

SOFTWARE CAD 3D APLICADO AO ENSINO DE DESENHO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE SISTEMAS MECÂNICOS PARA ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DO IFSP

CAD 3D SOFTWARE APPLIED TO TEACHING OF MECHANICAL SYSTEMS DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR IFSP CONTROL AND AUTOMATION ENGINEERING

Caio Igor Gonçalves Chinelato ¹

Data de entrega dos originais à redação em: 20/09/2019
e recebido para diagramação em: 16/01/2020

Este trabalho apresenta a experiência didática do uso do software CAD 3D Autodesk Inventor® aplicado ao curso de engenharia de controle e automação do IFSP campus São Paulo, na disciplina Laboratório Integrado VIII. O objetivo foi que os alunos pudessem compreender conceitos fundamentais de desenho e análise por elementos finitos de sistemas mecânicos através do uso de um software CAD 3D. Inicialmente, os alunos realizaram exercícios didáticos para a assimilação dos conceitos fundamentais de desenho com software CAD 3D e posteriormente, utilizaram o recurso de análise por elementos finitos. Finalmente, os alunos elaboraram um projeto final, mostrando o desenho e a análise por elementos finitos de um sistema mecânico. Como resultados, serão mostrados alguns projetos desenvolvidos pelos alunos e serão discutidos o desempenho e a eficiência do aprendizado dos alunos. Pode-se perceber que a experiência didática proposta foi bastante eficaz no sentido de auxiliar os alunos a assimilarem os conceitos fundamentais de desenho e análise por elementos finitos de sistemas mecânicos com software CAD 3D.

Palavras-chave: Ensino de Engenharia. Desenho de Sistemas Mecânicos. Software CAD 3D. Análise por Elementos Finitos.

This work presents the didactic experience of using CAD 3D software Autodesk Inventor® applied to IFSP Campus São Paulo control and automation engineering course, in integrated laboratory VIII discipline. The objective was that the students could understand fundamental concepts of mechanical systems design and finite element analysis through a CAD 3D software. Initially, the students did didactic exercises for assimilation of design with CAD 3D software fundamental concepts and posteriorly, used the finite element analysis resource. Finally, the students elaborate a final project, showing the design and finite element analysis of a mechanical system. As results, will be presented some projects developed by students and the performance and efficiency of students learning will be discussed. It can be verified that the didactic experience proposed was very effective to help student's assimilation of fundamental concepts of mechanical systems design and finite element analysis with 3D CAD software.

Keywords: Teaching Engineering. Mechanical Systems Design. CAD 3D Software. Finite Element Analysis.

1 INTRODUÇÃO

Softwares CAD (Computer-Aided Design) são ferramentas gráficas de projeto essenciais para engenheiros que desenvolvem sistemas mecânicos, mecanismos e máquinas. O aumento do desempenho e redução de custo dos sistemas computacionais nos últimos anos, tornaram estes **softwares** mais acessíveis, baratos e fáceis de se utilizar (AMARAL e FILHO, 2010). Como desenho e análise de sistemas mecânicos são tópicos tratados na graduação em engenharia de controle e automação, é de extrema importância que os alunos deste curso se familiarizem com **softwares** CAD e seus recursos de análise por elementos finitos.

Existem alguns trabalhos na literatura que apresentam relatos de experiências didáticas de aplicações de **softwares** CAD e análise por elementos finitos aplicadas ao ensino de engenharia. Silva (2011) apresenta uma experiência do ensino de desenho em cursos de engenharia, mostrando a importância da utilização de diferentes recursos didáticos para promover a motivação e o incentivo dos alunos do

curso. Em Barbosa e Cheng (2007), é mostrada a aplicação de CAD **freeware** para ensino e aprendizagem de desenho em engenharia. Silva *et al* (2015) mostram a utilização do **software** CAD juntamente com recurso de análise por elementos finitos para auxiliar os alunos da disciplina de mecânica dos sólidos na realização de ensaios mecânicos de materiais, como torções e flexões. Em Mello (2017), é mostrada de forma didática a aplicação do **software** CAD **Autodesk Inventor**, utilizando ferramentas de customização, alteração de projeto e análise por elementos finitos. Neto *et al* (2007) demonstram uma aplicação simples e didática da análise por elementos finitos em treliças para obtenção de deslocamentos, esforços internos, tensões e reações de apoio para a disciplina de mecânica computacional em engenharia. Bandeira e Chivante (2006) apresentam resultados obtidos na aprendizagem de análise por elementos finitos para engenharia civil e a interdisciplinaridade com outros tópicos do curso.

Na graduação em engenharia de controle e automação do IFSP Campus São Paulo, o tópico desenho

1 - Engenharia de Controle e Automação – Instituto Federal de São Paulo – IFSP Campus São Paulo < caio.chinelato@ifsp.edu.br >.

de sistemas mecânicos é tratado nas disciplinas semestrais desenho para engenharia I e desenho para engenharia II, onde os alunos aprendem conceitos básicos de desenho técnico, como vistas, cortes, perspectivas e trabalham com *software* CAD bidimensional (2D). O tópico de análise de sistemas mecânicos é tratado nas disciplinas semestrais resistência dos materiais, mecânica geral e elementos de máquina, onde os alunos utilizam princípios fundamentais da mecânica para calcular tensões e esforços internos em mecanismos e sistemas mecânicos em geral. Posteriormente, estes tópicos são tratados conjuntamente na disciplina laboratório integrado VIII, onde os alunos trabalham com *software* CAD tridimensional (3D) para modelagem de sólidos. Com isto, podem fazer o desenho de sistemas mecânicos complexos e utilizando o recurso de análise por elementos finitos do *software*, podem verificar numericamente valores de tensões e esforços internos.

Este trabalho apresenta a experiência didática do uso do *software* CAD 3D *Autodesk Inventor*® aplicado ao curso de engenharia de controle e automação do IFSP campus São Paulo, na disciplina Laboratório Integrado VIII. O objetivo foi que os alunos pudessem compreender conceitos fundamentais de desenho e análise por elementos finitos de sistemas mecânicos através do uso de um *software* CAD 3D.

2 SOFTWARE CAD 3D

Os primeiros *softwares* CAD foram desenvolvidos no final dos anos 60 e continham entidades geométricas 2D básicas, como linhas, círculos, arcos, polígonos e etc. Os modelos continham os contornos da peça ou do mecanismo a ser projetado, além de dimensões, textos e outras informações que poderiam ser encontradas em um desenho manual (LIEU e SORBY, 2009). A grande desvantagem dos *softwares* CAD 2D é que não podiam gerar visualizações e manipular modelos 3D.

No final dos anos 80, os primeiros *softwares* CAD com modelos 3D foram desenvolvidos. Estes sistemas eram limitados ao uso de entidades como linhas, círculos e arcos e eram denominados modelos estrutura de arame (*wireframe*). Estes modelos geravam ambiguidade nas suas representações, pois não representavam a peça ou o mecanismo como um sólido (ZEID, 2005).

Com a melhoria de desempenho e redução de custos dos sistemas computacionais, técnicas de modelagem de superfícies foram desenvolvidas. A modelagem de superfícies foi uma evolução do modelo estrutura de arame. Esta modelagem descreve matematicamente e exibe as superfícies entre os contornos do modelo estrutura de arame. Este método de modelagem é também conhecido como representação de fronteira (*boundary representation*). As entidades de fronteira podem ser planos, cilindros ou outras superfícies 3D (ZEID, 2005).

Existe também a modelagem de sólidos, que é muito parecida com a modelagem de superfícies, no entanto, na modelagem de sólidos é possível distinguir entre a parte de dentro e de fora do objeto. Portanto, é possível distinguir uma caixa vazia e um tijolo, por exemplo. Esta modelagem é construída utilizando uma técnica denominada geometria sólida construtiva (*constructive solid geometry*), onde os modelos são representados por blocos de construção padrão na forma de sólidos simples, como prismas, cilindros e esferas, denominados primitivos. *Softwares* CAD baseados neste tipo de modelo permitem computar

informações da peça ou do mecanismo, tais como volume, massa, centro de massa e outras propriedades (LIEU e SORBY, 2009).

Uma modelagem ainda mais precisa e eficiente é a modelagem de sólidos baseada em *features* (*feature-based solid modeling*), desenvolvida no meio dos anos 90. Esta modelagem permite criar peças mais complexas rapidamente usando *features* padrões, como extrusões, chanfros, furos, cortes e entre outros. A modelagem mais recente que existe é a modelagem de sólidos paramétrica, que é uma forma da modelagem de sólido baseada em *features* e que permite ao projetista mudar as dimensões da peça de maneira rápida e fácil (LIEU e SORBY, 2009).

Existem diversos *softwares* CAD, tais como *AutoCAD*®, *SolidWorks*® e *Catia*®. O *software* CAD utilizado neste trabalho foi o *Autodesk Inventor*® (INVENTOR, 2019), pois disponibiliza em seu site uma versão estudantil gratuita e o IFSP Campus São Paulo possui licenças para utilização da versão 2017 do *software* em laboratório. A versão estudantil apresenta os principais recursos da versão completa disponível no laboratório, portanto muitos alunos também utilizaram a versão estudantil para estudo, treinamento e elaboração do projeto fora do laboratório. Além disso, o *software Autodesk Inventor*® já possui o recurso de análise por elementos finitos, portanto não há a necessidade da aquisição de outro *software* específico para este tipo de análise (WAGUESPACK, 2014).

É importante destacar que atualmente existem diversos *softwares* CAD em nuvem, ou seja, que podem ser executados por um navegador local ou por um aplicativo da *web* ou móvel, diferentemente do *software* CAD tradicional instalado em um computador local (AUTODESK, 2020). Como exemplos temos *Fusion 360*®, *Tinkercad*® e *Onshape*®.

3 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Análise por elementos finitos é uma técnica de análise de projetos avançada aplicada aos modelos CAD 3D e usada para o cálculo numérico de variáveis de interesse em sistemas complexos. Por exemplo, considerando um sistema mecânico simples, como uma haste circular submetida a um esforço na sua extremidade. Usando conhecimentos básicos de física e resistência dos materiais, um engenheiro pode determinar os pontos onde as tensões internas serão maiores ou menores e realizar mudanças no projeto no sentido de reduzir as tensões internas.

Infelizmente, a maioria dos sistemas mecânicos encontrados nas aplicações de engenharia são mais complexos e modelados por equações diferenciais cujas soluções analíticas são muito difíceis de serem encontradas. Portanto, a análise por elementos finitos é um método numérico para solução destas equações diferenciais, onde o objeto analisado é dividido em elementos unidos por pontos nodais e que somados constituem uma malha (CHAPRA e CANALE, 2016). O método numérico é aplicado para cada elemento da malha. O computador compila os resultados de todos os elementos da malha para então gerar o resultado final do objeto analisado. É importante destacar que, por se tratar de uma solução numérica, é um resultado aproximado. A análise de elementos finitos é tipicamente aplicada em vários problemas de engenharia, como sistemas mecânicos, fluidos, térmicos e eletromagnéticos.

A análise por elementos finitos é dividida nas seguintes etapas (LIEU e SORBY, 2009; MELLO, 2017):

- Criação do modelo geométrico: o modelo geométrico da peça ou do mecanismo analisado é desenvolvido no *software* CAD 3D;
- Aplicação das restrições: se a peça ou mecanismo analisado for submetido a uma força externa e não houver restrições, ele irá se mover no espaço. Portanto, na análise por elementos finitos é necessário que o objeto esteja fixado no espaço;
- Aplicação das cargas: após as restrições terem sido especificadas, cargas podem ser aplicadas na forma de forças, pressões e/ou torques;
- Determinação dos elementos das malhas: um ponto muito importante da análise por elementos finitos é a escolha dos elementos da malha. Em geral, quanto menor os elementos mais precisos os resultados, no entanto, a simulação se tornará mais demorada. Além disso, em regiões onde a peça ou o mecanismo analisado possui curvaturas ou onde as tensões internas variam rapidamente, o tamanho dos elementos deve ser reduzido e em regiões onde as tensões internas são relativamente estáticas e variam pouco, o tamanho dos elementos pode ser aumentado para tornar a simulação mais rápida. Felizmente, os modernos *softwares* que realizam análise por elementos finitos tornam este processo de determinação das malhas mais simples. O usuário especifica um tamanho nominal para os elementos e o *software* cria os elementos e gera ajustes em pontos com curvaturas, por exemplo. No entanto, o processo de determinação dos elementos envolve experiência e prática;
- Simulação numérica dos resultados: para o caso de análise de sistemas mecânicos, os resultados numéricos gerados pela análise por elementos finitos são tensões, deslocamentos, deformações e fator de segurança baseados nas condições de contorno aplicadas, dadas pelas restrições e cargas;
- Análise dos resultados: os resultados são mostrados numericamente e graficamente no modelo geométrico;
- Modificação do projeto: de acordo com os resultados verificados no item anterior, o projetista realiza modificações estruturais no projeto no sentido de melhorar as características mecânicas;

4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

O objetivo do trabalho foi que os alunos pudessem compreender conceitos fundamentais de desenho e análise por elementos finitos de sistemas mecânicos através do uso de um *software* CAD 3D. A metodologia foi elaborada de forma que estes objetivos fossem atingidos.

Os alunos da disciplina Laboratório Integrado VIII do curso de engenharia de controle e automação foram divididos em turmas com uma média de 12 alunos por turma e cada turma cursou a disciplina por 5 semanas tendo 6 aulas de 45 minutos em um único dia da semana. Inicialmente os alunos realizaram exercícios didáticos para a assimilação dos conceitos fundamentais de desenho com *software* CAD 3D e posteriormente, utilizaram o recurso de análise por elementos finitos. Finalmente, os alunos elaboraram um projeto final, mostrando o desenho e a análise por elementos finitos de um sistema mecânico

proposto por eles. A avaliação final dos alunos foi feita baseando-se na realização de todos os exercícios didáticos propostos e no relatório do projeto final.

4.1 Exercícios Didáticos

Nas duas primeiras semanas do curso, foram propostos exercícios didáticos onde os alunos trabalharam com arquivos do tipo peça, montagem e folha de desenho. Os arquivos do tipo peça são constituídos pela modelagem dos sólidos de partes individuais de sistemas mecânicos, como um parafuso por exemplo. Estes arquivos são os que demandam mais tempo de aprendizagem e mais exercícios, pois os alunos precisam se familiarizar com as ferramentas de esboços 2D e posteriormente com os *features* 3D. Os arquivos do tipo montagem são constituídos por conjuntos de peças que são montadas utilizando relações geométricas e restrições específicas e que quando integradas formam um sistema mecânico completo. E os arquivos do tipo folha de desenho são constituídos por folhas de desenho das peças ou das montagens. Nestas folhas de desenho é possível editar o *layout*, vistas do sistema mecânico e cotagem (WAGUESPACK, 2014).

Foram elaborados exercícios de níveis básicos e intermediários e que utilizassem o maior número possível de recursos do *software*, de forma que os alunos adquirissem experiência para o desenvolvimento do projeto final da disciplina. É importante destacar que muitos alunos tiveram acesso à versão estudantil do *software Autodesk Inventor®* disponibilizada gratuitamente, como citado na seção 2 e, portanto, também puderam estudar e praticar exercícios fora do laboratório.

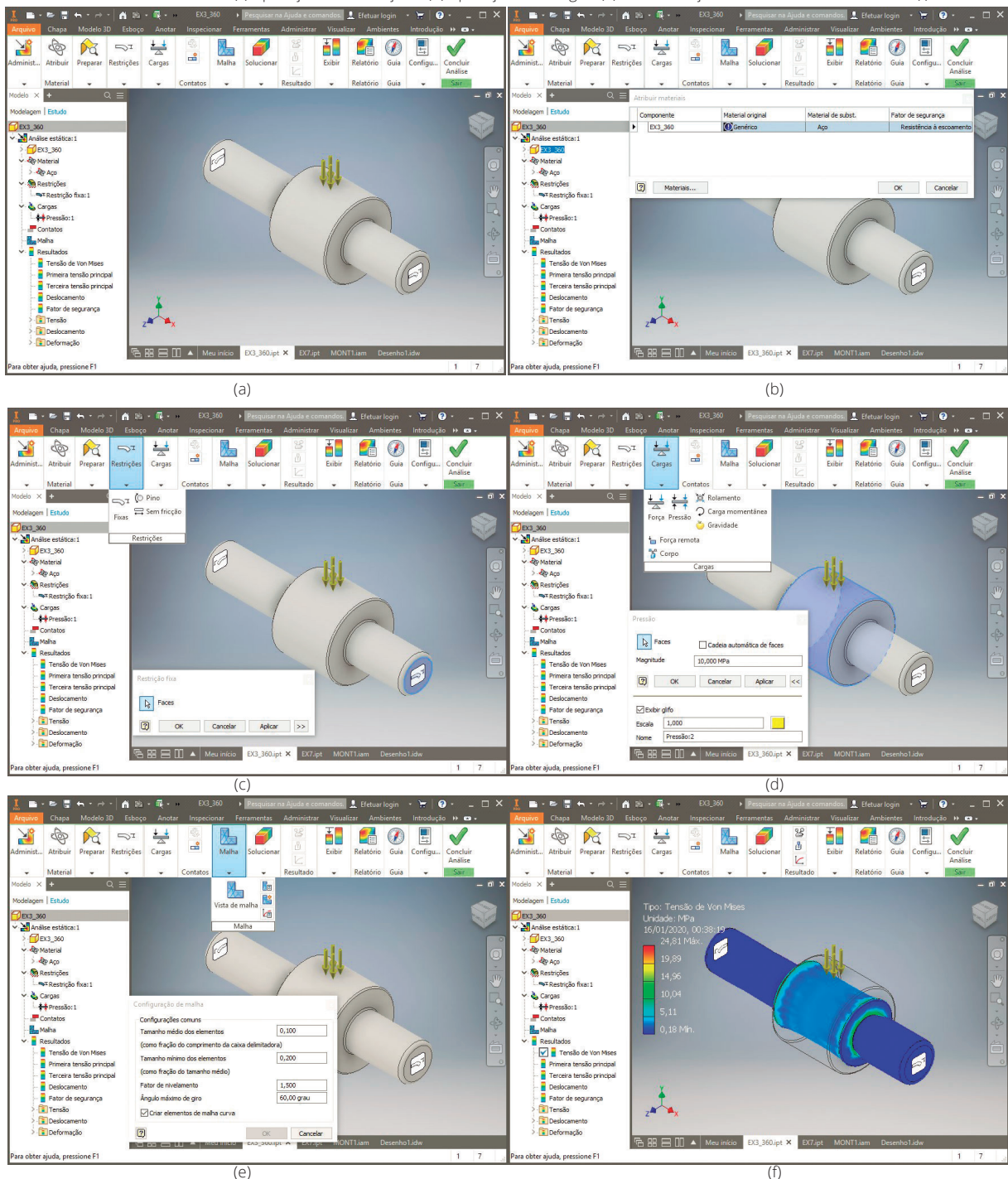
Na terceira semana do curso, os alunos trabalharam com o recurso de análise por elementos finitos do *software Autodesk Inventor®*. Basicamente, a análise é constituída pelos passos citados na seção 3, ou seja, aplicação das restrições, aplicação das cargas, determinação dos elementos das malhas, simulação numérica dos resultados e análise dos resultados. Além disso, também é possível alterar as características do material do sistema mecânico analisado. Como resultados da análise por elementos finitos são geradas todas as tensões, deformações, deslocamentos e fator de segurança do sistema mecânico analisado (HIBBELER, 2019). A análise foi feita em alguns arquivos de peças e montagens dos exercícios propostos anteriormente.

Nas Figuras 1a, 1b, 1c, 1d, 1e e 1f são mostrados os passos para a análise por elementos finitos de uma das peças propostas como exercício usando o *software Autodesk Inventor®*. Na Figura 1a é mostrada a peça analisada. Na parte superior do *software* são mostrados todos os parâmetros a serem determinados na análise por elementos finitos. Após os parâmetros terem sido determinados, eles aparecem na parte esquerda do *software*. Na Figura 1b é mostrada a escolha do material. O *software* fornece uma biblioteca com diversos materiais com características físicas pré-determinadas. No entanto, o usuário pode adicionar novos materiais não existentes na biblioteca. Na Figura 1c é mostrada a aplicação das restrições. Podem ser aplicadas restrições fixas, que restringem o movimento em todas as direções para a geometria selecionada, restrições do tipo pino que restringem o movimento para as direções radial, axial ou tangencial de acordo com as opções definidas e restrições sem atrito que previnem o movimento de uma face na direção

perpendicular à face. Na Figura 1d é mostrada a aplicação das cargas. Podem ser aplicadas forças, pressões, cargas de rolamento em faces cilíndricas, momentos, esforços gravitacionais, forças remotas em qualquer localização da peça ou carga de corpo. Na Figura 1e é mostrada a determinação dos elementos das malhas, onde os principais parâmetros numéricos das malhas são detalhados, como tamanho médio dos elementos, tamanho mínimo dos elementos, fator de nivelamento e ângulo máximo de giro. Além disso, é possível ter uma vista geral das malhas na peça analisada, ter um controle do tamanho das malhas em cada ponto da peça e determinar parâmetros de

convergência numérica. Finalmente, na Figura 1f, são mostrados os resultados. Os resultados são mostrados numericamente e graficamente através de um gráfico de cores para cada faixa de valores e são indicados os valores máximos e mínimos de cada variável analisada. As variáveis analisadas são tensão de Von Mises, primeira e terceira tensão principal, deslocamento, deformação e fator de segurança. Terminada a análise dos resultados, um relatório em formato .rtf ou .html pode ser automaticamente gerado com todos os parâmetros e resultados da análise por elementos finitos.

Figura 1 – Análise por elementos finitos de uma das peças propostas como exercício. (a) Peça analisada. (b) Escolha do material. (c) Aplicação das restrições. (d) Aplicação das cargas. (e) Determinação dos elementos das malhas. (f) Resultados



Ao término destas três primeiras semanas de curso, os alunos entregaram para o professor da disciplina todos os exercícios didáticos propostos para que pudessem ser avaliados.

4.2 Projetos Finais

Após a prática dos exercícios e assimilação dos conceitos fundamentais de desenho e análise por elementos finitos, foi proposto um projeto final. Neste projeto final, foi pedido que os alunos desenvolvessem o desenho de um sistema mecânico proposto por eles e realizassem a análise por elementos finitos do sistema. Na parte do desenho, os alunos tiveram que elaborar o arquivo de peça ou montagem do sistema mecânico juntamente com o arquivo folha de desenho. Já na análise por elementos finitos, foi proposto que os alunos avaliassem e discutissem a influência de diversos tipos de variáveis no sistema mecânico desenvolvido, como diferentes tipos de esforços, materiais e geometrias. Para isto realizaram uma quantidade significativa de simulações numéricas verificando a influência de cada uma destas variáveis no sistema mecânico desenvolvido. Finalmente, realizaram um relatório descrevendo todo o projeto final e que foi avaliado pelo professor da disciplina.

Os projetos foram desenvolvidos em duplas ou trios e nas duas últimas semanas do curso. Novamente, é importante destacar a importância de os alunos terem acesso à versão estudantil do *software Autodesk Inventor®* para que uma parte do desenvolvimento de projeto pudesse ser feita fora do laboratório.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com relação aos exercícios didáticos, pode-se observar que de forma geral os alunos conseguiram realizar todos os exercícios propostos e compreender os aspectos básicos de elaboração de arquivos do tipo peça, montagem e folha de desenho. As montagens e folhas de desenho foram realizadas pelos alunos sem nenhuma dificuldade. Algumas dificuldades foram encontradas por alguns alunos na criação das peças, devido ao maior número de

comandos e passos para a resolução do exercício. No entanto, nada que comprometesse de forma significativa o aprendizado e o desenvolvimento das aulas. As análises por elementos finitos também foram realizadas de forma eficiente. Os alunos executaram todos os passos citados na seção anterior e puderam compreender de forma geral o funcionamento do método numérico e como são feitas as análises dos resultados. Esta etapa dos exercícios foi fundamental para que os alunos adquirissem experiência para o desenvolvimento do projeto final da disciplina.

Após terem realizado todos os exercícios, os alunos desenvolveram os projetos finais. Foram propostos diversos sistemas mecânicos interessantes e muito aplicados na prática. Em todos os casos, os alunos conseguiram desenvolver os desenhos dos sistemas mecânicos e realizar as análises por elementos finitos.

A seguir serão apresentados alguns projetos desenvolvidos pelos alunos. Serão mostrados os arquivos de peças ou montagens desenvolvidos, as folhas de desenho geradas e alguns resultados simulados das análises por elementos finitos.

O primeiro projeto foi o mecanismo formado pelo pistão e pela biela de um motor de combustão interna. As peças pistão, biela e a montagem do mecanismo completo são mostrados respectivamente nas Figuras 2a, 2b e 2c. Nas Figuras 3 e 4, são mostradas as folhas de desenho do pistão e da biela respectivamente.

Figura 2 – Mecanismo formado pelo pistão e pela biela de um motor de combustão interna. (a) Peça pistão. (b) Peça biela. (c) Montagem do mecanismo completo



Figura 3 – Folha de desenho do pistão

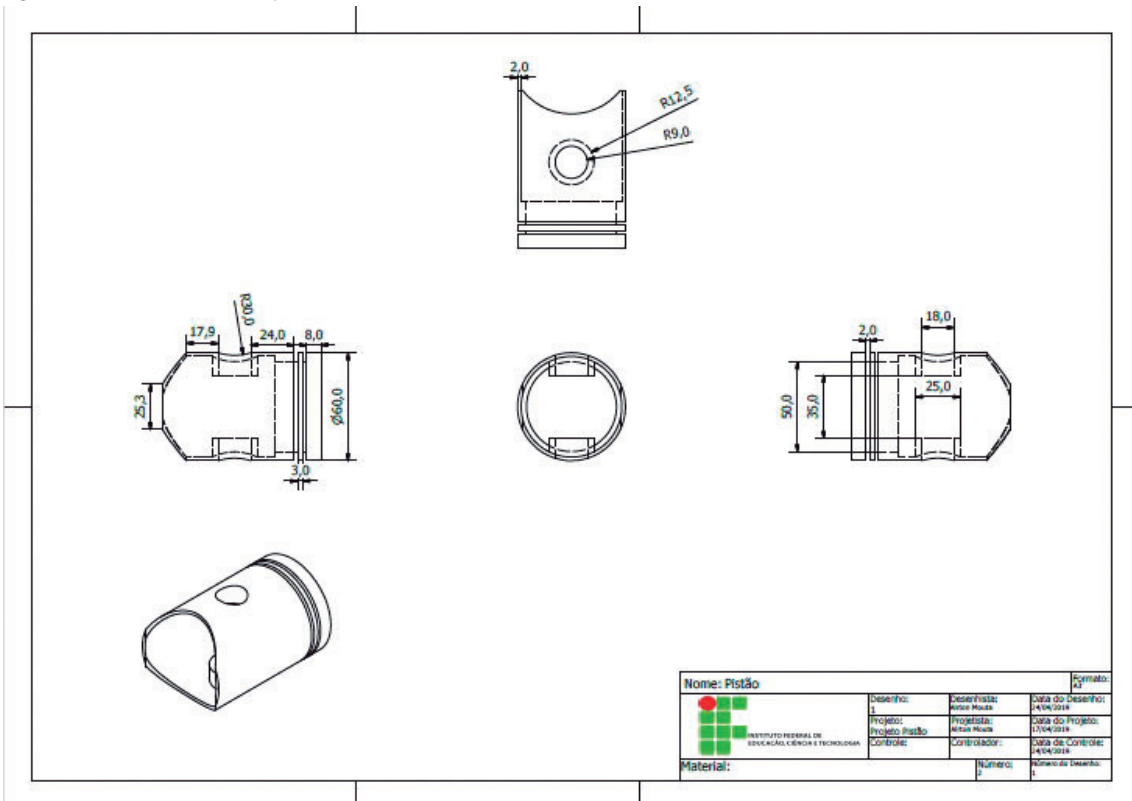
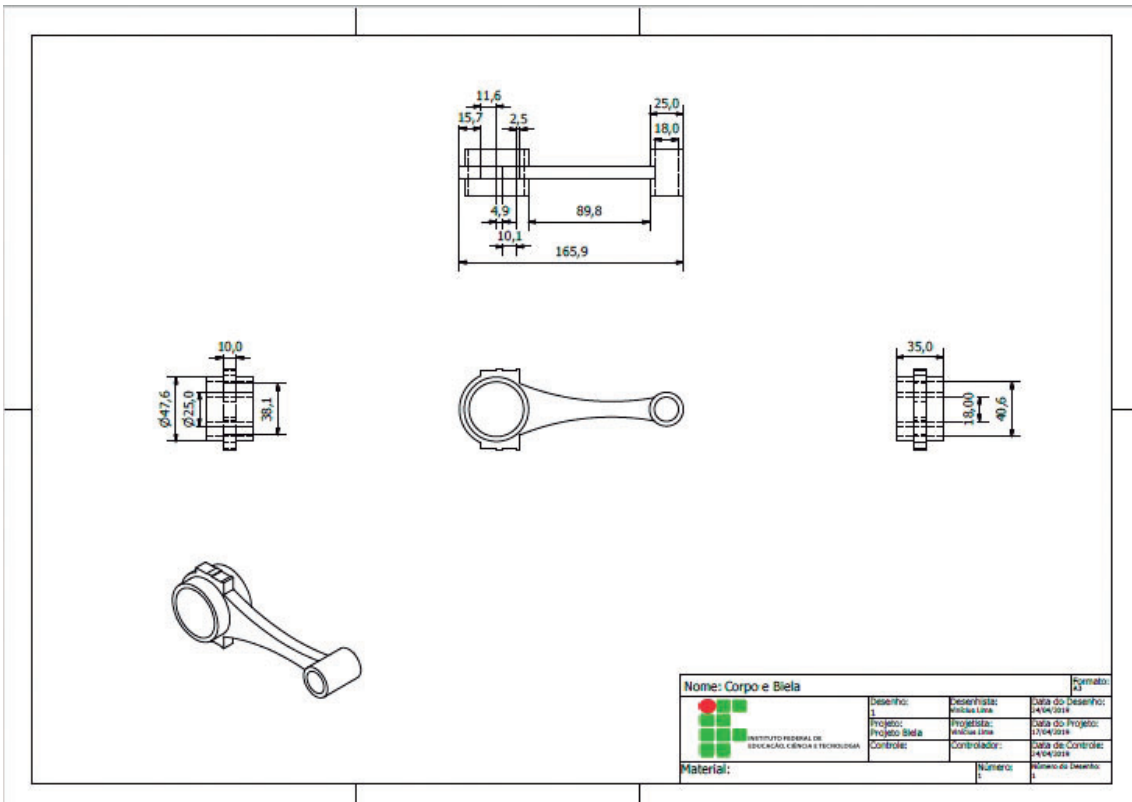


Figura 4 – Folha de desenho da biela



Posteriormente, os alunos realizaram diversas análises por elementos finitos testando diferentes tipos de materiais para o mecanismo e diferentes tipos de esforços. A análise mostrada simula o esforço que o sistema mecânico é submetido durante a explosão da mistura gás e combustível no interior do motor e considerando as peças constituídas por alumínio 6061.

Na Figura 5a é mostrada a restrição da biela fixa no virabrequim, na Figura 5b é mostrada a restrição da movimentação da biela em relação ao pistão e na Figura 5c é mostrada uma carga de 3,040 MPa aplicada no pistão devido a combustão no interior do motor. Nas Figuras 6a, 6b, 6c e 6d são mostrados os resultados da análise por elementos.

Figura 5 – Restrições e cargas aplicadas ao sistema mecânico. (a) Restrição da biela fixa no virabrequim. (b) Restrição da movimentação da biela em relação ao pistão. (c) Carga de 3,040 MPa aplicada no pistão devido a combustão no interior do motor

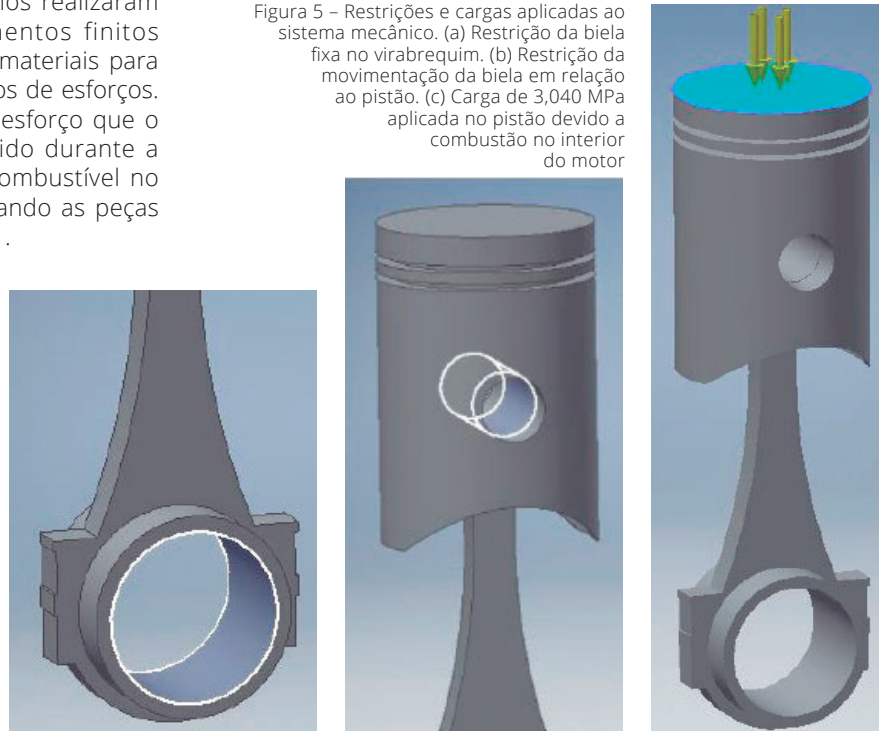


Figura 6 – Resultados da análise por elementos finitos. (a) Tensão de Von Mises. (b) Deslocamento. (c) Deformação. (d) Fator de segurança

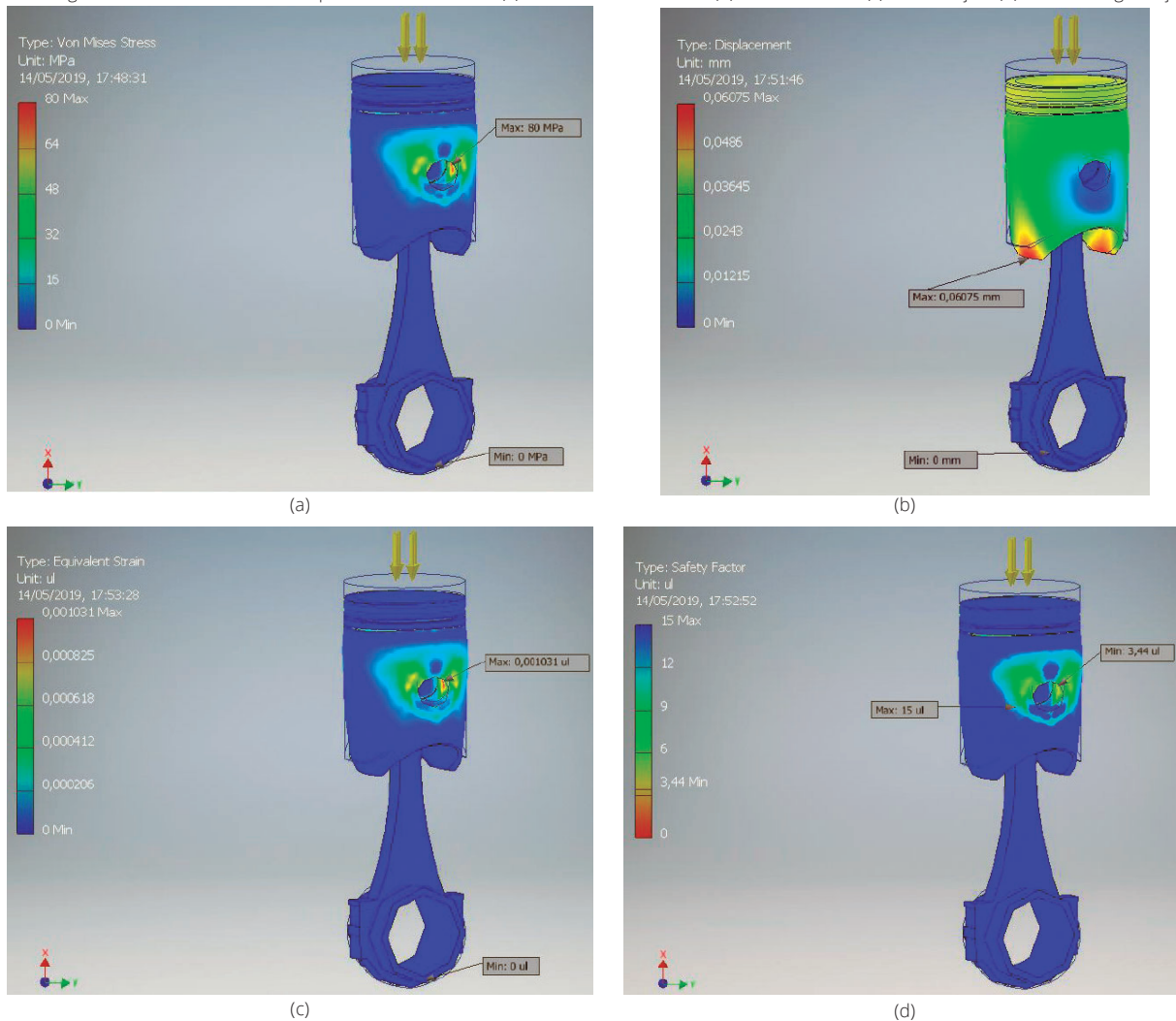


Figura 7 – Montagem da morsa

O segundo projeto foi uma morsa. A montagem da morsa é mostrada na Figura 7 e a folha de desenho é mostrada na Figura 8.

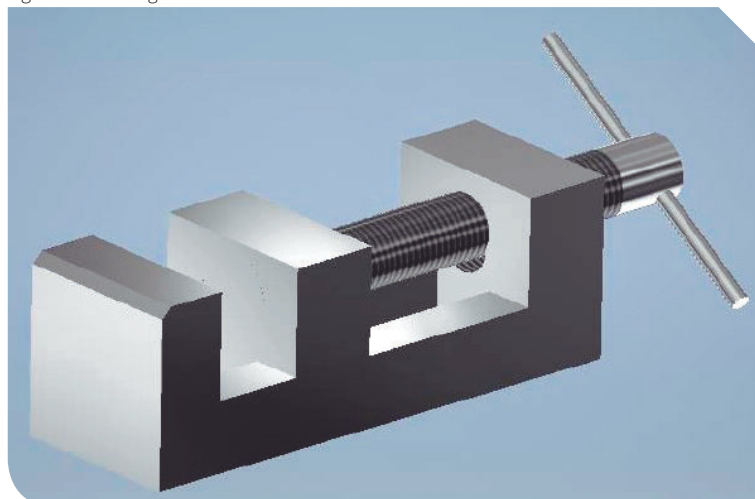
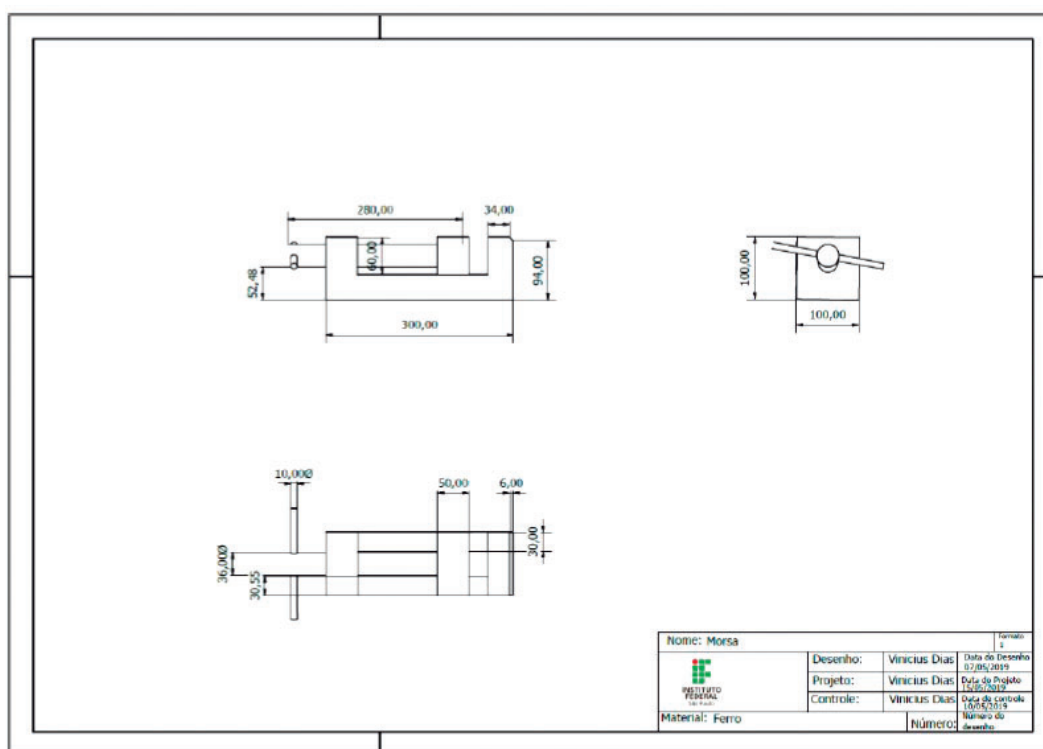


Figura 8 – Folha de desenho da morsa



Novamente foram realizadas diversas análises por elementos finitos testando diferentes tipos de materiais para o mecanismo e diferentes tipos de esforços. A análise mostrada simula o esforço de torção que a morsa é submetida quando o usuário aplica um torque de 5 N·m no seu eixo e considerando a morsa feita de aço. Na figura 9, são mostrados o esforço de torção e a restrição aplicada em uma das faces da morsa. Nas figuras 10a, 10b, 10c e 10d são mostrados os resultados da análise por elementos, assim como no projeto anterior.

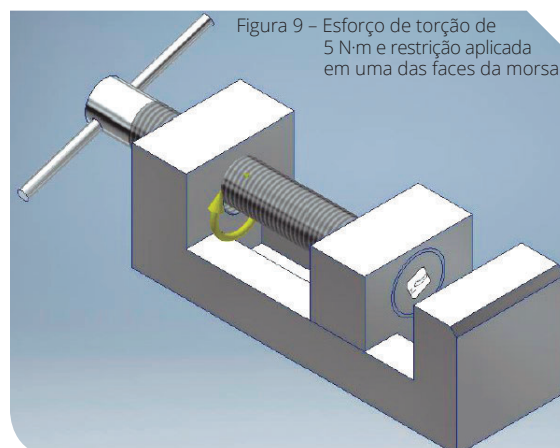
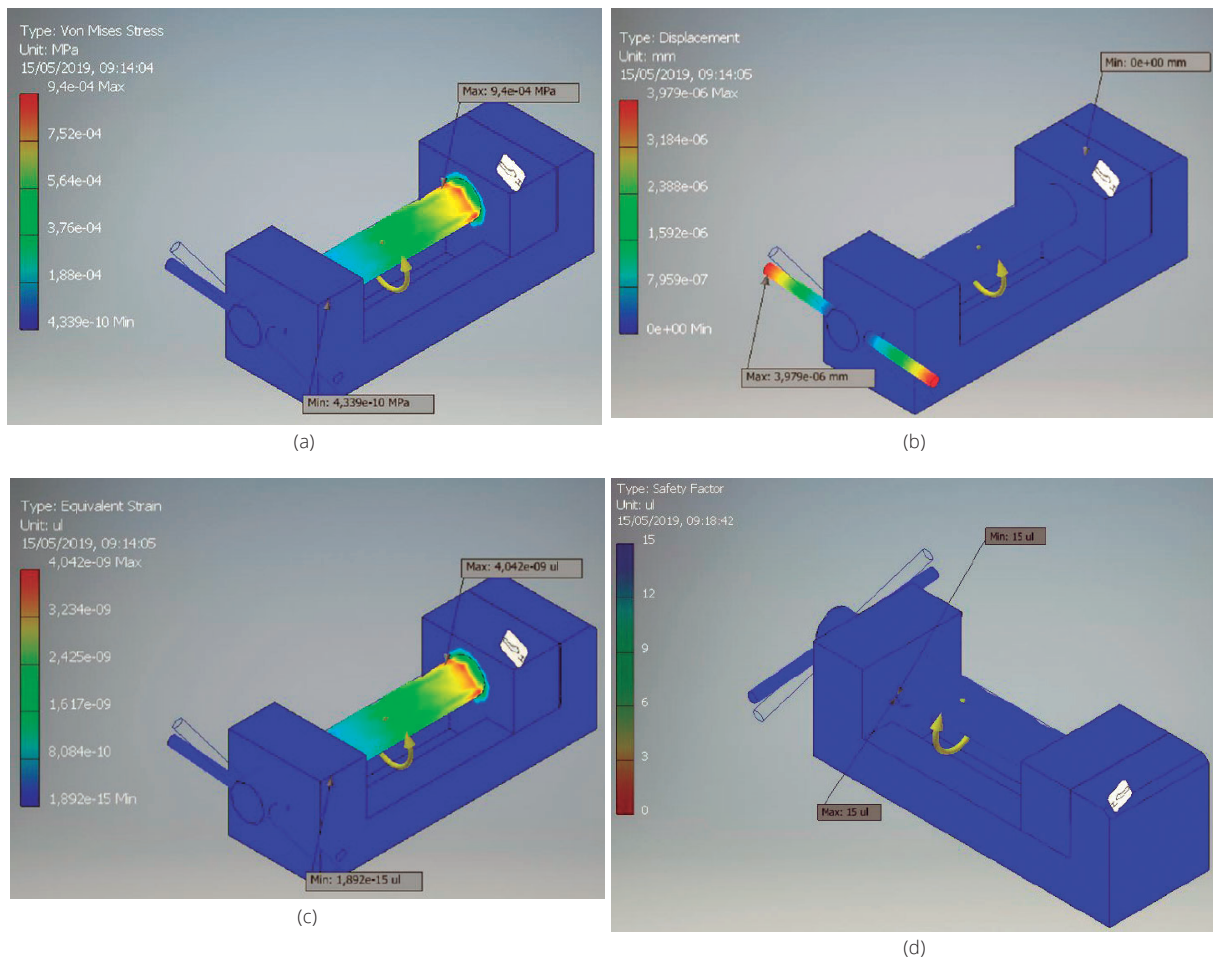


Figura 9 – Esforço de torção de 5 N·m e restrição aplicada em uma das faces da morsa

Figura 10 – Resultados da análise por elementos finitos. (a) Tensão de Von Mises. (b) Deslocamento. (c) Deformação. (d) Fator de segurança



O terceiro projeto foi uma roda automotiva. A roda automotiva é mostrada na Figura 11 e a folha de desenho é mostrada na Figura 12.



Novamente foram realizadas diversas análises por elementos finitos testando diferentes tipos de materiais para o mecanismo e diferentes tipos de esforços. A análise mostrada simula um esforço de 1,5 MPa aplicado perpendicularmente à roda e considerando a roda feita de aço. Na figura 13, são mostrados o esforço e as restrições aplicadas nos furos das rodas. Na figura 14a, 14b e 14c são mostrados os resultados da análise por elementos, assim como no projeto anterior.

Figura 13 – Esforço de 1,5 MPa aplicado perpendicularmente à roda e restrições aplicadas nos furos das rodas

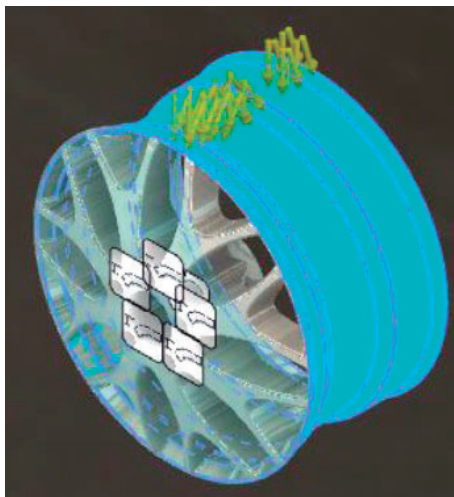


Figura 12 – Folha de desenho da roda automotiva

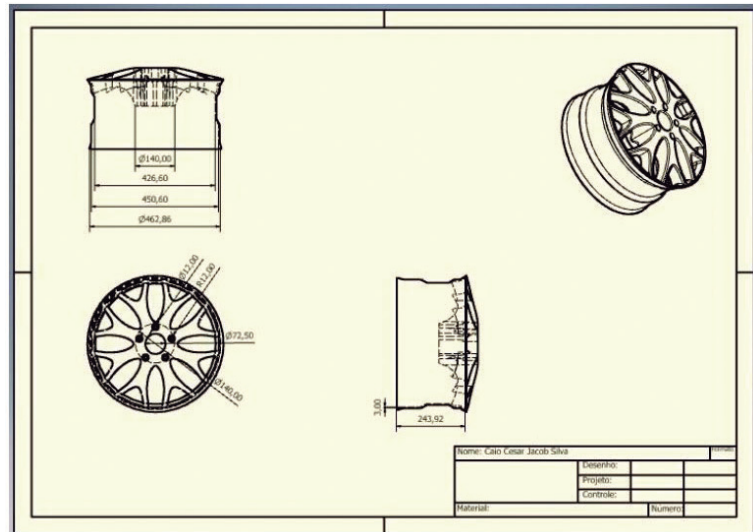
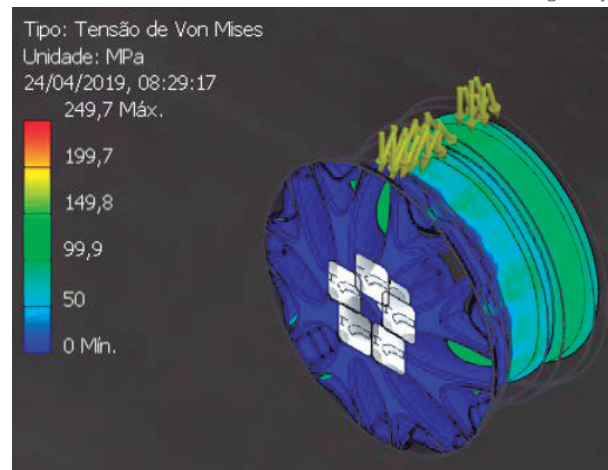
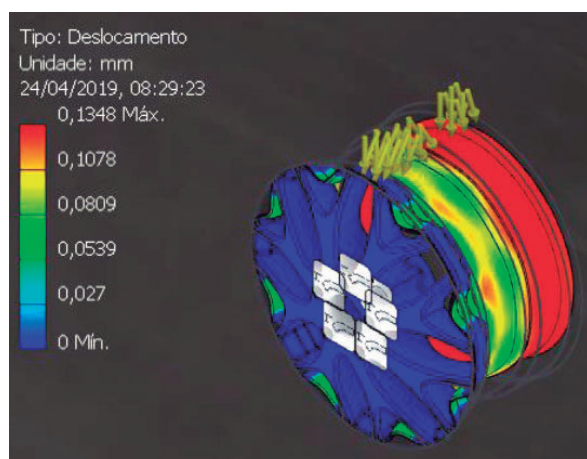


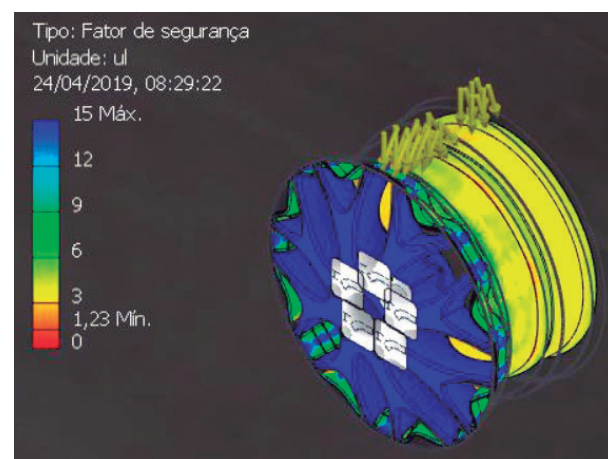
Figura 14 – Resultados da análise por elementos finitos. (a) Tensão de Von Mises. (b) Deslocamento. (c) Fator de segurança



(a)



(b)



(c)

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a experiência didática do uso do *software* CAD 3D *Autodesk Inventor®* aplicado ao curso de engenharia de controle e automação do IFSP campus São Paulo, na disciplina Laboratório Integrado

VIII. Após a realização dos exercícios didáticos e dos projetos, pode-se observar que os alunos conseguiram compreender conceitos fundamentais de desenho e análise por elementos finitos de sistemas mecânicos através do uso de um *software* CAD 3D.

Com relação aos exercícios didáticos, pode-se observar que de forma geral os alunos conseguiram realizar todos os exercícios propostos, compreender os aspectos básicos de elaboração de arquivos do tipo peça, montagem e folha de desenho e realizar as análises por elementos finitos. É importante destacar que a escolha de exercícios de nível básico e intermediário e que utilizaram uma grande variedade de recursos do *software* foi muito importante para acelerar o processo de aprendizado dos alunos. Exercícios avançados demorariam muito para serem realizados e exercícios que utilizam poucos recursos do *software* não permitiriam que os alunos explorassem o *software* com mais profundidade.

Com relação aos projetos finais, pode-se observar que os alunos desenvolveram sistemas mecânicos interessantes e com muita aplicação prática. Em todos os casos, os alunos conseguiram desenvolver os desenhos dos sistemas mecânicos e realizar as análises por elementos finitos. Um aspecto muito importante é que muitos alunos relataram que o projeto foi uma ferramenta de complementação essencial no aprendizado, pois só com os exercícios didáticos os alunos ainda tiveram algumas dúvidas e questionamentos e que foram esclarecidos durante o desenvolvimento do projeto.

Finalmente é importante destacar a importância da aplicação do *software* CAD 3D e da análise por elementos finitos como complementação didática às disciplinas que tratam de desenho técnico e análise de sistemas mecânicos.

7 AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao IFSP Campus São Paulo pelo apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

AMARAL, R. D. C., FILHO, A. C. P. A evolução do CAD e sua aplicação em projetos de engenharia. In: IX Simpósio de Mecânica Computacional (SIMMEC), São João Del Rei, MG, 2010.

AUTODESK. Software CAD online e CAD em nuvem. Disponível em: < <https://www.autodesk.com.br/solutions/cloud-based-online-cad-software>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

BANDEIRA, A. A., CHIVANTE, M. R. P. A interdisciplinaridade do ensino de elementos finitos no curso de engenharia

civil: aprendizagem e aspectos pedagógicos utilizando a ferramenta computacional ANSYS. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), Passo Fundo, RS, 2006.

BARBOSA, C. C., CHENG, L. Y. Uso de CAD freeware no ensino de engenharia. In: VII International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design (GRAPHICA), Curitiba, PR, 2007.

CHAPRA, S. C., CANALE, R. P. Numerical methods for engineers. New York: McGraw-Hill, 2016.

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. Pearson, 2019.

INVENTOR. Autodesk Inventor. Disponível em: < <https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>>. Acesso em: 17 set. 2019.

LIEU, D. K., SORBY, S. Visualization, modeling and graphics for engineering design. New York: Delmar Cengage Learning, 2009.

MELLO, V. S. Utilização das ferramentas iLogic e iPart do Autodesk Inventor na confecção de conjuntos mecânicos. Guaratinguetá, SP, 2017. Trabalho de graduação.

NETO, G. C. S., LOPES, R. C., LOPES, A. P. O método dos elementos finitos em treliças planas na disciplina de mecânica computacional. In: XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), Curitiba, PR, 2007.

SILVA, E. C. Ensino do desenho nos cursos de engenharia e design. In: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), Blumenau, SC, 2011.

SILVA, J. R. S., MÉNDEZ, C. A. C., JUNIOR, H. M. T., SANTOS, M. D., RODRÍGUEZ, A. S. M. Projeto e análise dos resultados em elementos finitos de equipamentos didáticos para disciplina mecânica dos sólidos. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC), Fortaleza, CE, 2015.

WAGUESPACK, C. Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014. Sybex, 2014.

ZEID, I. Mastering CAD/CAM. New York: McGraw-Hill, 2005.