

DESENVOLVIMENTO DE UM KIT DIDÁTICO PARA ESTUDOS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS, COM APLICAÇÃO NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC KIT FOR STUDIES OF MATERIAL RESISTANCE, WITH APPLICATION IN PRODUCTION ENGINEERING

Paulo Urbano Ávila* E-mail: paulo.avila@eseg.edu.br

Luiz Carlos de Campos**, * E-mail: lccampos@pucsp.br

Oscar João Abdounur*** E-mail: abdounur@ime.usp.br

José Antonio Siqueira Dias**** E-mail: siqueira@demic.fee.uicamp.br

Manuel Antonio Pires Castanho***** E-mail: manet@ipt.br

*Escola Superior de Engenharia e Gestão (ESEG), São Paulo, SP

** Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC/SP), São Paulo, SP

*** Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo (IMEUSP), São Paulo, SP

**** Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC), Universidade de Campinas (Unicamp), Campinas, SP

***** Laboratório de Metrologia Mecânica / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, SP

Resumo: Dentro do universo da engenharia de produção, o processo de usinagem de materiais metálicos e tratamento térmico causa tensões residuais que podem alcançar valores significativos e influenciar a durabilidade dos diversos componentes mecânicos. Definir o processo adequado para cada aplicação requer a previsão de quão elevada será a tensão gerada em função das variáveis do processo utilizado. A fim de conhecer os valores das tensões resultantes, é necessário medi-las, por exemplo, usando análise experimental de tensão, que consiste no uso de strain gauges para medir deformações em uma superfície. Logo, o objetivo deste artigo é apresentar o processo de desenvolvimento e aplicação de um kit didático educacional (KiDiTen®), versão II, automatizado, em conformidade com a formação por competência na pesquisa do ensino de Engenharia, utilizando conceitos de Física, Matemática e Teoria da Elasticidade, com o objetivo de levar o aluno ao conceito elementar da tensão mecânica, tensão elétrica e tensor de ordem 2. Utilizaram-se metodologias como Educação Baseada em Projetos, Aprendizado Baseado em Problemas e abordagem STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). Comprovou-se que a metodologia adotada foi adequada, empregando diversas metodologias de ensaios.

Palavras-chave: Pesquisa. Inovação. Ensino de Engenharia. Educação e STEM.

Abstract: Within the universe of production engineering, the process of machining metallic materials and heat treatment causes residual stresses that can reach significant values and influence the durability of the various mechanical components. Defining the appropriate process for each application requires forecasting how high the voltage generated will be depending on the variables of the process used. In order to know the resulting stress values, it is necessary to measure them, for example, using experimental stress analysis, which consists of using strain gauges to measure deformations on a surface. Therefore, the objective of this article is to present the process of development and application of an educational didactic kit (KiDiTen®), version II, automated, in accordance with the training by competence in the research of teaching Engineering, using concepts of Physics, Mathematics and Theory of Elasticity, with the objective of taking the student to the elementary concept of mechanical stress, electrical stress and tensor of order 2. Methods such as Project-Based Education, Problem-Based Learning and STEM

(Science, Technology, Engineering and Mathematics) approach were used. It was proven that the adopted methodology was adequate, employing several test methodologies.

Keywords: Research. Innovation. Engineering Teaching. Education and STEM.

1 INTRODUÇÃO

O homem constrói seu conhecimento à medida que a história acontece, especialmente, com a plena intenção de criar novas ideias e aperfeiçoar as que já possui, e, assim, passa a ser moldado com tudo aquilo que resulta de suas experiências e da sua interação com o meio.

Há muita relevância em se dizer que o conhecimento está ligado de forma inerente ao processo de desenvolvimento do pensamento, conforme descrito em Mosquera (2006). Quando se trata deste desenvolvimento, a inteligência abre a curiosidade e opera o funcionamento das atividades psíquicas, sobretudo na tentativa de acionar a compreensão de resolução de problemas e antecipar novas maneiras de se inovar, surgindo assim a criação do conhecimento.

O Projeto baseia-se na metodologia da fenomenologia de Husserl (1992), Heidegger (2007) e Oliveira (2006), visando a unir e organizar conhecimentos fundamentais da Matemática e da Física com aplicações na Engenharia com o objetivo de construir novas estratégias de ensino, mais acessíveis e prazerosas ao aluno.

A aplicação e sua solução foram a aprendizagem e incorporação das ideias fundamentais da Matemática, Física, Mecânica dos Sólidos e Teoria da Elasticidade e Resistência dos Materiais desde objetos matemáticos até a representação da realidade física, explorando por meio da geometria analítica, conceitos de matrizes, vetores e, principalmente, tensores. Além disso, foi possível analisar outros conceitos provenientes da mecânica dos sólidos, de forma simples e aplicada, incluindo os importantes aspectos históricos, a partir de ferramentas propostas por Heidegger (2007), Fleisch (2006) e Feynman (2016).

Nesta perspectiva, o desenvolvimento desta pesquisa no ensino de física com aplicações em engenharia foi dado por instrumentos de integralização. Tal preocupação quanto a promoção de ações integradas entre as disciplinas de Física e Matemática com aplicações na engenharia dentro do ambiente escolar é demonstrada por Pietrocola (2002), quando coloca em evidência questões

como, se a Matemática é a linguagem que permite ao cientista estruturar seu pensamento para apreender o mundo, o ensino de ciências deve oferecer meios para que os estudantes absorvam esta habilidade. Pois, “[...] não se trata apenas de saber matemática para poder operar as teorias físicas que representam a realidade, mas saber apreender teoricamente o real através de uma estruturação matemática” (PIETROCOLA, 2002).

Pode-se ressaltar que Pacey (1983) alerta que é indiscutível a importância de uma melhor educação em ciência e tecnologia, tanto para o cidadão quanto mais para os profissionais do ramo, o que propõe uma revisão de literatura em toda filosofia da educação, incluindo livros-texto e outros recursos para o desenvolvimento da aprendizagem, como para o uso de tecnologias.

Dentro deste paradigma, não se pode ignorar ser necessário a criação de novos processos e métodos para passar a execução do trabalho pedagógico com qualidade e competência, realizando o investimento em novas mídias de informação e comunicação. Logo, o curso de Engenharia de Produção na ESEG está apto a desenvolver consideráveis habilidades em tecnologia, como Inteligência Artificial, construção de novos processos operacionais mediante às técnicas de *Design Thinking* e melhoria das capacidades de gerenciamento de pessoas e equipes multiculturais. Torna-se imprescindível a adequação mediante o atendimento das necessidades de demanda, lançando mão destas ferramentas, especialmente como uma maneira de colocá-las a serviço da formação permanente e continuada das pessoas na busca do conhecimento.

Frente a isso, ao se considerar a dificuldade dos alunos de nível superior em absorver esses conteúdos e, de forma concomitante, partindo da própria maneira direta de colocar em prática, observando também a constância dinâmica desse conhecimento na vida de cada um desses indivíduos, verifica-se a importância de uma nova abordagem de ensino que crie uma aproximação entre conhecimento e interesse, teoria e prática, sala de aula e a vida cotidiana dos alunos.

Alguns desses instrumentos de integralização promovem uma melhor interação entre teoria e aplicação prática dos conhecimentos, como mostrado na Figura 1, tal qual: Técnica de análise de tensões utilizando *strain gauges*; Kits experimentais medindo flexão e torção; Vídeos educativos do professor Daniel Fleisch do Departamento de Física da Universidade de Wittenberg;

Conceituação matemática de Matriz, Vetor e Tensor; E aplicações em sala de aula com o *kit* (KiDiTen®), levando dessa forma ao aluno o conceito qualitativo de tensor.

Figura 1 – Estratégias Experimentais Aplicadas no Processo de Ensino e Aprendizagem



Fonte: Elaborado pelos autores.

O diagrama de blocos da Figura 1 mostra o processo de integralização do kit educacional denominado KiDiTen®, cuja finalidade é apresentar um kit educacional para o ensino de Matemática com Fundamentos da Teoria da Elasticidade com aplicações na Engenharia.

No processo do KiDiTen® salienta-se o apoio do Dr. Daniel Fleisch com o dispositivo lúdico interativo/livro/vídeo para melhor entender os conceitos de vetor e tensor de acordo com Sánchez (2007). Todo o desenvolvimento, validação e testes do KiDiTen® contou com o apoio do(s):

- i. Usuários da FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo e Centro Universitário SUMARÉ, com estudantes do ensino médio e superior que testaram a aplicação do *kit*;
- ii. Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo, que contribuíram para calibração do *kit*;
- iii. Parque CienTec; Projeto Catavento; Laboratório de demonstrações Ernst Wolfgang Hamburger (EWH)- IFUSP, para exposições nos eventos e visitas.

2 METODOLOGIA FENOMENOLÓGICA

Para Campos, Dirani e Mairinque (2011), a metodologia ativa ultrapassa as fronteiras do ensino tradicional de ensino e aprendizagem, em que os alunos são elementos ativos e o tutor é um elemento facilitador, numa metodologia dinâmica e direcionada a cada indivíduo. Alcançando-se mais clareza na aprendizagem autogerido, com o foco no estudante. Há integração entre universidades e empresas.

Project Based Education (PBE) é definido como uma metodologia de ensino com foco na atividade estudantil baseada em evidências, com trabalho em equipe e em resolução de projetos abertos, apoiados por vários cursos de palestras baseados em teoria podendo ser tanto um currículo, quanto um processo. O currículo consiste em problemas, cuidadosamente, selecionados e projetados que exigem a aquisição, por parte do estudante, de conhecimento crítico, proficiência na resolução de problemas, estratégias de aprendizado auto direcionadas e habilidades de participação em equipe Powell & Weenk (2003); Weenk, Blij e Plee (2012); Campos, Dirani e Mairinque (2011).

Baseando-se na metodologia ativa PBL, procura-se criar um vínculo com esta proposta numa aprendizagem fundamentada em projetos, cujo abandono dos métodos tradicionais coloca o professor na função de orientador, desenvolvendo assim mais liberdade para que os alunos sejam responsáveis pela sua própria formação, integrando teoria e prática, o que irá possibilitar uma aprendizagem significativa, sendo capaz de propiciar o trabalho em equipe realizado em projetos reais conforme Pereira e Santos (2014) e Campos, Dirani e Mairinque (2011).

O aprendizado prático em projetos interdisciplinares com o trabalho em equipe contribui para a possibilidade de alcançar uma compreensão mais aprofundada nos conceitos que ultrapassam os limites da realidade, de meros ouvintes para leitores de conceitos, trabalhando em parceria com seus colegas na aplicação desses conceitos com a finalidade de resolver projetos abertos de larga escala Powell & Weenk (2003)

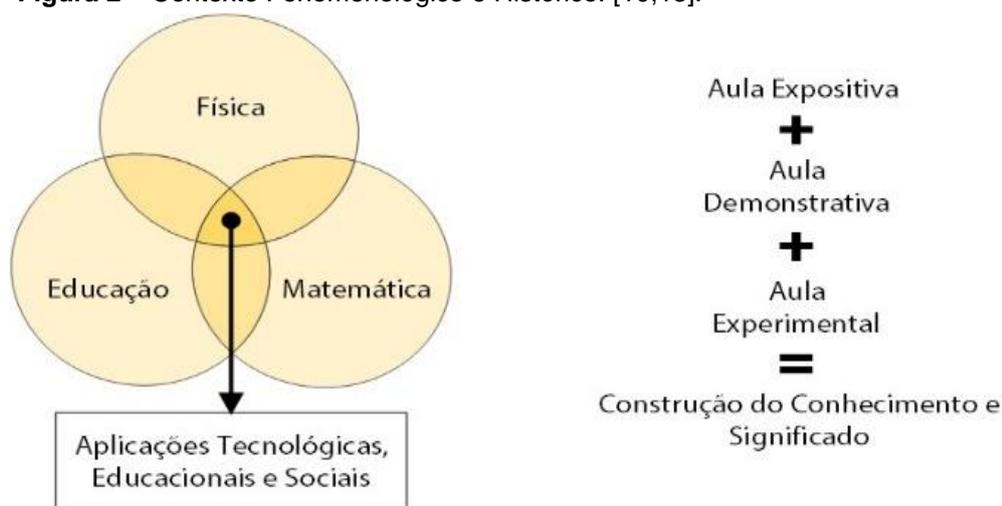
Tais métodos entram de acordo com a teoria desenvolvida por Ueno, Saad e Yamamura (2015). As técnicas quantitativas são as melhores formas de entender conceitos abstratos ou explicar fenômenos naturais para Kuhn (1991).

Entre eles, citam-se três maneiras de descrever estes fenômenos: o qualitativo, no qual se observa o fenômeno; não-numérico, no qual se aplica um processo experimental de medição; e exploração de leis, no qual parte-se dos resultados e formula-se leis naturais.

No entanto, ao se propor uma nova forma de ensino, entra em compatibilidade com Weenk, Blij e Plee (2012), no qual o novo sistema de aprendizagem deve ser especificado de objetivos, realizar testes antes e após os experimentos e, principalmente, ser flexível, ajustando-se ao desempenho do estudante.

No estudo, verificou-se que houve sentido e coerência na hipótese de haver uma redução eidética (volta à essência), ou melhor, uma busca de sentido do fenômeno em estudo por Husserl (1992), Heidegger (2007) e Peirce (1972) conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Contexto Fenomenológico e Histórico. [10,13].



Fonte: Elaborado pelos autores.

Desta forma, o projeto desenvolvido apresenta para os estudantes, de uma forma prática, elementos essenciais para o estudo, a medição, a análise e o trabalho com tensões mecânicas por meio de transdutores, mais especificamente, extensômetros de resistência elétrica (*strain gauges*). O contato com essa prática auxilia no desenvolvimento dos alunos para o futuro mercado de trabalho.

3 EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (ERE) OU STRAIN GAUGE

O *strain gauge*, ou extensômetro é um dispositivo de medição de grandezas mecânicas universal. Existem muitos tipos de extensômetros, que diferem entre si pela proporcionalidade da variação da resistência elétrica em função de sua deformação. Os tipos mais amplamente disponíveis são: resistência piezoresistiva, carbono resistivo, bimetálica, resistência colada e de folha resistiva. Este último é o mais utilizado e consiste em uma pista de fio ou folha resistiva inserida a uma matriz de acetato. A resistência elétrica da pista varia linearmente em função da tensão sofrida, causando desbalanceamento de um circuito complementar utilizado, nomeado de Ponte de Wheatstone de acordo com Omega Engineering Inc (1995).

O Monitoramento de Condições de Máquinas (MCM – *Machine Condition Monitoring*) está apoiado na medição ininterrupta dos diversos parâmetros de máquinas como: vibração, temperatura, pressão, corrente, nível de óleo, e inclusive tensão e deformação (*stress and strain*). Ainda que o *strain gauge* seja muito usado no Monitoramento de Estruturas (*Structural Healthing Monitoring*) como pontes e edifícios, semelhantemente, o *strain-gauge* pode servir para o Monitoramento de Condições de Máquinas associado a outros sensores como: acelerômetro, termopares, sensores de pressão, alimentação elétrica.

Como exemplo, a empresa DEWESoft fornece soluções que podem ser aplicadas no Monitoramento de Condições de Máquinas (MCM) e no Monitoramento de Estruturas, de acordo com figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 – Monitoramento das Condições de Máquinas (MCM)



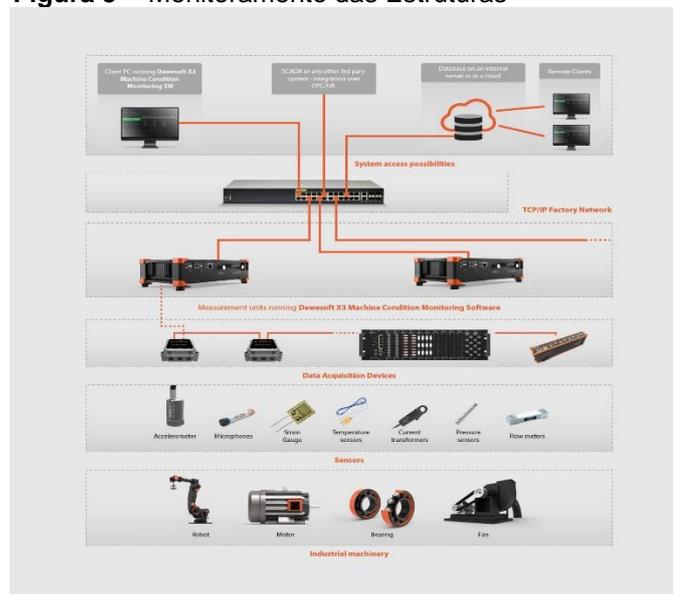
Fonte: Dewesoft.

Figura 4 – Monitoramento de Estruturas



Fonte: Dewesoft.

Figura 5 - Monitoramento das Estruturas



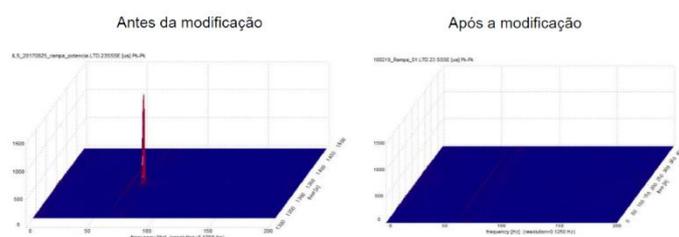
Fonte: Dewesoft.

Um trabalho muito valioso e importante foi a visita técnica com uma turma de alunos na fábrica de turbinas, geradores e equipamentos para usinas hidroelétricas - Voith Hydro. Tanto em hidrogeração quanto nos vários ramos da indústria, a utilização de *strain gauges* está intrinsecamente relacionado aos estudos de comportamento estático e dinâmico das tensões aplicadas aos elementos mecânicos. Os resultados experimentais quanto ao uso dessa técnica servem para melhorar e ajustar os parâmetros computacionais, conferindo-lhes maior aderência aos resultados práticos. O efeito simbiótico entre o prático e o teórico, entre o experimental e o computacional se apresenta tenazmente produtiva dado que, o parâmetro computacional tem sido comprovadamente representado pelo comportamento real. Logo, as correções e as melhorias

aplicadas e testadas no âmbito computacional podem se aplicar nos elementos mecânicos garantindo alta confiabilidade nos resultados adquiridos.

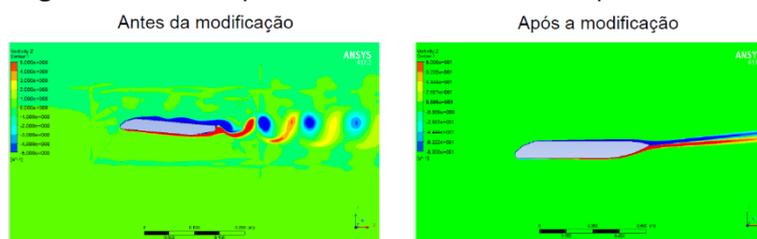
Essa técnica facilita para que os engenheiros de projeto façam uma adaptação de seus projetos às premissas de produção de energia congruente e com o contrato de cada empreendimento de geração (usina), o *know-how* que adquire em cada experimento, que ao serem combinados com outras técnicas de melhorias, adequações e perpetuação de conhecimento, resultam em altos ganhos no que toca os rendimentos, redução de custos, durabilidade e confiabilidade mesmo que especificamente ao ramo da engenharia que possui grandeza de singularidade. Os exemplos demonstrados abaixo – Figuras 6, 7, 8, e 9 - são uma indicação desses ganhos, o que também envolve a interação entre análise computacional e experimental.

Figura 6 – Aplicação da Análise de Tensões



Fonte: Dewesoft.

Figura 7 – Análise por mecânica dos fluidos computacional



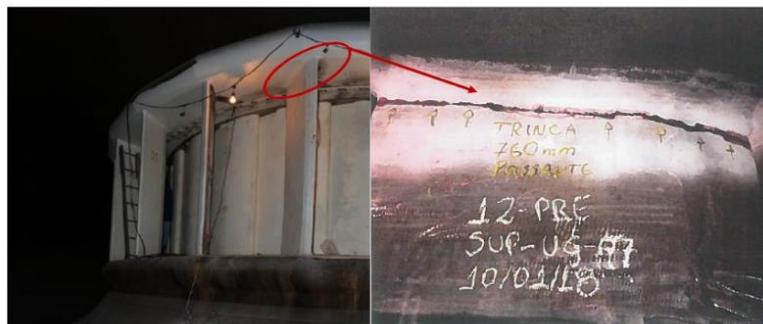
Fonte: Voith Hydro

Figura 8 – Montagem de extensômetro na Produção das Turbinas em componente



Fonte: Voith Hydro.

Figura 9 – Estudo das Tensões Mecânicas na Produção das Turbinas



Fonte: Voith Hydro.

O efeito da análise espectral (análise de frequências) do ensaio com *strain-gauges* concluído nas pás do pré-distribuidor de uma turbina Francis ressalta que há um componente espectral com uma boa definição quanto aos aspectos de amplitude e frequência. Esse comportamento de oscilação corrobora a análise computacional dado que, antes da modificação, o fluxo de água que seguia ao redor do elemento mecânico agitados resultava na formação de uma esteira organizada de vórtices, que provocava a vibração verificada pelos *strain gauges*.

Ao corroborar com o experimento quanto ao modelo computacional representar de forma autêntica o comportamento real, passou a ser plausível propostas e testes em ambiente computacional com novos perfis do pré-distribuidor, que ao ser aprovado nesse meio, houve a implantação na turbina, além de testes dentro das mesmas condições antecedentes. Com a apuração dos testes, nessa ocasião ficou comprovado que com a mudança do perfil hidráulico da pá, o efeito de agitação foi resolvido, tal validação se comprovou pela inexistência daquele componente espectral observado precocemente.

Ao se considerar o exemplo das travessas do pré-distribuidor no artigo *Comprehensive stay vane vibration analysis by means of numerical and experimental approaches* de Sampaio et al (2020), que tem como aplicação empírica o fenômeno que ocorre com um Transitório 2D de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), cuja simulação foi desenvolvida incorporando o efeito de interação fluido-estrutura, permitiu que a palheta simulada se movesse de um modo perpendicular ao fluxo. Além de que, medições de campo e resultados experimentais de laboratório serviram para calibração do modelo numérico, constata-se a partir desta experimentação que há inúmeras vantagens na cadeia

produtiva de geração de energia, dentre elas, tem-se o ganho com economia com manutenções preventivas e corretivas dado que os danos mecânicos (trincas e/ou cavitações) provocados com a vibração devem ser corrigidos ou ao que se espera ter menor ocorrência.

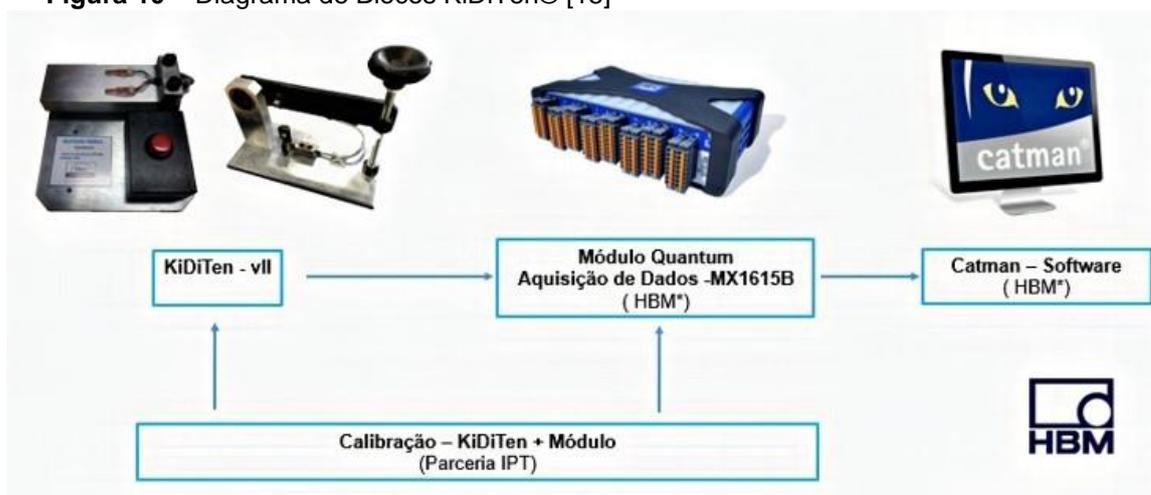
O trabalho educacional, a seguir, foi executado com o módulo de aquisição de dados para *strain gauge* - Quantum X MX1215B, da empresa HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) em parceria técnica que contém 16 entradas para sensores, dispostas em um corpo compacto, oferecendo uma densidade de canal incomparável em um pequeno espaço.

O módulo Quantum X MX1615B foi escolhido para este trabalho pelo fato de ser ideal para testes precisos e seguros de *strain-gauges* em configurações de ponte de Wheatstone completa, $\frac{1}{2}$ ponte e $\frac{1}{4}$ de ponte, bem como para transdutores, potenciômetros, termômetro de resistência (Pt100) ou tensão normalizada (+/- 10V). Este módulo é a escolha ideal para quando deformações, forças e deslocamentos são adquiridos, e quando a influência de temperatura deve ser quantificada.

Para a análise de dados, o *software* utilizado foi o CATMAN, da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik). Com ele, foi possível configurar o teste de diferentes maneiras e utilizar as diversas ferramentas presentes no *software*. O *kit* foi enviado para o Laboratório de Metrologia Mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo para caracterizações, calibrações e emissão de certificados.

A calibração é um processo que determina, em condições específicas, a relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e os valores correspondentes de um dado instrumento ou equipamento. Geralmente, a calibração é expressa por meio de um certificado, contendo tabelas ou gráficos. Este procedimento deve ser sempre realizado quando há necessidade de se comprovar a validade dos resultados apresentados por um instrumento ou equipamento, garantindo assim a rastreabilidade e confiabilidade do processo de medição ou controle. A metodologia e os procedimentos empregados neste trabalho tiveram ainda como objetivos avaliar a funcionalidade, repetibilidade e reprodutibilidade do KiDiTen® (versão II), considerando a proposta principal do kit, a qual é fundamentalmente educacional no ensino de física com aplicação na engenharia. O diagrama de blocos do *kit* é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de Blocos KiDiTen® [15]



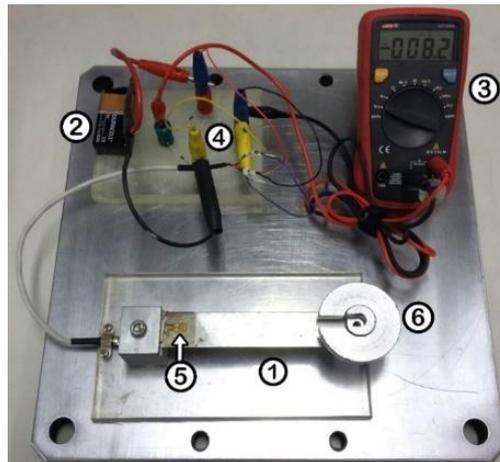
Fonte: Elaborado pelos autores.

As montagens são simples, visando reduzir custos e torná-los viáveis para utilização nas escolas. A posição para instalar o transdutor pode ser determinada a partir da coleta de dados extraídos do experimento. Considerando que o extensômetro mede a razão entre a extensão de um eixo sob carga e a extensão do mesmo eixo sem carga, primeiramente, foi escolhido o eixo do corpo de prova, para a instalação/colagem segundo a mudança de extensão esperada no dado eixo.

Essa condição pode ser alterada conforme as características mecânicas, a homogeneidade e a estrutura do material (corpo de prova) e o objeto do experimento. Características tais como trincas, falhas, bolhas e inclusões são determinantes no comportamento e resultado do teste.

A Figura 11 apresenta o KiDiTen® (versão I), *kit* de análises de flexão desenvolvido. A viga é indicada em 1, a alimentação em 2, o multímetro em 3, a ponte de Wheatstone em 4, *strain-gauge* em 5 e massa em 6. Reitera-se que houve uma evolução conceitual na instrumentação, saindo do multímetro com leitura manual para uma aquisição de dados automatizada (módulo de aquisição HBM).

Figura 11 – Calibração do KiDiTen® para Medição de Flexões



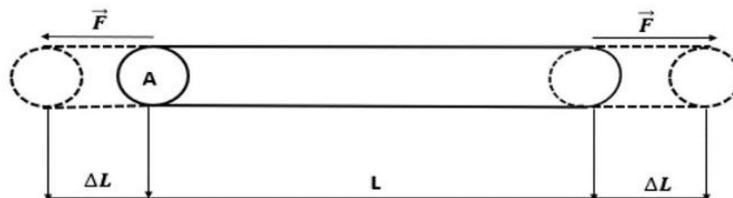
Fonte: Elaborada pelos autores.

Um manual de aplicação de extensômetros mostra-se útil ao listar quais tipos de transdutores serão adequados para certas aplicações. De modo contínuo, será necessário o conhecimento da sensibilidade do sensor, a tensão elétrica máxima de excitação, a compensação térmica e o eixo de trabalho segundo Peirce (1972). Idealmente, o extensômetro de resistência elétrica (ERE) ou *strain-gauge* (SG) é um resistor num circuito elétrico de instrumentação, cuja saída é proporcional à grandeza mecânica a ser medida. A rigor, é o único resistor variável no circuito.

O princípio de funcionamento do extensômetro de resistência elétrica assenta-se na relação entre a tensão mecânica e a resistência elétrica em um condutor. Um parâmetro fundamental do extensômetro é a sua sensibilidade à deformação. A resistência elétrica de um extensômetro varia gradualmente em função da deformação em seu corpo causada por tensão ou compressão. Esse fator é denominado de *gauge factor* (GF) ou fator de sensibilidade. O GF é definido pelo fabricante, e seu valor típico é 2. Ele pode ser definido pela razão entre a diferença entre a resistência do extensômetro antes e depois da deformação pela resistência nominal do extensômetro, dividido pelo coeficiente de deformação linear.

A relação Tensão/Deformação pode ser demonstrada por meio de um corpo cilíndrico, corpo de prova, que equivale a um pequeno segmento de um extensômetro, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Diagrama da Extensão de um Corpo Cilíndrico de um Extensômetro



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando que as variáveis E e Y representam o módulo de elasticidade ou módulo de *Young*, a carga mecânica (*load*) realiza uma tensão (*stress*) no corpo sofrendo uma extensão/deformação (*strain*). É considerado, σ como a tensão mecânica em Pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$); E o módulo de elasticidade (Pa); e ε a deformação linear adimensional ($\text{strain} = \Delta L/L$), obtendo-se a Equação 1:

$$E = Y = \frac{\text{tensão}}{\text{deformação}} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

3.1 Aplicações de Extensometria – Área Nuclear

De acordo com Mechanical Solutions (2016) uma usina de energia nuclear procurava compreender amplitude de vibração na extremidade do acionamento de suas novas bombas de água de alimentação, que manifestavam alterações na vibração durante todo o tempo e com isso houve resultados inconsistentes.

Declaração de Problemas (Desafio)

- **Qual (tipo de máquina):** Bomba de água de alimentação de sucção de fase dupla em serviço nuclear;
- **Onde (Estado / País):** Wisconsin
- **Por que (problema / razão):** uma usina nuclear buscava encontrar respostas sobre o porquê de suas novas bombas de água de alimentação apresentarem alta amplitude de vibração na extremidade da movimentação (DE), manifestando mudanças na vibração ao longo do tempo e com isso houve resultados inconsistentes relacionados ao

alinhamento antes e depois dos desligamentos. A planta buscava uma segunda opinião sobre se era seguro continuar a correr as bombas ou tirar a planta inteira da linha para uma interrupção cara e inesperada.

- **Trabalho realizado**

- **Métodos:** Monitoramento de Condição, Forma de Deflexão Operacional e Instalação de Célula de Carga.

- **Resultados/Solução**

- **Constatações:** A alta vibração da bomba DE foi por causa da tensão de tubulação excessiva nos bicos de sucção e descarga. Dentro destas circunstâncias, o invólucro da bomba estava operando como um suporte de âncora para a tubulação. Todas as vezes que a carga de tubulação foi requerida, a extremidade sul de ambas as bombas foi pressionada para baixo, alterando o alinhamento angular da bomba e dos eixos do motor.

4. APLICAÇÃO PRÁTICA DO CONCEITO DE TENSOR

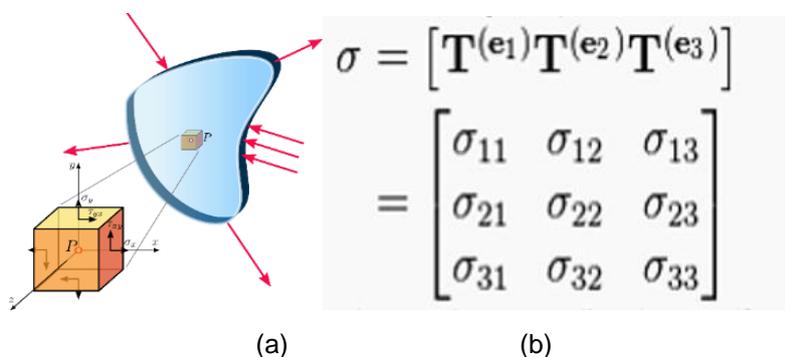
Tendo em vista um volume infinitesimal dV no ponto observado como sendo um paralelepípedo em equilíbrio, foram estudados os Tensores como entidades geométricas introduzidas na Matemática e na Física para generalizar conceitos escalares, vetoriais e matriciais aplicados na engenharia. Como em tais entidades, um tensor é uma forma de representação associada a um conjunto de operações, bem como a soma e o produto.

O tensor tensão de Cauchy, representado pelo símbolo σ , é um tensor tridimensional de segunda ordem, com nove componentes σ_{ij} , que definem completamente, o estado de tensão em um ponto no domínio de um corpo material em sua configuração deformada. O tensor relaciona um vetor diretor de comprimento unitário \mathbf{n} com o vetor tensão $\mathbf{T}(\mathbf{n})$ sobre uma superfície imaginária perpendicular a \mathbf{n} .

Muitas grandezas físicas podem ser representadas como a correspondência entre diferentes conjuntos de vetores. Por exemplo, a Tensão (mecânica), como exemplificado na Figura 13 (a), traduz uma ferramenta matemática que descreve e representa deformações mecânicas. A partir das

medições de tensão mecânica e das relações *stress-strain*, o aluno pode ser levado ao conceito matemático do Tensor, conforme a Figura 13 (b):

Figura 13 – Conceito Matemático do Tensor.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 RESULTADOS

Ainda que apresentando aspectos positivos quanto à aplicação da tensão (resistência dos materiais), o conceito de tensor tem trazido dificuldades no entendimento tanto para alunos de ensino médio, quanto para os alunos de graduação. Todavia, o aluno foi desperto para uma ideia espontânea e introdutória do conceito de deformação tensorial tal como comprovado em Ávila (2019).

Para comprovar os resultados do KiDiTen® em sala de aula, foi realizado um experimento com dois grupos de alunos de escolas distintas, dividido em duas fases. Na primeira fase do experimento, foi preparado um questionário com 7 questões de física referentes aos conceitos abordados para os alunos responderem, como: escalar, vetor, matriz e tensor, assim como, tensão mecânica e deformação elástica. Na segunda fase, foi aplicado o mesmo questionário em períodos distintos entre os grupos. Seguem as questões aplicadas, antes do uso do *kit* e após o uso:

- 1) Qual seria a definição de um escalar?
- 2) Um vetor pode ser definido como?
- 3) O Módulo de Elasticidade ou de *Young* pode ser definido como?
- 4) *Stress* em física é?
- 5) *Strain* em física pode ser descrito como?
- 6) O que é o transdutor *strain-gauge*?
- 7) O que é um tensor?

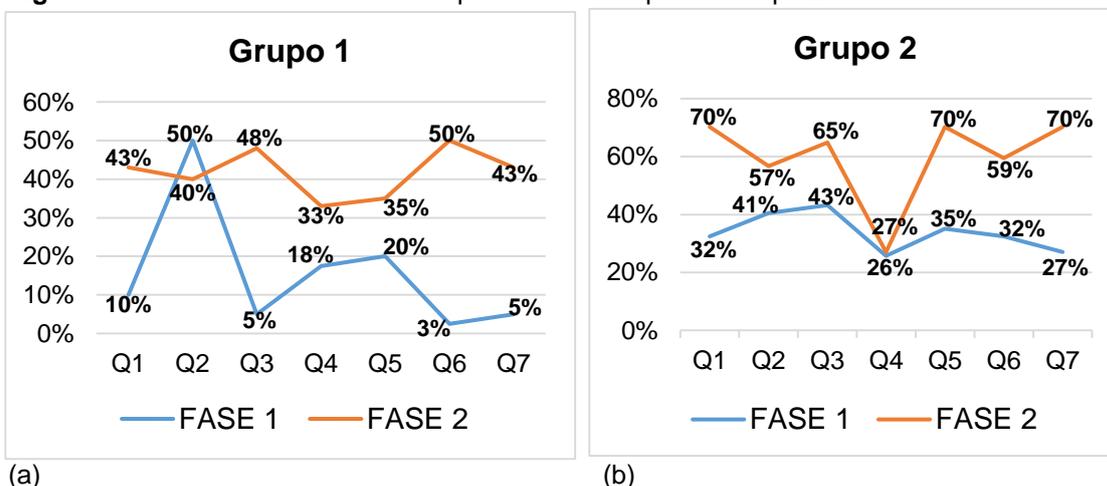
- Grupo 1: Alunos da FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo refizeram a prova um período depois, com os conceitos aprendidos na aula usando o *kit* didático KiDiTen®.

- Grupo 2: Alunos do Centro Universitário SUMARÉ refizeram a prova um período depois, com os conceitos aprendidos na aula usando o *kit* didático KiDiTen®.

Para a fase 1, o resultado foi obtido por meio de uma média de acertos dos alunos na prova com os conceitos da teoria clássica, sem a devida identificação dos alunos, apenas das turmas. A mesma análise foi realizada na fase 2. Para análise de variância, foi utilizado o *software* ANOVA. Vale ressaltar que os grupos de alunos de cada professor podem ser vistos como três níveis de um mesmo fator, sendo que o objetivo é saber se o fator modelo de aula experimental exerce alguma influência na variação do desempenho das notas dos alunos.

Ao empregar o ANOVA e compará-lo com as provas sem o uso do KiDiTen® e com o uso do KiDiTen®, foi verificado que cerca de 71% dos alunos tiveram uma melhora significativa com o uso do kit. Assim, foi comprovado que a metodologia adotada é adequada (PBL – PBE). Os alunos realizaram experimentos em grupos e com muita participação (*hands-on*), evidenciando aspectos importantes de proatividade e motivação. Os conjuntos de kits KiDiTen® (versão I e II) foram satisfatórios, bem como a sua calibração no IPT SP. Desse modo, pode-se resumir a evolução, porcentagem de acerto em cada questão, verificada experimentalmente na Figura 14.

Figura 14 – Resultados obtidos no experimento - Grupo 1 e Grupo 2



(a) Fonte: Elaborado pelos autores.

(b)

5.1 Questão 1

Ao usar o *Kit*, de antemão, o aluno observou a necessidade de discutir melhor o que é uma grandeza escalar e uma grandeza vetorial.

5.2 Questão 2

No Centro Universitário SUMARÉ, para praticarem as experiências com o *Kit*, os alunos compreenderam com mais clareza que certas grandezas físicas precisam de 03 características (módulo, direção e sentido), no qual houve maior carga de teoria. Já na FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, com carga de teoria bem menor, não houve melhoria.

5.3 Questão 3

A utilização do *Kit*, juntamente com a Teoria Básica da Elasticidade, levou o aluno a vivenciar a equação constitutiva ou estado das tensões (forma mais simples da Lei de *Hooke*). A escolha do material da barra do *kit* levou o aluno a discutir características do material (módulo de *Young*).

5.4 Questão 4

Na FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, o *kit* didático permitiu entender melhor o *stress (load)* como sendo: força/área, pelo fato de ter havido maior número de experiências com tração em corpos de provas. Já no Centro Universitário SUMARÉ, com carga horária bem menor dessa prática, não houve melhoria.

5.5 Questão 5

O *kit* didático permitiu o entendimento prático do *strain (extension)* como sendo: $\Delta L / L$, no sentido de ser o efeito provocado pelo *stress (força/área)*. Fizeram relação com a questão 3 (módulo de *Young*).

5.6 Questão 6

Claramente, o *kit* mostrou sua parte principal, o transdutor *strain-gauge*. O aluno foi levado a ressignificar a segunda lei de Ohm com o qual ele entende as relações entre *stress* x *strain* x módulo de elasticidade). O uso do *kit* mais a Teoria da Resistência dos Materiais foram fundamentais para essa melhoria.

5.7 Questão 7

A experiência com o *kit* didático experimental (KiDiTen) permitiu observar que a Tensão Mecânica não é simplesmente um Vetor, mas sim um Tensor de ordem 2 (uma matriz retangular 3 x 3, composta de 09 elementos Vetoriais). Certamente, a grande revisão de matriz e vetores teve papel crucial na colaboração.

Verifica-se, na figura 14, que, no grupo 1 da FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, na questão 02, o resultado foi uma árdua confusão conceitual pelos alunos. Após o estudo de vetor e posterior uso do *kit* didático, o conceito piorou. O mesmo fenômeno foi observado no grupo 2 (Centro Universitário SUMARÉ) com a questão 04. Ocorreu que não foi obtido uma compreensão bem-sucedida para representar os conceitos de *stress* e *strain* (dado o tipo de objetivo do questionário aplicado).

Contudo, em ambos os casos, ficou claro que o conceito de tensor, da questão 07, teve uma significativa melhoria na assimilação após o uso prático do KiDiTen, bem como nas demais questões.

6 CONSIDERAÇÕES

Este estudo trouxe consigo uma verificação exponencialmente motivadora na área das ciências exatas. O objetivo foi trabalhar os conceitos fundamentais de tensores, definindo-os e analisando-os. Inicialmente, foi abordado o conceito de tensor que, mesmo sendo novo teoricamente, pode ser considerado um tema muito relevante e profícuo para a Matemática, a Engenharia e a Física. As aplicações envolvendo a teoria Física com tensores são abrangentes, como acontece, por exemplo, na teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein,

totalmente tensorial. Esta teoria apresenta o grau de importância destes elementos matemáticos, assim como a teoria da Elasticidade e a Teoria da Resistência dos Materiais, com aplicação analisada e exemplificada neste artigo.

Vale reforçar que não se teve qualquer pretensão em fazer uma Análise Tensorial, no entanto, o que se pretendeu neste artigo foi dar direção para um estudo simplificado, qualitativo e motivador do Tensor, o que abrangeu aspectos práticos e observados nas medidas experimentais com base na utilização do Kit Didático para Ensino do Binômio Tensões Mecânicas e Tensores (KiDiTen), para flexão e torção.

Utilizou-se uma abordagem bem focada e analítica nos seguintes pontos:

- 1) O Objeto de Aprendizagem Phet, criado em 2002 pelo Prêmio Nobel Carl Wieman, que possui simulações Interativas da Universidade de Colorado Boulder, criando simulações interativas gratuitas de matemática e ciências. As simulações PhET baseiam-se em extensa pesquisa em educação e envolvem os alunos através de um ambiente intuitivo, estilo jogo, onde os alunos aprendem através da exploração e da descoberta.
- 2) Cálculo Analítico Relação Stress x Strain;
- 3) Kit's experimentais (flexão e torção) com calibração IPT (versão 1 e versão 2);
- 4) Cálculo numérico SolidWorks Simulação;
- 5) Vídeo e apoio do D. Fleisch de dispositivos lúdicos interativos, incluindo legenda em português feita pelo autor;
- 6) Aspectos históricos;
- 7) Teoria. Matriz – Vetor – Tensor Tensões/Deformações: Flexão e Torção.

As contribuições aqui defendidas representam o pensamento de que a perspectiva da Complexidade em modelo multi, inter e transdisciplinar traz estímulos para observar a existência de relações que sustentam os fenômenos da física dos materiais ao universo atual do aluno. Muito aprendizado pode ser tirado ao se desmembrar um equipamento para estudar suas partes e chegar-se ao entendimento sobre como e essas partes funcionam entre si, mas nem tudo pode ser reestudado dessa forma.

A educação para a Complexidade, pouco a pouco, tem se sustentado como uma base epistemológica sólida, com o propósito de entender os fatos e contextos, onde os processos de ensino e aprendizagem estão aplicados. É necessário dar origem às indagações a respeito do quadro educativo planejado. Os cientistas clássicos introduziram procedimentos metodológicos que limitavam a natureza complexa dos fenômenos à condição da análise compreendida. Os avanços científicos e tecnológicos provenientes desses esforços determinaram o melhor paradigma da visão reducionista da ciência clássica até estes quase vinte anos do século XXI. A importância de se enxergar de outro ângulo nos faz estar mais atentos às características de um fenômeno que, até então, ainda não havia sido contemplado, por ser visto apenas por um único paradigma. Apresentou-se a importância do conceito cultural de Bourdieu dentro do polêmico contexto histórico no ensino de Física.

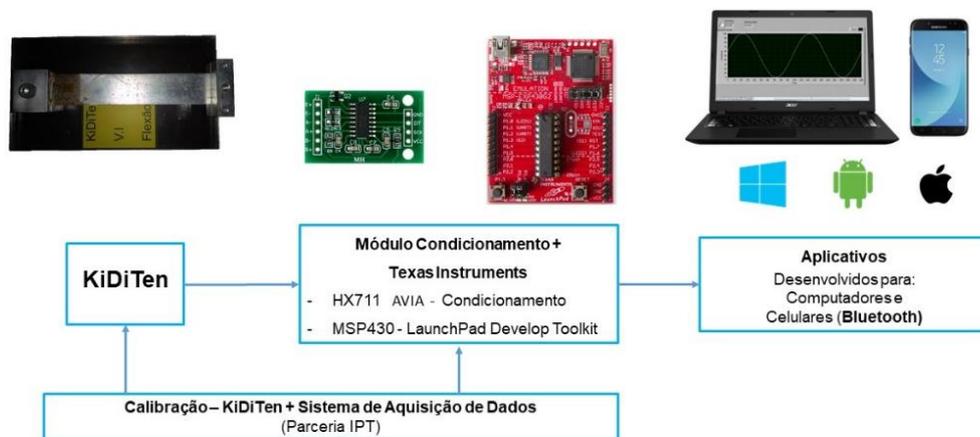
O processo para se avaliar as dificuldades dos estudantes com relação à disciplina Resistência dos Materiais e ao conteúdo de Tensores antes e após o estudo com o *kit* didático baseou-se no teste que se encontra na Seção 5. Foram analisadas duas turmas, sendo uma na FATEC e uma na Faculdade Sumaré, como mostrado na Figura 14. Os gráficos mostram os resultados obtidos em cada turma, para cada fase e sua respectiva comparação.

Quando se observa a aplicabilidade entre a prova 1 sem uso do *kit*, com a prova 2, com uso do *kit*, entende-se que cerca de 71% dos alunos tiveram uma melhora expressiva com o uso do *kit*, mesmo a variância sendo maior. Quando comparadas as duas provas, prova 2 sem uso do *kit* e prova 2 com uso do *kit*, é possível identificar que, mesmo nesse caso, quase 62% dos alunos da prova 2 tiveram uma melhora ou um entendimento mais aperfeiçoado da matéria com o uso do *kit*. Acrescenta-se a isto uma versão V2 do KiDiTen, desenvolvida em parceria com a HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) integrando um módulo de aquisição de dados e o *software* para tratamento dos mesmos.

É provável que buscar-se-á evoluir a ideia para uma V3, com substituição do módulo de aquisição por um módulo de condicionamento juntamente com o *LaunchPad Develop Toolkit* Texas Instruments e o *software* por um aplicativo, como ilustrado Figura 15.

Figura 15 - Versão 3 do KiDiTen.

Diagrama de Blocos – KiDiTen + Texas



Fonte: Elaborado pelos autores.

O empenho colocado neste trabalho foi escrever sobre a ferramenta matemática e sua aplicação na engenharia, de maneira a expandir e consolidar a linguagem matemática do aluno, extirpando as dúvidas que ocorrem no mero repertório de trivialidades. Ficou demonstrado, neste processo, o desejo de educar melhor o aluno e futuro professor na capacidade de manifestar-se com um conhecimento mais apurado na linguagem tensorial pela utilização das várias estratégias. O principal objetivo para o alcance de resultado foi o de considerar o conceito de tensor a partir da Teoria da Resistência dos Materiais.

Para trabalhos futuros, será necessária uma nova forma de diferenciar tais conceitos matemáticos e físicos, procurando-se também alterar a forma das questões do questionário. Esse experimento se mostrou eficiente e eficaz, conforme afirmações presentes na tese do autor deste artigo, Ávila (2019), tanto para a pesquisa em ensino de engenharia quanto para a aprendizagem dos alunos. Ficou evidente que houve significativa eficácia no sistema ensino-aprendizagem, mais do que as médias nacionais. Outros trabalhos futuros são, um possível projeto educacional em parceria com o Professor Doutor Mikiya Muramatsu (IFUSP), aplicando tensões mecânicas na área odontológica. Por exemplo, a análise da distribuição das tensões através de prótese xa implanto-suportada e dento-implanto suportada, usando Strain Gauge convencionais e fibra óptica, fotoelasticidade e holografia (SILVA; MURAMATSU, 2007). E a propósito também um projeto, em parceria com o Dr. Alexandre D'Agostini Neto

da Voith Group Division Hydro, para aplicação das medidas com Strain Gauges em pás de rotores - turbinas Pelton, incluindo importantes aspectos de treinamento para funcionários.

7 AGRADECIMENTOS

Aos professores que muito colaboraram com o projeto: Antonio Marmo de Oliveira, Claudio Hiroyuki Furukawa, Daniel Fleisch, Fuad Daher Saad, Jesuina Lopes de Almeida Pacca, José Luiz de França Freire, Luis Carlos de Menezes, Luiz Carlos de Campos, Mikiya Muramatsu, Nílson José Machado, Sergio Delijaicov, Sérgio Mascarenhas de Oliveira (in memoriam), Ubiratan D'Ambrosio (in memoriam), Wolodymir Boruszewski, Euclides Martins Oliveira Neto - DEWESoft Brasil, Alexandre D'Agostini Neto - Voith Hydro, André Flávio Schiante dos Santos - Santo Antônio Energia, André Rodrigues Pereira - Hottinger Brüel & Kjær (Hottinger Baldwin Messtechnik), Carlos Rodriguez Devesa (in memoriam) - Hottinger Brüel & Kjær (Hottinger Baldwin Messtechnik) e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP.

REFERÊNCIAS

ÁVILA, P.U. **Efetividade de estratégia ressignificantes no ensino-aprendizagem do conceito tensão mecânica e tensor, para o nível médio e superior.** (Doutorado em Ensino de Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2019.

CAMPOS, L. C.; DIRANI, T.A.; MAIRINQUE, A.L. **Educação em engenharia.** São Paulo: Editora PUC – SP, 2011.

DEWESOFT. **Monitoramento de condição:** monitoramento da condição da máquina e manutenção preditiva. Acesso em 22 de março de 2021. Disponível em: <https://dewesoft.com/applications/monitoring/condition-monitoring>

FEYNMAN, R.P. **Lições de física de Feynman.** São Paulo, SP: Bookman, 2016.

FLEISCH, D.A. **A student's guide to vectors and tensors.** Wittenberg University, Springfield, 2011.

HBM DO BRASIL. **Soluções de medição- sensores HBM.** Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/>. Acesso em: 20 maio 2020.

HEIDEGGER, M. **A questão da técnica.** 2007. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662007000300006>

HUSSERL, E. **Conferências de Paris.** Lisboa, LusoSofia, 1992.

KUHN, T.S. **A tensão essencial**: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica São Paulo: Ed. Unesp, 1991.

MOSQUERA, J. J. M. **Princípios da universidade no século xxi**: universidade e produção do conhecimento: inovação e empreendedorismo na universidade. Porto Alegre: EDIPUCRS, p. 79–81, 2006.

OLIVEIRA, M.K. **Vygotsky**: aprendizado e desenvolvimento um processo sócio-histórico, São Paulo: Scipione, 2006.

OMEGA ENGINEERING INC, **The pressure, strain and force handbook**, Omega, Stamford, 1995.

PACCA, J.L.; SCARINCI, A.L. **Ensaio pesquisa em educação em ciências**. Belo Horizonte, 13, n. 1, 2011. <https://doi.org/10.1590/1983-21172013130105>

PACEY, A. **The culture of technology**. [S.l.]: MIT press, 1983.

PEIRCE, C.S. **Semiótica e filosofia**. São Paulo: Editora Cultrix, 1972.

PEREIRA, M.A.C. ; SANTOS, C.G.L. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROJECT APPROACHES IN ENGINEERING EDUCATION MEDELLÍN, 42., 2014. [Anais...]. Colombia: PAEE, 2014.

PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno brasileiro de ensino de física**, v. 19, n. 1, p. 93–114, 2002.

POWELL, P.C.; WEENK, W. **Project-led engineering education (PLEE)**, Lemma Publishers, Utrecht, 2003.

SAMPAIO, R.; D'AGOSTINI NETO, A.; GOSSONI, H.C.; MARRAS FILHO, R.; ARAÚJO, PG.; ASSI, G. R. S.; CICOLIN, M. M. **Comprehensive stay vane vibration analysis by means of numerical and experimental approaches**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/774/1/012123>

SÁNCHEZ, E. **Tensores**. Rio de Janeiro Interciência, 2007.

UENO, P.T.; SAAD, F.D. ; YAMAMURA, P. **O cotidiano da física**: leituras e atividades - terminologias, óptica, ondas. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

WEENK, W. ; BLIJ, M.; PLEE, M. **Methodology and experiences at the university of Twente**. Sense Publishers, Rotterdam: 2012. https://doi.org/10.1007/978-94-6091-958-9_4



Artigo recebido em: 26/05/2021 e aceito para publicação em: 26/08/2021

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i3.4332>