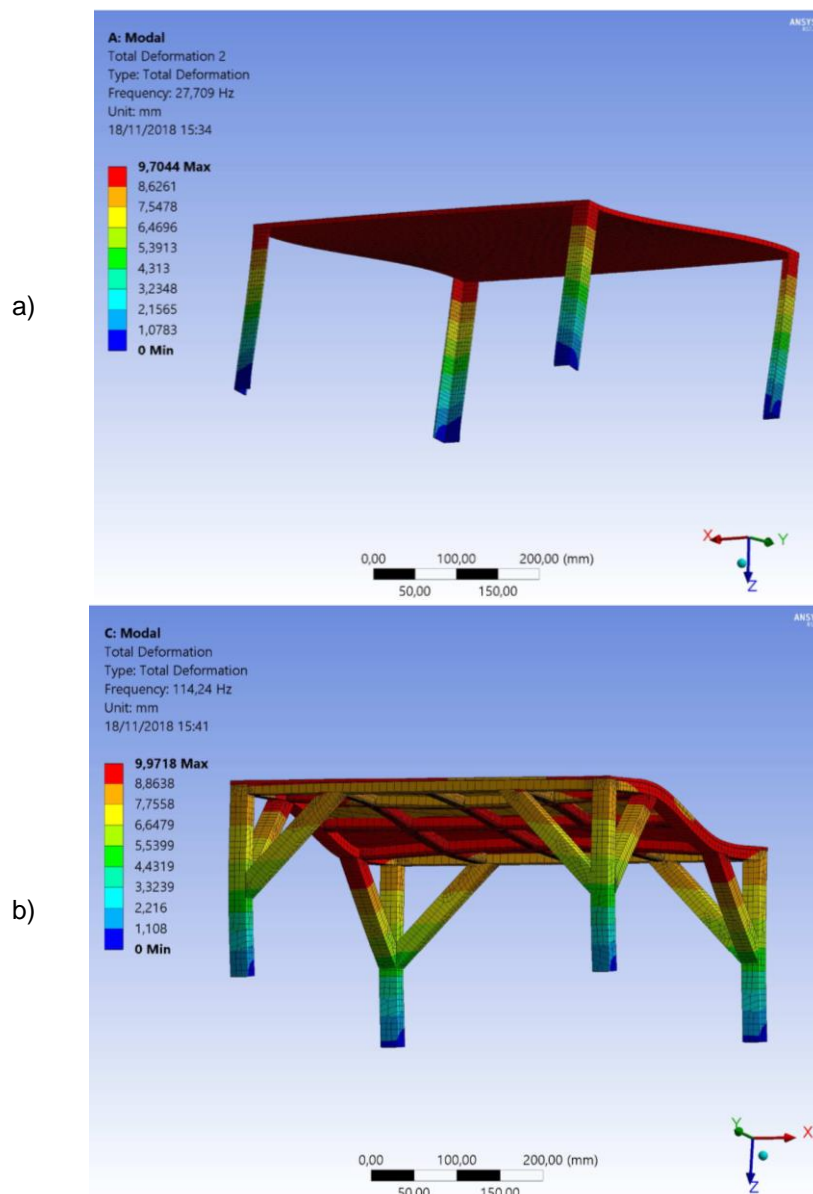
Tabela 4: Modos de vibrar da primeira proposta da bancada.

Modo de vibrar	1	2	3	4	5	6
Frequência (Hz)	27,709	52,092	63,896	72,301	133,75	135,22
Direção	Y	X	Z	Torção Z	Torção X	Torção Y

Fonte: Do autor (2018)

Em razão de que os valores da frequência natural ficaram muito próximos a frequência de excitação, que de acordo com o cálculo utilizando a Eq. 2, chegou-se a um valor de 12,5 (Hz), e esta proximidade pode coincidir com algumas frequências harmônicas ou múltiplos destas em seu funcionamento, então, foi definido que deveria ser proposta uma estrutura mais robusta para evitar possíveis frequências de ressonância. A Fig. 11 apresenta a simulação por elementos finitos da primeira proposta e a melhoria que foi realizada.

Figura 11: (a) análise modal da primeira proposta da mesa (b) análise modal da mesa modificada.

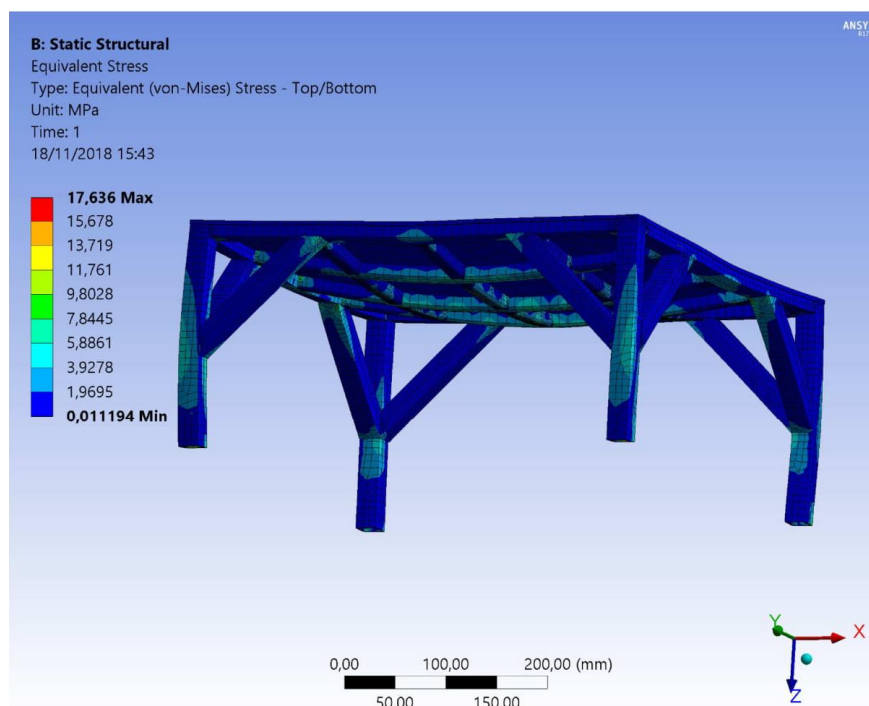


Fonte: Do autor (2018)

Na Fig. 11 (a) vemos que a frequência natural da mesa encontrada ficou muito próxima à frequência de excitação, onde o primeiro modo de vibrar ocorreu com uma frequência de 27 (Hz), o que poderia gerar uma vibração, influenciando o resultado final do corpo de prova a ser ensaiado. Sendo assim, foram adicionados reforços na estrutura e alterado a geometria de algumas partes. Para a chapa da mesa foi mantida a espessura de 6 mm. Nos pés de apoio foram utilizados tubos com medidas de 22x22x3 (mm) com aço ASTM A36. Conforme mostra a Fig. 11 (b), a frequência natural do primeiro modo de vibrar se distanciou da frequência de excitação, com o valor de 114 (Hz), tornando a mesa mais rígida e afastando-se das vibrações de ressonância.

Também foi realizada uma simulação estrutural estática, onde foram analisadas as tensões máximas para saber se excederia as tensões de escoamento. Como o dado de entrada, foi admitido uma força de 550 (N), aplicada na face superior da mesa. Este valor foi estimado com o peso que deveria ter os componentes da bancada somando-se a carga fixa do ensaio de acordo com a norma. Os resultados da simulação são mostrados na Fig. 12.

Figura 12: Análise estrutural da bancada após a melhoria.

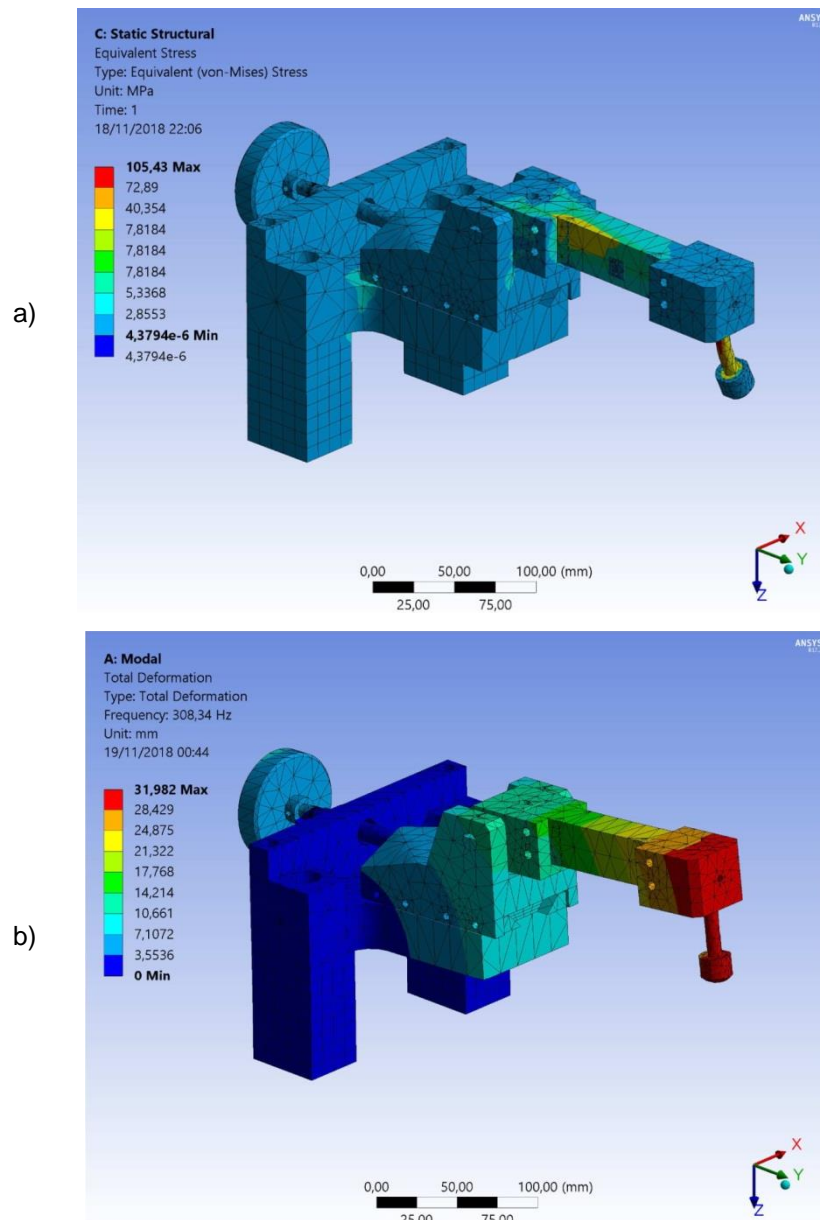


Fonte: Do autor (2018)

Conforme a Fig. 12, o valor da tensão máxima pelo critério de von Mises obtido através do Ansys® pelo método de simulação de elementos finitos foi de 17,6 (MPa), com deformação máxima de 0,43085 (mm) pelo que a mesa suportaria com pouca deformação e distante do limite da tensão de escoamento que é de 280 (MPa), tendo assim um elevado coeficiente de segurança.

Foi realizada uma simulação na parte superior que suportará a célula de carga, o pino e o peso conforme mostra a Fig. 13.

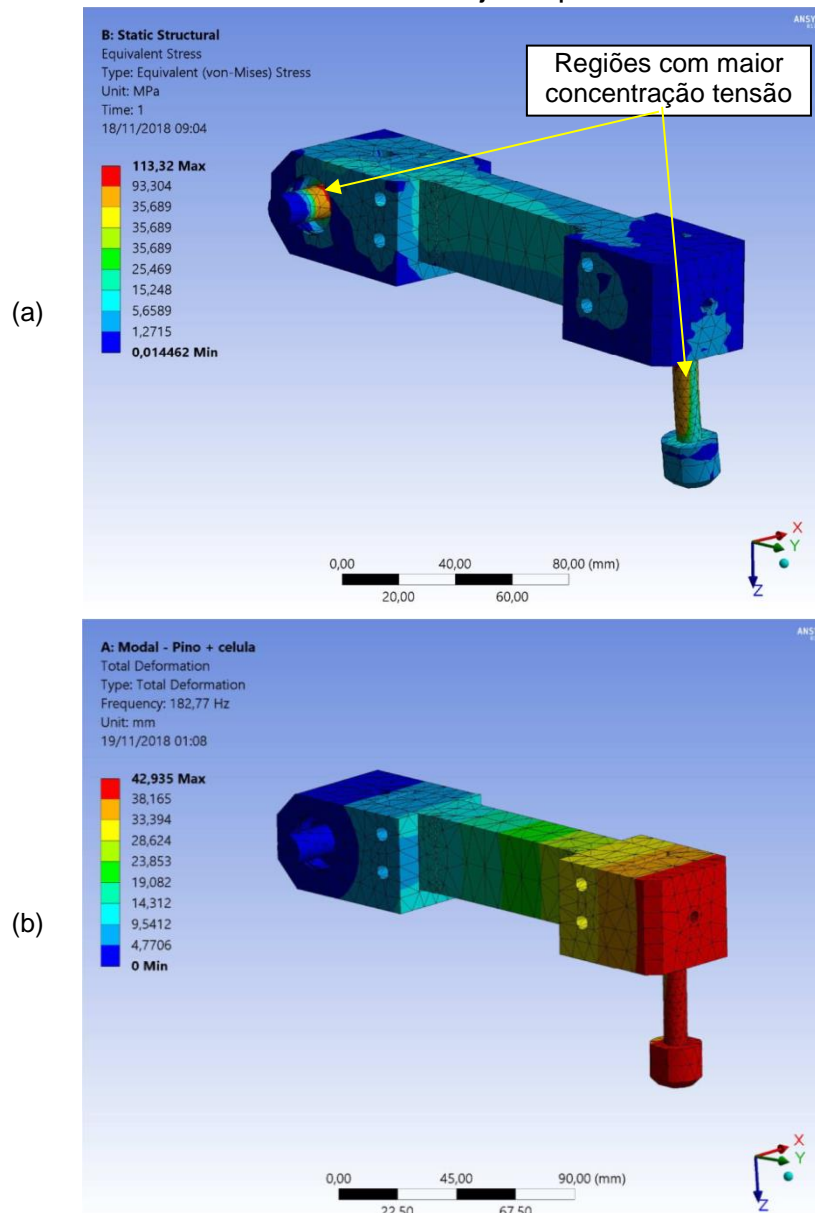
Figura 13: (a) análise estrutural da parte superior; (b) análise modal da parte superior



Fonte: Do autor (2018)

Como dado de entrada foi considerado uma carga máxima de acordo com o ensaio de 200 (N), no eixo Z, também foi estimado um coeficiente de atrito máxima de 0,8 com base em ensaios realizados entre dois metais, gerando uma força de atrito de 160 (N) no eixo X utilizando a Eq. 3. Como se mostra na Fig. 13 (a), nenhuma região ficou uma tensão elevada, e a análise modal apresentada na Fig. 13 (b) resultou numa frequência natural de 308 (Hz). É possível ver na simulação que há uma região com maior tensão na parte do pino que suporta a esfera, que será mostrado com mais detalhes na Fig. 14.

Figura 14: (a) análise estrutural conjunto pino e célula de carga e (b) análise modal do conjunto pino e célula de carga.

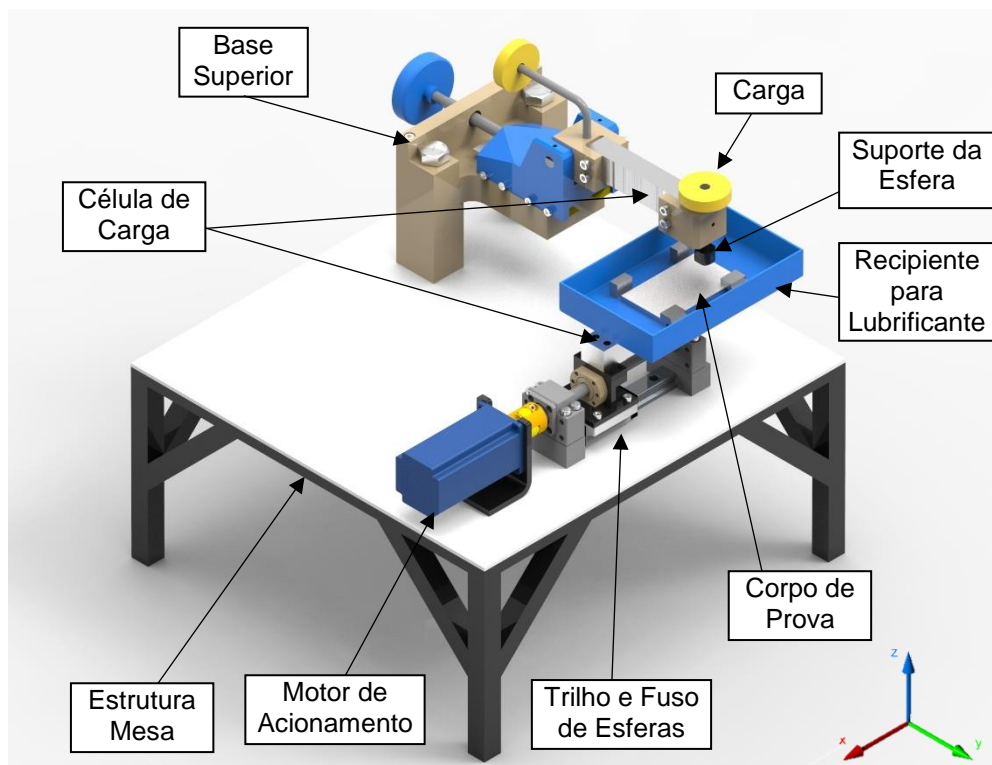


Fonte: Do autor (2018)

Foi realizada uma simulação no conjunto que suporta o pino e a célula de carga para verificar se haveria frequência de ressonância e se ultrapassaria a tensão de escoamento. Foi aplicada uma força de 200 (N) que é a força máxima do ensaio de acordo com a norma G133 e foi aplicada uma força no eixo X simulando a condição da força de atrito. Foi estimado neste caso um coeficiente de atrito de 0,8 que gerou uma força de atrito de 160 (N) utilizando a Eq. 3. Como se mostra na Fig. 14 (a), as regiões com maior tensão ocorreram em dois pontos, porém, não excedeu a tensão de escoamento e resulta em um alto coeficiente de segurança. Na Fig. 14 (b) foi realizada a análise modal, na qual se foi fixado a região do pino de articulação assemelhando-se a situação real, a frequência natural do modelo foi de 182,77 (Hz), que se mostrou distante da frequência de excitação, mostrando que não haveria ressonância.

Após serem realizadas as simulações, construiu-se então o modelo final em *software* CAD 3D, onde verificou se não haveriam interferência na montagem e movimentação dos componentes. A Fig. 16 mostra o tribômetro em sua proposta final.

Figura 15 – Proposta final do tribômetro desenhado em *software* CAD 3D.



Fonte: Do autor (2018)

O projeto final da bancada se mostrou funcional. Foram realizadas simulações do movimento para verificar se haveria choque ou interferência entre as peças e verificou-se que não ocorreriam problemas na movimentação. O motor definido foi um motor de passo NEMA 23 com capacidade de torque radial de 7kg e que atingiria a rotação que foi calculada para o ensaio lubrificado de 750 (rpm) e para o ensaio não lubrificado de 375 (rpm).

5 CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento de um produto existem diferentes métodos e técnicas recomendados. Para o desenvolvimento do projeto de uma máquina o mais recomendável seria usar as ferramentas de CAD e FEA. Para a proposta inicial da configuração da máquina se utilizou algumas ideias de tribômetros que foram obtidos de diferentes laboratórios e foram confrontados com o tribômetro pino sobre disco construído na SATC e que funciona de modo satisfatório. Conceitos de TRIZ foram utilizados para definir entre diferentes possibilidades de tecnologias e mecanismos de funcionamento e foram selecionadas as alternativas que se mostraram a melhor proposta ou a de melhor aplicação. Os conceitos de QFD foram utilizados considerando à norma ASTM G133 como as exigências do cliente principal e se adicionou as tecnologias usadas em outros tribômetros de movimento alternativo, principalmente na parte de instrumentação e automatização da máquina.

Para as análises do projeto preliminar de funcionamento da máquina, foi possível verificar que as ferramentas FMEA, utilizadas no projeto, se mostraram muito eficientes para a análise da funcionalidade da máquina, pois é possível prever as falhas que podem ocorrer e corrigi-las antes que realmente apareçam no produto.

A análise de elementos finitos com o *software* Ansys® mostrou que o projeto atende aos critérios de tensão de escoamento dos materiais em estudo. Análise modal auxiliou na definição de uma nova estrutura do tribômetro, bem como os principais componentes do projeto, evitando que ocorram futuramente os fenômenos de ressonância.

O projeto final mostrado na figura 15 mostra uma máquina de fácil manipulação, preparado para ser instrumentado e medir os parâmetros mais

importantes de atrito e desgaste, assim como também para sua automatização para ligar e desligar o motor, conta de número de ciclos e detecção do fim de curso.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode se dar continuidade e realizar a fabricação e instrumentação da bancada, como temas para outros acadêmicos.

REFERÊNCIAS

ASTM G133-05(2016), **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016,

BLAU, Peter J, **Friction science and technology: from concepts to applications**. P. 51, CRC press, 2008.

Chlum, B.; Hanson, K.; Lindsay, S.; e Pascoe, B. **Multi-Function Tribometer Design**. 2010.

CZICHOS, Horst. **Tribology: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication, and wear**. Editor Elsevier, 2009. Pg. 17.

DOHMANN, F.; HARTL, Ch. **Hydroforming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and processes**. Journal of materials processing technology, v. 150, n. 1-2, p. 18-24, 2004.

DRUET, K.; ŁUBIŃSKI, T.; ŁUBIŃSKI, J. I. **Reciprocating motion tribometer**. In: papers from 2nd World Tribology Congress. Vienna, Austria. 2001.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Arnold, London, capítulo 6.p. 133. 1992.

LORENZI, Clarice Inês; FERREIRA, Joao Carlos Espindola. **Failure mapping using FMEA and A3 in engineering to order product development: a case study in the industrial automation sector**. International Journal of Quality & Reliability Management, v. 11, n. 7, p. 1399-1422, 2018.

MOURA, Cândido. **Análise de modo e efeitos de falha potencial (FMEA)**. Manual de Referência, 2000.

MACUZIC, I.; PROSO U.; JEREMIC B.; TODOROVIC P.; e DAPAN M.; **Linear Reciprocating Tribometer – Examples of an Obtained Investigation Results**, 12th International Conference on Tribology – Serbiatrib' Maio, 2011.

Marjanovic, N.; Tadic, B.; Ivkovic, B.; E Mitrovic, S. **Design of Modern Concept Tribometer with Circular and Reciprocating Movement**. Tribology in industry, v. 27, n. 1&2, p. 3-8, 2006.

ROMANO, L. N. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. Florianópolis, 2003.

ROSA, Silas Luis Sartori Paschoal da. **Estudo da correlação entre os resultados de testes e a aplicação dos conceitos de gerenciamento de projetos para o modelamento matemático da durabilidade de um componente automotivo**. Salvador: UFBA, 2013.

SILVA, Carlos Eduardo Sanches da et al. **Método para avaliação do desempenho do processo de desenvolvimento de produtos**. Tese de Doutor em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Butterworth-Heinemann, 743 p. 2013.

STRAFFELINI, Giovanni. **Friction and wear: methodologies for design and control**. Springer, 2015.

AGRADECIMENTOS

O autor desse artigo agradece à Faculdade SATC e ao professor Elvys Isaias Mercado Curi pelo conhecimento transmitido, pelo apoio e orientações, que foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.