

Willyan Millnitz

**TÍTULO: ANÁLISE COMPUTACIONAL, VIA MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS, DO DESLIZAMENTO DE JUNTAS
APARAFUSADAS**

Florianópolis

2019



WILLYAN MILLNITZ

**TÍTULO: ANÁLISE COMPUTACIONAL, VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS, DO DESLIZAMENTO DE JUNTAS APARAFUSADAS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof^a. Otávio Augusto Alves da Silveira

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Millnitz, Willyan
Análise computacional, via Método dos elementos finitos, do deslocamento de juntas aparafusadas / Willyan Millnitz ; orientador, Otávio Augusto Alves da Silveira, 2019.
65 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.
Inclui referências.
1. Engenharia Civil. 2. Método dos elementos finitos. 3. Junta aparafusada. 4. Análise estrutural. I Alves da Silveira, Otávio Augusto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

WILLYAN MILLNITZ

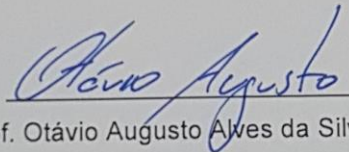
ANÁLISE COMPUTACIONAL, VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, DO
DESLIZAMENTO DE JUNTAS APARAFUSADAS.

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 17 de junho de 2019.

Prof^a. Luciana Rohde, Dr^a.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Otávio Augusto Alves da Silveira
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wellison José de Santana Gomes
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Rafael Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Marcelo Millnitz e Alcione Furtado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é dedicado especialmente à Alcione Furtado, Marcelo Millnitz e Bruno Furtado Nascimento, os maiores exemplos que tenho. Se um dia me tornar apenas uma parte do que vocês são, saberei que venci.

Também agradeço profundamente ao Prof. Otávio Augusto Alves da Silveira, pela paciência, parceria e conhecimento transmitidos nos últimos meses. Essas ações fizeram total diferença no desenvolvimento deste trabalho.

Dedico este trabalho também aos amigos Lauro Salvador Ribeiro Pires, João Eduardo Rodrigues Andrade, Lucas Maier Nunes, Luiz Gustavo Peres Guimarães, Moacir Saturnino Lopez Jr. e Christian dos Santos Januário pelo apoio inabalável durante todos esses anos.

Por fim, agradeço à Duany Silveira Marcello pelo companheirismo e dedicação excepcional. Você foi e vem se tornando cada vez mais fundamental, espero que essas sejam apenas as primeiras de muitas de nossas vitórias.

“Fights will go on as long as they have to”
(Fight Club)

RESUMO

Este é um estudo complementar do artigo *Joint slip in steel electric transmission towers*,(Ungkurapinan, 2002), o artigo em questão estuda o deslizamento de juntas aparafusadas em torres de transmissão, como próprio nome sugere, formulando equações que descrevem o comportamento das juntas mencionadas. Este trabalho apresentará análises mecânicas computacionais preliminares, via método dos elementos finitos, com o intuito de simular os experimentos apresentados no referido artigo. No presente trabalho, serão modeladas 8 conexões, cada uma possuindo configurações distintas. Essas conexões simulam o deslizamento de juntas aparafusadas com diferentes quantidades de parafusos e geometria, considerando não linearidades de contato, material e geométrica. A partir da aplicação de deslocamentos prescritos nas conexões, foram construídos gráficos de força por deslocamento que descrevem os trechos lineares, de deslizamento, e de plastificação nas juntas.

Este trabalho almeja expandir o conhecimento a respeito do comportamento das articulações já estudadas no referido artigo, além de tentar viabilizar modelos que possibilitem conhecer o comportamento de novas juntas. O uso do método dos elementos finitos para a modelagem mecânica fornece, ainda que a grosso modo, uma opção de análise, possibilitando assim uma tarefa mais simples, que não requer protótipos e experimentos de alto custo, para prever o comportamento das articulações.

Palavras-chave: deslizamento de junta; junta aparafusada; torres de linhas de transmissão; elementos finitos; simulação numérica..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre abordagens de estruturas. Fonte: Autor (2019).....	18
Figura 2 - Exemplo de viga com 2 elementos e 3 nós. Fonte: Oliveira de Azevedo (2019).....	21
Figura 3 - Exemplos de elementos. Fonte: Frei (2013)	22
Figura 4 - Exemplo de discretização de malhas. Fonte: Frei (2013)	23
Figura 6 - Curva tensão x deformação e limite da elasticidade. Fonte: Bayer (2013)	24
Figura 7 - Efeito de contração lateral em uma barra tracionada. Fonte: González (2018).....	25
Figura 8 - Concentração e normalização de tensões no decorrer de uma barra tracionada.....	27
Figura 9 - Comparativo os tipos de força de atrito. Fonte: Martendal (2017)	28
Figura 10 - Contato entre duas superfícies (Martendal, 2017)	29
Figura 11 - Localização do parafuso (Ungkurapinan, et al 2000)	31
Figura 12 - Exemplo de cantoneira em L. Fonte: internet.....	33
Figura 13 - Localização dos furos. Fonte: Ungkurapinan (2002).....	34
Figura 14 - Divisão de carregamento em juntas com 3 parafusos. Fonte: Ungkurapinan (2002).....	38
Figura 15 - Divisão de carregamento em juntas com 4 parafusos . Fonte: Ungkurapinan (2002).....	38
Figura 16 - Divisão das faces que estão em contato com outros corpos. Fonte: Autor (2019).....	40
Figura 17 - Separação das faces que compõe os furos. Fonte: Autor (2019)	40
Figura 18 - Demonstração de discretização de um parafuso. Fonte: Autor (2019) ...	41
Figura 19 – tensão x deformação do material que compõe as chapas. Fonte: Autor (2019).....	42

Figura 20 - tensão x deformação do material que compõe os parafusos. Fonte: Autor (2019).....	43
Figura 21 - Malha gerada para os modelos de 1 parafuso. Fonte: Autor (2019)	47
Figura 22 - Malha gerada para os modelos de 2 parafusos. Fonte: Autor (2019)	48
Figura 23 - Malha gerada para os modelos de 3 parafusos. Fonte: Autor (2019)	48
Figura 24 - Malha gerada para os modelos de 4 parafusos. Fonte: Autor (2019)	48
Figura 25 - Exemplo de posicionamento das condições de contorno (A face engastada; B face onde o deslocamento é aplicado; C, D e E são pré-cargas). Fonte: Autor (2019)	53
Figura 26 - Curva idealizada. Fonte Ungkurapinan (2002).....	54
Figura 27 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 1N. Fonte: Autor (2019).....	55
Figura 28 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 1M. Fonte: Autor (2019).....	55
Figura 29 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 2N. Fonte: Autor (2019).....	56
Figura 30 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 2M. Fonte: Autor (2019).....	56
Figura 31 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 3N. Fonte: Autor (2019).....	57
Figura 32 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 3M. Fonte: Autor (2019).....	57
Figura 33 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 4N. Fonte: Autor (2019).....	58
Figura 34 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 4M. Fonte: Autor (2019).....	58
Figura 35 - Configuração final das juntas com 1 parafuso. Fonte: Autor (2019)	61
Figura 36 - Configuração final das juntas com 2 parafusos. Fonte: Autor (2019).....	61
Figura 37 - Configuração final das juntas com 3 parafusos. Fonte: Autor (2019).....	62
Figura 38 - Configuração final das juntas com 4 parafusos. Fonte: Autor (2019).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação comprimento e número de parafusos. Fonte: Autor (2019).....	32
Tabela 2 - Relação corpos de prova e pontos de interesse. Fonte: Ungkurapinan (2002).....	36
Tabela 3 - Nível de discretização dos modelos. Fonte: Autor (2019)	49
Tabela 4 - Demonstrativo de deslocamento em cada passo do software. Fonte: Autor (2019).....	51
Tabela 5 - Coeficientes de torque (Budynas & Nisbett, 2016).....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D – Uma dimensão

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

A – Área

CAD – *Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)

D – diâmetro nominal do parafuso

E – Módulo de elasticidade

F – Força

Fat – Força de atrito

K – Rigidez

Kt – coeficiente de torque

ΔL – Variação de comprimento

L – Comprimento inicial

Mm – Milímetro

MEF – Método dos elementos finitos

N – Força normal

P – pré-carga

Pa – Pascal (N/M)

T – Torque

u – Deslocamento

LISTA DE SIMBOLOS: LETRAS GREGAS

ε – Deformação

ε_{lat} – Deformação lateral

ε_{long} – Deformação longitudinal

σ – Tensão axial

μ_e – Coeficiente de atrito estático

μ_d – Coeficiente de atrito dinâmico

ν – Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVAS	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Geral	15
1.2.2 Específicos	15
1.3 METODOLOGIA.....	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	18
2.1.1 Detalhamento matemático	19
2.1.2 Malha	22
2.2 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS.....	23
2.2.1 Tensão	23
2.2.2 Lei de Hooke	24
2.2.3 Princípio de Sant Vénant	26
2.3 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR DAS ESTRUTURAS.....	27
2.4 LEIS DE NEWTON.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.5 ATRITO	28
3 DESCRIÇÃO DO ARTIGO	30
3.1 ESTUDO EXPERIMENTAL.....	30
3.2 GEOMETRIA.....	32
3.2.1 Cantoneira	32
3.2.2 Parafusos	33
3.2.3 Furos	33
3.3 MATERIAL	34
3.4 CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES.....	34
4 DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO SOFTWARE	39
4.1 GEOMETRIA.....	39
4.2 MATERIAL	41
4.3 CONEXÕES	43
4.3.1 Colada	44

4.3.2 Com atrito	44
4.3.3 Sem atrito	44
4.4 MALHA	45
4.4.1 Métodos	46
4.4.2 Refinamentos	46
4.4.3 Malha de conexão	47
4.5 OBSERVAÇÕES E RESULTADOS	47
4.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO	49
4.6.1 Engaste e deslizamento	49
4.6.2 Pré-carga no parafuso	51
4.7 COMANDO (APDL)	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.8 RESUMO.....	53
5 RESULTADOS E COMPARAÇÃO	53
5.1 MODELOS COM 1 PARAFUSOS	55
5.2 MODELOS COM 2 PARAFUSOS	56
5.3 MODELOS COM 3 PARAFUSOS	57
5.4 MODELOS COM 4 PARAFUSOS	58
6 CONCLUSÃO	59
7 ANEXO.....	61
8 REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O estudo da deformação por deslizamento nas juntas aparafusadas em torres de transmissão é importante, pois ocorre com pequenos carregamentos, aumenta as deflexões e agrava os efeitos de vibração e fadiga, porém não influencia de maneira significativa a resistência final.

Estruturas de torres são frequentemente submetidas a movimentos que os softwares de análise estrutural comuns não consideram. Ao não considerar o efeito de deslizamento do parafuso nas juntas, a análise supõe forças de membros não realistas. No entanto, sob condições de campo, o escorregamento nas juntas resulta em redistribuição substancial das forças da torre e as forças reais dos membros são substancialmente menores do que as previstas pela análise.

O presente trabalho usa o método dos elementos finitos para abordar o deslizamento de juntas aparafusadas em torres de transmissão, dividindo em pequenos elementos as cantoneiras e parafuso(s) que compõe as conexões. Com esses elementos devidamente descritos, analisa-se o equilíbrio em cada um deles e desta forma se obtém o deslocamento individual de cada um deles. Com a posse dos deslocamentos individuais se obtém o campo de deslocamentos total da articulação.

O intuito final deste trabalho é comparar os resultados obtidos via MEF com os resultados do artigo *Joint slip in steel electric transmission towers*,(Ungkurapinan, 2002) que também faz a análise em laboratório das mesmas juntas.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Optar por solucionar problemas estruturais de maneira numérica vem se popularizando muito nos últimos anos. Este fenômeno deu-se em decorrência de vários aspectos, dentre os quais se destacam: custo, facilidade e precisão. Um dos métodos que ganhou destaque foi o Método dos Elementos Finitos (Alves Filho, 2000).

Apesar do MEF ser amplamente difundido e aplicado, no nível de graduação poucos são os estudos que comparam os resultados obtidos em MEF com os resultados obtidos experimentalmente, geralmente as comparações são feitas com os resultados das equações diferenciais de modelos mais simples.

Nesse contexto, o presente trabalho visa contribuir para os estudos de engenharia estrutural e em especial o deslizamento de juntas aparafusadas utilizadas em torres de linhas de transmissão. A maneira adotada para isso será fazendo uma comparação entre resultados de um experimento em laboratório e de sua modelagem via MEF.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção aborda-se os objetivos que este trabalho se destina. Com a finalidade de melhor entendimento, esta seção se divide em objetivo geral e objetivos específicos. Ambos serão melhor detalhados a seguir.

1.2.1 Geral

O objetivo principal deste trabalho é modelar por meio do método dos elementos finitos o deslizamento de juntas aparafusadas de torres de linha de transmissão.

1.2.2 Específicos

- Realizar a modelagem tridimensional, não linear geométrica e material, das cantoneiras e do(s) parafuso(s) que compõem cada uma das configurações de junta que deseja-se analisar;
- Gerar curvas de deslocamento por força para cada uma das configurações analisadas, assim como uma tabela de resumo;

- Comparar os resultados das curvas, em especial o ponto de deslizamento da junta, geradas pelas análises computacionais com os resultados obtidos em laboratório para tentar validar o modelo computacional.

1.3 METODOLOGIA

Sucintamente pode-se dizer que este trabalho se trata da reprodução, via MEF, dos resultados do artigo *Joint slip in steel electric transmission tower*. (Ungkurapinan, 2002) Pelo fato deste artigo não ter sido previamente pensada para o tipo de análise que será realizada neste trabalho, optou-se por dividir este trabalho em 3 fases.

Inicialmente foi feito o mapeamento do problema e aprofundamento dos principais fenômenos que envolvem o tema em questão, paralelamente a isto foi feita a revisão bibliográfica.

Após este mapeamento inicial foram feitas as considerações dos parâmetros não informados no artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) e que se faziam necessários para que o Ansys 16.0 pudesse resolver o problema. Desses parâmetros destacam-se: o coeficiente de atrito entre as placas, a geometria do parafuso, a pré-carga no parafuso e as propriedades mecânicas dos elementos da junta. Simultaneamente com a resolução desses parâmetros foram feitas algumas simulações, no modelo com apenas um parafuso, para avaliar o quanto a alteração de cada parâmetro influenciava no resultado final.

Munido com os dados necessários para fazer a simulação no modelo mais simples, o passo final foi reproduzir essas configurações nas outras juntas que possuíam maior número de parafusos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em 5 capítulos complementados por 1 anexo. Uma apresentação sucinta desses capítulos é fornecida a seguir, visando dar ao leitor um resumo geral do trabalho.

O capítulo 1 é composto por: introdução, justificativa, objetivos, metodologia e organização do trabalho.

No capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica e o embasamento dos assuntos que norteiam o trabalho, sendo eles: método dos elementos finitos, resistência dos materiais, comportamento não linear dos materiais e atrito.

No capítulo 3 o artigo *Joint slip in steel electric transmission towers*, de (Ungkurapinan, 2002) no qual este trabalho fará a modelagem é resumido, explicando como foram feitos os testes em laboratório, quais as características mecânicas dos materiais usados e detalhando outros pontos importantes do mesmo.

O capítulo 4 é destinado à descrição do modelo computacional e suas configurações de entrada que foram inseridas no *software* Ansys 16.0, juntamente com a suas justificativas.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados computacionais, juntamente com a comparação entre o resultado computacional e o obtido em laboratório para validação do modelo e obtenção dos objetivos elencados para este trabalho.

Após todos os capítulos será demonstrada a conclusão deste trabalho, as propostas para trabalhos futuros e, por fim, as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Conseguir dimensionar uma estrutura, não é consequência apenas do conhecimento de um aparato matemático geralmente complexo, mas também é fruto da capacidade que o engenheiro tem de entender a natureza física do fenômeno que se propõe a resolver. Identificar os pontos cruciais do problema e elencar hipóteses sobre o problema em questão são a base para um bom desenvolvimento de projeto (Alves Filho, 2000).

A maioria das estruturas reais são muito complexas para serem analisadas por técnicas como a Teoria Clássica das Placas, em decorrência das suas condições de contorno serem limitadas e abrangerem configurações extremamente bem definidas. Para estruturas gerais, a solução analítica comumente torna-se impossível, obrigando o engenheiro a adotar grandes e excessivas simplificações para encaixar-se nas expressões analíticas fechadas mencionadas anteriormente, gerando resultados pouco precisos. A solução encontrada para solucionar problemas de estruturas complexas foi utilizar métodos computacionais que necessitam de equações mais simples e fornecem resultados com aproximação razoável (Alves Filho, 2000) .

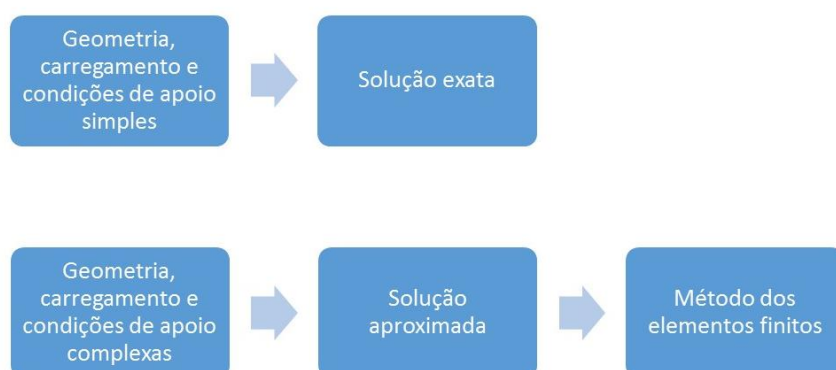


Figura 1 - Comparação entre abordagens de estruturas. Fonte: Autor (2019)

É natural da mente humana querer fracionar os problemas em pequenas parcelas, ou em seus elementos. Assim, surge a ideia de que entendendo o comportamento de cada elemento é possível entender o problema como um todo. Para um engenheiro, este é um caminho intuitivo de raciocínio e isso acarreta em implicações também nos métodos matemáticos utilizados para a descrição do comportamento dos sistemas (Alves Filho, 2000).

2.1.1 Detalhamento matemático

O MEF é baseado no processo de discretização, onde uma geometria contínua é modelada por *softwares* CAD (Projeto Assistido por Computador, tradução livre), é subdividida em uma quantidade finitas (isto que dá nome ao método) de elementos ligados entre si por nós, a junção de todos os elementos e nós é chamada de malha (Oliveira de Azevedo, 2016).

Nesta análise, cada elemento é tratado com uma mola que possui comprimento e rigidez determinados. Destaca-se que a acurácia dos resultados é fruto do quão bem definidos são os elementos e suas características. A partir destes parâmetros, utilizando-se as equações de resistência dos materiais que definem tensão e deformação Eq I, juntamente com a lei de Hooke Eq II chega-se na equação básica do Método dos elementos finitos Eq V (Oliveira de Azevedo, 2016).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{I}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{II}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{III}$$

Onde F é a força, A é a área da seção transversal, E é o módulo de elasticidade, σ é a tensão axial, ΔL é a Variação de comprimento, L é o comprimento inicial e ϵ é a Deformação.

Fazendo as devidas substituições chega-se em:

$$F = \left(\frac{E \cdot A}{L} \right) \cdot \Delta L \quad \text{IV}$$

Que pode ser finalmente reescrita de forma matricial como:

$$[F] = [k] \cdot [u] \quad \text{V}$$

Onde F é a matriz força, k é a matriz de rigidez, u é a matriz deslocamento.

A Eq V é utilizada em formato matricial, por se tornar mais fácil para um computador armazenar e operar um grande número de equações, possibilitando tratar forças e deslocamentos que não sejam apenas axiais (Alves Filho, 2000). Toda a sistematização é baseada na ideia de sistema local e sistema global de coordenadas, desta forma é possível estabelecer matrizes de rigidez para cada elemento e também para a estrutura de maneira global. Os deslocamentos nodais também são apresentados em sistema local e sistema global, com a equação de equilíbrio da estrutura no sistema global se encontra os deslocamentos nodais. Uma vez de posse dos deslocamentos nodais, as forças nas extremidades dos elementos são determinadas (Eloy Vaz, 2011).

Outro ponto importante é a determinação do grau de liberdade de cada elemento, que por definição em mecânica se trata dos conjuntos de deslocamentos ou rotações individuais que detalham completamente a posição deslocada ou deformada e a orientação do corpo ou do sistema (Tschiptschin, 2011). Juntamente com a determinação do grau de liberdade do elemento se obtém a ordem da matriz de rigidez, sendo um elemento finito que possua N

graus de liberdade terá sua matriz de rigidez quadrada e de ordem N (Alves Filho, 2000).

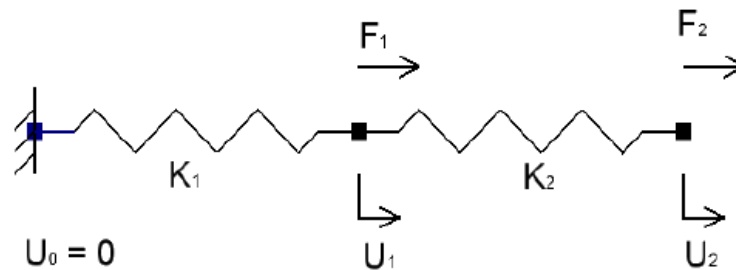


Figura 2 - Exemplo de viga com 2 elementos e 3 nós. Fonte: Oliveira de Azevedo (2019)

Discretização local de \$K_1\$:

$$\begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \end{pmatrix} \quad \text{VI}$$

Discretização local de \$K_2\$:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad \text{VII}$$

Discretização global da estrutura:

$$\begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad \text{VIII}$$

Acima podemos notar que a matriz de rigidez da estrutura foi montada a partir de sobreposição de cada nó de maneira que essa matriz dependerá da forma como os elementos estão dispostos na estrutura. Também pode-se notar que a mola, no âmbito isolado do elemento, se localiza entre dois nós (Alves Filho, 2000).

2.1.2 Malha

A malha de elementos finitos possui dois propósitos: discretizar a geometria subdividindo-a em elementos e delimitar o campo da solução para a física que está sendo resolvida (Frei, 2013).

A discretização do elemento pode ser feita com um número vasto de geometrias e leva em consideração o tipo de elemento (1D, 2D ou 3D) e os graus de liberdade que o mesmo possui (Oliveira Azevedo, 2016).

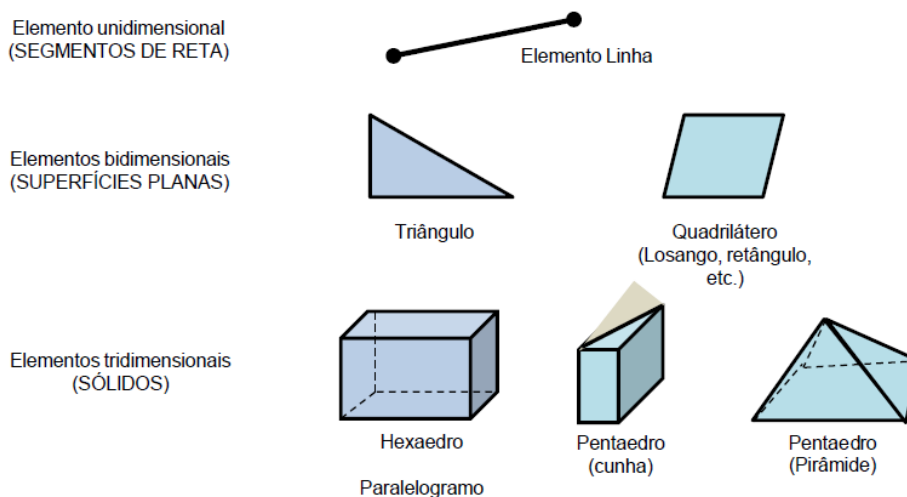


Figura 3 - Exemplos de elementos. Fonte: Frei (2013)

Independentemente do quão boa seja a discretização sempre existirá algum erro associado à geometria, bem como há uma aproximação da solução. Cabe ao engenheiro decidir o nível de discretização necessário, de forma a se maximizar a acurácia no resultado utilizando o menor gasto computacional possível (Frei, 2013).

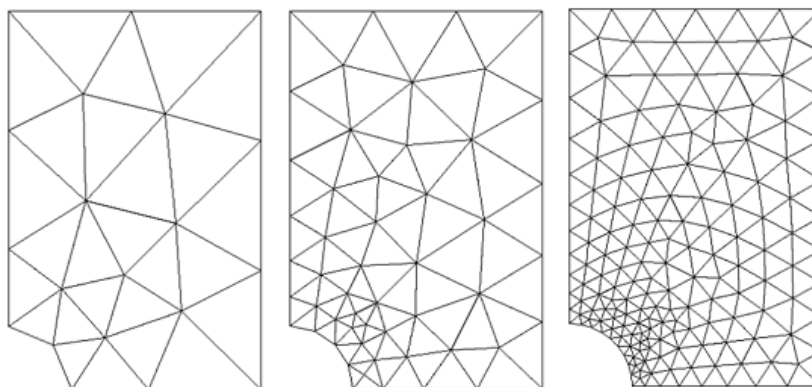


Figura 4 - Exemplo de discretização de malhas. Fonte: Frei (2013)

2.2 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Também conhecida como mecânica dos sólidos este é o ramo da mecânica aplicada que aprofunda os estudos sobre corpos sólidos sujeitos a carregamentos e tem como principal objetivo determinar tensões, deformações e deslocamentos. O entendimento desses comportamentos é fundamental para a segurança e economia de qualquer projeto estrutural (Gere, 2017)

2.2.1 Considerações

O comportamento das estruturas é formulado a partir das seguintes hipóteses básicas da teoria clássica:

- Todo corpo tem sua matéria distribuída de maneira contínua e totalmente uniforme, logo, não se considera qualquer heterogeneidade como falhas na microestrutura, poros, fissuras e etc... Obtendo assim tensões, deformações e deslocamentos contínuos.
- Todos os elementos que compõe o corpo possuem as mesmas propriedades físicas.
- Isotropia, as propriedades elásticas são as mesmas independentemente da direção.

Essas hipóteses permitem generalizar a distribuição das tensões ou das deformações (Timoshenko & Goodier, 1970).

As tensões são divididas em dois tipos: axiais e cisalhantes. Independente o tipo de esforço (torção, flexão, cisalhamento, compressão e tração), ele resultará em um tipo de tensão e terá deformação no seu sentido (Gere, 2017)

2.2.2 Lei de Hooke

Usualmente as estruturas são projetadas para sofrerem um intervalo de pequenas deformações. Este intervalo é chamado de elástico, pois o material se deforma conforme a carga de solitação, mas volta a sua configuração inicial quando a carga é retirada, não havendo nenhuma deformação plástica/permanente. O material não chega a sofrer plastificação e, muitas vezes, tem sua tensão diretamente proporcional a sua deformação, possuindo assim um comportamento dito como linear (Beer, 1989).

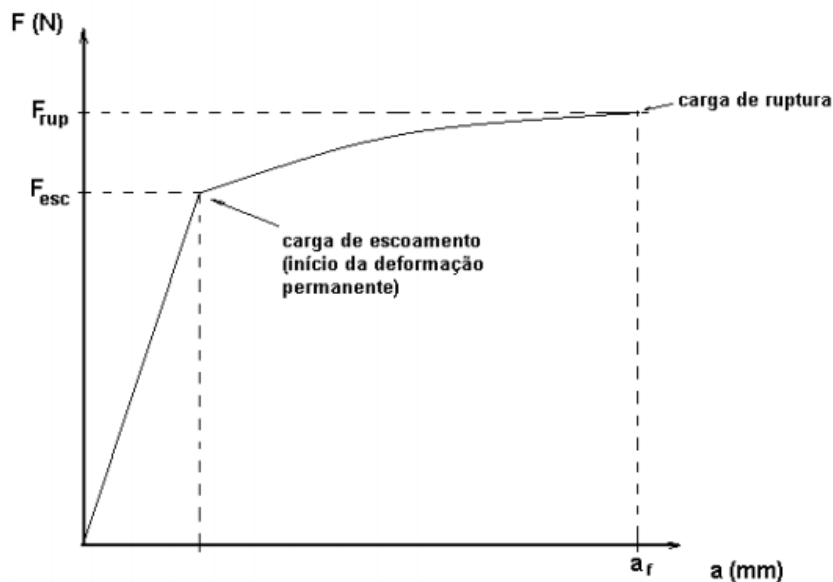


Figura 5 - Curva tensão x deformação e limite da elasticidade. Fonte: Bayer (2013)

Durante o regime elástico-linear, trecho correspondente a reta inicial da curva, a tensão é diretamente proporcional a deformação. A equação que

relaciona tensão e deformação se chama Lei de Hooke e é descrita com a seguir (Beer, 1989).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{II}$$

Onde E é conhecido como módulo de elasticidade ou módulo de Young que indica a rigidez à deformação do material, geralmente é expresso em Pascals, mas pode ser expressa em outra unidade equivalente, desde que seja igual a tensão σ . Enquanto ε é a deformação, relação entre a variação de comprimento e comprimento inicial, essa grandeza é adimensional (Luz, 2019).

Quando aplicado uma força axial de tração em um corpo, simultaneamente com o alongamento, o corpo sofre uma contração lateral. Já ao se aplicar uma força de compressão o oposto ocorre (Mendes, 2006).

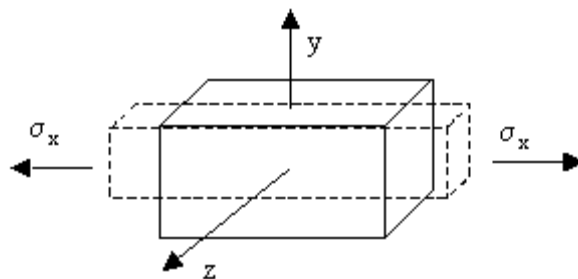


Figura 6 - Efeito de contração lateral em uma barra tracionada. Fonte: González (2018)

A razão entre a variação de comprimento entre duas direções ortogonais, sendo uma delas no sentido de aplicação da força, é chamada de coeficiente de Poisson e pode descrita por:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \quad \text{IX}$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson, ε_{lat} é a deformação lateral, ε_{long} é a deformação longitudinal

Com auxílio do coeficiente de Poisson pode-se desenvolver as Eq X, XI e XII que demonstram de maneira mais próxima a realidade, pois levam em consideração os efeitos de deformação ortogonais ao sentido da força como funciona a deformação de materiais, essas equações compõem a Lei de Hooke generalizada, seguem as equações mencionadas:

$$\varepsilon_x = + \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \text{X}$$

$$\varepsilon_y = - \nu \frac{\sigma_x}{E} + \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \text{IX}$$

$$\varepsilon_z = - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \text{X}$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson, E é o Módulo de elasticidade σ_x é a tensão axial no eixo x, σ_y é a tensão axial no eixo y, σ_z é a tensão axial no eixo z, ε_x é a deformação no eixo x, ε_y é a deformação no eixo y, ε_z é a deformação no eixo z.

2.2.3 Princípio de Saint Vénant

As equações clássicas da análise tradicional de resistência dos materiais servem para se calcular tensões em pontos suficientemente longes do ponto de aplicação da carga, pois elas desprezam os efeitos localizados nas transições geométricas bruscas. Para estas equações se tornarem válidas a região de análise tem que estar suficientemente longe de mudanças geométricas abruptas e dos pontos de aplicação da carga, este fenômeno é chamado de princípio de Saint Vénant (Meggiolaro, Topper, & Tupiassu Pinho de Castro, 2009).

Em situações onde cargas estão concentradas, os elementos vizinhos aos pontos de aplicação das forças ficam submetidos a grandes tensões enquanto elementos mais distantes são afetados por tensões

uniformes. Em função da concentração de cargas, grandes tensões e deformações específicas são observadas nas vizinhanças dos pontos de aplicação das forças, fato que não ocorre em elementos mais afastados (Beer, 1989). Em suma o princípio de Saint Vénant estabelece que as soluções e valores de tensão diferem de maneira significativa apenas na vizinhança imediata do ponto de aplicação das cargas (Chanduplatla & Belegundu, 2014).

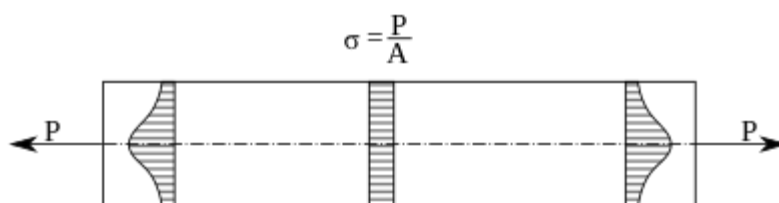


Figura 7 - Concentração e normalização de tensões no decorrer de uma barra tracionada

2.3 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR DAS ESTRUTURAS

Os comportamentos da natureza geralmente não são lineares, porém nossa forma de pensar tende a ser. Em se tratando de estruturas, a análise linear pode levar a alguns inconvenientes como o superdimensionamento e conseqüentemente o encarecimento da estrutura. Isto ocorre pois estruturas são comumente construídas por materiais que se plastificam e possuem uma resistência um pouco superior ao informado no catálogo e que dependem de fatores como grau de estaticidade, geometria da seção transversal e material (Ritto Corrêa, 2015).

Matematicamente evidencia-se uma análise não linear no método dos elementos finitos quando há alteração na matriz de rigidez [K]. Diferentemente de uma análise linear onde a rigidez do modelo é constante e tem suas equações montadas e resolvidas apenas uma vez, numa análise não linear há atualização da sua matriz de rigidez [K] enquanto o modelo está deformando, gerando um processo iterativo que aumenta de maneira significativa o tempo para obtenção de resultados precisos (Saldanha, 2017).

É comum e conveniente classificar o comportamento não linear de acordo com seus efeitos, dentre eles os 2 principais são:(Pereira, 2002):

- Não linearidade física - quando o material extrapola o limite elástico-linear e suas tensões deixam de serem proporcionais às deformações.
- Não linearidade geométrica - quando há grande deslocamento e/ou rotações, onde a deflexão de um membro possa resultar no surgimento de momentos fletores adicionais e/ou outros esforços, conhecidos como efeitos de segunda ordem.

2.4 ATRITO

Quando se empurra ou tenta-se empurrar algo que se encontra apoiado numa superfície, a interação entra as faces do corpo e da superfície faz com que haja uma resistência ao movimento, essa oposição ou resistência recebeu o nome de força de atrito ou simplesmente atrito. Esta força é paralela à superfície e aponta no sentido oposto ao do movimento ou tendência ao movimento (Halliday, Resnick, & Walker, 2016).

A medida que se aumenta o módulo da força aplicada, a intensidade da força de atrito estático, aumenta junto fazendo com que o corpo permaneça em repouso. Porém, esse fenômeno acontece apenas até um determinado limite de intensidade que quando atingido faz com que o bloco deslize e sofra aceleração (Halliday, Resnick, & Walker, 2016)

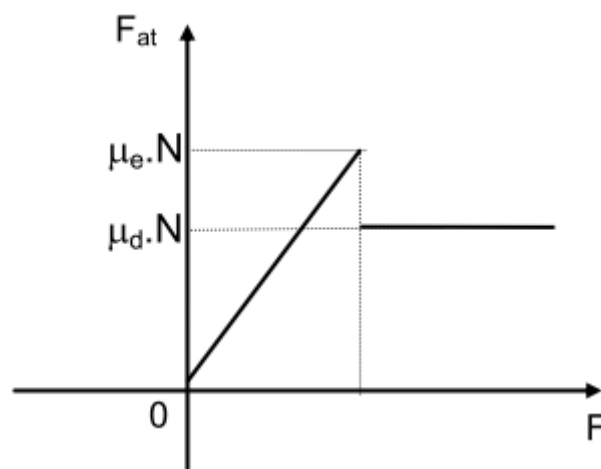


Figura 8 - Comparativo os tipos de força de atrito. Fonte: Martendal (2017)

O atrito estático ocorre quando não há movimento e a força de atrito acaba anulando totalmente as forças externas, ou seja, a força de atrito estático máxima é igual a força mínima necessária para tirar o corpo do repouso. Em contrapartida o atrito dinâmico ocorre quando o corpo entra ou está em movimento e seu coeficiente é sempre menor que o de atrito cinético (Halliday, Resnick, & Walker, 2016).

Para saber a força de atrito basta multiplicar o coeficiente de atrito pela normal atuante na superfície de contato, como mostra a seguir:

$$F_{at} = \mu_e . N \quad \text{XI}$$

$$F_{at} = \mu_d . N \quad \text{XII}$$

Outro fator que influencia ambos os coeficientes de atrito é interação entre os corpos. Por mais planas e polidas que duas superfícies possam parecer, elas não nunca estarão totalmente em contato, isto ocorre porque na realidade a superfície de um material é composta por diversos picos e vales, que constituem a rugosidade. Logo, quando encostadas, apenas partes das superfícies estão de fato em contato, o que constitui a chamada área de contato real, essa área é muito menor do que a área observada a olho nu (Martendal, 2017).

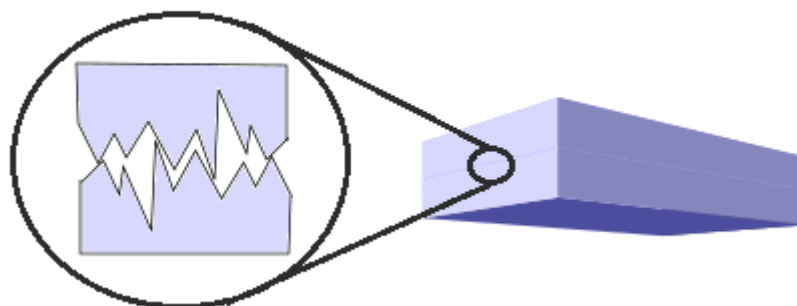


Figura 9 - Contato entre duas superfícies (Martendal, 2017)

3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

O artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002), trata do estudo sobre o deslizamento e deformação de juntas aparafusadas de torres de transmissão.

Considera-se a deformação total da junta a soma da deformação da haste do parafuso, a deformação das barras ou cantoneiras e a deformação dos membros próximos aos parafusos.

Destas deformações, o deslizamento se torna importante, pois ocorre com cargas muito pequenas quando comparado com as outras parcelas da deformação total.

3.1 ESTUDO EXPERIMENTAL

A fim de obter mais conhecimento sobre o deslizamento de juntas aparafusadas em torres de transmissão, elaborou-se 12 modelos diferentes de corpos de prova. As características que distinguiam cada modelo eram: número de parafusos, localização do parafuso em relação ao furo nas chapas e o comprimento das cantoneiras. No intuito de melhorar a acurácia dos resultados e minimizar qualquer discrepância foram feitas 3 espécimes de cada modelo, aumentando assim a amostragem do experimento.

O número de parafusos varia de 1 até 4. Para poder acomodar todos os furos o comprimento das cantoneiras também sofre variação.

A localização do parafuso é o que permite ou não o deslizamento da junta, em virtude da ampla possibilidade de alocação do centro do parafuso os modelos simulam apenas 3 situações:

- I. Em contato, onde não há folga (indicada pela letra B de *bearing*);
- II. Folga normal, onde os furos nas cantoneiras e a haste do parafuso estão centralizados (indicada pela letra N de *normal clearence*)
- III. Folga máxima, a onde o deslizamento é máximo (indicada pela letra M de *maximum clearence*).

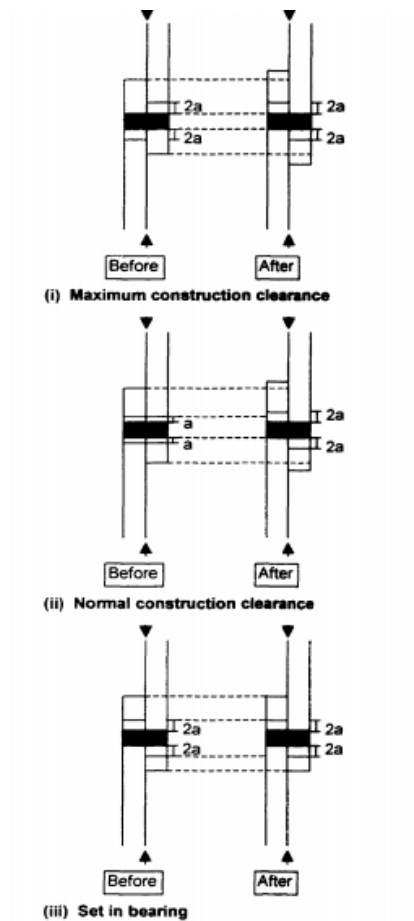


Figura 10 - Localização do parafuso (Ungkurapinan, et al 2000)

Para facilitar o reconhecimento de cada modelo foi dada uma sigla onde o corpo de prova pode ser facilmente identificado. Esta sigla contém 3 caracteres no qual o primeiro se refere ao número de parafusos, o segundo identifica a localização do parafuso e o terceiro diz qual das 3 espécimes se trata, por ex: 2M1, junta com 2 parafusos, folga máxima e se trata do primeiro corpo de prova.

Após sua confecção, cada corpo de prova foi submetido ao ensaio de compressão, com auxílio de uma prensa hidráulica, aferindo assim os pontos de interesse que serão melhor detalhados no decorrer deste capítulo.

3.2 GEOMETRIA

A descrição da geometria da junta será dividida em três partes: cantoneiras, parafuso(s) e furos. Um detalhe importante é o fato que para facilitar a modelagem, todos os modelos contaram com geometria única, ou seja, as características geométricas de um(a) cantoneira/parafuso/furo serve para os seus semelhantes.

3.2.1 Cantoneira

As cantoneiras possuem comprimento mínimo de 203,2 mm, isto ocorre na configuração com apenas um parafuso, em modelos com maior número de parafusos é adicionado 25,4 mm no comprimento para cada parafuso extra, podendo assim atingir até 279,4 mm pol nos modelos com o máximo número de parafusos.

Comprimento (mm)	Nº de parafusos
203,2	1
228,6	2
254	3
279,4	4

Tabela 1 - Relação comprimento e número de parafusos. Fonte: Autor (2019)

Em relação à seção transversal a cantoneira possui geometria constante em quase toda a peça, sofrendo variação apenas nos locais onde há furos. Ainda em relação à seção transversal a cantoneira possui aresta externa de 101,6 mm e espessura de 5,08 mm. Vale ressaltar que apesar de ser sabido que as bordas das cantoneiras serem geralmente abaloadas devido ao método de fabricação, como mostra a figura a seguir, o artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) não detalha nada a respeito.

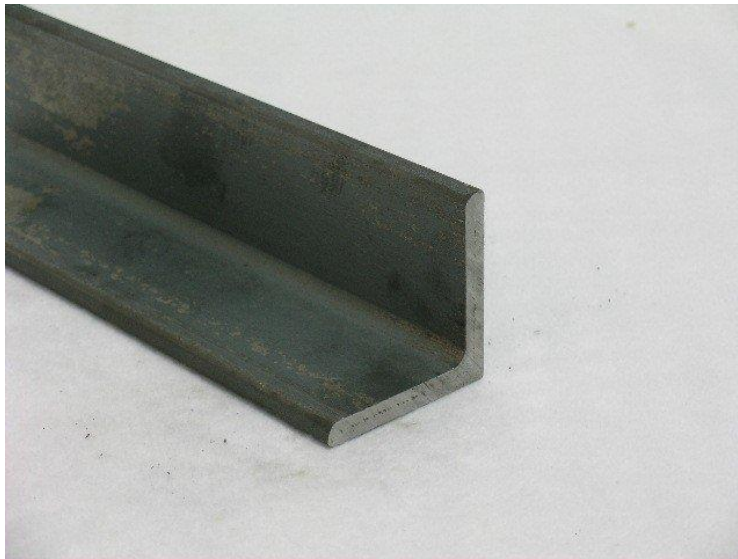


Figura 11 - Exemplo de cantoneira em L. Fonte: internet

3.2.2 Parafusos

O artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) não descreve o parafuso de forma detalhada, informando apenas o diâmetro de 15,875 mm referente a sua haste. Também não há detalhamento dos outros elementos que possam fazer parte da junta, como arruelas e porcas.

3.2.3 Furos

Os furos possuem diâmetro de 11/16 pol e a furação se inicia sempre a 1 pol da borda e a 2 pol de altura, localizando-se no meio de uma das duas chapas que compõe a cantoneira. O espaçamento entre o centro dos furos é de 2 pol.

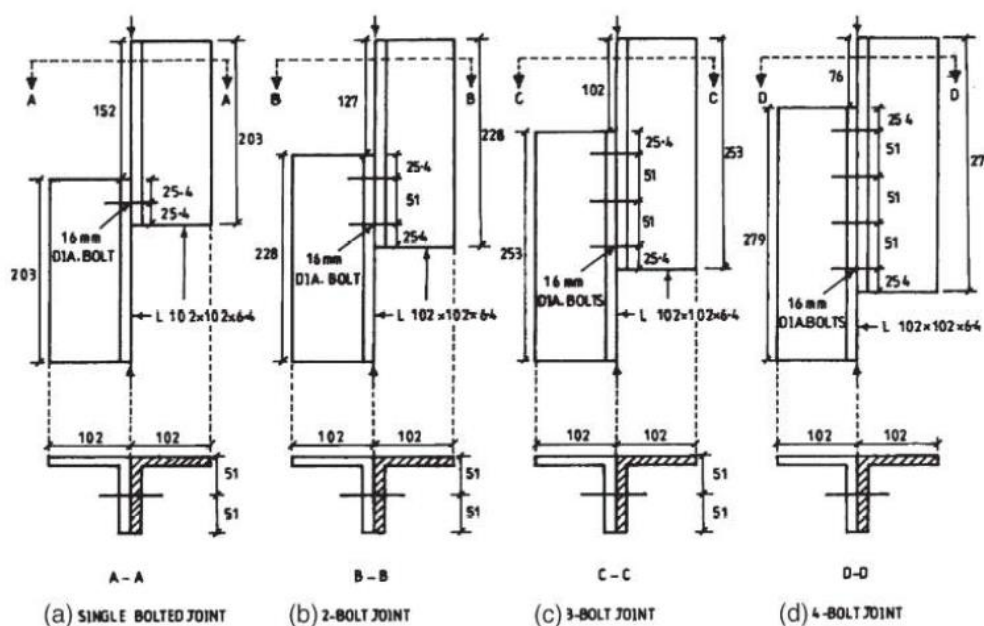


Figura 12 - Localização dos furos. Fonte: Ungkurapinan (2002)

3.3 MATERIAL

Em relação ao material as informações também são escassas, sendo que as principais indicavam que os parafusos eram compostos por um metal de tensão última de 900 MPa e que as chapas eram compostas por aço com ponto de escoamento de 358 MPa, tensão última de 507 MPa e 32,25% de alongamento, também foi dito que as cantoneiras possuíam 215 GPa de módulo de elasticidade.

3.4 CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES

Apesar do objetivo principal do artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) ser a formulação de equações que descrevessem o comportamento das juntas, essas equações não são relevantes neste trabalho, em contrapartida este mesmo artigo também concebe um quadro que demonstra o carregamento necessário para os principais componentes da deformação de uma junta aparafusada sendo eles: deslizamento, plastificação e falha. Esses dados são fornecidos para cada

corpo de prova, além de comentar o tipo de falha ocorrido no corpo de prova. A tabela com os dados será apresentada a seguir:

Arranjo dos parafusos	Carga para deslizamento (kN)	Carca do início da plastificação (kN)	Carregamento máximo (kN)	Tipo de falha
1M1	9,98	76,15	107,69	F3
1M2	8,10	61,48	104,73	F1
1M3	9,94	67,55	112,36	F1
1N1	9,23	65,64	100,49	F1
1N2	9,84	63,43	113,60	F1
1N3	8,63	70,05	111,70	F1
1B1	-	60,77	104,85	F1
1B2	-	55,16	108,39	F1
1B3b	-	-	106,20	F1
<i>Média</i>	9,29	65,03	107,98	
<i>desvio padrão</i>	0,78	6,40	4,24	
<i>variação ± (%)</i>	8,42%	9,83%	3,93%	
<i>Limites</i>	8,50 até 10,07	58,63 até 71,42	103,73 até 112,22	
2M1	25,27	102,64	173,73	F1
2M2	22,26	113,22	167,47	F1
2M3	23,61	106,18	154,25	F1
2N1	19,61	80,15	156,41	F1
2N2	16,04	80,89	147,51	F1
2N3	14,04	92,44	149,95	F1
2B1	-	104,68	148,82	F1
2B2	-	100,04	152,24	F1
2B3	-	97,32	169,01	F1
<i>Média</i>	20,14	97,53	156,30	
<i>desvio padrão</i>	4,41	11,23	9,79	
<i>variação ± (%)</i>	21,89%	11,52%	6,26%	
<i>Limites</i>	15,73 até 24,55	86,30 até 108,76	146,51 até	

			166,09	
3M1c	31,48	122,56	141,89	F1
3M2	28,78	153,99	205,65	F2
3M3	31,29	171,90	215,89	F2
3N1	29,95	150,51	207,76	F2
3N2	27,86	157,95	209,23	F2
3N3	26,34	149,28	218,20	F2
3B1	-	146,06	209,54	F2
3B2	-	152,42	213,53	F2
3B3	-	170,98	217,90	F2
<i>Média</i>	29,28	150,58	202,71	
<i>desvio padrão</i>	2,01	14,58	23,87	
<i>variação ± (%)</i>	6,87%	9,68%	11,78%	
<i>Limites</i>	27,27 até 31,30	136,00 até 165,16	178,84 até 226,58	
4M1d	-	-	195,40	F2
4M2	48,77	167,47	206,86	F2
4M3	54,48	167,95	205,48	F2
4N1	43,55	157,28	209,68	F2
4N2	47,23	163,74	210,64	F2
4N3	40,71	170,19	212,51	F2
4B1	-	173,74	209,42	F2
4B2	-	174,32	208,54	F2
4B3	-	170,95	209,40	F2
<i>Média</i>	46,95	168,21	207,55	
<i>desvio padrão</i>	5,26	5,60	4,99	
<i>variação ± (%)</i>	11,20%	3,33%	2,40%	
<i>Limites</i>	41,69 até 52,21	162,61 até 173,80	202,56 até 212,53	

Tabela 2 - Relação corpos de prova e pontos de interesse. Fonte: Ungkurapinan (2002)

b - Testado para uma carga intermediária até a máquina de teste travar. Teste prosseguiu após o ajuste da máquina, mas o conjunto de plasticidade não estava claro;

c - Ângulo empinado devido ao movimento considerável devido a suportes fixos. Portanto, no resto da tabela 2 testar, condições fixas e de suporte com rotação limitada para absorver qualquer irregularidade no ângulo e foram usadas;

d - Teste abandonado devido ao carregamento acidental do espécime instantaneamente até a falha;

F1 - Falha plástica na flambagem do parafuso;

F2 - Parafuso de cisalhou juntamente com a seção angular atingindo a plasticidade

F3 - Cisalhamento puro.

Em conjunto com a tabela, outra conclusão interessante que deve ser levada em consideração é a distribuição de tensões e deformações dos parafusos que se demonstrou maior nos parafusos localizados nas pontas como mostra o gráfico a seguir:

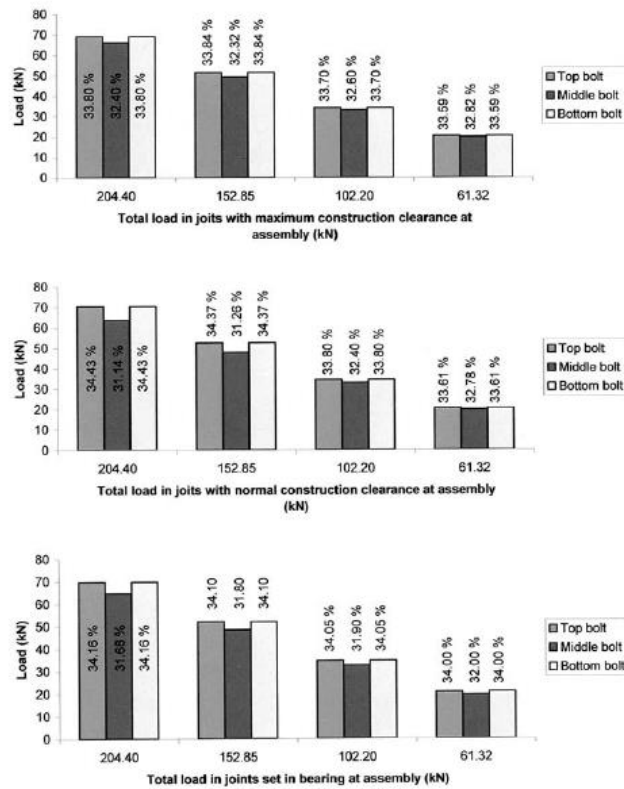


Figura 13 - Divisão de carregamento em juntas com 3 parafusos. Fonte: Ungkurapinan (2002)

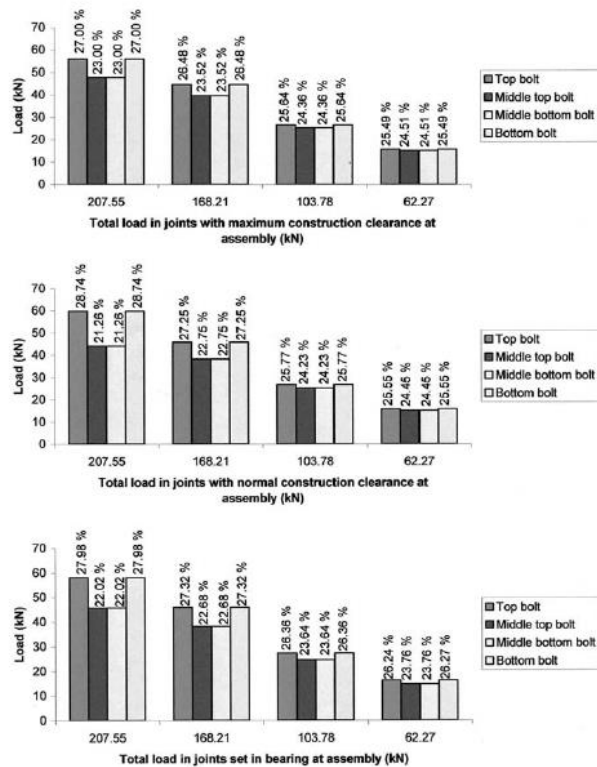


Figura 14 - Divisão de carregamento em juntas com 4 parafusos. Fonte: Ungkurapinan (2002)

4 ESTUDO REALIZADO

Os dados de entrada necessários para que o Ansys possa fazer a análise e resolver o problema são: geometria, material, coordenadas, conexões, malha e condições de contorno. Em decorrência dos eixos de coordenadas padrão do Ansys 16.0 coincidirem com os de interesse neste estudo, não será feita nenhuma alteração no mesmo, sendo este o único que não sofrerá alteração.

4.1 GEOMETRIA

A geometria dos modelos foi feita para ser o mais rigorosamente próximo ao relatado no experimento em laboratório, desta forma os furos possuem dimensão e localização idênticas ao que foi descrito no artigo. *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002). Seguindo este mesmo raciocínio foram modeladas as chapas, que possuíam dimensões idênticas, porém devido à ausência de detalhamento não possuíam abaloamento nas bordas. Além disso, o Ansys 16.0 permite subdividir as faces do corpo, esse recurso foi usado nas chapas em locais onde havia contato com outros corpos, justamente para facilitar o refino da discretização da malha.

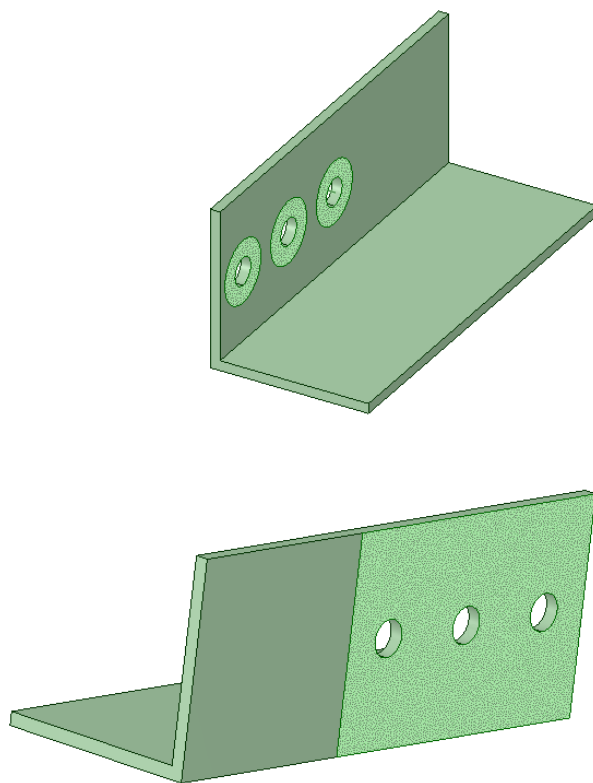


Figura 15 - Divisão das faces que estão em contato com outros corpos. Fonte: Autor (2019)

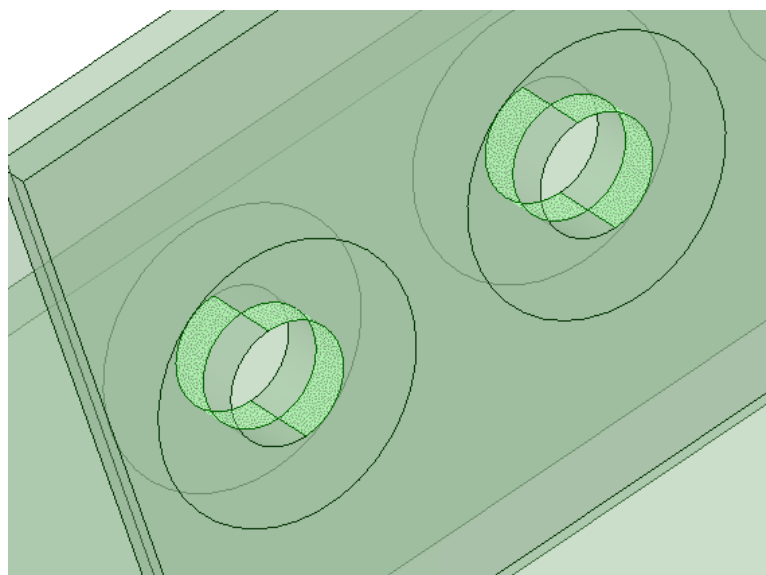


Figura 16 - Separação das faces que compõe os furos. Fonte: Autor (2019)

Apesar de não serem exatamente iguais, as chapas e furos modelados pelo software não possuem grandes diferenças dos corpos de prova confeccionados no experimento em laboratório.

Diferentemente das chapas e furos, os parafusos e seus periféricos (arruelas e porcas) não foram detalhados no artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002), fazendo com que as dimensões do modelo computacional sofressem uma série de hipóteses. Isto somado a problemas de convergência fizeram com que o modelo adotado fosse composto por 2 arruelas e 1 haste as ligando.

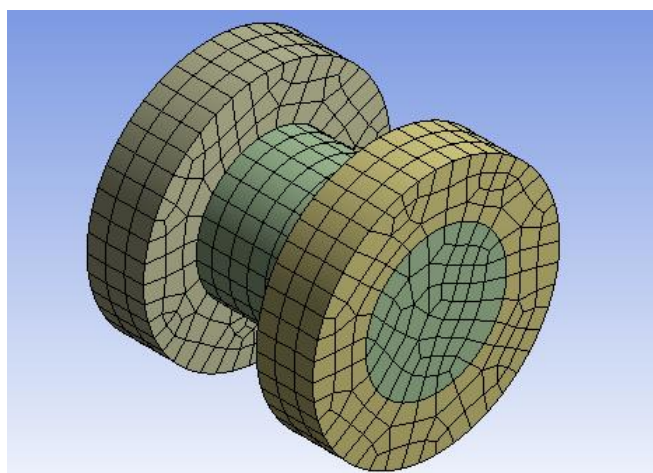


Figura 17 - Demonstração de discretização de um parafuso. Fonte: Autor (2019)

A haste possui diâmetro de 15,875 mm e comprimento de 101,6 mm, já as arruelas possuíam diâmetro externo de 27,78 mm (75% maior que o diâmetro da haste), furo de 15,875 mm e espessura de 25,4 mm.

4.2 MATERIAL

Com base nos dados informados no artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) foram configurados dois novos materiais, um para as chapas e outro para os parafusos. Ambos são uma reconfiguração do material Aço Estrutural não linear (*Structural Steel NL*) encontrado na biblioteca do Ansys 16.0, optou-se por reconfigurar um material

já existente pelo fato de que os aços possuem algumas características que pouco variam, como coeficiente de Poisson, densidade e etc... Assim essas características, e que não foram informadas no artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002), já estão indicadas.

Em contrapartida, o que distingue cada metal é sua curva de tensão x deformação alterada para os parâmetros fornecidos no artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002). O tipo de curva escolhido para simular o comportamento foi o bilinear onde a curva tensão x deformação é aproximada por duas retas, onde a primeira expressa o comportamento elástico-linear e a segunda expressa o escoamento do mesmo. O resultado pode ser visualizado nas curvas a seguir:

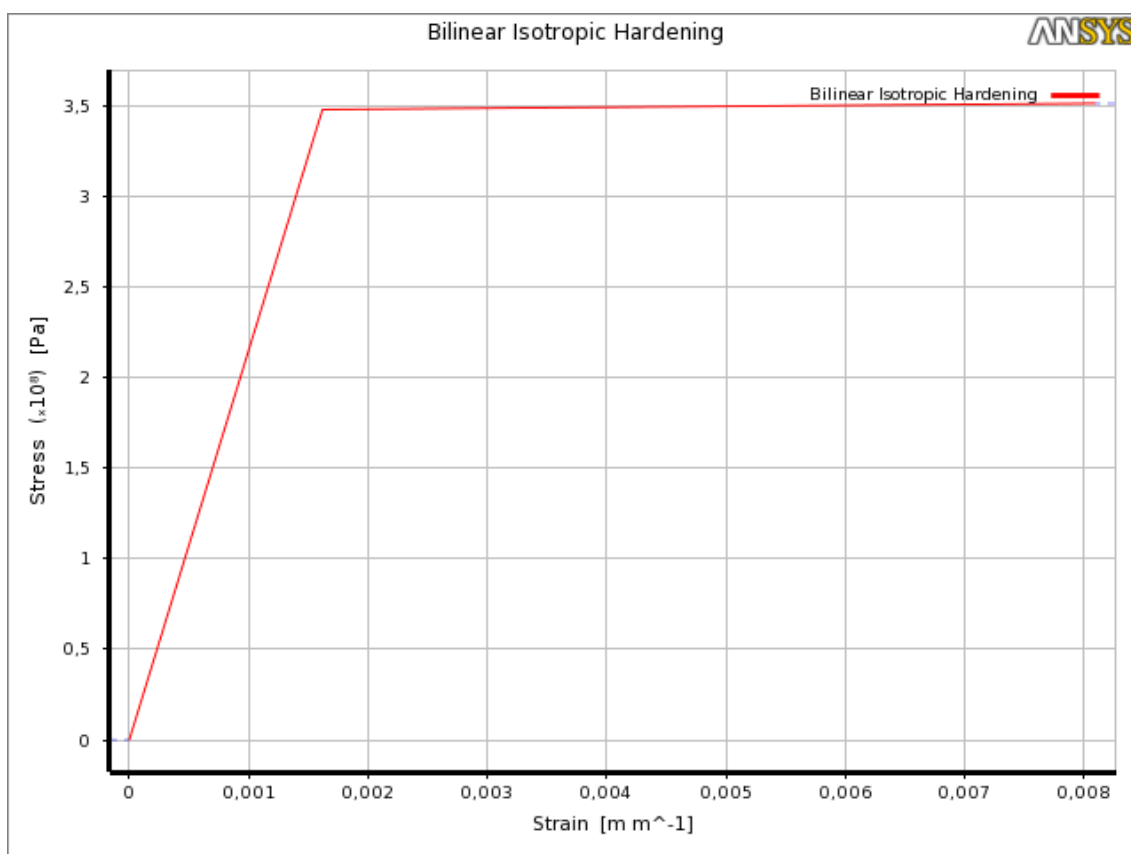


Figura 18 – tensão x deformação do material que compõe as chapas. Fonte: Autor (2019)

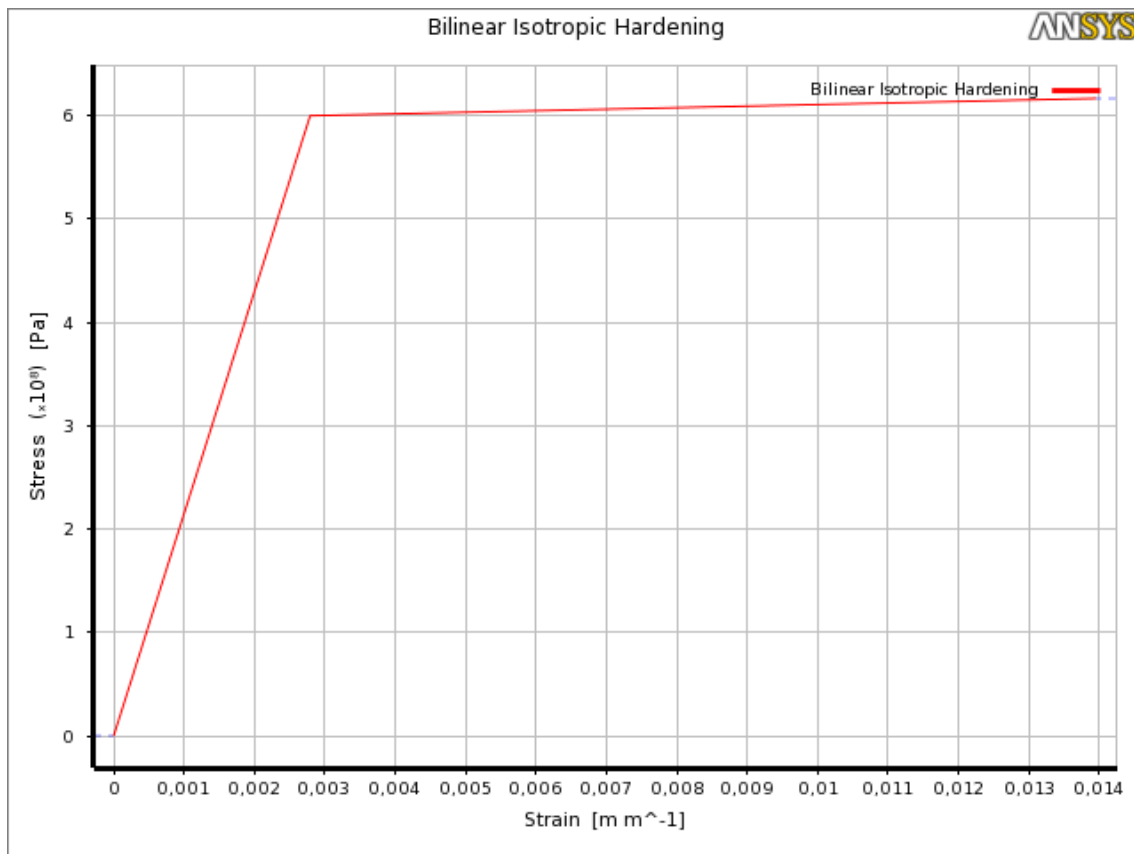


Figura 19 - tensão x deformação do material que compõe os parafusos. Fonte: Autor (2019)

4.3 CONEXÕES

As conexões expressam as interações entre os corpos do modelo, sua discretização requer muita atenção e precisão, pois quando feitos de maneira errônea impossibilitam o software de ter uma resolução do problema ou geram situações fisicamente impossíveis, como corpos entrando em outros corpos ou deformações excessivas.

Na simulação deste trabalho foram usadas 3 tipos de conexões: colada (*bonded*), com atrito (*frictional*) e sem atrito (*frictionless*).

4.3.1 Colada

A conexão do tipo colada (*bonded*) foi usada somente para que o parafuso, que é composto por 3 corpos, passe a ter comportamento similar a um corpo só.

Para isto foi selecionada a face exterior da haste (*contact*) e a face interior do furo da arruela (*target*), foi feita uma conexão deste tipo para cada arruela, logo a montagem de cada parafuso conta com duas conexões deste mesmo tipo. Nos demais campos de detalhamento da conexão foram deixados para o próprio *solver* decidir quais parâmetros usar ou então foi deixada a opção nativa do software.

4.3.2 Com atrito

A conexão do tipo com atrito (*frictional*) foi usada em duas regiões, a primeira localiza-se onde as chapas se encostam, essa região também foi indicada como comportamento simétrico (*behavior symmetric*).

A segunda região que utiliza este tipo de conexão localiza-se onde a face da arruela encosta na face de uma das chapas, pelo fato de cada parafuso conter duas arruelas, essa conexão aparece aos pares. Durante uma rápida pesquisa notou-se que valores para coeficiente de atrito entre duas superfícies metálicas ficam entre 0,15 e 0,25 e baseado nisso foi arbitrado 0,2 para este tipo de conexão.

4.3.3 Sem atrito

Foram indicadas como conexões sem atrito (*frictionless*) aquelas que indicavam o contato existente entre o furo das chapas e a haste do parafuso, para melhorar o detalhe da conexão as faces nos furos foram divididas e selecionadas apenas as que realmente interagem com a haste do parafuso, outro detalhe importante é que essa conexão também poderia ser

indicada como com atrito, porém já que o efeito do atrito seria irrelevante optou-se por descartá-lo.

4.4 MALHA

A formação de uma malha consiste na discretização geométrica dos corpos que constituem o modelo, essa discretização é feita dividindo o corpo em elementos menores, esses elementos podem possuir tamanhos e formas variadas. Quanto menores os elementos, mais bem detalhado ficará o modelo, obtendo assim melhores resultados, em contrapartida isso exigirá um custo computacional mais elevado, chegando assim a um dos dilemas do método dos elementos finitos: o quanto se deve detalhar uma malha para obter resultados precisos sem ter um custo computacional muito alto? Este questionamento sempre será presente em qualquer análise em elementos finitos, porém existem alguns indícios e indicativos de que a malha está suficientemente boa.

Usualmente tem-se uma malha considerada boa, quando os valores os valores em cada nó são próximos da média, em decorrência da falta de tempo para conclusão deste trabalho a estratégia de julgamento para uma boa malha, teve que ser alterada para dois indícios: visual e comparativo. No indício visual analisou-se a qualidade de modelar que a malha possuía, checando por exemplo se ela era capaz de discretizar locais circulares de maneira minimamente aceitável. Após isto foi feito um comparativo aumentando o número de elementos de maneira gradativa e comparando os valores necessários para o deslizamento da junta, assim que os valores convergissem o modelo era considerado bem discretizado.

É sabido que esta não é a melhor maneira de discretizar um modelo, porém em virtude da ausência de tempo essa foi a melhor solução encontrada pelo autor.

4.4.1 Métodos

Foram usados dois métodos de criação de malha, o método *Multizone* e o método *Hexa Dominant*, eles foram utilizados respectivamente para gerar uma malha que serviu como base para a cantoneira e para os corpos que compunham o(s) parafuso(s), ambos os tipos de malha usaram elementos tridimensionais do tipo SOLID186 E SOLID187 e interpolação quadrática.

4.4.2 Refinamentos

A aplicação do refinamento consiste em melhorar a malha em uma determinada região onde se possui maior interesse, no presente trabalho esse processo ocorreu em 4 situações: nos sólidos que compunham os parafusos, nas faces das chapas que se localizassem em volta dos furos, nas faces da(s) haste(s) que compunham o parafuso e nos locais do furo que estão em contato com a mesma.

Em virtude do método *Hexa Dominant* não predeterminar o tamanho dos elementos, necessitou-se a aplicação de um refinamento no mesmo, buscando uma melhor discretização, passando de 10mm para 2mm.

No processo de modelagem geométrica levantou-se a necessidade de subdividir determinadas faces, destacando assim regiões onde a malha seria mais detalhada. As regiões onde este processo ocorreu foram as faces das cantoneiras no(s) entorno(s) do(s) furo(s). Na região da face das cantoneiras onde havia contato com a arruela do parafuso, o refinamento foi aplicado foi de 3mm e na região onde a haste do parafuso se encontrava com borda do furo o refinamento aplicado foi de 1,5mm. Lembrando que nos locais a malha permaneceu com a configuração padrão de 10mm, indicada pelo Ansys 16.0.

4.4.3 Malha de conexão

O refinamento de todas as conexões acarretaria no aumento expressivo de elementos e nós do modelo, resultando em um gasto computacional muito elevado, para contornar este problema optou-se por melhorar a discretização apenas no(s) entornos do(s) parafuso(s). Esta ação foi tomada baseando-se no fato de que a discretização do local se mostrou muito relevante em simulações prévias, logo optou-se por aplicar um refino na malha no local de conexão entre as chapas, passando de 10mm para 8mm o tamanho dos elementos. Este processo ajudou a harmonizar a transição de tamanho de elementos entre os parafusos e as chapas

4.5 OBSERVAÇÕES E RESULTADOS

Na concepção da malha em todas as simulações tomou-se um cuidado para não haver mudança brusca no tamanho dos elementos, evitando assim problemas de convergência.

Outro detalhe que deve ser levado em consideração foi a ausência do uso de elementos de casca por problemas de convergência em simulações prévias.

Como resultado obteve-se as seguintes malhas:

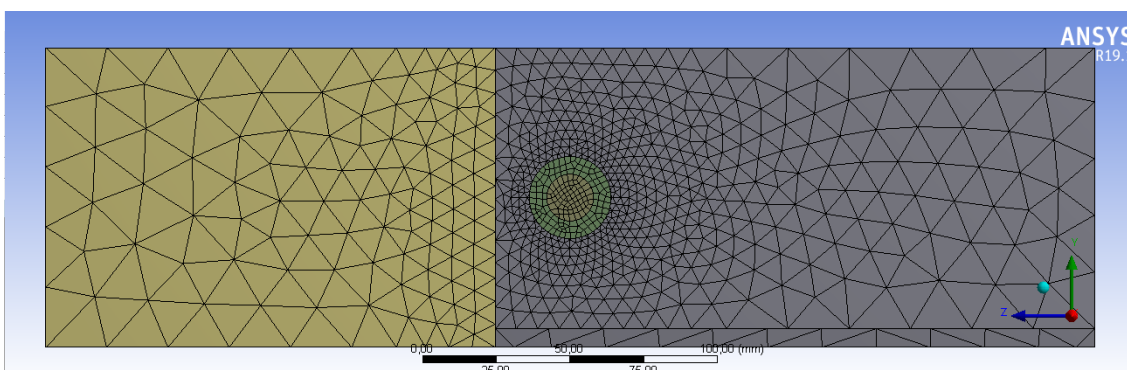


Figura 20 - Malha gerada para os modelos de 1 parafuso. Fonte: Autor (2019)

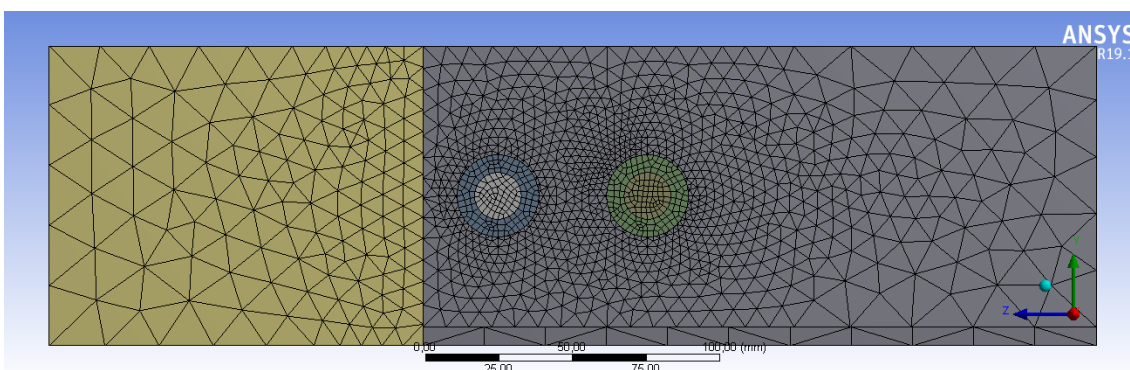


Figura 21 - Malha gerada para os modelos de 2 parafusos. Fonte: Autor (2019)

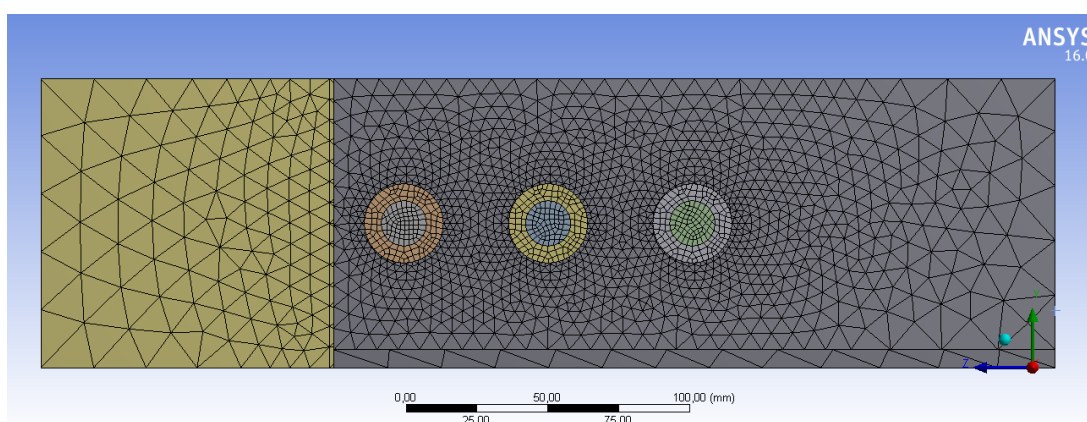


Figura 22 - Malha gerada para os modelos de 3 parafusos. Fonte: Autor (2019)

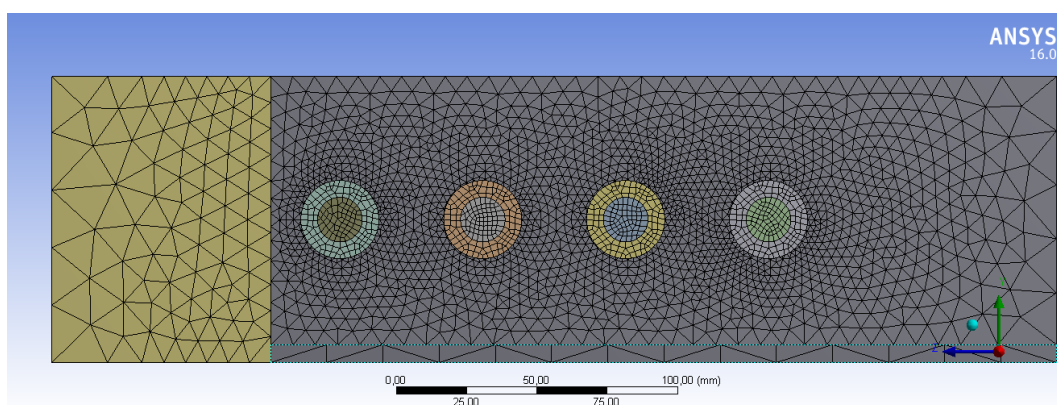


Figura 23 - Malha gerada para os modelos de 4 parafusos. Fonte: Autor (2019)

O intuito de aplicar essa série de refinamentos foi discretizar melhor e obter um resultado mais próximo do real, principalmente nos entornos dos parafusos, onde pequenas mudanças são significativas nos resultados. Um

resumo do número de elementos e nós de cada modelo pode ser observado a seguir:

Configuração	Nós	Elementos
1N	31469	13978
1M	31277	14155
2N	66504	31459
2M	66532	32078
3N	91489	41948
3M	100225	48573
4N	137341	66243
4M	141797	70527

Tabela 3 - Nível de discretização dos modelos. Fonte: Autor (2019)

4.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Em uma simulação computacional de estruturas é sempre fundamental a entrada dos dados de condições que cerceiam o mesmo. Neste trabalho procurou-se dividir e aplicar as condições de contorno em 29 passos para os modelos que possuíam folga normal e 27 para modelos de folga máxima, cada passo possui um deslocamento associado. Esses valores foram estipulados de maneira a não ocorrerem mudanças abruptas no modelo, principalmente no início da simulação onde ocorre o deslizamento, desta forma evitando problemas com convergência ou resultados imprecisos.

4.6.1 Engaste e deslizamento

Com intuito de simular a ação de uma prensa hidráulica aplicou-se dois suportes: um engaste e um suporte que permite apenas deslizamento em uma direção. O engaste foi aplicado na face da borda de uma das cantoneiras como é descrito no Ansys 16.0 como suporte fixo (*fixed suport*), no qual todos os nós daquela face permaneceram com deslocamentos nulos em todos os passos. Opostamente a isto, na face da borda mais distante da outra cantoneira foi aplicado um suporte de deslocamento (*displacement*), ao qual foi

submetida apenas deslocamento em um eixo conforme a tabela abaixo, vale ressaltar que todos os outros eixos foram deixados totalmente estáticos:

Passo	Deslocamento em mm (folga normal)	Deslocamento em mm (folga máxima)
0	0,025	0,025
1	0,050	0,050
2	0,075	0,075
3	0,100	0,100
4	0,400	0,600
5	0,700	1,100
6	1,000	1,600
7	1,300	2,100
8	1,600	2,600
9	2,100	3,100
10	2,600	3,600
11	3,100	4,100
12	3,600	4,600
13	4,100	5,100
14	4,600	5,600
15	5,100	6,100
16	5,600	6,600
17	6,100	7,100
18	6,600	7,600
19	7,100	8,100
20	7,600	8,600
21	8,100	9,100
22	8,600	9,600
23	9,100	10,100
24	9,600	10,600
25	10,100	11,100

26	10,600	11,600
27	11,100	12,100
28	11,600	N/A
29	12,100	N/A

Tabela 4 - Demonstrativo de deslocamento em cada passo do software. Fonte: Autor (2019)

4.6.2 Pré-carga no parafuso e não linearidade geométrica

O artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) cita que os parafusos foram submetidos a um torque de 114,27 kN.mm, porém o software aceita pré-carga somente como força ou deslocamento, desta forma necessitou-se auxílio da seguinte equação para estimar a força a que o parafuso estava submetido e assim usar nos dados de entrada do *software*:

$$T=Kt.D.P$$

Onde T é o torque ao qual o parafuso está submetido, D é o diâmetro nominal do parafuso, P é a pré-carga e Kt é o coeficiente de torque.

Dentre os parâmetros necessários para equação o único não fornecido no artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) foi o coeficiente de torque que varia em função das condições a que o parafuso está submetido, tais como ausência ou não de lubrificação, ou o tipo do parafuso. Segundo (Budynas & Nisbett, 2016) pode-se usar a seguinte tabela como referência:

Condição do Parafuso	Kt
Não revestido, acabamento negro	0,30
Revestido de zinco	0,20
Lubrificado	0,18
Revestido de cádmio	0,16
Com antiaderente da Bowman	0,12

Tabela 5 - Coeficientes de torque (Budynas & Nisbett, 2016)

Baseado nesta tabela optou-se por adotar como coeficiente de torque o valor 0,30 chegando assim a uma pré-carga de 23.993,7N que foi aproximada para 24 kN.

Assim como as outras condições de contorno, a pré-carga no parafuso teve que ser inserida em função dos passos dados pelo Ansys 16.0. Com objetivo de tornar a simulação o mais próxima do real, aplicou-se toda a pré-carga logo no primeiro passo e nos outros passos usou-se o comando *lock* para se travar e manter a pré-carga constante durante toda simulação.

A análise considera a não linearidade geométrica. A ativação se dá por meio do comando *nlgeom,on*.

4.7 RESUMO

Buscando demonstrar de maneira resumida as configurações a respeito das condições de contorno, segue uma imagem do software de um modelo com 3 parafusos, onde todas as condições de contorno estão devidamente indicadas. É importante atentar que modelos com quantidades de parafusos diferentes terão o número forças de pre-carga compatível ao número de parafusos.

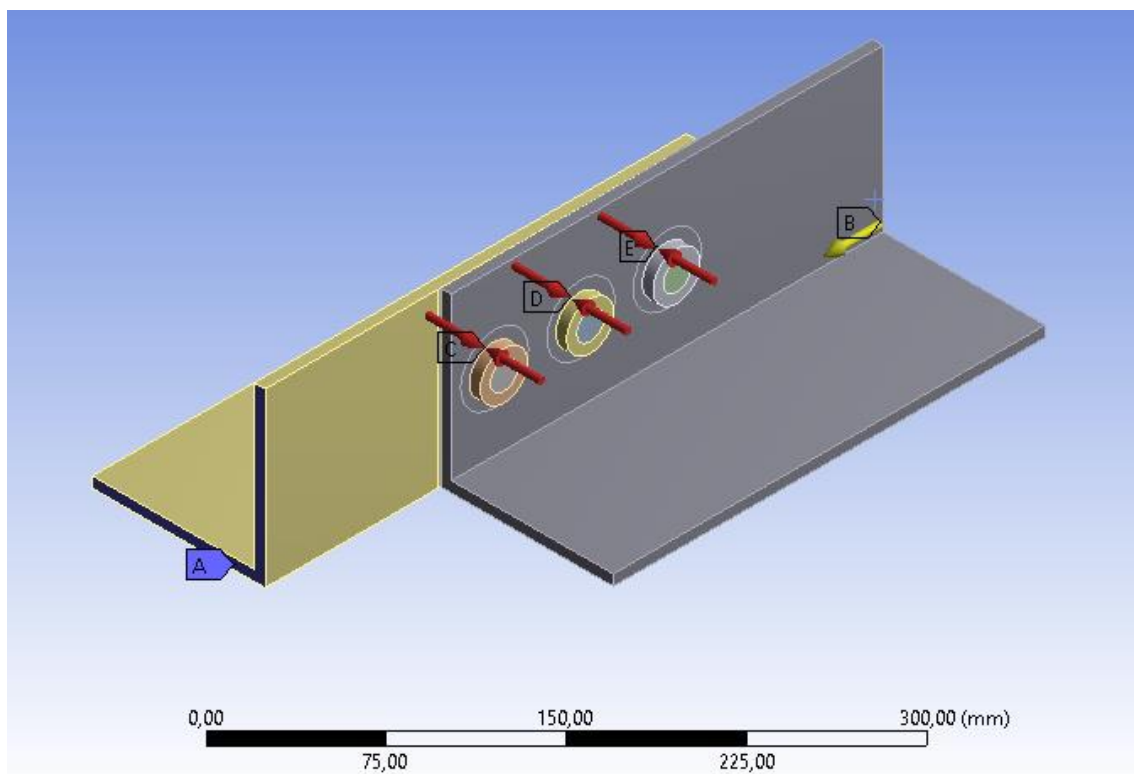


Figura 24 - Exemplo de posicionamento das condições de contorno (A face engastada; B face onde o deslocamento é aplicado; C, D e E são pré-cargas). Fonte: Autor (2019)

5 RESULTADOS E COMPARAÇÃO

Em virtude deste trabalho tratar do deslizamento das juntas aparafusadas, não foram feitas análises nas configurações do tipo B (*bearing*), pois as mesmas não possuíam folga, logo não deslizavam.

Como saída foi solicitado ao software que informasse a força de reação na mesma face onde o deslocamento estava sendo aplicado, que pode ser visto na figura 25. Em conjunto com a informação prévia de deslocamento, confeccionaram-se as curvas deslocamento por força.

O artigo *Joint slip in steel electric transmission towers* (Ungkurapinan, 2002) apresenta uma curva idealizada que demonstra o comportamento das juntas, destacando as zonas de: deformação linear, deslizamento, plastificação e falha.

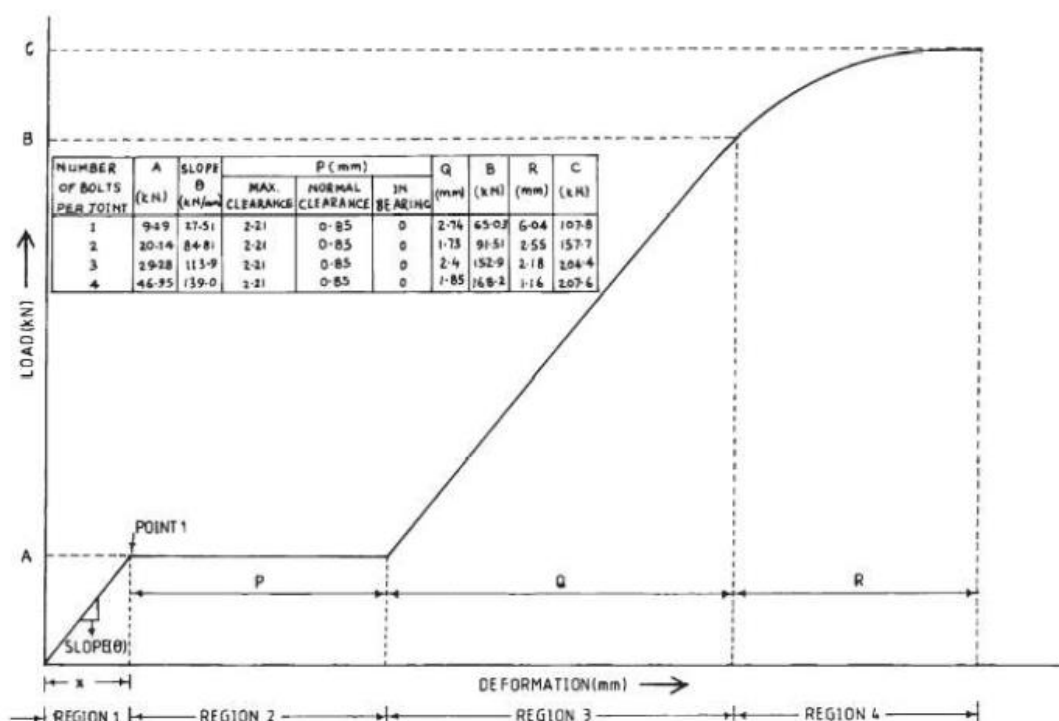


Figura 25 - Curva idealizada. Fonte Ungkurapinan (2002).

A curva gerada pelo *software* é plotada em conjunto com a curva ideal desejada para então serem analisadas, em relação à forma, todas as curvas ficaram próximas da ideal e em decorrência do comportamento próximo dos modelos que possuem o mesmo número de parafusos, organizaram-se os resultados desta mesma forma.

Para distinguir todas as curvas obtidas pelos resultados do experimento em laboratório receberam a indicação no nome de Lab.

5.1 MODELOS COM 1 PARAFUSOS

Os modelos mais simples apresentaram resultados mais próximos à curva ideal. Obtendo um valor de carga próximo ao real, quando analisado o deslizamento. Porém a grande divergência está na rigidez, onde a simulação necessitou de uma carga muito maior para se deformar logo após o deslizamento, outro ponto interessante é que ambas as curvas mudam de comportamento com cerca de 65kN.

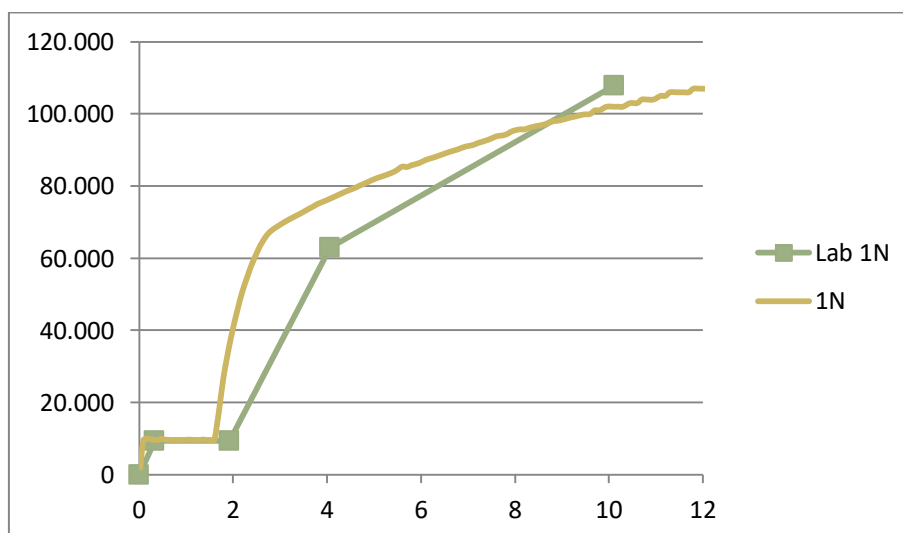


Figura 26 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 1N. Fonte: Autor (2019)

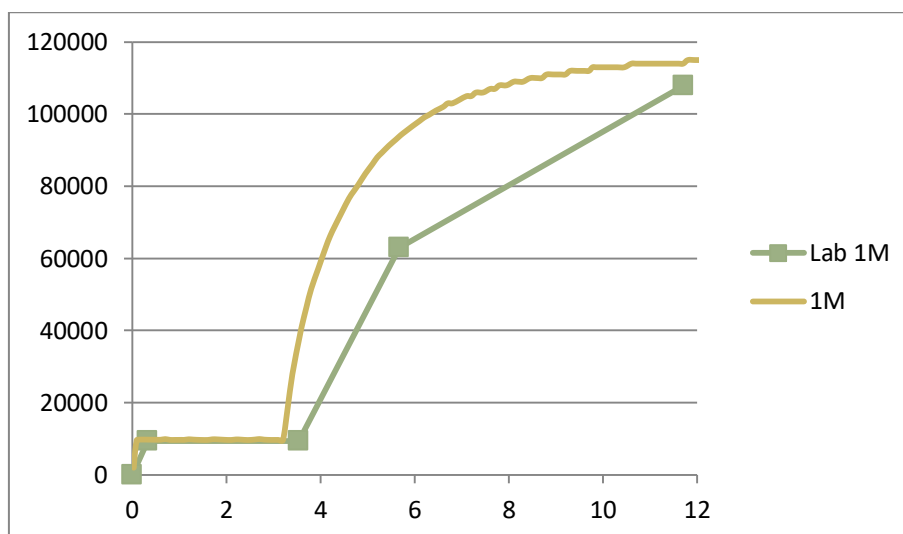


Figura 27 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 1M. Fonte: Autor (2019)

5.2 MODELOS COM 2 PARAFUSOS

Neste tipo de modelo obteve-se boa aproximação na carga necessária para o deslizamento, porém o comportamento após o deslizamento foi o que mais interessante, pois a curva ideal é praticamente reta, situação bem distinta da curva obtida pela simulação.

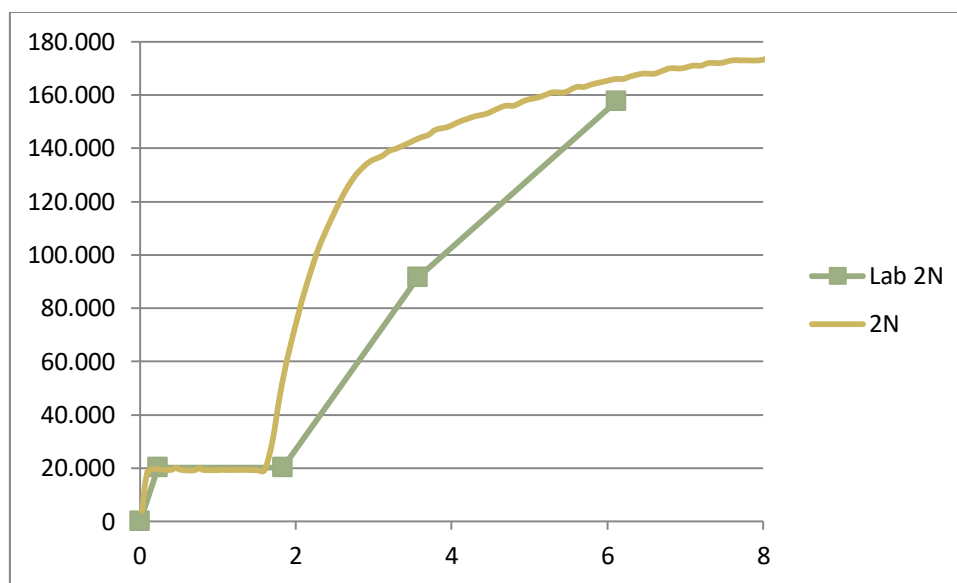


Figura 28 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 2N. Fonte: Autor (2019)

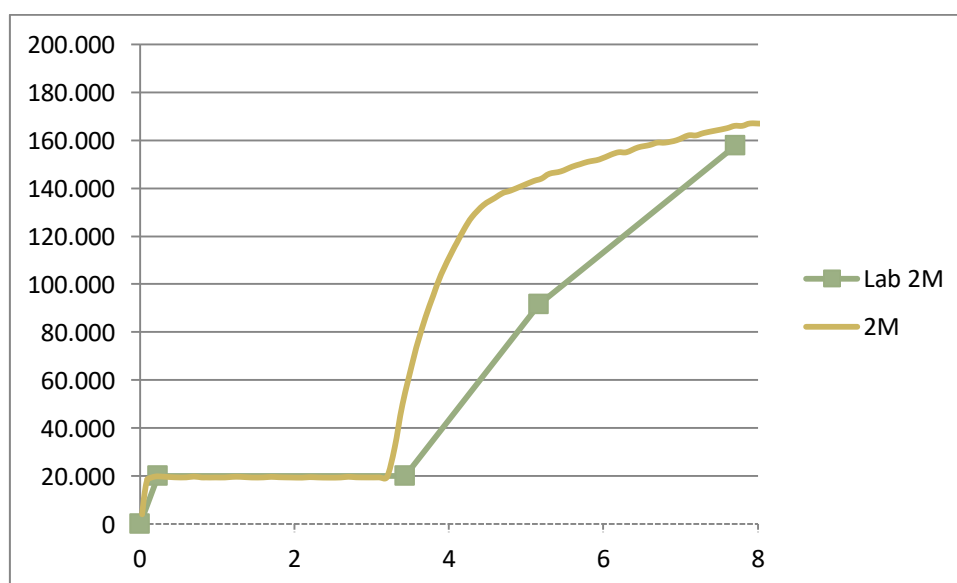


Figura 29 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 2M. Fonte: Autor (2019)

5.3 MODELOS COM 3 PARAFUSOS

As simulações que contém 3 ou mais parafusos foram as que obtiveram resultados mais distantes da respectiva curva ideal. No caso da curva com 3 parafusos os resultados das simulações chegam a ter o dobro de carregamento para a mesma deformação em alguns pontos.

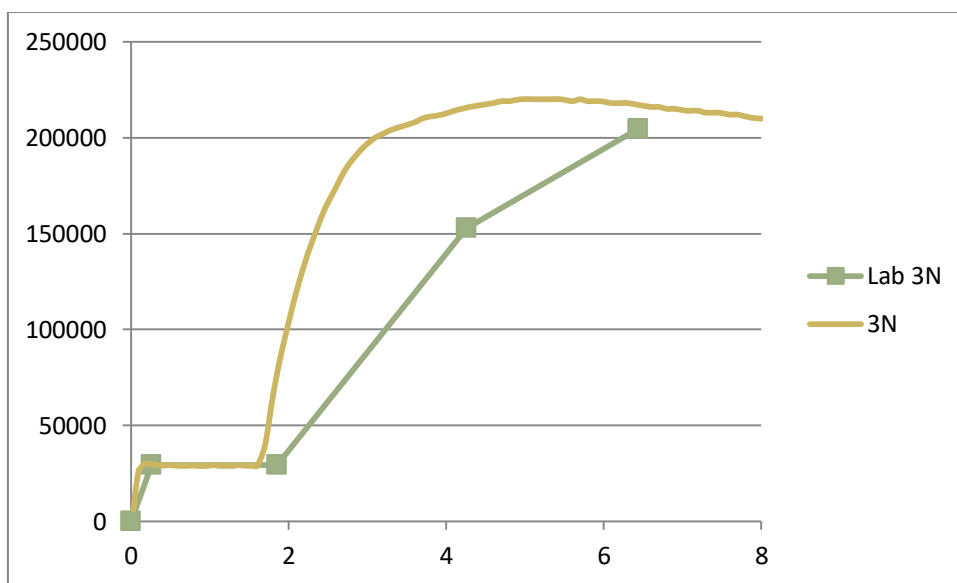


Figura 30 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 3N. Fonte: Autor (2019)

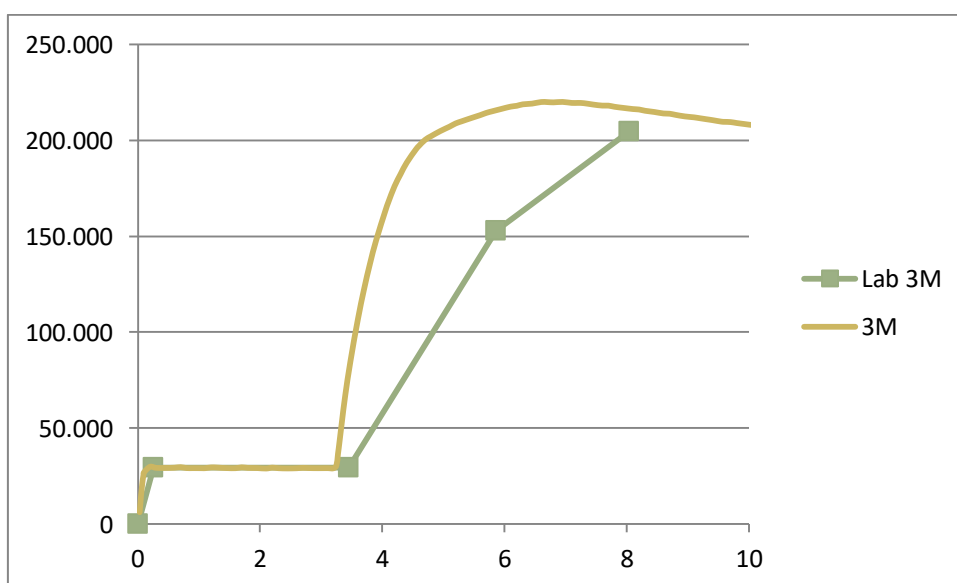


Figura 31 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 3M. Fonte: Autor (2019)

5.4 MODELOS COM 4 PARAFUSOS

As simulações com 4 parafusos foram as que tiveram os resultados mais distantes da curva ideal, sendo as únicas curvas que possuem resultados distantes até na carga necessária para o deslizamento.

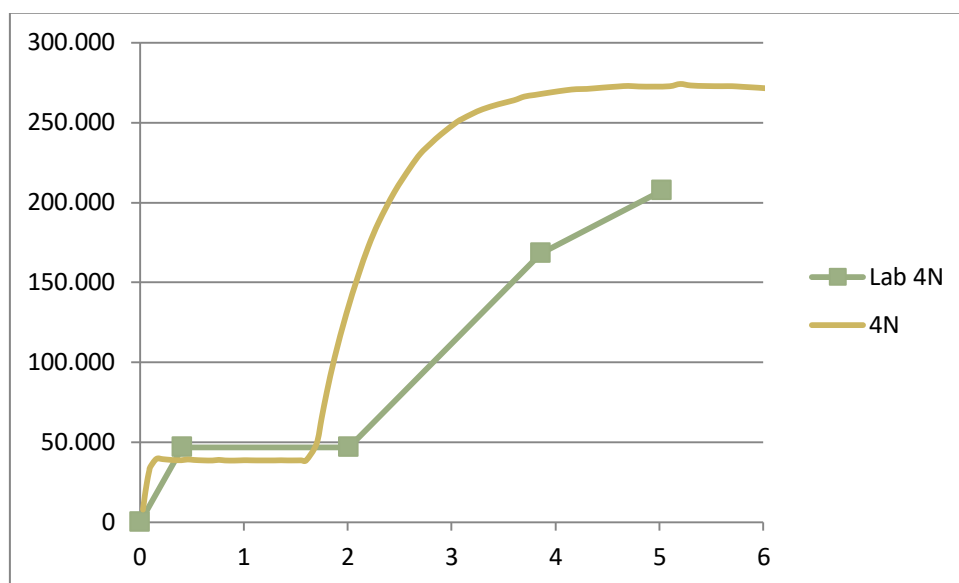


Figura 32 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 4N. Fonte: Autor (2019)

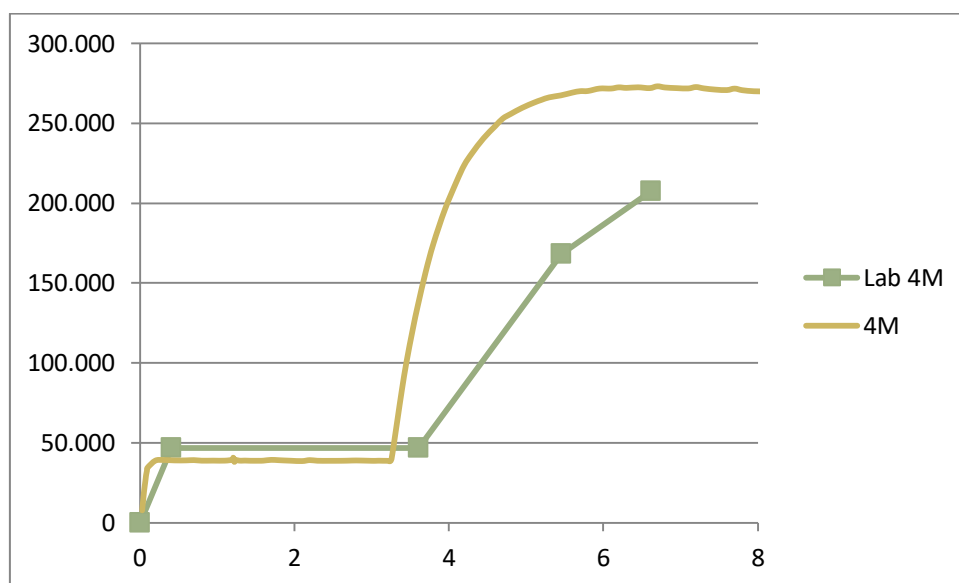


Figura 33 - Deslocamento (mm) x Carregamento (N), modelo 4M. Fonte: Autor (2019)

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que os modelos feitos nesse estudo têm comportamento relativamente parecido ao analisado em laboratório, tendo em vista que as curvas formadas foram semelhantes e os carregamentos necessários para o deslizamento foram bem próximos na grande maioria das simulações. Porém, existiram divergências evidentes quando comparados os resultados.

Em consequência dessa divergência de valores foram tecidas algumas justificativas para tal, as quais se destacam: possíveis problemas na discretização das malhas, condições de contorno diferentes das reais, configuração final distinta da ocorrida em laboratório, diferenças geométricas e materiais.

Apesar dos modelos apresentarem deslizamento com carregamentos próximos e isto ter sido um fator determinante na escolha da malha, talvez a discretização do modelo não tenha sido ideal, resultando em deformações nos entornos dos furos diferentes das reais.

Outro ponto de imprecisão nos modelos foi às condições de contorno, em especial o apoio de deslocamento (*displacement*) que permitia apenas deslocamento da face em apenas um sentido, excluindo qualquer tipo de flexão ou deslocamento que ocorresse em outro plano/sentido. Apesar de ser o mais próximo do que o artigo fornece não é idêntico ao que acontece na prática, onde a face em questão teria maior grau de liberdade.

As divergências geométricas também puderam ter causado diferenças nos resultados, principalmente a ausência de detalhamento do parafuso. Em testes preliminares a geometria do parafuso se mostrou fundamental na rigidez da junta, o tamanho e espessura da arruela são importantes na transmissão da pré-carga do parafuso em força normal nas chapas, assim sendo fundamental na estabilidade da mesma. Um dos indícios fortes que isto acontece foi maneira significativa com que a localização do parafuso interferiu na carga necessária para o deslizamento nos ensaios feitos em laboratório, porém pouco influenciou as simulações.

Além das divergências geométricas também houve divergência no material. Mais uma vez em função da ausência de detalhamento no artigo, o material que confeccionava o parafuso teve seu ponto de escoamento arbitrado em 620Mpa. Analisando os gráficos nota-se que a junta tem comportamento consideravelmente mais rígido nas simulações do que do experimento prático, parte disso pode ter ocorrido justamente em função dessa divergência de materiais e pode ter sido agravada pela distância na tenão de escoamento entre os dois materiais que compunham a junta, onde as cantoneiras escoavam em 348Mpa e os parafusos em 620Mpa.

7 ANEXO

A seguir seguem imagens do estado final de alguns modelos.

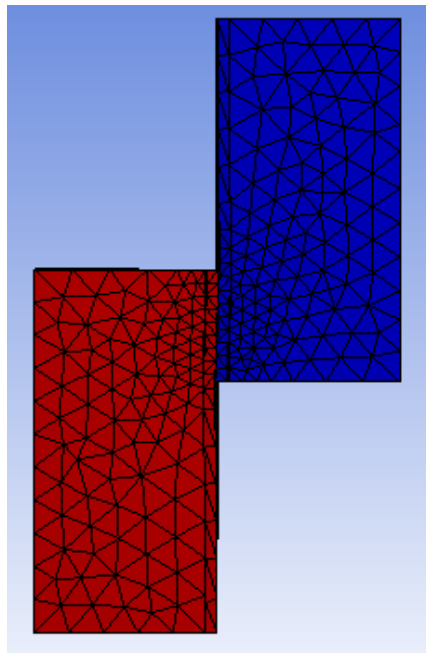


Figura 34 - Configuração final das juntas com 1 parafuso. Fonte: Autor (2019)

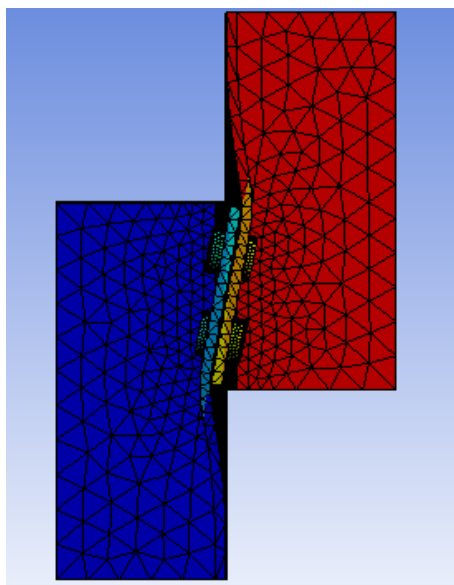


Figura 35 - Configuração final das juntas com 2 parafusos. Fonte: Autor (2019)

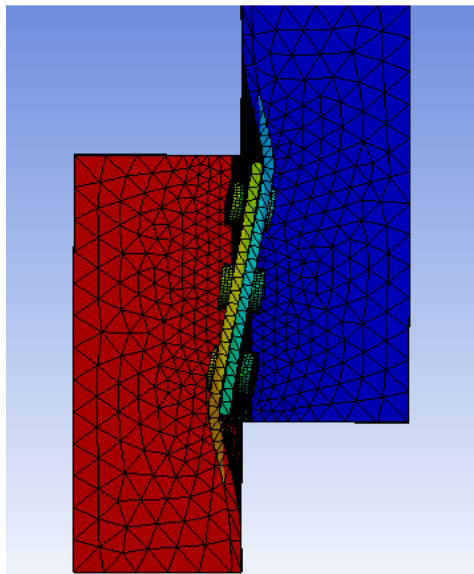


Figura 36 - Configuração final das juntas com 3 parafusos. Fonte: Autor (2019)

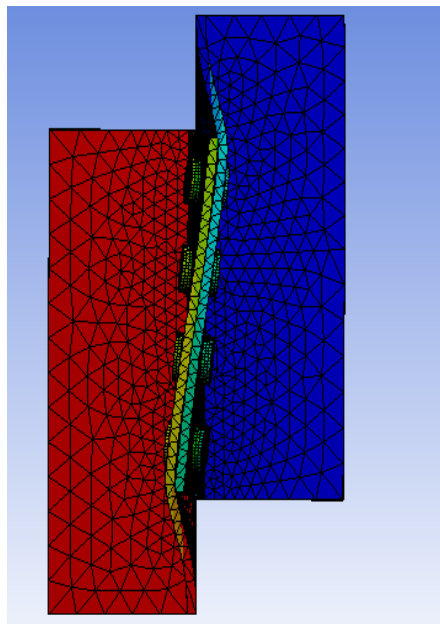


Figura 37 - Configuração final das juntas com 4 parafusos. Fonte: Autor (2019)

8 REFERÊNCIAS

- Alves Filho, A. (2000). *Elementos finitos. A base da tecnologia CAE*. Érica.
- Beer, F. (1989). *Resistência dos materiais*. McGrawn Hill.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2016). *Elementos de Máquinas de Shigley*. Amgh.
- Chandrupatla, T., & Belegundu, A. (2014). *Elementos Finitos*. Pearson.
- Eloy Vaz, L. (2011). *Método dos elementos finitos em análises de estruturas*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Frei, W. (22 de Outubro de 2013). *Meshing Considerations for Linear Static Problems*. Fonte: COMSOL: <https://www.comsol.com/blogs/meshing-considerations-linear-static-problems/>
- Gere, J. M. (2017). *Mecânica dos materiais*. Thomsom.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (s.d.). *Fundamentos de física, volume 1: mecânica*. LTC.
- Luz, G. (2019). *Blog Materiais*. Fonte: Módulo de elasticidade ou módulo de Young: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/12/modulo-de-elasticidade-ou-modulo-de-young.html>
- Martendal, C. (7 de Fevereiro de 2017). *Rugosidade de uma superfície*. Fonte: Engenheiro de materiais: <http://engenheirodemateriais.com.br/2017/02/08/rugosidade-de-uma-superficie/>
- Meggiolaro, M., Topper, T. H., & Tupiassu Pinho de Castro, J. (2009). *Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume I - Iniciação de Trincas: 1*. Createspace Independent Publishing Platform.
- Oliveira Azevedo, D. F. (2016). *CAE – Computer aided engineering. Engenharia auxiliada por computador*. Mogi das Cruzes.
- Oliveira de Azevedo, D. F. (2016). *Análise estrutural com Ansys Workbench*. Mogi das Cruzes.
- Pereira, A. (29 de Agosto de 2002). *Projeto ótimo de pórticos planos*.
- Ritto Corrêa, M. (25 de Novembro de 2015). *Introdução ao comportamento não linear de estruturas*.

- Saldanha, L. (4 de Julho de 2017). *4i engenharia*. Fonte: Análise linear e não linear com software de engenharia: <https://www.4ieng.com.br/single-post/Analise-linear-e-nao-linear-com-software-de-engenharia>
- Timoshenko, S., & Goodier, J. (1970). *Theory of Elasticity*. McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- Tschiptschin, A. P. (2011). *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*. Fonte: Método de Elementos Finitos Aplicado à Seleção de Materiais: http://www.pmt.usp.br/pmt2404/Elementos%20finitos_final.pdf
- Ungkurapinan, N. (Abril de 2000). A study of joint slip in galvanized bolted angle connections.
- Ungkurapinan, N. (2002). Joint slip in steel electric transmission towers. *Engineering Structures*, 10.
- Paulo Jorge Baeta Mendes (2006). Fonte: http://figaro.fis.uc.pt/PJBM/ensino/ano_2006_7/aulas/Bloco_05Elasticidade_Poisson.pdf
- Paulo Sergio Bayer (2013). Fonte: <http://joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Ensaios%20dos%20Materiais/Apostila%20de%20Ensaios%20dos%20Materiais.pdf>
- Antonio Pérez González (2018). Fonte: http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm