

PROJETO DE UM DISPOSITIVO MECÂNICO E UM PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO PARA DINAMÔMETROS TRIAXIAIS

Eloi Antonio Triaca, eloiat3@gmail.com¹
Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Sen. Salgado Filho, 3000, 59078-970, Natal-RN, Brasil.

Resumo. *Dinamômetros são dispositivos de medição de forças comumente aplicados à automação e o monitoramento de processos industriais. Para realizar a medição, eles são constituídos de transdutores que medem deformações decorrentes da aplicação das forças ou suas componentes. Esses dispositivos precisam ser calibrados para que a relação entre as forças aplicadas em cada sentido e as respostas dos transdutores sejam definidas. O método mais simples para promover as forças conhecidas para a calibração consiste na aplicação de massas-padrão. O desafio neste caso é a definição de forças horizontais, para as quais é requerido o emprego de uma estrutura capaz de rotacionar a carga produzida pelo efeito da gravidade sobre massas-padrão. Este projeto teve como objetivo geral o desenvolvimento de um dispositivo mecânico e um procedimento que permitam a calibração, nas três componentes ortogonais de aplicação de força, de dois dinamômetros desenvolvidos no Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O desenvolvimento do projeto foi dividido em três etapas: (a) projetar o dispositivo mecânico; (b) manufaturar e montar os componentes do sistema; (c) e elaborar os códigos de aquisição e de processamento de dados para caracterizar/calibrar os dinamômetros e para identificar as suas frequências naturais de vibração. Os resultados mostraram que o dispositivo mecânico é adequado para o procedimento de calibração com a aplicação de três componentes ortogonais de força e os códigos computacionais permitiram a caracterização das cargas e a modelagem das curvas de calibração para os dinamômetros.*

Palavras chave: *Dispositivo de calibração, Dinamômetro triaxial, Medição de forças.*

Abstract. *Dynamometers are force measurement devices commonly applied to automation and monitoring of industrial processes. These devices consist of transducers that measure deformations caused by applying the forces, or their components, to perform such measurement. These devices need to correlate the relationship between the forces used in each direction and the transducer responses. The simplest method to promote forces for the calibration procedure is based on the application of standard masses. The challenge in this case is the application of horizontal forces, which requires a structure capable of rotating the load from the effect of gravity on the standard masses. Therefore, this study aims to develop a mechanical device and a procedure that allows the calibration in the three orthogonal components of force application, using two dynamometers developed previously in the Manufacturing Laboratory at the Federal University of Rio Grande do Norte. The development of this work was split into three steps: (a) design the mechanical device; (b) manufacture and assemble the system components; (c) and develop data acquisition and processing codes to characterize/calibrate the dynamometers and to identify their natural vibration frequencies. The results showed that the mechanical device is suitable for the calibration procedure with the application of three orthogonal components of force, and the computational codes allowed the characterization of the loads and modeling of the calibration curves for the dynamometers.*

Keywords: *Calibration device, Triaxial dynamometer, Force measurement.*

1. INTRODUÇÃO

A automação de processos de usinagem tem sido demandada para produzir componentes mecânicos de forma mais rápida, confiável e econômica (Liang *et al.*, 2016). Nesse sentido, também há uma maior necessidade de monitorar em tempo real parâmetros como as componentes da força de usinagem, que estão relacionadas às condições de usinagem como o valor do desgaste da aresta de corte, a vibração da máquina-ferramenta e o acabamento da superfície usinada (Luo *et al.*, 2018; Rizal *et al.*, 2015; Rizal *et al.*, 2018).

Para a medição dessas componentes da força de usinagem, dispositivos com transdutores de carga são empregados. Tais equipamentos, denominados de dinamômetros, realizam uma medição indireta da força, isto é, eles estimam o valor com base em efeitos produzidos por ela, como deformações locais, deslocamentos ou acelerações de componentes mecânicos. Geralmente, dois tipos de transdutores são usados: cristais piezoelétricos ou extensômetros (Totis *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2013).

Os dinamômetros precisam ser devidamente caracterizados e calibrados para que a correlação entre a carga aplicada e as respostas dos transdutores seja definida devido à medição indireta das componentes da força. Além disso, é necessário que as componentes das forças sejam aplicadas individualmente (pois a relação entre a carga e o sinal emitido não é igual em todos os sentidos) e que o processo seja realizado na posição de trabalho do dinamômetro.

A metodologia dos ensaios de caracterização e calibração é padronizada por normas técnicas. No Brasil, a referência é a norma ABNT NBR ISO 376 (2012), que define como devem ser realizadas a energização do dinamômetro, a pré-carga do sistema, os ciclos de carregamento/descarregamento e a avaliação do dispositivo. Em relação à aplicação das cargas, ela pode ser realizada com o auxílio de uma Máquina Universal de Testes Eletromecânica (EMUTM), de atuadores servo-hidráulicos ou da aplicação de massas-padrão. O último método é o mais viável, pois não requer o uso de máquinas para controlar a carga. Porém, como as massas-padrão só exercem cargas verticais, a calibração nos sentidos horizontais de aplicação de força (eixos X e Y do dinamômetro) requer o emprego de uma estrutura que converta a carga das massas em uma força horizontal.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um dispositivo mecânico que permita a calibração, nas três componentes ortogonais de aplicação de força, de dois dinamômetros baseados em extensômetros desenvolvidos no Laboratório de Manufatura (LABMAN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Os dispositivos foram desenvolvidos por Ribeiro (2014) e Lourenço (2018). Um requisito a ser considerado no projeto da estrutura do dispositivo mecânico aplicado para a calibração é que as cargas produzidas por ele devem ser compensadas.

Para que o objetivo geral fosse alcançado, os seguintes objetivos específicos foram realizados: (a) o projeto de um dispositivo mecânico que permita a aplicação de cargas horizontais (com um sistema de compensação de cargas acoplado); (b) a construção da estrutura; (c) e a implementação de uma rotina de caracterização/calibração dos transdutores e identificação de frequência com base na plataforma *LabVIEW* 2011 (*National Instruments*, 2020).

2. METODOLOGIA

Na Figura 1 são apresentadas as etapas desenvolvidas para que os objetivos específicos do projeto fossem atendidos.

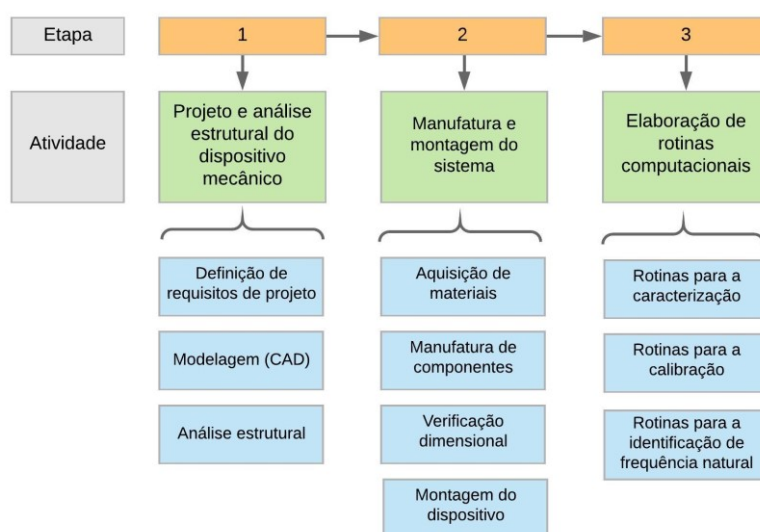


Figura 1. Etapas de desenvolvimento do projeto. Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a Fig. 1, as etapas são as seguintes: (1) o projeto e a análise dimensional do dispositivo mecânico de calibração; (2) a manufatura e a montagem do sistema; (3) a elaboração de códigos para caracterização, calibração e detecção de frequências naturais dos dinamômetros.

Na primeira etapa, foram realizadas as seguintes atividades: (a) a análise dos requisitos necessários para projetar o dispositivo de calibração, a qual foi elaborada com base em características desejadas para o equipamento e uma revisão bibliográfica dos procedimentos de caracterização e de calibração; (b) projeto mecânico da estrutura desenvolvida com suporte do software *CAD Creo Parametric 4.0*; e (c) a análise das tensões mais críticas desenvolvidas nos componentes mecânicos dos dispositivos, executada de acordo com as teorias de resistência dos materiais (Budynas e Nisbett, 2011; Hibbeler, 2010). Em relação à análise dos requisitos de projeto, eles foram definidos de acordo com a revisão bibliográfica dos procedimentos de caracterização e de calibração, pois as demandas do projeto dependem de características de tais ensaios e dos dinamômetros aos quais eles serão aplicados. Os requisitos são os seguintes: (a) o

dispositivo precisa converter a carga vertical das massas-padrão em uma carga horizontal; (b) ele deve ser adequado para a fixação nos dinamômetros de Ribeiro (2014) e Lourenço (2018); (c) o sistema deve ser fixado a uma máquina-ferramenta com alta rigidez, para que vibrações não afetem a medição das cargas; (d) as fixações do dispositivo precisam ser compatíveis com as da máquina-ferramenta; (e) o dispositivo deve suportar a aplicação de cargas de até 2 kN, para permitir uma calibração com forças de até 1 kN com um fator de segurança igual a 2; (f) como massas-padrão de 49,05 N (35 mm de altura, e 300 mm de diâmetro) serão utilizadas na caracterização e na calibração, ao menos 22 massas-padrão precisam ser aplicadas; (g) a carga que o dispositivo exerce sobre o dinamômetro precisa ser anulada.

A segunda etapa envolveu as seguintes atividades: (a) a aquisição dos materiais e componentes necessários para a construção do dispositivo; (b) a manufatura de parte dos componentes mecânicos em máquinas-ferramenta convencionais; (b) a análise dimensional de tais componentes; e (d) a montagem do sistema de calibração. Para a execução dessas atividades, foram utilizadas a infraestrutura e equipamentos do Laboratório de Manufatura (LABMAN, 2020) e do Laboratório de Metrologia (LABMETROL), ambos da UFRN.

Na última etapa do projeto, foram desenvolvidas as rotinas computacionais dos procedimentos de caracterização, calibração e identificação de frequência natural. Os códigos foram elaborados com o auxílio do *software LabVIEW 2011* e projetados para serem compatíveis com o acelerômetro triaxial da empresa Brüel & Kjaer, modelo 4520. As rotinas foram desenvolvidas de modo a permitir a estimativa dos indicadores que caracterizam os dinamômetros, como: a curva de calibração, o erro médio entre a carga que é aplicada e o seu valor teórico e as frequências naturais de vibração dos dinamômetros; além de parâmetros estatísticos de avaliação do dinamômetro, como sensibilidade, sensibilidade cruzada, e erros de histerese, linearidade, repetitividade e acurácia (Zhao *et al.*, 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação da metodologia descrita, foram obtidos resultados referentes: (1) ao projeto conceitual e ao projeto mecânico do dispositivo; 2) às análises de engenharia; 3) à aquisição de componentes, à manufatura e à montagem do dispositivo; 4) e ao desenvolvimento dos sistemas computacionais de aquisição e de processamento de dados.

De acordo com os requisitos do projeto mecânico, a Fig. 2 mostra o projeto conceitual do dispositivo mecânico para calibração de dois dinamômetros.

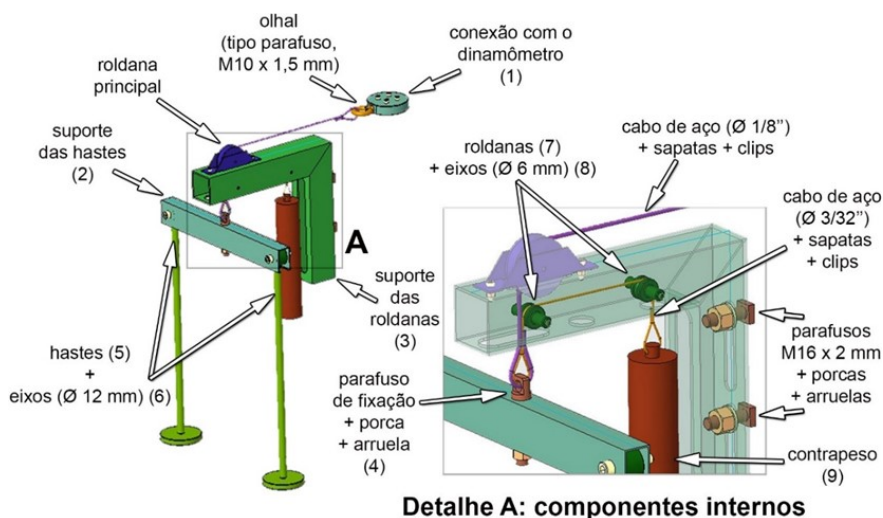


Figura 2. Projeto conceitual do dispositivo mecânico de calibração. Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma plaina limadora (ZOCCA, modelo PLZ 650) do LABMAN foi escolhida como a máquina-ferramenta na qual o dispositivo de calibração deve ser fixado, devido à sua alta rigidez. As principais características da mesa da plaina são: comprimento de 650 mm; largura de 350 mm; e altura de 960 mm em relação ao piso. O material da estrutura da máquina-ferramenta é o ferro fundido cinzento, o qual possui elevada capacidade de amortecimento de vibrações. As características mencionadas são fundamentais para a fixação de um dispositivo destinado à calibração, pois evita que vibrações externas impactem significativamente nos resultados (requisito de projeto mecânico (c)). Com relação ao projeto elaborado, as máximas dimensões do dispositivo são: altura de 696 mm, comprimento de 492 mm e largura de 400 mm.

De acordo com a Fig. 2, conceitualmente, o dispositivo desenvolvido pode ser subdividido em quatro subsistemas principais: a) conexão entre dinamômetro e carga aplicada, realizada com cabos de aço; b) estrutura de suporte para roldanas e de fixação do dispositivo à máquina-ferramenta; c) estrutura de suporte para as massas-padrão; e d) sistema de contrapeso. A conexão entre o dinamômetro e a carga aplicada permite converter as cargas verticais, resultantes da aplicação de massas-padrão, em cargas horizontais. A ideia é a seguinte: um cabo de aço (alma de fibra 6x7, Ø 1/8'' (3,17

mm)) conecta um suporte, que comporta as massas-padrão, a uma conexão que é fixada sobre o dinamômetro, passando por uma roldana (\varnothing 48 mm); a carga vertical resultante da aplicação das massas-padrão produz uma força de tração no cabo, que é transmitida à conexão por meio de um olhal como uma força horizontal, devido à passagem do cabo pela roldana; como a conexão é montada sobre a base superior dos dinamômetros, uma carga horizontal também é transmitida aos dispositivos. Esse princípio de conversão do sentido de carregamento por meio da passagem de um cabo por uma roldana também foi adotado por Subasi *et al.* (2018) em um procedimento de calibração de um dinamômetro triaxial com massas-padrão e, com sua aplicação, o requisito de projeto mecânico (a) é satisfeito.

Em relação à compatibilidade do dispositivo com os dinamômetros, a quatro furos passantes (\varnothing 6,5 mm) dispostos em um padrão circular com diâmetro de 40 mm foram projetados para a conexão que permite a fixação entre ambos os dispositivos, com o suporte de quatro parafusos (M6 x 1 mm). Esse padrão de furos também está presente nos dinamômetros desenvolvidos por Ribeiro (2014) e por Lourenço (2018), pois seguem a série de Renard. Portanto, o requisito de projeto mecânico (b) é devidamente satisfeito pelo projeto. O olhal (com rosca M10 x 1,5 mm) é empregado para fixar o cabo de aço ao conector. Além dos componentes mencionados, clips e sapatilhas foram utilizados para permitir a acomodação adequada do cabo de aço.

Para tornar possível a aplicação das 22 massas-padrão (requisito de projeto mecânico (f)), foi projetada uma estrutura com duas hastes (altura de 480 mm), as quais podem comportar, cada uma, as 11 massas-padrão requeridas, que, juntas, ocupam 385 mm de altura. Pela altura das hastes, mais massas-padrão poderiam ser dispostas, mas, devido aos resultados da análise estrutural, que serão expostos futuramente no texto, tal limitação é necessária. A escolha por duas hastes está relacionada à máxima altura disponível na mesa da máquina-ferramenta (960 mm). Considerando a configuração de duas hastes no projeto, são impostas duas limitações ao processo de carregamento: a) para que momentos e forças indesejadas não sejam transmitidos ao dinamômetro durante a calibração, deve haver um balanceamento das cargas que são impostas sobre as hastes, isto é, é a mesma quantidade de massas-padrão precisa ser aplicada em cada haste; b) como são utilizadas massas-padrão de 49,05 N, o intervalo entre cargas sucessivas que são aplicadas na caracterização e na calibração precisa ser igual a, no mínimo, 98,10 N. Além disso, para que a carga das massas-padrão seja transmitida ao cabo de aço, foi projetado um parafuso com uma porca de fixação, que conectam o cabo de aço à estrutura.

Para permitir a montagem do dispositivo de calibração à plaina limadora (requisito de projeto mecânico (d)), uma estrutura em forma de “L” foi projetada. Essa estrutura também é responsável por servir como suporte para roldana. Para a fixação da estrutura à máquina-ferramenta, foram projetados dois rasgos verticais (altura de 79 mm e largura de 16 mm), os quais permitem que o dispositivo seja fixado a plaina limadora com o auxílio de dois parafusos e porcas M16 x 2 mm. Além disso, o rasgo também possibilita o ajuste da altura de todo o dispositivo (com uma amplitude de 79 mm). Isso é importante para o processo de calibração, pois os dinamômetros a serem calibrados possuem diferentes alturas (78 mm para o dinamômetro de Ribeiro (2014); e 55 mm para o de Lourenço (2018)).

Por causa da necessidade de componentes de suporte para a disposição das massas-padrão, a carga que é imposta horizontalmente sobre os dinamômetros não é causada apenas pela aplicação das massas-padrão como também pela massa de sua estrutura de suporte. Para anular essa carga horizontal adicional que é imposta sobre o dinamômetro (requisito de projeto mecânico (g)), desenvolveu-se um sistema de contrapeso, como pode ser visto no detalhe “A” da Fig. 2. Esse sistema é composto por um contrapeso do material aço AISI 1020 (\varnothing 50 mm e comprimento de 243,6 mm), um cabo de aço (\varnothing 3/32”) e duas roldanas (\varnothing 18 mm). A dimensão de 243,6 mm foi necessária para anular a massa de todo suporte de disposição de massa e, a sua determinação será mostrada a posterioridade. O princípio de funcionamento é o seguinte: um cabo de aço é conectado à estrutura das massas-padrão e ao contrapeso; este último, possui uma massa igual à da estrutura de suporte das hastes; balanceando assim, a carga adicional que era antes imposta sobre o dinamômetro. Para acoplar o sistema à estrutura, duas roldanas foram dispostas internamente à estrutura que serve como suporte à roldana principal, sendo fixadas com o auxílio de dois eixos (\varnothing 6 mm, comprimento de 61 mm) e quatro anéis trava-eixo (\varnothing 6 mm).

Em relação à análise estrutural do dispositivo, foram efetuados os cálculos considerados como os mais críticos para o projeto: (a) a deflexão e a resistência ao escoamento da estrutura responsável pelo suporte das hastes; (b) a resistência do parafuso de fixação; (c) o diâmetro mínimo para os cabos de aço a serem empregados; e (d) a resistência do eixo da roldana ao carregamento. A partir dessa análise foi verificado que todos os componentes resistiam a esses casos com um fator de segurança mínimo de 1,2.

Para o caso (a), foi verificado que a estrutura do suporte das hastes está submetida a uma tensão máxima de 24,14 MPa e que, como ela é feita de aço AISI 1020 (tensão de escoamento igual a 350 MPa), ela resiste ao escoamento com um fator de segurança igual a 14,5 (MatWeb, 2020a). Quanto ao caso (b), foi verificado que os parafusos de fixação selecionados (M12x1,5 mm) resistem à sobrecarga, à separação das juntas, ao escoamento e à fadiga com fatores de segurança iguais a 68, 1,3, 10 e 82, respectivamente. Em relação ao caso (c), foi calculado o diâmetro mínimo para os dois cabos de aço utilizados (um para conectar o dinamômetro e a estrutura de suporte das hastes, e outro para conectar esta estrutura ao contrapeso) com base nas forças e na resistência à tração de cabos de aço da classe 6x7 com alma de fibra (17 N/mm²), além de considerar um fator de segurança igual a 2 (CIMAF, 2009; Vornbäumen, 2020). Para o cabo de aço responsável pela sustentação do contrapeso, foi definido um diâmetro mínimo de 0,351 mm (um diâmetro de 3/32”) (2,38 mm) foi selecionado), enquanto que, para o cabo de aço que sustenta a estrutura de suporte das hastes, um

diâmetro mínimo de 1,878 mm foi calculado (uma diâmetro de 1/8" (3,17 mm) foi selecionado). E para o caso (d), foi verificado que o eixo da roldana está submetido a uma tensão máxima igual a 462,18 MPa e que, como o eixo é composto por aço AISI 1045 (tensão de escoamento igual a 550 MPa), ele resiste ao escoamento com um fator de segurança igual a 1,19 (MatWeb, 2020b). Portanto, as dimensões e os materiais selecionados para o desenvolvimento do dispositivo satisfazem os requisitos de carregamento máximo do sistema (requisito de projeto mecânico (e)).

Após essa etapa, os componentes e os materiais foram adquiridos e manufaturados. Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados, respectivamente, os componentes que foram adquiridos e os componentes que precisaram ser manufaturados. Em geral, os componentes adquiridos consistem de componentes de fixação como parafusos, porcas, arruelas e olhal, enquanto que os componentes que precisaram ser manufaturados no LABMAN consistem de componentes mais customizados para o dispositivo, como as estruturas de suporte e o contrapeso, ou de componente de fixação que precisaram ter detalhes ajustados.

Tabela 1. Lista de componentes mecânicos comprados. Fonte: Elaborada pelo autor.

Item	Quantidade
Olhal tipo parafuso (rosca M10 x 1.5 mm)	1
Roldana principal	1
Cabo de aço (\varnothing 3/32")	1
Cabo de aço (\varnothing 1/8")	1
Clips (grampo) para cabo de aço (3/16", 1/8")	5
Sapata para cabo de aço (3/16", 1/8")	3
Parafuso (rosca M16 x 2 mm)	2
Porca (rosca M16 x 2 mm)	2
Arruela (\varnothing int 16 mm)	2
Porca (rosca M12 x 1.75 mm)	1
Arruela (\varnothing int 12 mm)	1
Parafuso rosca M6 x 1 mm)	4
Parafuso (rosca M5 x 1 mm)	2
Porca (rosca M5 x 1 mm)	2
Arruela (\varnothing int 5 mm)	2
Anel trava eixo (\varnothing int 12 mm)	4
Anel trava eixo (\varnothing int 6 mm)	4

Tabela 2. Lista de componentes mecânicos manufaturados. Fonte: Elaborada pelo autor.

Item	Quantidade
Conexão entre o dinamômetro e a carga aplicada	1
Suporte das hastes	1
Suporte das roldanas	1
Parafuso de fixação (rosca M12 x 1,75 mm)	1
Hastes	2
Eixos para a fixação das hastes (\varnothing 12 mm, L = 31 mm)	2
Roldanas internas	2
Eixos para a fixação das roldanas internas (\varnothing 6 mm, L=61 mm)	2
Contrapeso	1

Após a manufatura dos componentes, realizou-se a atividade de verificação dimensional. Os resultados das medições geométricas e de massa dos componentes se mostraram condizentes com as estimativas realizadas durante o projeto mecânico do dispositivo. Além disso, foi estabelecida a massa final do contrapeso do sistema (3,76 kg). E, após a verificação dimensional de todos os componentes do dispositivo, eles foram montados e fixados à plaina limadora (máquina na qual o dinamômetro é fixado para a realização dos ensaios), como está disposto na Fig. 3. Conforme pode

ser observado na Fig. 3, o dinamômetro desenvolvido na pesquisa de Ribeiro (2014) também está fixado ao dispositivo de calibração e à plaina.

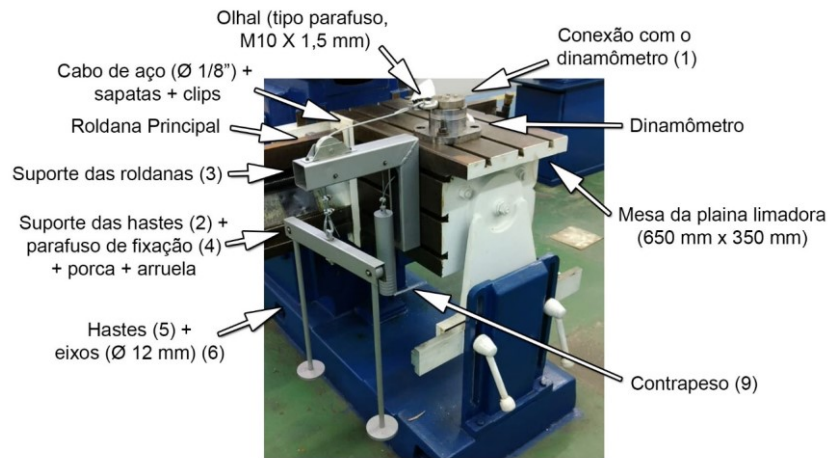


Figura 3. Montagem do dispositivo de calibração manufaturado. Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a conclusão da etapa 2 prevista na metodologia, oito rotinas computacionais foram desenvolvidas para os processos de caracterização, de calibração e de identificação de frequências naturais de vibração. Tais rotinas são disponibilizadas para consulta em um repositório *online* (TRIACA, 2020). Para a caracterização, duas rotinas foram implementadas. Uma delas é responsável pela aquisição da tensão elétrica de saída do dinamômetro e pelo salvamento dos dados em um arquivo de texto. Além disso, é permitido que o usuário visualize os dados coletados em tempo real e selecione o intervalo de dados que será salvo com o auxílio de uma janela temporal, para cada valor de carga aplicado. Na outra rotina, o processamento dos dados do ensaio de caracterização é realizado. A sua interface gráfica é apresentada na Fig. 4.



Figura 4. Rotina de processamento de dados do procedimento de caracterização do dinamômetro. Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme mostra a Fig. 4, a rotina de processamento dos dados de caracterização possui as seguintes funcionalidades: a) permite o carregamento dos arquivos de texto criados no código anterior; b) obtenção dos valores médios de carregamento para cada valor de carga aplicada; c) cálculo dos coeficientes da regressão linear entre os dados

do sinal de tensão elétrica importados no arquivo de texto e os valores médios de carga informados; d) estimativa da força (força calculada) com base na regressão linear calculada; e) disposição das curvas de carregamento/descarregamento e da carga teórica (estimada com a regressão linear); f) o cálculo do coeficiente de determinação entre a força aplicada e a tensão elétrica de saída dos dinamômetros; e g) o salvamento dos coeficientes da regressão linear em um arquivo de texto (extensão “.txt”). Essa última funcionalidade não é visível na interface disposta na Fig. 4. O salvamento do arquivo ocorre de forma automática quando o usuário finaliza o carregamento de arquivos, de maneira que, ao final desta etapa, a funcionalidade não fica disposta na interface gráfica final da rotina. Os valores de interferência cruzada e a sensibilidade do dinamômetro, em cada sentido de medição, podem ser estimados com o auxílio do código, com base nos coeficientes de regressão linear. A interferência cruzada é calculada quando os dados da aquisição de tensão elétrica e os valores das cargas estão em sentidos distintos. Nesse último caso, a regressão linear calculada também corresponde à curva de calibração do dinamômetro no sentido selecionado.

Para os ensaios de calibração, também foram elaboradas rotinas de aquisição e de processamento dos dados. Assim como para a caracterização, a primeira rotina computacional é responsável pela aquisição de sinal, e possui todas as funcionalidades do código de aquisição do procedimento de caracterização. Contudo essa rotina também permite que o usuário carregue o arquivo com os coeficientes da curva de calibração e calcula, com base em tal curva, uma estimativa das forças que o carregamento exerce sobre o dinamômetro. Além disso, os dados de saída são referentes a essa força calculada. O processamento e a análise da calibração são realizados com o suporte de três diferentes rotinas computacionais, as quais têm, como função principal: 1) o cálculo dos erros médios absoluto e relativo entre os valores de força aplicados no ensaio de calibração e os valores de força calculados com a curva de calibração estimada com o auxílio do código de processamento dos dados da caracterização; 2) o cálculo dos erros de histerese e de linearidade para os ciclos de carregamento/descarregamento; 3) o cálculo do erro de repetitividade. A interface gráfica (ao final da execução da rotina) é apresentada na Fig. 5.

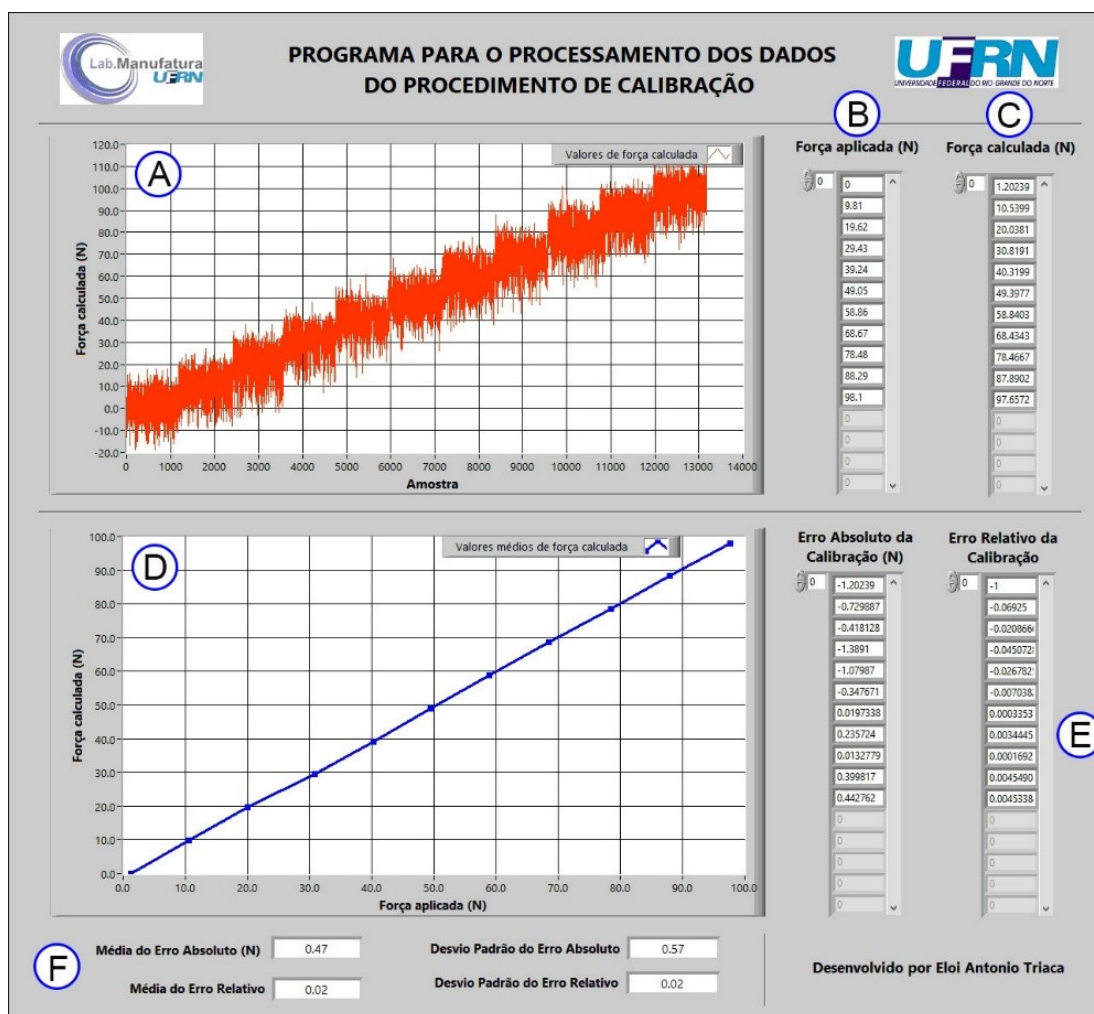


Figura 5. Rotina de processamento de dados do procedimento de calibração do dinamômetro. Fonte: Elaborada pelo autor.

A rotina disposta na Fig. 5 possui as seguintes funcionalidades: a) possibilita o carregamento dos arquivos de texto salvos na rotina de aquisição, cujos dados são dispostos graficamente (a ordem de exibição corresponde à ordem de carregamento); b) permite que o usuário informe os valores das forças aplicadas (correlacionando com cada arquivo), os quais são também dispostos; c) calcula e apresenta (em tabela) o valor médio de força calculada para cada arquivo carregado; d) dispõe, em um gráfico, uma relação entre os valores médios de força calculada e as respectivas forças aplicadas; e) apresenta e calcula os erros absoluto e relativo para cada arquivo que foi carregado; f) calcula e apresenta o erro médio e o desvio padrão do erro (tanto o absoluto como o relativo) entre a carga que é aplicada e o seu valor teórico. A funcionalidade (a) e parte da funcionalidade (b) são apresentadas apenas durante a execução do código e por isso não são exibidas na Fig. 6. Na primeira rotina de processamento são calculados e apresentados os erros de histerese e de linearidade para um ciclo de carregamento/descarregamento. Neste caso, um gráfico com a curva de carregamento e de descarregamento também é disposto. Já a terceira rotina foi implementada para permitir o cálculo e a disposição do erro de repetitividade. Nela, o usuário deve informar os desvios-padrão das medições para cada valor de carga aplicada. Como algumas etapas do processo de análise dos resultados dos ensaios de calibração necessitam também de valores médios dos carregamentos, dos descarregamentos e dos dois processos em conjunto, um código auxiliar foi elaborado para calcular tais valores médios e os desvios-padrão para cada valor de carga aplicada. Esses dados são salvos separadamente em arquivos de texto distintos.

Para a identificação das frequências naturais de vibração dos dinamômetros, foram elaboradas duas rotinas computacionais. A primeira é responsável pela aquisição do sinal de vibração emitido pelo acelerômetro, possuindo as seguintes funcionalidades: a) permite a aquisição de três sinais de vibração (para os sentidos ortogonais “X”, “Y” e “Z”); b) dispõe graficamente, em tempo real, tais sinais; c) permite que o usuário escolha a frequência de amostragem da aquisição de dados; d) possibilita a seleção do intervalo de dados que será salvo com o auxílio de uma janela temporal. Assim como nos outros códigos desenvolvidos, os dados selecionados são salvos em um único arquivo de texto. Uma segunda rotina foi implementada para realizar o processamento do sinal de vibração e permitir a detecção das frequências naturais de vibração. A interface gráfica de tal rotina é disposta na Fig. 6.

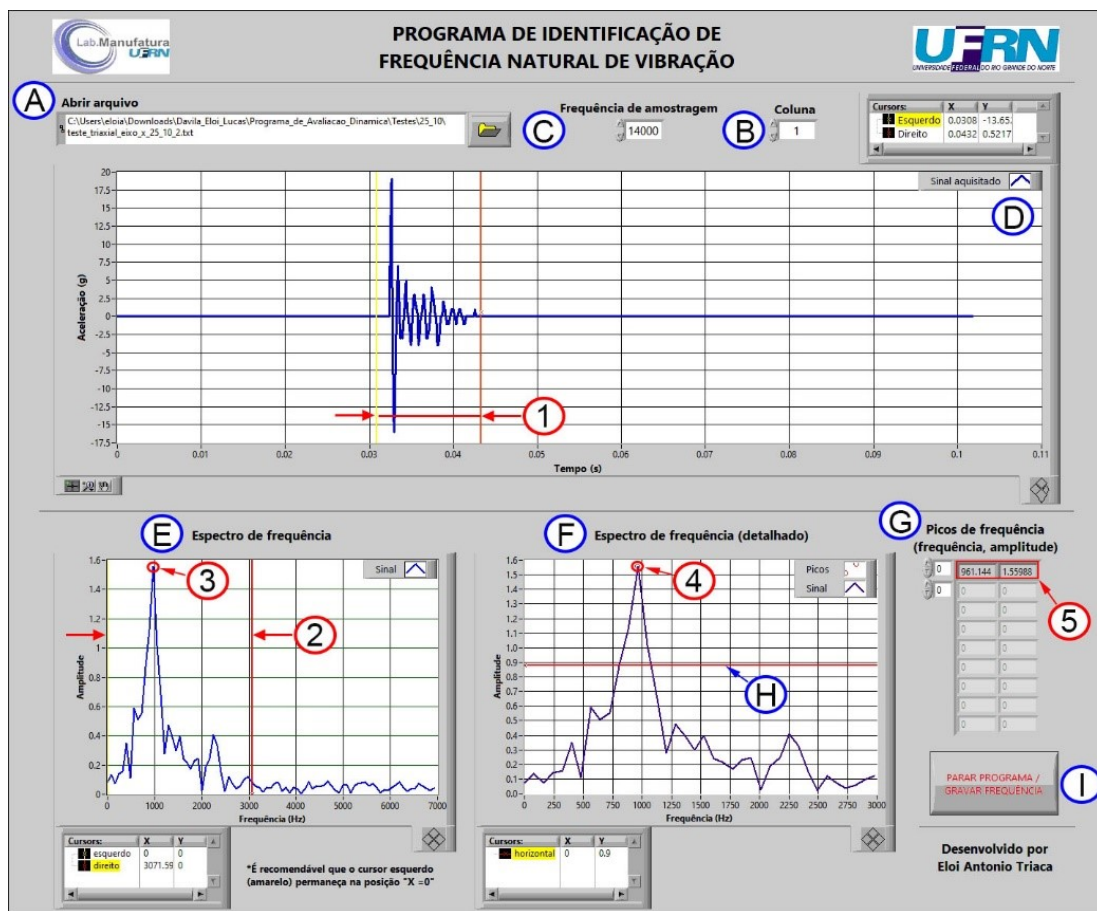


Figura 6. Rotina de processamento de dados para a identificação de frequência natural de vibração. Fonte: Elaborada pelo autor.

As funcionalidades da rotina apresentada na Fig. 6 são as seguintes ao usuário: a) importar o arquivo de texto criado com o código de aquisição; b) selecionar a coluna do arquivo que será analisada (os sinais de vibração em cada sentido

de medição são dispostos em diferentes colunas); c) informar a frequência de amostragem utilizada na aquisição; d) selecionar, com o auxílio de uma janela temporal, um intervalo de dados para ser analisado; e) visualizar os picos de frequência em um espectro de frequência (calculado com auxílio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos dados selecionados); f) selecionar com uma janela um intervalo de frequências a serem analisadas e dispostas com maior detalhamento, em um segundo espectro de frequência; g) apresentar a frequência e a amplitude dos “picos de frequência” (frequências que estão relacionadas às maiores amplitudes da FFT) desse espectrograma; h) ajustar, com o auxílio de cursores horizontais, para qual intervalo de amplitudes serão identificados picos de frequência; i) salvar os valores dos picos de frequência selecionados em arquivos de texto. Além das funcionalidades, são destacados na Fig. 6: 1) a janela temporal para seleção dos dados; 2) a janela para seleção de frequências a serem detalhadas; 3) o pico de frequência (961,1 Hz) no primeiro gráfico de espectro de frequência; 4) o mesmo pico de frequência no espectro de frequência detalhado; 5) e os valores da frequência (em Hz) e da amplitude do pico.

Com a implementação dos códigos de aquisição e de processamento de dados, os ensaios experimentais de caracterização, calibração e de identificação de frequências naturais de vibração nos eixos ortogonais “X”, “Y” e “Z” dos dinamômetros podem ser realizados, conforme a demanda exigida pelo requisito (3) do projeto.

4. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, os dinamômetros desenvolvidos por Ribeiro (2014) e Lourenço (2018) no LABMAN podem ser devidamente calibrados nas três componentes ortogonais de aplicação de força com o auxílio do dispositivo de calibração manufaturado e das rotinas computacionais de aquisição e processamento de dados elaboradas. Considerando o desenvolvimento realizado neste trabalho, pode-se afirmar que:

a) O dispositivo mecânico de calibração foi projetado de modo a atender as definições do projeto mecânico, como, por exemplo, a necessidade que forças horizontais possam ser aplicadas sobre os dinamômetros e que o dispositivo possua um sistema de compensação de cargas acoplado. A viabilidade técnica do projeto foi verificada com o suporte de análises de engenharia;

b) A manufatura e a montagem do dispositivo mecânico em uma plaina limadora mostraram-se adequadas para a realização do procedimento de calibração de dinamômetros;

c) Foram desenvolvidas, com o auxílio da plataforma *LabVIEW 2011*, oito rotinas computacionais de aquisição e de processamento de dados para os procedimentos de caracterização, de calibração e de identificação de frequências naturais de vibração dos dinamômetros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a realização da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 376: *Materiais Metálicos – Calibração de máquinas de instrumentos de medição de força utilizados para a verificação de máquinas de ensaio uniaxiais*. Rio de Janeiro, 2012.
- Budynas, R., Nisbett, J. K., 2011. *Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica*. 8. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011. 1073 p. Tradução de: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar.
- CIMAF, 2009. “Manual Técnico de Cabos”. 21 de junho de 2020. <<https://www.internacionalcabos.com.br/CatalogoCimaf.pdf>>.
- Hibbeler, R. C., 2010. *Resistência dos Materiais*. Pearson Prentice Hall7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010, 659 p. Tradução de Arlete Simille Marques; revisão técnica de Sebastião Simões da Cunha Jr.
- LABMAN. *Máquinas Convencionais*. 15 de junho de 2020. <https://labman.ct.ufrn.br/pagina.php?a=maq_convencionais>.
- Li, Y., Zhao, Y., Fei, J., Qin, Y., Zhao Y., Cai, A., Go, S., 2017. “Design and Development of a Three-Component Force Sensor for Milling Process Monitoring”. *Sensors*, Vol. 17, n. 5, p. 949-967.
- Liang, Q., Zhang, D., Wu, W., Zou, K., 2016. “Methods and Research for Multi-Component Cutting Force Sensing Devices and Approaches in Machining”. *Sensors*, Vol. 16, n. 11, p. 1926-1933.
- Lourenço, M. A. M., 2018. “Projeto e construção de dinamômetro triaxial com múltiplos elementos elásticos”. Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- Luo, M. et al., 2018. “A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 110, p. 556-568.
- MatWeb. “AISI 1020 Steel, cold rolled”. 25 de junho de 2020a. <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cfffbb&ckck=1>>.

- MatWeb. "AISI 1045 Steel, as cold drawn, 22-32 mm (0.875-1.25 in) round". 25 de junho de 2020b. <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9aa951ba895940159b45c570be74b036>>.
- National Instruments. "Ambiente LabVIEW: Página de descrição". 08 de junho de 2020 <<https://sine.ni.com/np/app/main/p/docid/nav-104/lang/pt/>>.
- Ribeiro, K. S. B., 2014. *Construção de dinamômetro para avaliação de carregamentos na manufatura de componentes para a indústria do petróleo*. Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Rizal, M., Ghani, J. A., Nuawi, M. Z., Haron, C. H. C., 2015. "Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 52-53, p. 559-576.
- Rizal, M., Ghani, J. A., Nuawi, M. Z., Haron, C. H. C., 2018. "An embedded multi-sensor system on the rotating dynamometer for real-time condition monitoring in milling". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, p. 811-823.
- Subasi, O.; Yazgi, S., G.; Lazoglu, I., 2018. "A novel triaxial optoelectronic based dynamometer for machining processes". *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 279, p. 168-177.
- Totis, G., Adams, O., Sortino, M., Veselovac, D., Klocke, F., 2014. "Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications". *Measurements*, Vol. 49, p. 164-181.
- Triaca, E. A., 2020. "Desenvolvimento de um procedimento de calibração para dinamômetros baseados em extensômetros". 26 de agosto de 2020. <<https://github.com/eloiantonio/Desenvolvimento-de-um-procedimento-de-calibracao-para-dinamometros-baseados-em-extensometros.git>>.
- Vornbäumen. "Technical Notes". 21 de junho de 2020 <<https://www.vornbaeumen.de/en/service/technical-notes/calculation-variables.html>>.
- Zhao, Y., Zhao Y., Ge, X., 2018. "The Development of a Triaxial Cutting Force Sensor Based on a MEMS Strain Gauge". *Micromachines*. Vol. 9, n.1, p. 30-41.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.