



Uso da Tecnologia *Computer Aided Engineering (Cae)* como Ferramenta de Auxílio no Ensino de Engenharia De Materiais

Felipe Camargo Brito Matias^a, Marco Antônio Pereira do Rosário^b, Belmira Benedita de Lima Kuhn^c, Renata Nunes Oliveira^d, Antonio Renato Bigansolli^e

ARTICLE INFO

Recebido: 18 de enero de 2024

Aceito: 27 de abril de 2024

Disponível on-line: 30 de mayo de 2024

Palavras chave: Tecnologia CAE. Mecânica dos materiais. Tecnologias computacionais.

E-mail: ^afelipecbm03@hotmail.com

^brosario-marco@bol.com.br

^cbelmira@ufrj.br

^dnunes@ufrj.br

^ebigansolli@ufrj.br

ISSN 2007-9842

© 2014 All rights reserved

ABSTRACT

The present work is a study of solid mechanics applied to the Materials' Engineering teaching process. The Computer Aided Engineering (CAE) tool helps Physicists and Engineers to teach different contents of Materials Engineering. The physical concepts of Materials' mechanics, such as, stresses and strains, mechanical analysis, safety coefficients, failure criteria and computational tech, are encompassed for the Engineering teaching. Computer simulations were performed based on 3D models of dog-bone samples. Quantitative and qualitative data were obtained by this technique when comparison between experimental and theoretical/computational data was possible. Results have shown that CAE tool can help predictions related to different engineering projects. The CAE results were adequate, as expected, revealing that this is a valuable tool to engineering projects that accomplish Teaching, Research and Development.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a importância da mecânica dos sólidos e da tecnologia de Engenharia auxiliada pelo uso da tecnologia *Computer Aided Engineering (CAE)* envolvendo o ensino para a atuação de físicos e engenheiros. A partir dos estudos realizados o trabalho abordou princípios físicos da mecânica de materiais, onde levando em consideração os conceitos de tensões e deformações; propriedades dos materiais; ensaios mecânicos; coeficiente de segurança e critérios de falhas; tecnologias computacionais para o ensino de engenharia. Simulações computacionais foram realizadas levando em consideração modelos tridimensionais de corpos de prova. Obteve-se com as simulações dados qualitativos e quantitativos para as referidas técnicas, visando comparar resultados analíticos com os obtidos computacionalmente. Os resultados evidenciaram que a tecnologia CAE pode auxiliar na execução de diversos projetos para o ensino de engenharia. Os resultados obtidos foram satisfatórios e dentro do esperado, evidenciando assim que a tecnologia computacional é uma ferramenta importante nos processos mais modernos que englobam ensino, pesquisa e desenvolvimento.

I. INTRODUÇÃO

Quando um corpo está submetido a um estado múltiplo de tensões, as análises de falhas ficam mais difíceis de serem realizadas, sendo em algumas vezes, quase impossível de se obter resultados confiáveis. O critério de falhas são métodos utilizados para avaliar o comportamento de estruturas variadas quando estas sofrem tensões multiaxiais (duas ou três direções). Esses critérios se baseiam em parâmetros pré-estabelecidos que indicam os esforços sofridos, bem como as propriedades dos materiais, para em seguida, dar uma resposta sobre o comportamento da estrutura em determinadas condições. Para os cálculos, são considerados fatores como o uso do material e características tais como ductilidade e fragilidade. Alguns dos critérios de falhas mais comuns são: *von Mises*; *Rankine*; *Mohr*; *Treska*. O critério

de falha segundo os níveis das tensões de *von Mises*, também conhecido como critério da máxima energia de distorção, é um dos mais utilizados, pois seus resultados teóricos são os mais condizentes com os resultados experimentais (BEER, 1995).

Através do uso de *CAD (Computer Aided Design)* é possível explorar todas as partes de um projeto, visando otimizar o tempo, reduzir custos e automatizar processos. Dentre os softwares disponíveis no mercado, podem-se citar alguns tais como: *Solidworks CAD; Catia; AutoCAD 2D e 3D; Inventor; Fusion 360; SolidEdge*; entre outros (BUCCIARELLI, 2003; NAVEIRO, 2011).

A simulação computacional utilizando a tecnologia *CAE (Computer Aided Engineering)* possibilita a realização de testes em estruturas e componentes, visando alertar para problemas ou falhas que poderão aparecer futuramente. Esses testes envolvem análises estáticas, dinâmicas, térmicas, de fluidos, de impactos, dentre outras, com a finalidade de verificar o comportamento dos corpos através de parâmetros de entrada pré-estabelecidos. A maioria destes parâmetros usados para a simulação são baseados nas condições do ambiente e nas várias interações que o modelo poderá sofrer durante o seu uso. Dentre os softwares disponíveis, podem-se citar: *Solidworks Simulation; Solidworks Flow Simulation; Fusion 360; Comsol Multiphysics*; entre outros (BUCCIARELLI, 2003; NAVEIRO, 2011).

Os softwares escolhidos para as simulações neste trabalho foram o *Solidworks Premium 2020* e o *Fusion 360*. Com eles foram possíveis a criação de modelos tridimensionais de corpos de prova usando a tecnologia *CAD*, para em seguida, realizar as simulações usando a tecnologia *CAE*. (BUCCIARELLI, 2003; NAVEIRO, 2011).

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Os softwares utilizados foram licenciados na versão para estudante (*Software Solidworks CAD e Solidworks Simulation na versão Premium 2020 para testes; Software Fusion 360 (CAD e CAE) na versão 2.0.6670*). As simulações computacionais usando a tecnologia *CAE* foram feitas utilizando a computação em nuvem.

Primeiramente, foi criado um modelo tridimensional de uma barra prismática usando o sistema *CAD*. As dimensões foram de 25,4 mm x 25,4 mm x 300 mm. Acionando o modo de simulação *CAE*, escolheu-se como material uma Liga de Aço e o esforço aplicado foi o de tração. A carga de força aplicada foi de 100.000 N, atuando numa face de área de seção reta igual 645,16 mm². A outra extremidade foi utilizada para criação dos pontos de fixação. A análise realizada foi em condição estática, com a criação de malha sólida fina para uma maior precisão nos resultados. Esse procedimento foi realizado nos dois softwares, *Solidworks (CAD e CAE)* e *Fusion 360*.

Dentre os dados encontrados, foi possível a plotagem de modelos tridimensionais dos corpos após os esforços sofridos, com indicação das escalas de distorção oferecidas pelos softwares, bem como indicação de cores para os níveis das tensões de *von Mises*, deformação específica, deformação total e fator de segurança (FOS). Os resultados obtidos computacionalmente foram comparados com os cálculos analíticos.

Num segundo momento, usando somente o *Solidworks*, foi criado um modelo de chapa usando a tecnologia *CAD* a fim de simular um erro de dimensionamento de projeto com excesso de carga. As medidas escolhidas foram de 10 mm x 300 mm x 1.000 mm. Em seguida, acionando o modo *CAE*, aplicou-se como material o Ferro dúctil com um esforço distribuído causando flexão. A carga inicialmente escolhida foi de 10.000 N, com fixação em duas faces. A análise foi feita em condição estática, também com criação de malha sólida fina.

Obteve-se a plotagem do modelo tridimensional já distorcido, com indicação de cores para os níveis das tensões de *von Mises*, deformação total e fator de segurança (FOS).

Para simular um erro de dimensionamento, elevou-se a carga para 70.000 N. O software indicou possíveis falhas no projeto, oferecendo sugestões de aprimoramento ao acionar-se o consultor de resultados. Dentre as indicações dadas, constou-se um fator de segurança menor que 1 e atuação das tensões no limite de escoamento do material.

Seguindo uma das sugestões, optou-se por aumentar as dimensões do material. A nova espessura escolhida foi de 15 mm. As simulações foram refeitas e todas as plotagens foram obtidas novamente. Observou-se a diminuição nas

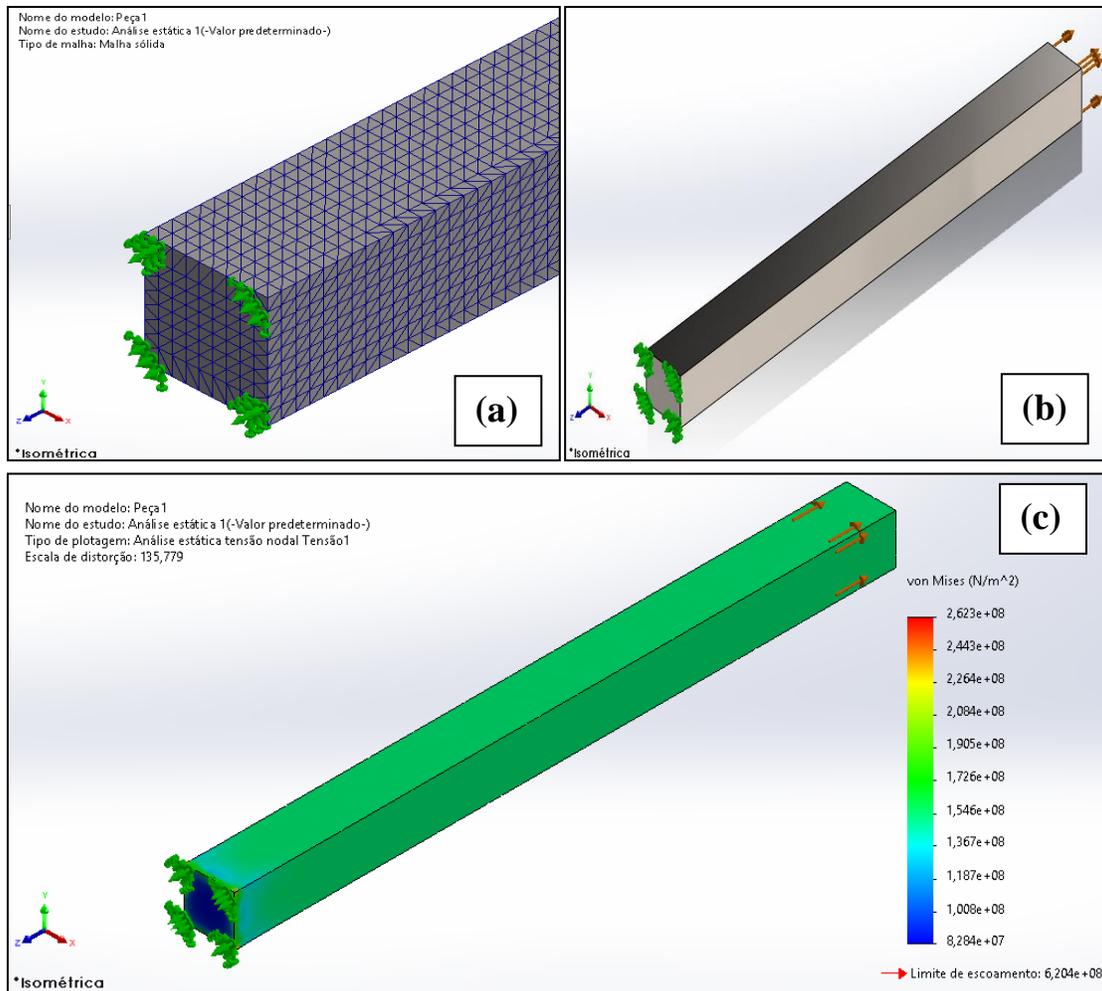
tensões atuantes, ficando abaixo do limite de escoamento, bem como um aumento no fator de segurança, possuindo agora um valor superior a 1.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

III.1 Esforços trativos

Para a primeira simulação, com esforço de tração em barra prismática, os cálculos analíticos foram, se barra quadrada de lado $l = 25,4 \text{ mm}$, $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{100.000}{645,16} \cong 155,00 \text{ MPa}$; logo, considerando um módulo de elasticidade $E = 210 \text{ GPa}$ para Aço: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{155 \text{ MPa}}{210 \text{ GPa}} \cong 0,000738 \text{ mm/mm}$. Assim, a deformação total (Δl) é $\Delta l = \varepsilon \cdot l_0 = 0,000738 \cdot 300 \cong 0,221 \text{ mm}$. Considerando um limite de escoamento $\sigma_e = 620,42 \text{ MPa}$ para o Aço, o coeficiente de segurança (N) seria $N = \frac{\sigma_e}{\sigma_{adm}} = \frac{620,42 \text{ MPa}}{155,00 \text{ MPa}} \cong 4,00$.

A seguir, estão demonstradas as plotagens realizadas que vão desde o modelo CAD tridimensional até as simulações feitas usando a tecnologia CAE. Para a primeira simulação, com barra prismática sofrendo esforço de tração, tem-se a Figura 1, com os resultados no *Solidworks*. Os resultados mostrados na Figura 2 são aqueles obtidos no *Fusion 360*.



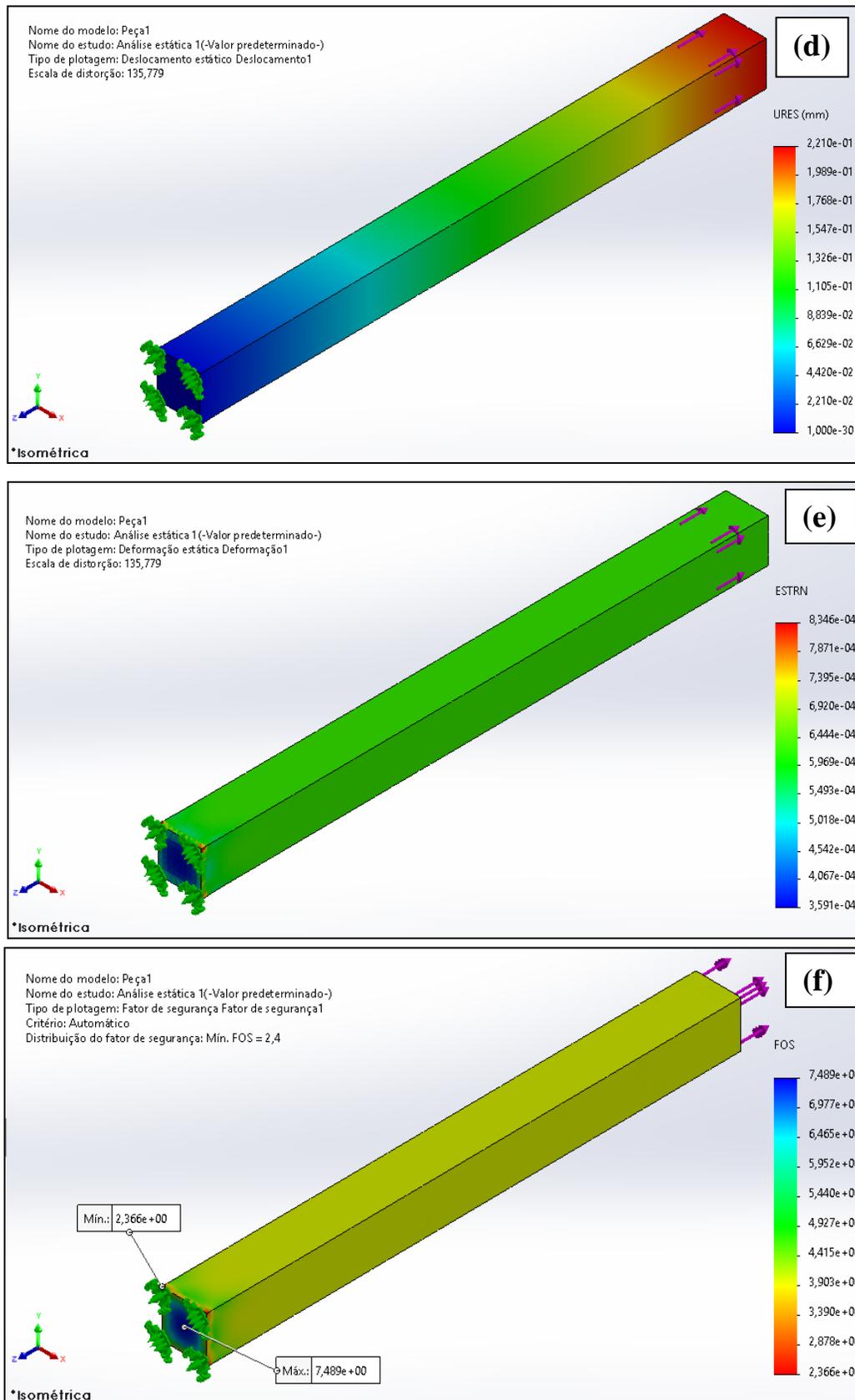


FIGURA 1. (a) Barra de aço fixada sofrendo esforço de tração, (b) Plotagem da malha sólida com qualidade fina, (c) Plotagem dos níveis das tensões de *von Mises*, (d) Plotagem da deformação total, (e) Plotagem da deformação específica; (f) Plotagem do Fator de Segurança.

A figura 1(a) mostra o modelo tridimensional em CAD. Na parte do canto esquerdo inferior, foram colocadas conexões para fixação. Na parte superior direita é possível observar pela representação das setas a força de tração atuante. Essa simulação foi realizada em condição estática. Na figura 1(b) tem-se o modelo de malha sólida com qualidade fina criada, dividida em elementos tetraédricos.

Quanto mais fina a malha, mais elementos são criados e mais precisos são os resultados. Essas simulações realizadas pelos softwares utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é um método de resolução de equações diferenciais após uma subdivisão do modelo em pequenos elementos conectados por nós. Cada nó, ou nodo, une dois ou mais elementos e o conjunto de elementos unidos por nós gera toda a malha do modelo tridimensional. Essa subdivisão em pequenos elementos facilita a realização dos cálculos e o resultado global no corpo é dado por meio da união de todos os cálculos realizados localmente. Após o modelo sofrer o esforço, é possível notar uma distribuição das tensões, como mostra a figura 1(c).

Na figura 1(c) é possível notar que a distribuição das tensões está conforme o resultado da tensão média atuante calculada, $\sigma = 155,00$ MPa. Essa faixa de tensão encontra-se na cor verde na escala de tensões, demonstrando que o corpo como um todo tem esse valor médio de tensão aplicado. Observa-se que as tensões atuantes estão bem abaixo do limite de escoamento $\sigma_e = 620,42$ MPa do material.

A figura 1(d) demonstra a deformação total sofrida pelo corpo após o esforço aplicado. É possível notar que a deformação total do corpo é de 0,221 mm, resultado que está em conformidade com o calculado. O modelo como um todo sofre um alongamento, onde na faixa vermelha é apresentado o resultado global de toda a deformação sofrida do modelo tridimensional.

A figura 1(e) indica a deformação específica sofrida pelo modelo tridimensional após aplicação do esforço. Essa plotagem indica a deformação ao longo de toda estrutura do corpo, ou seja, quanto ele deforma por unidade de comprimento. A deformação específica calculada foi $\epsilon \cong 0,000738$ mm/mm. Esse valor indica que para cada milímetro da sua extensão longitudinal, o esforço de tração faz o corpo aumentar seu tamanho em 0,000738 mm.

A figura 1(f) representa a plotagem dos valores para o coeficiente de segurança (FOS) do modelo após o esforço aplicado. Pelo cálculo, o coeficiente de segurança seria $N \cong 4,00$. A plotagem da figura 1(f) indica uma distribuição praticamente uniforme na região próxima a esse valor. Os valores máximos e mínimos para o coeficiente de segurança indicam os pontos onde há os menores e maiores valores, respectivamente, para as tensões atuantes no corpo. Mesmo considerando o valor mínimo para N observado na plotagem, o modelo em análise apresenta com segurança uma capacidade de resistir ao esforço aplicado, já que atende o requisito para $N > 1$.

A figura 2 é plotada após realizar o mesmo procedimento no software Fusion 360. Observa-se na Figura 2(a) que há uma distribuição praticamente uniforme ao longo de todo o modelo, onde as tensões médias se concentraram num valor $\sigma = 155,00$ MPa. Assim como calculado e na Figura 2(b), é possível notar que o valor para deformação total é de 0,221 mm. O valor de 0 mm na região azul indica um não deslocamento da face de fixação e a região vermelha apresenta a faixa de maior deformação do modelo. A figura 2(c) representa os valores para o coeficiente de segurança, que assim como calculado e obtido no resultado da figura 2(c), possui um valor $N \cong 4,00$ praticamente uniforme ao longo de toda extensão do modelo. Esse valor se encontra na região verde da escala, indicando que o modelo como um todo, mesmo considerando o valor mínimo para o coeficiente de segurança, é capaz de suportar os esforços aplicados com segurança. Estes resultados estão em conformidade com os obtidos nas simulações do *Solidworks Simulation*.

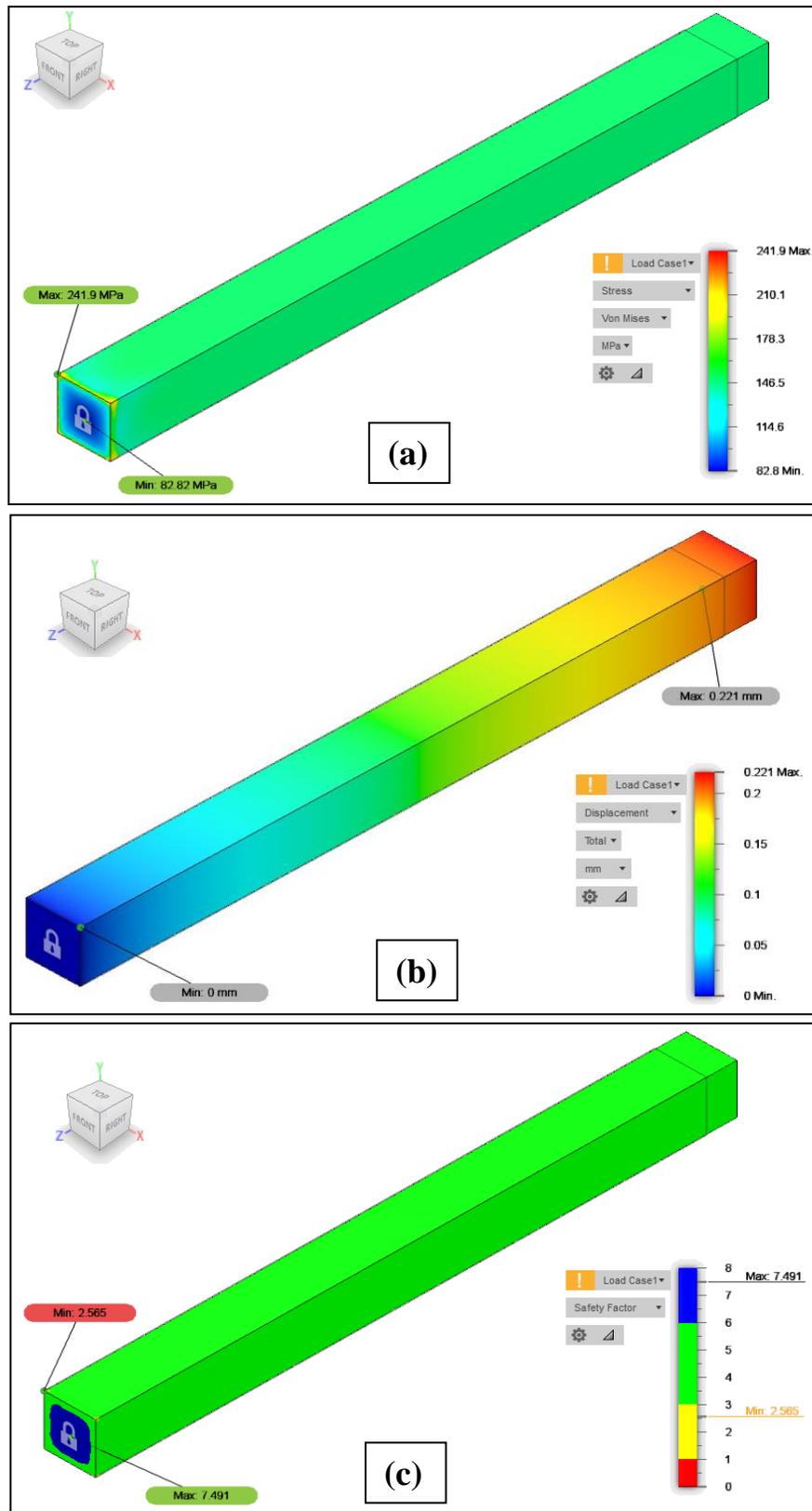
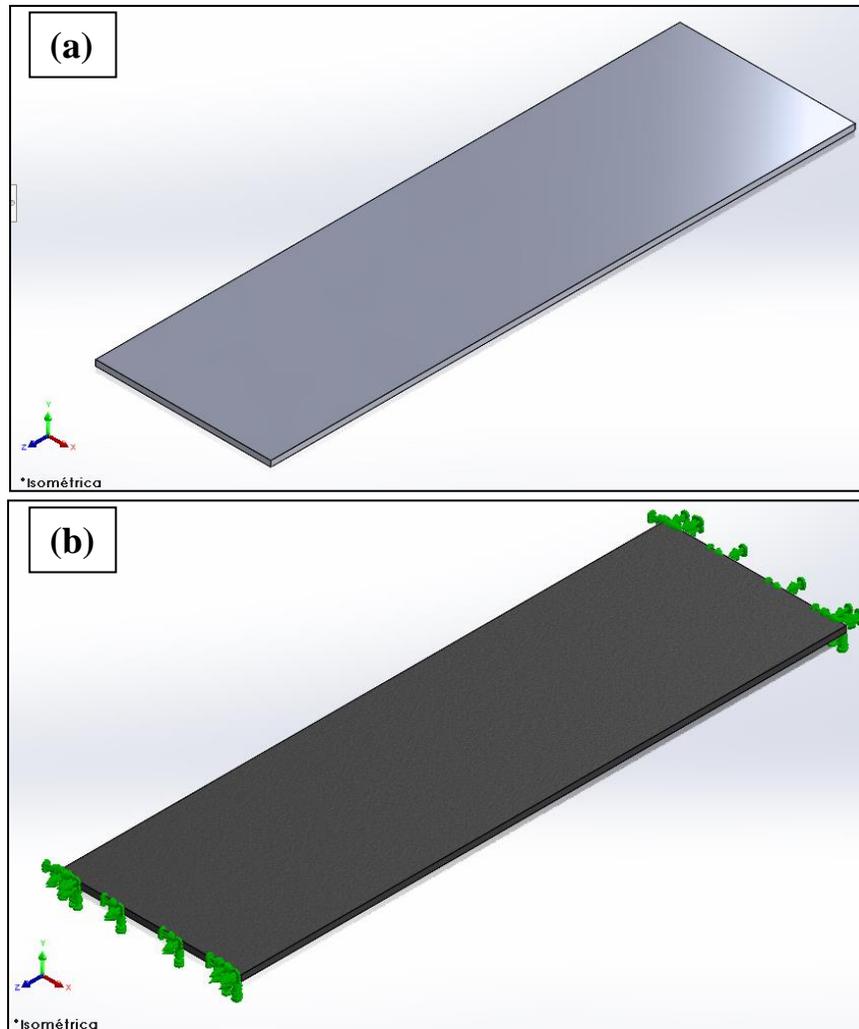


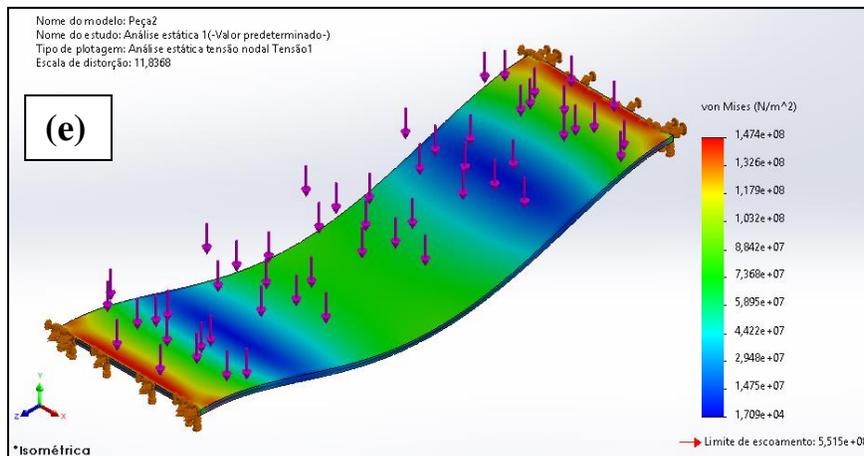
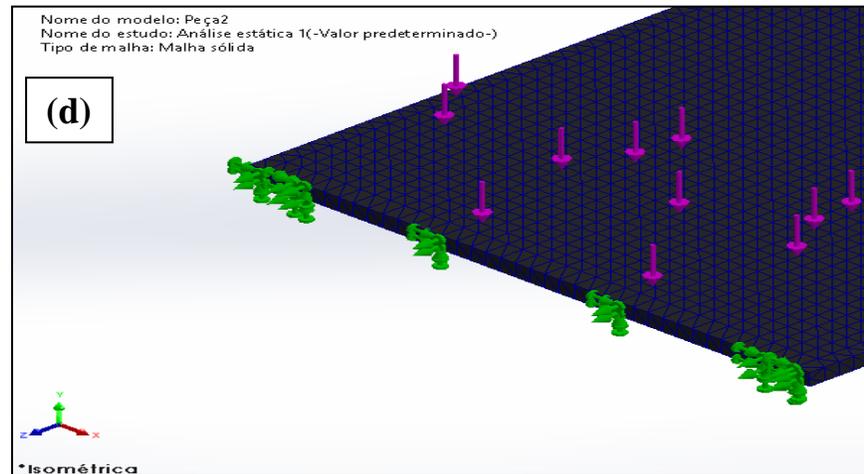
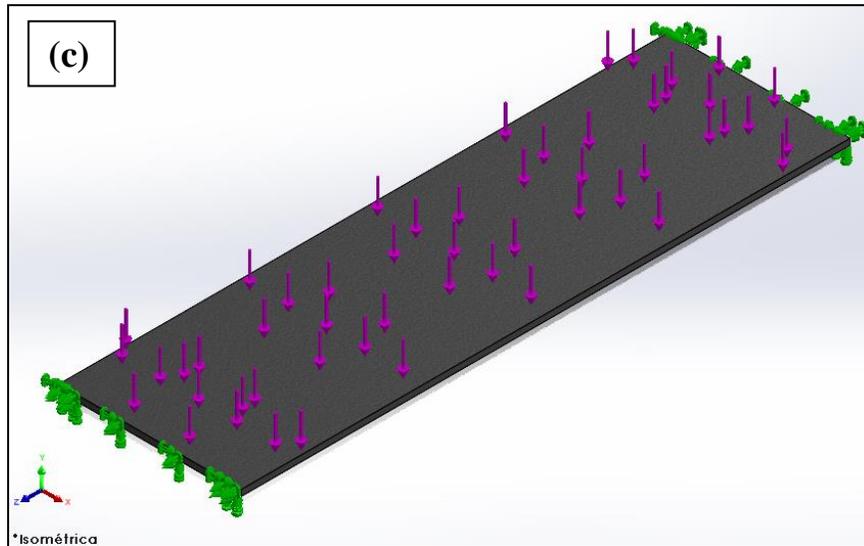
Figura 2. (a) plotagem das tensões atuantes após o esforço aplicado, (b) plotagem da deformação total do modelo, que indica a variação total do comprimento após o esforço de tração ser aplicado, (c) Plotagem do Fator de Segurança.

III.2 Esforços fletores

Para segunda situação, simulando um erro de dimensionamento, foi criado o modelo de chapa metálica sofrendo esforço de flexão, obtendo-se como resultados a Figura 3. A figura 3(a) representa a plotagem do modelo tridimensional da chapa metálica em perspectiva isométrica. As medidas utilizadas foram 10 mm de espessura, 300 mm de largura e 1.000 mm de comprimento.

Após a criação do modelo tridimensional em *CAD*, foi acionado o modo para simulação computacional *CAE*, escolhendo-se os pontos para fixação nas extremidades da chapa. O material adicionado foi o Ferro Dúctil, com limite de escoamento $\sigma_e = 551,48$ MPa.





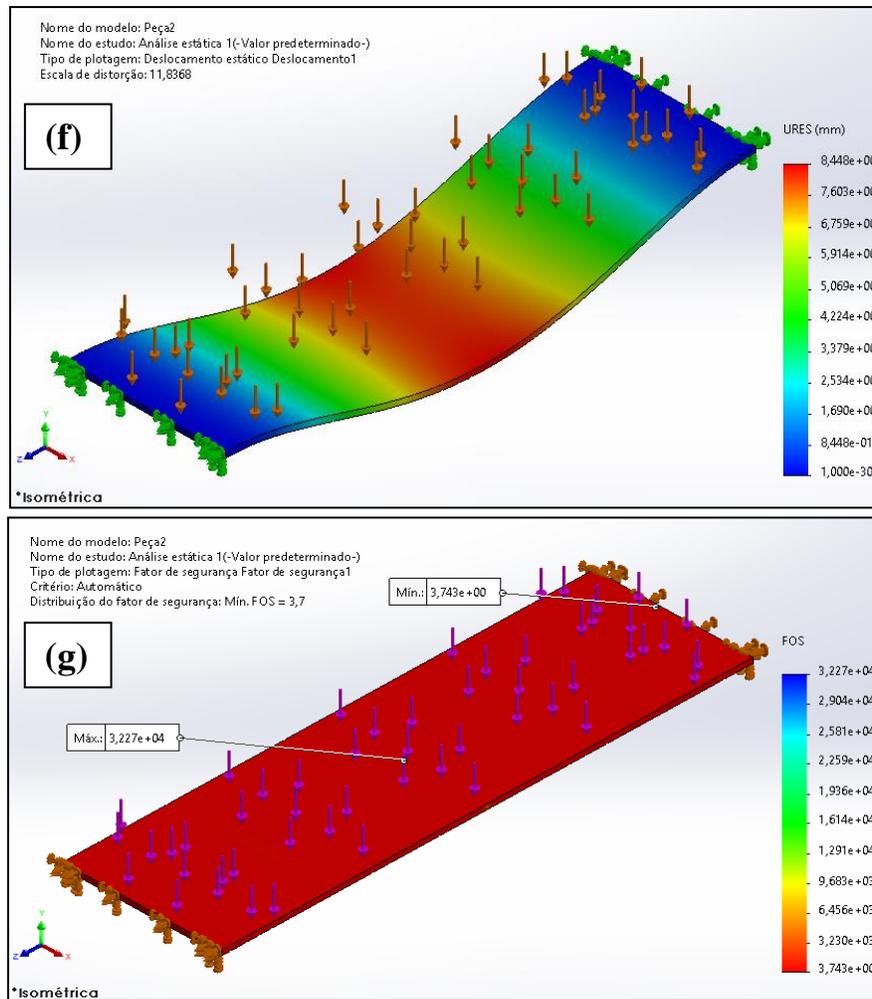


Figura 3. (a) chapa com dupla fixação nas extremidades; (b) As fixações são elementos verdes; (c) são apresentadas as forças atuantes por setas rosas verticais; (d) tem-se malha para subdividir todo o modelo. Com o carregamento de 10.000 N para o modelo com 10 mm de espessura tem-se (e) Plotagem dos níveis das tensões de *von Mises*; (f) Plotagem da deformação total; (g) Plotagem do Fator de Segurança após o esforço de flexão.

Nota-se na figura 3(a-b) a cor mais escura do modelo, já que possui uma textura característica do material utilizado após sua inserção. Ao colocar-se a carga de força distribuída na superfície do modelo, obteve-se a figura 3(c) que representa o campo de forças atuante.

A força distribuída ao longo de toda superfície teve valor igual a 10.000 N para esta primeira simulação antes do erro hipotético no dimensionamento. A análise realizada foi em condição estática. A malha que subdivide todo o modelo teve qualidade fina com elementos tetraédricos formados (Figura 3(d)).

Para a modelagem sob carregamento de 10.000 N para o modelo com 10 mm de espessura, observa-se na figura 3(e) que mesmo após as deformações, as tensões atuantes não atingem o valor de tensão de escoamento do material, que é de 551,48 MPa. Os maiores valores de tensões estão representados pela cor vermelha, com valores próximos de 147,4 MPa.

Essa deformação está com escala de distorção de 11,8368 vezes. Essa escala serve para melhorar a visualização da deformação, já que o efeito global, considerando a tensão atuante, não é tão visível.

Observa-se nessa figura que o valor máximo para deformação é de 8,448 mm, sendo localizado na parte mais central da chapa, afastado dos pontos de fixação criados nas extremidades. Pelo mapeamento de cor, observa-se que este ponto se encontra na região vermelha do modelo (Figura 3(f)). É possível notar que após o esforço de flexão o modelo tende a sofrer uma alteração no seu eixo geométrico, apresentando agora um aspecto curvo ao longo de toda sua extensão.

A figura 3(g) indica a plotagem do fator de segurança para esse modelo após o esforço de flexão. É possível notar que os valores mínimos do fator de segurança ocorrem nas extremidades do modelo, próximos dos pontos de fixação. Contudo, há como valor mínimo um $N=3,743$, que atende as expectativas tratadas para um projeto seguro que é $N>1$.

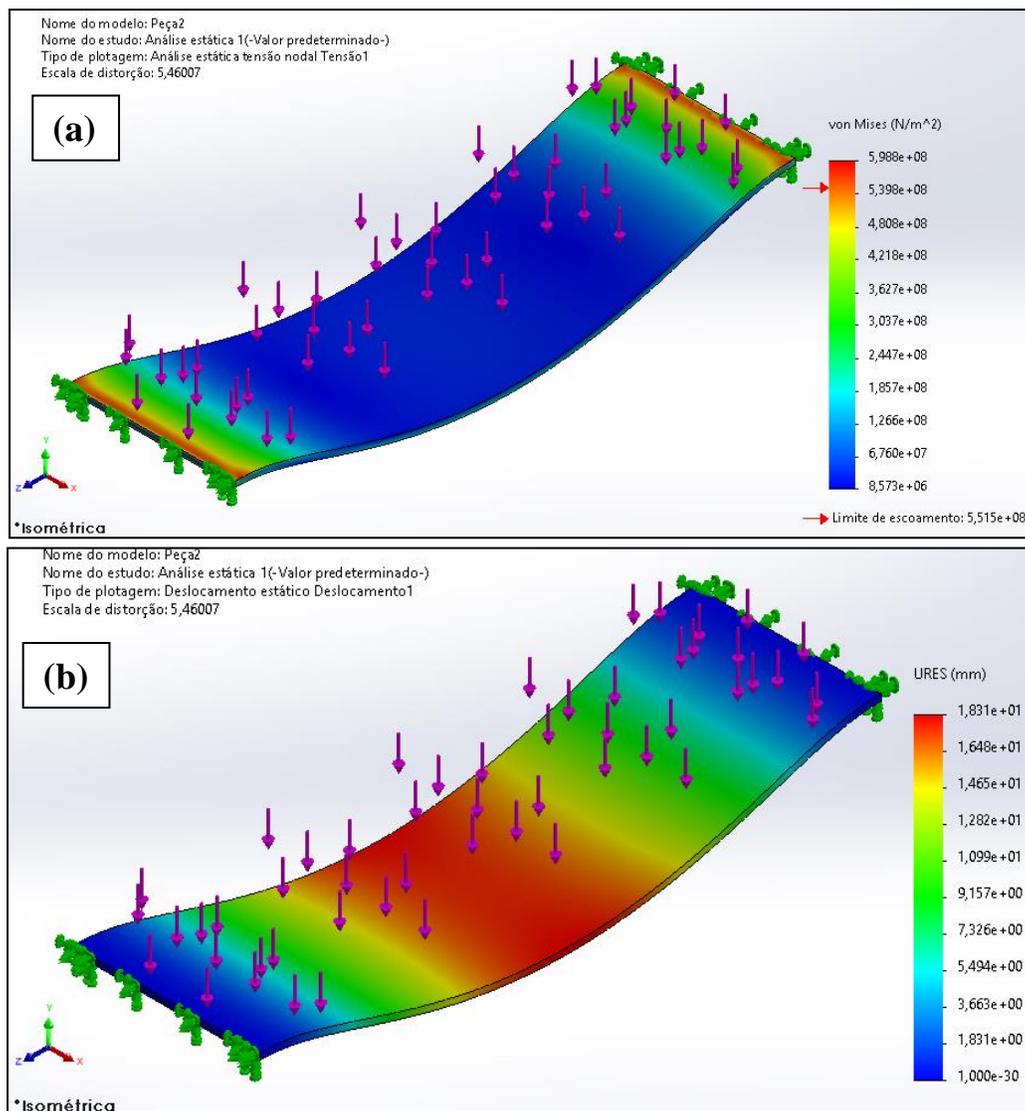
Ao mudar-se o carregamento de força de 10.000 para 70.000 N, verifica-se um excesso de deformação caso a espessura do modelo seja mantida.

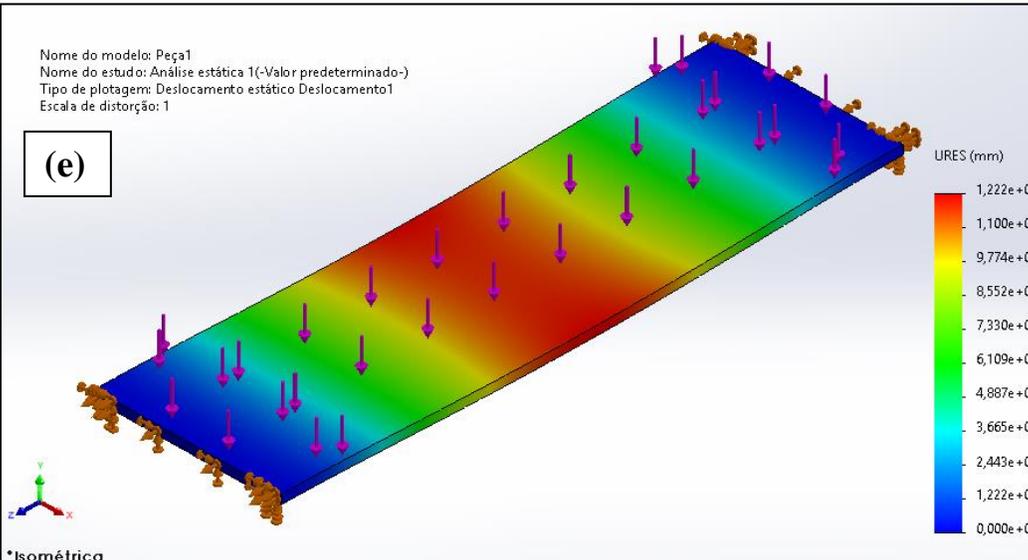
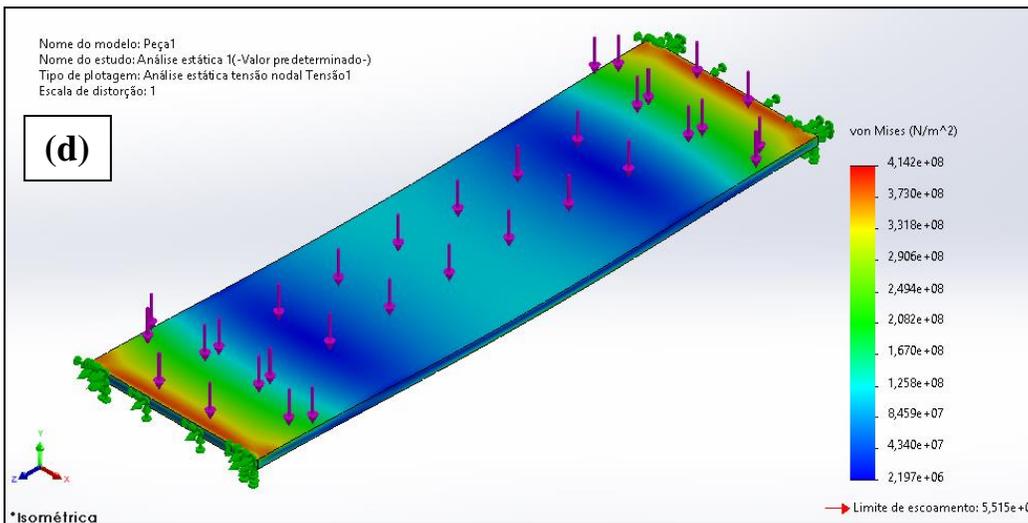
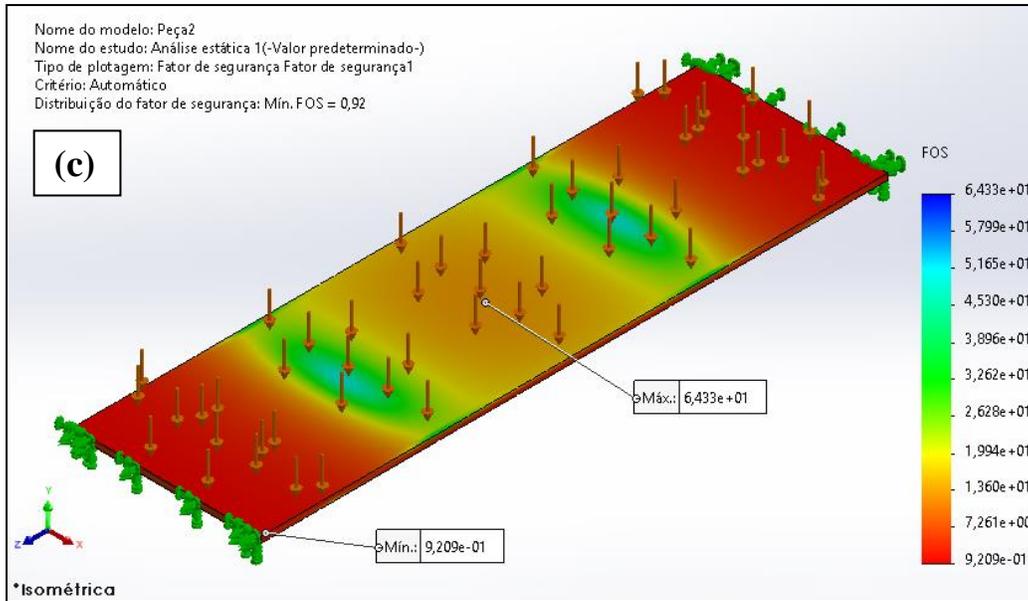
As figuras de (34) a (37) são referentes ao carregamento de 70.000 N para a chapa ainda com 10 mm de espessura.

O modelo está sofrendo deformações excessivas devido ao excesso de carga, já que seu dimensionamento não suporta todo o esforço aplicado. Prosseguindo com a simulação, mesmo assumindo os equívocos de um erro de dimensionamento, é possível plotar todos os gráficos necessários para as análises.

A figura (35) representa as distribuições das tensões após o carregamento de 70.000 N. Nota-se nesta figura que as tensões geradas no corpo atuam no limite de escoamento do material escolhido, que é de 551,48 MPa, o que para um projeto pode representar condições inseguras e indesejadas.

A marcação deste valor na plotagem do gráfico dos níveis das tensões de *von Mises* está representada por uma seta vermelha.





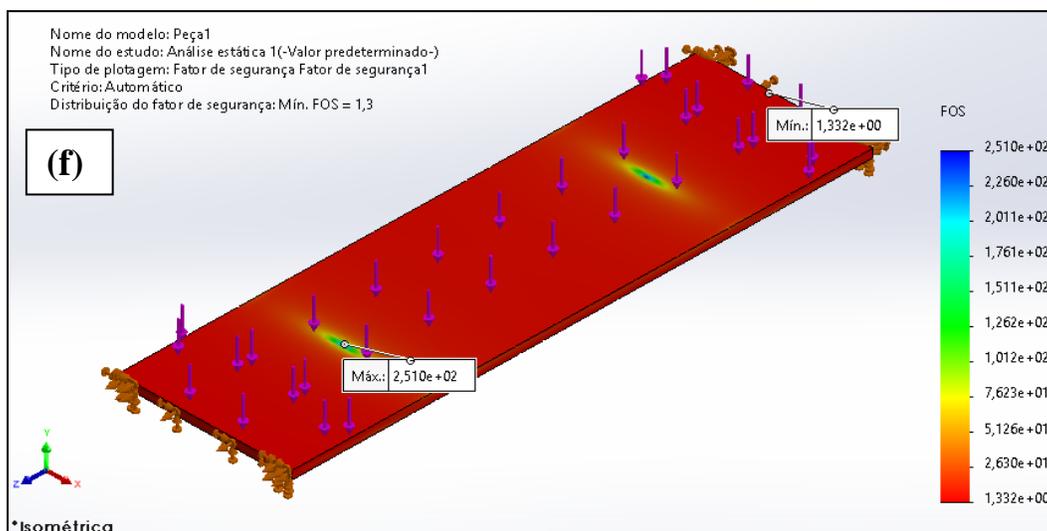


Figura 4. Carregamento de 70.000 N em chapa com 10 mm de espessura, (a) Plotagem dos níveis das tensões de *von Mises*; (b) Plotagem da deformação Total; (c) Plotagem do Fator de Segurança (FOS). A espessura do modelo foi alterada para 15 mm (carregamento de 70.000 N), seguiu-se a (d) plotagem dos níveis das tensões de *von Mises*; (e) Plotagem da deformação total; (f) Plotagem do Fator de segurança (FOS).

Nota-se que o valor para deformação máxima subiu de 8,448 mm para 18,310 mm, Figura 4(a-b). O resultado é de se esperar, já que com aumento da carga haverá uma maior deformação se todas as outras condições forem mantidas. Nota-se que o valor mínimo para o fator de segurança foi de 3,743 para 0,921, Figura 4(c). Como para uma condição segura deve-se ter um $N > 1$, esta simulação mostra que há pontos possíveis para falhas na estrutura do modelo.

De modo a mitigar a sobrecarga, optou-se pela mudança da espessura do modelo para 15mm, Figura 4(d-f). Esse aumento de espessura fez com que o modelo em análise aumentasse sua resistência à flexão. O aumento da espessura fez com que as tensões atuantes ficassem abaixo do limite do escoamento do material, indicando para essa nova situação um ganho de resistência no modelo como um todo. Nota-se que o limite de escoamento do material é de 551,48 MPa e que as tensões máximas atuantes estão próximas de 414,20 MPa.

É possível observar que o valor máximo para deformação total caiu de 18,310 mm para 12,220 mm. Esse resultado era esperado, tendo em vista que o aumento da espessura deu ganho de resistência ao esforço de flexão para o modelo em análise. Ocorreu um aumento do fator de segurança mínimo no modelo, saindo de um valor de $N = 0,921$ para $N = 1,332$. Esse novo valor atende ao critério de segurança para $N > 1$, porém, não elimina a necessidade de novas análises em outras condições físicas.

Os resultados obtidos na simulação de tração foram muito satisfatórios se comparados aos obtidos de forma analítica, apresentando resultados muito próximos em ambos os softwares, dando uma maior confiabilidade aos resultados. Ainda nas simulações de tração, os valores para coeficiente de segurança possuem uma distribuição próxima do valor $N = 4$, mesmo valor encontrado analiticamente. Entretanto, foi observado valores inferiores próximos aos pontos de fixação e valores maiores nos pontos próximos à aplicação dos esforços.

Na simulação da chapa metálica sofrendo esforço de flexão, foi possível perceber por meio das plotagens os efeitos da mudança no eixo geométrico do modelo, apresentando um caráter curvo após a deformação. Ao aumentar-se a carga para valores muito acima dos limites suportados, observou-se a capacidade que a tecnologia CAE oferece aos usuários indicando as possíveis falhas. Foi notável os valores inferiores a 1 para coeficiente de segurança, bem como a atuação das tensões no regime de escoamento, uma condição que na prática, dependendo do projeto, deve ser evitada. Após seguir as sugestões e correções, notou-se que as tensões atuantes ficaram abaixo do limite de escoamento (σ_e) do material, assim como foi possível observar uma menor deformação total. Verificou-se também um aumento no coeficiente de segurança, onde constatou-se que o valor mínimo saiu de 0,921 para 1,332.

Todas as simulações realizadas neste trabalho foram em condições de carregamento estático. Essas simulações não são definitivas, tendo em vista que outros fatores físicos, tais como carregamento dinâmico, temperatura ou falha por fadiga, por exemplo, podem ser inseridos e analisados.

IV. Considerações Finais

O conhecimento da mecânica dos sólidos tem grande importância nos ramos de atuação de físicos e engenheiros, em especial para aqueles que atuam na área de projetos mecânicos e similares.

Conhecer os princípios físicos desta ciência pode dar destaque aos profissionais da área, em especial os físicos, tendo em vista a grande contribuição que a mecânica ofereceu ao longo da história.

Do ponto de vista tecnológico, conhecer os sistemas de auxílio aos projetos, *CAD* e *CAE*, pode aumentar as possibilidades dos profissionais no mercado de trabalho e permitir que estes atuem em pesquisa e desenvolvimento nas áreas de engenharia. Esses sistemas, em especial a tecnologia *CAE*, não são definitivos, mas são capazes de dar suporte a todas as equipes durante as fases de elaboração dos projetos, ajudando a todos na tomada de decisões.

Essas tecnologias são capazes de integrar equipes multidisciplinares, onde, através da conversação dos sistemas entre os softwares e a computação em nuvem, é possível que um projeto seja elaborado por vários membros ao mesmo tempo, podendo ser alterado a qualquer momento.

Usar o *CAE* não elimina os cálculos analíticos assim como não elimina a necessidade de resultados experimentais feitos em protótipos, corpos de prova ou produto, porém, é uma tecnologia capaz de ajudar em diversos fatores tais como reduções de custos e tempo de produção, aumento da produtividade e confiabilidade.

REFERENCIAS

BEER, F.P., JOHNSTON, E.R. (1995). *Resistência dos Materiais*. 3ª edição. São Paulo: Pearson Makron Books.

BUCCIARELLI, Liuis L. (2003). *Engineering philosophy*. Delft: Delft University Press.

NAVEIRO, R., OLIVEIRA, V., (2011). *O projeto de engenharia, arquitetura e Desenho Industrial: conceitos, Reflexões, Aplicações e Formação Profissional*, 1a ed. Juiz de Fora, UFJF. SILVA, Francisco Duarte Magalhães. *O CAD Aplicado ao Projeto do Produto: O Ponto de Vista dos Designers Industriais* - Francisco Duarte Magalhães Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.