

## PROJETO DE UM EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE DESGASTE E ATRITO POR DESLIZAMENTO SOB MÚLTIPLAS GEOMETRIAS DE CONTATO

**Fernando Henz Maldaner**, fhmaldaner@gmail.com<sup>1</sup>

**Felipe André Ritter**, ritter.felipe@acad.ufsm.br<sup>1</sup>

**Eduardo Monteiro Zitske**, eduardomontzitske@gmail.com<sup>1</sup>

**Cesar Gabriel dos Santos**, cesar.g.santos@ufsm.br<sup>1</sup>

**Cristiano José Scheuer**, cristiano.scheuer@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais - GMAT. Prédio 10 - Sala 407, Bairro Camobi, CEP 97105-900 - Santa Maria, RS.

**Resumo.** O desgaste é um dos principais modos de falhas dos materiais de engenharia, sendo responsável por perdas consideráveis de eficiência em sistemas mecânicos. Neste sentido, para avaliar o comportamento tribológico de materiais submetidos a contatos do tipo deslizante, empregam-se ensaios mecânicos de desgaste e atrito. Para realização de tais ensaios, são utilizados equipamentos denominados tribômetros, os quais usualmente apresentam alto custo. Neste cenário, o presente trabalho teve como objetivo realizar o projeto de um tribômetro para a realização de ensaios de desgaste e atrito por deslizamento sob múltiplas geometrias de contato. Para o desenvolvimento do equipamento, foram consideradas normas e diretrizes que regulamentam à execução de tais ensaios. O equipamento concebido é constituído por quatro conjuntos: i) conjunto da estrutura de contenção; ii) conjunto do sistema de posicionamento do corpo; iii) conjunto do sistema de posicionamento do contracorpo; e iv) conjunto do sistema de acionamento e controle. O conceito de tribômetro desenvolvido atende aos requisitos estabelecidos pelas diretrizes que regem a execução dos ensaios, e aos requisitos estabelecidos pelos potenciais usuários do produto.

**Palavras chave:** Tribômetro. Desgaste. Atrito. Projeto de produto.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma demanda recorrente de vários segmentos econômicos é a redução de custos de manutenção e lucros cessantes causados pelas avarias produzidas por fenômenos tribológicos em componentes de sistemas mecânicos. Nesse sentido, estima-se que aproximadamente 23% do consumo total de energia do mundo é consumida para vencer o atrito (HOLMBERG; ERDEMIR, 2017).

Uma das maneiras de contornar esse problema constitui o correto projeto e especificação dos materiais usados na construção de tais componentes. Para simular em escala laboratorial os danos promovidos pelo desgaste e estimar o coeficiente de atrito, empregam-se os equipamentos chamados de tribômetro. Uma grande variedade de configurações de ensaios é disponibilizada atualmente, envolvendo a simulação de diferentes tribosistemas, possibilitando a realização de estudos envolvendo atrito, desgaste e/ou lubrificação (STACHOWIAK *et al.*, 2004).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é realizar o projeto conceitual de uma concepção de tribômetro para realizar ensaios de desgaste e atrito por deslizamento sob múltiplas geometrias de contato, todas contidas em um mesmo banco de testes.

### 2. ABORDAGEM METODOLÓGICA ADOTADA

A metodologia de projeto utilizada para nortear as tarefas envolvidas no desenvolvimento do equipamento proposto MR-PDMA (Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas) é baseada no método proposto por Pahl & Beitz (1988). Em poucas palavras, o MR-PDMA (ROMANO, 2003) corresponde a uma sintetização das ações envolvidas no projeto do produto, com a orientação da execução das tarefas em diversas fases, as quais são orientadas de forma cronológica. Esse sequenciamento de tarefas conduz à elaboração progressiva do produto, desde a ideia inicial até a definição completa das suas especificações, culminando com a fabricação e lançamento do produto no mercado.

No MR-PDMA o processo de projeto é dividido em três macrofases, correspondentes, em ordem cronológica à: planejamento, projeção e implementação (Figura 1). As três macrofases, por sua vez, são decompostas em oito fases, sendo que ao final de cada fase há uma avaliação do resultado obtido, autorizando a passagem para a etapa seguinte. Assim, a macrofase de planejamento é composta por apenas uma fase, o planejamento do projeto, cuja principal saída é o plano do projeto. A projeção é formada por quatro fases: projeto informacional, projeto

conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Para estas fases as saídas esperadas são respectivamente: especificações de projeto, concepção do equipamento, viabilidade econômica e a solicitação de investimentos. A implementação compõe-se em três fases: preparação da produção, lançamento e validação. Na preparação da produção a principal saída é a liberação do produto para a produção. A fase de lançamento objetiva a liberação do lote inicial do produto. A fase de validação tem como saída a validação do produto e, conseqüente, encerramento do projeto.

Apesar do MR-PDMA constituir um método de projeto criado especificamente para o desenvolvimento de máquinas e implementos agrícolas, a referida metodologia

foi transcrita posteriormente por Back *et al.* (2008). Essa transcrição recebeu a denominação de PRODIP (Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto). Nela os autores validam o emprego do método para guiar o projeto de produtos genéricos (ou seja, qualquer configuração de produto).

No caso específico do tribômetro desenvolvido neste trabalho, fez-se necessário somente a aplicação da macrofase de projeção do MR-PDMA. A supressão da realização das demais fases da metodologia se deu ao fato do equipamento não constituir um produto que será produzido comercialmente, sendo desenvolvido apenas para sanar a demanda do grupo de pesquisa ao qual os autores pertencem.



Figura 1. Representação simplificada do Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (Romano, 2003).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Projeto Informacional

Nesta fase do desenvolvimento do projeto é visada a definição de um conjunto de especificações técnicas, e as características do produto. Para isso, é necessário identificar as necessidades dos potenciais usuários do equipamento (clientes). No presente trabalho, estas necessidades foram determinadas através da análise de patentes de produtos pré-existentes, e pela aplicação de questionários on-line, utilizando os recursos do Google Forms. A importância destes requisitos estabelecidos pelos clientes foi quantificada utilizando o diagrama de Mudge.

Após o estabelecimento de tais necessidades, estas foram convertidas em parâmetros de projeto medíveis e testáveis, ou seja, em requisitos de projeto. Os requisitos de projeto definidos foram quantificados e classificados em ordem de importância utilizando a matriz QFD (*quality function deployment*). Ao final desta fase, foi obtida uma lista de especificações técnicas para o produto em desenvolvimento, classificadas em ordem de importância.

#### 3.2 Projeto Conceitual

Nesta fase, ocorreu a formulação e seleção dos conceitos de solução para atender as especificações estabelecidas na fase de projeto informacional. Para tanto, inicialmente definiu-se a estrutura funcional do produto, através da técnica de síntese funcional. A síntese funcional constitui ao desdobramento da função técnica global do produto em

sub-funções. Tais sub-funções combinadas, permitem que o sistema completo atenda integralmente a sua função. Neste sentido, com a definição das soluções individuais para cada sub-função parcial do equipamento, a sua matriz morfológica foi construída. A partir da matriz morfológica, os princípios de solução para cada sub-função parcial foram combinados, gerando-se diferentes concepções para o equipamento em desenvolvimento. Estas concepções foram avaliadas baseando-se nos requisitos de clientes estabelecidos, e a que melhor atendeu a estes foi selecionada. O mapeamento digital do conceito de equipamento escolhido é ilustrado na Figura 2a.

#### 3.3 Projeto Preliminar

Nesta fase foi elaborada a arquitetura do equipamento, por meio do estabelecimento da sua árvore genealógica (Figura 3). Foram realizados também nesta etapa o dimensionamento dos componentes do equipamento, e a partir do resultado destes, foi feita a seleção de materiais à serem usados na sua fabricação. Durante esta etapa, buscou-se adaptar componentes que integram a concepção desenvolvida, para possibilitar o uso de itens comerciais e/ou existentes na universidade. Essa estratégia teve como intuito reduzir os custos e tempo associados a fabricação de tais componentes. Ao final desta fase, foi criada a lista de elementos (Tabela 1) que integram o equipamento (conjuntos, subconjunto e componentes), com o estabelecimento da sua codificação (conjuntos, subconjunto e componentes), sua respectiva designação, e a equivalência com o código da matriz funcional.

### 3.4 Projeto Detalhado

Nesta fase foi realizada a completa especificação dos materiais, acabamentos e tolerâncias, processos de fabricação, definição de peças fabricadas e comerciais, análise dos modos de falhas e seus efeitos, etc.; informações que integram o plano de desenvolvimento do equipamento. Nesta fase também foi realizada a fabricação e montagem de um protótipo funcional do equipamento (Figura 2b). Este protótipo teve o seu funcionamento

avaliado por meio de ensaios experimentais conduzidos para determinar do coeficiente de atrito e desgaste do alumínio classe AA1100, sob as diferentes condições de contato tribológico que integram o equipamento. Os resultados obtidos foram confrontados com aqueles reportados na literatura quando na aplicação dos mesmos ensaios sobre a referida liga. A partir dos resultados dos testes realizados, constatou-se a reprodutibilidade dos valores, validando-se assim o equipamento.

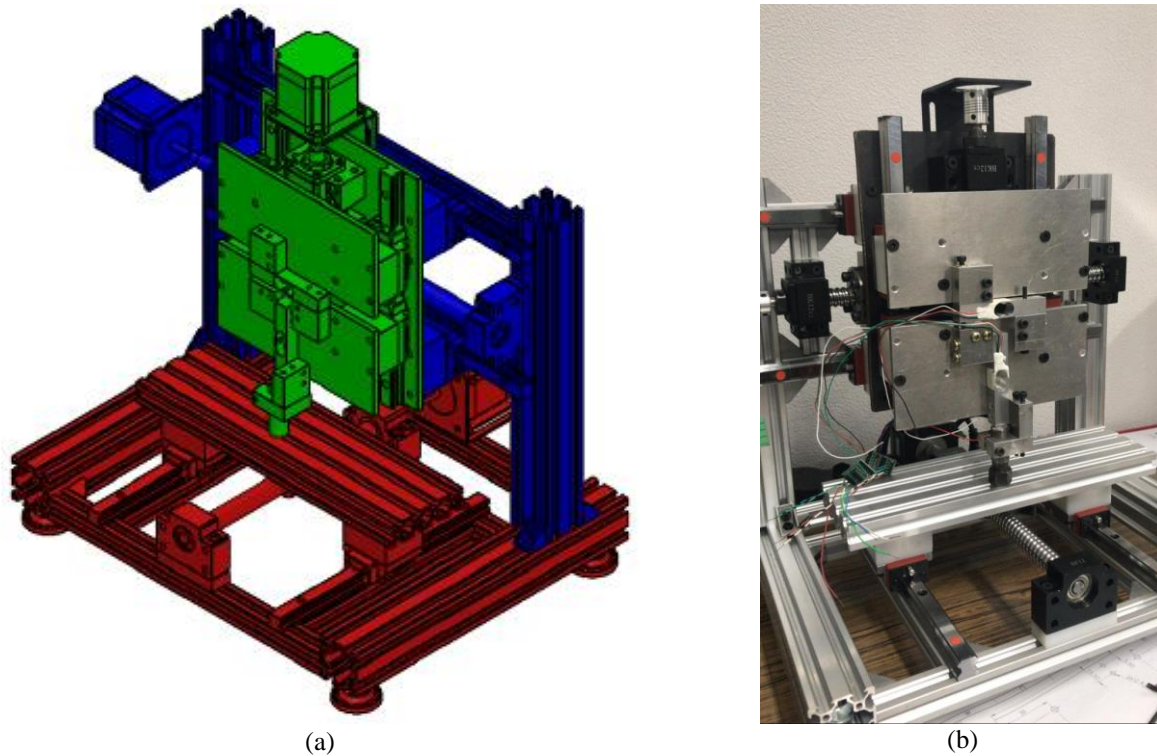


Figura 2. (a) Mocape digital e (b) protótipo físico da concepção de equipamento selecionada (Autor).

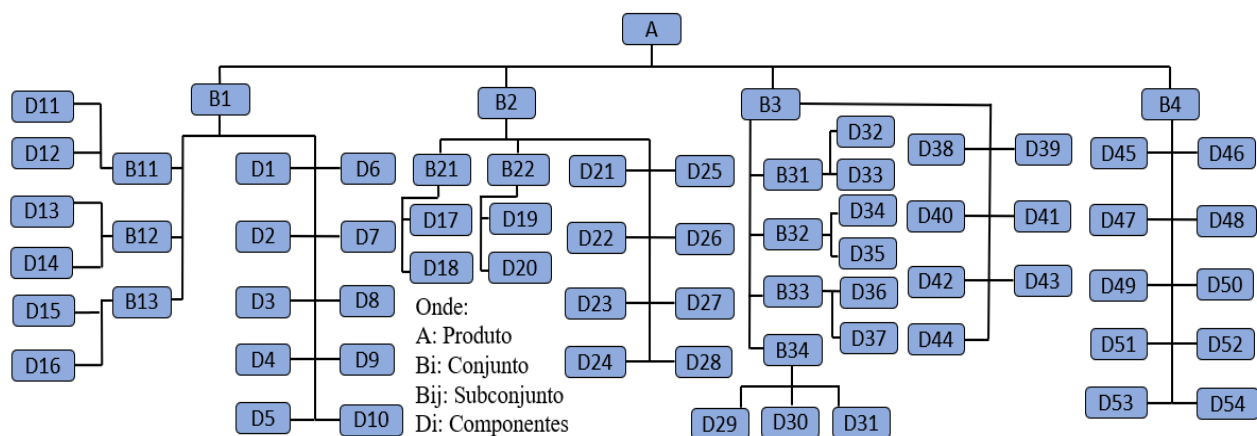


Figura 3. Árvore genealógica do equipamento desenvolvido.



Tabela 1. Lista de peças do equipamento.

Código	Descrição	AG			
01.00.00.00	Produto	A	01.04.00.02	Placa de aquisição de dados	D46
01.01.00.00	Conj. Estrutura de Contenção	B1	01.04.00.03	Driver de potência Eixo X	D47
01.01.01.00	Subconjunto fuso de movimentação	B11	01.04.00.04	Driver de potência Eixo Y	D48
01.01.01.01	Fuso	D11	01.04.00.05	Driver de potência Eixo Z	D49
01.01.01.02	Castanha	D12	01.04.00.06	Fonte Chaveada 24V 15A	D50
01.01.02.00	Subconjunto guia de movimentação	B12	01.04.00.07	Chave fim de curso Eixo X	D51
01.01.02.01	Trilho	D13	01.04.00.08	Chave fim de curso Eixo Y	D52
01.01.02.02	Patim	D14	01.04.00.09	Chave fim de curso Eixo Z	D53
01.01.03.00	Conj. nivelador da estrutura	B13	01.04.00.10	Interface Tela LCD	D54
01.01.03.01	Pé nivelador	D15			
01.01.03.02	Porca	D16			
01.01.00.01	Perfil 40x40	D1			
01.01.00.02	Perfil 20x20	D2			
01.01.00.03	Perfil 20x80	D3			
01.01.00.04	Suporte de guia de movimentação	D4			
01.01.00.05	Calço fuso de movimentação	D5			
01.01.00.06	Acoplamento do fuso	D6			
01.01.00.07	Conector perfis 20x20	D7			
01.01.00.08	Perfil 20x20 300mm	D8			
01.01.00.09	Suporte de motor passo 90°	D9			
01.01.00.10	Motor de passo	D10			
01.02.00.00	Conj. Sist. Posic. Corpo	B2			
01.02.01.00	Subconjunto fuso de movimentação	B21			
01.02.01.01	Fuso	D17			
01.02.01.02	Castanha	D18			
01.02.02.00	Subconjunto guia de movimentação	B22			
01.02.02.01	Trilho	D19			
01.02.02.02	Patim	D20			
01.02.00.01	Perfil 40x40	D21			
01.02.00.02	Perfil 20x20	D22			
01.02.00.03	Suporte motor de passo	D23			
01.02.00.04	Suporte da guia de movimentação	D24			
01.02.00.05	Calço fuso de movimentação	D25			
01.02.00.06	Acoplamento do fuso	D26			
01.02.00.07	Conector 20x20	D27			
01.02.00.08	Perfil 20x20 300mm	D28			
01.03.00.00	Conj. Sist. Posic. Contracampo	B3			
01.03.01.00	Subconjunto fuso de movimentação	B31			
01.03.01.01	Fuso	D32			
01.03.01.02	Castanha	D33			
01.03.02.00	Subconjunto guia de movimentação	B32			
01.03.02.01	Trilho	D34			
01.03.02.02	Patim	D35			
01.03.03.00	Subconjunto célula H	B33			
01.03.03.01	Célula de carga	D36			
01.03.03.02	Junção	D37			
01.03.04.00	Subconjunto célula V	B34			
01.03.04.01	Célula de carga	D29			
01.03.04.02	Junção	D30			
01.03.04.03	Junção suporte	D31			
01.03.00.01	Chapa de aço	D38			
01.03.00.02	Suporte guia de movimentação	D39			
01.03.00.03	Chapa inferior	D40			
01.03.00.04	Chapa Superior	D41			
01.03.00.05	Acoplamento do fuso	D42			
01.03.00.06	Suporte motor de passo 90°	D42			
01.03.00.07	Motor de passo	D43			
01.03.00.08	Suporte do contracampo	D44			
01.04.00.00	Conj. Sist. Acionamento e Controle	B4			
01.04.00.01	Placa Arduino de Controle	D45			

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido, fabricado e validado um equipamento multi-ensaio multifuncional para o estudo de desgaste por deslizamento. O conceito desenvolvido contempla recursos que possibilitam o comando remoto do equipamento, e a leitura automática dos parâmetros de ensaios. A sua interface de programação é constituída por uma tela LCD interfaceada à uma plataforma Arduino, que permite a fácil programação, controle e aquisição de dados de ensaio. A validação do funcionamento do equipamento foi realizada através de ensaios experimentais sob todas as geometrias de contato que o integram, confrontando-se os resultados obtidos com aqueles reportados na literatura, a partir do uso de tribômetros equivalentes comerciais adotando-se os mesmos parâmetros de ensaio e material de contracampo. A partir dos resultados dos testes de validação, confirmou-se que o mesmo apresenta bom funcionamento e reprodutibilidade. Tendo em vista a comprovação da precisão, robustez, operacionalidade e confiabilidade do equipamento através dos testes funcionais, conclui-se que a concepção de produto gerada contempla as necessidades apontadas pelos seus usuários.

#### 5. REFERÊNCIAS

- BACK, N. et al. Projeto Integrado de Produto: planejamento, concepção e modelagem, 1ª ed. Barueri, Editora Manole, 2008.
- JOST, H.P. Tribology: origin and future. *Wear*, Vol. 136, p 1–17, 1990.
- HOLMBERG, K., ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, Vol. 5, p. 263–284, 2017.
- HOLMBERG, K., ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, Vol. 5, p. 263–284, 2017.
- MACULOTTI, G. et al. Uncertainty-based comparison of conventional and surface topography-based methods for wear volume evaluation in pin-on-disc tribological test. *Tribology International*, v. 165, p. 107260, 2022.
- PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering Design a systematic approach*. Londres: The Design Council, 1988.
- ROMANO, L.N. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas. 2003. Tese, UFSC, Florianópolis, SC, 2003.
- STACHOWIAK, G.W., et al. *Experimental Methods in Tribology*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 2004.
- ZUM GAHR, K.-H. *Microstructure and Wear of Materials*. Siegen: Elsevier, 1987.