

## Análise Tensional de Peças Mecânicas pelo Método dos Elementos Finitos

CISNEROS, Edry Antonio Garcia<sup>1</sup>

*Doctor, Professor of Mechanical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

GOMES, Raimundo Cláudio Souza

*Doctor, Professor of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

PRINTES André Luiz

*MSc Professor of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

CARDOSO, Fábio de Sousa

FERREIRA, Angilberto Muniz Sobrinho

*Doctor, Professor of Electronic Engineering at Amazonas State University, Brazil*

MARTINS, Karolayne Barbosa

*Electrical Engineer of Embedded Systems Laboratory at Amazonas State University*

*Brazil*

TORNÉ, Israel Gondres

*Doctor, Professor of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

PEDRAÇA JÚNIOR, Neirival Rodrigues

ABREU, Diogo Furtado

*Student of Mechanical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

DA COSTA, Barbosa Isaias

MARTINS, da Costa João Carlos

*Mechanical Engineer of Embedded Systems Laboratory at Amazonas State University*

*Brazil*

SICCO, João Victor Reis de Oliveira

*Student of Mechanical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

### Abstract

*The use of computational tools for modeling parts (CAD systems) is a fundamental premise in RD&I research. 3D CAD systems allow you to visualize, analyze and simulate the behavior of the part in question in order to optimize material and costs due to the ease of construction of the digital prototype under real conditions, even before its construction, which facilitates a great saving of time and with that the cycle of prototyping of research results is reduced, this factor directly affects the efficiency of companies. The Finite Element Method (FEM) is one of the processes that has been most used for the discretization of continuous media in recent times, mainly due to the emergence of powerful processors that allow data processing with a high*

---

<sup>1</sup> Corresponding author: edry1961cu@gmail.com

CISNEROS, Edry Antonio Garcia; GOMES, Raimundo Cláudio Souza; PRINTES André Luiz; CARDOSO, Fábio de Sousa; FERREIRA, Angilberto Muniz Sobrinho; MARTINS Karolayne Barbosa; TORNÉ, Israel Gondres; PEDRAÇA JÚNIOR, Neirival Rodrigues; ABREU, Diogo Furtado; DA COSTA, Barbosa Isaias; MARTINS, da Costa João Carlos; SICCO, João Victor Reis de Oliveira– **Análise Tensional de Peças Mecânicas pelo Método dos Elementos Finitos**

---

*degree of accuracy of these solutions. Its wide use is also due to the fact that it can be applied, in addition to the classical problems of linear-elastic structural mechanics (for which it was the method initially developed), if not also for nonlinear, static or dynamic problems, stiffness problems, fluid analysis, thermal and electrostatic problems, among others. This work presents the result of the 3D drawing of a punch body and its validation by means of simulation via FEM using NX software. The results were validated by FEA analysis and they made it possible to affirm the validity of both the material used and the simulated geometries of the studied body.*

**Keywords:** FEA, CAD

### **Resumo**

*A utilização de ferramentas computacionais para modelagem de peças (sistemas CAD) é uma premissa fundamental nas pesquisas. Os sistemas CAD permitem visualizar, analisar e simular o comportamento da peça em questão visando otimizar material e custos devido as facilidades de construção do protótipo digital sob condições reais, antes mesmo da construção do mesmo o que facilita uma grande economia de tempo e com isso diminui-se o ciclo de prototipação dos resultados das pesquisas, este fator incide diretamente na eficiência das empresas. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos processos que tem sido mais usado para a discretização de meios contínuos nos últimos tempos devido sobretudo ao surgimento de processadores potentes que possibilitam processamento de dados com alto grau de exatidão dessas soluções.*

*Este trabalho apresenta o resultado da simulação de duas geometrias diferentes a serem usadas como elementos de punção, foram desenvolvidos os desenhos 3D desses corpos e simulado a compressão sob ação de carregamento estático, os resultados foram validados por análise de FEA estes resultados possibilitaram afirmar a validade tanto do material usado quanto das geometrias simuladas do corpo estudado para este tipo de aplicação.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A simulação computacional é uma tecnologia que vem sendo muito importante nos trabalhos de PD&I. Por meio dela, tanto engenheiros quanto especialistas podem trabalhar com protótipos digitais para o desenvolvimento de novos produtos, projetos e processos, esta

facilidade faz com que estes processos sejam acelerados e muito econômicos, além de possibilitar um melhor entendimento do comportamento de materiais submetidos a diferentes esforços.

O MEF baseia-se na divisão da estrutura em um número finito de subdomínios de forma simples e dimensões variadas, portanto quanto maior o número de nós e subdomínios, maior a tendência em obter resultados mais precisos, uma vez que será realizada a análise dos esforços em cada nó para em seguida gerar o diagrama dos esforços da peça e/ou estrutura (LA ROVERE, 2001).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos processos que tem sido mais usado para a discretização de meios contínuos nos últimos tempos devido sobretudo ao surgimento de processadores potentes que possibilitam processamento de dados com alto grau de exatidão dessas soluções. A sua larga utilização se deve também ao fato de poder ser aplicado, além dos problemas clássicos da mecânica estrutural elástico-linear (para os quais foi o método inicialmente desenvolvido), se não também para problemas não lineares, estáticos ou dinâmicos, problemas de rigidez, análise de fluidos, problemas térmicos e eletrostáticos entre outros.

Este trabalho apresenta o resultado da simulação via MEF de dois diferentes geometrias de corpos de punção, partindo do desenho 3D destes corpos foi feito tudo o processo de modelagem: físico, geométrico e discretização pelo MEF sobre a base da definição de uma malha para os corpos e a correspondente simulação computacional. Os resultados foram validados por análise de FEA mediante o software NX Siemens e os mesmos possibilitaram afirmar a validade tanto do material usado quanto das geometrias simuladas do corpo estudado. Esses resultados permitem visualizar futuras aplicações destes corpos em diferentes dispositivos mecânicos de punção.

CISNEROS, Edry Antonio Garcia; GOMES, Raimundo Cláudio Souza; PRINTES André Luiz; CARDOSO, Fábio de Sousa; FERREIRA, Angilberto Muniz Sobrinho; MARTINS Karolayne Barbosa; TORNÉ, Israel Gondres; PEDRAÇA JÚNIOR, Neirival Rodrigues; ABREU, Diogo Furtado; DA COSTA, Barbosa Isaias; MARTINS, da Costa João Carlos; SICCO, João Victor Reis de Oliveira– **Análise Tensional de Peças Mecânicas pelo Método dos Elementos Finitos**

---

## **2. SISTEMAS CAD. MÉTODOS PARA ANÁLISES ESTRUTURAIS DE PEÇAS MECÂNICAS. O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).**

Os sistemas CAD reconhecidamente contribuem para a inovação nas empresas, em especial no desenvolvimento de novos produtos industriais em diferentes áreas como descrito por Qiu et al. (2007).

Segundo Pavanello (1997), os primeiros princípios que embasariam o MEF foram utilizados em 1906 quando um grupo de pesquisadores recomendou um mecanismo de modelagem do contínuo por um modelo de barras elásticas, de modo que os deslocamentos nos nós representariam uma aproximação para o deslocamento contínuo.

Como classificado por Araújo (1996), a Visualização Científica ou Método de Elementos Finitos, Simulação Computacional ou mesmo Simulação e Modelagem Computacional.

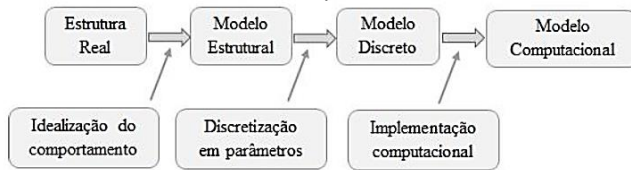
Pedgen (1995) define a simulação computacional como sendo o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo, com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

O Método de Elementos Finitos utiliza técnicas matemáticas para encontrar soluções aproximadas para equações diferenciais parciais.

A técnica subdivide o domínio do problema, resultando em partes menores de malhas poligonais. Tem por objetivo reduzir complicadas equações diferenciais em um grupo de equações algébricas que podem ser solucionadas numericamente, segundo Moore e Molloy (2007).

A análise estrutural moderna, segundo Martha (2007), trabalha com quatro instâncias, sendo que o primeiro nível corresponde à estrutura física, o segundo nível corresponde ao modelo estrutural, ou seja, a estrutura real acrescida da idealização de seu comportamento, o terceiro nível corresponde ao modelo discreto inserido de diversos parâmetros ao modelo estrutural e o quarto nível representa o modelo computacional, isto é, o modelo discreto será convertido em modelo computacional através de sua implantação no *software*, conforme Figura 1:

**Figura 1. Quatro níveis de abstração referentes a uma estrutura na análise estrutural.**



Fonte: Martha, 2007

A modelação pelo método dos elementos finitos pressupõe uma sequência de etapas, necessárias para obter um modelo pelo MEF.

Com o aparecimento de novos materiais e o próprio desenvolvimento da tecnologia surgem novas possibilidades na área de simulação via MEF o que permite obter peças desenhadas e simuladas mais similares às peças reais, o que se traduz em maior aproveitamento do tempo e redução de custos de fabricação pelo fato de não ter peças sobredimensionadas.

A modelagem por este método inicia justamente na modelagem física, neste passo são definidas as cargas, as condições de contorno, o contorno do problema físico em geral (seja estático ou dinâmico), o tipo de problema.

Na modelagem geométrica é feita uma reprodução do sólido em uma geometria de superfície, deve ser o mais precisa possível visto que através dela é criado o modelo matemático do objeto ou conjunto.

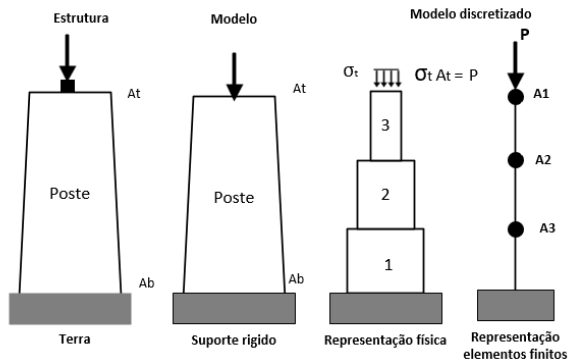
Na etapa de modelação dos elementos finitos procede-se a subdividir a geometria do modelo em elementos discretos, são assignadas as propriedades do material y dos elementos, nesta etapa se define o tipo de malha que será utilizada na discretização do modelo.

Nesta etapa de análise são calculados os resultados previamente definidos (tensões, deformações, etc).

Inicialmente e partindo da idealização do problema real se chega ao estabelecimento do modelo estrutural, se representa a estrutura física considerando a simplificação de forças e áreas e depois

se desenvolve o modelo computacional onde são determinados o tipo de malha e os nós da estrutura objeto de análises conforme Figura 1.

**Figura 1. Etapas da modelagem pelo MEF**



Fonte: Autores, 2022

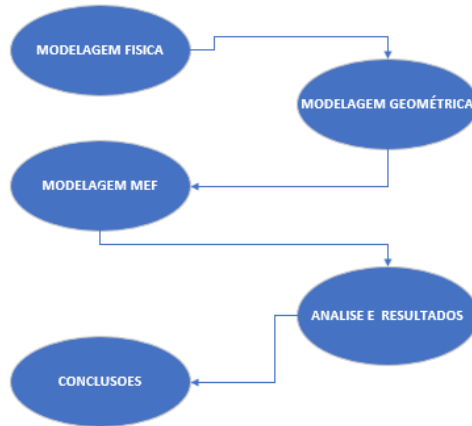
Por último a verificação dos resultados onde é comparado com os critérios do projeto e caso contrário se deve proceder a redesenhar a estrutura, trocar materiais e repetir o processo.

A abordagem de uma estrutura a ser realizada pode ser considerada um sistema discreto. A discretização de um sistema contínuo consiste na divisão da estrutura em partes separadas distintas, com conexões entre si. Sendo assim, obtém-se uma solução aproximada simulando o sistema contínuo. “Como uma montagem de elementos que têm um comprimento finito (e não diferencial)”.

A utilização do software de Análise por Elementos Finitos (FEA) em análises estruturais tem por objetivo facilitar a rápida visualização, pelo usuário, das deformações (deslocamentos) e tensões que ocorrem em um determinado modelo matemático (geometria da peça). Para tanto, se faz necessária a utilização de conceitos de física, aplicados à resistência dos materiais, na elaboração do modelo completo com suas condições de contorno tais como forças aplicadas e restrições ao movimento

A seguir uma figura 2 ilustrativa deste processo.

**Figura 2. Etapas da modelação pelo MEF**



Fonte: Autores, 2022

Em sínteses a modelagem geométrica consiste em estudar e descrever as formas são muito aplicados nos sistemas CAD. estes são sistemas de computador que auxiliam no desenho, modificação, e otimização de projetos. Estas aplicações são muito usadas na engenharia mecânica em geral no desenho de peças e elementos de maquinas, em eletrônica, na engenharia química entre outros.

A modelagem geométrica ode ser utilizada na otimização estrutural; este processo é feito partindo da modificação da geometria do modelo afim de minimizar a quantidade de material utilizada para concepção da peça estrutural, respeitando os limites de desempenho mecânico e os critérios do projeto.

Critério de falha de Von Mises. O critério de tensão de von Mises máxima é baseado na teoria de Von Mises-Hencky, também conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distorção máxima. Esta teoria e utilizada nos principais softwares do mercado atualmente como NX Siemens, SolidWorks, Auto Cad Inventor entre outros.

Nos termos das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , a tensão de von Mises é expressa como:

$$\sigma_{Von\ Mises} = \{\sigma_1 - \sigma_2\}^2 + \{\sigma_2 - \sigma_3\}^2 + \{\sigma_1 - \sigma_3\}^2 + 2\}^{1/2} \quad 1$$

Essa teoria afirma que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de tensão. Na maioria dos casos, o limite de escoamento é usado como limite de tensão. Entretanto, o software permite usar a tração máxima ou definir o seu próprio limite de tensão.

$$\sigma_{Von\ Mises} \geq \sigma\ lim \quad 2$$

O limite de escoamento é uma propriedade dependente da temperatura. O valor especificado do limite de escoamento deve levar em consideração a temperatura do componente. O fator de segurança em um local é calculado por:

$$F_s = \sigma\ lim \div \sigma\ Von\ Mises \quad 3$$

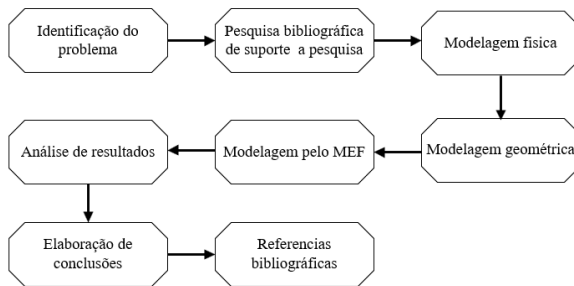
Para o caso do cisalhamento puro que seria o exemplo a ser usado no software NX. No caso de cisalhamento puro  $t$ , a tensão de von Mises pode ser expressa como:

$$\sigma\ vonMises = 3^{1/2} * \tau \quad 4$$

$$A\ falha\ ocorre\ se\ \tau_{max} = 0,577\ \sigma_{escoamento} \quad 5$$

As etapas observadas durante a pesquisa foram:

**Figura 3. Etapas da pesquisa.**



Fonte: Autores, 2022

Todo o processo de modelagem foi feito usando o software NX Siemens.



#### **4. ANÁLISE E RESULTADOS**

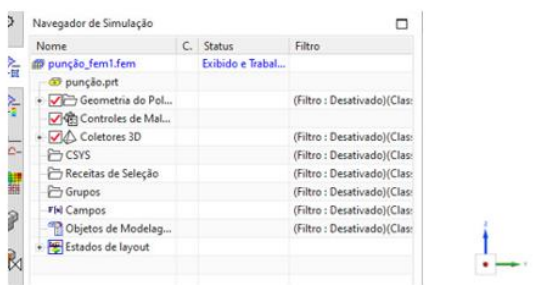
O problema identificado corresponde certamente a um problema do tipo análise estrutural, este problema relaciona-se a necessidade de analisar o comportamento de dois corpos com geometrias diferentes que poderão ser usados para o mesmo objetivo. Esta análise permitirá validar ou refutar a aplicação destas geometrias.

A revisão bibliográfica possibilitou a adoção da teoria da análise estrutural pelo MEF no caso do estudo.

Os resultados das análises serão apresentados de forma gráfica pelo software. As escalas de cores geradas nos gráficos pelo software são atribuídas para cada campo de tensões, deformações e coeficiente de segurança, distribuídos pelas regiões do modelo analisado. A partir dos dados obtidos é criado pelo software NX Siemens um relatório final para cada análise, sendo esta a principal fonte de informações para a avaliação dos resultados obtidos.

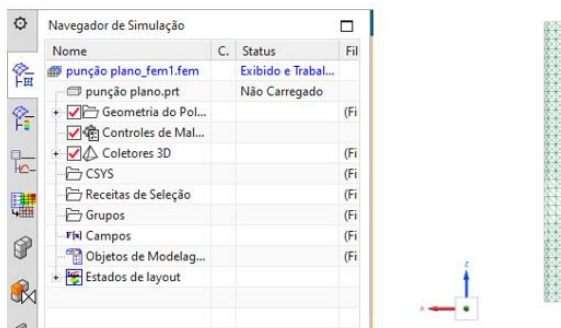
A malha de definição dos elementos finitos gerados, apresentam a forma triangular onde é determinada em função do tipo de geometria do sólido analisado (no caso cilíndrica). Os resultados podem ser visualizados pela escala de cores, na qual a cor vermelha indica o valor máximo da tensão média desenvolvida, estando seus valores em torno de 59 Mpa, abaixo das tensões limites de ruptura e de escoamento do material. A cor azul representa as regiões onde o material está fracamente tensionado, com valores próximos à zero Mpa. Nestas regiões estão posicionados os recursos para a remoção de massa, de acordo com os critérios expostos por Collins (2006). Na figura 4 se apresenta o primeiro gráfico gerado pelo software que no caso indica a malha selecionada para a simulação. A malha selecionada para as duas geometrias foi a tetraédrica de tipo tridimensional.

**Figura 4. Imagem da malha gerada pelo software para a geometria tipo cônica.**



Fonte: Autores, 2022

**Figura 5. Imagem da malha gerada pelo software para a geometria tipo cilíndrica.**

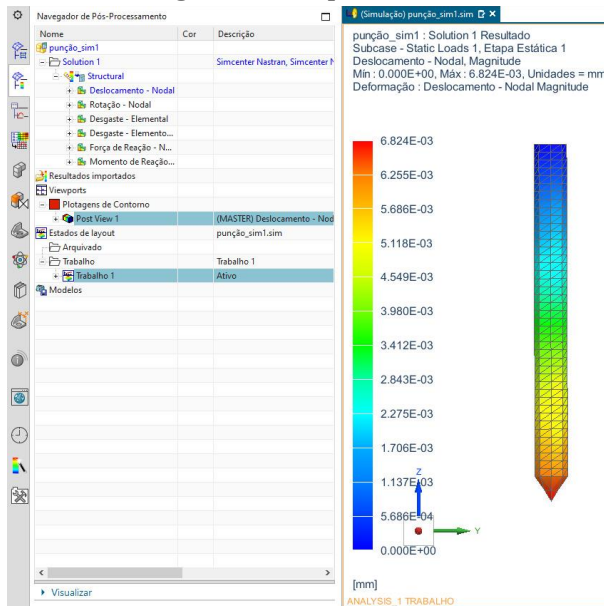


Fonte: Autores, 2022

Este tipo de geometria permite desenvolver uma simulação adequada visto que a mesma ocupa uma distribuição uniforme ao longo de todas as peças.

Na Figura 6 pode-se observar a distribuição das deformações pelas regiões da peça, tendo os seus valores indicados, também, pela escala de cores.

**Figura 6. Distribuição das deformações pelas regiões da peça com geometria tipo cônica**



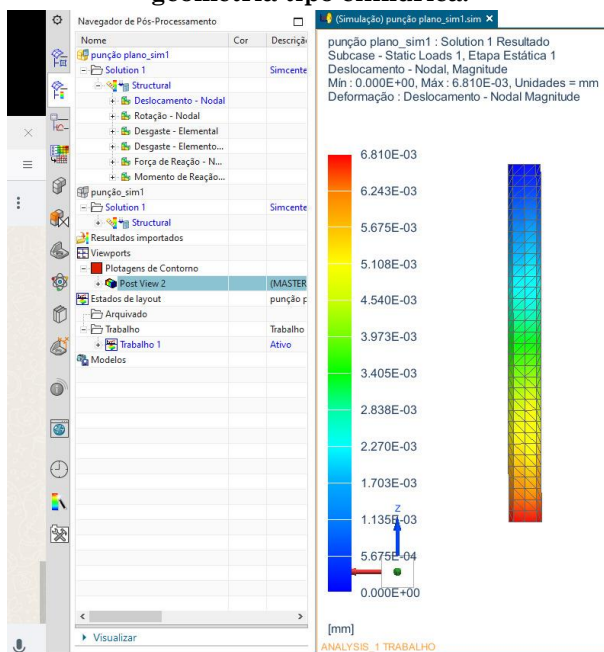
Fonte: Autores, 2022

O vermelho está relacionado à área onde ocorreu a maior deformação, apresentando um valor máximo de  $6,824 \times 10^{-3}$  mm, neste caso, é possível observar no gráfico que é justamente na ponta onde ocorre a maior deformação por compressão, nas outras regiões da peça onde aparece a cor amarela, mas com menor intensidade mostra que existe deformação, mas esta vá diminuindo na mesma medida que a distância da ponta da peça fica maior devido a que é justamente na ponta onde ocorre a sollicitação de compressão com maior intensidade; depois vão aparecendo a cor azul menos escura que indica como mostrado na escala da esquerda que a deformação continua diminuindo e chega a ocupar valores de  $2,843 \times 10^{-3}$  mm até  $5,686 \times 10^{-4}$  mm. Finalmente aparece a cor azul escuro indicam uma deformação próxima praticamente nula. Já na borda superior da peça que o lugar mais afastado da ponta aparece uma cor azul indicativo de que este

processo de deformação e quase nulo como indicado na escala de cores a esquerda.

Na figura 7 pode se observar o comportamento para a peça com geometria cilíndrica, nesta peça também foi observado similar comportamento quanto a grau de deformações. Como se observa nesta figura o maior valor de deformação foi de  $6,810 \times 10^{-3}$  mm na zona de maior solicitação de carga por compressão que é justamente na parte do contato. Esse valor depois continua diminuindo e chega a ocupar valores de deformação da ordem  $6,243 \times 10^{-3}$  mm correspondente a zona próxima da área de contato mais afastada da mesma, logo esse valor continua diminuindo chega até  $5,108 \times 10^{-3}$  mm.

**Figura 7. Distribuição das deformações pelas regiões da peça com geometria tipo cilíndrica.**



Fonte: Autores, 2022

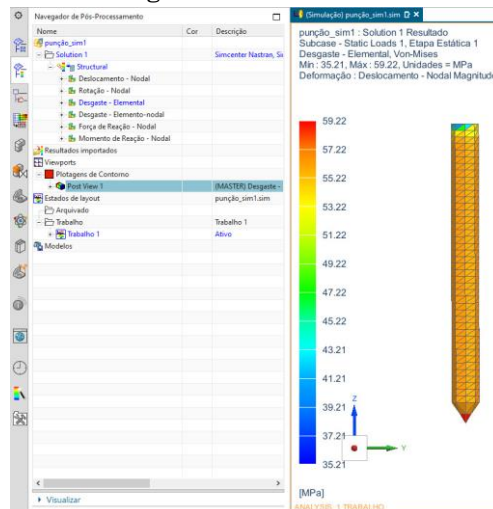
A partir desse valor se produz um cambio na cor da peça que passa a ocupar a cor verde indicativa de diminuição de deformação ocupando

CISNEROS, Edry Antonio Garcia; GOMES, Raimundo Cláudio Souza; PRINTES André Luiz; CARDOSO, Fábio de Sousa; FERREIRA, Angilberto Muniz Sobrinho; MARTINS Karolayne Barbosa; TORNÉ, Israel Gondres; PEDRAÇA JÚNIOR, Neirival Rodrigues; ABREU, Diogo Furtado; DA COSTA, Barbosa Isaias; MARTINS, da Costa João Carlos; SICCO, João Victor Reis de Oliveira– **Análise Tensional de Peças Mecânicas pelo Método dos Elementos Finitos**

valores de  $3,973 \times 10^{-3}$  mm e segue diminuindo até o valor de  $3,405 \times 10^{-3}$  mm para mudar a cor de novo, esta vez a cor azul claro com um valor de deformação de até  $1,70 \times 10^{-3}$  mm, na mesma medida em que a distancia do ponto de maior sollicitação aumenta desmuni a deformação até ocupar a cor azul escura com valores próximos de zero.

Na Figura 8 é ilustrado o resultado das **tensões de Von Mises**, que segundo Cruz (2008), indica as tensões médias nas regiões da peça sujeitas a compressão, a qual recebe a denominação de Equivalent Stress atribuída pelo sistema usado. O valor máximo desta tenção foi de 59, 22 Mpa. Esse valor indica que para o material selecionado (aço) existe uma concentração de tensões na ponta da punção o que se traduz na necessidade de avaliar a resistência para verificar se resiste e não falha, conhecido o material que é aço, e também sabendo que o valor da tensão permissível que é de 150 Mpa pode se afirmar que o mesmo não falhará pois a valor real obtido e muito menor do que o permissível.

**Figura 8. Representação das tensões de Von Mises peça com geometria cônica.**



Fonte: Autores, 2022

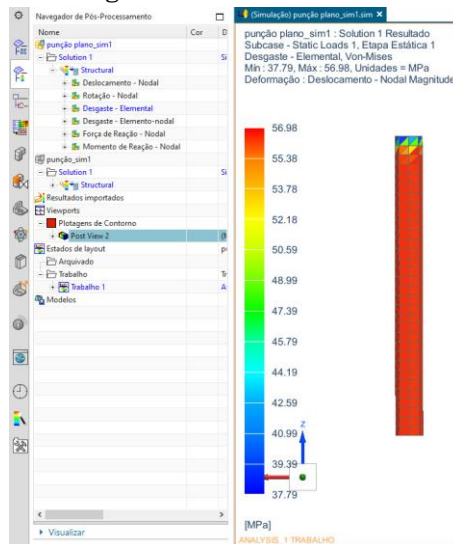
O comportamento segundo esta teoria permite também afirmar que existe uma concentração de tensão na parte da punção próxima da

CISNEROS, Edry Antonio Garcia; GOMES, Raimundo Cláudio Souza; PRINTES André Luiz; CARDOSO, Fábio de Sousa; FERREIRA, Angilberto Muniz Sobrinho; MARTINS Karolayne Barbosa; TORNÉ, Israel Gondres; PEDRAÇA JÚNIOR, Neirival Rodrigues; ABREU, Diogo Furtado; DA COSTA, Barbosa Isaias; MARTINS, da Costa João Carlos; SICCO, João Victor Reis de Oliveira– **Análise Tensional de Peças Mecânicas pelo Método dos Elementos Finitos**

área que primeiro fara contato com a lacre a ser furada. Existe também uma distribuição mais uniforme que o primeiro critério explicado, isto se deve justamente a que neste caso são apresentados valores de tensões medias.

Similar comportamento foi obtido com a geometria cilíndrica como observado na figura 9, onde pode se observar que o valor máximo desta tensão foi de 56,98 Mpa. Esse valor indica que para o material selecionado (aço) existe uma concentração de tensões nessa geometria, essa cor se observa quase ao longo total da punção, este fato indica que as tensões medias neste caso estão distribuídas de forma mais uniforme por toda a área deste elemento. Analisando os valores máximos de tensão média obtida e conhecendo o material do elemento de punção que é aço, assumindo então que o valor de tensão máxima permissível para este material pode se considerar igual a 150 Mpa segundo o manual do fabricante Gerdau, pode se afirmar o mesmo não falhará pois a valor real obtido e muito menor do que o permissível.

**Figura 9. Representação das tensões de Von Mises peça com geometria cilíndrica.**



Fonte: Autores, 2022

## 5. CONCLUSÕES

A malha selecionada de tipo triangular espacial mostrou-se satisfatória ao permitir os cálculos tanto das tensões quanto das deformações ao longo das duas geometrias testadas.

A aplicação das etapas definidas na metodologia possibilitou a obtenção de resultados favoráveis no processo de simulação pelo método dos elementos finitos (MEF) obtendo-se resultados analíticos e gráficos que permite afirmar a possibilidade de utilização de ditas geometrias.

Os valores máximos de tensão obtidas nos relatórios gerados pelo software ocuparam valores de 56,98 Mpa para a geometria cilíndrica e de 59,22 Mpa para a geométrica cônica o que quando comparadas com a tensão permissível do material das peças (aço) testadas que é 150 Mpa validaram a resistência destas peças e sua validação para uso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 6118:2014 – Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento, 2014.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 6120:1980 – Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações - Procedimento, 1980.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, 2003.
4. AZEVEDO, Álvaro. Método dos Elementos Finitos. 1 ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2003.
5. CAMPILHO, Raul. Método de Elementos Finitos: Ferramentas para Análise Estrutural. [S.L.]: Publindústria, 2012.
6. COELHO, J.A. Modelagem de Lajes de Concreto Armado por Analogia de Grelha: Dissertação (Mestrado). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2000.
7. GESUALDO, F. A. R. Método dos Elementos Finitos: Notas de Aula. Uberlândia: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFU, 2010.
8. HAMBLY, E.C. Bridge deck behavior. London, Chapman and Hall: [s.n.], 1976.
9. HENNRICHS, C.A. Estudos Sobre Modelagem de Lajes Planas de Concreto Armado: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2003.

CISNEROS, Edry Antonio Garcia; GOMES, Raimundo Cláudio Souza; PRINTES André Luiz; CARDOSO, Fábio de Sousa; FERREIRA, Angilberto Muniz Sobrinho; MARTINS Karolayne Barbosa; TORNÉ, Israel Gondres; PEDRAÇA JÚNIOR, Neirival Rodrigues; ABREU, Diogo Furtado; DA COSTA, Barbosa Isaias; MARTINS, da Costa João Carlos; SICCO, João Victor Reis de Oliveira– **Análise Tensional de Peças Mecânicas pelo Método dos Elementos Finitos**

---

10. LA ROVERE, H. L. Utilização do Método dos Elementos Finitos em Projetos de Estruturas: Apostila do Curso de Especialização em Projeto de Estruturas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2001.
11. LIGHTFOOT, E.; SAWKO, F. Structural frame analysis by electronic computer: grid frameworks resolved by generalized slope deflection. [S.L.: s.n.], 1959. 60.
12. MARTHA, Luiz Fernando. Métodos Básicos da Análise de Estruturas. Rio de Janeiro: PUC - Rio, 2007. 312 p.
13. PAVANELLO, R. Introdução ao Método dos Elementos Finitos: Notas de Aula. Campinas: UNICAMP, 1997.
14. SANTOS, Luís Filipe Costa Dos. Comparação de Modelos de Grelha e de Elementos Finitos de Laje na Modelação de Estruturas de Edifícios de Betão Armado: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). [S.L.: s.n.], 2010.
15. SORIANO, Humberto Lima. Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas. São Paulo: Edusp, 2003. 578 p.
16. STRAMANDINOLI, J.S.B. Contribuições à Análise de Lajes Nervuradas por Analogia de Grelha: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2003.
17. ARAÚJO, J.M. Curso de concreto armado. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003a. v. 2. Curso de concreto armado. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003b. v.4.