

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BANCADA DE ENSAIOS DE RABINOWICZ

Yasmin Delbue¹; Leonardo Bartalini Baruffaldi²

¹Estudante de Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, campus Hortolândia, yasmin.delbue@aluno.ifsp.edu.br

²Professor, orientador, IFSP, campus Hortolândia, leonardo.baruffaldi@ifsp.edu.br

Área do conhecimento (Tabela CNPq): 3.00.00.00-9 Engenharias

RESUMO: O presente trabalho descreve a metodologia e os resultados preliminares da instrumentação de uma bancada de ensaio de Rabinowicz para a validação de modelos de atrito. A pesquisa justifica-se pela complexidade do atrito seco e pela necessidade de dados experimentais precisos para a calibração de modelos matemáticos. Por meio de simulações computacionais, desenvolveu-se um modelo dinâmico capaz de reproduzir o fenômeno de stick-slip, essencial para a definição das grandezas físicas a serem mensuradas. Os principais resultados incluem a definição formal das variáveis críticas de instrumentação, força de atrito, deslocamento e velocidade, e a seleção preliminar de elementos do sistema de aquisição de dados. Conclui-se que o trabalho estabeleceu as fundações teóricas e metodológicas para a fase experimental, permitindo que a obtenção de dados futuros valide os modelos teóricos e consolide as contribuições para a área de tribologia.

PALAVRAS-CHAVE: tribologia; atrito seco; stick-slip; modelagem; instrumentação; sensores.

INSTRUMENTATION OF A RABINOWICZ FRICTION TEST BENCH FOR THE VALIDATION OF FRICTION MODELS

ABSTRACT: This work describes the methodology and preliminary results of the instrumentation of a Rabinowicz friction test bench for the validation of friction models. The research is justified by the complexity of dry friction and the need for accurate experimental data to calibrate mathematical models. Through computational simulations, a dynamic model capable of reproducing the stick-slip phenomenon was validated, which is essential for defining the physical quantities to be measured. The main results include the formal definition of critical instrumentation variables—friction force, displacement, and velocity—and the design of the data acquisition system mains elements. It is concluded that the work has established the theoretical and methodological foundations for the experimental phase, allowing future data acquisition to validate the theoretical models and consolidate contributions to the field of tribology.

KEYWORDS: tribology; dry friction; stick-slip; modeling; instrumentation; sensors.

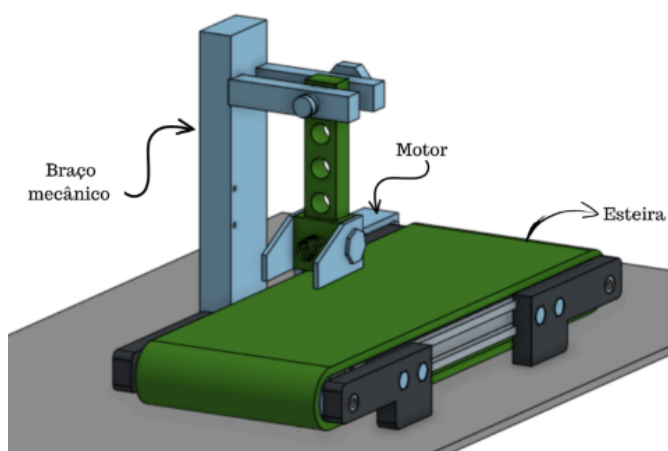
INTRODUÇÃO

A dinâmica do atrito seco é um tema de constante investigação na engenharia, dada sua influência crítica sobre o desempenho e a estabilidade de sistemas mecânicos e mecatrônicos. Modelos tribológicos clássicos, como o de Coulomb, são de ampla utilização por sua simplicidade, mas frequentemente se mostram inadequados para capturar a complexidade do fenômeno, especialmente a ocorrência de stick-slip em regimes de baixa velocidade (Pennestri et al., 2016). A necessidade de modelos matemáticos mais representativos, como o de LuGre e o de Dahl, exige uma validação rigorosa com dados experimentais de alta qualidade. Neste contexto, o presente trabalho se propõe a

resolver uma lacuna na área de pesquisa experimental em tribologia, direcionando esforços para a instrumentação de uma bancada de ensaios de Rabinowicz.

A bancada serve como um sistema físico para a investigação do comportamento dinâmico do atrito por meio da excitação controlada de um corpo de prova. A instrumentação visa quantificar com precisão as grandezas físicas de interesse, como a força de atrito e o deslocamento do bloco, que são essenciais para a calibração e a validação de modelos matemáticos de atrito. O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um sistema de medição e aquisição de dados tecnicamente viável e economicamente otimizado para a referida bancada, abrangendo desde a seleção de sensores até a concepção do condicionamento de sinal e de um sistema de aquisição de dados. A hipótese central é a de que a instrumentação permitirá a obtenção de um conjunto de dados experimentais confiáveis, que futuramente servirão de base para a validação de modelos de atrito seco e para o estudo aprofundado de fenômenos dinâmicos, contribuindo para o avanço do conhecimento em tribologia.

FIGURA 1. Representação gráfica da bancada em CAD (Santos; Baruffaldi, 2023)



MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo adota uma metodologia de pesquisa que se concentra na instrumentação de uma bancada, que foi desenvolvida em uma iniciação científica anterior, de ensaios de Rabinowicz simplificada, cujo projeto e fabricação foram desenvolvidos em etapas de pesquisa anteriores. O sistema físico consiste em um bloco de massa m suportado por uma mola de rigidez k , cuja dinâmica é excitada pelo movimento de uma esteira a uma velocidade controlada v_s . A dinâmica do corpo de prova pode ser modelada pela equação de movimento:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_{\text{atrito}}(t) \quad (1)$$

, em que m representa a massa do corpo de prova, k é a rigidez da mola, $x(t)$ é o deslocamento horizontal da massa, e $F_{\text{atrito}}(t)$ é a força de atrito entre o bloco e a superfície móvel.

A instrumentação da bancada é a etapa central deste projeto, visando à medição precisa dos parâmetros essenciais para a calibração e a validação de modelos de atrito. Para a quantificação da força de atrito, um mensurando crítico, será empregada uma célula de carga, que será integrada de forma a medir a força restauradora da mola. Para a medição do deslocamento e, por derivação, da velocidade do corpo de prova, que são fundamentais para a análise de fenômenos dinâmicos como o stick-slip, estão sendo avaliadas diferentes tecnologias de sensoriamento. As alternativas incluem sensores magnéticos de efeito Hall ou Doppler, e encoders rotativos, sendo a seleção final baseada em uma análise técnico-econômica que prioriza a precisão, a resolução e a viabilidade do projeto.

A aquisição e o processamento de dados serão realizados por meio de um sistema eletrônico de baixo custo, utilizando microcontroladores da família Arduino ou ESP32. A adequação dessas plataformas será verificada em termos de taxa de amostragem, para garantir que os fenômenos de alta frequência da dinâmica do atrito sejam capturados com fidelidade. O circuito de condicionamento de sinal será projetado para assegurar a integridade do sinal proveniente dos transdutores, minimizando ruídos e amplificando os sinais de baixa intensidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no desenvolvimento teórico e técnico deste projeto de iniciação científica validaram a abordagem metodológica adotada e pavimentaram o caminho para a fase experimental. O avanço inicial consolidou a base de modelagem dinâmica e simulação computacional, essencial para a compreensão dos fenômenos tribológicos.

Como primeiro resultado significativo, a implementação numérica do modelo dinâmico massa-mola-amortecedor em ambientes computacionais (Python e MATLAB) permitiu a elucidação do comportamento do sistema. Conforme ilustrado no gráfico 1, as simulações iniciais consideravam apenas o atrito viscoso, evidenciaram uma resposta suavemente amortecida, o que contrasta com o comportamento não linear e frequentemente abrupto observado em sistemas com atrito seco. Essa discrepância motivou a revisão do modelo teórico, baseada na identificação da necessidade de se incorporar explicitamente a força de atrito seco para representar com fidelidade o fenômeno de *stick-slip*.

A reformulação do modelo, que incluiu o atrito de Coulomb, permitiu a simulação de oscilações não periódicas e de transições de regime de movimento, fenômenos que são indicativos da não linearidade do atrito seco. Esses resultados numéricos são consistentes com os padrões descritos por Pennestri et al. (2016), que identificaram oscilações não periódicas e transições abruptas. O comportamento oscilatório do adesão foi devidamente reproduzido nas simulações, conforme apresentado no gráfico 2, o que validou a coerência estrutural do modelo numérico e forneceu uma base sólida para a definição das grandezas físicas a serem medidas na bancada. Nota-se, a partir do instante 1,5 s, que o bloco cessa sua vibração em função de uma força de atrito superior à necessária para vencer o efeito inercial combinado à força de mola do sistema. O mesmo comportamento não pode ser obtido por meio de um modelo com amortecimento viscoso, em que a força de dissipação é proporcional à velocidade do corpo e, portanto, diminui com sua redução.

GRÁFICO 1. Resposta com atrito para sistema massa-mola-amortecedor, mostrando posição e velocidade em função do tempo.

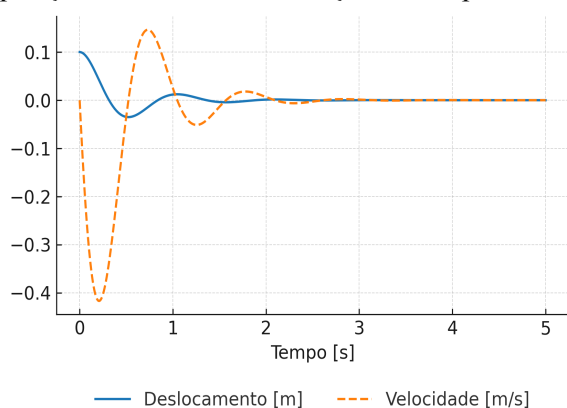
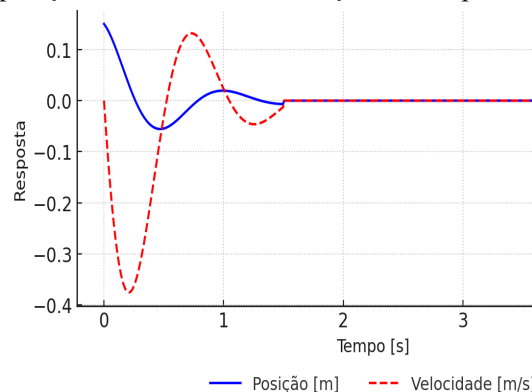


GRÁFICO 2. Resposta dinâmica com atrito para sistema de atrito de Coulomb, mostrando posição e velocidade em função do tempo.



A análise crítica da literatura técnica, em especial o trabalho de Pennestri et al. (2016), subsidiou a sistematização das características e exigências dos modelos tribológicos contemporâneos. Essa etapa resultou na definição formal das variáveis a serem instrumentadas: a força de atrito, medida indiretamente pela célula de carga; o deslocamento horizontal da massa; e a velocidade, que será derivada digitalmente do deslocamento. A partir disso, um levantamento técnico-econômico de sensores foi realizado para identificar as opções mais viáveis para a instrumentação da bancada, considerando parâmetros como resolução, frequência de aquisição e compatibilidade com plataformas de baixo custo, como o Arduino ou o ESP32. Esta avaliação resultou na seleção dos componentes sumarizados na Tabela 1.

TABELA 1. Resumo dos sensores selecionados com base na análise técnico-econômica para a medição das variáveis críticas da bancada de ensaio.

Sensor	Detalhes	Justificativa
Célula de Carga	Tipo barra/S, 1-5kg, acoplada a um Módulo HX711	Medição indireta da força de atrito via deformação da mola. O módulo HX711 é essencial para amplificar o sinal e convertê-lo para leitura digital por um microcontrolador.
Encoder Rotativo	Com adaptação mecânica (cremalheira/pinhão ou polia/corda)	Utilizado para medição direta da velocidade angular do motor, o que permite o controle preciso da excitação do sistema.
Sensor de Efeito Hall	Com régua de ímãs	Solução de baixo custo e alta precisão para a medição do deslocamento linear do bloco. A configuração com ímãs garante uma leitura robusta e sem contato.

Em comparação com o trabalho de Miyasato et al. (2022), que utilizou suporte viscoelástico no estudo de atrito, as simulações aqui conduzidas apresentaram frequências de *stick-slip* ligeiramente menores, possivelmente em função da ausência de elementos viscoelásticos no modelo adotado. Essa diferença reforça a importância de ajustes finos nos parâmetros do modelo para melhor representar o comportamento físico da bancada real. Tais paralelos confirmam que a abordagem metodológica proposta é consistente com a literatura e, ao mesmo tempo, evidenciam lacunas que poderão ser exploradas na fase experimental para aprimorar a modelagem e a calibração dos sensores.

Finalmente, com base nas simulações e na análise de requisitos, está em elaboração a arquitetura conceitual do sistema de aquisição de dados, que contempla a cadeia completa de instrumentação: do sensor ao condicionamento de sinal (amplificação), conversão analógico-digital, tratamento digital (filtragem e derivada) e, por fim, armazenamento ou visualização dos dados. Essa estrutura servirá de guia para a montagem dos testes-piloto. Tal abordagem reflete o conhecimento fundamental na área de instrumentação e metrologia, conforme proposto por Bolton (2003), e direciona o projeto para a fase de aquisição e calibração de sensores. Os próximos resultados esperados incluem a finalização da seleção dos sensores, a montagem e a calibração do sistema de medição e, subsequentemente, a obtenção dos primeiros dados experimentais para a validação dos modelos teóricos.

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta o estudo de instrumentação para uma bancada de ensaios de Rabinowicz. Alinhado com os objetivos mais amplos da pesquisa sobre modelos de atrito aplicados em simulação computacional, este artigo estabelece as fundações teóricas e metodológicas para a instrumentação de uma bancada de ensaio de Rabinowicz. Por meio de modelos numéricos, mostrou-se que a modelagem adequada do atrito seco, por meio de um modelo não linear como o de Coulomb, é fundamental para a representação realista do fenômeno de adesão-eskorregamento (*stick-slip*). Este resultado numérico não apenas validou a coerência interna da nossa abordagem, mas também orientou a fase de planejamento do sistema de instrumentação.

A partir dos resultados das simulações, houve a definição das variáveis críticas de instrumentação — força de atrito, deslocamento horizontal e velocidade do bloco — e a concepção da arquitetura do sistema de aquisição de dados. Esta abordagem, que prioriza a simulação e a análise de requisitos antes da montagem física, concorre para a viabilidade do projeto, uma vez que permitiu a identificação das variáveis e sensores mais adequados para a futura instrumentação.

Em suma, o trabalho transcendeu a fase de modelagem e criou um guia de implementação robusto para as etapas seguintes. A próxima etapa, focada na obtenção de dados experimentais, permitirá a validação dos modelos teóricos e a consolidação das contribuições para a área de tribologia.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Y.D. (Yasmin Delbue) foi responsável pela Conceitualização do estudo, pelo desenvolvimento da Metodologia, pela Análise Formal, pela Investigação (simulações computacionais), e pela Redação do Rascunho Original.

L.B.B. (Leonardo Bartalini Baruffaldi) foi responsável pela Supervisão, pela Administração do Projeto (gestão e coordenação da pesquisa) e pelo auxílio na Investigação (simulações computacionais).

A bancada experimental utilizada como base para este estudo foi desenvolvida em uma pesquisa anterior, por Danielly Alves dos Santos, contribuindo para a fundamentação do presente trabalho.

Ambos os autores contribuíram para a Redação, Revisão e Edição do manuscrito e aprovaram a versão final submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIFSP - Graduação), essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANDREAUS, U.; CASINI, P. Dynamics of friction oscillators excited by a moving base and/or driving force. **Journal of Sound and Vibration**, v. 245, n. 4, p. 685–699, ago. 2001.

BOLTON, W. **Instrumentation and Control Systems**. 2. ed. Oxford: Newnes, 2003.

MIYASATO, H. H.; SIMIONATTO, V. G. S.; DIAS, M. Simulation of a mass-on-belt dynamical model with the Zener viscoelastic support. **Journal of Sound and Vibration**, v. 534, p. 117025, set. 2022.

NORTON, R. L. **Projetos de máquinas: uma abordagem integrada**. São Paulo: Bookman, 2021.

PENNESTRÌ, E. et al. Review and comparison of dry friction force models. **Nonlinear Dynamics**, v. 83, n. 4, p. 1785–1801, mar. 2016.

RABINOWICZ, E. Stick and Slip. **Scientific American**, v. 195, n. 5, 1956.

SANTOS, D.A.; BARUFFALDI, L.B. Desenvolvimento de bancada de ensaios de Rabinowicz. In: **Anais do 14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP**. IFSP, Capivari, 2023. Disponível em <<https://ocs.ifsp.edu.br/conict/xivconict/paper/view/10195>>