



CARLOS HENRIQUE LARA

**ANÁLISE DE TENSÃO NA ESTRUTURA DE UM BANCO DE TRATOR PARA FINS
DE REDUÇÃO DOS RISCOS DE ACIDENTES DURANTE A IGNIÇÃO DE
TRATORES**

LAVRAS – MG

2021

CARLOS HENRIQUE LARA

**ANÁLISE DE TENSÃO NA ESTRUTURA DE UM BANCO DE TRATOR PARA FINS
DE REDUÇÃO DOS RISCOS DE ACIDENTES DURANTE A IGNIÇÃO DE
TRATORES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos

Coorientador

LAVRAS – MG

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Lara, Carlos Henrique.

Análise de tensão na estrutura de um banco de trator para fins de redução dos riscos de acidentes durante a ignição de tratores / Carlos Henrique Lara. - 2021.

54 p. : il.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador(a): Fábio Lúcio Santos.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Acidentes com tratores. 2. Análise de elementos finitos. 3. Dispositivo de segurança com uso de extensômetros. I. Magalhães, Ricardo Rodrigues. II. Santos, Fábio Lúcio. III. Título.

CARLOS HENRIQUE LARA

**ANÁLISE DE TENSÃO NA ESTRUTURA DE UM BANCO DE TRATOR PARA FINS
DE REDUÇÃO DOS RISCOS DE ACIDENTES DURANTE A IGNIÇÃO DE
TRATORES**

**STRESS ANALYSIS IN THE STRUCTURE OF A TRACTOR SEAT FOR PURPOSE
OF REDUCING THE RISKS OF ACCIDENTS DURING TRACTORS IGNITION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 20 de abril de 2021

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães	UFLA
Dr. Fábio Lúcio Santos	UFLA
Dr. Ednilton Tavares de Andrade	UFLA
Dr. Evandro Pereira da Silva	UNILAVRAS

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

LAVRAS – MG

2021

Aos meus pais, Maria Helena Silva Lara e Carlos Pinto Lara pelo exemplo de vida e incentivo.

A minha companheira de vida Paula Helena Nogueira pelo apoio e incentivo.

A Deus por permitir que este trabalho fosse realizado.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães pela orientação e atenção prestada durante a pesquisa.

Ao professor Dr. Fabio Lúcio Santos pela orientação e atenção prestada durante a pesquisa.

Ao professor Dr. Ednilton Tavares de Andrade pela orientação e atenção prestada durante a pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente me incentivaram e contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

Muito Obrigado!

RESUMO

A mecanização no setor agrícola apresentou crescimento elevado nas últimas décadas para atendimento a crescente demanda de produção deste setor. Com o aumento da mecanização, surge também, um incremento no índice de acidentes de trabalho durante a operação de máquinas agrícolas. Todo trabalhador rural, ao operar uma máquina agrícola, está sujeito a riscos diversos. Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de dispositivos de segurança para reduzir o risco de acidentes. O objetivo deste trabalho foi realizar análise estrutural estática no assento do banco de um trator com o intuito de entender a distribuição de tensões de von Mises e indicar um local apropriado para instalação de um dispositivo de segurança para reduzir os riscos de acidentes durante o procedimento de ignição dos tratores. Neste caso, a ignição será realizada se a carga exercida pelo peso do operador no assento for superior a carga de peso médio de uma criança e se o operador estiver posicionado corretamente no assento durante a ignição. Para isso, foi instalado um extensômetro unidirecional no local de maior tensão de von Mises no banco com o intuito de validar os resultados da simulação. Os resultados dos valores de tensão experimentais foram comparados com os valores de tensão obtidos na simulação gerando uma diferença média satisfatória de 11,4% com um coeficiente de correlação linear (R^2) de 0,9997. Desta forma, os resultados das simulações no suporte do assento do banco, quando submetido a carregamentos externos, permitiram o entendimento da distribuição de tensões na estrutura e indicaram um local adequado para a instalação do dispositivo de segurança (região de maior tensão no banco), no intuito de prever acidentes de trabalho com crianças pesando até 415,8 N.

Palavras-chave: Acidente de Trabalho, Assento de Trator, Dispositivo de Segurança.

ABSTRACT

Mechanization in agriculture has grown significantly in recent decades to meet the growing production demand. Inconsequently, work accidents during the operation of agricultural machinery was also increased. For this reason, rural working-people are exposed to situations of risk and it is needed the development of new devices to reduce the risk of accidents. Based on that, this work is aimed to perform static structural analysis on the tractor seat in order to understand the von Mises stress distribution and to indicate an appropriate place to install a safety device to reduce the risk of accidents during the ignition procedure of tractors. In this case, the ignition will be carried out if the load exerted by the operator's weight on the seat is greater than the average load of a child and if the operator is correctly positioned on the seat during ignition. For this, a unidirectional strain gage was installed in the place of greatest stress of von Mises in the tractor seat in order to validate the results of the simulation. The results of the experimental stress values were compared with the stress values obtained in the simulation, generating a satisfactory average difference of 11.4% with a linear correlation coefficient (R^2) of 0.9997. In this way, the results of the simulations in the tractor seat, when subjected to external loads, allowed the understanding of the distribution of stresses in the structure and indicated an appropriate place for the installation of the safety device (region of greatest stress in the seat) in order to predict work accidents with children weighing up to 415.8 N.

Keywords: Accident at Work, Tractor Seat, Safety Device.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	11
1 OBJETIVOS.....	13
1.1 Objetivo Geral.....	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Modernização das máquinas agrícolas.....	14
2.2 Acidentes com máquinas agrícolas.....	15
2.3 Método dos elementos finitos	19
2.4 Extensometria	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Obtenção dos modelos geométricos e definição das propriedades mecânicas para realizar a simulação numérica.	23
3.2 Análise da convergência de malha da mola e do suporte do banco.....	27
3.3 Simulação numérica e validação experimental do deslocamento do suporte do banco	27
3.4 Calibração do sistema de aquisição de dados para utilização do extensômetro	30
3.4.1 Determinação e construção da Ponte de <i>Wheatstone</i>	30
3.4.2 Preparação da viga e colagem do extensômetro.....	31
3.4.3 Sistema de aquisição de dados.....	33
3.4.4 Máquina de ensaio	34
3.4.5 <i>Setup</i> do experimento	34
3.4.6 Cálculo analítico para verificação dos resultados experimentais	35
3.5 Avaliação dos valores de tensão obtidos por simulação numérica.....	36
4 RESULTADOS	40
4.1 Resultados da simulação para determinar as propriedades do material da mola.....	40

4.2	Resultados da análise de convergência de malha da mola e suporte do banco.....	40
4.3	Resultados da simulação numérica e validação experimental do deslocamento do suporte do banco.....	42
4.4	Resultados da calibração do sistema de aquisição de dados para utilização do extensômetro.....	45
4.5	Resultados da validação dos valores de tensão obtidos na simulação numérica	48
5	CONCLUSÃO.....	50
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

INTRODUÇÃO

Trabalhadores rurais estão constantemente expostos a diversos agentes físicos e ergonômicos causadores de acidentes envolvendo máquinas e implementos agrícolas. Todo trabalhador no momento em que exerce sua função está sujeito a alguma situação de risco que pode gerar um acidente de trabalho, sendo que em algumas profissões este risco é maior.

A modernização da mecanização agrícola promoveu diversas melhorias na questão produtiva, no conforto e na segurança dos operadores, porém também houve um aumento potencial nos riscos de acidentes que envolvem o trabalhador do setor agrícola devido à complexidade de operação das máquinas.

O trator agrícola é considerado uma máquina de grande relevância no desenvolvimento do setor agrícola, sendo capaz de trazer altos rendimentos e melhorar consideravelmente a condição de trabalho no setor agrícola. Em contrapartida, a atividade de operação do trator agrícola é considerada uma das atividades mais perigosas do setor agrícola, contribuindo com o aumento nos índices e gravidade dos acidentes.

A segurança e saúde do trabalho podem ser definidas como um conjunto de medidas que são adotadas com o objetivo de minimizar os índices de acidentes de trabalho e doenças ocupacionais, além de proteger a integridade e a capacidade laboral dos trabalhadores. Existem normas nacionais e internacionais que regulamentam os requisitos de fabricação e operação das máquinas agrícolas.

O projeto de uma máquina deve ser feito de modo que a segurança das pessoas que irão operá-las seja garantida. Para isto, a instalação de dispositivos que auxiliam na segurança de operação do equipamento, e conseqüentemente, na redução dos índices de acidentes é de extrema importância para a saúde do trabalhador rural e para o sucesso do projeto. Desta forma, justifica-se realizar pesquisas que desenvolvam estes dispositivos e melhorem as condições de trabalho dos operadores no que diz respeito a segurança de operação das máquinas agrícolas.

Ferramentas computacionais, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), e a extensometria para validação dos resultados de simulações, têm sido utilizadas com frequência durante o desenvolvimento de produtos em geral. Mais especificamente, o uso destas ferramentas permite melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no processo, podendo ser usadas, até mesmo na prevenção de acidentes durante o desenvolvimento dos novos produtos agrícolas.

Alguns acidentes em máquinas agrícolas podem ocorrer durante o procedimento de ignição, onde pessoas sem treinamento adequado (principalmente crianças) ou até mesmo as pessoas com treinamento, em algum momento realizam este procedimento sem seguir as regras de segurança, como por exemplo, não estar posicionado corretamente sobre o assento do trator durante a ignição. Por segurança, alguns tratores possuem dispositivos que só permitem a ignição do motor nas seguintes condições: alavanca do câmbio na posição neutra ou de estacionamento; alavanca de reversão do câmbio na posição neutra; pedal da embreagem totalmente acionado, freio de estacionamento acionado; tomada de potência desligada; operador posicionado no assento do trator.

Ao analisar dispositivos de segurança atuais que monitoram a presença do operador no assento do trator durante a ignição do motor, observa-se que estes dispositivos não monitoram a carga exercida pelo peso do operador no assento, permitindo-se assim que a ignição possa ser realizada acidentalmente por crianças ou até mesmo com o operador posicionado de forma incorreta no assento. Portanto, o objetivo deste trabalho foi identificar um local adequado para a instalação de um dispositivo de segurança na estrutura do assento do banco de um trator, a partir de análises estruturais estáticas via Método dos Elementos Finitos. O propósito deste dispositivo visa reduzir os riscos de acidentes durante o procedimento de ignição dos tratores, uma vez que, a ignição só poderá ser realizada se a carga exercida pelo peso do operador no assento for superior a carga de peso médio de uma criança e se o operador estiver posicionado corretamente no assento durante a ignição.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi identificar um local adequado para a instalação de um dispositivo de segurança na estrutura do assento do banco de um trator, a partir de análises estruturais estáticas via Método dos Elementos Finitos. O propósito deste dispositivo visa reduzir os riscos de acidentes durante o procedimento de ignição dos tratores agrícolas, sendo que este dispositivo não foi objeto de estudo deste trabalho.

1.2 Objetivos Específicos

- Entender a distribuição da tensão equivalente de von Mises quando o assento do banco do trator estiver submetido a carregamentos externos.
- Avaliar os resultados das simulações numéricas por meio de validação experimental.
- Indicar um local para instalação de um dispositivo de segurança a partir dos resultados encontrados para tensões de von Mises.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Modernização das máquinas agrícolas

A crescente expansão populacional nas últimas décadas acabou gerando uma maior demanda por alimentos, sendo então necessário aumentar a produtividade agrícola para suprir esta demanda. Como consequência, os produtores passaram a utilizar de forma intensificada inovações tecnológicas referentes à produção agrícola, com o intuito de continuarem competitivos no agronegócio e de aumentarem a sua rentabilidade (SANTOS, 2016).

A mecanização, modernização ou industrialização da agricultura são termos utilizados para definir um amplo conjunto de mudanças que reconfigurou as formas de produção agrícola e pecuária, da organização do espaço agrário, de trabalho, de sociabilidade humana, de alimentação e de utilização dos bens ambientais (GERHARDT, 2016).

De acordo com Silveira (2001), o trator agrícola é uma máquina de médio a grande porte com uma unidade móvel de potência, constituída basicamente por motor, sistema de transmissão, sistema de direção e sistema de locomoção. Esse equipamento possui uma ampla gama de aplicações na agricultura e pecuária, entre elas transportar, empurrar, arrastar, levantar e acionar máquinas equipamentos agrícolas.

A utilização dos tratores nas atividades agrícolas é indispensável para se obter uma maior produtividade considerando que estas máquinas proporcionam rapidez na execução das atividades, maior eficiência no uso dos recursos e redução dos custos de produção (SANTOS, 2016).

Até a década de 1990, a indústria de máquinas agrícolas obteve inovações incrementais, mantendo-se o *design* e o padrão até então desenvolvidos (VIAN, et al., 2013). O padrão de desenvolvimento do setor neste período pode ser definido como um "somatório" de avanços condicionados pelas operações e "adaptações" a outras condições de solo e clima, além da capacidade de adaptação de implementos melhores e mais pesados. Apenas nos anos 1990 surgiram algumas novas tendências em termos de design dos tratores (SARTI; SABBATINI; VIAN, 2009).

Com a contínua evolução, os tratores tornaram-se máquinas com maior potência e utilidade fornecendo mais conforto e segurança ao operador, além proporcionar um ambiente de trabalho adequado e conseqüentemente um aumento na produção e qualidade das tarefas realizadas (ROZIN, 2004).

As tendências de exigências do mercado para as máquinas agrícolas são a demanda de maior potência e automação permitindo maior eficiência e redução de custos. Assim, com

uma estrutura de mercado mais concentrada do que nas décadas anteriores, torna-se possível buscar cada vez mais a diferenciação pela qualidade e por potência dos tratores e colheitadeiras (SARTI; SABBATINI; VIAN, 2009).

Realizando uma comparação na produção de máquinas agrícolas e rodoviárias no Brasil entre os anos de 1961 e 2019, é possível observar um crescimento de 1805%, sendo que em 1961 foram produzidas 2.430 máquinas agrícolas e rodoviárias e em 2019 foram produzidas 43.855 máquinas agrícolas e rodoviárias (ANFAVEA, 2019).

2.2 Acidentes com máquinas agrícolas

A interação entre o trator e o operador durante a operação de máquinas caracteriza uma unidade produtiva integrada, chamada de sistema homem-máquina. Se a operação em tratores agrícolas não for um sistema eficiente, o operador é exposto a uma elevada carga física e mental podendo apresentar menor produtividade, piorar a qualidade do trabalho e aumentar ocorrência de erros e acidentes (PERIPOLLI; ALONÇO; POSSEBOM, 2017).

A conceituação de acidente de trabalho está inserta na legislação previdenciária, cujo artigo 19 da Lei 8213/91 menciona que o acidente de trabalho é o que ocorre pelo exercício do trabalho a serviço da empresa, provocando lesão corporal ou perturbação funcional que cause a morte ou a perda ou redução, permanente ou temporária, da capacidade para o trabalho.

A Norma Regulamentadora nº 31 (NR 31) é originária da Portaria 86, datada do ano de 2005 e têm por finalidade dispor sobre regras, requisitos e condições a serem observadas nas relações de trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura. Esta Norma Regulamentadora tem por objetivo estabelecer os preceitos a serem observados na organização e no ambiente de trabalho, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento das atividades da agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura com a segurança e saúde e meio ambiente do trabalho.

De acordo com a NR 31, é função do empregador rural ou equiparado: garantir adequadas condições de trabalho, higiene e conforto, definidas nesta Norma Regulamentadora, para todos os trabalhadores, segundo as especificidades de cada atividade; realizar avaliações dos riscos para a segurança e saúde dos trabalhadores e, com base nos resultados, adotar medidas de prevenção e proteção para garantir que todas as atividades, lugares de trabalho, máquinas, equipamentos, ferramentas e processos produtivos sejam seguros e em conformidade com as normas de segurança e saúde; promover melhorias nos ambientes e nas condições de trabalho, de forma a preservar o nível de segurança e saúde dos

trabalhadores; informar aos trabalhadores: os riscos decorrentes do trabalho e as medidas de proteção implantadas, inclusive em relação a novas tecnologias adotadas pelo empregador; dentre outros deveres.

A NR 31 também regulamenta que o trabalhador deve cumprir as determinações sobre as formas seguras de desenvolver suas atividades, especialmente quanto às Ordens de Serviço para esse fim; adotar as medidas de proteção determinadas pelo empregador, em conformidade com esta Norma Regulamentadora, sob pena de constituir ato faltoso a recusa injustificada; submeter-se aos exames médicos previstos nesta Norma Regulamentadora e colaborar com a empresa na aplicação desta Norma Regulamentadora.

Embora a NR 31 tenha representado um marco quanto a normatização de segurança nas relações de trabalho no setor agrícola, pode-se afirmar que a Norma Regulamentadora nº 12 (NR 12) refinou à questão do compromisso com a questão voltada a segurança do trabalho em especial ao labor com máquinas agrícolas. Esta Norma Regulamentadora e seus anexos definem referências técnicas, princípios fundamentais e medidas de proteção para garantir a saúde e a integridade física dos trabalhadores e estabelece requisitos mínimos para a prevenção de acidentes e doenças do trabalho nas fases de projeto e de utilização de máquinas e equipamentos de todos os tipos. As medidas de proteção são adotadas na seguinte ordem: a) medidas de proteção coletiva; b) medidas administrativas ou de organização do trabalho; e c) medidas de proteção individual.

A ocorrência de acidentes significa que existem anomalias no ambiente de trabalho que precisam ser investigadas e analisadas com o objetivo de encontrar a causa raiz do problema e assim definir as medidas preventivas mais adequadas para os controles de riscos operacionais (MONTEMOR; VELOSO; AREOSA, 2015). Segundo Montemor, Veloso e Areosa (2015), as estimativas da Organização Internacional do Trabalho (OIT) indicam que apenas 3,9% dos acidentes de trabalho ocorridos no setor agrícola são notificados às entidades competentes para sua investigação e análise.

Segundo Debiasi (2002), os estudos relacionados com a área de segurança em conjuntos tratorizados, principalmente sobre ocorrência de acidentes são muito importantes, porém ainda são pouco explorados no Brasil, sendo raros os trabalhos na área, principalmente trabalhos que tenham foco em frequência, gravidade, características e causas dos acidentes. A profissão no setor agrícola sem dúvidas encontra-se entre as profissões com maior probabilidade de ocorrências de acidentes (TEIXEIRA; FREITAS, 2003). Os trabalhadores rurais realizam atividades rurais e insalubres em ambientes que proporcionam diversos riscos ocupacionais (SILVEIRA et al., 2005).

Quando se analisa a evolução do trabalho no setor agrícola brasileiro, sempre foi notada a existência dos riscos ocupacionais, porém estes riscos foram intensificados e agravados a partir da década de 1940, onde as inúmeras transformações que afetaram o meio de trabalho no setor agrícola provocaram o aumento da ocorrência de acidentes (DREBES et al., 2014).

Embora os acidentes com tratores agrícolas sejam pouco explorados no Brasil, sabe-se que estas máquinas representam cerca de 20% do total de acidentes na agricultura e 54% destes acidentes são considerados como leves (SCHLOSSER et al., 2002). Dos acidentes graves, 14,8% são devido à condição de equipamentos inadequados ou ausência de itens de segurança obrigatórios. Sendo assim, é de extrema importância que seja realizada a manutenção correta dos dispositivos que compõem a máquina agrícola para que a segurança do operador seja garantida (SCHLOSSER et al., 2002).

Debiasi, Schlosser e Willes (2004) relataram que, em 114 propriedades rurais do Rio Grande do Sul – Brasil, um total de 125 acidentes foram observados, sendo definidas como causas genéricas 75,2% atitudes inseguras, 20,8% condições inseguras e 4% causas não definidas. Macedo et al. (2015) investigaram sobre a caracterização dos acidentes com máquinas agrícolas em rodovias federais, também no Rio Grande do Sul e concluíram que o principal tipo de acidente neste cenário é a colisão traseira, sendo sua principal causa a falta de atenção dos operadores.

Um estudo realizado por Lima (2016) sobre acidentes agrícolas no âmbito nacional, relatou que os locais com maior incidência de acidentes são as propriedades rurais, onde a Região Sul do Brasil foi a de maior quantitativo de acidentes com tratores agrícolas, seguido da Região Sudeste e Centro Oeste.

Os elevados custos, diretos e indiretos, dos acidentes de trabalho estão diretamente relacionados com a redução de rendimentos e qualidade de vida dos trabalhadores e familiares, além de perdas de produção e produtividade das organizações (LUNES, 1997). Desta forma, fica evidente a importância de desenvolver trabalhos que tenham o objetivo de melhorar as condições de segurança de operação das máquinas agrícolas.

Em relação ao posto de trabalho do operador de tratores agrícolas, existem diversos fatores que têm o objetivo de tornar este ambiente mais confortável e seguro. Entre estes fatores, citam-se a luminosidade, visibilidade, temperatura, ruídos, vibrações e outros dispositivos de segurança que podem acarretar limitações no funcionamento do sistema homem-máquina. De acordo com a NR 12, os dispositivos de segurança são os componentes que por si só ou interligados ou associados a proteções, reduzam os riscos de acidentes e de

outros agravos à saúde. A NR12 classifica esses dispositivos em: comandos elétricos ou interface de segurança; dispositivos de intertravamento; sensores de segurança.

Durante o período de 2005 à 2014, 68% dos acidentes fatais com crianças no setor agrícola na Irlanda foram associados com o uso de tratores e máquinas agrícolas (HEALTH AND SAFETY AUTHORITY, 2015). É indicado que crianças com menos de 14 anos de idade nunca operem tratores e que as chaves sejam retiradas da ignição e mantidas fora do alcance de crianças (HEALTH AND SAFETY AUTHORITY, 2015).

Pate e Görücü (2020) apresentaram dados de 69 acidentes fatais com jovens relacionados com o setor agrícola no estado da Pensilvânia nos Estados Unidos durante o período de 2000 a 2018 e concluíram que 74% das fatalidades aconteceram com crianças maiores que 5 anos de idade. Toussaint et al. (2017) analisaram dados de acidentes no setor agrícola envolvendo 505 crianças e adolescentes de 9 estados do meio oeste dos Estados Unidos entre 2005 e 2010, e concluíram que 307 acidentes ocorreram com crianças operando máquinas agrícolas.

Segundo Wright, Marlenga e Lee (2013) a cada 3 dias uma criança morre nos Estados Unidos devido a acidentes no setor agrícola e todos os dias 45 crianças são feridas. A lesão não fatal mais comum ocorreu entre jovens com idade entre 10 e 15 anos, sendo as principais fontes das lesões estruturas e superfícies, animais e maquinas agrícolas. As lesões em tratores representam um terço de todas as mortes (WRIGHT; MARLENGA; LEE, 2013).

Gorucu, Murphy e Kassab (2015) analisaram 82 acidentes fatais de jovens com menos de 20 anos de idade no estado da Pensilvânia nos Estados Unidos durante o período de 2000 a 2012 e concluíram que os jovens com menos de 5 anos de idade tiveram a maior taxa de mortalidade de 87,1 mortes por 100.000 jovens de famílias do setor agrícola por ano.

Alguns acidentes acontecem durante o procedimento de ignição dos tratores, onde pessoas sem treinamento adequado (principalmente crianças) ou até mesmo as pessoas com treinamento, em algum momento realizam este procedimento sem seguir as regras de segurança, como por exemplo, não estar posicionado corretamente sobre o assento do trator durante a ignição. Por segurança, alguns tratores possuem dispositivos que só permitem a partida do motor nas seguintes condições: alavanca do câmbio na posição neutra ou de estacionamento (P); alavanca de reversão do câmbio na posição neutra; pedal da embreagem totalmente acionado, freio de estacionamento acionado; tomada de potência desligada; operador posicionado no assento do trator (SENAR, 2017).

2.3 Método dos elementos finitos

Segundo Knop et al. (2015), o Método dos Elementos finitos (MEF) é um recurso bastante utilizado na Engenharia para calcular as tensões e deformações em estruturas complexas. A vantagem de utilização deste método em relação aos outros é que ele pode ser utilizado em objetos com geometrias irregulares compostos por diferentes tipos de materiais e ter condições de contorno mistas (COUTO et al., 2004).

A formulação do MEF resulta de um sistema de equações algébricas simultâneas. Inicialmente é necessário gerar as malhas (discretização do modelo) da geometria que será estudada. Este processo consiste em realizar a subdivisão da geometria do modelo em pequenos volumes formados por nós e elementos. Quando o modelo é submetido a carregamentos externos de cargas, alguns nós mudam de posição causando uma deformação elástica no modelo. Neste trabalho, são utilizadas equações de um sistema tridimensional com elasticidade extraídas de Kwon e Bang (2000).

O vetor de deformação elástica $\{\mathcal{E}\}$ representado pela Equação 1 é determinado por meio dos deslocamentos nodais (u, v, w) e são calculados durante a simulação via MEF.

$$\{\mathcal{E}\} = \begin{Bmatrix} \mathcal{E}_{xx} \\ \mathcal{E}_{yy} \\ \mathcal{E}_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial w / \partial z \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \\ \partial v / \partial z + \partial w / \partial y \\ \partial u / \partial z + \partial w / \partial x \end{Bmatrix} \quad (1)$$

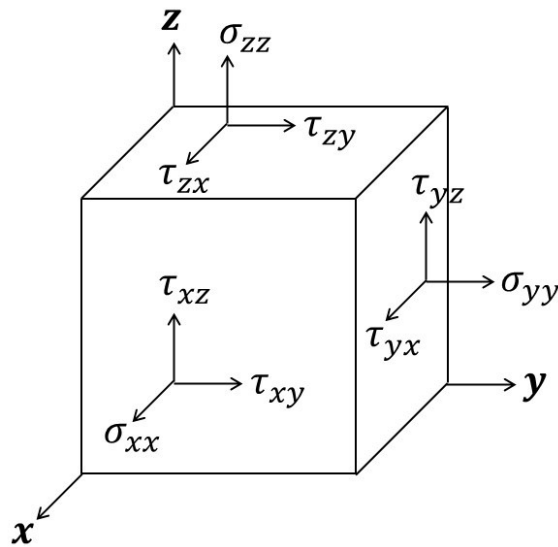
Onde u é o deslocamento e \mathcal{E}_{xx} a deformação no eixo x , v é o deslocamento e \mathcal{E}_{yy} a deformação no eixo y , w é o deslocamento e \mathcal{E}_{zz} a deformação no eixo z , γ_{xy} a deformação de cisalhamento no plano (x, y) , γ_{yz} a deformação de cisalhamento no plano (y, z) e γ_{xz} a deformação de cisalhamento no plano (x, z) .

Após conhecer em cada ponto os deslocamentos e as deformações, pode ser realizado o cálculo das tensões que atuam no modelo. Admitindo que o modelo se encontra no regime linear-elástico para as cargas aplicadas, é possível aplicar a lei de Hooke. As componentes do tensor das tensões $\{\sigma\}$ podem ser calculadas a partir de:

$$\{\sigma\} = [D]\{\mathcal{E}\} \quad (2)$$

Onde, $\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz}\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx}\}^T$ é o vetor das tensões de componentes σ_{xx} para a tensão normal no eixo x , σ_{yy} para a tensão normal no eixo y , σ_{zz} para a tensão normal no eixo z , τ_{xy} para a tensão de cisalhamento no plano (x, y) , τ_{yz} para a tensão de cisalhamento no plano (y, z) , τ_{zx} para a tensão de cisalhamento no plano (x, z) e $[D]$ é a matriz do material composta pela informação de propriedades do material (módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*). Na Figura 1, tem-se um cubo representativo do estado tridimensional das tensões em um ponto.

Figura 1: Cubo representativo do estado tridimensional de tensões em um ponto.



Fonte: Do autor (2021).

Quando cargas externas são aplicadas nos nós e elementos, o modelo comporta-se de acordo com a Equação 3.

$$\{F\} = [m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \quad (3)$$

Sendo $\{F\}$ o vetor de carga externa, $[m]$ a matriz de massa, $[c]$ a matriz de amortecimento, $[K]$ a matriz de rigidez, $\{\ddot{u}\}$ o vetor de aceleração, $\{\dot{u}\}$ o vetor de velocidade e $\{u\}$ o vetor de deslocamento.

Ao assumir um sistema estático sem amortecimento, a Equação 3 pode ser escrita de acordo com a Equação 4.

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (4)$$

Foi encontrado na literatura um número incipiente de trabalhos envolvendo estudos voltados para análise de tensões em estruturas do banco de tratores agrícolas com o objetivo de melhorar as questões de segurança. Sindhu e Naidu (2017) realizaram um estudo na estrutura do banco de um trator com objetivo de reduzir a vibração gerada neste ponto do equipamento por meio do MEF. Biris et al. (2015) também utilizaram o MEF para testar a resistência do assento do banco de um trator e verificar a conformidade com normas estabelecidas.

2.4 Extensometria

Os extensômetros (Strain Gages) são usados em experimentos para medição das deformações em corpos de prova, bem como para determinar as propriedades mecânicas, em especial a curva de tensão-deformação do material (SANDÍ & JIMÉNEZ, 2013). O teste consiste em sujeitar o corpo de prova a determinada tensão axial que ocasionará deformações unitárias no objeto de estudo (AVNER, 1988).

Os extensômetros podem ser conectados por intermédio de fios, hastes ou tubos, caracterizando os métodos mecânicos (MENTES, 2012). Nos métodos mecânicos, transdutores eletrônicos como os potenciômetros lineares, transdutores indutivos e capacitivos são utilizados para transmutar o deslocamento mecânico em sinais elétricos (MENTES, 2012). Os extensômetros são os transdutores mais comumente utilizados e são constituídos por uma base isolante e resistência elétrica fina, que pode ser de fio ou de lâmina, e funcionam a partir da variação da resistência elétrica. (HOFFMANN, 1989).

A configuração dos extensômetros é realizada por meio dos circuitos de ponte de *Wheatstone* que têm a função de converter a variação de resistência em unidade de volts proporcionais à carga aplicada (MARCELINO et al., 2018). As pontes de *Wheatstone* são amplamente utilizadas por apresentarem maior precisão na medição de pequenas variações de resistência (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2017). Essas pontes são compostas por quatro elementos resistivos e podem ser montadas de diferentes maneiras, que são: um quarto de ponte em que apenas um elemento é ativo, meia ponte em que dois elementos são ativos e ponte completa, por sua vez, em que todos os elementos são ativos (MARCELINO, et al., 2018).

A tensão de saída da ponte de *Wheatstone* é proporcional a variação da resistência elétrica do extensômetro. Assim, esta tensão de saída também é proporcional à deformação do material. Então, para medir essa deformação, basta medir a tensão de saída da ponte (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2017).

Como esses extensômetros são afixados ao corpo de prova, faz-se necessário que os testes de tensão não ultrapassem o limite de regime elástico do material, pois a partir deste limite o transdutor será inutilizado para aquele corpo de prova ou até mesmo definitivamente (SANDÍ & JIMÉNEZ, 2013).

Para utilização do extensômetro é necessário realizar a calibração do sistema de medição. A calibração busca relacionar os valores aferidos por um sistema de aquisição de medidas e valores correspondentes às grandezas estabelecidas por padrões, sob determinadas condições pré-estabelecidas (MARCELINO et al., 2018).

O comportamento do torque do motor de um trator agrícola foi analisado por Thomas (2010) para situações de campo utilizando extensômetros de resistência elétrica, fixados ao eixo cardan na saída do volante do motor do trator. De acordo com o autor, o sistema mostrou eficácia para avaliação de conjuntos mecanizados enfatizando que o procedimento possui muitas potencialidades.

Baek e Rowlands (2001), descreveram um método híbrido de análise de tensões na região de localização de um furo em um elemento confeccionado a partir de um compósito ortotrópico utilizando análise por elementos finitos e o método de extensometria.

O coeficiente de Poisson da espécie de madeira tropical *Goupia Glabra* foi determinado por Mascia e Nicolas (2013) por meio do ensaio de compressão com a utilização de extensômetros elétricos. Os autores compararam este ensaio com um modelo elástico, e as diferenças entre as médias de valores teóricos e experimentais estavam no intervalo de 2 a 15%, exceto para um ângulo de 75° e para o ângulo de 90°. O intervalo de 2 a 15% das diferenças médias encontradas, foi considerado adequado pelos autores quando comparado com dados da literatura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Vibrações Mecânicas do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

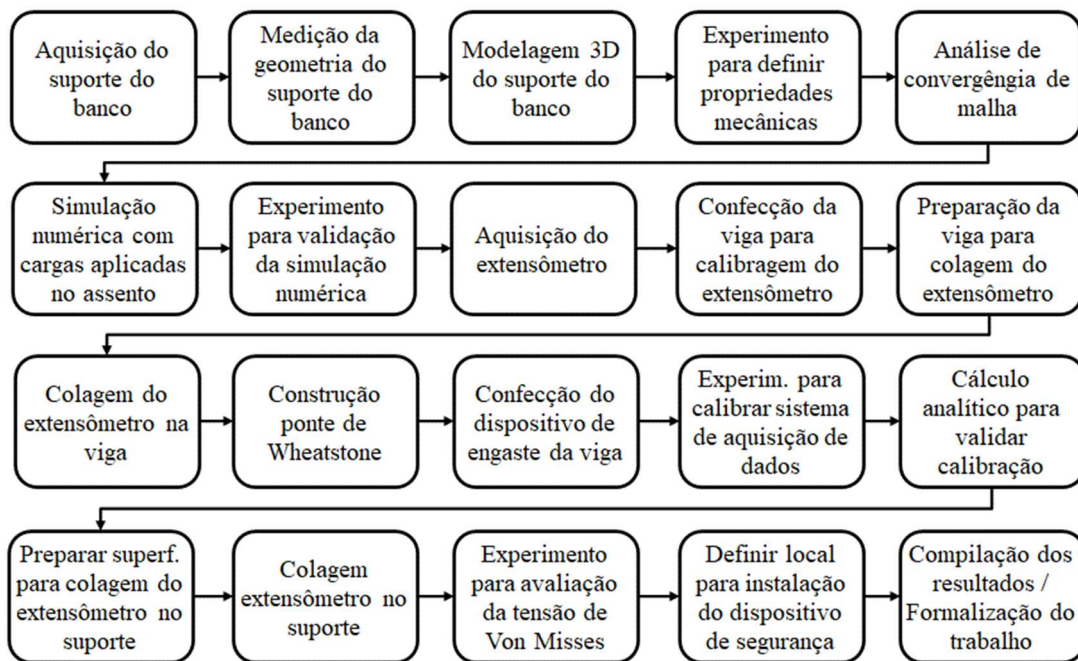
A primeira etapa deste trabalho foi realizada a partir da modelagem tridimensional do suporte do assento do trator utilizando o software comercial Solidworks®. Posteriormente, foi

realizada uma simulação numérica via MEF para análise de tensões e deslocamentos utilizando o software comercial Ansys[®], versão 14.5.

No intuito de validar os resultados das simulações numéricas, foram realizados experimentos para avaliar o deslocamento da estrutura do assento do banco quando submetido às mesmas condições impostas nas simulações.

Por fim, foi instalado um extensômetro unidirecional no local definido durante as simulações com o intuito de avaliar os resultados da simulação envolvendo as tensões de von Mises e indicar um local adequado para instalação do dispositivo de segurança. As principais etapas do trabalho são apresentadas na Figura 2. Para plotagem dos gráficos dos resultados foi utilizado o software comercial MATLAB[®], versão R2016a.

Figura 2: Principais etapas do trabalho.



Fonte: Do autor (2021).

3.1 Obtenção dos modelos geométricos e definição das propriedades mecânicas para realizar a simulação numérica.

Foi definido como objeto deste estudo, o conjunto para assento do trator modelo ECO-11SM fornecido pela empresa Star Seating SYS (Figura 3). Este conjunto tem um design padrão que pode ser utilizado em grande parte dos tratores agrícolas de pequeno porte.

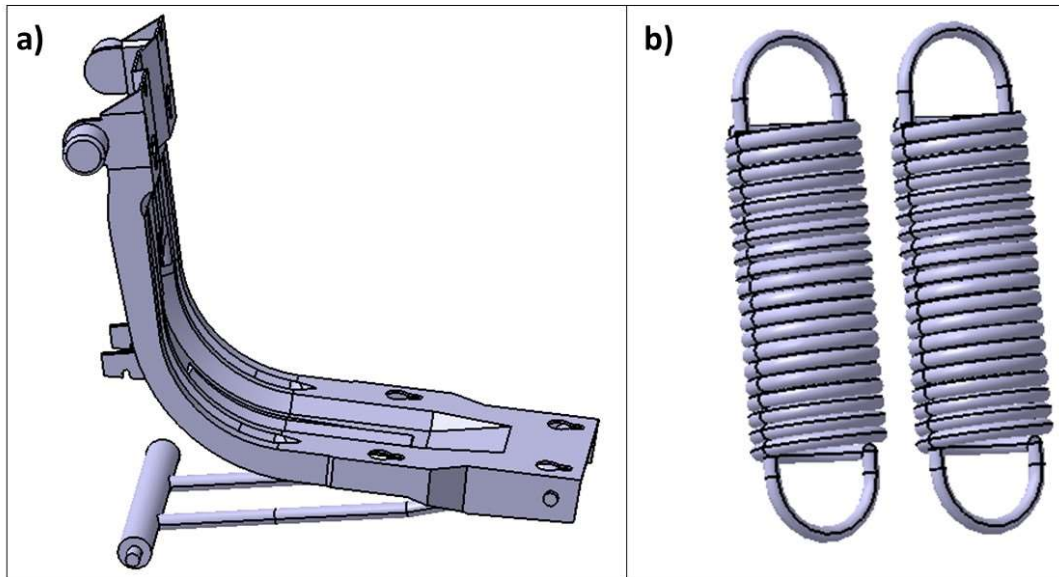
Figura 3: Modelo de conjunto do assento trator ECO-11SM.



Fonte: Do autor (2021).

Para realização das simulações numéricas foi necessário realizar a modelagem geométrica do suporte de apoio do banco e das molas de sustentação deste suporte, conforme Figura 4. A modelagem foi realizada individualmente para cada peça no software comercial Solidworks® por meio da medição da geometria das peças com auxílio de um paquímetro. Após a modelagem, as principais características de geometria como posição das furações, comprimento e largura total do suporte, altura de fixação das molas e posição de apoios do banco foram comparadas com o modelo físico, no intuito de verificar possíveis erros durante a modelagem. Ressalta-se que não foram identificadas divergências entre os modelos físico e numérico.

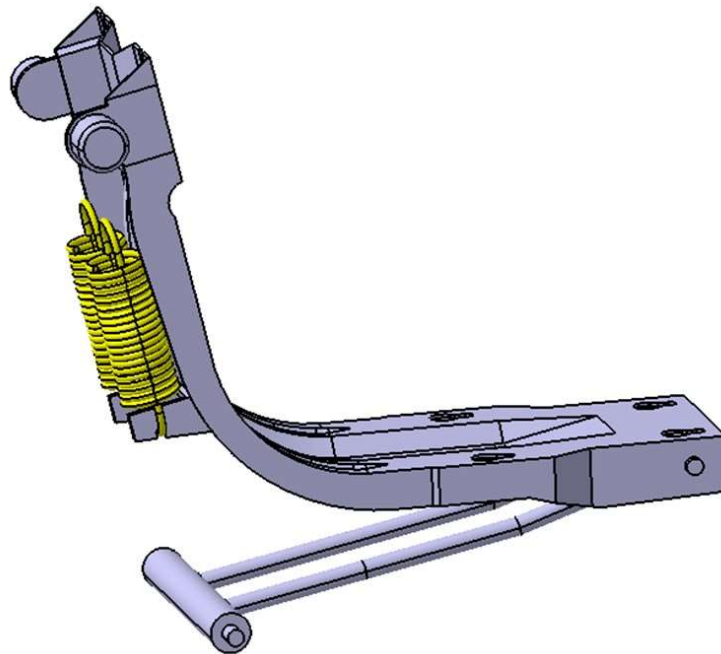
Figura 4: (a) Suporte de apoio do banco e (b) Molas de sustentação do suporte.



Fonte: Do autor (2021).

Após a modelagem das peças, foi realizada a montagem do conjunto (suporte de apoio do banco e molas de sustentação do suporte) no software comercial Solidworks[®], conforme Figura 5. A geometria deste conjunto foi exportada para o software Ansys[®] para fins de realizar simulações.

Figura 5: Conjunto suporte de apoio do banco e molas de sustentação do suporte

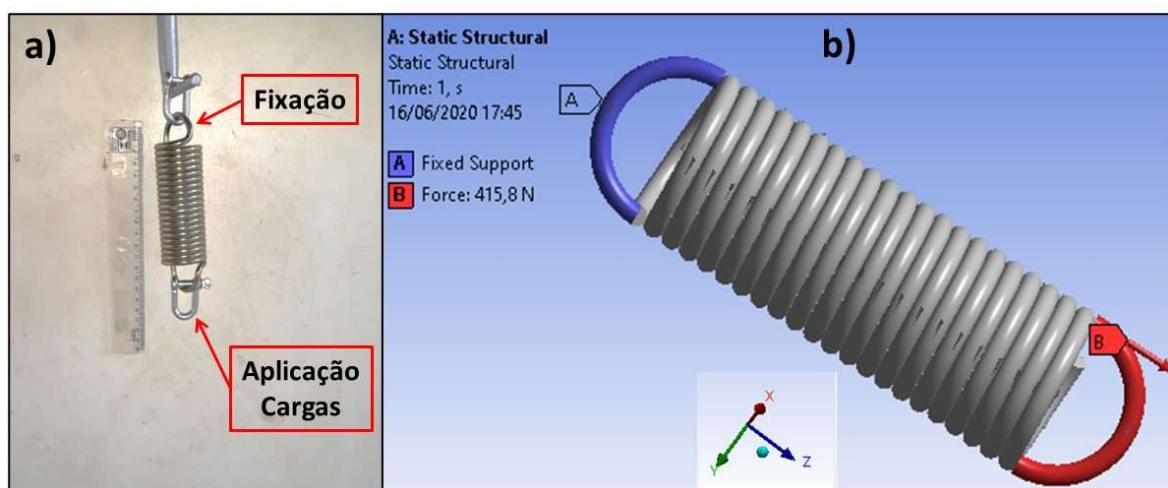


Fonte: Do autor (2021).

As propriedades mecânicas do material do suporte de apoio do banco foram definidas a partir do aço SAE 1020, disponível na biblioteca de materiais do software Ansys®, sendo que a especificação deste material consta nas especificações do produto.

A definição das propriedades mecânicas (Coeficiente de *Poisson* e Módulo de Elasticidade) do material das molas foram obtidas experimentalmente, visto que esta informação não constava nas especificações do produto. O experimento foi desenvolvido analisando a deformação das molas para diferentes valores de cargas, Figura 6a.

Figura 6: (a) Experimento e (b) simulação



Fonte: Do autor (2021).

Foram realizadas 3 réplicas com 10 medições de deformação para cada mola com as variações das cargas entre 156,9 N e 415,8 N. A partir dos valores de deformação encontrados foi possível definir o valor da constante elástica das molas de $8099,8 \text{ N.m}^{-1}$, conforme Equação 4.

Após a definição da constante elástica da mola, foram realizadas simulações (Figura 6b) para a definição do coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do material das molas. A partir dos dados obtidos experimentalmente utilizando carga igual 415,8 N, constante elástica da mola de $8099,8 \text{ N.m}^{-1}$ e deformação de 0,0513 m, os valores do coeficiente de *Poisson* e módulo de elasticidade foram testados na simulação até que os valores de deformação da mola convergissem para os mesmos valores de deformação obtidos no experimento. Por fim, definiu-se os valores do coeficiente de Poisson de 0,3 e módulo de elasticidade de 320 GPa.

3.2 Análise da convergência de malha da mola e do suporte do banco

No intuito de garantir a confiabilidade das simulações, optou-se por realizar análise de convergência de malha de acordo com condições de contorno pré-estabelecidas para a mola (Figura 6b) e para o suporte (Figura 7). Nesta análise, foi aplicada uma carga no centro do assento e na extremidade da mola de 415,8 N utilizando dois tipos de geometria de malha de segunda ordem (tetraédrica e hexaédrica) seguindo as etapas:

- a) Gerar malha com menor número de elementos possíveis e obter a deformação total da mola e o deslocamento em um ponto pré-definido da geometria (Figura 7) para o suporte;
- b) Refinar a malha com elementos menores e comparar com valores de deformação e deslocamento obtidos anteriormente;
- c) Aumentar a densidade da malha e reanalisar os resultados de deformação e deslocamento até que fosse identificada a estabilidade dos valores;

Durante a análise, não foi possível verificar a convergência dos resultados para a malha de geometria hexaédrica de segunda ordem. A convergência dos resultados foi alcançada apenas para a malha com geometria tetraédrica de segunda ordem para a mola e o suporte.

Por meio da variação das dimensões dos elementos da malha, os resultados de convergência de deformação da mola foram da ordem de 0,0810 m para elementos a partir de 0,004m de tamanho. Quanto maior o número de nós e elementos, maior o custo computacional para realizar as simulações, desta forma, optou-se por utilizar elementos com dimensão de 0,004 m, totalizando 28123 nós e 13119 elementos.

Os resultados de convergência de deslocamento do suporte foram da ordem de 0,0244 m para elementos a partir de 0,004 m de tamanho. Optou-se por utilizar elementos com esta dimensão, totalizando 157052 nós e 78314 elementos.

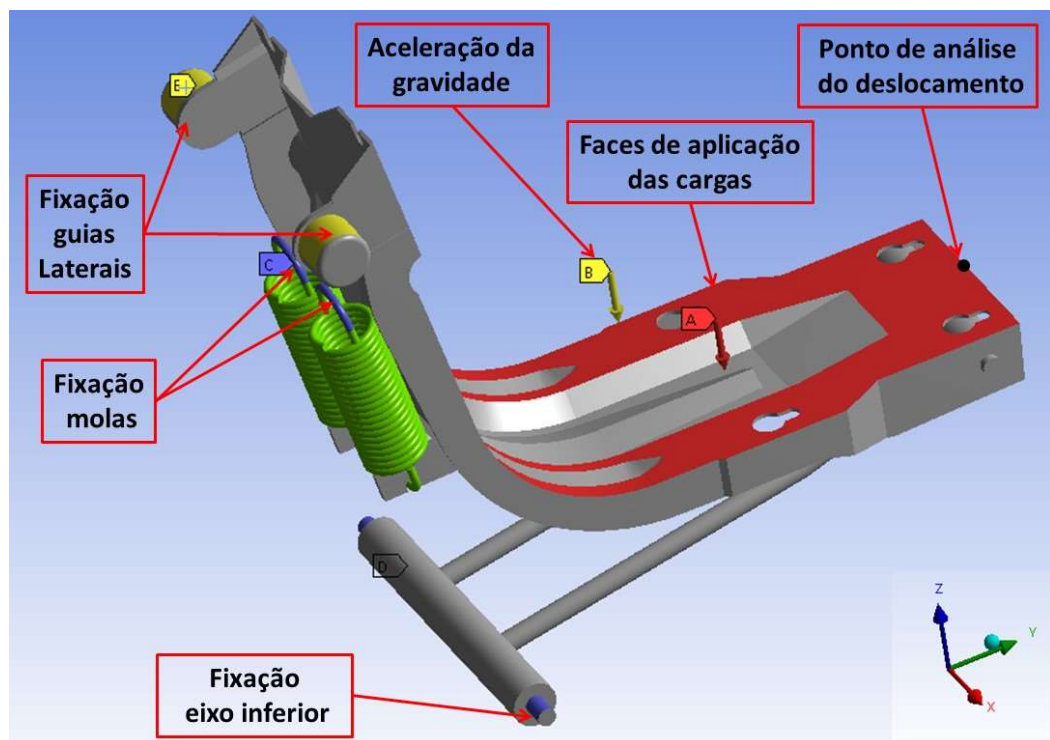
3.3 Simulação numérica e validação experimental do deslocamento do suporte do banco

Para avaliar as tensões e deslocamentos do suporte do banco quando submetido à carregamentos externos, foi utilizada a análise estrutural estática. Para isso, definiu-se primeiramente como pontos de fixação as duas faces superiores das molas. O eixo inferior foi fixado permitindo apenas a rotação do conjunto na direção do eixo x. Também foi definido o

ponto de fixação do suporte as guias laterais, deixando apenas a direção do eixo z livre (Figura 7). A aceleração da gravidade foi inserida em todo o conjunto e as cargas foram aplicadas considerando o operador posicionado no centro do assento, na lateral esquerda, na lateral direita e na extremidade (Figura 8).

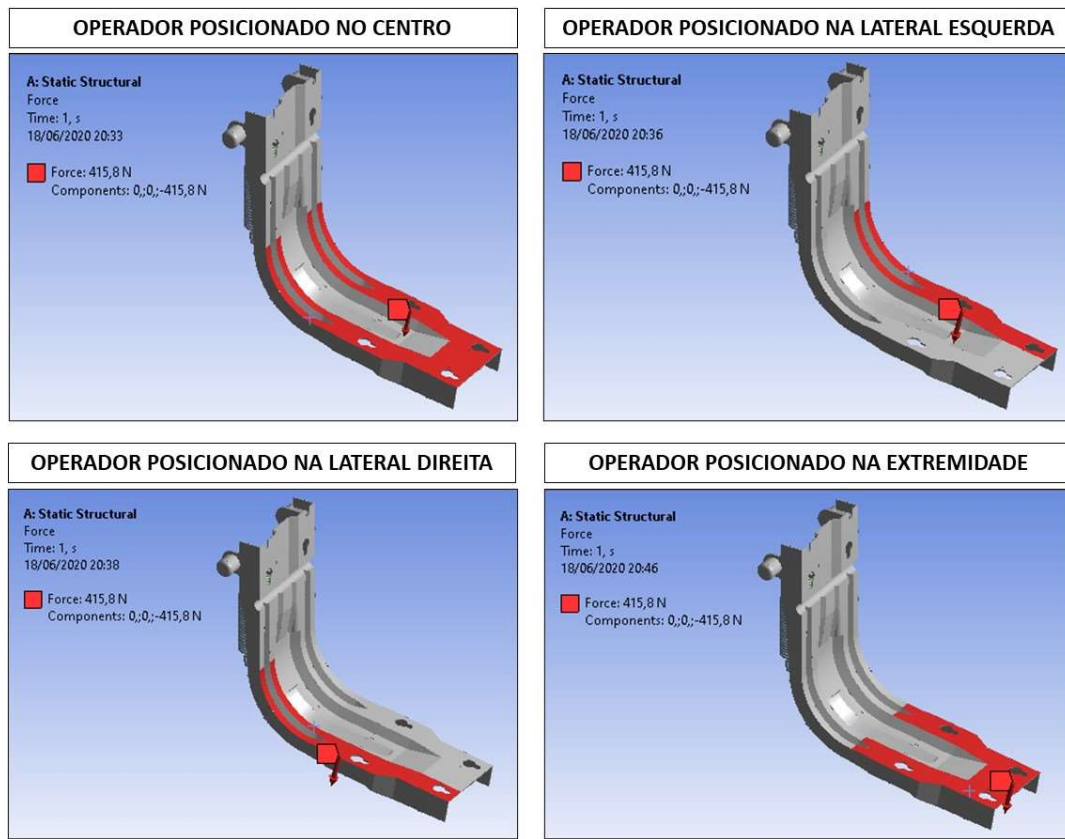
Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), no Brasil, o peso médio de crianças com doze anos de idade é de 42,4 kg. Desta forma, foi definido uma carga de 415,8 N (42,4kg) para análise das tensões utilizando o critério de von Mises.

Figura 7: Condições de contorno do conjunto.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 8: Local de aplicação das cargas no assento do banco.



Fonte: Do autor (2021).

Para validação da simulação, foi realizado um experimento de 3 réplicas com 8 medições de deslocamento do suporte quando submetido as cargas (aplicadas com operador posicionado no centro) variando de 215,7 N a 415,8 N. Foi utilizado um paquímetro com 0,01 mm de precisão para medir o deslocamento do suporte de acordo com ponto indicado na Figura 7. A referência utilizada para medição foi à superfície superior do suporte em relação a sua base, conforme Figura 9. A média e o erro padrão dos resultados de deslocamentos obtidos no experimento foram comparados com os resultados gerados por meio da simulação com as mesmas configurações de cargas.

Figura 9: Referência de medição do deslocamento do suporte.



Fonte: Do autor (2021).

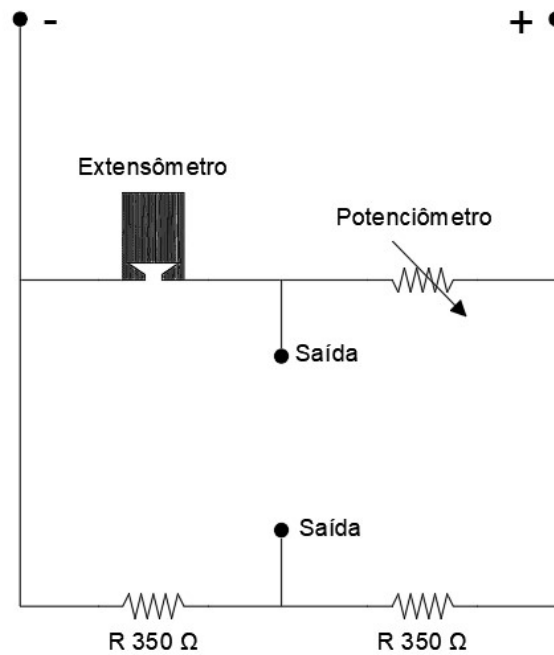
3.4 Calibração do sistema de aquisição de dados para utilização do extensômetro

Para avaliação dos valores de tensão obtidos via simulação numérica, foi necessário a utilização de um extensômetro unidirecional. O sistema de aquisição de dados foi calibrado com base em grandezas estabelecidas por padrões, sob condições controladas de acordo com os próximos tópicos.

3.4.1 Determinação e construção da Ponte de *Wheatstone*

Foi escolhida a configuração de um quarto de ponte de *Wheatstone* para a ligação de um extensômetro unidirecional. A ponte foi composta por dois resistores, um potenciômetro e um extensômetro, conforme Figura 10.

Figura 10: Esquema de configuração da Ponte de *Wheatstone*.



Fonte: Do autor (2021).

O equilíbrio da ponte foi alcançado por meio do ajuste do potenciômetro até que a voltagem do terminal referente ao extensômetro equivalesse a zero. Para a medição dessa voltagem utilizou-se um multímetro da marca Fluke, modelo 115 TRUE RMS.

3.4.2 Preparação da viga e colagem do extensômetro

Uma viga de aço ASTM A36, de comprimento 195mm, 40mm de largura e 3,25mm de altura foi preparada para receber o extensômetro unidirecional do fabricante Excel Sensores, modelo PA-06-060BA-350-LL. Para o engaste da viga, foi desenvolvido um dispositivo específico, conforme Figura 13. A lista de materiais utilizados para a colagem do extensômetro está listado na Tabela 1.

Tabela 1: Lista de Materiais para Colagem do Extensômetro.

Material	Função
Extensômetro (<i>Strain Gage</i>)	Sensor
Viga metálica	Corpo de prova
Lixa fina	Abrasão física
Álcool isopropílico + gaze	Limpeza química
Tesoura	Cortar materiais
Traçador de altura	Posicionar extensômetro
Riscador ponta fixa de metal duro	Marcação e posicionamento do extensômetro
Pinça	Auxílio para manuseio do extensômetro
Fita adesiva 48 mm	Posicionamento do extensômetro
Adesivo especial para extensômetro	Fixar extensômetro
Fita isolante	Isolar fios do extensômetro em relação a viga
Resina plástica	Proteger extensômetro
Espátula	Manuseio da resina plástica

Fonte: Do autor (2021).

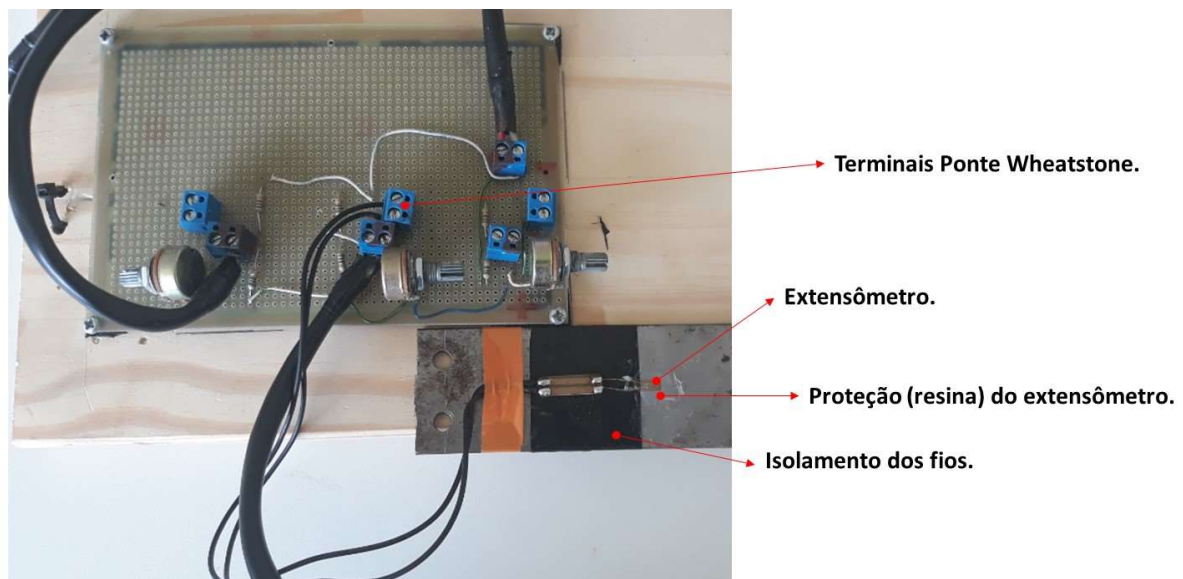
O processo de colagem do extensômetro consiste, inicialmente, na preparação da superfície para a remoção de resíduos e imperfeições da área de posicionamento do extensômetro, afim de se evitar que causem interferências no mesmo, para isso foram utilizados uma lixa para abrasão da superfície e posteriormente álcool e a gaze para limpeza química. A marcação do local de posicionamento do extensômetro foi realizada com o auxílio de um traçador de altura e um riscador de ponta fixa. Esta marcação foi localizada no centro da viga metálica a uma distância de 0,122 m da extremidade de aplicação da carga.

Após determinado o posicionamento correto do extensômetro, ele foi colado na viga respeitando-se os devidos procedimentos de manuseio. Foi cortado um pedaço de 0,05 m da fita adesiva e com o auxílio da pinça o extensômetro foi pego por uma das bordas (com o cuidado de não tocar no circuito), e foi posicionado sobre a fita de modo que o extensômetro permanecesse fixo. A fita adesiva foi utilizada para posicionar o extensômetro nas marcações da viga de acordo com as indicações previamente realizadas.

A próxima etapa consistiu em levantar, cuidadosamente, a extremidade da fita, de modo a não comprometer o posicionamento do extensômetro. Com o auxílio do bico dosador, depositou-se um pouco de cola adesiva sobre a superfície da viga de forma que toda a área de contato do extensômetro fosse abrangida. Em seguida, a fita foi colocada novamente na

posição original. Durante o processo de cura da cola adesiva (aproximadamente 90 segundos), foi aplicada uma pressão com o dedo sobre o extensômetro. Por fim, a fita adesiva foi retirada e certificou-se que não haviam irregularidades como bolhas ou posicionamento errôneo. Para garantir o isolamento dos fios do extensômetro, foi colada uma fita isolante na viga, próximo a extremidade do extensômetro. Com o objetivo de proteger o extensômetro, foi aplicado uma resina plástica (com auxílio de uma espátula) sobre o extensômetro e na região em torno dele. O tempo de cura da resina foi de 24 horas, conforme especificação do fabricante. Após o processo de colagem do extensômetro, os fios foram conectados aos terminais da ponte de *Wheatstone*, conforme Figura 11.

Figura 11: Conexão do extensômetro à Ponte de *Wheatstone*.



Fonte: Do autor (2021).

3.4.3 Sistema de aquisição de dados

Foram utilizados os hardwares NI 9237 e NI 9949 da *National Instruments*. O *software* utilizado para a comunicação com os *hardwares* foi o LabView® (versão 16.0f2). A configuração dos *hardwares* e do *software* foi realizada levando-se em consideração um quarto de Ponte de *Wheatstone*, conforme indicação do manual do fabricante.

3.4.4 Máquina de ensaio

A máquina de ensaio utilizada foi a EMIC 23-20 do fabricante Instron. Além disso, uma célula de carga com capacidade de 5kN, devidamente calibrada com o *software* específico foi utilizada para a realização dos ensaios de aplicação das cargas sobre a viga.

3.4.5 Setup do experimento

O objetivo do experimento foi coletar os valores de deformação específica por meio da leitura do extensômetro para cada carga aplicada à viga. O experimento consistiu na montagem do dispositivo de engaste da viga abaixo do eixo de aplicação da carga, de modo que, a carga fosse aplicada na extremidade da viga. O controle da carga aplicada foi realizado por meio do próprio *software* da máquina de ensaio. A coleta de dados foi realizada por meio do software LabView® e dos hardwares NI 9237 e NI 9949 (Figura 12).

Figura 12: Setup do experimento.



- | | |
|-------------------------------------|--|
| ① Controle da carga aplicada. | ④ Hardware NI 9237. |
| ② Eixo de aplicação da carga. | ⑤ Hardware NI 9949. |
| ③ Dispositivo com a viga engastada. | ⑥ Software de comunicação (LabView) com o sistema de aquisição de dados. |

Fonte: Do autor (2021).

Foram realizadas cinco réplicas do experimento, de modo que, cada réplica consistiu na leitura média de deformação específica para cargas estáticas variando de 10 a 70 N com um incremento de 10 N. Como estratégia para minimizar o erro durante a coleta de dados, a cada medição realizada, optou-se por adotar o procedimento de calibração do extensômetro disponível no software LabView®, descrito no manual do fabricante.

3.4.6 Cálculo analítico para verificação dos resultados experimentais

Para a verificação dos resultados experimentais, foi realizado o cálculo analítico das deformações específicas para o mesmo valor de cada carga aplicada. Uma equação utilizada para determinara deformação de materiais é dada pela Lei de Hooke (Equação 5), desde que a deformação compreenda a região elástica, devido a linearidade entre tensão e deformação.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

em que σ é a tensão aplicada, E a constante do módulo de elasticidade do material (Módulo de *Young*) e ε a deformação específica.

O método analítico utilizado para determinação da deformação do corpo de prova levou em consideração a geometria do corpo e suas condições de graus de liberdade (corpo livre, engastado, bi apoiado, etc.). Para uma viga engastada (Figura 13), as Equações de 6 a 10 implicaram na determinação analítica da deformação específica de uma viga em balanço (Equação 11).

Figura 13: Viga engastada.



Fonte: Do autor (2021).

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \quad (6)$$

$$M = PL \quad (7)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

$$y = \frac{h}{2} \quad (9)$$

em que M é o momento fletor, I o momento de inércia do corpo, P a carga aplicada e L a distância entre onde está sendo aplicada a carga e o extensômetro. O momento de inércia esta relacionado com a geometria do corpo e é determinado pela Equação 9, em que b é a base do corpo de prova, h a altura e y corresponde à metade da altura da seção transversal do corpo de prova.

Combinando-se as equações (8) e (9) em (6), tem-se a equação (10):

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \quad (10)$$

Combinando-se as equações (7) e (5) em (10), tem-se a equação (11):

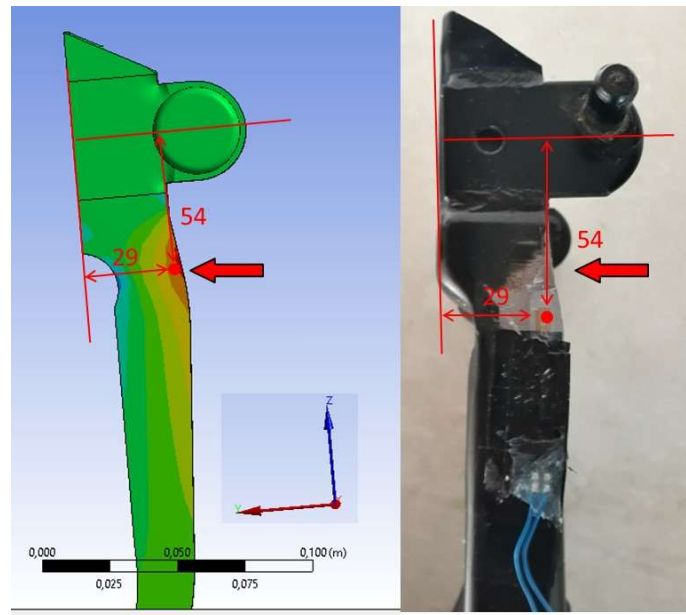
$$\mathcal{E} = \frac{6PL}{Eb^2} \quad (11)$$

Os valores de deformação obtidos no cálculo analítico foram comparados com os valores do experimento por meio da análise de regressão linear simples e do erro global.

3.5 Avaliação dos valores de tensão obtidos por simulação numérica

Nesta etapa foi realizada a colagem do extensômetro no assento do banco para avaliação dos valores de tensão obtidos na simulação numérica no intuito de indicar um local adequado para instalação do dispositivo de segurança. A preparação da superfície do assento do banco para colagem do extensômetro foi feita de acordo o procedimento citado no item 4.4.2. O extensômetro foi posicionado na direção do eixo z de acordo com as coordenadas do ponto de maior tensão indicado na simulação. A referência utilizada para as coordenadas foi o centro das guias laterais e face de apoio superior do assento do banco (Figura 14).

Figura 14: Localização do extensômetro na peça.



Fonte: Do autor (2021).

Após a colagem do extensômetro no ponto indicado, o setup do experimento foi configurado com as mesmas características do setup descrito no item 4.4.5, exceto pela substituição do item 3 (dispositivo com viga engastada) mencionado na Figura 12 pelo assento do banco de acordo com a Figura 15.

Figura 15: Setup experimento validação tensões.

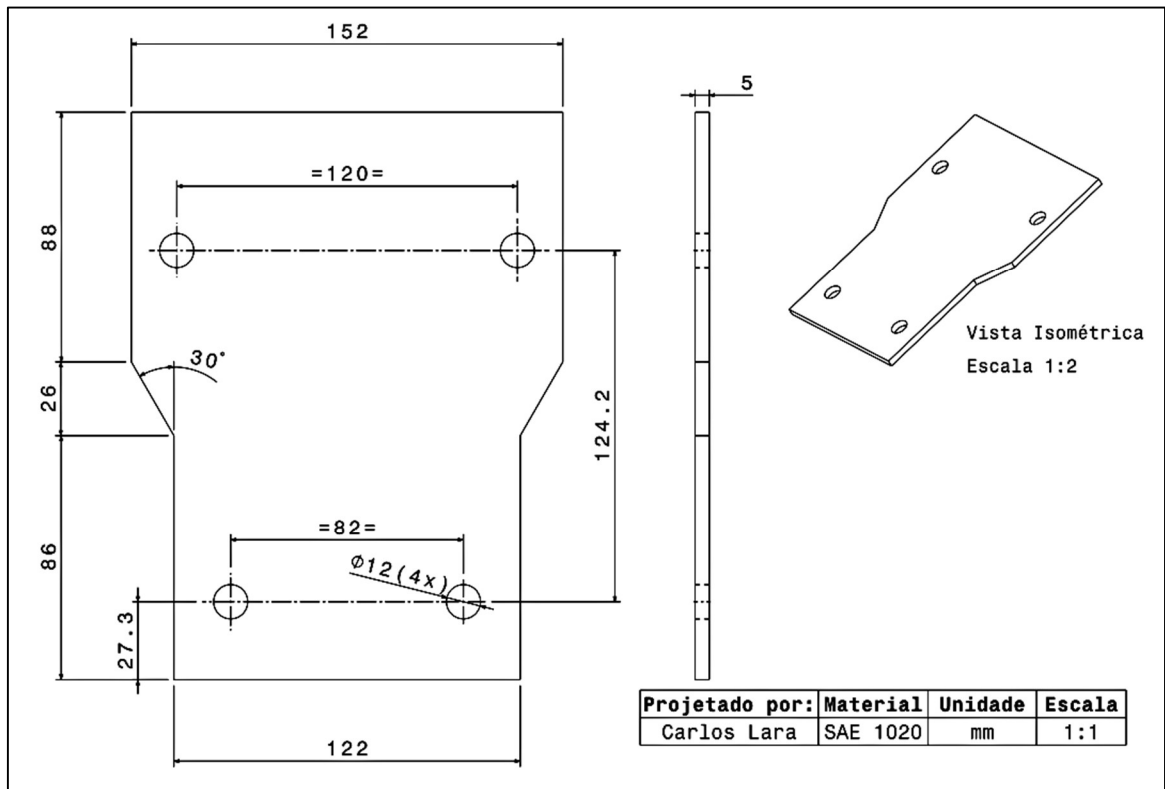


- ① Assento do banco.
- ② Superfície para aplicação das cargas.

Fonte: Do autor (2021).

O local de aplicação das cargas no assento do banco foi considerado como sendo as superfícies em que o operador se encontra posicionado na extremidade do assento conforme descrito na Figura 8. Para simular a mesma condição de distribuição das cargas aplicadas na simulação, foi confeccionada uma peça com a mesma geometria das superfícies consideradas. Os detalhes e especificações técnicas desta peça estão descritos na Figura 16.

Figura 16: Desenho técnico da superfície para aplicação das cargas.



Fonte: Do autor (2021).

A peça foi fixada no assento do banco com quatro parafusos de acordo com a Figura 15. O peso desta peça e dos parafusos de 1,06 kg foi considerado durante a aplicação das cargas.

Foram realizados dois experimentos para validação das tensões. O objetivo do primeiro experimento foi validar o ponto de maior tensão indicado na simulação, para isto, foi aplicada a mesma carga da simulação de 415,8 N com 3 réplicas e 10 medições de tensão para cada réplica. A média dos valores de tensão do experimento foi calculada e comparada com o valor obtido na simulação gerando um percentual de diferença entre eles.

O objetivo do segundo experimento foi gerar uma curva de correlação entre as tensões geradas na simulação e no experimento. Desta forma foram aplicadas cargas variando de 98,1 N a 415,8 N com 5 réplicas e 4 medições de tensão por réplica. Os valores de tensão obtidos na simulação e no experimento foram plotados em um gráfico juntamente com o modelo de regressão linear simples e o erro padrão do experimento.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da simulação para determinar as propriedades do material da mola

Os resultados da simulação para determinar as propriedades do material da mola estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da simulação para determinar as propriedades do material da mola.

Dados do experimento			Dados simulação			Diferença entre experimento e simulação (%)
F (N)	K (N/m)	Deform. (m)	Coefficiente de Poisson	Modulo de elasticidade (GPa)	Deform. (m)	
415,8	8099,8	0,0513	0,27	210,0	0,0776	51,17%
			0,28	250,0	0,0657	27,98%
			0,29	300,0	0,0552	7,53%
			0,30	305,0	0,0547	6,56%
			0,30	310,0	0,0538	4,80%
			0,30	315,0	0,0529	3,05%
			0,30	320,0	0,0509	-0,88%

Fonte: Do autor (2020).

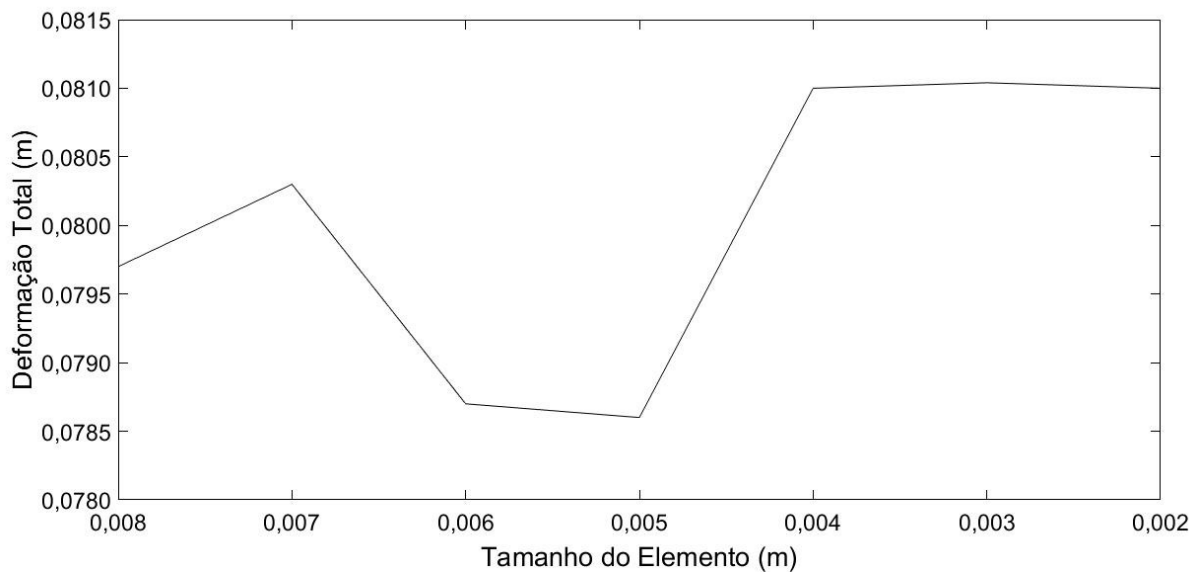
Nota-se na Tabela 2 que, para os valores do coeficiente de Poisson de 0,3 e módulo de elasticidade de 320,0GPa, a diferença entre a deformação obtida na simulação e no experimento foi de apenas 0,88%, desta forma definiu-se estes valores como propriedades do material da mola. Estes valores foram testados em uma nova simulação para cargas variando de 156,9 N a 415,8 N e a diferença entre os valores de deformação na simulação e no experimento manteve-se em 0,88%, validando-se os valores obtidos.

4.2 Resultados da análise de convergência de malha da mola e suporte do banco

Durante a análise, não foi possível verificar a convergência dos resultados para a malha de geometria hexaédrica de segunda ordem. A convergência dos resultados foi alcançada apenas para a malha com geometria tetraédrica de segunda ordem para a mola e o suporte.

Os resultados de convergência de malha para deformação da mola foram da ordem de 0,0810 m para elementos com dimensão a partir de 0,004 m, Figura 17.

Figura 17: Análise de convergência de malha (geometria tetraédrica de segunda ordem) da mola.



Fonte: Do autor (2021).

A configuração dos nós e elementos utilizados na análise de convergência de malha da mola está apresentada na Tabela 3. Nota-se, na Tabela 3 uma redução de 38,2% no número de nós e 41,7% no número de elementos com dimensão entre 0,004 m e 0,002 m, ou seja, houve uma redução significativa de 54% do tempo computacional durante as simulações numéricas.

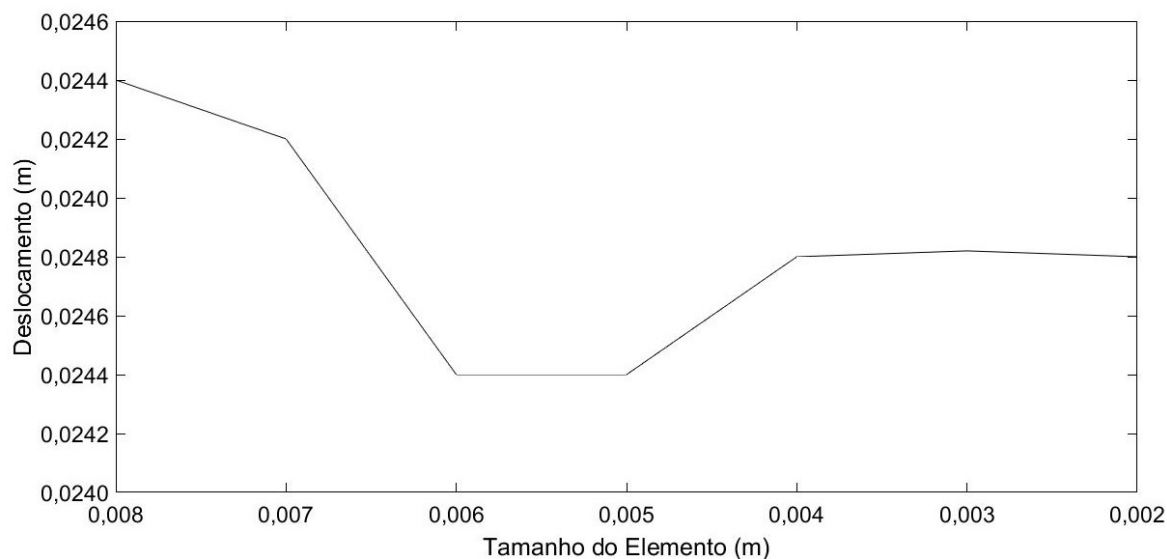
Tabela 3: Análise de convergência de malha da mola com geometria tetraédrica de segunda ordem.

Elemento (m)	Nº Nós	Nº Elementos	Deformação (m)
0,0080	29.070	13.577	0,0797
0,0070	31.403	14.708	0,0803
0,0060	28.958	13.675	0,0787
0,0050	26.666	12.607	0,0786
0,0040	28.123	13.119	0,0810
0,0030	38.461	18.506	0,0811
0,0020	45.517	22.514	0,0810

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados de convergência de malha para deslocamento do suporte foram da ordem de 0,0244 m para elementos com dimensão a partir de 0,004 m, conforme Figura 18.

Figura 18: Análise de convergência de malha (geometria tetraédrica de segunda ordem) do suporte.



Fonte: Do autor (2021).

A configuração dos nós e elementos utilizados na análise de convergência de malha do suporte está apresentada na Tabela 4. Analisando a Tabela 4, verificou-se uma redução de 50,8% no número de nós e 53,5% no número de elementos com dimensão entre 0,004 m e 0,002 m, ou seja, houve uma redução significativa de 67% do tempo computacional durante as simulações numéricas.

Tabela 4: Análise de convergência de malha do suporte com geometria tetraédrica de segunda ordem.

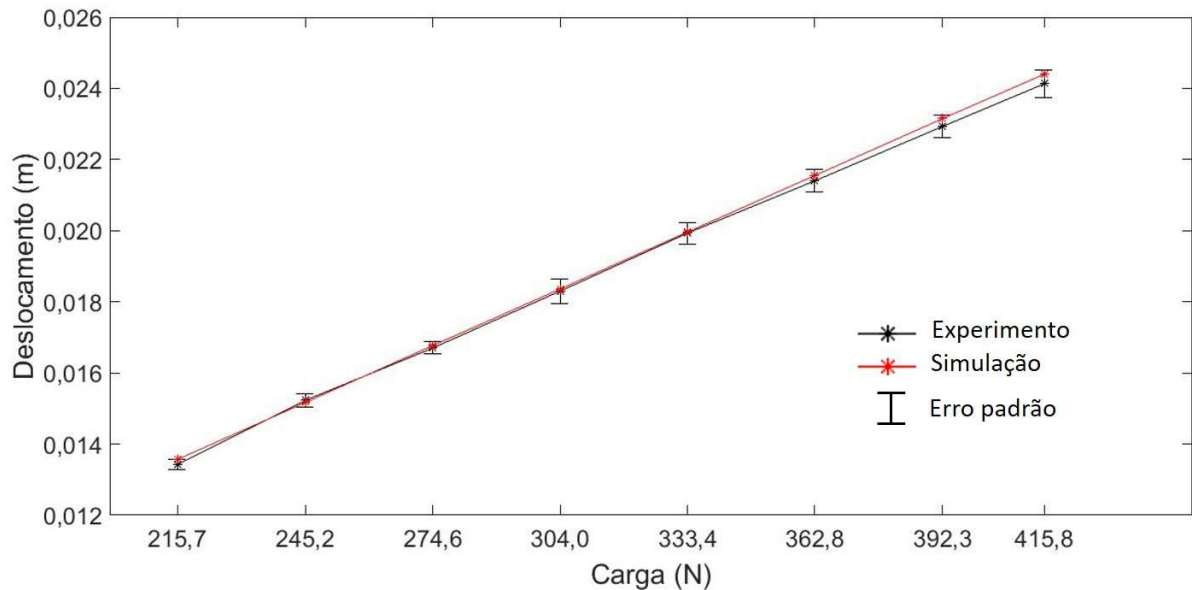
Elemento (m)	Nº Nós	Nº Elementos	Deslocamento (m)
0,0080	103.365	50.192	0,0247
0,0070	102.821	49.603	0,0246
0,0060	110.261	53.959	0,0242
0,0050	125.697	62.097	0,0242
0,0040	157.052	78.314	0,0244
0,0030	224.355	112.694	0,0244
0,0020	319.136	168.529	0,0244

Fonte: Do autor (2021).

4.3 Resultados da simulação numérica e validação experimental do deslocamento do suporte do banco

Os resultados de deslocamentos do suporte do banco obtidos na simulação numérica e no experimento estão apresentados na Figura 19.

Figura 19: Resultados de deslocamento do assento do banco.

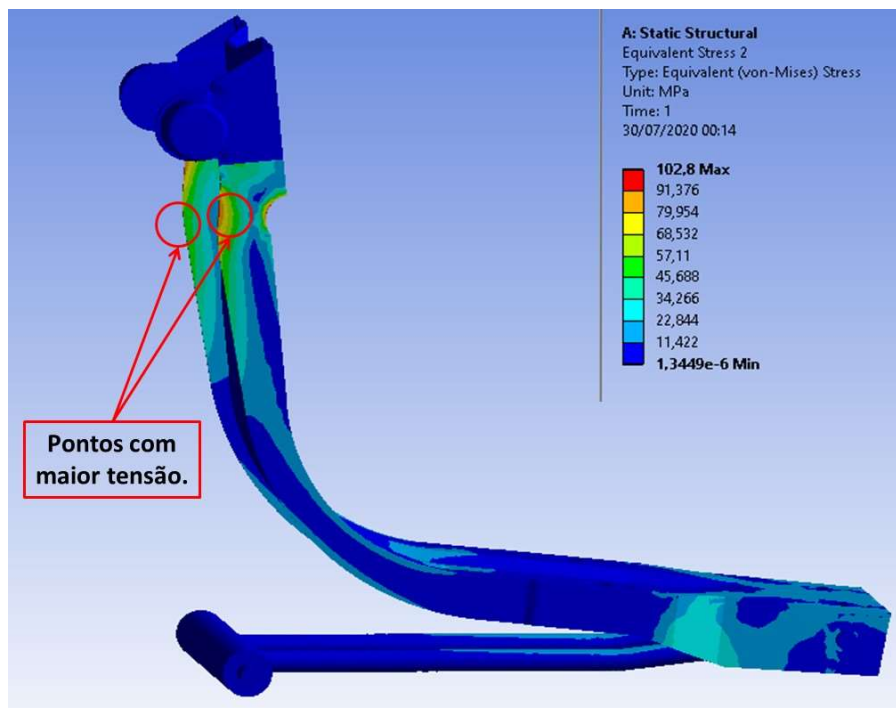


Fonte: Do autor (2021).

Nota-se que, no gráfico apresentado na Figura 19, a diferença máxima entre os valores de deslocamentos encontrados foi de 1,1%, considerando o carregamento máximo (415,8 N). Os resultados das simulações e experimentais apresentaram linearidade nos valores obtidos de deslocamento, ou seja, ao variar os carregamentos no suporte do assento, considerando um acréscimo de 29,4 N, observou-se um acréscimo médio no deslocamento de 0,00160 m nas simulações e 0,00158 m nos experimentos.

Verificou-se ainda que, com a aplicação da carga de 415,8 N considerando o operador posicionado no centro e na extremidade do assento, a concentração de tensão em todo o suporte do banco se comportou de forma simétrica conforme o esperado (Figura 20). Não foram identificados valores de tensão superiores ao limite de escoamento do material SAE 1020, que é de aproximadamente 350 MPa.

Figura 20: Resultado da análise de tensões no suporte do banco (operador posicionado na extremidade).



Fonte: Do autor (2021).

Os pontos máximos de tensão foram de 95,1 MPa e 102,8 MPa com o operador posicionado no centro e na extremidade do assento, respectivamente. Estes pontos estão localizados na parte superior do assento em ambos os lados (Figura 20) e indicam potencial local para instalação de um extensômetro para medir deformações na região e desenvolvimento do dispositivo de segurança. Considerando o operador posicionado na lateral esquerda e direita do assento, os pontos máximos de tensão foram de 102,7 MPa, mantendo-se na parte superior do assento do mesmo lado em que a carga foi aplicada. Os valores de tensão dos planos x, y e z estão detalhados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado da tensão de von Mises na simulação

Posição do operador no assento	σ (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)
Centro	95,1	39,5	41,7	97,9
Lateral esquerda	102,7	43,2	53,7	105,8
Lateral direita	102,7	43,2	53,7	105,8
Extremidade	102,8	42,9	46,9	105,8

Fonte: Do autor (2021).

Sindhu e Naidu (2017) analisaram as tensões na estrutura do banco de um trator utilizando simulações numéricas, porém com uma carga de 1000 N aplicada na parte inferior da estrutura. Os autores encontraram um valor máximo de tensão na ordem de 107,94 MPa, ou seja, abaixo do limite de escoamento do material. A diferença entre os valores encontrados deve-se ao fato de os projetos das estruturas do banco serem oriundos de conceitos diferentes, sendo que a estrutura estudada por Sindhu e Naidu (2017) é mais robusta do que a estrutura analisada neste trabalho.

4.4 Resultados da calibração do sistema de aquisição de dados para utilização do extensômetro

Os resultados de deformação do cálculo analítico e do experimento de calibração do sistema de aquisição de dados estão apresentados na Tabela 6. A maior diferença encontrada entre o erro médio das réplicas foi de apenas 5,7% para a carga de 10 N e erro global da diferença entre as deformações calculadas e do experimento foi de 3,8%. Estes resultados demonstraram boa repetibilidade entre as medições realizadas e também demonstram a concordância em relação ao cálculo analítico.

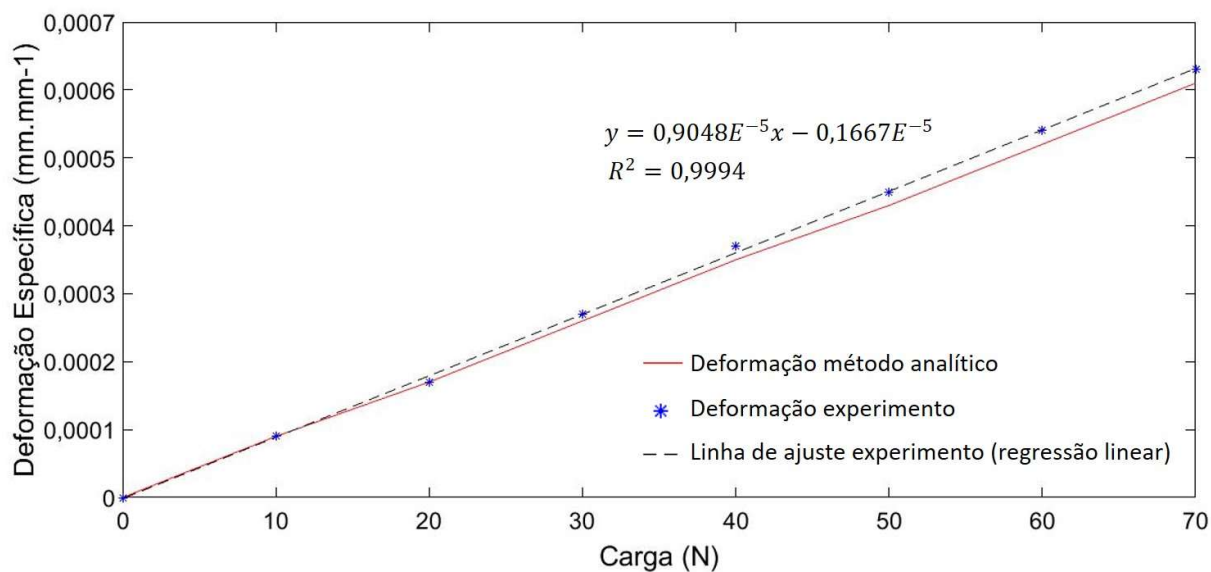
Tabela 6: Resultado das deformações calculada e do experimento de calibração do sistema de aquisição de dados.

Carga (N)	ϵ (mm/mm) Calculada	ϵ (mm/mm) Média Experimento	% médio de erro entre réplicas	% diferença entre ϵ calculada e experimento
0	0,000000	0,000000	0,0%	0,0%
10	0,000087	0,000092	5,7%	5,8%
20	0,000173	0,000174	4,2%	0,4%
30	0,000260	0,000268	4,4%	3,0%
40	0,000347	0,000366	5,2%	5,3%
50	0,000433	0,000452	4,1%	4,2%
60	0,000520	0,000540	4,4%	3,7%
70	0,000606	0,000632	4,4%	4,1%
Erro Global (%)				3,8%

Fonte: Do autor (2021).

O gráfico com as curvas de ajuste linear das deformações calculada e do experimento está apresentado na Figura 21. Ao analisar a curva de deformação do experimento, a correlação entre os dados é justificada pelo valor do coeficiente de correlação linear (R^2), responsável por indicar o quanto o modelo se ajusta aos dados observados no experimento. O coeficiente de correlação linear varia entre zero (0) e um (1), e quanto mais próximo de um (1), mais representativo é o modelo. O experimento apresentou um R^2 de 0,9994, o que se encontra próximo de um (1). Um valor próximo do R^2 de 0,9998 foi encontrado por Marcelino et al. (2018) durante a aplicação da ponte de *Wheatstone* com extensômetros elétricos na instrumentação de um link para medições das cargas de tração e compressão.

Figura 21: Gráfico de carga versus deformação para abordagem analítica e experimental.



Fonte: Do autor (2021).

A linearidade dos valores obtidos no experimento mostra concordância com a Lei de Hooke para deformações dentro da região elástica do material e assim permitiu a validação do sistema de medição proposto.

Por meio dos resultados encontrados, pode-se verificar que o procedimento empregado durante a preparação da viga e colagem do extensômetro mostrou-se adequado.

A utilização de um potenciômetro na construção da ponte de *Wheatstone* possibilitou o procedimento de equilíbrio de tensões da ponte garantindo assim maior assertividade na coleta de dados.

A utilização do extensômetro para medidas de carga e deformação mostrou-se uma opção vantajosa ao apresentar linearidade em resposta as aplicações de carga. Além disto, o extensômetro tem baixo custo de aquisição e pode ser utilizado em diversas aplicações para medição de carga e deformação.

O sistema de medição validado também pode ser utilizado para determinar as propriedades mecânicas de um material, em especial a curva de tensão-deformação. É importante ressaltar que os valores de carga aplicada ao objeto de estudo não devem ultrapassar o limite elástico do material.

4.5 Resultados da validação dos valores de tensão obtidos na simulação numérica

Os resultados dos valores de tensão da simulação e do experimento estão apresentados na tabela 6. O valor de tensão obtido na simulação foi de 105,8 MPa e a média das tensões do experimento foi de 93,8 MPa gerando uma diferença de apenas 11,4%. Yurdem et al. (2019) realizaram uma simulação numérica via MEF em um arado de aiveca para determinar os pontos de maior concentração de tensão de von Mises em diversos pontos da estrutura do arado quando submetido a uma carga de 20 kN. Para validação da simulação, Yurdem et al. (2019) instalaram extensômetros na estrutura do arado nos mesmos pontos indicados na simulação e a diferença média obtida entre os valores de tensão da simulação e do experimento foi de 22%. Valladares et al. (2014) utilizaram métodos computacionais e experimentais em um projeto de otimização de um suporte do eixo de semirreboque submetido a cargas de fadiga. Os resultados obtidos por Valladares et al. (2014) via MEF para valores de tensão de von Mises foram correlacionados com testes extensiométricos com o objetivo de avaliar a precisão do método computacional, obtendo-se diferença entre os valores de tensão experimental e na simulação em torno de 31%. Considerando que a diferença encontrada nesse trabalho foi de 11,4% (Tabela 6), é possível afirmar que os resultados obtidos para a distribuição de tensão no assento do banco quando o mesmo é submetido a carregamentos externos foram adequados, quando comparados com dados de literatura.

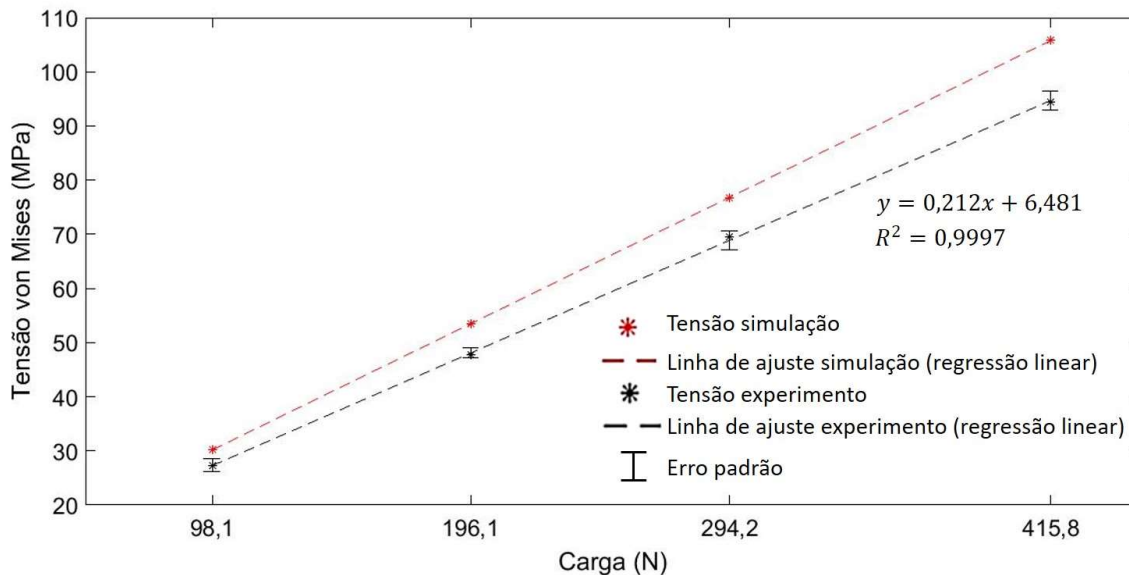
Tabela 6: Resultados valores tensão entre simulação e experimento.

Dados da simulação		Dados do experimento				
F (N)	σ (MPa)	Amostra	σ (MPa) - média entre réplicas	% diferença entre simulação e experimento	σ (MPa) - média experimento	% diferença entre experimento e simulação
415,8	105,8	1	93,4	11,7%	93,8	11,4%
		2	93,4	11,7%		
		3	91,8	13,2%		
		4	95,1	10,1%		
		5	98,4	7,0%		
		6	90,2	14,8%		
		7	90,2	14,8%		
		8	91,8	13,2%		
		9	96,7	8,6%		
		10	96,7	8,6%		

Fonte: Do autor (2021).

O gráfico com as curvas de ajuste linear das tensões obtidas na simulação e experimento está apresentado na Figura 22. Ao analisar a curva de tensão do experimento, a correlação entre os dados é justificada pelo valor do coeficiente de determinação (R^2) de 0,9997. A diferença máxima encontrada entre os valores de tensão do experimento e simulação foi de 10,8% para a carga de 196,1 N e a diferença mínima obtida foi de 9,3% para a carga de 294,2 N. Estes resultados demonstraram boa repetibilidade entre as medições realizadas. Naderi et al. (2008) utilizou extensômetros para medição da carga dinâmica das rodas motrizes de um trator com o objetivo de melhorar a eficiência de tração. Os valores obtidos por meio da utilização de extensômetros no experimento com cargas variando de 6,5 kN a 20,6 kN foram comparados com os valores obtidos por meio das equações de previsão da carga dinâmica. A diferença mínima encontrada entre os valores da carga dinâmica calculada e do experimento foi de 9% e a diferença máxima foi de 20%. O coeficiente de correlação linear simples (R^2) das medições realizadas no experimento foi de 0,95.

Figura 22: Gráfico de tensão versus carga entre simulação e experimento.



Fonte: Do autor (2021).

A linearidade dos valores obtidos no experimento valida o local indicado na simulação para instalação do dispositivo de segurança. O próprio extensômetro pode ser utilizado como dispositivo de segurança desde que seja implementada uma interface de comunicação com o sistema de ignição do trator. Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos para desenvolvimento desta interface de comunicação e do dispositivo de segurança. É indicado

que a instalação do extensômetro seja feita em ambos os lados do local indicado, uma vez que a distribuição de tensão se comportou de forma simétrica.

5 CONCLUSÃO

Foi possível entender a distribuição da tensão de von Mises a partir de análises estruturais estáticas via MEF, quando o assento do banco do trator é submetido a carregamentos externos de cargas e também indicar o local para instalação do dispositivo de segurança proposto.

A distribuição dos valores de tensão se comportou de forma simétrica em torno do assento do banco. O valor de tensão obtido na simulação foi de 105,8 MPa e a média das tensões do experimento foi de 93,8 MPa gerando uma diferença de apenas 11,4%. Os resultados obtidos para a distribuição de tensão foram adequados, quando comparados com dados de literatura que apresentaram diferenças de 22% e 31% entre valores de simulação e experimento.

O local indicado para instalação do dispositivo de segurança é o ponto com maior concentração de tensão de 105,8 MPa obtido na simulação numérica de acordo com a Figura 20. O próprio extensômetro pode ser utilizado como dispositivo de segurança desde que seja implementada uma interface de comunicação com o sistema de ignição do trator. Trabalhos futuros podem ser realizados para desenvolvimento desta interface de comunicação e do dispositivo de segurança.

A análise de convergência de malha proposta para o modelo garantiu a confiabilidade dos resultados, além de proporcionar uma redução significativa do tempo computacional de 54% durante as simulações com a mola e 67% nas simulações com o suporte do banco.

A utilização do extensômetro para medidas de carga e deformação mostrou-se uma opção vantajosa ao apresentar linearidade em resposta as aplicações de carga. Além disto, o extensômetro tem baixo custo de aquisição e pode ser utilizado em diversas aplicações para medição de carga e deformação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. Extensometria básica, 2017. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2019.
- ANFAVEA. Produção de máquinas agrícolas e rodoviárias. 2019. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 04 de Maio de 2019.
- ANSYS Inc. Ansys Workbench, version 14.5. Canonsburg: Ansys Inc., 2012. Conjunto de programas. 1 CD-ROM. 2017.
- AVNER, S.; Introducción a la metalurgia física. 2ª ed. Mc Graw Hill. Interamericana de México. D.F. México, 1988.
- BAEK, T. H.; ROWLANDS, R. E. Hybrid stress analysis of perforated composites using strain gages. *Experimental Mechanics*. vol. 41. nº 2, p. 195-203, 2001.
- BIRIS, S. et al. FEM analysis / Testing Resistance of a Tractor Seat. **Symposium “Actual Tasks on Agricultural Engineering”**, Opatija, Croácia, n. 43, p. 189-199, 2015.
- BRASIL. **Norma Regulamentadora NR 12**. Segurança no trabalho em Máquinas e Equipamentos. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-12-seguranca-no-trabalho-em-maquinas-e-equipamentos>>. Acesso em: maio de 2020.
- BRASIL. **Norma Regulamentadora NR 31**. Segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-31.pdf>. Acesso em: maio de 2020.
- COUTO, S. M. et al. Determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café pela técnica de elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 274-283, 2004.
- DEBIASI, H. **Diagnóstico dos acidentes de trabalho e das condições de segurança na operação de conjuntos tratorizados**. 2002. 290 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.
- DEBIASI, H.; SCHLOSSER, J. F.; WILLES, J. A. Work accidents involving tractor-implement systems in farms of Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p. 779-784, mai/jun, 2004.
- DREBES, L. M. et al. Typical rural work accidents: a study of records from the University Hospital Santa Maria, RS, Brazil. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**, v.13, n. 4, p. 3467-3476, 2014.
- GERHARDT, M. Uma história ambiental da modernização da agricultura: o norte do Rio Grande do Sul. **História: Debates e Tendências**, v. 16, n.1, p. 166-180, jan./jun. 2016.

GORUCU, S.; MURPHY, D.; KASSAB, C. Occupational and nonoccupational farm fatalities among youth for 2000 through 2012 in Pennsylvania. **Journal of Agromedicine**, v. 20, n. 2, p. 125-39, 2015.

HOFFMANN, Karl. An Introduction to Measurements using Strain Gages, 1^a ed, 1989.

HEALTH AND SAFETY AUTHORITY. (2015). Child tractor safety. <https://www.hsa.ie/eng/Your_Industry/Agriculture_Forestry/Young_Elderly_on_Farms/Children_on_Farms/Child_Tractor_Safety/>. Acesso em: abril de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA, 2008. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2657>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

KNOP, L. et al. Scientific use of the finite element method in Orthodontics. **Dental Press Journal of Orthodontics**, Maringá, v. 20, n. 2, p. 119-125, mar/abr, 2015.

KWON, Y.N; BANG H. The finite element method using MATLAB.CRC press, 2^a ed, 2000.

LIMA, I. O. **Espacialização dos acidentes com tratores nas regiões Brasileiras**. 2016. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

LUNES, R. F. Impacto econômico das causas externas no Brasil: um esforço de mensuração. **Revista de Saúde Pública**, v. 31, n.4, p. 38-46, 1997.

MACEDO, D. X. S. et al. Caracterização dos acidentes com máquinas agrícolas em rodovias federais no estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 1, p. 43-46, jan. 2015.

MARCELINO, M., L; MASSA, A.; F.; FLORIAN, F.; BITTENCOURT, J. L.; Aplicação da ponte de Wheatstone com extensômetros elétricos: instrumentação de um link para medições das forças de tração e compressão – Universidade de Araraquara, 2018.

MASCIA, N. T.; NICOLAS, E. A. Determination of Poisson's ratios in relation to fiber angle of a tropical wood species. **Construction & Building Materials**, v. 41, p. 691-696, 2013.

MENTES, G.; A new borehole wire extensometer with high accuracy and stability for observation of local geodynamic processes for observation of local geodynamic processes. **Review of Scientific Instruments**, v. 015109, January, 2012.

MONTEMOR, C.; VELOSO, L.; AREOSA, J. Acidentes com tratores agrícolas e florestais: aprender para prevenir Sociologia. **Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto**, v.30, n. 1, p. 119-143, 2015.

NADERI, M. et al. Assessment of Dynamic Load Equations Through Drive Wheel Slip Measurement. **American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.**, v. 3, n. 5, p. 778-784, 2008.

PATE, M. L.; GÖRÜCÜ, S. Agricultural Work-Related Fatalities to Non-Working Youth: Implications for Intervention Development. **J Agric Saf Health.**, v. 1, n. 26, p. 31-43, 2020.

PERIPOLLI, J. L. Z.; ALONÇO, S. A. dos.; POSSEBOM, G. Conformidade do espaço interno livre de tratores agrícolas e itens de segurança obrigatórios segundo as normas NBR/ISSO 4252 e NR12. **TECNO-LÓGICA**, Santa Cruz do Sul, v. 21, n. 2, p. 103-107, jul./dez. 2017.

ROZIN, D. **Conformidade do posto de operação de tratores agrícolas nacionais com normas de ergonomia e segurança.** 2004. 211 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SANDÍ, A. M.; JIMÉNEZ, A. A., Comparación de determinación de propiedades mecánicas en barras de refuerzo para concreto com extensómetro axial convencional y extensómetro láser. **Métodos y Materiales**, v.3, p. 4–20, 2013.

SANTOS, V. C. **Vibração ocupacional em trator 4x2 tda em função da pressão interna dos pneus e da superfície de rolamento.** 2016. 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SARTI, F.; SABBATINI, R.; VIAN, C. E. F. PROJETO PIB: Perspectivas do Investimento em Mecânica. **Projeto PIB.** Campinas, v.1, n. 7, p. 160, 2009.

SENAR, Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Mecanização: operação de tratores agrícolas.** 192 p. Brasília, 2017. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/177-OPERA%C3%87%C3%83O-DE-TRATORES.pdf>>. Acesso em: maio de 2020.

SCHLOSSER, J. F. et al. Caracterização dos acidentes com tratores agrícolas. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, Santa Maria, p. 977-981, nov./dez. 2002.

SILVEIRA, G. M. Os cuidados com o trator. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001.

SILVEIRA, C. A. et al. Acidente de trabalho entre trabalhadores rurais e da agropecuária identificados através de registros hospitalares. **Ciência, cuidado e saúde**, v. 4, n. 2, p. 120-128, maio/ago, 2005.

SINDHU, P.; NAIDU, M. K. Experimental and Finite Element Analysis of Seat Frame and Bonnet of a Tractor. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v.5, n. 9, p. 108-126, 2017.

TEIXEIRA, L. P. T; FREITAS, R. M. V. dos. Acidentes do Trabalho Rural no Interior Paulista. **São Paulo em Perspectiva**, n. 17, v. 2, p. 81-90, 2003.

TOUSSAINT, M.; FAUST, K.; PEEK-ASA, C.; RAMIREZ, M. Characteristics of Farm Equipment-Related Crashes Associated With Injury in Children and Adolescents on Farm Equipment. **J Rural Health**, v. 2, n. 33, p. 127-134, 2017.

THOMAS, C. A. K. **Análise de veículos para atividades agrícolas por meio do consumo de combustível e torque na tomada de potência.** 2010. 133 p. Tese (Doutorado em

Engenharia – Projeto e Fabricação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VALLADARES, D. et al. Application of Computational-Experimental Methods for Designing Optimized Semitrailer Axle Supports. **Sage Journals**, Zaragoza, Spain, v. 2, 2014.

VIAN, C. E. F. et al. Origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, n. 4, v. 51, Brasília, Oct. / Dec. 2013.

WRIGHT, S.; MARLENGA, B.; LEE, B. C. Childhood agricultural injuries: an update for Clinicians. **Curr Probl Pediatr Adolesc Health Care**, v.2, n. 43, p. 20-44, 2013.

YURDEM, H. et al. Measurement of strains induced on a three-bottom moldboard plough Under load and comparisons with finite element simulations. **Elsevier Measurement**, Turkey, v. 136, p. 594-602, 2019.