FENEMI
FEDERAÇÃO NACIONAL
DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL

**“Como a Engenharia Mecânica e Industrial
podem melhorar o Agronegócio do Brasil”**

ESTUDO COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA CHAVE T PARA ABERTURA E FECHAMENTO DE VÁLVULAS SUBTERRÂNEAS POR DOIS SOFTWARES DE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Thiago Lopes Quevedo ⁽¹⁾ (thiagoquevedo@ufpr.br), José Eduardo Gubaua ⁽¹⁾ (gubaua@ufpr.br), Rafael Henrique de Oliveira ⁽²⁾ (rafael.henrique206@gmail.com), Leandro Elias Basmage Pinheiro Machado ⁽³⁾, (leandro.machado@anhanguera.com), Fernando Quevedo ⁽⁴⁾. (professorquevedo@hotmail.com).

⁽¹⁾ Universidade Federal do Paraná (UFPR); Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

⁽²⁾ Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS); Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais

⁽³⁾ Centro Universitário Anhanguera de Campo Grande (FCL); Coordenação do Engenharia Mecânica

⁽⁴⁾ Faculdade Estácio de Sá; Curso de Matemática.

RESUMO: *Com o desenvolvimento tecnológico na área de modelagem e simulações de projetos, foi visto a possibilidade de melhorias em uma ferramenta para abertura e fechamento de válvulas subterrâneas que seja mais ergonômica no transporte, operação e que possa manter suas aplicações de trabalho. Além disso, se propôs a realizar um comparativo no dimensionamento através dos softwares Solidworks e Abaqus. Inicialmente, realiza-se uma simulação de elementos finitos utilizando o software Solidworks para a avaliação da chave T proposta no trabalho. Após a verificação inicial, as mesmas condições de contorno, materiais e geometria são importadas ao software Abaqus. Conclui-se que os campos de tensões gerados são semelhantes em ambos os softwares, os quais ficaram abaixo das tensões admissíveis do projeto em todos os componentes da ferramenta. O ponto de tensão mais elevada de von Mises está localizado no elemento de ligação superior da ferramenta e este está abaixo da tensão admissível do material e daquele obtido nas análises com os softwares Solidworks e Abaqus. Por fim, tem-se que a maior deformação elástica é apresentada no ponto de maior fragilidade da ferramenta, ou seja, no elemento de ligação.*

PALAVRAS-CHAVE: CHAVE T, ELEMENTOS FINITOS, DIMENSIONAMENTO.

A COMPARATIVE STUDY OF THE DESIGN OF A T-KEY FOR THE OPENING AND CLOSING OF UNDERGROUND VALVES BY TWO FINITE ELEMENT SOFTWARE

ABSTRACT: *The technological development in the area of modeling and simulations of projects has brought several possibilities, among them, there is a need for improvements in a tool for opening and closing underground valves that is more ergonomic in transportation, operation and that can keep your functionalities. In this perspective, we proposed to perform a comparative in the sizing of a new T-key through the software Solidworks and Abaqus. Initially, a simulation using finite elements is performed by Solidworks software in order to evaluate the T-key proposed in the work. After initial verification, the same boundary conditions, materials, and geometry are imported into the Abaqus software. It is concluded that the generated stress fields are similar in both software, which were below the allowable design stresses in all the components of the tool. The highest von Mises stress point is located on the upper connecting element of the tool; this is below the allowable stress of the material and the one obtained in the analyses with the Solidworks and Abaqus software packages. Finally, it is observed that the greatest elastic deformation is presented at the point of greatest fragility of the tool, that is, in the connecting element.*

KEYWORDS: KEY-T, FINITE ELEMENT METHOD, DESIGN MACHINE.

FENEMI
FEDERAÇÃO NACIONAL
DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL

**“Como a Engenharia Mecânica e Industrial
podem melhorar o Agronegócio do Brasil”**

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de uma nova chave T, para abertura e fechamento de válvulas subterrâneas, parte da necessidade de facilitar a utilização do dispositivo nas operações cotidianas de empresas responsáveis pelo fornecimento e tratamento de água e esgoto. A ferramenta convencionalmente utilizada mede 1,6m e possui massa de aproximadamente 12kg. Além disso, como há duas medidas de válvulas, necessita-se o transporte de duas ferramentas o que dificulta os serviços.

Com o avanço tecnológico na área computacional, torna-se possível a implementação de modelos computacionais, os quais visam reduzir custos e tempo no desenvolvimento de novos projetos de produtos, a exemplo a chave T. Nesta perspectiva, o presente estudo buscou comparar o dimensionamento de uma nova chave T através de dois *softwares*, Soliworks® e Abaqus®, ambos utilizados para a análise e simulação utilizando o método de elementos finitos, sendo o primeiro ainda utilizado para a modelagem de geometria.

Com esses instrumentos computacionais é possível desenvolver projetos e simular diversas situações de serviço, explorando a resistência mecânica dos materiais utilizados, ergonomia do transporte e utilização. Também, possibilita-se a correção de possíveis/eventuais erros de projeto, o que leva a evitar desperdício de tempo em redesigne e deixando de onerar novos custos ao projeto.

As características do projeto da ferramenta, condições de contorno aplicadas às simulações são apresentadas a seguir.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A chave T foi dimensionada para que pudesse ser leve e retrátil para ser carregada por um funcionário em uma mochila, e que permita abrir as duas medidas de válvulas subterrâneas. Com as ferramentas convencionais de 1,6 m e com aproximadamente 12 kg, não seria possível a sua utilização. Logo, o projeto conceitual é representado nas figuras 1 e 2.

Identificação dos itens:

1. Alavanca
2. Eixo com encaixe 1
3. Luva
4. Pinos
5. Elemento de ligação
6. Eixo 2
7. Trava de fixação luva
8. Eixo com encaixe 2

FIGURA 1. Projeto conceitual da chave T. Imagem a direita, vista explodida; a esquerda, ferramenta montada. Fonte: Autores (2019).

FIGURA 2. Chave T recolhida para transporte. Fonte: Autores (2019).

2.1 Memorial de cálculo

Nesta seção são apresentadas todas as equações utilizadas para o dimensionamento dos componentes mecânicos da ferramenta desenvolvida no trabalho.

2.1.1 Cálculos relativos à alavanca

O fator de segurança é o primeiro aspecto de dimensionamento a ser definido, o qual deve estar de acordo com as exigências de serviço do equipamento. Conforme Souza (1991), este será igual a 1,5, sendo o indicado para ferramentas sem risco operacional direto e que possuem cargas aplicadas lentamente e sem oscilação de esforços. No que diz respeito as tensões, tem-se que a tensão limite deve ser igual a tensão máxima de escoamento. Considera-se que a nova ferramenta será fabricada com aço 1010 (mais leve e barato em relação ao aço 1020 da ferramenta convencional), o que resulta numa tensão admissível de 120 MPa.

Para girar o eixo da válvula subterrânea, foi medido pelo torquímetro que a força necessária em uma das alavancas é de 80Nm. Logo, o momento fletor pode ser considerado, uma vez que a aplicação de força ocorre em apenas um dos lados da alavanca.

Com a mesma relação do momento fletor, é possível descobrir a força concentrada aplicada em apenas um lado do braço da alavanca para realizar o torque necessário. O braço da alavanca possui 300mm em cada lado. Assim, obtém-se uma força concentrada de 266,66 N. Tendo como base que o tamanho total da alavanca é de 600 mm, a força aplicada em cada um dos braços será de 133,33 N.

Considerando que a alavanca será um tubo vazado com diâmetros externo e interno de 20 mm e 17 mm respectivamente, o módulo de resistência à flexão em tubos poderá ser obtido através da equação 1.

$$Wt = \pi \cdot \frac{D^4 - d^4}{32 \cdot D}, \quad (1)$$
$$Wt = \pi \cdot \frac{0,020^4 - 0,017^4}{32 \cdot 0,02},$$

$$Wt = 3,754154 E - 7 .$$

A tensão máxima atuante na alavanca não deve exceder a tensão admissível do material considerado (120 MPa), sendo determinada através da equação 2.

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{Mf}{W_t}, \\ \sigma_{max} &= \frac{80}{3,754154 E - 7}, \\ \sigma_{max} &= 213,097 MPa.\end{aligned}\tag{2}$$

Se a tensão atuante for concentrada em apenas um braço da alavanca, ela será de 213,097MPa, superior a tensão admissível do projeto. No entanto, tratando-se de uma alavanca sujeita a um binário de forças onde a resultante deve ser um momento fletor de 80Nm cada parte da alavanca sofrerá uma tensão máxima calculada de 106,548MPa (213,097/2), estando abaixo da tensão admissível do material.

2.1.2 Cálculos relativos ao eixo (alma)

A alma da chave “T” está sujeita a um momento torsor, decorrente de uma força tangencial de 5333,33 N, exatamente como um eixo-árvore. Através do movimento da alavanca, esse eixo sofre um torque em uma das extremidades e um contra torque na outra extremidade.

A força tangencial exercida em cada extremidade da alavanca é igual a 266,66N e com o raio do tubo igual a 3 cm, tem-se um momento torsor resultante de 80N.m. Devido suas características geométricas, o eixo é cilíndrico oco, portanto, possui momento polar de inércia 2,2641 E-8.

Adotando que no eixo da alma os diâmetros externo e interno serão de 25 e 20mm, respectivamente, a tensão cisalhante máxima é de 88,33MPa. Nota-se que tensão cisalhante máxima fica abaixo do limite de escoamento do aço SAE 1010.

2.1.3 Cálculos de acoplamento entre alma e alavanca

A alavanca da ferramenta tipo T será ligada a alma por meio de um engate tipo espiga (forma quadrada). O dimensionamento de altura de engate, bem como largura das paredes de contato, deve obedecer aos cálculos de resistência mecânica. Conforme Melconian (2012), as equações devem utilizar fatores x e y para largura e altura de dimensão respectivamente. Os fatores apresentados serão para o Aço Série DIN 5463 com tipo de ligação de forma, conforme será o engate da espiga da

ferramenta. Os fatores utilizados para x estão entre o intervalo de 0,13 a de 0,21, enquanto que para y estão entre 0,12 e 0,16. As equações 3 e 4 representam a altura e espessura para o dimensionamento de encaixe de ligação da alavanca e alma, respectivamente. Vale ressaltar que algumas restrições devem ser impostas à geometria, as quais são que a largura mínima de parede para o engate é de 1,80 mm e a altura mínima da parede é de 1,37 mm.

$$L = 2X. \sqrt[3]{Mtor}, \quad (3)$$
$$L = 2 * 0,21. \sqrt[3]{80}.$$

$$h = 2Y. \sqrt[3]{Mtor}, \quad (4)$$
$$h = 2 * 0,16. \sqrt[3]{80}.$$

2.1.4 Cálculos relativos à tensão dos pinos na ligação dos eixos

No eixo superior, há dois engates para o parafuso. No inferior, há apenas um engate. Para os dimensionamentos do parafuso e dos engates, deve ser considerada a tensão de cisalhamento máxima que deve ser duplicada devido ao tipo do contato utilizado.

Por meio da tensão cisalhante é possível encontrar a área e o diâmetro do parafuso. Considera-se um fator de segurança igual a 1,5, a tensão cisalhante do material igual a 88,33 MPa e a força tangencial igual a 5.333,33 N. Assim, tem-se que a tensão de cisalhamento é de 58,88 MPa. Como posto anteriormente, devido ao contato, esse valor determinado para a tensão de cisalhamento deve ser duplicado. Logo, o valor da tensão cisalhante é igual a 117,73 MPa.

A relação da área pode ser encontrada pela divisão da força atuante sobre a tensão cisalhante, que resulta em 45,3mm², onde o diâmetro do parafuso é igual a 7,59 mm.

2.1.5 Análise preliminar

A partir dos cálculos, foi possível observar que para o modelamento da chave “T” com aço SAE 1010 e sujeita à um torque de 80Nm, com comprimento de 1600mm de alma e 600mm de alavanca e fator de segurança de 1,5, as dimensões dos tubos são:

- Para a alavanca um tubo de diâmetro externo de 30mm e interno de 25mm;

- Para a alma um tubo de diâmetro externo de 25mm e interno de 20mm;
- Nos engates de alavanca e alma: largura mínima de parede para o engate é de 1,8 mm;
- Altura mínima de parede para o engate é de 1,37 mm.

2.2 Parâmetros para modelagem

Os materiais utilizados na modelagem estão apresentados a seguir:

- Alavanca: Aço SAE 1010
- Eixo com encaixe: Aço SAE 1010
- Luvas: Aço SAE 1010
- Pinos: Aço SAE 1045
- Elementos de ligação: Aço SAE 1020
- Eixo 2: Aço SAE 1010
- Eixo com encaixe 2: Aço SAE 1010

Inicialmente, realiza-se uma simulação de elementos finitos utilizando o *software* Solidworks para a avaliação da chave T proposta no trabalho. Após a verificação inicial, as mesmas condições de contorno, materiais e geometria são importadas ao *software* Abaqus. Diferentemente do Solidworks, o Abaqus permite a simulação por elementos finitos de diversas estruturas, condições de contorno e análises. O *software* permite ao usuário a implementação de sub-rotinas que o customizam, com o intuito de simular, por exemplo, um comportamento de um material específico que modifique propriedades ao longo do tempo, efeito cíclicos de carregamento, processos de fabricação, implementação da formulação de elementos finitos entre outros.

Na Figura 3 pode ser visualizado o binário de forças aplicado nas extremidades dos braços da alavanca para simulação do torque de 80Nm.

FIGURA 3. Forças na alavanca com engate no eixo fixo. Fonte: Autores (2019).

A Figura 4 apresenta as condições de contorno de Dirichlet homogêneas aplicadas na extremidade inferior do eixo com encaixe 2. Não se permite nenhum movimento nessa face do modelo geométrico.

FIGURA 4. Ferramenta montada com engate interno fixo na válvula. Fonte: Autores (2019).

A Figura 5 apresenta o refinamento da malha gerado utilizando o *software* Solidworks. Este refino é maior para regiões que apresentem os maiores níveis de tensão como concentradores de tensões e locais onde há mudança de geometria.

FIGURA 5. Refinamento em ponto específico da malha. Fonte: Autores (2019).

O *Software Solidworks 2015 simulation* foi ajustado com os parâmetros a seguir

- Análise: Estática com carregamento lento de força
- Malha: Malha sólida
- Gerador de malha: Malha com base em curvas com alta qualidade
- Critério de análise de tensão: *Von Mises* unidade MPa
- Total de nós: 37495
- Total de elementos: 19172

Para a execução da análise por elementos finitos utilizando o *software* Abaqus v. 12-1, foram utilizadas as mesmas condições de contorno aplicadas ao modelo quando da simulação por meio do Solidworks.

O modelo da ferramenta foi discretizado utilizando o elemento tetraédrico com funções de forma quadráticas denominado C3D10 (*Continuum, three-dimensional with 10 nodes*). Basicamente, os mesmos parâmetros da malha utilizada no *software* Solidworks foram utilizadas para a discretização do domínio. No total, a malha possui 21622 elementos e 40362 nós, sendo muito semelhante a utilizada na primeira análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a simulação através do Solidworks, como pode ser observado na Figura 6, as tensões encontradas estão abaixo das tensões admissíveis do projeto. O ponto de maior tensão foi no

elemento de ligação com 214,659 MPa, sendo sua tensão admissível 233,33 MPa. Nos eixos de aço SAE 1010 a tensão máxima de von Mises foi de 71,55 MPa, abaixo da tensão admissível de 120 MPa. Por fim, a tensão encontrada nos pinos foi de 89,44 MPa, abaixo da tensão admissível de 353,33 MPa.

FIGURA 6. Análise de tensões de von Mises. Fonte: Autores (2019).

O maior deslocamento apresentado está nas extremidades do braço da alavanca, no valor de 19,5 mm em relação a posição inicial como pode ser observado na Figura 7.

FIGURA 7. Deslocamento máximo URES. Fonte: Autores (2019).

A máxima deformação elástica é apresentada no ponto de maior fragilidade da ferramenta, o qual é o elemento de ligação. A máxima deformação atingiu um nível de 0,001 mm/mm conforme se observa na Figura 8.

FIGURA 8. Deformação elástica. Fonte: Autores (2019).

Fazendo um comparativo com Ferramenta tipo “T” usual, Figura 9, observa-se

- Diminuição de massa em 4 vezes em relação a ferramenta usual, ferramenta usual possui 12,308 Kg mais 6,765 kg no eixo de contato sobressalente devido a encaixes diferentes de válvula.
- Melhor ergonomia no transporte, a nova ferramenta além de menor massa pode ser transportada usando uma área de aproximadamente 0,06m² e volume de 4,8 E -3m³, com uma haste de 0,6 m, sendo a ferramenta usual uma haste de 1.60 m.

Em observação a Figura 9, pode ser comparado as ferramentas montas e desmontadas para transporte, respectivamente o modelo projetado e o modelo usual em proporções exatas.

FIGURA 9. Ferramenta “T” projetada e modelo usual. Fonte: Autores (2019).

A Figura 10 apresenta o resultado obtido para a simulação realizada com o *software* Abaqus. O campo de tensões gerado é semelhante ao obtido anteriormente. O ponto de tensão mais elevada de von Mises está localizado no elemento de ligação superior e possui valor de 166,91MPa, abaixo da tensão admissível do material e daquele obtido na primeira análise com o *software* Solidworks. O máximo valor para a tensão de von Mises para os eixos com encaixe foi de 133,41MPa. Já os pinos e a alavanca apresentaram as intensidades mais baixas, sendo 62,70MPa e 36,96MPa, respectivamente.

FIGURA 10. Distribuição de tensões de von Mises (MPa) para a simulação do modelo da ferramenta com o *software* Abaqus. Fonte: Autores (2019).

A Figura 11 apresenta o campo de deslocamentos (mm) gerado devido a Força de 133,33N aplicada na alavanca da ferramenta. Nesta simulação, o deslocamento proporcionado pela aplicação do esforço foi menor que o gerado na primeira simulação, no valor de 14,17mm.

FIGURA 11. Deslocamentos (mm) gerados pela aplicação do carregamento nas extremidades dos braços da alavanca utilizando o *software* Abaqus. Fonte: Autores (2019).

Por fim, a Figura 12 apresenta a distribuição das deformações geradas pela aplicação do esforço no modelo analisado. A máxima deformação é apresentada para a região de contato entre o

eixo com encaixe e o elemento de ligação inferior. Esse ponto é avaliado como errôneo, pois conforme pode ser visualizado na vista em detalhe, há um contorno sem arredondamento em uma das abas do encaixe do eixo, o que gerou um concentrador de tensão no local. Esse contorno sem arredondamento não é considerado na fabricação da ferramenta, sendo um pequeno defeito na concepção da geometria via *software* Solidworks. O correto ponto de máxima deformação ocorrente no modelo, assim como na simulação realizada com o Solidworks, é apresentado na Figura 12 e está localizado no elemento de ligação superior.

FIGURA 12. Distribuições de deformações (mm/mm) ocorrentes na simulação via *software* Abaqus (a) para o modelo completo e (b) detalhe com o máximo valor encontrado para o contorno sem arredondamento. Fonte: Autores (2019).

FIGURA 13. Máxima deformação (mm/mm) ocorrida no elemento de ligação superior.

5. CONCLUSÕES

Pode-se dizer que o Abaqus apresenta maior robustez para fornecimento de resultados de simulações de elementos finitos que o Solidworks, visto que este possui um intuito muito maior de desenvolvimento de geometrias no ambiente CAD (*computer aided design*).

REFERÊNCIAS

- MELCONIAN, S.. Elementos de máquinas. Editora Érica, 10 ed., São Paulo, 2012.
- NORTON, R.L. Projetos de Máquinas. Editora Bookman, 4 ed., Porto Alegre, 2013.
- POPOV, E. P. Introdução à mecânica dos sólidos. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, EUA, 534 p., 1978.
- SOUZA, H. R. Resistência do Materiais ProTec. Editora F. Provenza, 6 ed., São Paulo, 1991.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.