



## OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE ARRUELAS LISAS UTILIZADAS PARA A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EM CONJUNTOS DE FIXAÇÃO MECÂNICA

**Mayra Leticia Alexandre Brollo** – mayra.brollo@gmail.com

**Flávio Bernardi Pacheco Corrêa** – flavio.bernardi@live.com

**Prof. Dr. William Manjud Maluf Filho** – wmaluf@fei.edu.br  
Centro Universitário FEI  
Av. Humberto Castelo Branco, 3972  
09850-901 – São Bernardo do Campo – SP

**Resumo:** *A arruela é um componente utilizado para fixação mecânica entre elementos. Apesar de estar presente em praticamente todas as uniões feitas por parafusos, é raro encontrar qualquer tipo de referência a essa peça na literatura de elementos de máquinas. Este trabalho tem por objetivo entender melhor como se dão as interações físicas na arruela quando em operação, de modo a permitir que uma otimização estrutural seja feita, reduzindo o custo do produto. Como estudo de caso, o modelo físico simulará um tipo de conector elétrico comercial, em que a arruela se apoia em uma mola. A arruela será mecanicamente solicitada através do torque de aperto de uma porca até o ponto de deformação plástica. Os valores de torque serão anotados, possibilitando a validação de um modelo numérico a ser simulado. Após validação do modelo numérico, a possibilidade de otimização da arruela em função de sua utilização será discutida.*

**Palavras-chave:** *Arruela. Otimização estrutural. Elementos finitos.*

### 1. INTRODUÇÃO

Em aplicações industriais, o uso de elementos de fixação é particularmente grande. Um setor fundamental da economia e que faz muito uso desses elementos é o setor energético, responsável pelo fornecimento de eletricidade tanto para a indústria quanto para a residência dos mais de 200 milhões de brasileiros.

Atualmente, o Brasil tem o consumo anual energético em cerca de 464 mil GWh, sendo a maior parte dele na indústria.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publica regulamentações sobre diversas áreas do conhecimento. Segundo a norma NBR 5474, cujo título é Conector elétrico e foi publicada em 1986, o conector elétrico é um dispositivo eletromecânico que faz a ligação elétrica, entre si e/ou a uma parte condutora de um equipamento, transmitindo ou não força mecânica e conduzindo corrente elétrica. Ou seja, é a peça responsável por conectar e derivar a tensão e a corrente elétrica proveniente das linhas de transmissão.

Organização



Promoção





Parte fundamental dos conectores elétricos é a arruela, que pode exercer diversos tipos de funções mecânicas na peça, como distribuição da tensão mecânica normal de aperto, amortecimento de vibrações ou trava dos componentes da união. Um exemplo de arruela é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Representação de arruela serrilhada



O objetivo dessa pesquisa é compreender como a arruela se comporta quando submetida aos esforços mecânicos, de forma a criar um modelo numérico confiável que torne possível verificar se os modelos comerciais de arruela oferecidos são os mais indicados para determinada aplicação. O estudo será voltado para o uso da arruela lisa em conectores elétricos, em especial conectores de engate rápido.

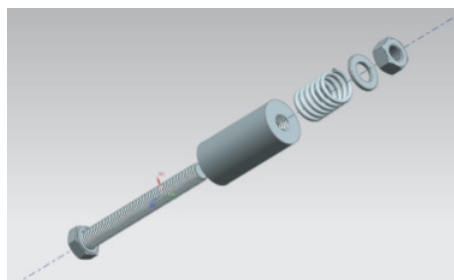
## 2. METODOLOGIA APLICADA

Para obtenção dos dados experimentais, um modelo físico contendo os seguintes itens será preparado:

- Parafuso de cabeça francesa M12 com 150mm de comprimento,
- Mola com extremidades em esquadro e 50mm de comprimento,
- Arruela lisa D13,
- Porca sextavada M13,
- Torquímetro.
- Morsa mecânica O parafuso será fixado pela morsa mecânica.

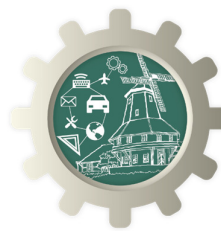
O modelo numérico será modelado em um software de Computer Aided Design (CAD) comercial e o Método dos Elementos Finitos (MEF) será aplicado para determinação de tensões e deslocamentos. Os resultados físicos e numéricos serão comparados, tornando possível que o modelo numérico seja refinado até que haja convergência de resultados. Um exemplo do modelo físico que será empregado é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Vista explodida de exemplo de modelo físico



Organização

Promoção



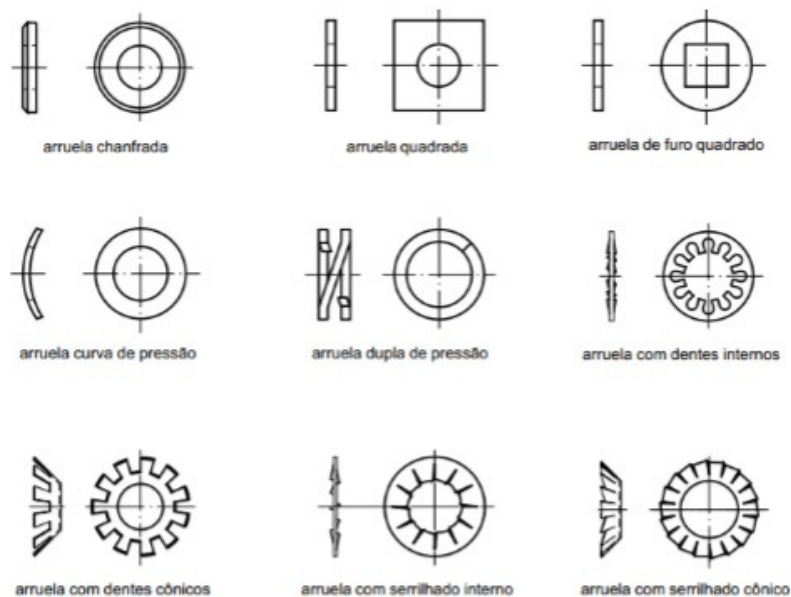
### 3. TIPOS DE ARRUELAS

A magnitude das forças envolvidas em apertos de elementos de fixação pode tornar-se um problema quando, ao invés de fixar os elementos, deforma-se a peça através da concentração de tensão em uma região de contato. Para isto foi criada a arruela lisa, componente que garante a imobilização do conjunto sem permitir que haja deformações significativas na peça, através da diminuição na pressão sobre a superfície (GREEN, 2007).

O sucesso ou falha de um projeto pode depender da seleção apropriada e uso de uniões. (NORTON, 2000, p. 757)

Existem diversos tipos de arruelas para funções específicas que podem ser manufacturados de acordo com a capacidade da empresa ou requisitos para fornecedores como projetos especiais, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Exemplos de outros tipos de arruelas



### 4. ESFORÇOS EM UNIÃO COM ARRUELAS

#### *Pré carregamento em uniões*

Segundo os autores Collins (2006), Shigley (1984), Norton (2000), quando uma junta aparafusada é apertada, o processo de aperto induz tração no parafuso através de uma força inicial de aperto ( $F_i$ ) e compressão nos flanges fixados com o mesmo valor de força. A carga  $P$  é a carga externa aplicada posteriormente durante a operação e a carga  $F_s$  é uma carga de cisalhamento.

O objetivo do pré-carregamento é de dar às partes em compressão melhor resistência à carga de tração externa e aumentar o atrito entre as peças, para resistirem melhor à carga de cisalhamento. A carga de cisalhamento não afeta a tração final no parafuso, podendo, portanto, ser desprezada no estudo do efeito da carga externa de tração na compressão das peças e na tração resultante no parafuso. Uma ilustração das forças descritas é apresentada na Figura 4.

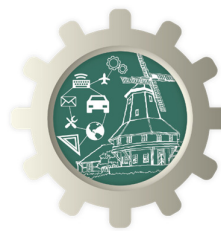
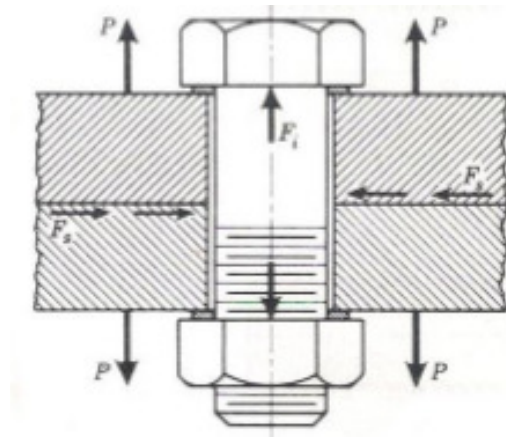


Figura 4 - Ilustração de uma união por parafuso



A tensão mecânica é definida por força sobre área (BEER, 1981):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

No qual:

$\sigma$  = tensão mecânica normal compressiva

F = força de aperto ou pré-carga

A = área da seção resistiva

### ***Torque de aperto***

Pelo fato de elementos de fixação normalmente serem roscados, a força de aperto na arruela é consequência de um torque de aperto na porca. Para o correto dimensionamento da arruela, é preciso verificar se o torque de aperto no parafuso não ultrapassa o limite de resistência ao cisalhamento do material da arruela. Esses valores de resistência são tabelados de acordo com o material da arruela.

O valor da tensão de cisalhamento fica definido como (BEER, 1981):

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (2)$$

Sendo:

$\tau$  = tensão de cisalhamento

T = torque aplicado

r = raio externo da arruela

J = momento polar de inércia

### ***Modos de falha***

Em posse das equações no item anterior e suas variações, é possível prever os dois modos de falha mais comuns em arruelas: esmagamento e cisalhamento.

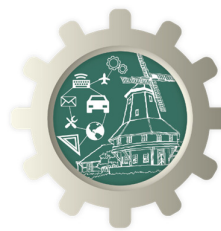
O esmagamento ocorre pela tensão normal proveniente do aperto da porca contra a arruela e o cisalhamento ocorre pela tensão cisalhante que surge entre a porca e a arruela.

Organização



Promoção





Um exemplo de arruela que falhou pela tensão de cisalhamento gerada pela corrente do comando de um veículo é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Arruela lisa que falhou devido ao cisalhamento



## 5. CONECTORES ELÉTRICOS

Os conectores elétricos são dispositivos eletromecânicos, de material condutor, utilizados para unir diferentes circuitos elétricos, com ou sem derivação de tensão, através de uma montagem mecânica. Os conectores são compostos por um corpo e condutores, onde o corpo faz a função de ligação entre os condutores. A conexão pode ser fixa, como no caso dos conectores à compressão, ou temporária, como nos conectores aparafusados, ou de engate rápido (MROCZKOWSKI, 1998).

Os conectores elétricos são divididos de acordo com o tipo e área de atuação.

Principais tipos:

- Aparafusado: Conector e condutor são unidos por uma ligação aparafusada.
- Soldado: Os condutores são unidos através de um molde com material explosivo.
- Compressão: O condutor e conector são unidos através de uma ou mais compressões.
- Engate rápido: O condutor e conector são unidos por um sistema de mola.

O modelo simulado será o de um conector de engate rápido, onde a arruela lisa ficará apoiada em uma mola, a qual é responsável por manter os dois corpos unidos e prendendo os condutores.

## 6. MODELAGEM 3D E ANÁLISE ESTRUTURAL POR MEF

O Método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica utilizada para se obter resultados sobre o comportamento físico de uma estrutura quando submetida a um ou mais esforços mecânicos (HUEBNER, 1975).

Por tratar-se de uma aproximação, é fundamental que uma rotina de cálculo seja executada de forma a obter-se um resultado fiável e que reflita o fenômeno físico.

Uma das rotinas efetuadas é a busca pela convergência numérica da simulação. Quanto mais elementos a malha discretizada possuir, maior o número de nós e, portanto, mais precisa é a simulação. Contudo, produtividade é um fator de extrema importância na indústria competitiva atual, e um número muito grande de elementos implica em um grande tempo computacional necessário para que a simulação seja concluída. Cada nó da malha possui 1 ou mais graus de liberdade (GL), que são os possíveis sentidos nos quais pode haver deslocamento. No MEF, cada GL representa uma equação matricial, portanto, para uma geometria com  $n$  GL, será necessário que a unidade de processamento resolva um sistema com  $n$  incógnitas. Os nós de cada tipo de estrutura estão representados na Figura 6.

Organização

Promoção

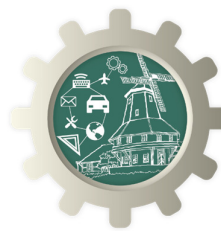
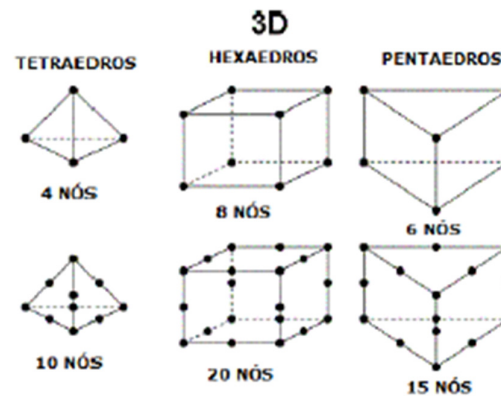


Figura 6 - Tipos de nós em elementos 3D

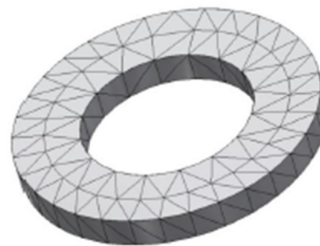


### ***Escolha do tipo de elemento discreto***

Para uma análise correta utilizando MEF, é importante selecionar corretamente o tipo de elemento discreto a ser utilizado na malha. Segundo Silva (2009), o que determina a escolha do elemento é a geometria da peça e o tipo de carregamento. Utiliza-se elementos 1D para barras e vigas, que são submetidas à esforços mecânicos em apenas uma direção, como tração axial na barra e flexão na viga. Para elementos do tipo chapa, cuja espessura é desprezível em relação às outras dimensões, utiliza-se elementos 2D, considerando os elementos triangulares para geometrias circulares e quadráticos para geometrias retangulares. E para elementos sólidos, onde comprimento, largura e profundidade são todos relevantes, os elementos 3D são os mais indicados (BATHE, 1996).

Um exemplo de como o software discretiza a arruela em elementos 2D triangulares é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de arruela lisa discretizada com elementos triangulares 2D.



## **6.1 MODELO FÍSICO**

O experimento físico consistiu na aplicação de um carregamento mecânico controlado em uma arruela através de torque em uma porca até que alguma deformação fosse visível. O controle do torque foi feito através de um torquímetro, onde foi possível fazer a leitura do carregamento aplicado na porca.

Após ter o conjunto montado, o mesmo foi fixado em uma morsa mecânica, garantindo que todas as medições fossem feitas na mesma condição, alterando-se apenas a arruela.

O conjunto montado é apresentado na Figura 8.

Organização

Promoção

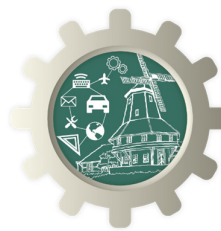


Figura 8 - Conjunto montado



### ***Coleta de dados***

O teste foi realizado 10 vezes, de forma a obter-se um valor médio para a deformação da arruela. Isso evita que o resultado final seja afetado por uma medição incorreta ou por uma arruela que não atenda às exigências da norma DIN 125.

Para a medição da deformação da arruela, antes de cada teste, o paquímetro foi zerado na espessura do item, permitindo que, após o experimento, fosse possível medir o quanto a arruela se deslocou. Esse método evita pequenos erros decorrentes da subtração da espessura do acessório da deformação final, já que a espessura fica armazenada no paquímetro.

Os dados do teste estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados experimentais

Teste	Torque aplicado [Nm]	Força de aperto [N]
1	25,0	9615,38
2	27,0	10384,62
3	25,5	9807,69
4	24,0	9230,77
5	26,0	10000,00
6	26,5	10192,31
7	25,0	9615,38
8	25,5	9807,69
9	26,0	10000,00
10	25,5	9807,69
<b>Média</b>	<b>25,6</b>	<b>9846,15</b>

Como em nenhum dos testes a arruela apresentou sinais de falha por cisalhamento, na simulação por MEF o conjunto será testado apenas para falha em função da força de aperto, onde a simulação será validada de acordo com a deformação apresentada pela aplicação de carga mecânica normal de compressão na arruela.

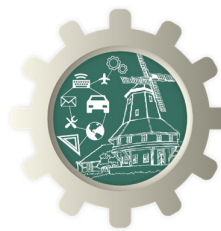
Para a simulação será considerado como força de aperto 9846,15 N e a deformação esperada é de aproximadamente 1,50 mm. A diferença pressuposta deve-se às condições impostas ao software, como total concentricidade entre parafuso, mola e arruela, o que é impraticável para o experimento com o modelo real.

Organização



Promoção





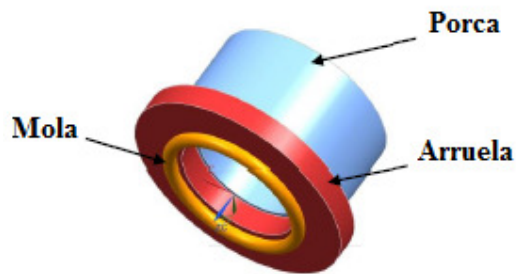
## 6.2 MODELO NUMÉRICO

Visando diminuir a complexidade do sistema, algumas hipóteses simplificadoras foram impostas ao modelo 3D e à simulação:

- Conjunto mola, arruela e porca perfeitamente concêntrico
- Total contato entre mola e arruela
- Carga axial uniformemente distribuída ao longo da porca
- Fixação do conjunto perfeitamente vertical
- Geometria da porca simplificada

O modelo 3D é demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo 3D



A porca teve sua geometria simplificada buscando diminuir o tempo computacional de simulação. Os valores para construção do modelo 3D respeitam as normas DIN 125 para arruela lisa D13 e DIN 934 para porca M12. O segmento de mola foi desenhado de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante:

- Diâmetro interno = 13,6 mm
- Diâmetro externo = 16,4 mm
- Diâmetro da seção circular = 1,4 mm

### *Verificações e refino da malha*

Durante a aplicação de malhas para análise por MEF, é importante verificar se o nível de distorção da malha criada é aceitável ou se pode tornar a simulação muito imprecisa. Para tanto, é feito o cálculo do inverso da determinante da matriz jacobiana, sendo que esse valor deve ser menor ou igual a 5 (Bucki, 2009). Para ganhar tempo computacional, a razão jacobiana (RJ) é verificada somente nas regiões críticas da peça, evitando que o número de elementos seja demasiado alto, demandando muito tempo para que a simulação seja feita.

Portanto, o nível de distorção da malha é menor que 5 e não interferirá de maneira significativa nos resultados apresentados

O processo se repetiu 6 vezes até que houve convergência dos resultados.

A verificação da RJ na malha da arruela apresentou distorção máxima de 1,67.

## 7. RESULTADOS

Após o processo de convergência da malha, agora é possível comparar os resultados obtidos com os testes executados no modelo físico e validar o modelo numérico proposto.

A deformação máxima apresentada foi 1,48 mm, conforme

O resultado obtido para deformação da arruela é condizente tanto em magnitude quanto em localização com o modelo físico do experimento. O perfil da arruela após a solitação é bastante similar ao apresentado durante os ensaios no modelo prático, como representado na Figura 10.

Organização



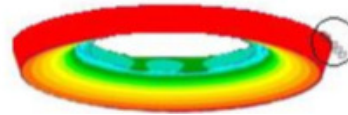
Promoção







Figura 10 - Convergência de resultados entre modelo físico e numérico



## 8. PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO

Dos modelos físicos e numéricos, é possível observar que, na condição proposta, a arruela se comporta como uma viga engastada, apresentando maior deformação na extremidade livre e maior tensão na extremidade fixa. Tendo esse modelo numérico validado, é possível iniciar uma rotina de otimização para qualquer arruela. É necessário conhecer:

- Torque de aperto
- Dimensões da peça a ser analisada
- Material
- Condições de operação
- Vínculos entre a arruela e outras peças que fazem parte do conjunto de fixação
- Limite de escoamento e resistência do material

Com os parâmetros acima conhecidos, é possível simular o comportamento da arruela durante a solicitação mecânica e observar se ela age como um componente superdimensionado, subdimensionado ou corretamente dimensionado. Os valores de máxima tensão mecânica e deformação indicam se o componente está próximo ou não de falhar. Caso a máxima tensão seja inferior à tensão mecânica admissível da arruela, pode-se variar a espessura da arruela e repetir a simulação verificando se, na nova condição, o componente ainda opera dentro da tensão mecânica admissível. Esse processo visa diminuir a quantidade de material da arruela, otimizando o componente para a aplicação proposta.

No modelo de conector utilizado para o estudo a arruela lisa apresentou falhas mecânicas devido ao torque de aperto no momento da montagem do conjunto. O presente trabalho ainda permite apresentar algumas possíveis soluções técnicas que o modelo numérico pode simular:

- Variar a espessura da arruela até que a mesma não apresente falhas mecânicas
- Variar o material da arruela de forma a aumentar seu limite de resistência mecânica

A alteração dos parâmetros acima pode ser inserida na simulação por MEF de forma a tornar possível a avaliação do impacto de cada uma no componente.

## 9. CONCLUSÃO

Após reunir todo material de pesquisa, determinar uma metodologia e executar os testes nos modelos físico e numérico, conclui-se que, utilizando elementos do tipo sólido no MEF, é possível determinar o comportamento de arruelas mediante carregamentos estáticos, ainda que sob condições pouco usuais, como a arruela apoiada em uma mola. Os resultados obtidos foram satisfatórios e apresentam uma solução de otimização para um componente que tem pouquíssimas referências na literatura acadêmica. A otimização de arruelas, componente utilizado em larga escala, torna-se uma alternativa atrativa que pode produzir uma redução significativa de custos e consequente melhora na saúde financeira de qualquer empresa.

A rotina de otimização do componente, discutida nessa pesquisa, pode ser fundamental para decidir se as arruelas oferecidas em especificações normalizadas são, de fato, adequadas à aplicação que estão sujeitas, abrindo a possibilidade de negociação entre empresa e fornecedor, em busca de redução de material e consequente redução de preço.

Organização



Promoção





AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI B 18.2.2: Square and Hex Nut. New York, 1987

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI B 27.2: Plain Washers. New York, 1984

BEER, F. P., JOHNSTON, E. R. Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics, Nova Iorque: McGraw-Hill, 1981

CALLISTER JR., W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

COLLINS, J. A. Projeto mecânico de elementos de máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CORRÊA, P. F., Otimização estrutural de arruelas lisas utilizadas para a distribuição de tensão em conjuntos de fixação mecânica. São Paulo: centro universitário FEI, 2015.

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. São Paulo: Prentice Hall-Br, 2003

HUEBNER, K. H. The Finite Element Method for Engineers. New York: John Wiley & Sons, 1975

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 934: Hex nuts. Berlin, 1987.

NORTON, R. L. Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada. São Paulo: Artmed, 2000

SABONNADIÈRE, J. C. Elementos Finitos e CAE. São Paulo: Aleph, 1993

SHIGLEY, J. E. Elementos de Máquinas. Rio de Janeiro: LTC, 1984

### **STRUCTURAL OPTIMIZATION OF FLAT WASHER USED FOR STRESS DISTRIBUTION IN MECHANICAL ASSEMBLIES**

**Abstract:** *The washer is a component used for mechanical fixing between elements. Despite of being present in almost all unions made by screws, it is very rare to find any kind of reference to this part on the machine design literature. This work has as an objective to create a better understanding of the physical interactions on the washer when operating, aiming to reach a structural optimization in order to reduce costs of product and or service. As a case study, the physical model will simulate one commercial connector type, where a coil sustains the washer. The washer will be stressed through the tightening torque until plastic deformation starts. The torque values will be saved, making possible to validate a numeric model. After the numeric model validation process the optimization possibility according to the washer function will be discussed.*

**Keywords:** *Washer. Structural optimization. Finite elements.*

Organização



Promoção

