



## DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA USO EM AULAS PRÁTICAS DE METROLOGIA INDUSTRIAL

**Fabricio T. Paziani** – fpaziani@ufscar.br

**Flávio Y. Watanabe** – fywatanabe@ufscar.br

**Rafael V. Aroca** – aroca@ufscar.br

Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica  
Rod. Washington Luis, Km 235  
CEP 13565-905 – São Carlos – SP

**Fábio L. Nardin** – fnardin93@gmail.com

Universidade Federal de São Carlos, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
Rod. Washington Luis, Km 235  
CEP 13565-905 – São Carlos – SP

**Resumo:** *No atual cenário econômico das universidades federais brasileiras, é um grande desafio adquirir equipamentos de alta resolução e alta exatidão para uso em aulas práticas de metrologia. Como alternativa, é comum o desenvolvimento de projetos e a construção de equipamentos didáticos de baixo custo dentro de atividades de extensão, com envolvimento de alunos de graduação. Este trabalho relata o desenvolvimento de dois equipamentos para uso em aulas práticas da disciplina “Princípios de Metrologia Industrial”, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A atividade foi apoiada pela Pró-Reitoria de Extensão (ProEx) e teve como premissa a utilização de materiais e processos de fabricação de baixo custo. Dentro do escopo proposto, foram produzidas uma base de medição universal e uma máquina de medição linear. O processo construtivo permitiu verificar que o exercício de práticas simples é uma experiência motivadora tanto para o aluno diretamente envolvido na atividade quanto para os alunos usuários dos equipamentos produzidos.*

**Palavras-chave:** *Extensão universitária, Material didático, Metrologia industrial.*

### 1 INTRODUÇÃO

O controle dimensional é atividade fundamental para a indústria, pois sem a verificação da conformidade dimensional, não há garantias de que o processo empregado na fabricação de um produto esteja dentro das tolerâncias estabelecidas em projeto. Assim, não há como assegurar que o produto irá funcionar corretamente dentro das aplicações esperadas. Por exemplo, considerando um acoplamento entre um eixo e um mancal, quando o devido controle dimensional não é aplicado, não se pode afirmar se o encaixe apresentará folga excessiva ou interferência, podendo assim, prejudicar o funcionamento do equipamento.

Para garantir que as dimensões estejam de acordo com os requisitos do projeto faz-se necessário a utilização de equipamentos adequados, possuindo especificações como faixa de medição, exatidão e tolerâncias dimensionais que podem variar para cada item a ser medido.



Os custos destes equipamentos industriais estão diretamente relacionados a quão restritos estão os requisitos para os instrumentos empregados na medição.

No âmbito acadêmico, nem sempre é possível dispor destes equipamentos devido ao elevado custo. Contudo, desde a sua formação, um dos papéis do engenheiro é atuar buscando soluções alternativas para os problemas enfrentados utilizando os recursos disponíveis.

Vários exemplos de desenvolvimento de material didático como alternativa para uso em atividades de graduação podem ser citados. O trabalho de Franco et. al. (2016) apresentou o desenvolvimento de material didático para o estudo de vibrações mecânicas, também no âmbito de atividade de extensão, para uso em disciplinas do curso de Engenharia Mecânica.

Evangelista et. al. (2016) desenvolveram um dinamômetro de baixo custo, com uso de materiais de descarte, para ilustração da lei de Hooke, inclusive com uso de microcontrolador Arduino.

O trabalho de Aguiar et al. (2016) apresenta, como forma de sobrepor dificuldades em disciplinas de desenho técnico e outras relacionadas a projeto de arquitetura e engenharia, o desenvolvimento de modelos tridimensionais de peças mecânicas e elementos arquitetônicos, como estruturas de telhados e coberturas.

Oliveira et al. (2015) desenvolveram o protótipo de um braço mecânico que também utiliza microcontrolador Arduino, como instrumento de divulgação de curso de Engenharia Elétrica para alunos de escolas de ensino médio.

O trabalho de Pocovi e Santos (2015) registra o desenvolvimento de uma guia linear de baixo custo com controle de posicionamento para uso em aulas de cursos de Controle e Automação.

Neste trabalho buscou-se desenvolver equipamentos para aplicação didática com o custo de construção significativamente reduzido. A viabilização deste projeto deu-se através de uma atividade de extensão apoiada pela Pró-Reitoria de Extensão (ProEx) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Os equipamentos desenvolvidos foram disponibilizados para uso no curso de Engenharia Mecânica, com a finalidade de auxiliar em práticas da disciplina “Princípios de Metrologia Industrial”, além de uso cotidiano no laboratório de Metrologia. O projeto também proporcionou o desenvolvimento de habilidades de desenvolvimento conceitual em ferramentas CAD (*Computer Aided Design*), processos de fabricação mecânica, circuitos eletrônicos e programação. Esta atividade de extensão originou uma orientação de iniciação científica e um trabalho de conclusão de curso subsequentes.

## 2 METODOLOGIA

Com o orçamento disponível, foi possível a construção de dois equipamentos. O primeiro é uma base universal de medição e o segundo, uma máquina de medição linear. A última foi base para desenvolvimento de um projeto de iniciação científica. A seguir, serão descritos os procedimentos de concepção e construção de cada equipamento separadamente.

### 2.1 Base de Medição Universal

Este equipamento possui uma função próxima a um desempenho, pois se trata de uma superfície com desvios de planicidade controlada na qual se deve apoiar a peça a ser medida, além de uma haste perpendicular a esta superfície e um suporte para instrumentos de medição como relógio comparador e apalpador, entre outros. A Figura 1 mostra o exemplo de uma base de medição comercial.



### *Projeto Conceitual*

Para o desenvolvimento do projeto conceitual, foi empregada a ferramenta CAD Siemens NX. Cada peça constituinte foi modelada e uma montagem virtual do equipamento foi realizada. Este processo se deu de maneira iterativa entre aluno e orientador até o projeto se mostrar em sua configuração final, possuindo uma pedra de granito, peças metálicas (uma haste de aço SAE 8620, uma bucha de bronze, porca e arruela) e um suporte para relógio comparador.

Figura 1 – Base de medição comercial

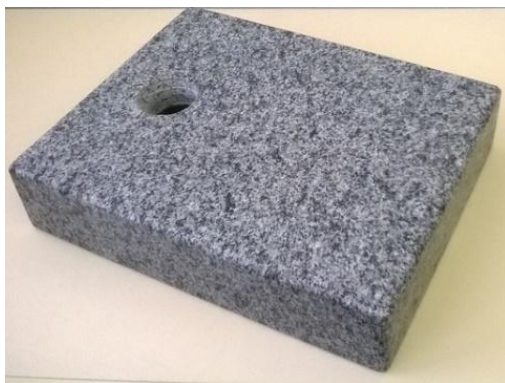


### *Pedra de granito*

As pedras comerciais para este tipo de equipamento são submetidas a processos que garantem alta planicidade à superfície, porém, para reduzir os custos para o projeto com fins didáticos, optou-se pela compra de uma peça de granito comum em uma marmoraria. O produto entregue já contemplava um furo cilíndrico passante, para montagem da haste e um rebaixo retangular na parte inferior para alojamento da porca que prende a haste à pedra. As Figuras 2(a) e (b) mostram a vista superior e inferior da pedra.

Figura 2 – Vista superior (a) e inferior (b) da pedra de granito

(a)



(b)

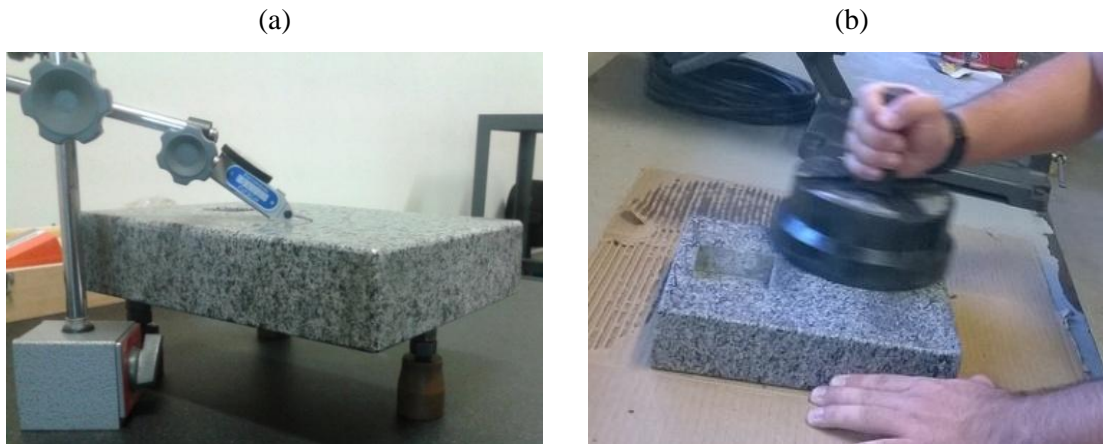


A pedra foi avaliada quanto ao desvio de planicidade originalmente presente na face superior. Este experimento está ilustrado na Figura 3(a). Sobre o desempenho, a pedra foi apoiada em três suportes de altura ajustável. O nivelamento da pedra foi conseguido com o auxílio de um relógio comparador, ajustando-se a altura dos suportes para zerar a leitura do relógio nos três pontos selecionados. A varredura sobre a superfície com um relógio apalpador revelou uma diferença máxima de 40  $\mu\text{m}$  em toda área útil da pedra.



Para conferir uma melhor qualidade à superfície, esta foi submetida a um processo manual de lapidação, mostrado na Figura 3(b). Após a lapidação, 100 pontos foram mapeados sobre a superfície da pedra e uma nova verificação de erro de planicidade foi realizada. As medições foram efetuadas quatro vezes em cada ponto e foi tomada uma média dos valores.

Figura 3 – Medição de erro de planicidade inicial (a) e Lapidação da pedra (b)

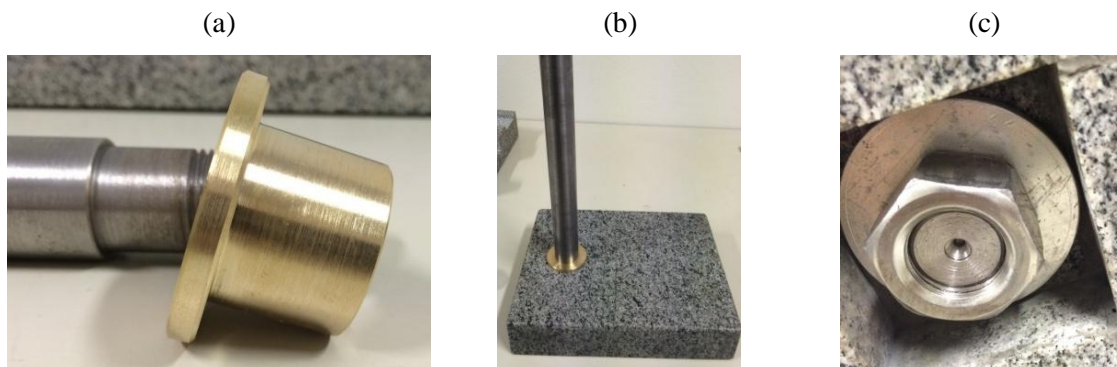


### *Peças metálicas*

A haste foi construída em aço SAE 8620 e usinada em torno mecânico convencional no Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da UFSCar. A haste apresenta um rebaixo para assentamento sobre a bucha e rosca em sua extremidade inferior para colocação de uma porca que garantirá a montagem rígida do equipamento.

Pelo fato de a pedra ter sido adquirida em marmoraria, não há garantias sobre o perpendicularismo do furo em relação à face superior, portanto, foi adotada uma bucha de bronze usinada no mesmo torno que a haste. Esta bucha foi construída para minimizar o erro de perpendicularismo entre a pedra e a haste, pois se apoiará na superfície plana polida da pedra e por se ajustar com folga em relação ao furo, confere uma perpendicularidade controlada da montagem. A Figura 4 mostra a bucha (a), montagem superior (b) e inferior (c) do conjunto.

Figura 4 – Bucha (a), Vista superior (b) e Vista inferior (c) da montagem



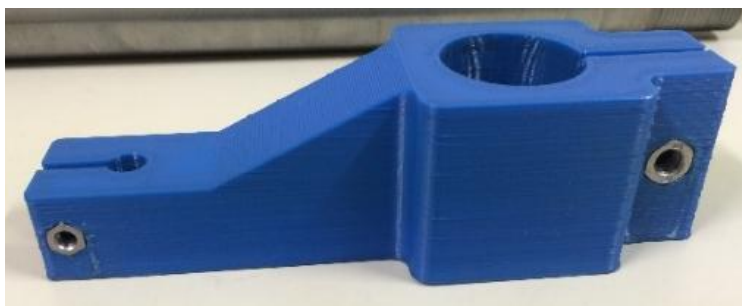




### ***Suporte para relógio comparador***

Para a construção do suporte foi utilizado o processo de manufatura aditiva, por ser um recurso novo, disponível na universidade, de baixo custo e que é bastante versátil, além de cumprir com as exigências do projeto. Foi desenvolvido um modelo CAD da peça, prevendo os rasgos e alojamentos para parafusos e porcas. A Figura 5 a mostra o suporte pronto. Nesta peça foram montados manípulos que são responsáveis pela fixação do suporte na haste e pela fixação do instrumento de medição.

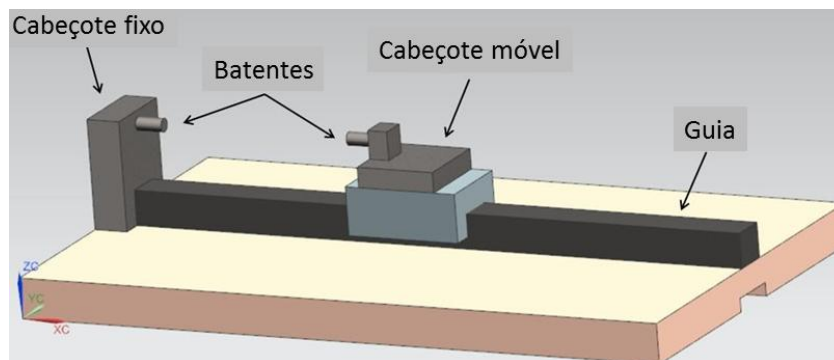
Figura 5 – Suporte construído por manufatura aditiva



## **2.2 Máquina de Medição Linear**

O segundo equipamento desenvolvido foi denominado de *Máquina de Medição Linear* (abreviada por *MML*). Trata-se de uma estrutura que permite a medição de distâncias em uma direção apenas. Primeiramente foram discutidas as melhores estratégias e soluções construtivas para a execução do projeto visando baixo custo, solidez do sistema e boa ergonomia. Um modelo CAD foi gerado para permitir o delineamento da proposta de funcionamento de construção das partes. A Figura 6 mostra o modelo tridimensional inicial

Figura 6 – Modelo CAD inicial da máquina de medição linear



Ao longo do desenvolvimento do projeto, os objetos conceituais foram tomando formas diferentes para possibilitar a construção da MML. Em seguida estão descritas as partes constituintes do sistema e como foi efetuada a sua construção.

### ***Processo Construtivo Mecânico***

A MML possui uma base em granito de baixo custo, comprado em marmoraria, responsável por apoiar toda a estrutura da máquina. Esta estrutura garante massa adequada



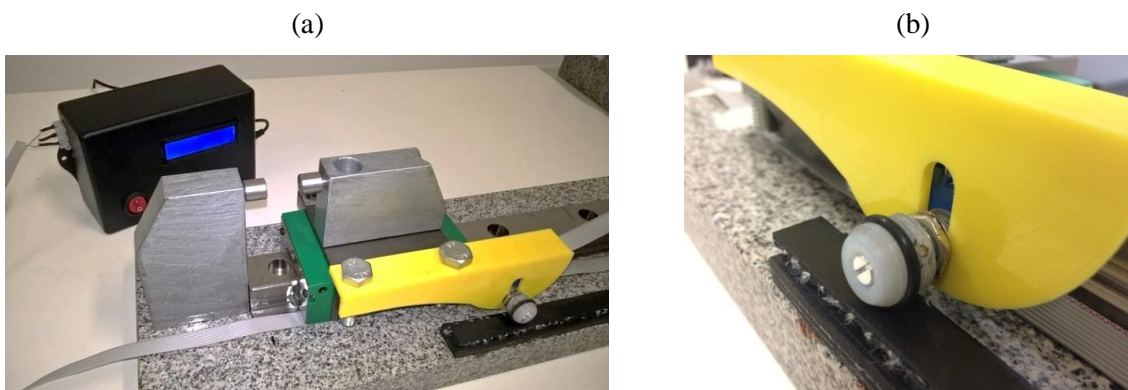
para conferir rigidez à máquina em sua operação, além de ser uma superfície suficientemente lisa e regular, na qual são apoiados os demais componentes do projeto.

Sobre esta base foi construído um cabeçote fixo, que possui um batente para permitir que a peça sob inspeção seja encostada primariamente. Neste batente é ajustada a leitura zero da medida, pois a medição é dada pela distância entre dois pontos, sendo o batente fixo a referência estacionária. Uma guia linear, colocada centralizada na base junto ao cabeçote fixo, possui papel fundamental para o projeto, pois sobre ela é montado o sistema de medição. Portanto suas tolerâncias apertadas minimizam a propagação de erros do sistema como um todo. A guia linear foi adquirida como doação pela empresa Schaeffler para o projeto.

Sobre a guia translada um carro que carrega um batente ajustado para ser coaxial ao batente do cabeçote fixo. O conjunto do carro, cabeçote e o batente sobre ele formam o cabeçote móvel da MML. Desta maneira, a distância entre estes dois batentes fornecerá a medição desejada.

Sobre o carro também foi montado um suporte para um potenciômetro. Este suporte foi projetado e impresso por manufatura aditiva no Laboratório de Engenharia Aplicada do DEMec, possuindo furos para fixação no carro e um espaço para encaixe do potenciômetro com um ajuste de altura. A montagem do sistema mecânico pode ser observada na Figura 7 (a). O detalhe da montagem do potenciômetro e da roda pode ser observado na Figura 7 (b).

Figura 7 – Sistema mecânico montado (a) e detalhe da montagem (b)



### ***Processo Construtivo Eletrônico***

Para efetuar a medição foi acoplado um sistema eletrônico à parte mecânica. O sistema é composto por um potenciômetro de múltiplas voltas, um sistema de aquisição de dados, um display digital, uma fonte de tensão e circuito regulador de tensão.

O potenciômetro foi montado no suporte e, em seu eixo, foi acoplada uma roda de nylon dotada de um anel de borracha, que gira sobre uma pista também de borracha. A rotação do eixo provoca a variação da resistência do potenciômetro e, portanto, a tensão em seus terminais varia proporcionalmente. Esta variação de tensão foi então lida por um sistema de aquisição de dados e calibrada para fornecer o valor da medição.

Foi escolhido o micro controlador Arduino UNO, por se tratar de uma tecnologia nova e de baixo custo, para a aquisição dos dados de tensão do potenciômetro. Neste micro controlador é possível programar os sinais de entrada e saída facilmente com o auxílio de um computador. Nesta placa foram conectados o potenciômetro, a fonte de tensão e o display digital. Então foi desenvolvido um software, em linguagem C++, que aplicado ao micro controlador, permitiu a calibração do sistema e a emissão o valor da medição ao display digital. O sistema é alimentado pela tensão da rede, com entrada bivolt alternada e saída 12 V



contínua. Um circuito regulador de tensão, baseado em um transistor LM7809, foi incluído no sistema para reduzir ruídos presentes na rede e da fonte DC. Desta maneira, o sinal de 12 V com ruído é transformado em um sinal de 9 V bastante constante e confiável.

Todo o sistema eletrônico foi montado dentro de uma caixa plástica, com entrada para os terminais do potenciômetro. Ainda há uma entrada para o conector da fonte DC, o display LCD e um botão para zerar a leitura.

### ***Calibração***

Após finalizar a construção do sistema, este foi submetido a um processo de calibração. O sinal apresenta um erro aleatório, oscilando após a terceira casa decimal, porém para resolução teórica desejada, de duas casas decimais, é possível considerá-lo estável e aplicar uma calibração estática. O processo foi realizado utilizando-se blocos padrão, com blocos de várias dimensões, começando pelos de menor dimensão e aumentando até atingir-se o número suficiente de pontos para análise. As medições da máquina foram comparadas às dimensões dos blocos, sendo possível levantar uma curva de calibração.

Porém, após a aplicação do procedimento de calibração, foi possível observar erros sistemáticos que mostraram valores precisos, porém com exatidão ruim. Com isso foi necessário aplicar um novo procedimento para correção dos valores, fazendo com que a curva de calibração levantada anteriormente fosse corrigida por outra curva, tornando as medições suficientemente exatas. Por fim, as curvas de calibração e de correção foram implementadas no algoritmo do microcontrolador e as medições foram refeitas.

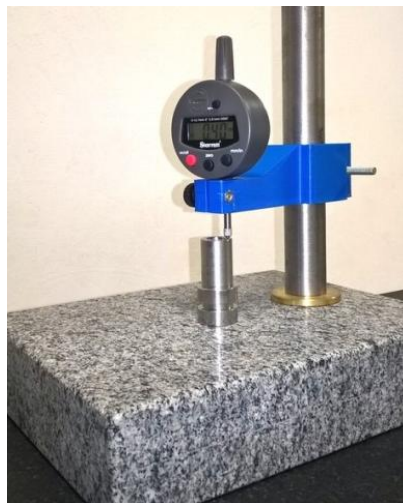
## **3 RESULTADOS**

A seguir, estão descritos os resultados observados no desenvolvimento dos equipamentos propostos.

### **3.1. Base de Medição Universal**

A montagem do equipamento foi realizada e a Figura 8 mostra a sua configuração final, com a base de medição pronta para utilização.

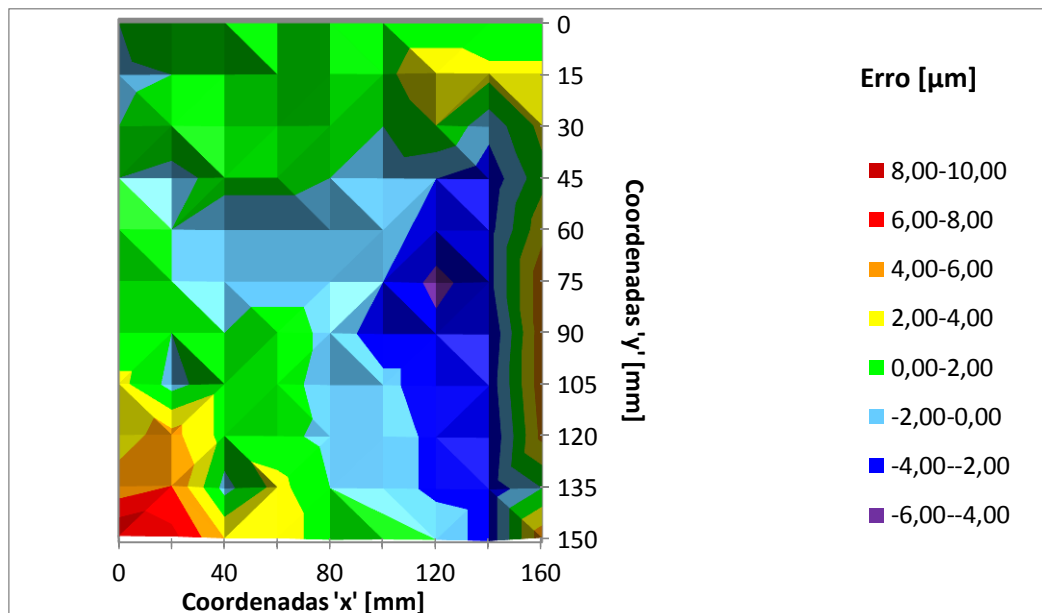
Figura 8 – Base de Medição Universal finalizada





Como citado no item 2.1, a face superior foi verificada quanto aos desvios de planicidade após a lapidação. As medições foram efetuadas quatro vezes em cada ponto e foi tomada uma média dos valores. O Gráfico 1 mostra o mapeamento da superfície, mostrando, em código de cores, os valor medidos de erro de planicidade.

Gráfico 1 – Mapeamento do erro de planicidade da superfície da Base de Medição Universal



Como é possível observar no Gráfico 1, o erro de planicidade da superfície, que era de 40  $\mu\text{m}$  antes da lapidação, foi reduzido a menos da metade, sendo agora de apenas 16  $\mu\text{m}$ . Deve-se notar, entretanto, que região central da superfície, mais utilizada para medições, possui um erro de planicidade da ordem de 4  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 Máquina de Medição Linear

Primeiramente, foi levantada a curva de calibração do sistema. Para tal, foram utilizados blocos padrão com onze dimensões diferentes e para cada dimensão foram efetuadas cinco medições de tensão elétrica no potenciômetro. Destas medições, foi calculada a média dos valores individuais e os pontos foram colocados em um gráfico de comprimento em função de tensão e uma reta ajustada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) foi traçada, determinando a equação que relaciona tensão e comprimento.

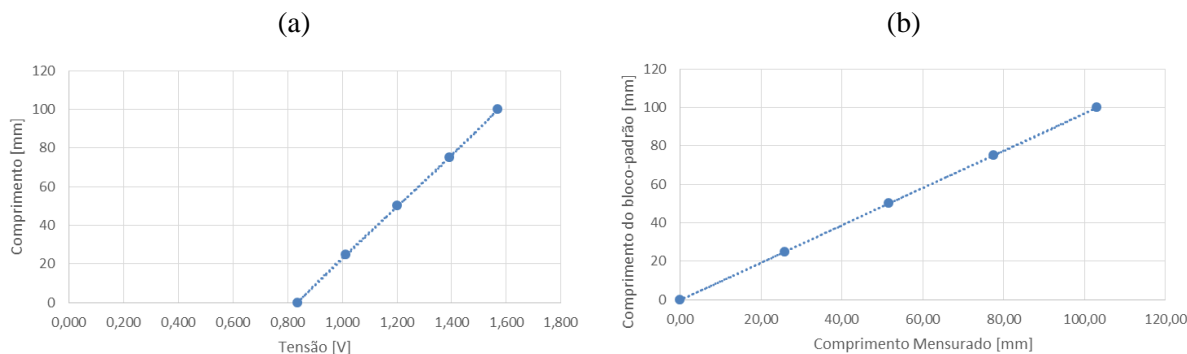
Uma série de medições foi realizada para testar a calibração. Inicialmente, os resultados não foram satisfatórios, apresentando exatidão muito ruim, com erros da ordem de cinco milímetros em algumas medições. Efetuando o mesmo procedimento de medição para diferentes pontos, foi observado que o erro de exatidão era maior quanto maior o comprimento mensurado. Então foi proposto realizar um ajuste efetuando medições de cinco dimensões diferentes, anotando-se os valores em milímetros que a máquina aferiu. Antes de cada medição a leitura do equipamento foi levada a zero, por meio de um botão no display do microcontrolador. O procedimento foi repetido 5 vezes para cada dimensão e então foi tomada a média das medições.





Então, novamente estes pontos foram plotados em um gráfico e a reta do MMQ foi ajustada. Esta reta foi utilizada para corrigir os valores medidos durante a aplicação do procedimento de medição. Com este último ajuste a exatidão do equipamento se mostrou satisfatória, obtendo erros na casa de 0,5 mm, tanto para mais quanto para menos. O Gráfico 2 mostra a curva de calibração original (a) e a curva de correção (b).

Gráfico 2 – Curva de calibração (a) e curva de correção (b)



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com um orçamento muito abaixo do custo de equipamentos comerciais, foi possível construir uma base universal de medição funcional com tolerâncias bastante apertadas. Durante sua construção, foi possível aliar uma técnica tradicional, como a lapidação manual, a um processo de fabricação moderno e inovador, a manufatura aditiva. Ainda, o aluno desenvolveu habilidades quase não contempladas no ambiente acadêmico tradicional de sala de aula, como cotar e comprar materiais, fazer a gestão do tempo e dos processos e propor alternativas de projeto.

A MML inicialmente não atingiu as expectativas colocadas em projeto, porém constatou-se que o potenciômetro não possui tolerâncias resistivas que atendessem os valores esperados. Foi possível concluir que o melhor resultado possível foi atingido para a construção proposta. Neste trabalho também foi possível abordar propostas de calibração e identificação de erros e propor soluções, observando o contraste entre teoria e prática.

O aluno bolsista de extensão continuou o desenvolvimento da MML. A atividade de extensão originou um projeto de Iniciação Científica Voluntária, cujo objetivo foi propor a otimização do equipamento, como novo sistema de leitura com encoder no lugar do potenciômetro e nova programação. As modificações propostas começaram a ser implementadas dentro do Trabalho de Conclusão de Curso do aluno, que está em andamento e cujos resultados serão publicados em novo artigo, após sua conclusão.

A formação em engenharia pressupõe o desenvolvimento de inúmeras habilidades, competências, valores e atitudes que capacitem os futuros engenheiros a enfrentar desafios profissionais multidisciplinares, mas embasados em conhecimentos básicos e específicos sólidos. Em um mercado globalizado e cada vez mais competitivo, o exercício da criatividade e a adoção de soluções inovadoras, mas com custos reduzidos, devem balizar as decisões dos futuros profissionais. Neste sentido, as atividades relatadas no presente trabalho e apresentadas aos estudantes, exemplificam e evidenciam a necessidade de se buscar soluções de engenharia simples, inovadoras e eficientes, sempre que possível e necessário.



### *Agradecimentos*

Os autores gostariam de agradecer a Pró-Reitoria de Extensão (ProEx) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelo auxílio financeiro que viabilizou a construção dos materiais didáticos descritos neste trabalho.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGUIAR, V. N. et al. Dificuldades dos discentes de engenharia em representação gráfica – diagnóstico e desenvolvimento de materiais. Anais: XLIV Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia. Natal: UFRN, 2016.

EVANGELISTA, T. S. et al. Protótipo de um dinamômetro usando Arduino e material de sucata para aulas de laboratório de física como estudo de caso da ABP. Anais: XLIV Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia. Natal: UFRN, 2016.

FRANCO, V. R. et al. Desenvolvimento de material didático para uso na disciplina “vibrações mecânicas”. Anais: XLIV Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia. Natal: UFRN, 2016.

OLIVEIRA, E. C. L. et al. Desenvolvimento de braço mecânico com controle digital para apresentação em escolas do ensino médio: a atuação do engenheiro em sistemas controle. Anais: XLIII Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia São Bernardo do Campo: UFABC, 2015.

POCOVI C. S., SANTOS, M. S., Desenvolvimento de uma guia linear com controle eletrônico analógico de posicionamento em malha fechada. Anais: XLIII Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia. São Bernardo do Campo: UFABC, 2015.



## **DEVELOPMENT OF COURSEWARE FOR USE IN PRATICAL CLASSES OF INDUSTRIAL METROLOGY**

**Abstract:** *In the current economic scenario of the Brazilian federal universities, it is a great challenge to acquire high resolution and high accuracy equipment for use in metrology practical classes. As an alternative, it is common the development of projects aiming the design and construction of low-cost courseware equipment. They are built within extension activities involving graduation students. This paper reports the development of two pieces of equipment for use in practical classes of the discipline "Principles of Industrial Metrology", of the Mechanical Engineering course at the Federal University of São Carlos (UFSCar). The activity was supported by the Extension Office (ProEx) and had, as a premise, the use of low-cost materials and manufacturing processes. Within the proposed scope, a universal measuring table and a linear measuring machine were developed. The constructive process allowed to verify that the exercise of simple practices is a motivating experience for the student who was directly involved in the activity and for the students who use the produced equipment.*

**Key-words:** *University extension, Courseware, Industrial metrology.*

Organização



Promoção

