

BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES

**COMPORTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NOS PARAFUSOS EM
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

**Guaratinguetá
2012**

BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES

COMPORTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NOS PARAFUSOS EM
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Mecânica na
área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2012

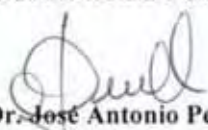
M357c	Marques, Bruno Mikio Fujiwara Comportamento da distribuição de carga nos parafusos em diferentes configurações de juntas utilizando o método dos elementos finitos / Bruno Mikio Fujiwara Marques – Guaratinguetá : [s.n], 2012. 108 f : il. Bibliografia: f. 92-94 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Juntas (Engenharia) 2. Ligações parafusadas 3. Método dos elementos finitos I. Título CDU 624.042.8(043)
-------	--

BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. JOÃO ZANGRANDI FILHO
Unesp-Feg


Prof. Dr. LEONARDO KYO KABAYAMA
UNIFEI

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

BRUNO MIKIO FUJIWARA MARQUES

NASCIMENTO	25.09.1984 – JACAREÍ / SP
FILIAÇÃO	Heraldo Rodrigues Marques Luiza Toshiko Fujiwara Marques
2002/2006	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2011/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a Deus por ser o grande patrocinador desse trabalho sendo a minha fonte de sabedoria e guia dos meus caminhos,

ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, pelo seu conhecimento compartilhado, disposição para orientação e incentivo ao projeto,

aos meus pais Heraldo e Luiza, que foram a primazia dos meus estudos, da educação e visão do mundo, incentivadores e apoiadores incondicionais,

à minha irmã Thaila, pela compreensão, descontração e conversas durante essa fase da minha vida,

à minha esposa Thaís, pelo seu apoio, seus conhecimentos, compreensão e amor durante todos os momentos. Muito Obrigado!

A toda minha família, em especial ao Seu Francisco, Dona Fátima, Laura e Pedro, que souberam entender a importância deste trabalho para mim e a minha dedicação para realizá-lo,

à EMBRAER S.A., pela política de incentivo aos estudos e liberação para dedicar-me ao mestrado.

MARQUES, B.M.F. Comportamento da distribuição de carga nos parafusos em diferentes configurações de juntas utilizando o método dos elementos finitos. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Em praticamente todo sistema mecânico, juntas aparafusadas são utilizadas com o objetivo de unir componentes distintos, controlando folgas estruturais de tal modo a manter o envelope geométrico de projeto e o alinhamento entre as partes unidas. Normalmente, os parafusos são submetidos aos carregamentos de tração e cisalhamento o qual o último gera momento de flexão no parafuso devido ao efeito de contato com a superfície do furo. O comportamento da distribuição de carga ao longo do corpo do parafuso apresenta uma grande contribuição no seu dimensionamento principalmente por causa do braço de flexão que determinará o momento atuante. Dessa forma, esse trabalho apresenta diferentes tipos de juntas aparafusadas, normalmente aplicadas em estruturas de alta responsabilidade, para analisar o comportamento da distribuição de carregamento ao longo do corpo do parafuso. As juntas apresentam diferentes materiais e espessuras das placas envolvidas como ligas de alumínio e aço, a presença de calços ou não e parafusos normatizados de diferentes diâmetros. As análises contemplam o cálculo analítico o qual apresenta o tipo de distribuição de carregamento, triangular, trapezoidal ou retangular, análise pelo método dos elementos finitos com modelos bidimensionais e tridimensionais. Assim, após a análise dos resultados obtidos pelos métodos citados, mostrou que a presença de calço nas juntas aparafusadas e a espessura das placas influenciam diretamente as diferenças entre os métodos e mesmo que as diferenças entre os métodos existam, a confiabilidade do método analítico é confirmada uma vez que todos os braços de flexão são maiores daqueles obtidos pelo método dos elementos finitos. Desse modo, as juntas dimensionadas pelo método analítico são conservativas, apresentam margens de segurança satisfatórias e, conseqüentemente, baixa probabilidade de falha do parafuso devido à flexão.

PALAVRAS-CHAVE: Juntas aparafusadas, distribuição de carregamento, parafuso, elementos finitos.

MARQUES, B.M.F. **Load distribution behavior on bolts in different joints configurations using the finite element method.** 2012. 108 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Practically all mechanical system applies bolted joints in order to put together independent components, fitting up structural gaps to maintain the geometrical envelope in accordance with design and the alignment between the joined parts. Normally, the bolts withstand tension and shear loads which the last one generates bending moment in the bolt body due the contact effect with the hole surface. The load distribution behavior along the bolt body presents a great contribution to define it principally because the bending arm which determines the applied moment. Thus, this study presents different bolted joints configurations, usually applied in high responsibility structures in such way to analyze the load distribution behavior all along the bolt body. The joints present different plates materials and thicknesses as like aluminum and steel alloys, considering shims or not and standard bolts with a variety of diameter. The analyses regard the analytical method which presents the load distribution type, triangular, trapezoidal or rectangular, finite elements analysis method considering bidimensional and tridimensional models. Therefore, after the analysis of the results from the mentioned methods, stated the shims and the plates thicknesses have a significant influence in the differences between the methods. Even though the differences exist, the reliability of the analytical method is confirmed once all bending arms are bigger than those resulted by the finite element method. Hence, the joints dimensioned by the analytical method are conservatives, present satisfactory margins of safety and, consequently, low probability of bolt failure due bending.

KEYWORDS: Bolted joints, load distribution, bolt, finite elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre rosca usinada e rolada (Adaptada de NIU, 1988).	21
Figura 2 – Processo de fabricação da rosca rolada; (a) rosca em região com acesso transversal; (b) rosca em região com acesso axial (Adaptada de FETTE catalogs).	22
Figura 3 – Posicionamento aceitável entre parafuso e partes unidas (Adaptada de NIU, 1988).	23
Figura 4– Tipos de porca (Adaptada de BRUHN, 1973).	23
Figura 5 – Pré-carregamento em uma junta aparafusada (Adaptada de SHIGLEY, 1984).....	24
Figura 6 – Força no parafuso com carregamento axial aplicado na junta (Adaptada de OBERG et al, 2004).	25
Figura 7 – Diagrama de corpo livre das forças no filete de rosca (OBERG et al, 2004).	26
Figura 8 – Força de atrito na rosca (adaptada de OBERG et al, 2004).	27
Figura 9 – Parafuso submetido a carregamento de tração (CARVILL, 1993).	28
Figura 10 – Menor área na região da rosca (Adaptada de NIU, 2005).	28
Figura 11 – Tipos de falha de uniões rebitadas sujeitas ao cisalhamento. (a) Carregamento de cisalhamento; (b) flexão do parafuso; (c) cisalhamento do parafuso; (d) falha de tração das peças; (e) efeito de esmagamento entre parafuso e peças; (f) corte por cisalhamento; (g) arrancamento por cisalhamento (SHIGLEY, 1984).	29
Figura 12 - Junta aparafusada sobre cisalhamento duplo (Adaptada de BRUHN, 1973).	30
Figura 13 - Junta aparafusada sobre cisalhamento duplo e distribuição de forças não uniforme.	31
Figura 14 - Junta aparafusada sobre cisalhamento simples.	32
Figura 15 - Distribuição de tensão triangular.	33
Figura 16 - Distribuição de tensão trapezoidal.	34
Figura 17 – Placa com elementos triangulares.	36
Figura 18 – Modelo com uma malha mais refinada na região de concentração de tensão.	37
Figura 19– Representação esquemática do elemento de mola (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).	39
Figura 20 – Sistema de coordenadas do elemento CQUAD4 (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).	40
Figura 21 – Forças, momentos e tensões em elementos de placa (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).	41

Figura 22 – Elemento CHEXA (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).....	42
Figura 23 – Elemento CTETRA (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).....	43
Figura 24 – Configuração das juntas aparafusadas.	45
Figura 25 – Parafuso NASM21134 (adaptada de NASM21134).....	46
Figura 26 – Porca NASM21133 (adaptada de NASM21133).....	47
Figura 27 – Modelo de elementos finitos bidimensionais.....	50
Figura 28 – Malha de elementos finitos do corpo do parafuso.	51
Figura 29 – Malha de elementos finitos da cabeça do parafuso e da porca.	51
Figura 30 – Malha de elementos finitos das peças unidas.....	52
Figura 31 – Contato entre as partes e direção dos elementos de mola.	54
Figura 32 – Condições de contorno e carregamento.	55
Figura 33 – Elementos rígidos RBE2 de ligação entre as extremidades das placas.....	55
Figura 34 – Propriedades dos materiais requeridas na modelagem.....	56
Figura 35 – Tabela de contato.	58
Figura 36 – Modelo tridimensional da configuração de junta 1.....	59
Figura 37 – Modelo tridimensional do parafuso	60
Figura 38 – Modelo tridimensional da porca.	60
Figura 39 – Condições de contorno no modelo tridimensional.....	61
Figura 40 – Disposição dos elementos de mola – configuração 1.	64
Figura 41 - Distribuição do carregamento – configuração 1.....	65
Figura 42 – Disposição dos elementos de mola – configuração 2.	65
Figura 43 - Distribuição de carregamento – configuração 2.	66
Figura 44 – Disposição dos elementos de mola – configuração 3.	67
Figura 45 - Distribuição de carregamento – configuração 3.	68
Figura 46 - Deslocamento translacional – configuração 1.	69
Figura 47 - Deslocamento translacional – configuração 2.	69
Figura 48 - Deslocamento translacional – configuração 3.	70
Figura 49 – Regiões de contato – configuração 1: (a)Interface parafuso e placa 1, (b) Interface parafuso e placa 2.	71
Figura 50 – Distribuição de carregamento na configuração 1 – Placa 1 X Parafuso.	73
Figura 51 – Distribuição de carregamento na configuração 1 – Placa 2 X Parafuso.	75
Figura 52 – Regiões de contato – configuração 2: Interface parafuso e placa 1.....	75
Figura 53 – Regiões de contato – configuração 2: Interface parafuso e placa 2.	76
Figura 54 – Distribuição de carregamento na configuração 2 – Placa 1 X Parafuso.	77

Figura 55 – Distribuição de carregamento na configuração 2 – Placa 2 X Parafuso.	79
Figura 56 – Regiões de contato – configuração 3: Interface parafuso e placa 1.	79
Figura 57 – Regiões de contato – configuração 3: Interface parafuso e placa 2.	80
Figura 58 – Distribuição de carregamento na configuração 3 – Placa 1 X Parafuso.	82
Figura 59 – Distribuição de carregamento na configuração 3 – Placa 2 X Parafuso.	84
Figura 60 - Deslocamento translacional – modelo tridimensional - configuração 1.....	85
Figura 61 - Deslocamento translacional – modelo tridimensional - configuração 2.....	85
Figura 62 - Deslocamento translacional – modelo tridimensional - configuração 3.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações das juntas aparafusadas.	45
Tabela 2 – Características do parafuso NASM21134 (NASM21134, 1999).	46
Tabela 3 – Características da porca NASM21133 (NASM21133, 1999).	47
Tabela 4 – Composição química das ligas de alumínio (ASM, 1997).	48
Tabela 5 – Propriedades mecânicas das ligas de alumínio (MMPDS-04, 2008).	48
Tabela 6 – Composição química do aço 4130 (ASM, 1997).....	49
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do aço 4130 (MMPDS-04, 2008).....	49
Tabela 8 - Espessuras dos modelos.	53
Tabela 9 – Coeficiente de atrito entre os corpos (OBERG et al, 2004).	57
Tabela 10 – Planilha de dados – Configuração 1.	62
Tabela 11 - Resultados do método analítico.....	63
Tabela 12 – Forças dos elementos de mola da configuração 1.	64
Tabela 13 – Forças dos elementos de mola da configuração 2.	66
Tabela 14 - Forças dos elementos de mola da configuração 3.	67
Tabela 15 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 1.....	72
Tabela 16 - Forças de contato modificadas entre Placa 1 e Parafuso da configuração 1.	73
Tabela 17 - Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 1.....	74
Tabela 18 - Forças de contato modificadas entre Placa 2 e Parafuso da configuração 1.	74
Tabela 19 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 2.....	76
Tabela 20 - Forças de contato modificadas entre Placa 1 e Parafuso da configuração 2.	77
Tabela 21 - Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 2.....	78
Tabela 22 - Forças de contato modificadas entre Placa 2 e Parafuso da configuração 2.	78
Tabela 23 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 3.....	80
Tabela 24 - Forças de contato modificadas entre Placa 1 e Parafuso da configuração 3.	81
Tabela 25 - Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 3.....	82
Tabela 26 - Forças de contato modificadas entre Placa 2 e Parafuso da configuração 3.	84
Tabela 27 – Comparação dos deslocamentos translacionais entre modelagem bidimensional e tridimensional das juntas.	86
Tabela 28 – Comparação dos métodos para a configuração de junta1.....	87
Tabela 29 – Comparação dos métodos para a configuração de junta2.....	87
Tabela 30 – Comparação dos métodos para a configuração de junta3.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	- American Iron and Steel Institute
ASM	- American Society for Metals
ASTM	- American Society for Testing and Materials
MEF	- Método dos elementos finitos
MIL-B	- Military specification
MIL-S	- Military specification
MMPDS	- Metallic Materials Properties Development and Standardization
NASM	- National Aerospace Standard

LISTA DE SÍMBOLOS

A_m	- Menor área na região da rosca	mm^2
A_s	- Área na região do corpo do parafuso	mm^2
b_i	- Distância entre a carga aplicada e a face do componente “i-ésimo” (braço de flexão)	mm
B_i	- Comprimento da distribuição de carga do componente “i-ésimo”	mm
CG	- Centróide de área	
d_2	- Diâmetro primitivo da rosca	mm
D	- Diâmetro do parafuso	mm
D_h	- Diâmetro da cabeça do parafuso ou da porca	mm
E	- Distância do centro do furo até a borda do componente	mm
E	- Módulo de elasticidade do material	MPa
F_i	- Pré-carregamento do parafuso	N
F_x	- Força normal atuando na face “x”	N
F_y	- Força normal atuando na face “y”	N
F_{xy}	- Força de cisalhamento no plano	N
G	- Folga entre as peças ou espessura do calço	mm
G	- Módulo de elasticidade	MPa
H	- Comprimento dos componentes unidos	mm
H	- Altura da cabeça do parafuso	mm
I	- Momento de inércia de área	mm^4
K	- Coeficiente de rigidez de mola	N/mm
L	- Passo da rosca	mm
L	- Comprimento do corpo do parafuso	mm
M	- Nó “m”	
M_x	- Momento de flexão na face “x”	$N.m$
M_y	- Momento de flexão na face “y”	$N.m$
M_{xy}	- Momento torsional	$N.m$
N	- Nó “n”	
P_a	- Força na junta no ponto “a”	N
P_b	- Força na junta no ponto “b”	N
P_B	- Força no parafuso	N

P_{Ba}	- Força no parafuso no ponto “a”	N
P_{Bb}	- Força no parafuso no ponto “b”	N
$P_{Ba'}$	- Força no parafuso no ponto “a”	N
$P_{Bb'}$	- Força no parafuso no ponto “b”	N
P_{Na}	- Força normal ao flanco da rosca	N
P_t	- Resistência a tração do parafuso	N
S_{bru}	- Tensão última admissível de esmagamento do material das peças a serem unidas	MPa
S_{bry}	- Tensão admissível de esmagamento do material das peças a serem unidas	MPa
S_{min}	- Tensão mínima ao longo da distribuição de carga no parafuso	MPa
S_{su}	- Tensão última admissível de cisalhamento do material do parafuso	MPa
S_{ut}	- Tensão última admissível de tração do material do parafuso	MPa
T	- Espessura das peças na região do furo	mm
t_i	- Espessura da peça “i-ésima”	mm
t_b	- Espessura do elemento de placa do corpo do parafuso	mm
t_{hn}	- Espessura do elemento de placa da cabeça do parafuso e da porca	mm
t_p	- Espessura do elemento de placa dos componentes	mm
T	- Torque total necessário para desenvolver a força axial no parafuso	$N.m$
T_1	- Torque devido a carga axial	$N.m$
T_2	- Torque devido a força de atrito entre filetes de rosca	$N.m$
T_3	- Torque devido a força de atrito entre cabeça ou porca e face de um dos componentes	$N.m$
u_n	- Deslocamento do nó “n”	mm
u_m	- Deslocamento do nó “m”	mm
u_x	- Grau de liberdade translacional na direção “x”	
u_y	- Grau de liberdade translacional na direção “y”	
u_z	- Grau de liberdade translacional na direção “z”	
θ_x	- Grau de liberdade rotacional na direção “x”	
θ_y	- Grau de liberdade rotacional na direção “y”	
θ_z	- Grau de liberdade rotacional na direção “z”	
V_x	- Força de cisalhamento transversal atuando na face “x”	N
V_y	- Força de cisalhamento transversal atuando na face “y”	N

B	- Ângulo de inclinação do filete de rosca	°
σ_x	– Tensão normal na direção “x”	<i>MPa</i>
σ_y	– Tensão normal na direção “y”	<i>MPa</i>
Σ	- tensão	<i>MPa</i>
σ_e	- tensão de escoamento	<i>MPa</i>
τ_{xy}	– Tensão de cisalhamento no plano	<i>MPa</i>
μ_1	- Coeficiente de atrito entre os filetes de rosca	
μ_2	- Coeficiente de atrito entre a porca ou a cabeça do parafuso e a face de um dos componentes	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações gerais.....	18
1.2	Objetivo.....	19
1.3	Justificativa da dissertação	19
1.4	Estrutura da dissertação	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Juntas aparafusadas	21
2.2	Pré-carregamento dos parafusos.....	24
2.3	Cálculo do torque.....	26
2.4	Comportamento da distribuição de carga no parafuso.....	27
2.4.1	Parafusos submetidos a cargas axiais	27
2.4.2	Parafusos submetidos a cargas cisalhantes ou transversais	29
2.4.3	Efeito da flexão nos parafusos	30
2.5	Calços	35
2.6	Método dos elementos finitos	35
2.6.1	Tipos de elementos.....	38
2.6.1.1	Elemento de mola (CELAS2)	38
2.6.1.2	Elemento rígido (RBE2).....	39
2.6.1.3	Elementos bidimensionais (CQUAD4 e CTRIA3).....	39
2.6.1.4	Elementos tridimensionais (CTETRA, CHEXA).....	42
2.6.1.5	Elemento de contato	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Materiais	47
3.2	Simulação computacional.....	49
3.2.1	Modelos bidimensionais	50
3.2.2	Modelos tridimensionais	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	Método analítico.....	62
4.2	Simulação computacional.....	63
4.2.1	Modelos bidimensionais	63
4.2.2	Modelos tridimensionais	70

5	CONCLUSÕES.....	90
6	PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	91
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A - EXEMPLOS DOS ARQUIVOS DE ENTRADA DE DADOS DOS	
	MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS - SOFTWARE MSC PATRAN® 2010.....	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

União de componentes mecânicos faz-se necessária para se obter um conjunto ou sistema com uma finalidade específica de tal modo a facilitar a sua construção e montagem. Segundo Griza (2000), a união dos materiais é um tópico multidisciplinar que está constantemente em evolução devido aos requisitos cada vez mais severos de desempenho e redução dos custos. Os métodos típicos de fixação ou união de peças incluem o uso de itens como parafusos, porcas, pinos, estrias, rebites, retentores de molas, dispositivos de travamento e chavetas (SHIGLEY, 1984).

Esses tipos de montagem, que requerem uniões mecânicas, são largamente utilizados nos projetos mecânicos e estruturais, desde simples condições até as mais complexas como aeronaves, as quais podem apresentar em torno de 2,5 milhões de uniões em sua construção.

Como cada vez mais, os projetos são definidos para resistirem maiores carregamentos, com menores dimensões dos elementos e serem, portanto, mais leves, a confiabilidade dos materiais, dos métodos de cálculo e da fabricação devem ser cada vez maiores.

Um dos métodos mais comum e mais utilizado de união é a realizada por parafuso e porca, conhecida como junta aparafusada. Por ser um tipo de união bastante difundida e que possui uma ampla literatura abordando esse assunto, muitas vezes não é considerada a importância necessária durante o projeto, aumentando a probabilidade de falha dos componentes unidos e do próprio parafuso ou porca. Efeitos combinados de tração, cisalhamento e flexão na junta podem apresentar condições indesejadas e, dependendo da aplicação, catastróficas se uma análise criteriosa não for utilizada.

Dessa forma, esse trabalho apresenta diferentes tipos de juntas aparafusadas, normalmente aplicadas em estruturas de alta responsabilidade, para analisar o comportamento da distribuição de carregamento ao longo do corpo do parafuso. A distribuição de carregamento influencia de forma bastante significativa no efeito de flexão do parafuso o qual, combinado com outras condições de contorno, torna-se um item de grande relevância durante a análise. As juntas definidas nesse estudo apresentam diferentes materiais e espessuras das placas envolvidas, a presença de calços ou não e parafusos de diferentes diâmetros. As análises contemplam o cálculo analítico o qual apresenta o tipo de distribuição

de carregamento, triangular, trapezoidal ou retangular, análise pelo método dos elementos finitos com modelos bidimensionais lineares e modelos tridimensionais com análise não linear contemplando os efeitos de contato e atrito. Assim, a correlação entre esses tipos de análise será realizada para demonstrar as variações dos resultados obtidos pelos métodos citados como os tipos de distribuição de carregamento, comprimento do corpo do parafuso que efetivamente sofre a aplicação das cargas, comportamento da junta em si e as particularidades de cada método.

1.2 Objetivo

O objetivo principal desse trabalho é realizar um estudo do comportamento da distribuição de carga nos parafusos em diferentes configurações de juntas utilizando um método analítico convencional e o método dos elementos finitos com modelamentos bidimensionais, tridimensionais, análises lineares e não lineares. Desse modo, atingir os objetivos específicos em correlacionar os resultados obtidos devidos aos métodos de análise utilizados e dissertar sobre as principais diferenças encontradas tendo como referência o método analítico.

1.3 Justificativa da dissertação

O desenvolvimento e dimensionamento de juntas, em sua grande maioria, remetem um vasto conhecimento na mecânica dos materiais e responsabilidade em sua análise uma vez que são regiões que apresentam concentração de tensão e possuem probabilidade alta de falhas estruturais levando em consideração um sistema mecânico como um todo. Especificamente as juntas aparafusadas, as quais suportam elevadas cargas de tração e cisalhamento, aplicação de torque de aperto, apresentam comportamentos não lineares como atrito entre os componentes unidos, deformações plásticas localizadas e momentos secundários tanto no corpo do parafuso como nas interfaces. Portanto, representar esses fenômenos durante as análises e possuir um método robusto que utilize de modo correto essas representações e considerações, motivam a realização de estudos sobre esse tema de importância no ambiente da mecânica.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho é dividido em seis capítulos. O primeiro introduz o assunto abordado no estudo e apresenta os objetivos; o segundo visa expor uma revisão bibliográfica dos trabalhos e literaturas mais relevantes e correlatas. O terceiro capítulo aborda a metodologia utilizada e seus fundamentos ao longo do trabalho. O quarto apresenta os resultados obtidos utilizando o método analítico e pelas simulações computacionais, e o quinto capítulo descreve as conclusões obtidas da análise dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Juntas aparafusadas

Juntas aparafusadas possuem uma característica peculiar em possibilitar a desmontagem e a remontagem da estrutura ou do conjunto mecânico sem grandes esforços ou que acarretem efeitos indesejáveis ou retrabalho. Isso impacta diretamente o custo de um projeto, pois um componente fixado por parafusos pode ser trocado devido a uma falha em detrimento do sistema.

Os parafusos são usados basicamente para transferir elevadas cargas de tração e cisalhamento de um elemento para outro (BRUHN, 1973). Eles são fabricados com diferentes tipos de geometria e materiais para satisfazer as mais diversas aplicações e restrições impostas.

De acordo com Niu (1988), para garantir uma vida em serviço satisfatória de parafusos e porcas combinados com a resistência requerida de projeto, deve-se verificar o tipo de rosca mais apropriada e a estrutura do material na região roscada.

Sabe-se que a região da rosca no corpo do parafuso gera concentração de tensão devido à geometria presente. Assim, algumas melhorias no processo de fabricação foram adotadas para se obter ganhos de resistência estática e na vida em fadiga desse elemento. As normas MIL-B-7838 e MIL-S-8879 especificam um raio mínimo na raiz do filete o qual é obtido por um processo de rolamento da rosca. Na Figura 1 é apresentada a diferença entre rosca usinada e rolada.

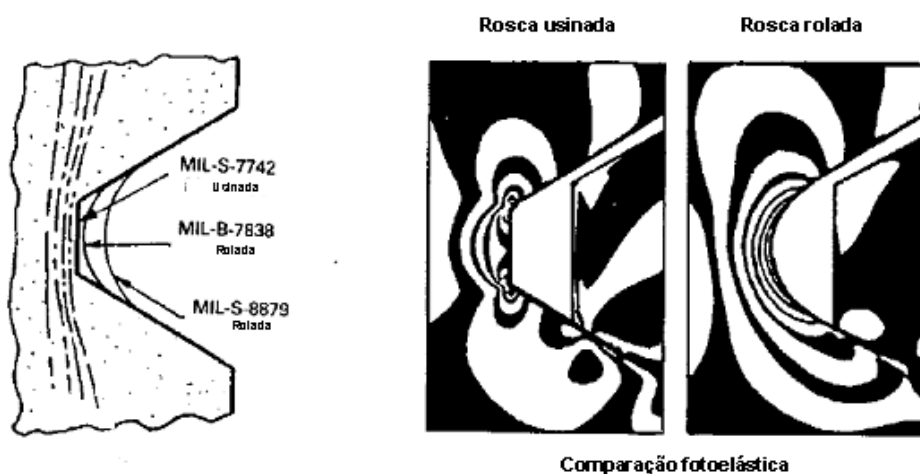


Figura 1 – Comparação entre rosca usinada e rolada (Adaptada de NIU, 1988).

Pode-se observar também que a rosca rolada apresenta uma distribuição de tensão mais uniforme, o que acarreta uma menor tendência de nucleação de trincas nessa região devido a cargas cíclicas. O processo de fabricação da rosca rolada é ilustrado na Figura 2.



(a)



(b)

Figura 2 – Processo de fabricação da rosca rolada; (a) rosca em região com acesso transversal; (b) rosca em região com acesso axial (Adaptada de FETTE catalogs).

Além disso, segundo Bruhn (1973), um bom projeto não deve submeter os filetes de rosca a cisalhamento ou esmagamento. Para isso, o comprimento do corpo do parafuso precisa ser tal que não mais de um filete permaneça em contato com a superfície do furo. Por outro lado, toda a região da rosca fora do furo pode gerar torque falso e, conseqüentemente, não haverá uma boa união entre os componentes. De forma a cumprir com esse requisito, arruelas podem ser utilizadas entre a cabeça e a face de uma das peças a ser unida. Na Figura 3 é exemplificado um projeto onde não há presença de filetes de rosca em contato com o furo.

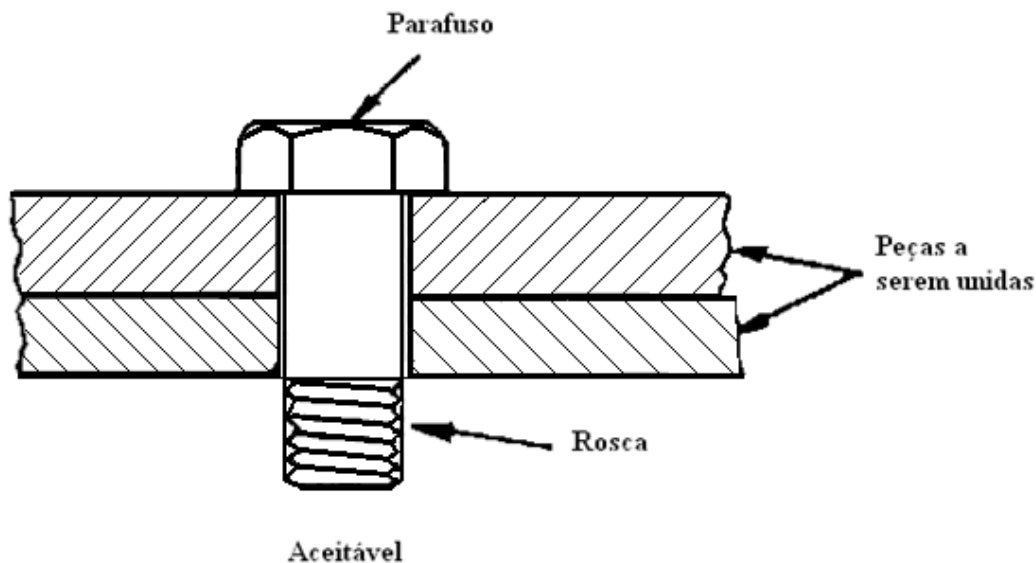


Figura 3 – Posicionamento aceitável entre parafuso e partes unidas (Adaptada de NIU, 1988).

Juntamente com o parafuso, existe a presença da porca a qual apresenta também uma grande importância nas juntas aparafusadas. O material da porca normalmente é mais dúctil que o do parafuso para que, quando o torque de aperto for aplicado, a rosca irá defletir e assentar nos filetes do parafuso. No entanto, é prudente selecionar o material da porca visando a não diminuição da resistência da junta como um todo.

De modo geral, as porcas são classificadas como de tração e de cisalhamento. Basicamente, as de tração possuem uma maior altura e quantidade de filetes de rosca do que os encontrados nas porcas de cisalhamento, apresentando uma resistência a tração superior. As diferenças geométricas podem ser observadas na Figura 4.

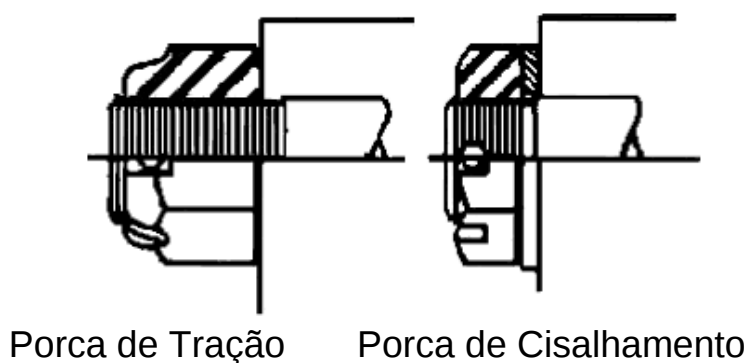


Figura 4– Tipos de porca (Adaptada de BRUHN, 1973).

2.2 Pré-carregamento dos parafusos

Em toda junta aparafusada, o parafuso é pré-carregado aplicando-se um torque na cabeça ou na porca, resultando em uma força de união entre os componentes. O torque a ser aplicado depende do material do parafuso, da porca e da arruela, do acabamento superficial das peças a serem unidas, do grau de lubrificação e do número de vezes que o parafuso foi instalado.

Altos pré-carregamentos aumentam a resistência da junta, gera atrito entre as partes para resistir o cisalhamento e melhora a resistência à fadiga, principalmente pela indução de cargas compressivas nas superfícies dos componentes unidos (OBERG et al, 2004). Segundo Oberg et al (2004), o pré-carregamento recomendado, F_i , mostrado na Figura 5, para ser utilizado tanto em condições estáticas como em aplicações de fadiga é 75% da força de escoamento do material do parafuso para juntas desmontáveis e de 90% para juntas permanentes.

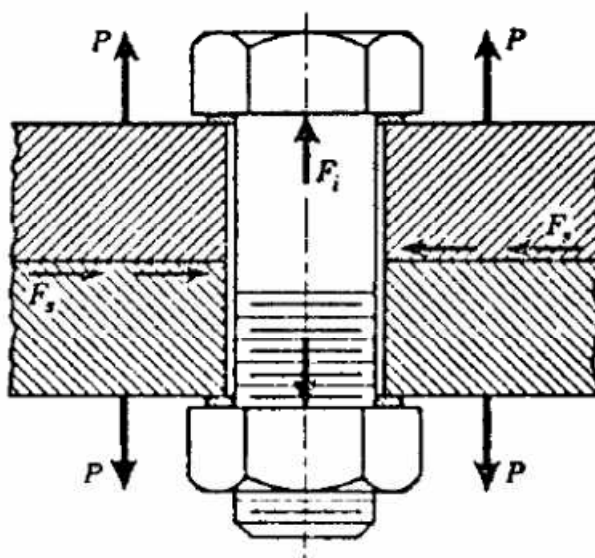


Figura 5 – Pré-carregamento em uma junta aparafusada (Adaptada de SHIGLEY, 1984).

Além dos benefícios do torqueamento do parafuso citados acima, deve-se ressaltar a importância do mesmo para a permanência das partes da junta em contato evitando um possível vazamento e espaçamento.

Ainda considerando a figura 5, se a força P variar de P_a para P_b , a força no parafuso irá variar de P_{Ba} para P_{Bb} . Contudo, se o pré-carregamento F_i for aplicado no parafuso, a junta

estará comprimida e a força no parafuso irá mudar mais lentamente que o carregamento da junta. Isso ocorre, pois parte desse carregamento é absorvida para reduzir a compressão e a força no parafuso irá seguir agora de $P_{Ba'}$ para $P_{Bb'}$, conforme mostrado na figura 6. Esta condição reduz consideravelmente a variação de carga no parafuso e consequentemente aumenta a vida em fadiga do prendedor (OBERG et al, 2004).

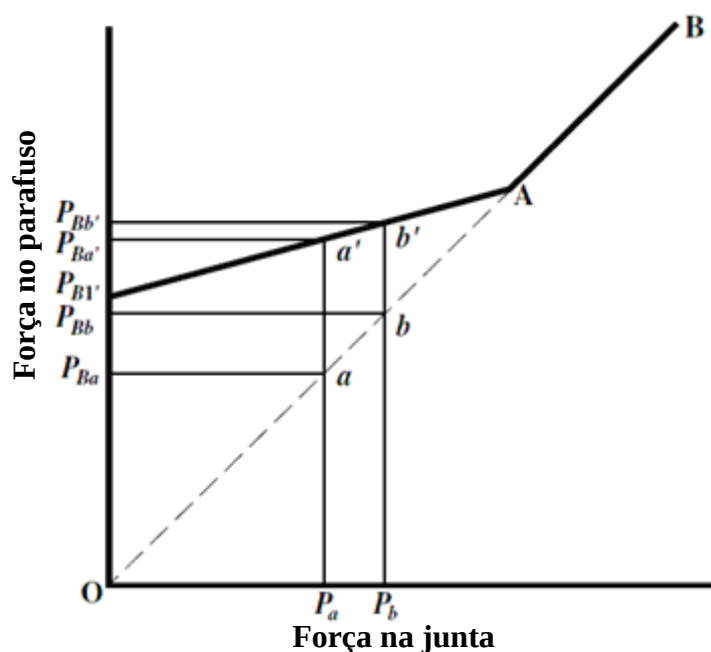


Figura 6 – Força no parafuso com carregamento axial aplicado na junta (Adaptada de OBERG et al, 2004).

Devido ao torque aplicado, escoamento localizado nas regiões entre a cabeça do parafuso e a peça e, entre a porca e o outro componente pode ocorrer. A consequência desse efeito é o relaxamento do pré-carregamento.

Algumas ações podem ser tomadas para evitar essa perda de carga, como utilizar arruelas para aumentar a área de contato e o reaperto do parafuso.

Dependendo do método de medição, o torque aplicado pode variar em até 25%. Os métodos mais comuns são o uso de torquímetro, alongamento do parafuso, giro da porca, *strain gages* e outros.

A escolha do método dependerá de quão preciso deverá ser a medida associado ao custo envolvido na medição.

2.3 Cálculo do torque

Para que a força axial seja atingida no parafuso, o torque aplicado deve superar o atrito entre os filetes de rosca e nas regiões da cabeça e da porca. Na Figura 7, a força axial definida como P_B é um dos componentes da força normal à hélice da rosca e, o outro é a força devido ao torque $P_B \cdot \tan \beta$. Assumindo que a força de giro é aplicada no diâmetro primitivo da rosca, o torque T_1 necessário para desenvolver a carga axial é:

$$T_1 = \frac{P_B \times \tan \beta \times d_2}{2} \quad (1)$$

Sendo:

β o ângulo de inclinação do filete de rosca;
 d_2 o diâmetro primitivo da rosca.

Considerando l o passo e substituindo $\tan \beta = \frac{l}{d_2 \times \pi}$, a equação (1) será:

$$T_1 = \frac{P_B \times l}{2 \times \pi} \quad (2)$$

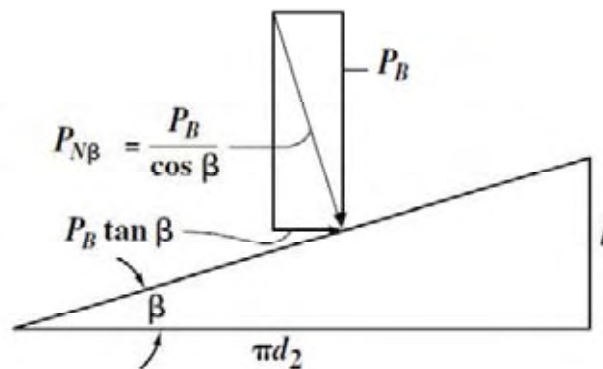


Figura 7 – Diagrama de corpo livre das forças no filete de rosca (OBERG et al, 2004).

Considerando $P_{N\alpha}$ a força normal ao flanco da rosca, μ_1 o coeficiente de atrito entre os filetes (veja Figura 8), o torque para superar a força de atrito será:

$$T_2 = \frac{d_2 \times \mu_1 \times P_B}{2 \times \cos \alpha} \quad (3)$$

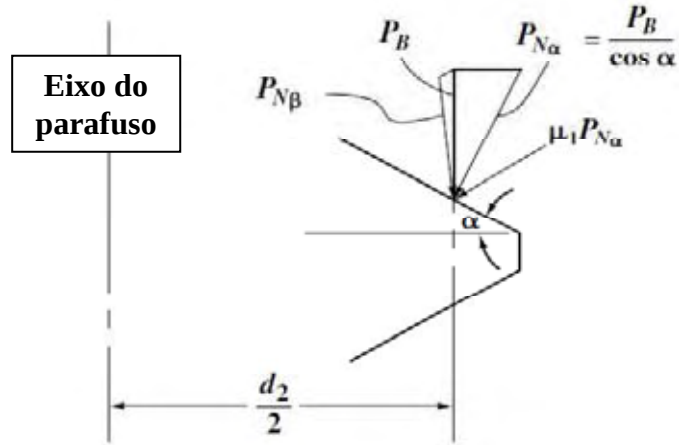


Figura 8 – Força de atrito na rosca (adaptada de OBERG et al, 2004).

Com o coeficiente de atrito μ_2 entre a porca ou a cabeça do parafuso e a face de um dos componentes, o torque para compensar essa força de atrito ainda dependerá do diâmetro do parafuso (d) e do diâmetro da cabeça do parafuso ou da porca (b) e será:

$$T_3 = \left(\frac{d + b}{4} \right) \times \mu_2 \times P_B \quad (4)$$

Portanto, o torque total necessário para desenvolver a força axial no parafuso será a soma dos torques:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (5)$$

2.4 Comportamento da distribuição de carga no parafuso

2.4.1 Parafusos submetidos a cargas axiais

Na Figura 9 é mostrado um parafuso submetido a um carregamento de tração mais ao efeito do torqueamento.

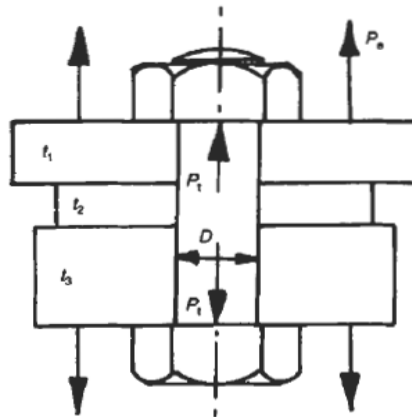


Figura 9 – Parafuso submetido a carregamento de tração (CARVILL, 1993).

Nesta condição, a resistência à tração do parafuso pode ser descrita como (NIU, 2005):

$$P_t = S_{ut} \cdot A_m \quad (6)$$

Sendo: S_{ut} a tensão última admissível de tração do material do parafuso;
 A_m a menor área na região da rosca.

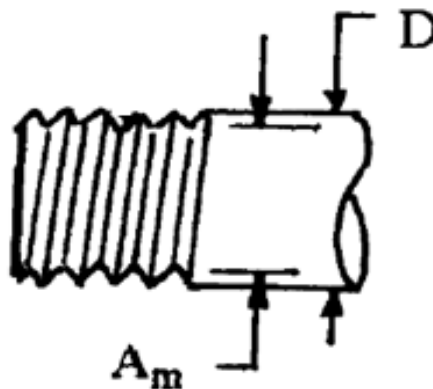


Figura 10 – Menor área na região da rosca (Adaptada de NIU, 2005).

Essa metodologia também pode ser aplicada para avaliar a resistência ao escoamento substituindo na equação (6) o valor da resistência à tração.

Além disso, um dimensionamento de junta robusta também se deve considerar a resistência das peças a serem unidas devido ao esmagamento na região de aperto e a resistência ao arrancamento da cabeça quando utilizar um parafuso com cabeça escareada.

Esse último deve-se realizar ensaios para a obtenção das tensões admissíveis, uma vez que, é dependente dos materiais envolvidos e da geometria da junta.

2.4.2 Parafusos submetidos a cargas cisalhantes ou transversais

De modo a exemplificar a consequência das cargas cisalhantes ou transversais em juntas, uma junta rebitada submetida a esse tipo de carregamento é mostrada na Figura 11. Seus efeitos e falhas podem representar o comportamento em juntas aparafusadas.

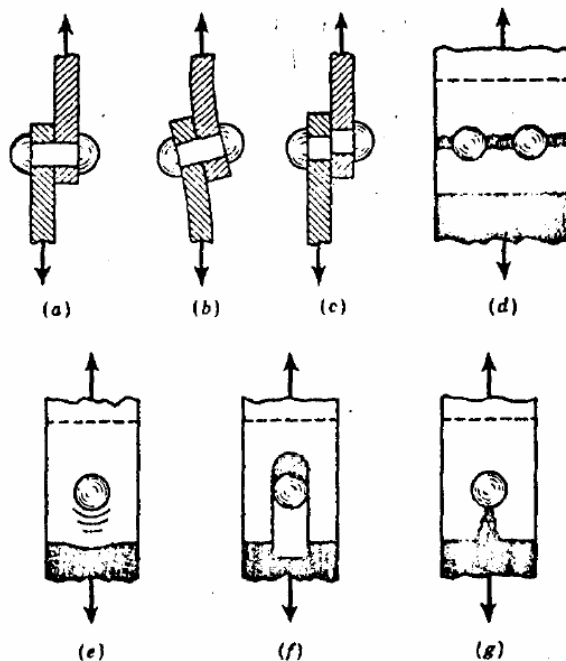


Figura 11 – Tipos de falha de uniões rebitadas sujeitas ao cisalhamento. (a) Carregamento de cisalhamento; (b) flexão do parafuso; (c) cisalhamento do parafuso; (d) falha de tração das peças; (e) efeito de esmagamento entre parafuso e peças; (f) corte por cisalhamento; (g) arrancamento por cisalhamento (SHIGLEY, 1984).

Segundo Niu (2005), a resistência ao cisalhamento do parafuso pode ser determinada como:

$$P_s = S_{su} \times A_s \quad (7)$$

Sendo: S_{su} a tensão última admissível de cisalhamento do material do parafuso;
 A_s a área na região do corpo do parafuso.

No caso da presença do carregamento cisalhante na junta, deve-se avaliar a resistência do furo quanto ao esmagamento devido ao contato com o corpo do parafuso. Assim, a resistência da peça ao esmagamento será:

$$P_{br} = S_{bru} \times D \times t \quad (8)$$

Sendo: S_{bru} a tensão última admissível de esmagamento do material das peças a serem unidas;
 D o diâmetro do parafuso;
 t a espessura das peças na região do furo.

Tanto na equação (7) como na equação (8), a metodologia pode ser aplicada para avaliar o efeito de escoamento substituindo as tensões últimas admissíveis pelas tensões de escoamento.

2.4.3 Efeito da flexão nos parafusos

A maioria dos métodos analíticos considera no dimensionamento do parafuso, devido à flexão, um braço aproximado, o qual é determinado julgando que a distribuição de forças de contato entre o corpo do parafuso e o furo é uniforme. Na Figura 12 é mostrada uma junta sobre cisalhamento duplo.

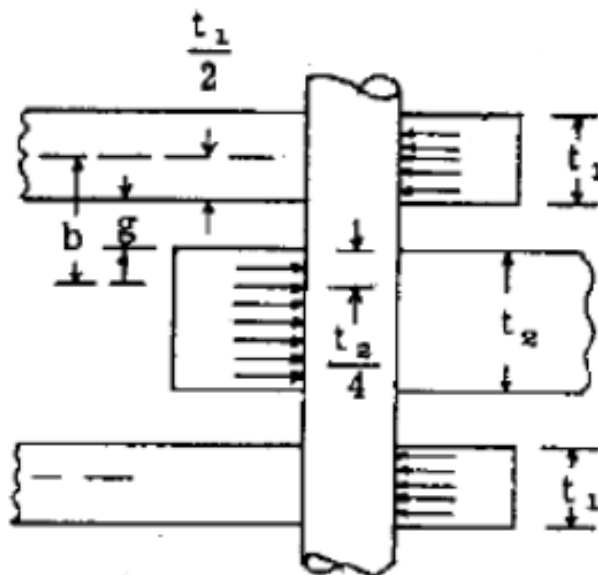


Figura 12 - Junta aparafusada sobre cisalhamento duplo (Adaptada de BRUHN, 1973).

De acordo com Bruhn (1973), o braço é definido pela equação (9) para casos de cisalhamento simples no parafuso e pela equação (10) para duplo cisalhamento.

$$b = \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} + g \quad (9)$$

$$b = \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{4} + g \quad (10)$$

Sendo: b braço de flexão;
 t_1 espessura da peça 1;
 t_2 espessura da peça 2;
 g folga entre as peças ou espessura do calço.

No entanto, Niu (2005) menciona que como o parafuso flexiona, a distribuição de tensão tende a apresentar um pico do que apresentar uma distribuição uniforme como citado anteriormente.

Esta variação ao longo do contato entre o parafuso e o furo resulta em uma distribuição de carga triangular ou trapezoidal a qual reduz o braço de flexão e, conseqüentemente, a tensão. Na Figura 13 é apresentado um exemplo de distribuições não uniformes em uma junta de duplo cisalhamento.

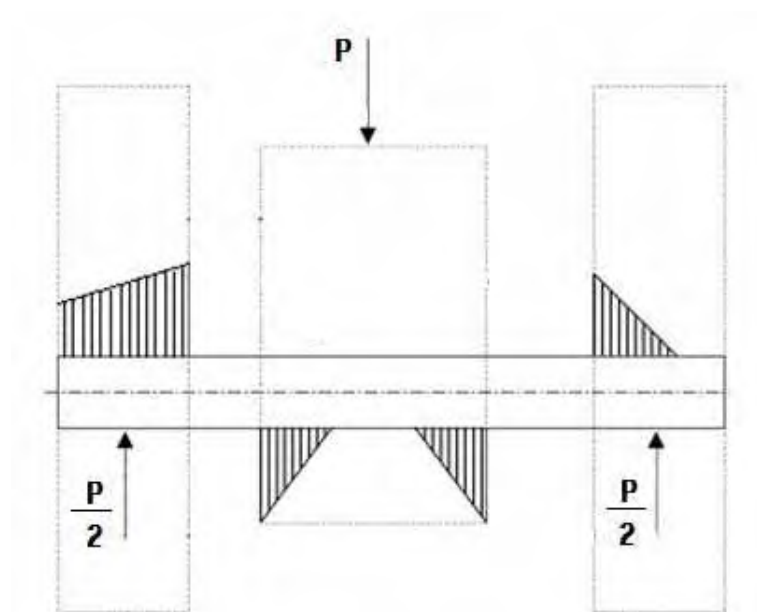


Figura 13 - Junta aparafusada sobre cisalhamento duplo e distribuição de forças não uniforme.

O comportamento da distribuição de carga depende da espessura dos componentes a serem unidos, do diâmetro do parafuso e das tensões admissíveis de esmagamento dos materiais envolvidos.

No caso de cisalhamento simples, o comportamento da distribuição de carregamento e o braço de flexão podem ser ilustrados na Figura 14:

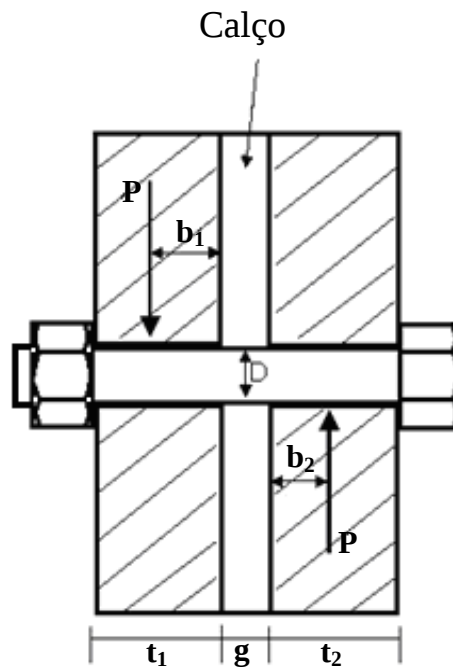


Figura 14 - Junta aparafusada sobre cisalhamento simples.

Sendo: b_1 distância entre a carga aplicada e a face do componente 1;
 b_2 distância entre a carga aplicada e a face do componente 2;
 t_1 espessura do componente 1;
 t_2 espessura do componente 2;
 g espessura do calço;
 P força na junta;
 D diâmetro do parafuso.

Primeiramente é considerada uma distribuição de cargas triangulares e, a máxima tensão, é a mínima tensão admissível de esmagamento entre as partes envolvidas (Figura 15), contemplando os materiais do parafuso e das peças unidas.

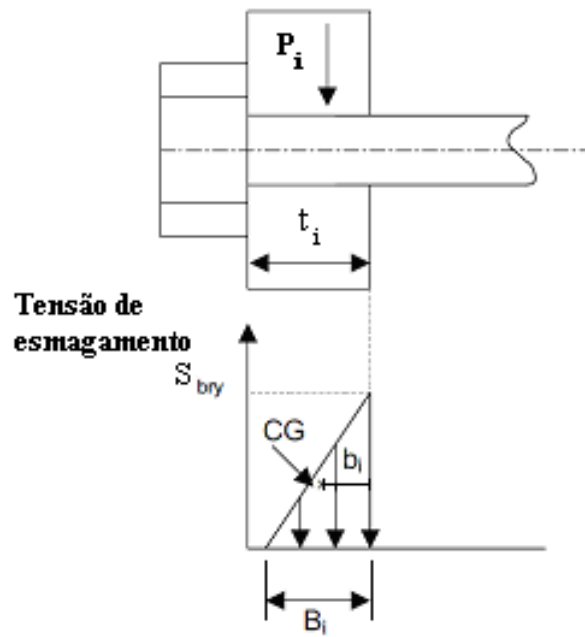


Figura 15 - Distribuição de tensão triangular.

Na Figura 15, se D é o diâmetro do parafuso, a reação neste item pode ser escrita como:

$$P = \frac{S_{bry} \times B_i}{2} \times D \quad (11)$$

Onde S_{bry} é a mínima tensão admissível de esmagamento entre as partes a serem unidas e o parafuso e, B_i é o comprimento da distribuição de carga. Então,

$$B_i = \frac{2 \times P}{S_{bry} \times D} \quad (12)$$

O valor de b_i depende do valor obtido para B_i :

Se $B_i \leq t_i$, é assumido que existe uma distribuição triangular do carregamento e b_i será:

$$b_i = \frac{B_i}{3} \quad (13)$$

Se $B_i > t_i$, a distribuição de carregamento pode ser trapezoidal ou retangular.

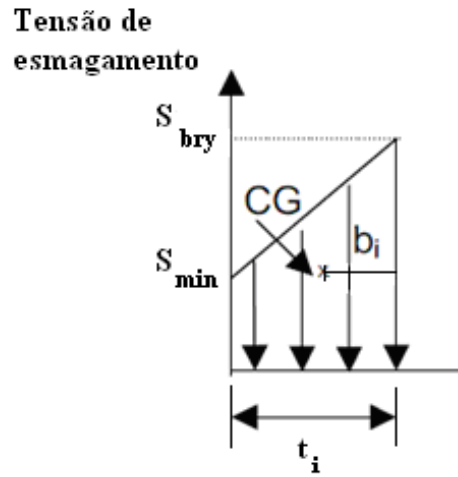


Figura 16 - Distribuição de tensão trapezoidal.

Da Figura 16, a reação no parafuso pode ser escrita como:

$$P = \frac{S_{bry} + S_{min}}{2} \times t_i \times D \quad (14)$$

Portanto,

$$S_{min} = \frac{2 \times P}{t_i \times D} - S_{bry} \quad (15)$$

Se $S_{min} \geq S_{bry}$, deformação plástica (ou falha em uma condição última) ocorre, e a distribuição de carga torna-se uniforme apresentando um comportamento retangular. Consequentemente, b_i será:

$$b_i = \frac{t_i}{2} \quad (16)$$

Contudo, se $S_{min} < S_{bry}$, a distribuição de carregamento apresentará um comportamento trapezoidal e b_i será:

$$b_i = \frac{t_i}{3} \times \left(\frac{S_{bry} + 2 \times S_{min}}{S_{bry} + S_{min}} \right) \quad (17)$$

2.5 Calços

Em diversas aplicações, os calços são utilizados em juntas aparafusadas para compensar efeitos de tolerância geométrica entre peças a serem unidas, para manter o contorno ou o alinhamento entre componentes e, sua presença gera alguns efeitos que devem ser avaliados.

Quando calço é inserido entre os componentes, há principalmente um aumento na tensão no parafuso devido à flexão. Isso ocorre por causa do aumento do braço de flexão e que, consequentemente, induz um maior momento fletor no parafuso.

Segundo Bruhn (1973), quando um calço é razoavelmente fino, i.e., possui uma espessura entre 10 % a 12 % do diâmetro do parafuso, seu efeito é normalmente ignorado.

Acima desse valor, o calço deve ser considerado e a análise deve seguir as equações descritas anteriormente.

2.6 Método dos elementos finitos

Haja vista que o método dos elementos finitos é bem difundido e explanado na literatura e no ambiente técnico, para esse trabalho, torna-se bastante interessante elucidar de forma sucinta a origem e seus principais conceitos enfatizando a análise estrutural.

Sabe-se que a maior parte dos projetos, que são alvos de estudo, possui sistemas irregulares e arbitrários, tornando-se quase impossível a obtenção da solução analítica exata, requerendo grandes e excessivas simplificações, resultando na maioria das vezes em cálculos pouco acurados.

De acordo com Cook (1994), o método foi primeiramente aplicado à análise de tensões e, desde então, tem sido aplicado também a outros problemas do contínuo como análises térmicas e de escoamento de fluidos.

Da resistência dos materiais é sabido que por meio de métodos analíticos clássicos podem-se obter resultados exatos de deslocamentos, deformações e tensões em estruturas com baixa complexidade, sendo possível determiná-las em todos os seus pontos, isto é, nos seus infinitos pontos.

Devido a isso, métodos aproximados começaram a ser estudado para que pudessem ser aplicados em uma maneira geral, sendo a estrutura complexa ou simples, submetida a

qualquer condição de carregamento, desde que resultassem em valores dentro da precisão aceitável do problema de engenharia. Daí, então, surge o Método dos Elementos Finitos.

A origem do método dos elementos finitos moderno pode ter sido traçado em meados de 1900, quando alguns investigadores aproximaram e modelaram um elástico contínuo usando discretização equivalente de barras elásticas. Entretanto, segundo MOAVENI (1999), Courant obteve todos os créditos por ter sido a primeira pessoa a desenvolver o método dos elementos finitos. Em um artigo publicado em meados de 1940, Courant usou interpolação polinomial sobre sub-regiões triangulares para investigar problemas de torção. Contudo, até a década de sessenta não era muito popular, até que Clough criou o termo “elemento finito” (LOPES, 2002).

O conceito básico por trás do método dos elementos finitos é a discretização. Ao contrário da solução analítica que mostra o comportamento exato do sistema em qualquer ponto dentro deste, este método aproximado trabalha dentro dos parâmetros de precisão, somente em pontos discretos, chamados nós (LOPES, 2002). O procedimento de discretização consiste em dividir a estrutura em um número finito de partes ou elementos fazendo com que a solução possa ser representada por uma função aproximadora muito mais simples que a requerida para a estrutura como um todo. O número de pontos discretos escolhidos sendo suficientes para representar a solução do conjunto inteiro de forma aproximada dependerá do trecho que será analisado bem como a acuracidade do projeto.

Observando a Figura 17, nota-se que a estrutura foi dividida em partes menores denominadas elementos. Nesse caso, eles são de forma triangular não uniformes, mas existem outros tipos de elementos como de barra, quadrangular, tetraedros e cúbicos (hexas), sendo esses dois últimos para o caso de sólidos.

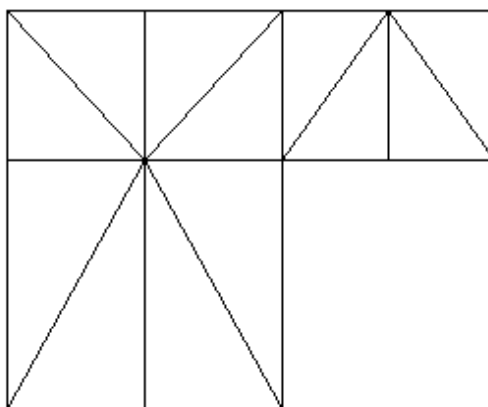


Figura 17 – Placa com elementos triangulares.

Na Figura 18, é representado um modelo com uma malha mais refinada. Esta subdivisão deve-se a necessidade de elementos menores nas regiões de grande variação da solução; regiões de pequenas variações não necessitam de divisão fina (GRANDIN, 1986).

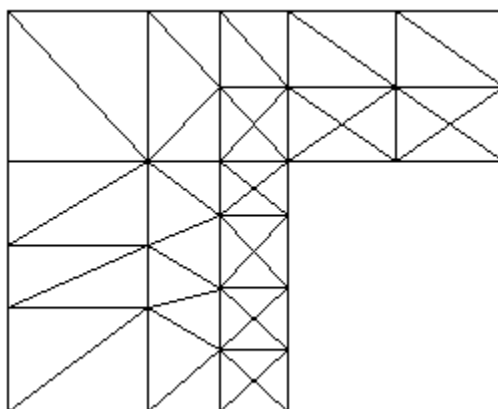


Figura 18 – Modelo com uma malha mais refinada na região de concentração de tensão.

Para a análise de elementos finitos, existem alguns passos que são: fase de pré-processamento, fase de solução das equações e fase de pós-processamento.

Em relação à fase de pré-processamento existem as seguintes etapas:

1. Criar e discretizar o domínio da solução em elementos finitos, isto é, subdividir o domínio em elementos (barra, viga, chapa, placa, casca, etc.) e nós;
2. Assumir uma função de forma para representar o comportamento físico de um elemento, isto é, assume-se uma função contínua aproximadora para representar a solução dentro do elemento;
3. Desenvolver as equações para um elemento;
4. Efetuar a montagem de elementos a fim de representar o domínio inteiro: construir a matriz de rigidez global do domínio;
5. Aplicar as condições de carregamento, condições de contorno e condições iniciais.

A etapa seguinte se encontra dentro da fase de solução das equações, que é:

6. Resolver um conjunto de equações lineares ou não lineares simultaneamente para obter os resultados nodais, tais como valores de deslocamento nos diversos nós de uma estrutura.

Já na fase de pós-processamento tem-se a seguinte etapa:

7. Obter outras informações importantes: tensões principais, deslocamentos, etc.

Em geral, há vários desenvolvimentos para formular problemas utilizando elementos finitos: (1) formulação direta, (2) formulação da mínima energia potencial total e (3) formulações de métodos de resíduos ponderados. É importante observar que os passos básicos envolvidos em qualquer análise de elementos finitos serão sempre os mesmos, independentes da formulação utilizada para se chegar às equações de elementos finitos (GRANDIN, 1986).

2.6.1 Tipos de elementos

Como foi dito anteriormente, cada elemento possui diversas equações que constituem sua base matemática e descreve seu comportamento devido aos carregamentos e condições de contorno.

Nesse trabalho foi utilizado a metodologia presente no software MSC Patran® 2010 o qual possui uma grande variedade de elementos e recursos matemáticos para representar um modelo de elementos finitos estrutural.

Não é escopo apresentar a formulação utilizada nos modelos desenvolvidos por este software, no entanto, são apresentadas de forma geral algumas características consideradas fundamentais para o desenvolvimento desse estudo.

2.6.1.1 Elemento de mola (CELAS2)

Elementos de mola, também conhecidos como elementos zero-dimensionais ou elementos escalares, conectam dois graus de liberdade, com um em cada nó. Eles se comportam como simples molas de tração, compressão ou de torção, resultando em forças ou momentos. As forças definem deslocamentos axiais translacionais e os momentos em deslocamentos angulares.

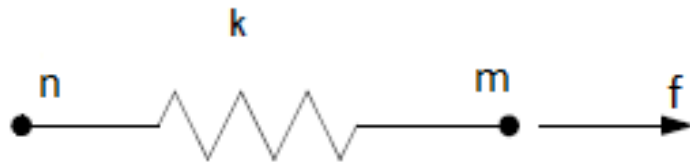


Figura 19– Representação esquemática do elemento de mola (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).

A força no elemento de mola é calculada como:

$$f = k \times (u_n - u_m) \quad (18)$$

Sendo,

u_n – deslocamento do nó n ;

u_m – deslocamento do nó m .

2.6.1.2 Elemento rígido (RBE2)

O elemento RBE2 define um corpo rígido no qual os graus de liberdade independentes são especificados em um único ponto ou nó e os graus de liberdade dependentes são especificados em um número arbitrário de pontos ou nós. O RBE2 não causa dificuldades numéricas, pois não adiciona rigidez ao modelo de elementos finitos. Esse elemento de fato é um tipo de restrição que prescreve a relação de deslocamento entre dois ou mais pontos ou nós.

2.6.1.3 Elementos bidimensionais (CQUAD4 e CTRIA3)

Os elementos do tipo CQUAD4 e CTRIA3 são normalmente referidos como elementos de placa ou casca. Eles diferem-se pela sua forma, número de nós conectados e de pontos que fornecem tensões internas. Cada um pode ser usado em modelos de membrana, placa, casca grossa ou fina.

O sistema de coordenadas do elemento CQUAD4 é semelhante ao do CTRIA3 e está representado na Figura 20.

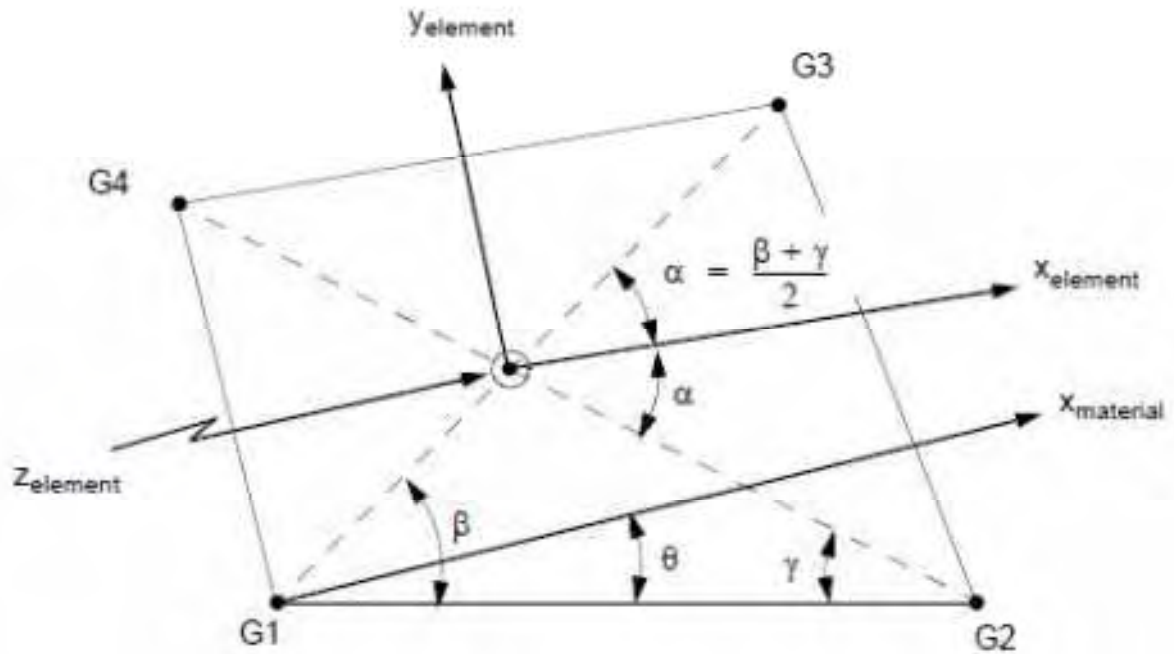


Figura 20 – Sistema de coordenadas do elemento CQUAD4 (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).

A orientação do sistema de coordenadas é determinada segundo a ordem de conectividade dos nós. O eixo Z do elemento é determinado utilizando a regra da mão direita. Portanto, se a ordem da conectividade dos nós mudar, há uma inversão na direção do eixo Z.

Na Figura 21 são mostradas as direções positivas das forças, momentos e tensões para um elemento de placa. Eles são definidos como:

F_x, F_y – Forças normais atuando nas faces x e y;

F_{xy} – Força de cisalhamento no plano;

V_x, V_y – Forças de cisalhamento transversais atuando nas faces x e y;

M_x, M_y – Momentos de flexão nas faces x e y;

M_{xy} – Momento torsional;

σ_x, σ_y – Tensões normais nas direções x e y;

τ_{xy} – Tensão de cisalhamento no plano.

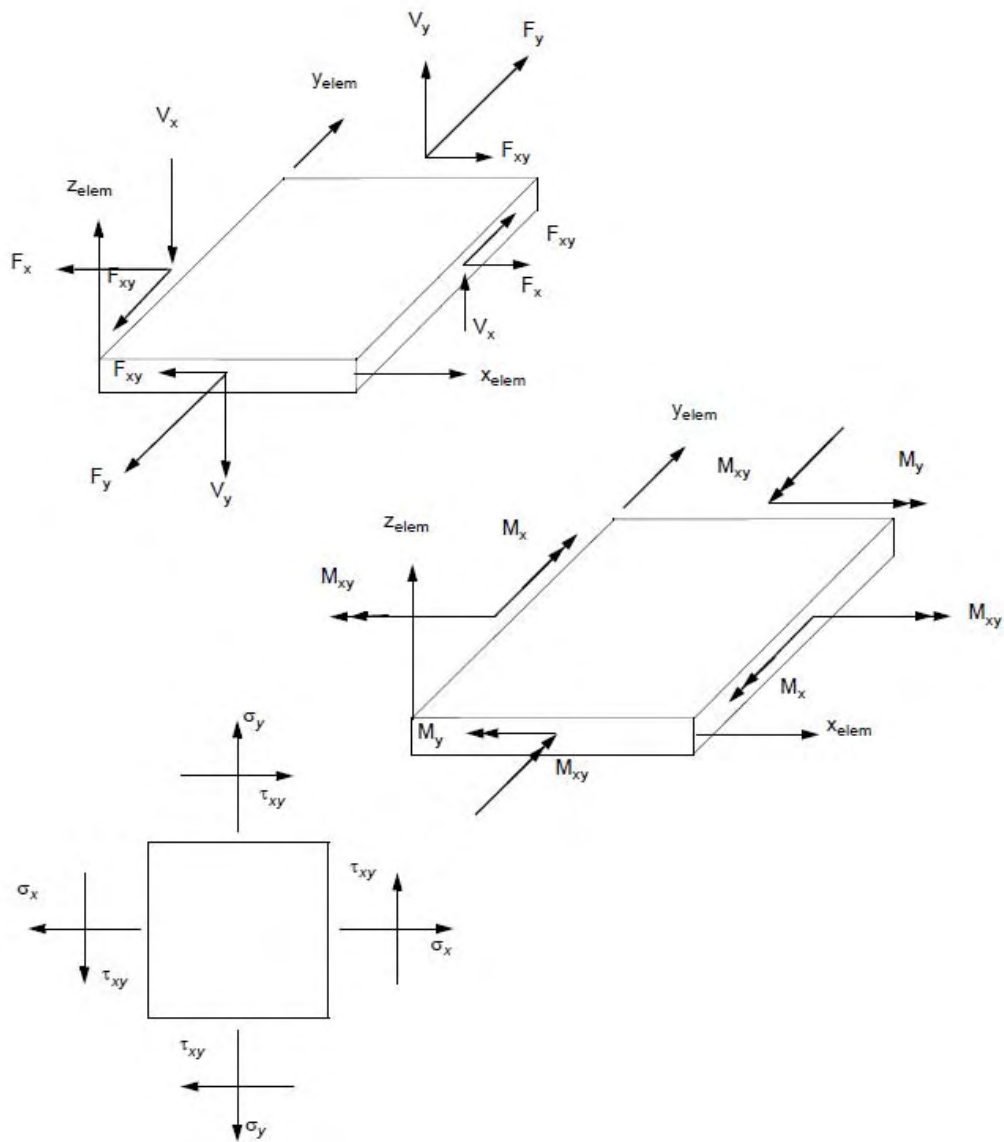


Figura 21 – Forças, momentos e tensões em elementos de placa (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).

Como se pode observar, para definir o elemento CQUAD4, deve-se especificar quatro nós enquanto para o elemento CTRIA3 três nós. Esses nós definem as suas arestas. O elemento, no entanto, é elasticamente conectado a apenas cinco dos seis graus de liberdade em cada um dos nós. O elemento não oferece uma rigidez elástica direta para o sexto grau de liberdade, i.e., a rotação em torno da normal a superfície do elemento.

2.6.1.4 Elementos tridimensionais (CTETRA, CHEXA)

Elementos tridimensionais são comumente conhecidos como elementos sólidos e utilizados para modelar estruturas que não podem ser representadas por elementos de viga ou placa, ou quando, necessita-se de resultados mais precisos em regiões específicas.

Os elementos CTETRA e CHEXA são usados para aplicações gerais de modelamento. Eles se diferem principalmente pelo número de faces e pelo número de nós conectados.

O elemento CHEXA é também denominado de elemento de bloco e possui seis faces. O elemento CTETRA é conhecido como elemento pirâmide e possui quatro faces. Prefere-se utilizar o CHEXA nos modelamentos enquanto o CTETRA é utilizado nas transições de malha ou em regiões nas quais o CHEXA apresenta distorções.

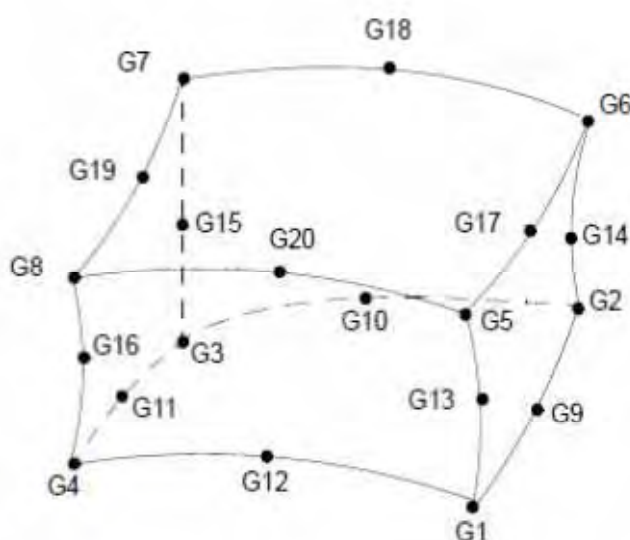


Figura 22 – Elemento CHEXA (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).

Como pode ser observado na Figura 22, o elemento CHEXA é definido por oito nós nas suas arestas e por até doze nós intermediários.

No caso do elemento CTETRA, existem quatro nós definindo suas arestas e até seis nós intermediários. Veja a Figura 23.

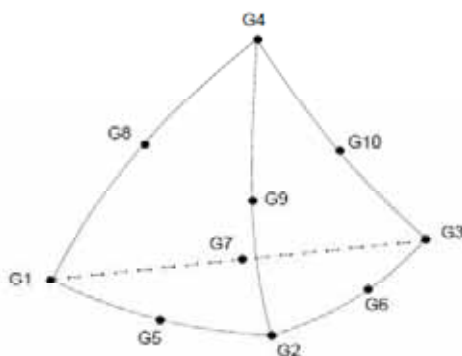


Figura 23 – Elemento CTETRA (MSC SOFTWARE CORPORATION, 2010).

2.6.1.5 Elemento de contato

A simulação de vários problemas físicos requer a modelagem do fenômeno de contato. A análise de contato torna-se bastante complexa principalmente devido à precisão do movimento de múltiplos corpos geométricos antes e depois da ocorrência do contato. Para esse tipo de análise, foi utilizado o auxílio computacional do *MSC Nastran Implicit Nonlinear*. Dois tipos de formulação para a modelagem da interação entre os corpos são adotados pelo *software Patran*.: formulação de pequenos deslizamentos e grandes deslizamentos. O primeiro envolve condições onde os deslocamentos entre os corpos são pequenos e contempla até o caso especial onde não é permitido separação dos componentes nem deslizamento. A segunda formulação permite o contato e separação, deslizamentos de grande amplitude e rotação arbitrária dos corpos.

Os modelos sólidos deste trabalho foram aplicados os contatos do tipo deformável-deformável entre os corpos definidos como deformáveis.

Corpos deformáveis são simplesmente um conjunto de elementos finitos os quais compõem esse corpo, os nós na superfície externa os quais podem entrar em contato com outro corpo ou entre si e as arestas ou faces os quais descrevem a superfície externa onde um nó em outro corpo ou do mesmo pode se conectar.

O movimento dos corpos deformáveis pode ser prescrito utilizando-se os métodos convencionais de imposição de deslocamentos, forças ou cargas distribuídas. A detecção do contato é feita durante cada incremento onde inicialmente é verificada a proximidade de cada nó potencialmente sujeito ao contato com o segmento de contato. No modelo tridimensional este segmento é definido com a face do outro corpo deformável ou do seu próprio corpo, visto

que é permitida a ocorrência do contato de um corpo com ele mesmo. Para simplificar a computação é definida uma tabela de contato, que contém a relação e o tipo de contato entre os corpos estabelecendo uma condição de restrição (XAVIER, 2006).

No caso específico do elemento (CTETRA10) utilizado no modelo 3D, esta condição de restrição dá-se com o nó do elemento que fez contato, e os dez nós que compõem o elemento sólido contatado, perfazendo um total de onze nós a ser considerado nas equações de restrição.

É analisada também a existência de deslizamento do nó em contato, e separação através da comparação da força ou tensão que causa a separação. A superfície em contato define a área e a parcela de carga transferida normal a esta área cujo coeficiente de atrito leva a obtenção da força de atrito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a avaliar o comportamento da distribuição de cargas nos parafusos, foram analisados diferentes tipos de juntas aparafusadas analiticamente, pelo método dos elementos finitos com modelos bidimensionais e tridimensionais.

Foram definidas três configurações de juntas aparafusadas de cisalhamento simples, com e sem a presença de calço entre as partes a serem unidas. Na Figura 24 são apresentados esquematicamente os parâmetros envolvidos.

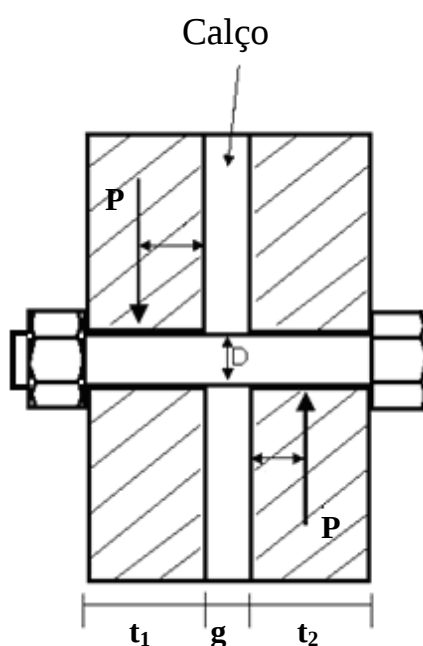


Figura 24 – Configuração das juntas aparafusadas.

As juntas diferenciam-se pelas diferentes espessuras, materiais utilizados e o carregamento aplicado. Assim, a influência dessas variações deve ser observada dependendo do tipo de distribuição de carregamento nos parafusos encontrado após a aplicação dos métodos.

Tabela 1 – Configurações das juntas aparafusadas.

Configuração	Parafuso	D [mm]	Material – Placa 1	t ₁ [mm]	Material – Placa 2	t ₂ [mm]	g [mm]	P [N]
1	NASM21134	11,09	Al7475-T7351	12,0	Al7475-T7351	9,0	2,0	40000
2	NASM21134	6,35	Al7475-T7351	4,0	Al7475-T7351	3,0	2,5	13333
3	NASM21134	12,68	AISI4130	11,0	Al7050-T7451	21,0	0	62867

O parafuso considerado segue a norma aeronáutica NASM21134, fabricado com o material AISI4140 e possui uma resistência à tração mínima de 1240,2 MPa. As dimensões dos parafusos e suas principais características são apresentados na Figura 25 e na Tabela 2.

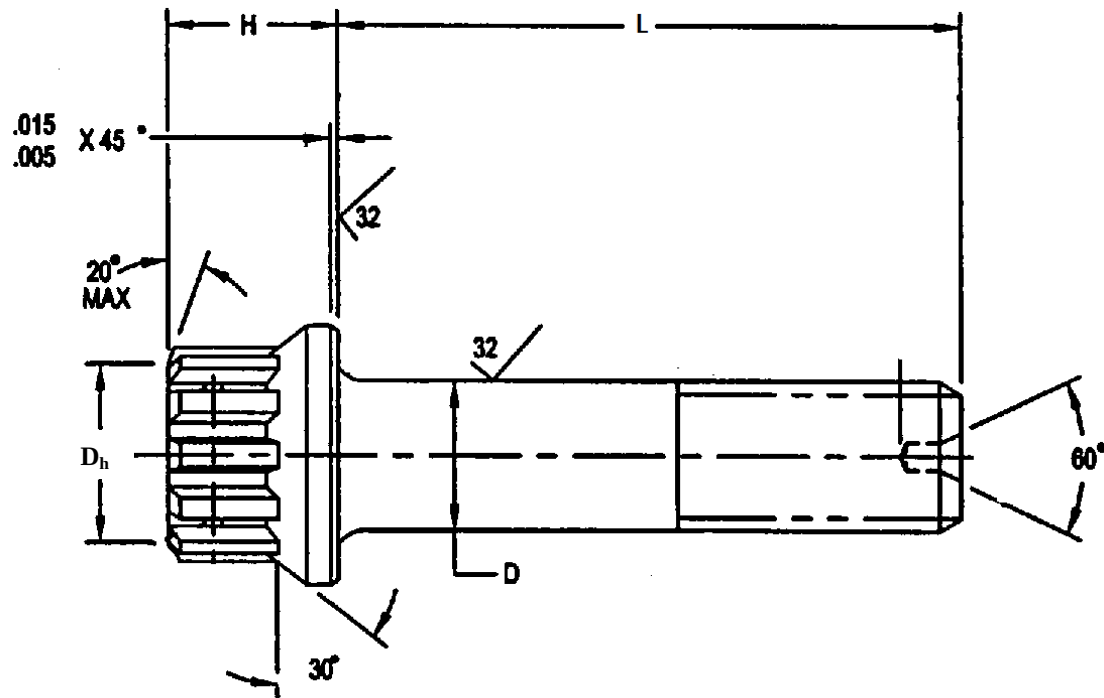


Figura 25 – Parafuso NASM21134 (adaptada de NASM21134).

Tabela 2 – Características do parafuso NASM21134 (NASM21134, 1999).

D [mm]	H [mm]	D _h [mm]	L [mm]	Limite de resistência à tração [N]	Resistência ao cisalhamento simples [N]
11,09	9,98	12,70	22,96 – 170,58	103240	72312
6,35	6,35	6,35	16,71 – 164,33	31061	23585
12,68	11,43	14,27	24,53 – 172,16	137505	94340

Consequentemente, uma vez utilizado o parafuso especificado acima, a porca NASM21133 foi utilizada nas configurações de juntas deste estudo. Suas dimensões e propriedades mecânicas do material construtivo foram utilizadas para a modelagem utilizando o método dos elementos finitos. Na Figura 26 é apresentado o desenho técnico da porca e na Tabela 3 são descritos as dimensões e propriedades mecânicas do material utilizado.

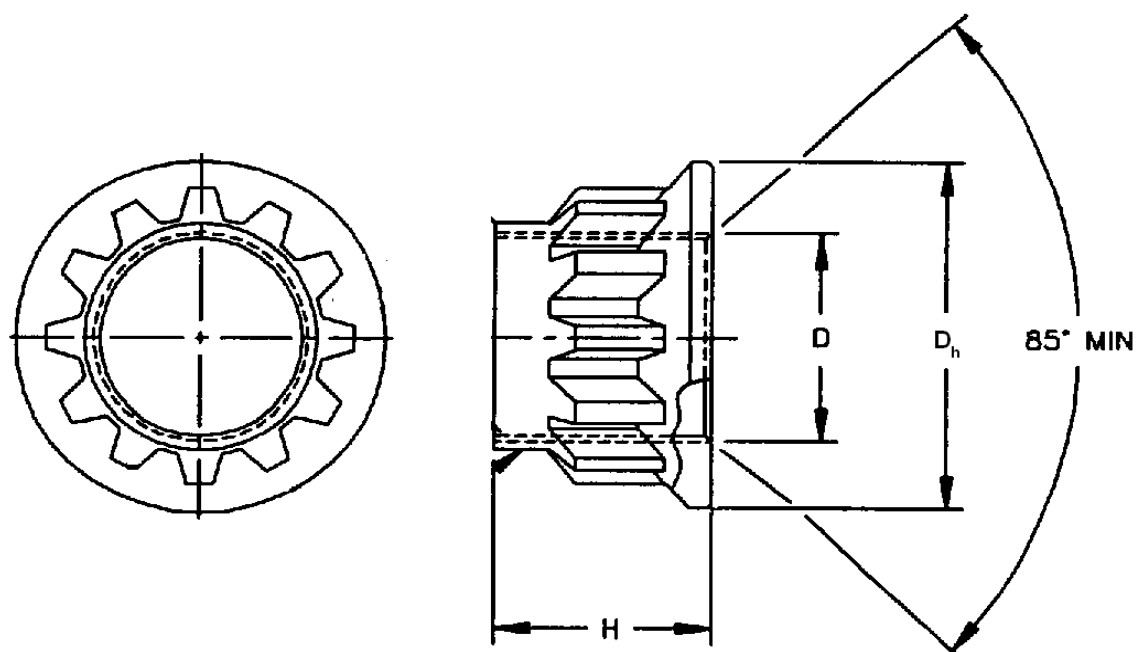


Figura 26 – Porca NASM21133 (adaptada de NASM21133).

Tabela 3 – Características da porca NASM21133 (NASM21133, 1999).

D [mm]	H [mm]	D _h [mm]	Limite de resistência à tração [N]
11,11	11,11	18,62	103240
6,35	6,35	6,35	31061
12,70	12,70	21,15	137505

A seguir, os materiais e os diferentes métodos serão abordados em detalhes para o estudo proposto.

3.1 Materiais

Como estão apresentadas na Tabela 1, as juntas são formadas por placas de materiais tipicamente aeronáuticos de alta resistência.

Nas duas primeiras configurações, as placas são fabricadas por liga de alumínio da série 7000. Essa série possui o zinco como principal elemento de liga e magnésio e cobre como outros elementos de maior presença. Suas resistências são aumentadas principalmente por tratamento térmico de solubilização e endurecimento por precipitação. Elas estão entre as que

possuem maiores resistências mecânicas dentro das séries de ligas de alumínio (MMPDS-04, 2008). As duas ligas utilizadas no trabalho são a 7475-T7351 e a 7050-T7451.

A 7050 é uma liga de Al-Zn-Mg-Cu-Zr desenvolvida para se obter uma alta resistência mecânica, a corrosão por tensão e boa tenacidade à fratura, sendo indicado para utilizações onde são requeridas pequenas espessuras.

Já a liga 7475 é uma liga de Al-Zn-Mg-Cu a qual possui uma resistência mecânica ligeiramente inferior a 7050, mas uma tenacidade à fratura superior a essa liga.

Ambas as ligas utilizadas sofreram tratamento térmico de solubilização, sobreenvelhecida ou estabilizada.

Na Tabela 4 é apresentada a composição química das ligas de alumínio utilizadas.

Tabela 4 – Composição química das ligas de alumínio (ASM, 1997).

Designação		Composição [%]									
Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Outros elementos	Ti	Elementos não especificados Cada Total	
7050	0,12	0,15	2,0-2,6	0,10	1,9-2,6	0,04	5,7-6,7	0,08-0,15 Zr	0,06	0,05	0,15
7475	0,10	0,12	1,2-1,9	0,06	1,9-2,6	0,18-0,25	5,2-6,2		0,06	0,05	0,15

Além disso, na Tabela 5 são mostradas as propriedades mecânicas das duas ligas de alumínio utilizadas.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas das ligas de alumínio (MMPDS-04, 2008).

Liga	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Resistência última ao esmagamento (e/D = 2) [MPa]	Resistência limite ao esmagamento (e/D = 2) [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	Coeficiente de Poisson
7050	509,86	440,96	964,60	695,89	70,96	26,87	0,33
7475	482,30	406,51	909,48	668,33	70,96	26,87	0,33

Na terceira configuração há a presença do aço baixa liga cromo-molibdênio 4130 o qual é bastante aplicado devido a suas práticas de tratamento térmico e suas técnicas de processamento bem estabelecidas. É um aço de temperabilidade intermediária e normalmente é resfriado em água. Possui boa resistência à tração, à fadiga e propriedades de impacto até

aproximadamente 370 °C, no entanto, possui propriedades de impacto baixas em temperaturas criogênicas. A composição química desse aço é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do aço 4130 (ASM, 1997).

Designação		Composição [%]				
Liga	C	Si	Mn	P	Cr	Mo
4130	0,28-0,33	0,20-0,35	0,40-0,60	0,10	0,80-1,10	0,15-0,25

Na Tabela 7 são mostradas as propriedades mecânicas do aço.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do aço 4130 (MMPDS-04, 2008).

Liga	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Resistência última ao esmagamento (e/D = 2) [MPa]	Resistência limite ao esmagamento (e/D = 2) [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	Coeficiente de Poisson
4130	1240,20	1136,85	2356,38	1956,76	199,81	75,79	0,32

3.2 Simulação computacional

Para gerar os modelos de elementos finitos das configurações de juntas definidas na Tabela 1, o *software* MSC Patran® 2010 Student Edition foi utilizado como pré e pós-processador. Esse *software* possibilitou a criação da malha e dos tipos de elementos finitos, a definição das condições de contorno e a aplicação dos carregamentos.

O *software* MSC Patran® 2010 utiliza o *solver* de elementos finitos MSC Nastran® 2010 o qual é um dos mais robustos e confiáveis para resolver o conjunto de equações que rege os modelos.

Nesse trabalho, foi definida a utilização de dois tipos de modelagem para representar as configurações de juntas apresentadas na Tabela 1: modelos bidimensionais, os quais apresentam de modo simplificado e obtém os resultados em um menor tempo computacional e modelos tridimensionais, utilizando elementos sólidos e análise não linear. Para esse último tipo de modelagem, foi utilizada análise não linear considerando a presença do contato entre os componentes.

3.2.1 Modelos bidimensionais

Para uma análise inicial, de modo a avaliar o comportamento da distribuição de carga ao longo do parafuso, um método simplificado de modelagem das juntas onde, o parafuso e as partes a serem unidas são representados por elementos de placa bidimensionais conhecidos como CQUAD4 foi escolhido. Essa opção ocorreu, pois esse tipo de modelo matemático utilizando o método dos elementos finitos fornece resultados bastante satisfatórios comparados ao tempo computacional gasto para solucionar o problema. Esses modelos são constituídos por aproximadamente quatrocentos elementos de placa e quinhentos nós. O modelo é ilustrado na Figura 27.

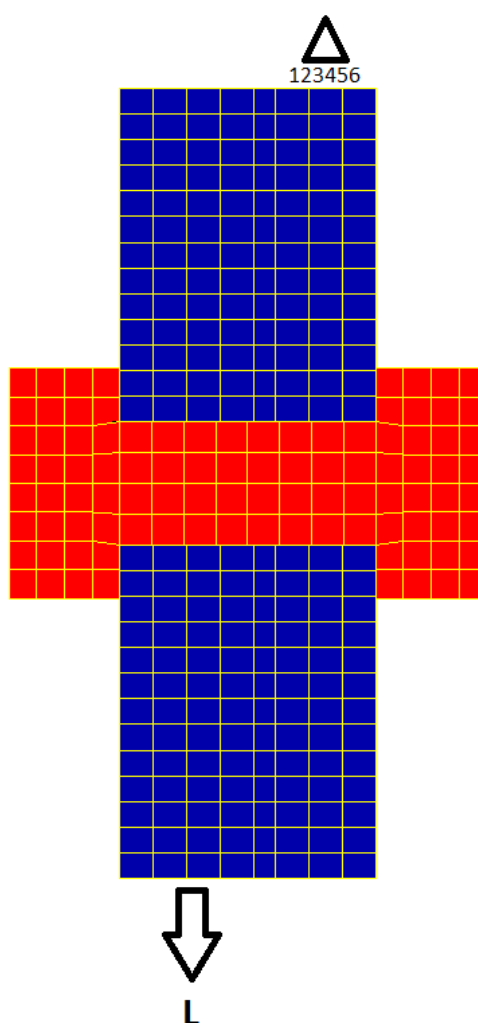


Figura 27 – Modelo de elementos finitos bidimensionais.

Sabendo que o comportamento a flexão é o principal interessado, as espessuras equivalentes dos componentes envolvidos devem garantir o mesmo momento de inércia de área das seções originais. Portanto, as fórmulas para definirem as espessuras são:

- Corpo do parafuso

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64} = \frac{t_b \times D^3}{12} \Rightarrow t_b = \frac{3 \times \pi \times D}{16} \quad (19)$$

Onde I é o momento de inércia de área, D é o diâmetro do corpo do parafuso e t_b é a espessura do elemento de placa.

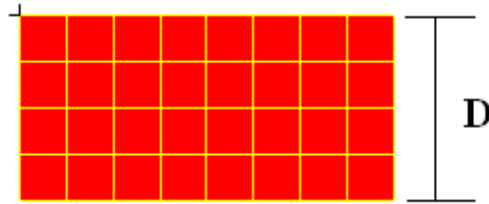


Figura 28 – Malha de elementos finitos do corpo do parafuso.

- Cabeça do parafuso e porca

$$I = \frac{\pi \times D_h^4}{64} = \frac{t_{hn} \times D_h^3}{12} \Rightarrow t_{hn} = \frac{3 \times \pi \times D_h}{16} \quad (20)$$

Onde I é o momento de inércia de área, D_h é o diâmetro da cabeça do parafuso ou da porca e t_{hn} é a espessura do elemento de placa.

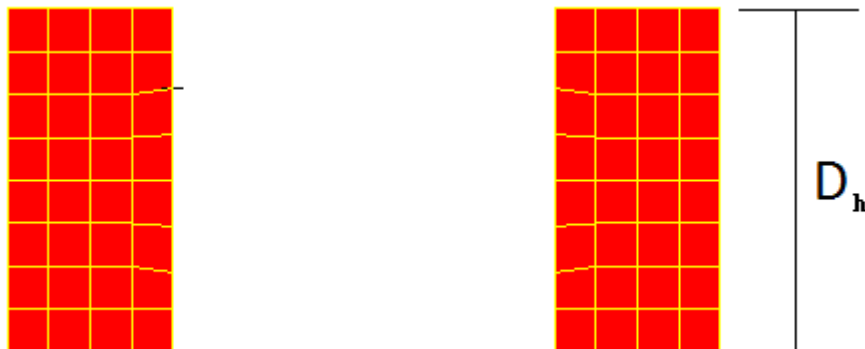


Figura 29 – Malha de elementos finitos da cabeça do parafuso e da porca.

- Peças unidas (placas)

$$I = \frac{D \times h^3}{12} - \frac{\pi \times D^4}{64} = \frac{t_p \times h^3}{12} - \frac{t_p \times D^3}{12} \Rightarrow t_p = \frac{D \times h^3 - \left(\frac{3 \times \pi \times D^4}{16} \right)}{h^3 - D^3} \quad (21)$$

Onde I é o momento de inércia de área, D é o diâmetro do corpo do parafuso, t_p é a espessura do elemento de placa e h é o comprimento da placa.

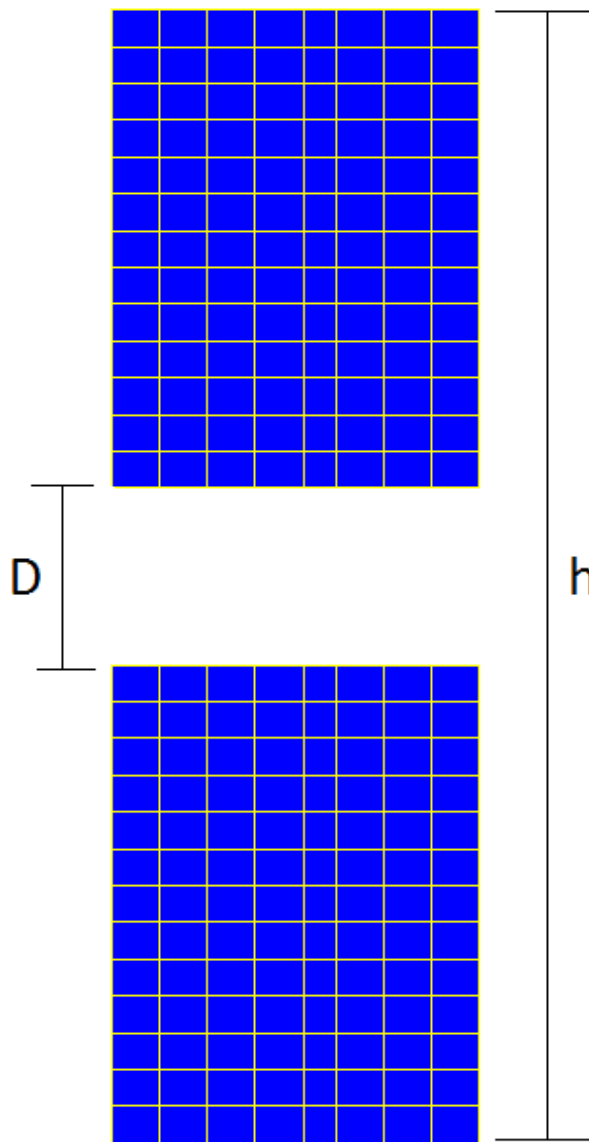


Figura 30 – Malha de elementos finitos das peças unidas.

Na Tabela 8 são apresentadas as espessuras para cada configuração.

Tabela 8 - Espessuras dos modelos.

Configuração	D [mm]	D _h [mm]	h [mm]	t _b [mm]	t _{hn} [mm]	t _p [mm]
1	11,09	20,74	60,00	6,54	12,22	11,13
2	6,35	11,94	60,00	3,74	7,03	6,35
3	12,68	24,00	40,00	7,47	14,14	12,85

Além disso, o contato entre as partes foi simulado utilizando o elemento de mola unidirecional, CELAS2. De tal forma a representar esses contatos, foi aplicado aproximadamente oitenta elementos. Na região entre o corpo do parafuso e as partes a serem unidas, a rigidez de contato está na direção y segundo o sistema de coordenadas global. Por outro lado, entre a cabeça do parafuso e a placa, entre as placas e o calço (se for considerado) e entre a placa e a porca, a rigidez de contato está na direção x do sistema de coordenadas global como é ilustrado na Figura 31. A rigidez de contato assumida nos modelos é de 10^6 N/mm e apresenta uma condição satisfatória para obter a distribuição de carregamento ao longo do corpo do parafuso.

Para cada configuração são realizadas duas análises utilizando o software de elementos finitos. A primeira tem a principal função de apresentar as forças em cada elemento de contato, CELAS2. Se a força for negativa, o elemento se comporta em compressão, há contato naquela posição e a rigidez do elemento é mantida. No entanto, se a força for positiva, o elemento está apresentando comportamento de tração, não há mais contato e a rigidez do elemento será modificada para um valor infinitesimal para a próxima rodada.

Assim, a segunda rodada está apresentando uma condição mais próxima da junta real onde somente haverá troca de cargas nas regiões que permanecerem em contato após a aplicação das condições de contorno e carregamento.

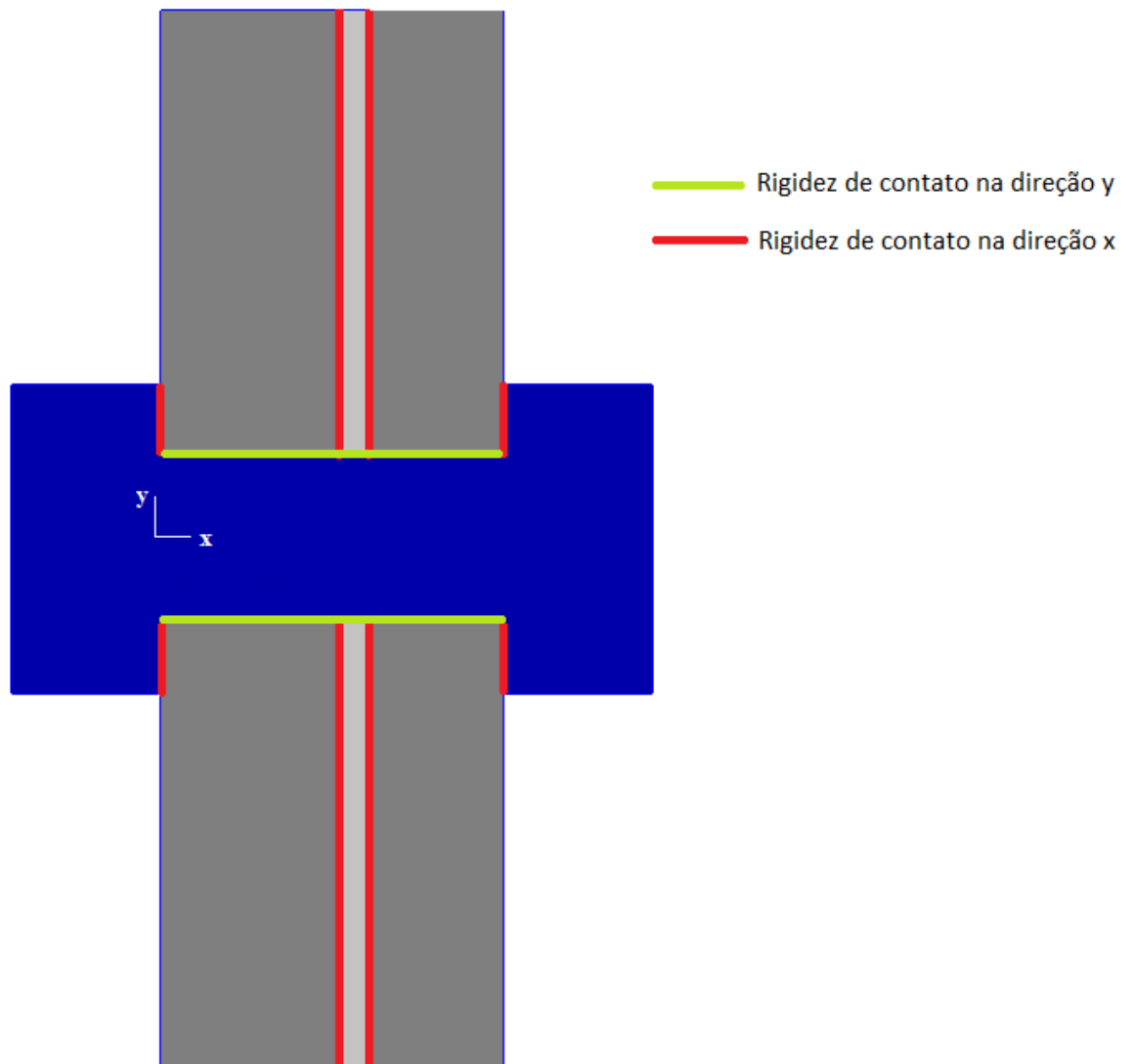


Figura 31 – Contato entre as partes e direção dos elementos de mola.

O carregamento é aplicado nos nós da extremidade de uma das placas e os graus de liberdade u_x , u_y e θ_z são restringidos nos nós da extremidade oposta da outra placa. Observa-se adicionalmente que todos os nós do modelo computacional têm os graus de liberdade u_z , θ_x e θ_y restringidos de modo a induzir o comportamento somente no plano xy e aproximar o comportamento a uma junta real. Veja Figura 32.

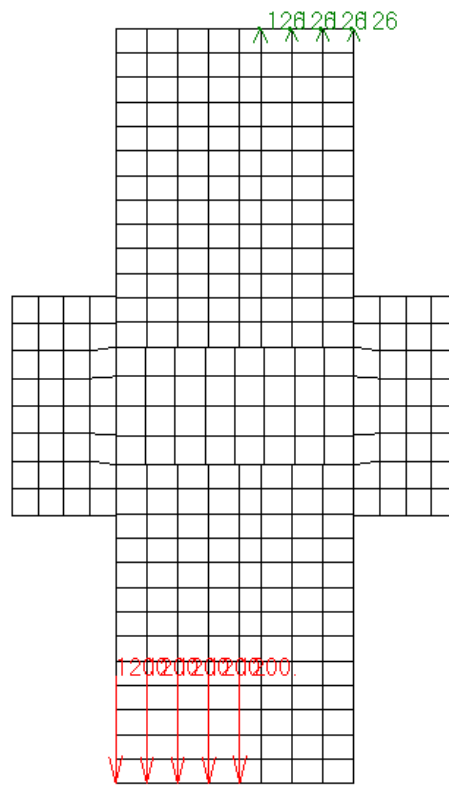


Figura 32 – Condições de contorno e carregamento.

Finalmente, complementando o modelo, elementos rígidos RBE2, apresentados na Figura 33, representam a união das extremidades superior e inferior dos alojamentos. Os nós das extremidades apresentam os graus de liberdade u_x e u_y relacionados dois a dois.

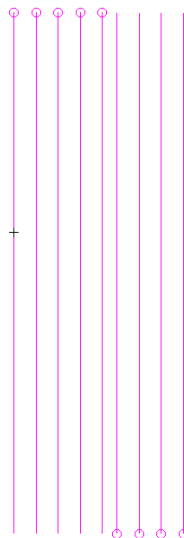


Figura 33 – Elementos rígidos RBE2 de ligação entre as extremidades das placas.

3.2.2 Modelos tridimensionais

Para esse estudo, além de avaliar as juntas aparafusadas utilizando modelos de elementos finitos bidimensionais, foi realizado uma análise com modelos tridimensionais os quais permitiram rodadas não lineares contemplando contato entre os componentes unidos, placas e calços.

Primeiramente, utilizando o *software* MSC Patran® 2010, foi definido um código de análise baseado no MSC Marc® do tipo estrutural o qual oferece a possibilidade de modelagem utilizando condições de contorno de contato e opções de interface entre os corpos envolvidos como coeficiente de atrito e definição do tipo de contato entre os corpos. Os materiais definidos na modelagem são referentes ao parafuso, as placas e o calço de acordo com os dados disponíveis na seção 3.1. Nesse estudo, foi definido o modelo constitutivo do material como linear elástico, uma vez que o carregamento aplicado às juntas permanece em grande parte nessa região. Na Figura 34 – Propriedades dos materiais requeridas na modelagem são mostradas as propriedades dos materiais necessárias como coeficiente de *Poisson*, módulo de elasticidade transversal e longitudinal.

The image shows a software window titled "Input Options". At the top, there is a dropdown menu for "Constitutive Model" set to "Linear Elastic". Below this is a table with two columns: "Property Name" and "Value". The table contains the following rows:

Property Name	Value
Elastic Modulus =	
Poisson Ratio =	
Shear Modulus =	
Density =	
Thermal Expan. Coeff =	
Structural Damping Coeff =	
Reference Temperature =	

Below the table are two empty text boxes labeled "Temperature Dep./Model Variable Fields:" and "Current Constitutive Models:". At the bottom of the window are three buttons: "OK", "Clear", and "Cancel".

Figura 34 – Propriedades dos materiais requeridas na modelagem.

Em seguida, foram definidas as propriedades dos elementos sólidos contemplando o tipo e a orientação do material. A orientação faz-se bastante importante quando o material é ortotrópico ou anisotrópico. No estudo em questão, foram considerados materiais isotrópicos os quais apresentam propriedades iguais em qualquer direção.

Como o objetivo numérico do contato é detectar o movimento entre corpos como foi descrito na seção 2.6.1.5, determinou-se cinco corpos deformáveis para avaliar o comportamento das juntas: parafuso, porca, placa 1, placa 2 e calço. Além disso, foram definidos os coeficientes de atrito entre os corpos conforme Tabela 9 – Coeficiente de atrito entre os corpos. Segundo Oberg et al (2004), esses coeficientes de atrito levaram em consideração testes realizados entre superfícies secas e limpas. Além disso, devido o atrito ser afetado por diversos fatores e, mesmo pequenos desvios da condição do ensaio podem levar variações significativas, os valores utilizados nesse estudo podem ser considerados representativos para o que está sendo proposto mas deve-se avaliá-los com outros parâmetros em aplicações reais e de maiores responsabilidades.

Tabela 9 – Coeficiente de atrito entre os corpos (OBERG et al, 2004).

Coeficiente de atrito					
Corpos	Parafuso	Porca	Placa 1	Placa 2	Calço
Parafuso	-	0,8	0,45 (0,8*)	0,45	0,8
Porca	0,8	-	-	0,45	-
Placa1	0,45 (0,8*)	-	-	-	0,45 (0,8*)
Placa 2	0,45	0,45	-	-	0,45
Calço	0,8	-	0,45 (0,8*)	0,45	-

* : Aplicável para a configuração 3.

A formulação utilizada pelo software permite a escolha dos contatos entre os corpos com grandes escorregamentos (“touch”) ou pequenos escorregamentos (“Glued”), sendo que, nesse último, os corpos não estão habilitados a penetrar-se, separar-se ou apresentar escorregamento relativo entre eles. Assim, de modo a facilitar a interface com o usuário, o *software* MSC Patran® 2010 apresenta uma interface com o usuário de modo a facilitar a definição de parâmetros e a seguinte tabela é disponibilizada para a escolha do tipo de contato:

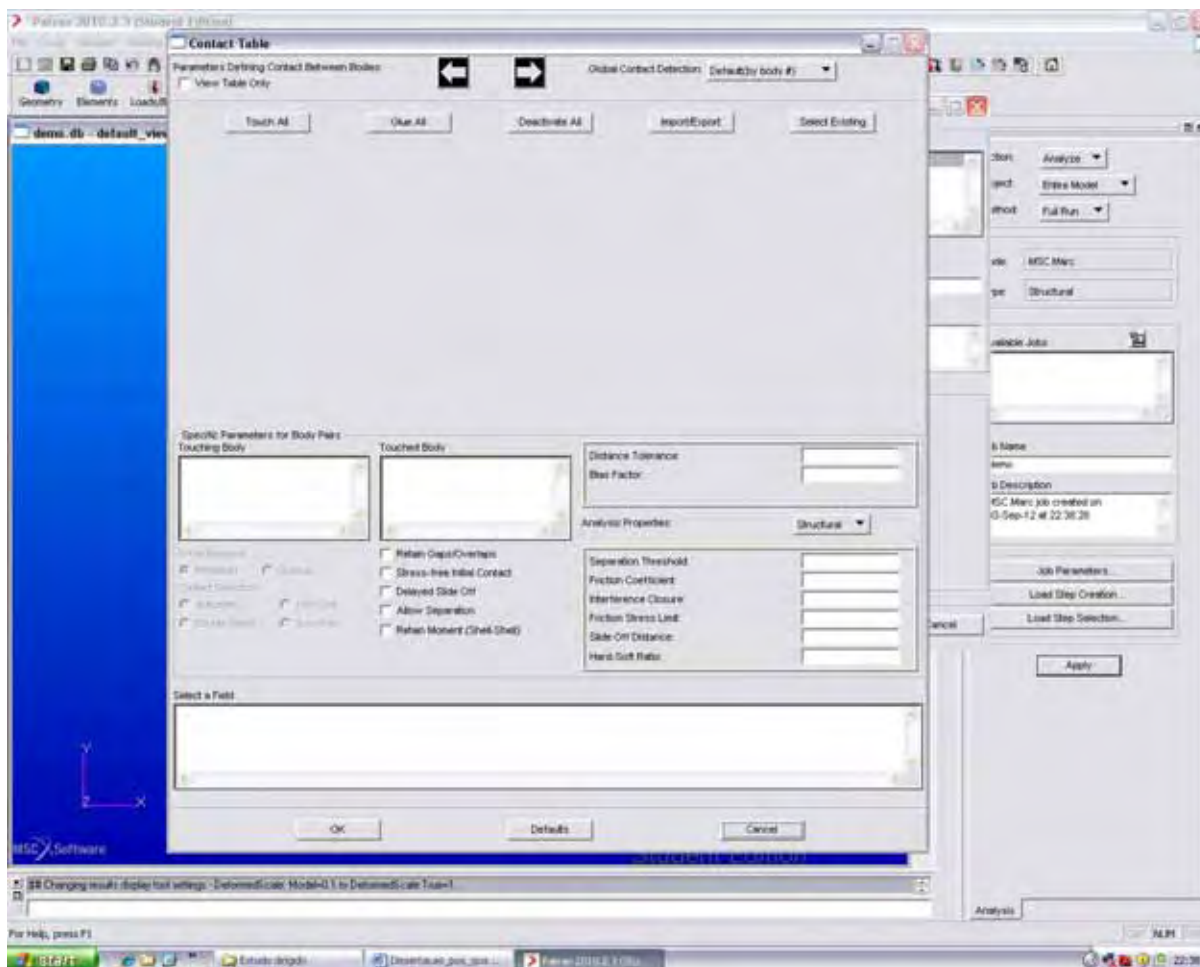


Figura 35 – Tabela de contato.

O tipo de contato definido entre as placas e calço com o parafuso e porca foi o de grandes escorregamentos o qual permite separação, escorregamento relativo, mas não há penetração entre as malhas de elementos finitos. Do mesmo modo ocorre entre as placas e o calço. A interface entre parafuso e porca será feita através da formulação de pequenos escorregamentos para representar o comportamento no qual a porca não apresenta movimento relativo ao parafuso após o contato considerando que o pré-torque e a relação entre os filetes de rosca sejam efetivos. Além disso, para diminuir o tempo computacional, as condições de contorno de contato entre as partes que fisicamente não apresentam a possibilidade de toque foram desabilitadas.

Nesses modelos foram utilizados os elementos sólidos CTETRA4 tanto para a representação do parafuso como para as placas e o calço. A malha de elementos finitos apresenta um maior refinamento no parafuso e ao redor dos furos das placas e do calço, uma vez que, são essas regiões que serão de grande interesse nesse trabalho devido ao contato existente entre as partes e a possível definição do comportamento da distribuição de cargas ao

longo do corpo do parafuso. A escolha desse tipo de elemento foi devido ao modelo não ser isoparamétrico e otimizar o tempo computacional com resultados bastante satisfatórios. De uma forma geral, os modelos tridimensionais contemplam aproximadamente 20000 elementos e 5000 nós. Na Figura 36 é mostrado o modelo da configuração 1.

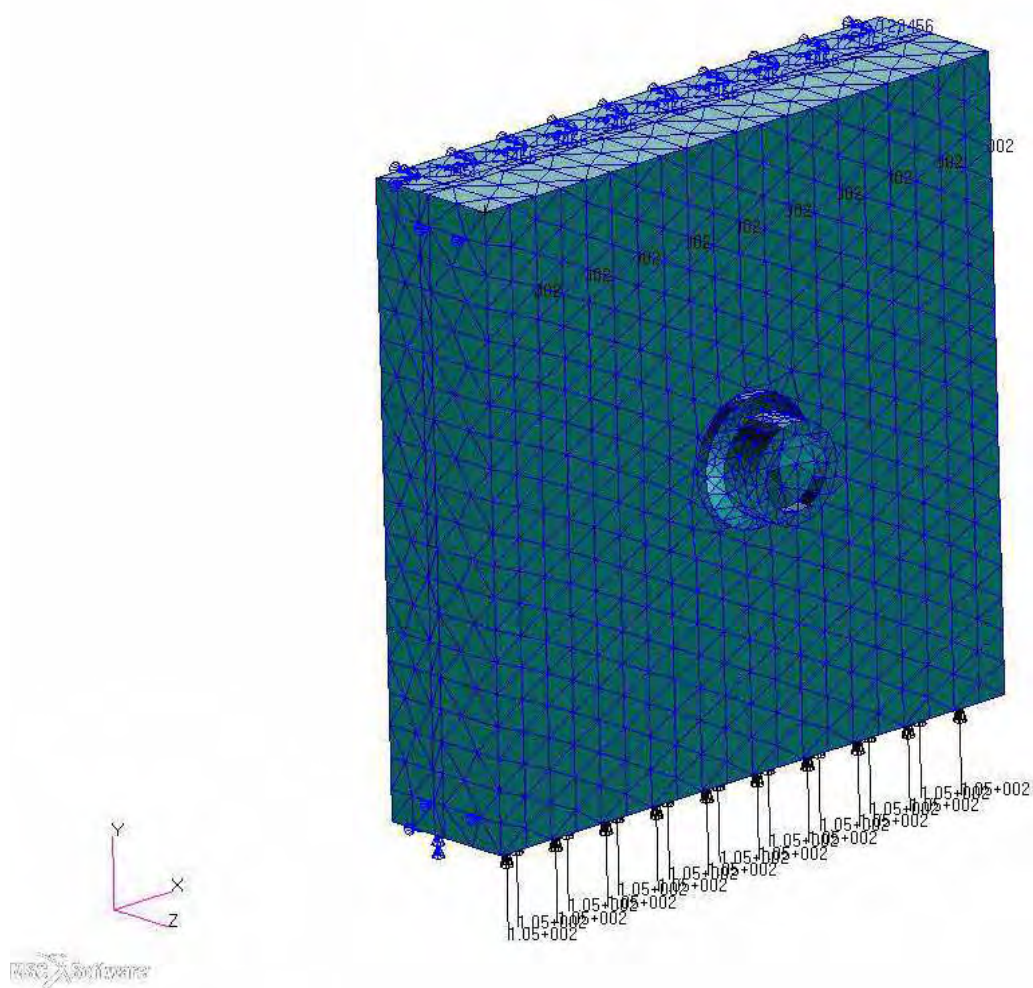


Figura 36 – Modelo tridimensional da configuração de junta 1.

Os parafusos e as porcas representados nos modelos seguiram os valores dimensionais segundo suas respectivas normas e especificadas nas Tabela 2 e Tabela 3. Nas Figura 37 e Figura 38 são apresentados esses componentes no modelo de elementos finitos.

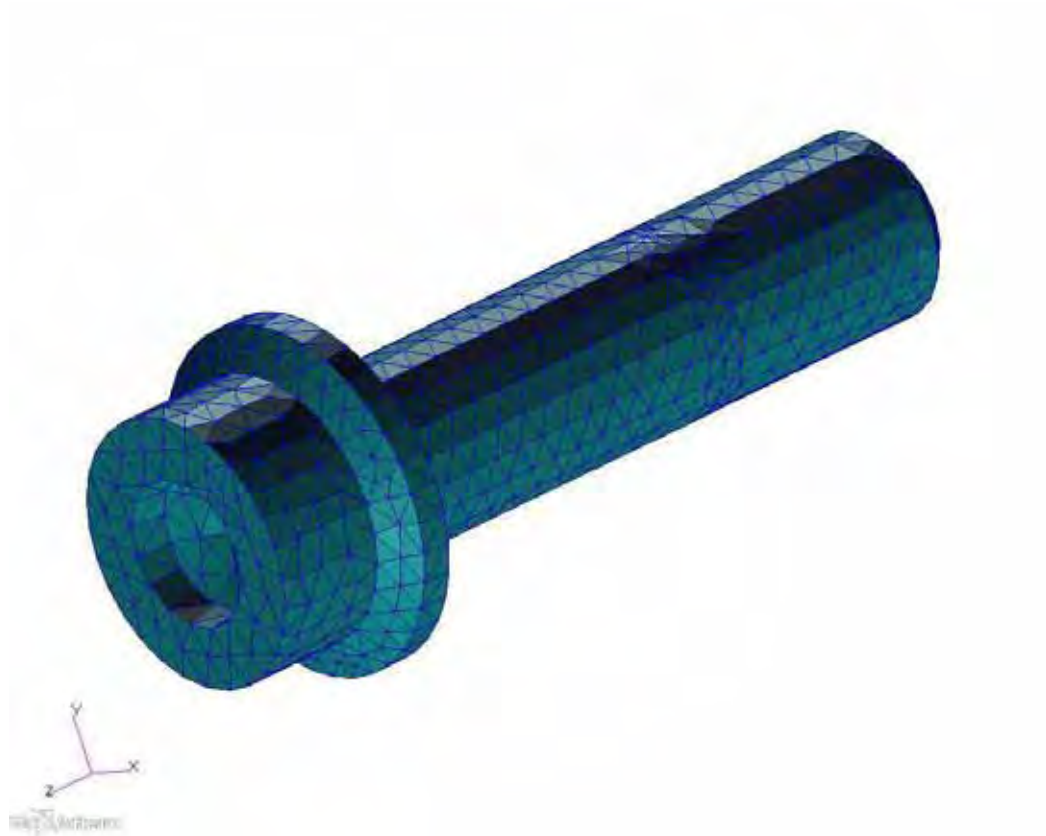


Figura 37 – Modelo tridimensional do parafuso

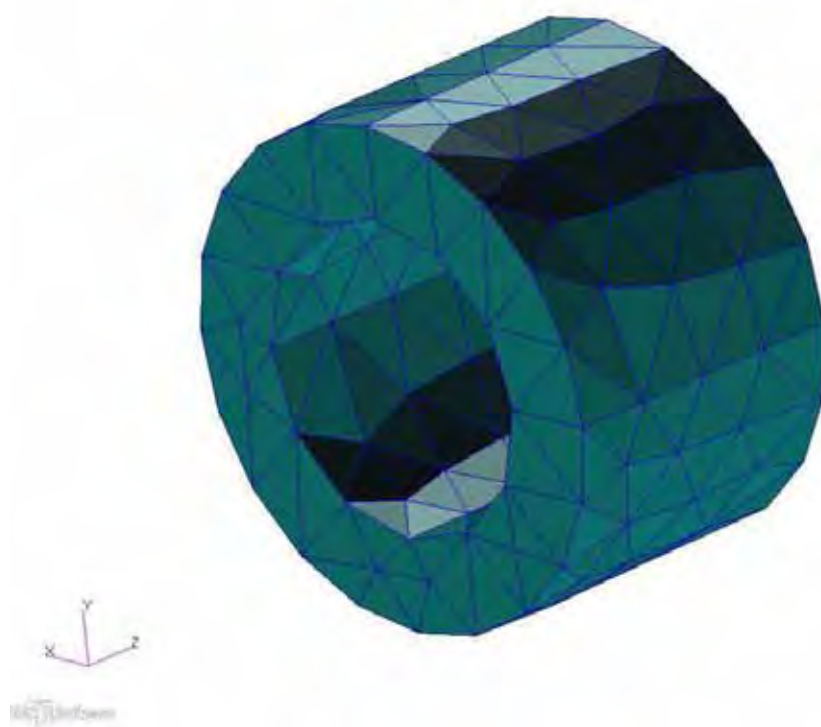


Figura 38 – Modelo tridimensional da porca.

As condições de contorno abrangeram tanto a questão do contato entre os componentes envolvidos como o carregamento e as restrições de deslocamentos e rotações.

O carregamento é aplicado de forma distribuída nas duas faces opostas de uma das placas para que não haja comportamentos secundários e não uniformes de tal modo a perturbar a resposta do sistema requerida nesse estudo.

Similarmente, todos os graus de liberdade das faces da placa adjacente são restringidos para permitir que somente o restante do modelo apresente os deslocamentos devido às cargas aplicadas e os contatos existentes. Além disso, os graus de liberdade u_y das faces perpendiculares a aplicação da carga da placa e do calço foram restringidos com o objetivo de induzir um comportamento sem distorções na direção desse eixo. Na Figura 39 são ilustradas as condições de contorno aplicadas nos modelos.

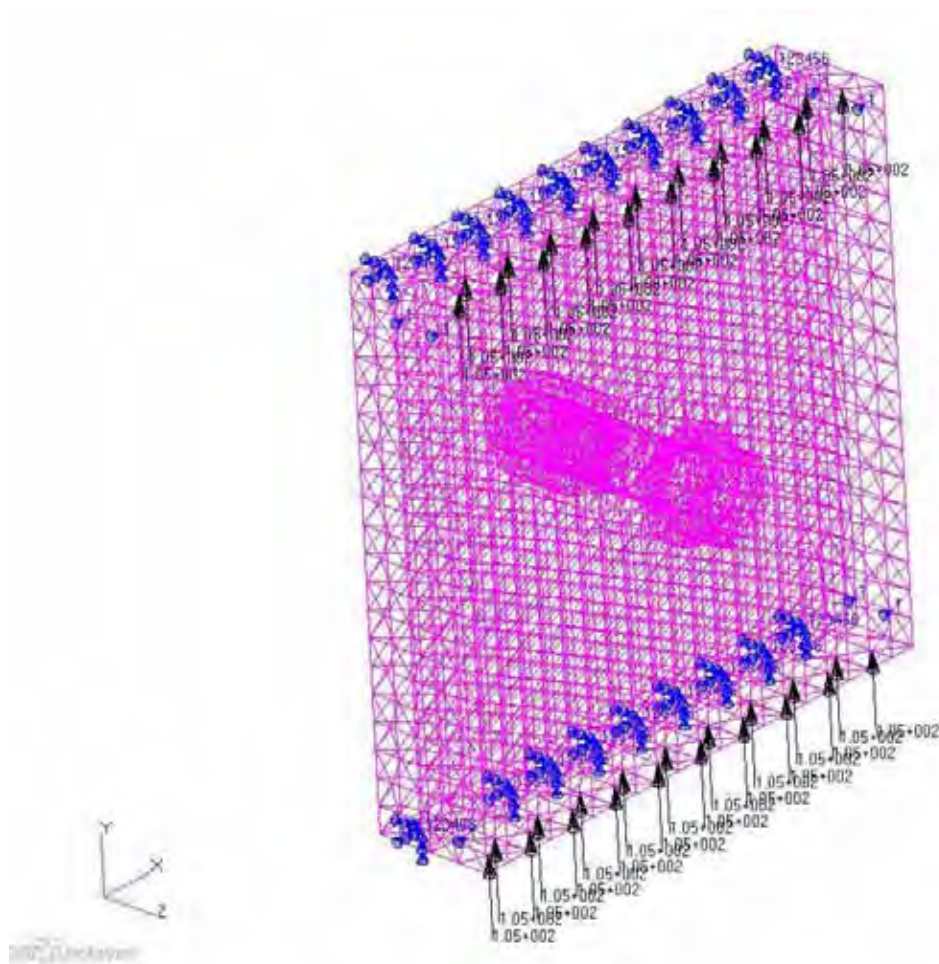


Figura 39 – Condições de contorno no modelo tridimensional.

Dessa maneira, a simulação dessas juntas aparafusadas fornece como resposta as forças de contato nos nós e o deslocamento dos componentes envolvidos, os quais permitem uma avaliação da distribuição do carregamento ao longo do corpo do parafuso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado no Capítulo 3, as três configurações de juntas foram analisadas analiticamente e pelo método de elementos finitos. Portanto, neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos e alguns comentários serão enaltecidos acerca dos diferentes métodos utilizados, tendo em vista o comportamento da distribuição de carregamento nos parafusos.

4.1 Método analítico

Com o intuito de diminuir o tempo de cálculo e obtenção dos resultados advindos das fórmulas analíticas descritas na seção, uma planilha de dados do *software Microsoft Excel* foi desenvolvida.

Tabela 10 – Planilha de dados – Configuração 1.

Método analítico	
g [mm]	2
t ₁ [mm]	12
t ₂ [mm]	9
D [mm]	11,09
P ₁ [N]	40000
P ₂ [N]	40000
S _{brupin} [MPa]	2383,94
S _{bru1} [MPa]	695,90
S _{bru2} [MPa]	695,90
B ₁ [mm]	10,37
S _{min 1} [MPa]	0,0
b ₁ [mm]	3,46
Tipo de distribuição	Triangular
B ₂ [mm]	10,37
S _{min 2} [MPa]	105,623
b ₂ [mm]	3,40
Tipo de distribuição	Trapezoidal

Na Tabela 11 são mostrados os resultados e o tipo de distribuição do carregamento para cada configuração de junta.

Tabela 11 - Resultados do método analítico.

Configuração	S_{bry1} [MPa] (1)	S_{bry2} [MPa] (1)	$S_{bryparaf}$ [MPa] (1)	B_1 [mm]	B_2 [mm]	S_{min1} [MPa]	S_{min2} [MPa]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	Distribuição carga 1	Distribuição carga 2
1	668,30	668,30	2383,94	10,79	10,79	N/A	105,52	3,60	3,50	Triangular	Trapezoidal
2	668,30	668,30	2383,94	6,28	6,28	353,87	703,83	1,82	1,50	Trapezoidal	Retangular
3	1956,76	695,90	2383,94	5,07	14,25	13,70	N/A	1,69	4,75	Trapezoidal	Triangular

⁽¹⁾: MMPDS-04, 2008.

De acordo com a Tabela 11, as configurações de juntas 1 e 3 apresentaram uma distribuição triangular ou trapezoidal de carregamento entre as placas e o corpo do parafuso. Avaliando os valores de B , constata-se que as interfaces onde ocorre uma distribuição triangular, a região de contato possui comprimento menor que a espessura da placa. Para as regiões onde a distribuição trapezoidal ocorreu, toda a espessura da placa permanece em contato com o corpo do parafuso, confirmado pelos valores de B maiores que a espessura. Além disso, o valor de S_{min} é menor que o valor de S_{bry} da placa em questão, não determinando uma distribuição retangular.

Por outro lado, para a configuração de junta 2, ocorreu a presença de uma distribuição de carregamento retangular. Essa condição é definida pelo contato ao longo de toda a espessura da placa e pelo valor de S_{min} ser maior que o valor de S_{bry} , representando o início de deformação plástica local na placa de alumínio.

4.2 Simulação computacional

4.2.1 Modelos bidimensionais

Como mencionado no capítulo 3, os modelos bidimensionais simulam o contato entre as partes utilizando elementos de mola unidirecionais. Esses elementos fornecem como resposta as condições impostas ao modelo, forças de interface entre os nós dos diferentes componentes, parafuso, placas e calço. Dessa maneira, obtém-se o comportamento da distribuição de carregamento no corpo do parafuso. Na Figura 40 é apresentada a disposição

dos elementos de mola de acordo com o número de identificação para a configuração de junta 1.

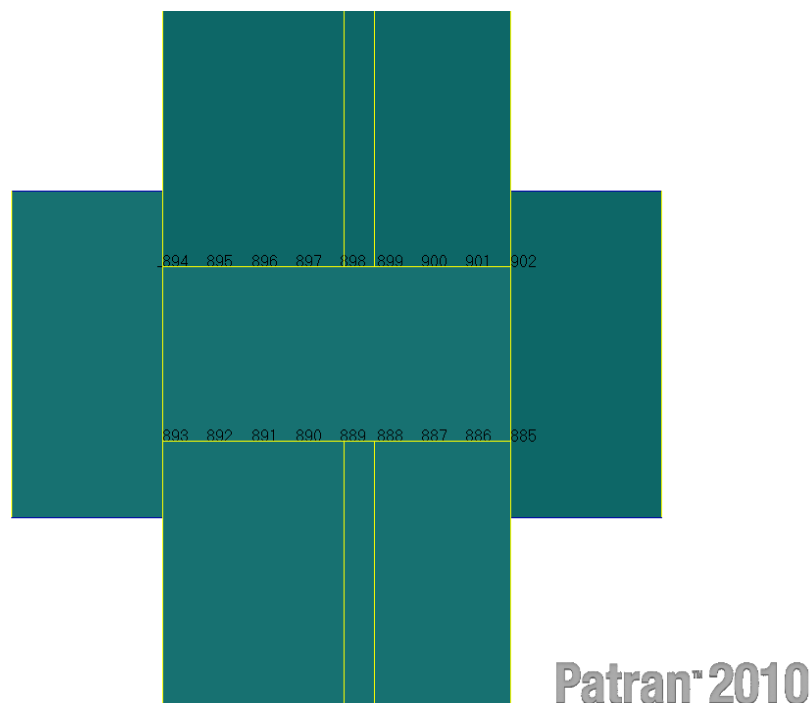


Figura 40 – Disposição dos elementos de mola – configuração 1.

Na Tabela 12 são apresentadas as forças dos elementos de mola entre o corpo do parafuso e as placas para a configuração de junta 1.

Tabela 12 – Forças dos elementos de mola da configuração 1.

Elemento de mola	Posição no eixo x [mm]	Posição no eixo y [mm]	Força do elemento [N]
894	0	5,5	-4164,59
895	3	5,5	-2127,44
896	6	5,5	4407,88
897	9	5,5	15024,30
898	12	5,5	16859,87
899	14	5,5	-16302,50
900	17	5,5	-13666,51
901	20	5,5	-2717,51
902	23	5,5	2687,24
893	0	-5,5	-4164,68
892	3	-5,5	-2127,51
891	6	-5,5	4407,89
890	9	-5,5	15024,36
889	12	-5,5	16859,93
888	14	-5,5	-16302,83
887	17	-5,5	-13666,97
886	20	-5,5	-2717,86
885	23	-5,5	2686,96

Para os elementos de mola 894 até 902, os valores negativos indicam que não há contato entre as partes, i.e., a folga está aumentando. No entanto, para os elementos de mola 885 até 893, os valores negativos indicam o contato entre as placas e o parafuso. Portanto, a distribuição do carregamento no corpo do parafuso é demonstrada na Figura 41.

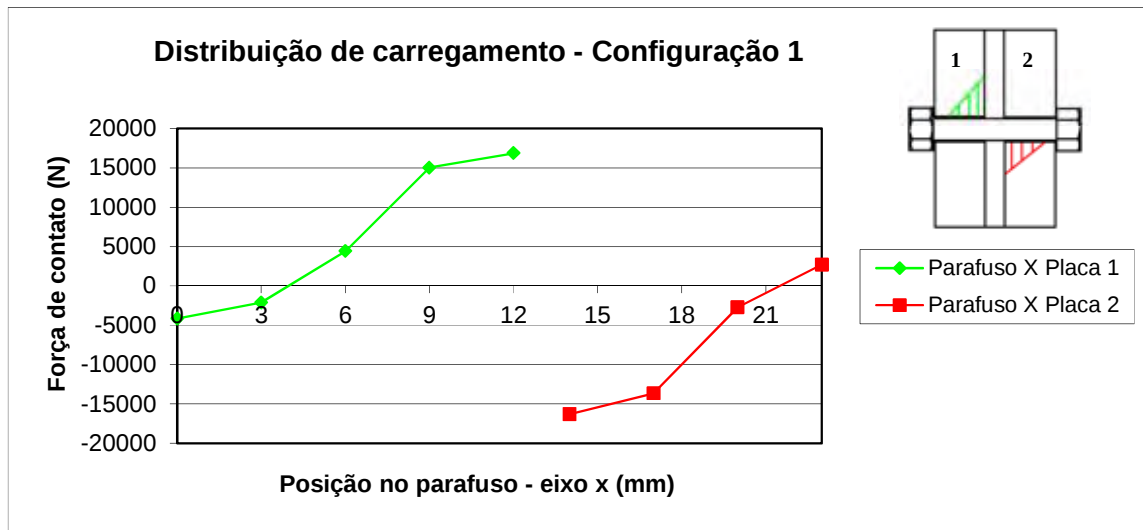


Figura 41 - Distribuição do carregamento – configuração 1.

Os resultados mostram uma distribuição de carregamento tipicamente triangular na interface parafuso/placa1 e parafuso/placa2. Os valores de B_1 e B_2 pelo método de elementos finitos são 8,03 mm e 7,51 mm respectivamente. Consequentemente, b_1 é 2,67 mm e b_2 é 2,50 mm.

Na Figura 42 é apresentada a disposição dos elementos de mola de acordo com o número de identificação para a configuração de junta 2.

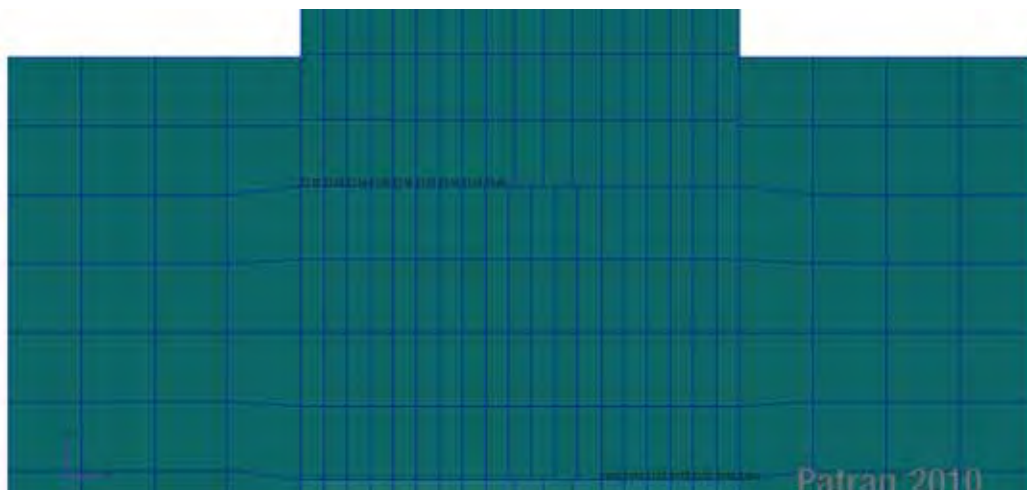


Figura 42 – Disposição dos elementos de mola – configuração 2.

Na Tabela 13 são mostradas as forças dos elementos de mola do contato entre o corpo do parafuso e as placas da configuração 2.

Tabela 13 – Forças dos elementos de mola da configuração 2.

Elemento de mola	Posição no eixo x [mm]	Posição no eixo y [mm]	Força do elemento [N]
2132	0,0	3,18	469,33
2133	0,5	3,18	1164,05
2134	1,0	3,18	1285,35
2135	1,5	3,18	1617,23
2136	2,0	3,18	2038,89
2137	2,5	3,18	2528,48
2138	3,0	3,18	3125,51
2139	3,5	3,18	4024,77
2140	4,0	3,18	3746,35
2160	6,5	-3,18	-1475,184
2159	7,0	-3,18	-1259,545
2158	7,5	-3,18	-839,7566
2157	8,0	-3,18	-488,0744
2156	8,5	-3,18	-209,5536
2155	9,0	-3,18	-52,97834
2154	9,5	-3,18	387,776

Para os elementos de mola 2132 a 2140, os valores positivos das forças indicam o contato entre as partes, i.e., não há folga entre eles. Contudo, para os elementos de mola 2160 até 2154, os valores positivos das forças indicam que não há contato entre as partes, i.e., a folga está aumentando. Assim, a distribuição de carregamento no parafuso é apresentada na Figura 43.

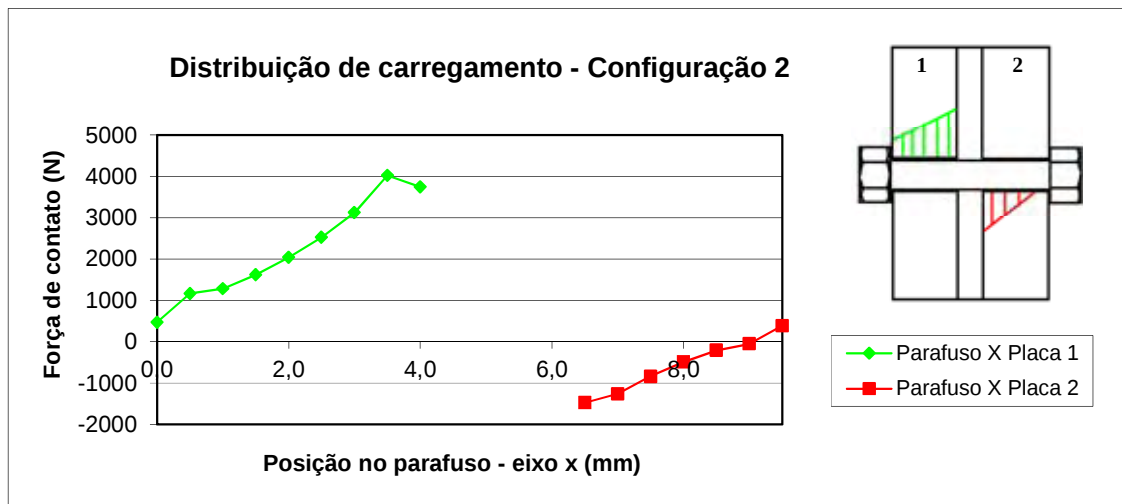


Figura 43 - Distribuição de carregamento – configuração 2.

Os resultados mostram um comportamento trapezoidal para a distribuição do carregamento na interface parafuso/placa 1 e um comportamento triangular na interface parafuso/placa2. Os valores de B_1 e B_2 pelo MEF são 4,0 mm e 2,6 mm respectivamente. Consequentemente, b_1 é 1,47 mm e b_2 é 0,87 mm.

Na Figura 44 é apresentada a disposição dos elementos de mola de acordo com o número de identificação para a configuração de junta 3.

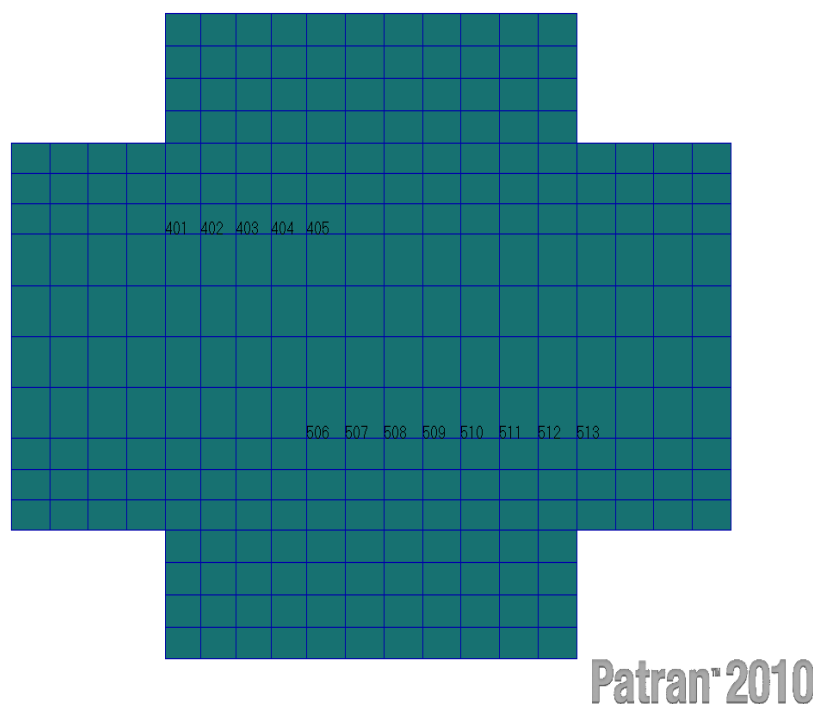


Figura 44 – Disposição dos elementos de mola – configuração 3.

Na Tabela 14 são mostradas as forças dos elementos de mola da configuração 3.

Elemento de mola	Posição no eixo x [mm]	Posição no eixo y [mm]	Força do elemento [N]
401	0,00	6,38	-697,10
402	2,75	6,38	3454,32
403	5,50	6,38	5466,19
404	8,25	6,38	13794,66
405	11,00	6,38	25131,94
506	11,00	-6,38	-19768,32
507	14,00	-6,38	-16194,82
508	17,00	-6,38	-8776,73
509	20,00	-6,38	-4319,24

Continuação da Tabela 14 - Forças dos elementos de mola da configuração 3.

Elemento de mola	Posição no eixo x [mm]	Posição no eixo y [mm]	Força do elemento [N]
510	23,00	-6,38	-1510,07
511	26,00	-6,38	264,73
512	29,00	-6,38	1232,60
513	32,00	-6,38	1921,87

Para os elementos de mola 401 a 405, os valores positivos das forças indicam o contato entre as partes, i.e., não há folga entre eles. Contudo, para os elementos de mola 506 até 513, os valores positivos das forças indicam que não há contato entre as partes, i.e., a folga está aumentando. Assim, a distribuição de carregamento no parafuso é apresentada na Figura 45.

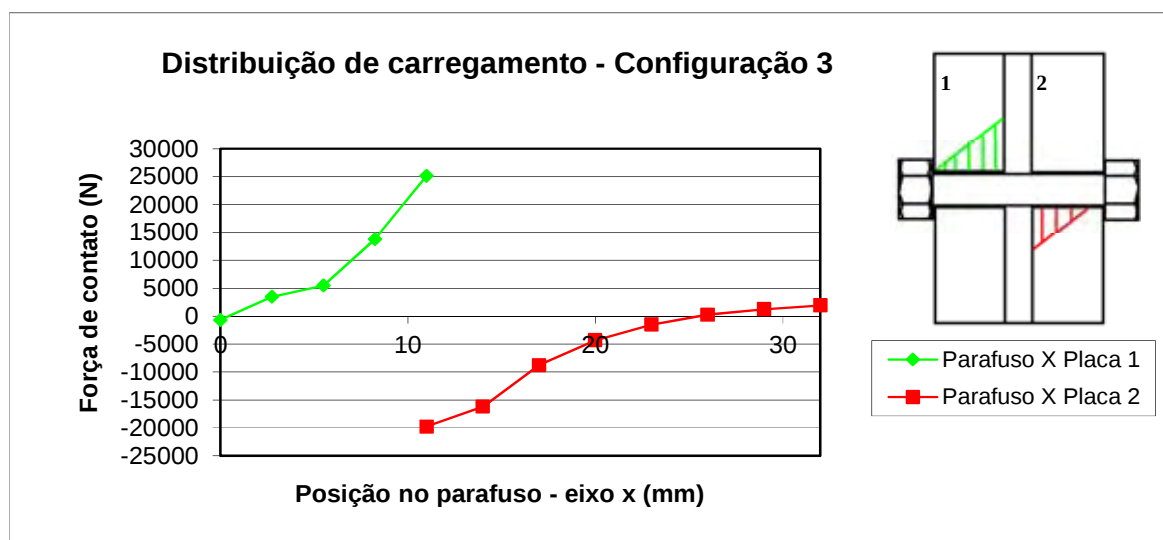


Figura 45 - Distribuição de carregamento – configuração 3.

Os resultados mostram um comportamento triangular para a distribuição do carregamento na interface parafuso/placa 1 e parafuso/placa2. Os valores de B_1 e B_2 pelo MEF são 10,54 mm e 14,55 mm respectivamente. Consequentemente, b_1 é 3,51 mm e b_2 é 4,85 mm. Nas Figura 46, Figura 47 e Figura 48 são mostrados os deslocamentos translacionais das configurações de juntas de tal modo a demonstrar que os carregamentos impostos resultam em valores pequenos com tendência dos componentes permanecerem na região elástica dos materiais envolvidos, tendo somente algumas regiões concentradas onde pode haver presença de deformações plásticas.

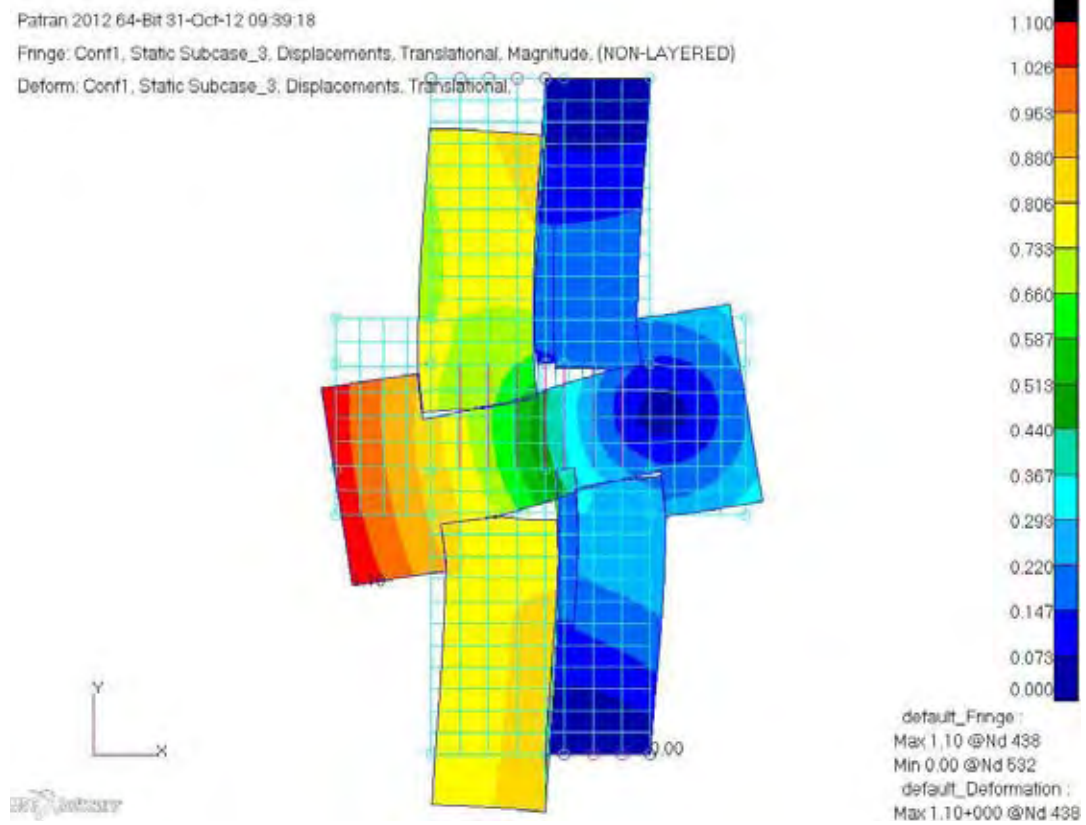


Figura 46 - Deslocamento translacional – configuração 1.

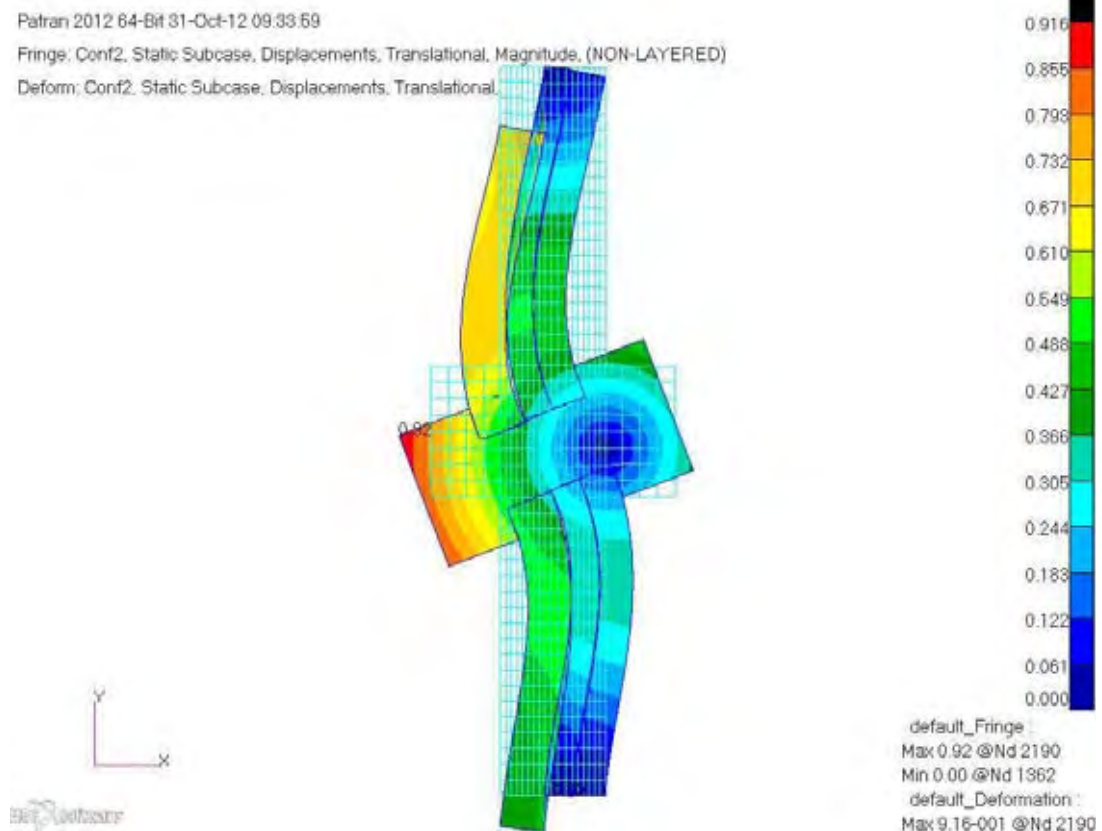


Figura 47 - Deslocamento translacional – configuração 2.

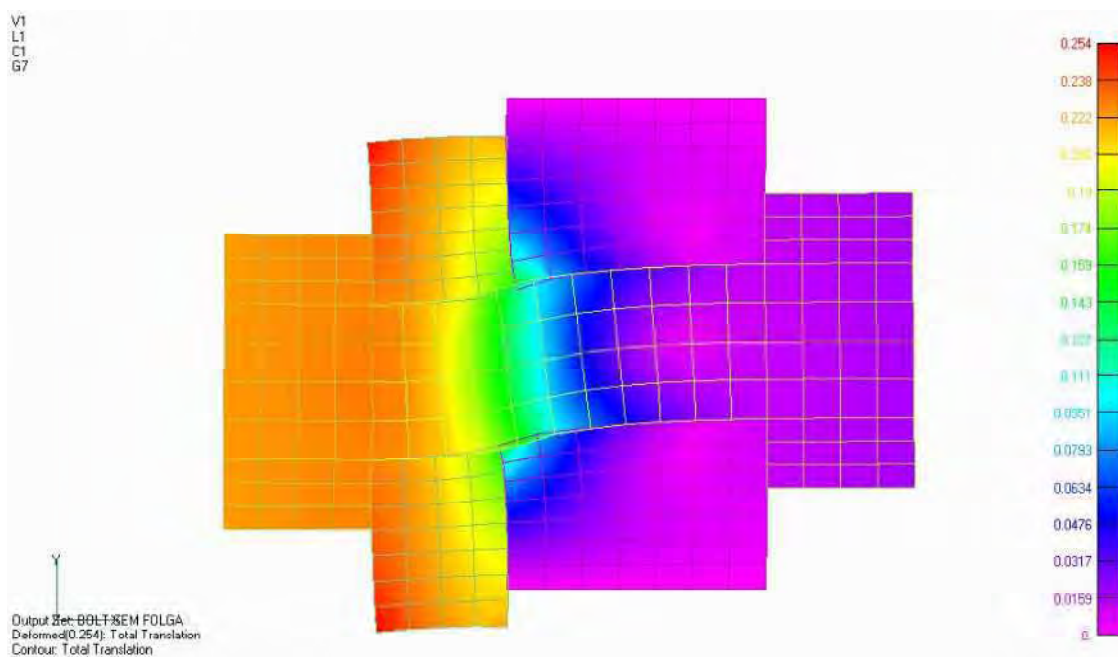


Figura 48 - Deslocamento translacional – configuração 3.

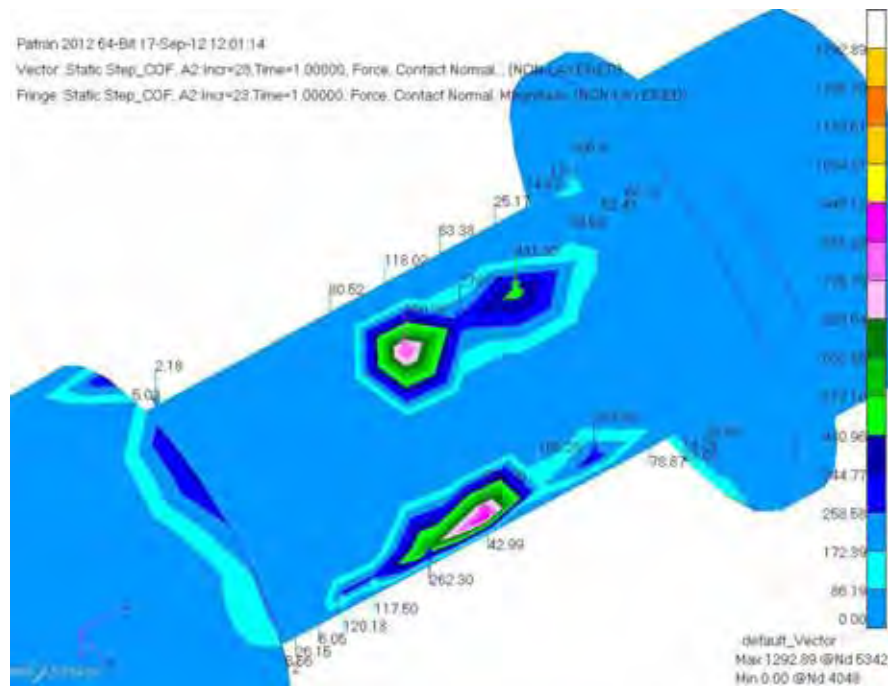
Comparando os resultados obtidos pelo método analítico e pelo método dos elementos finitos utilizando modelos bidimensionais, algumas diferenças aparecem principalmente para a configuração de junta 3 na interface parafuso/placa 1 e na configuração 2 na interface parafuso/placa 2. Para as configurações 1 e 3, o MEF apresenta apenas distribuições de carregamento triangulares ao contrário do comportamento trapezoidal obtido para algumas placas pelo método analítico. No entanto, existe uma boa correlação relacionada ao braço de flexão para a configuração 3 na interface parafuso/placa 2, o qual apresentou apenas 2,11% de diferença entre o MEF e o método analítico. Considerando a configuração 2, a maior discrepância está na interface parafuso/placa 2 onde o método analítico determinou uma distribuição de carregamento retangular e o MEF uma distribuição triangular. Para esta interface, a diferença no braço de flexão alcançou 42% e para a interface parafuso/placa 1 a diferença é de 19,23%.

4.2.2 Modelos tridimensionais

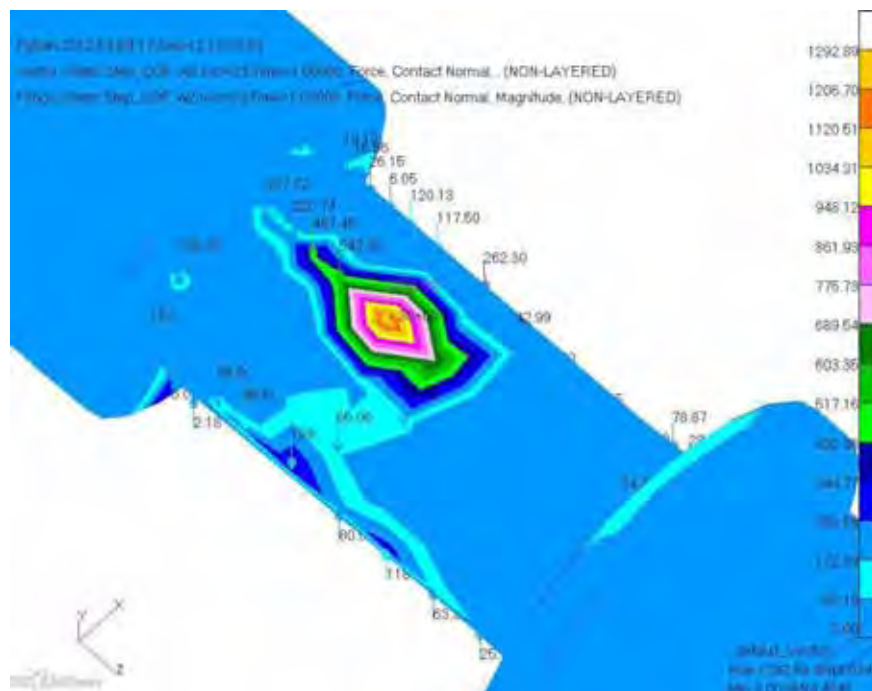
Os modelos utilizando elementos tridimensionais utilizam uma metodologia a qual, a cada incremento de carga, é analisado o possível contato entre os nós dos corpos e, quando esse efeito acontece, a força de contato entre os nós é gerada. Portanto, essa interação entre os

vários nós disponíveis nos corpos permite a avaliação do comportamento da distribuição de cargas ao longo do corpo do parafuso por meio dessas respostas nodais. Essa metodologia foi aplicada para todas as configurações de junta.

Na Figura 49 são apresentadas as regiões onde apresentaram contato entre as placas e o corpo do parafuso e os nós que responderam a essa condição para a configuração 1.



(a)



(b)

Figura 49 – Regiões de contato – configuração 1: (a)Interface parafuso e placa 1, (b) Interface parafuso e placa 2.

Visualmente e pela coordenada z do nó, longitudinal ao corpo do parafuso, pode-se definir as forças de contato existentes entre as placas separadamente. Os valores da coordenada z são negativos, pois o modelo está presente no terceiro e quarto quadrante do sistema de coordenadas global.

Na Tabela 15 são apresentados os nós e suas respectivas forças de contato entre o parafuso e a placa1. As forças de contato possuem a direção do eixo y uma vez que a força atuante na junta está aplicada nessa direção e dessa maneira será possível avaliar a distribuição de carga ao longo do parafuso.

Tabela 15 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 1.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
5524	-1,24	-744,29
5525	-1,24	-303,03
5526	-1,24	-280,29
5529	-1,24	1063,30
5534	-1,24	601,34
5535	-1,24	173,15
5348	-2,35	-142,31
5416	-2,36	149,70
5406	-2,36	534,14
5357	-3,87	-788,70
5414	-3,87	895,94
5424	-3,87	251,75
5356	-6,49	3033,01
5413	-6,49	4413,29
5423	-6,49	633,76
5355	-9,11	1652,49
5412	-9,11	2700,88
5422	-9,11	1180,15
5332	-9,82	-429,93
5466	-10,77	-713,49
5343	-11,73	6578,52
5354	-11,73	9387,01
5411	-11,73	8602,81
5421	-11,73	805,15

Verifica-se que alguns nós apresentam a mesma coordenada z , não significando que estão na mesma posição. Isto porque os modelos são tridimensionais e os nós possuem coordenadas x e y distintas. De tal forma a analisar o comportamento das forças de contato no corpo do parafuso devido ao tipo de distribuição, foram somados os valores nodais com o mesmo posicionamento no eixo z . Assim, na Tabela 16 são mostradas as forças de contato de acordo com a coordenada z .

Tabela 16 - Forças de contato modificadas entre Placa 1 e Parafuso da configuração 1.

Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
-1,24461	510,18
-2,34623	683,85
-3,86653	1147,69
-6,48898	8080,06
-9,11142	5533,52
-11,7339	18794,97

Como pelo MEF não foi possível obter os valores das forças de contato na posição 0 mm e 12 mm, uma extrapolação dos resultados foi realizada e os valores obtidos foram 313,97 N para 0 mm e 20140,74 N para -12 mm.

Devido a essa consideração, pode-se definir a distribuição entre a placa 1 e o parafuso como do tipo trapezoidal. Logo, os valores de B_1 é 12 mm e b_1 é 4,06 mm. Na Figura 50 são mostradas graficamente as forças de contato entre a placa 1 e o parafuso para a configuração 1.

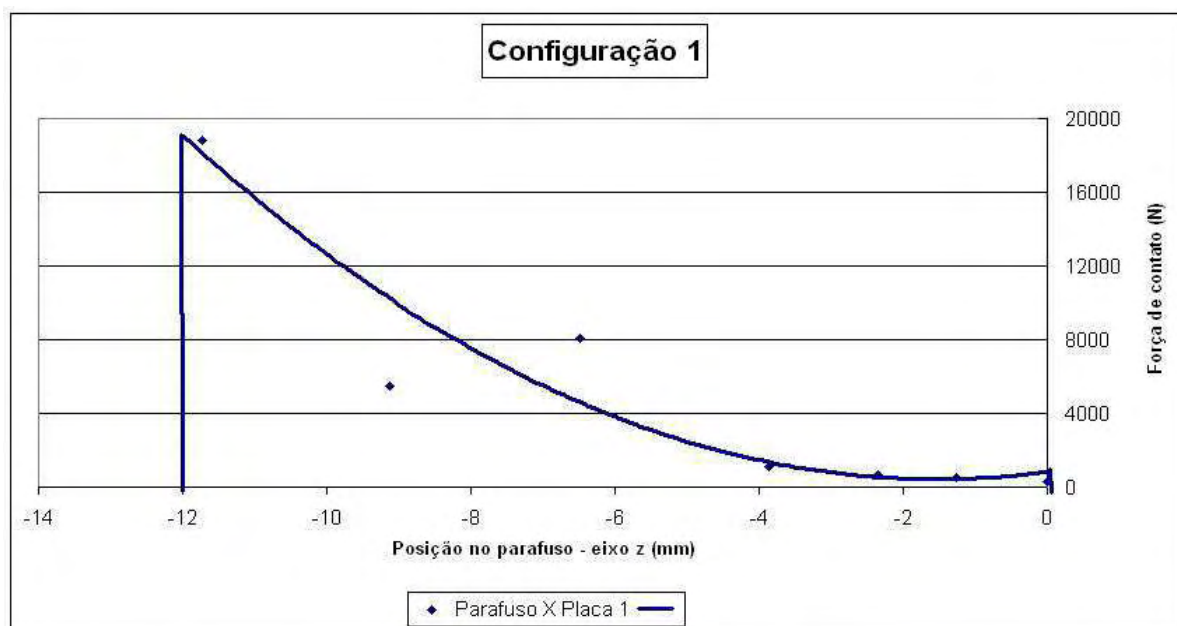


Figura 50 – Distribuição de carregamento na configuração 1 – Placa 1 X Parafuso.

Analogamente, foi utilizado o mesmo método e as considerações para a interface entre a placa 2 e o parafuso. Na

Tabela 17 são apresentados todos os nós e as forças de contato resultantes dessa interface.

Tabela 17 - Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 1.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
5342	-14,36	-12928,91
5353	-14,36	-2623,03
5420	-14,36	-1399,31
5464	-15,17	767,62
5341	-16,98	-5479,29
5352	-16,98	-1174,98
5419	-16,98	-956,59
5415	-18,44	-565,57
5337	-18,46	-4674,49
5347	-18,47	-1201,29
5340	-19,60	-2207,41
5351	-19,60	-60,49
5368	-20,17	21,79
5349	-20,73	-261,50
5339	-21,05	-2277,15
5417	-21,06	50,20
5350	-21,62	-166,60
5262	-22,22	-1803,25
5278	-22,22	-191,21
5282	-22,22	-181,98

Na Tabela 18 são apresentados os valores das forças de contato de acordo com a coordenada z.

Tabela 18 - Forças de contato modificadas entre Placa 2 e Parafuso da configuração 1.

Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
-14,36	-16951,25
-16,98	-7610,85
-18,44	-6441,36
-19,60	-2267,90
-21,05	-2633,27
-22,22	-2176,44

Do mesmo modo para a placa 2, extrapolações de valores foram realizadas para obter a força de contato para a posição -14 mm, -18220,37 N, e para a posição -23 mm, -1872,48 N. Esses resultados, portanto, definem uma distribuição de carregamento trapezoidal entre a placa 2 e o parafuso com valores de 9 mm para B_2 e 3,28 mm para b_2 . Na Figura 51 é mostrada a distribuição de carregamento entre a placa 2 e o parafuso.

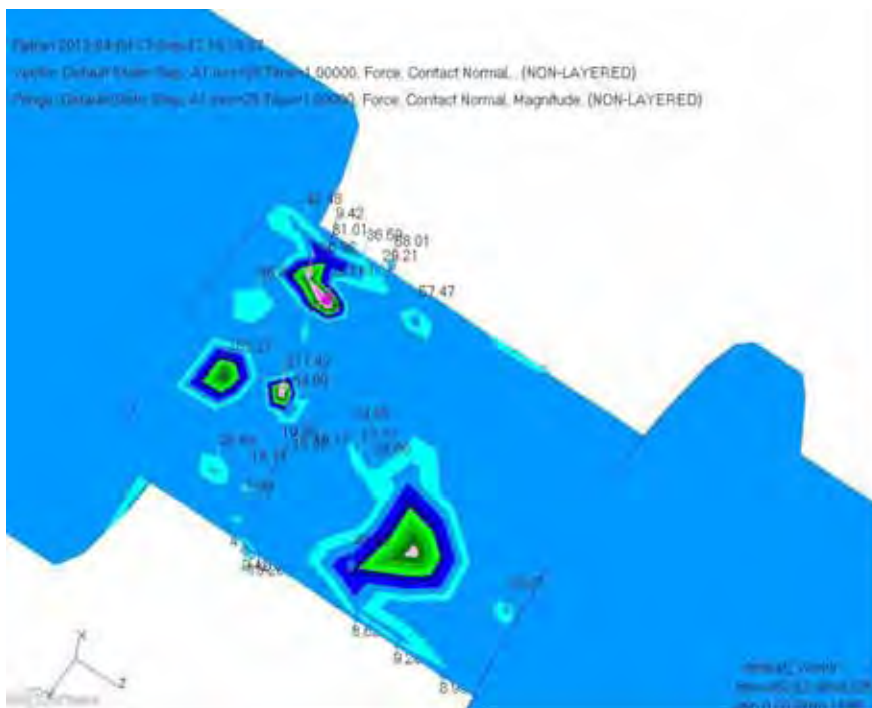


Figura 53 – Regiões de contato – configuração 2: Interface parafuso e placa 2.

Assim, os resultados nodais obtidos devido ao contato entre a placa 1 e o parafuso são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 2.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
3320	-0,71	-232,49
3329	-0,71	413,08
3213	-1,47	39,60
3252	-1,48	141,24
3257	-1,48	1040,62
3216	-2,59	92,65
3255	-2,59	118,33
3260	-2,59	1704,45
3211	-3,00	1478,02
3251	-3,60	31,65
3256	-3,60	3608,23
3212	-3,61	86,25
3204	-3,89	570,14
3309	-3,98	257,80

De tal forma a definir o tipo de distribuição de carregamento presente no corpo do parafuso, as forças de contato com coordenadas z com variação em torno de 0,01 mm foram somadas para fornecer valores mais uniformes. Na Tabela 20 são apresentados os valores modificados.

Tabela 20 - Forças de contato modificadas entre Placa 1 e Parafuso da configuração 2.

Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
-0,71	180,59
-1,47	1221,46
-2,59	3393,44
-3,61	4554,06

Tendo como princípio uma distribuição do carregamento linear, foi obtido através de extrapolação linear os valores para a força de contato na posição 0 mm, -792,12 N e, para a posição -4 mm, 4997,15 N. Com esses valores extrapolados e aqueles obtidos através do método dos elementos finitos define-se uma distribuição de carregamento triangular entre a placa 1 e o parafuso com valores de 3,42 mm para B_1 e 1,14 mm para b_1 . Na Figura 54 é ilustrada a distribuição triangular graficamente entre a placa 1 e o parafuso na configuração 2.

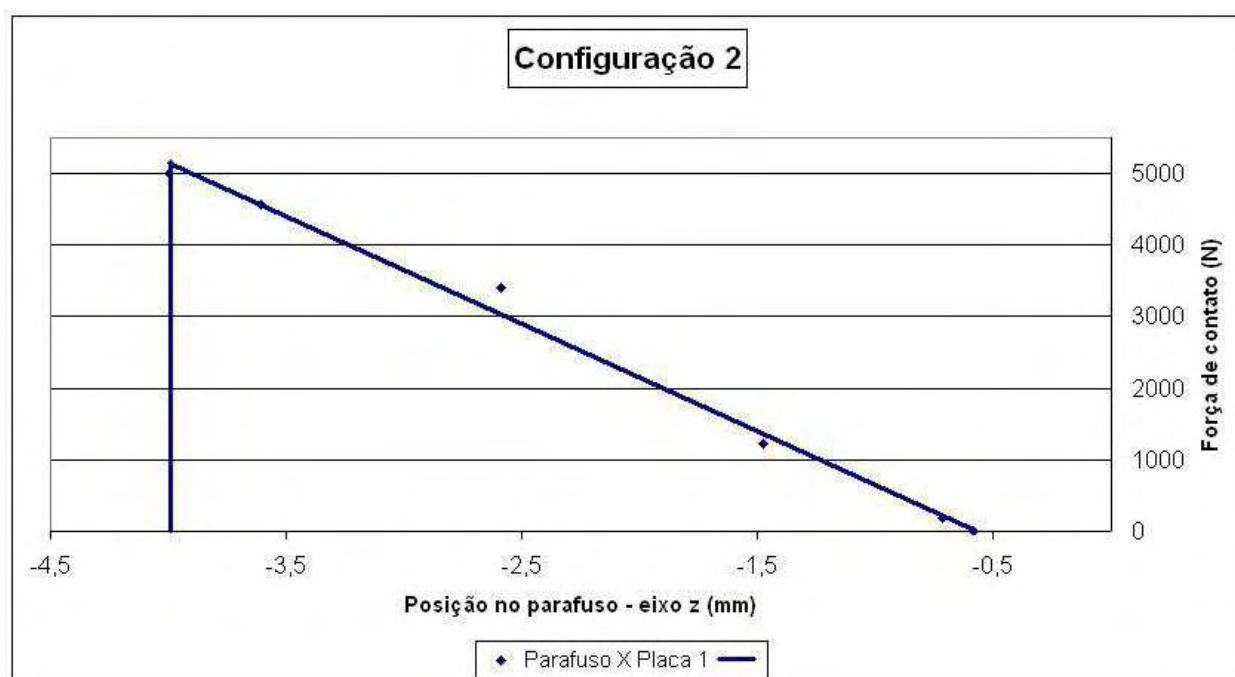


Figura 54 – Distribuição de carregamento na configuração 2 – Placa 1 X Parafuso.

Para a placa 2, os resultados nodais obtidos devido ao contato com o parafuso são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 2.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
2995	-6,56	-39,91
2991	-6,57	49,87
2990	-6,68	-187,30
2996	-6,68	48,57
2978	-6,70	-640,90
3128	-6,81	-292,07
3121	-7,01	-580,14
2976	-7,01	-2114,90
3006	-7,28	-273,53
3105	-7,29	356,32
3106	-7,34	-2576,10
3120	-7,37	-365,92
2986	-7,44	-264,29
3049	-7,58	51,29
3111	-7,94	-810,13
3102	-7,97	-1969,80
2964	-8,18	-1822,65
3010	-8,51	-468,77
3053	-8,51	-94,16
3115	-8,79	-434,75
3083	-9,04	-837,39

De tal forma a definir o tipo de distribuição de carregamento presente no corpo do parafuso, as forças de contato com coordenadas z com variação em torno de 0,2 mm foram somadas para fornecer valores mais uniformes. Na Tabela 22 são apresentados os valores modificados.

Tabela 22 - Forças de contato modificadas entre Placa 2 e Parafuso da configuração 2.

Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
-6,68	-1061,75
-7,28	-2612,26
-7,37	-3155,01
-7,97	-4602,58
-8,51	-1835,08

Utilizando a mesma metodologia de extrapolação dos valores das forças de contato para a obtenção nas extremidades da placa 2, na posição -6,5 mm do eixo z, a força de contato é de -615,03 N. Para a outra extremidade da placa, como houve uma inflexão na distribuição de carregamento, a extrapolação linear não levou em consideração o valor obtido para a posição -8,51 mm do eixo z, mas sim os dois valores anteriores. Portanto, a força de contato na posição -9,5 mm é de -8277,78 N.

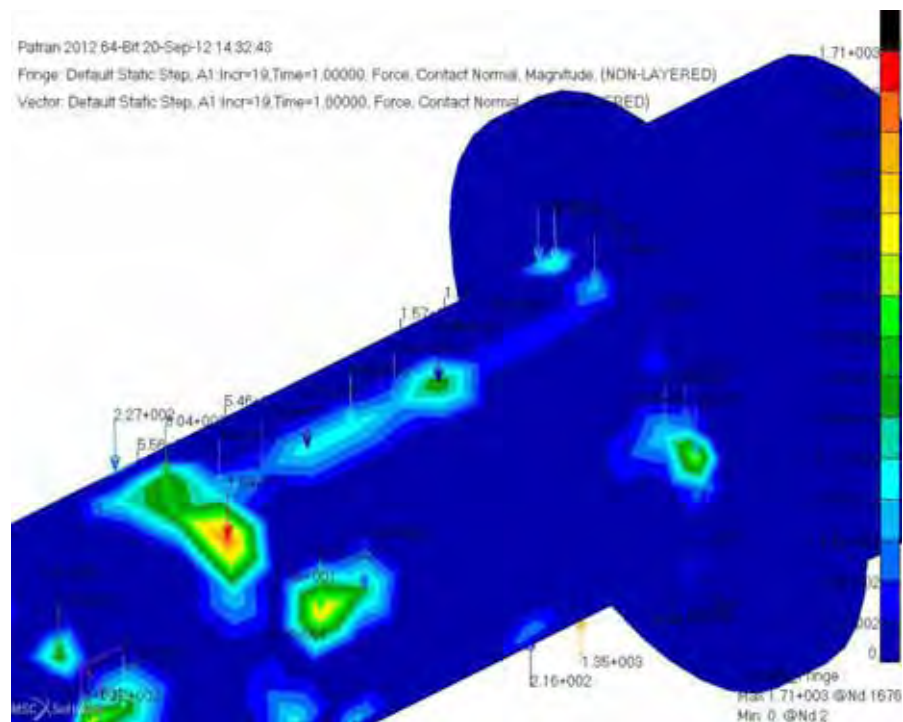


Figura 57 – Regiões de contato – configuração 3: Interface parafuso e placa 2.

Assim, os resultados nodais obtidos devido ao contato entre a placa 1 e o parafuso são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 3.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
1678	-21,15	-3296,69
1682	-21,15	-1867,28
1718	-21,15	-9390,16
1722	-21,15	-3354,65
1734	-21,15	811,51
1850	-21,15	-8347,62
1862	-21,15	-3414,62
1866	-21,15	556,19
1711	-22,21	-5310,64
1827	-22,21	-178,08
1831	-22,21	-5042,38
1676	-23,27	-16350,53
1825	-24,45	-1086,27
1714	-25,56	2752,29
1705	-27,13	-6689,95
1707	-27,13	-1025,76
1821	-27,13	2477,35
1835	-27,13	5030,70
1822	-27,36	-1642,62
1694	-27,36	-11118,71

Continuação da Tabela 23 - Forças de contato entre Placa 1 e Parafuso da configuração 3.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
1660	-27,90	-1852,81
1627	-28,58	-6075,06
1632	-28,58	-6079,25
1635	-28,58	849,12
1640	-28,58	10889,21
1641	-28,58	7147,38
1642	-28,58	-1145,67
1645	-28,58	197,25
1646	-28,58	7230,59
1648	-28,58	6816,28
1649	-28,58	1115,21
1652	-28,58	-2143,20
1655	-28,58	-5140,40

Como mencionado para a configuração de junta 1, alguns nós também apresentam a mesma coordenada z, não significando que estão na mesma posição pois possuem coordenadas x e y distintas. De tal forma a analisar o comportamento das forças de contato no corpo do parafuso devido ao tipo de distribuição, foram somados os valores nodais com o mesmo posicionamento no eixo z. Assim, na Tabela 24 são mostradas as forças de contato de acordo com a coordenada z.

Tabela 24 - Forças de contato modificadas entre Placa 1 e Parafuso da configuração 3.

Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
-21,15	-28303,33
-22,21	-10531,10
-23,27	-16350,53
-24,45	-1086,27
-25,56	2752,29
-27,13	-14821,79
-28,58	13661,45

Conforme realizado para as outras configurações, em forma de caráter numérico para a definição do tipo de distribuição de carga, foram obtidos através de extrapolação linear os valores para a força de contato na posição -21 mm, -30883,88 N e, para a posição -32 mm, 26053,41 N. Observa-se que na posição -24,76 mm na coordenada z, a força de contato é nula, i.e., existe um comportamento de distribuição de carregamento triangular entre a placa 1 e o parafuso com valores de 3,76 mm para B_1 e 1,25 mm para b_1 . Na Figura 58 é ilustrada a distribuição de carga ao longo do parafuso.

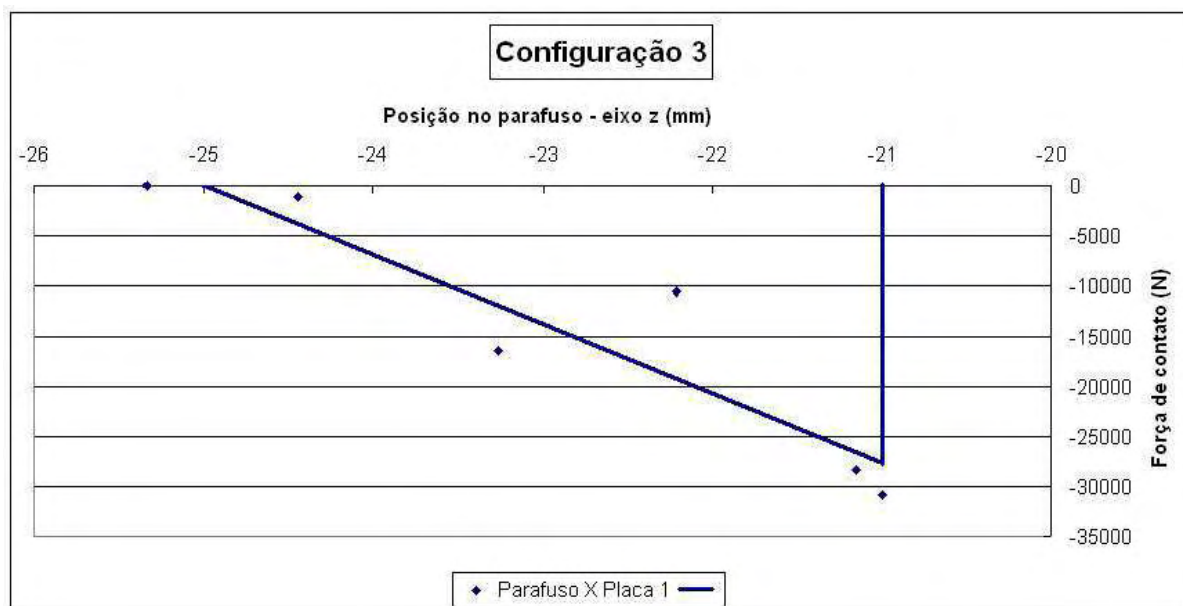


Figura 58 – Distribuição de carregamento na configuração 3 – Placa 1 X Parafuso.

Para a placa 2, os resultados nodais obtidos devido ao contato com o parafuso são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 3.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
1927	-1,40	-7576,92
1930	-1,40	-599,85
1932	-1,40	108,87
1934	-1,40	-2,54
1936	-1,40	-242,46
1938	-1,40	3397,66
1939	-1,40	5148,80
1940	-1,40	351,43
1941	-1,40	4147,44
1942	-1,40	732,48
1944	-1,40	1302,21
1946	-1,40	2323,91
1947	-1,40	3595,87
1948	-1,40	-1204,12
1951	-1,40	-276,69
1952	-1,40	-1231,52
1954	-1,40	-588,16
1811	-2,38	-1767,70
1819	-2,38	-256,79
1923	-2,38	3358,01
1916	-2,99	-1532,92
1809	-4,13	-2480,39
1817	-4,13	1323,28
1921	-4,13	701,51
1770	-5,10	-13496,05

Continuação Tabela 25- Forças de contato entre Placa 2 e Parafuso da configuração 3.

Nó	Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
1914	-5,10	-1676,26
1787	-6,13	-3599,30
1803	-6,13	1573,42
1764	-7,12	1991,58
1892	-7,12	1564,23
1758	-9,13	-2155,58
1890	-9,13	649,01
1779	-10,14	164,88
1884	-11,13	4019,54
1777	-12,14	-451,35
1882	-13,13	5346,75
1731	-14,14	4374,30
1747	-14,14	546,46
1860	-15,13	519,45
1744	-15,13	-1547,91
1748	-15,13	-106,62
1745	-16,14	-138,71
1873	-16,14	2492,37
1742	-17,13	-981,50
1858	-17,13	2544,18
1686	-17,13	-1708,00
1739	-18,14	556,41
1867	-18,14	9558,21
1736	-19,13	-21,68
1852	-19,13	4219,74
1724	-19,13	302,67
1720	-19,13	-4026,39
1677	-20,15	-172,17
1681	-20,15	1154,67
1721	-20,15	6950,95
1733	-20,15	1137,27
1737	-20,15	-264,03
1845	-20,15	2270,31
1849	-20,15	8035,34
1861	-20,15	15436,54
1865	-20,15	189,41

De tal forma a definir o tipo de distribuição de carregamento presente no corpo do parafuso, as forças de contato presentes nas mesmas coordenadas z foram somadas para fornecer os valores na seção transversal ao corpo do parafuso. Na Tabela 26 são apresentados os valores modificados.

Tabela 26 - Forças de contato modificadas entre Placa 2 e Parafuso da configuração 3.

Posição no eixo z [mm]	Força de contato [N]
-1,40	938,64
-2,38	133,35
-2,99	-153,29
-4,13	-45,56
-5,10	-1517,23
-6,13	-202,59
-7,12	355,58
-9,13	-150,66
-10,14	16,49
-11,13	401,95
-12,14	-45,14
-13,13	534,67
-14,14	492,08
-15,13	-113,51
-16,14	235,37
-17,13	-14,53
-18,14	1011,46
-19,13	47,44
-20,15	3473,83

Como realizado para as outras interfaces, um modelo de regressão linear foi aplicado para uma melhor definição do tipo de distribuição de carregamento. As forças de contato entre a placa 2 e o parafuso apresentaram uma dispersão considerável em relação à linha de tendência como pode ser observado na Figura 59. Contudo, mesmo considerando essa variação nos valores ao longo do eixo z, pode-se determinar um comportamento da distribuição de carga triangular com B_2 igual a 14,08 mm e b_2 igual a 4,69 mm.

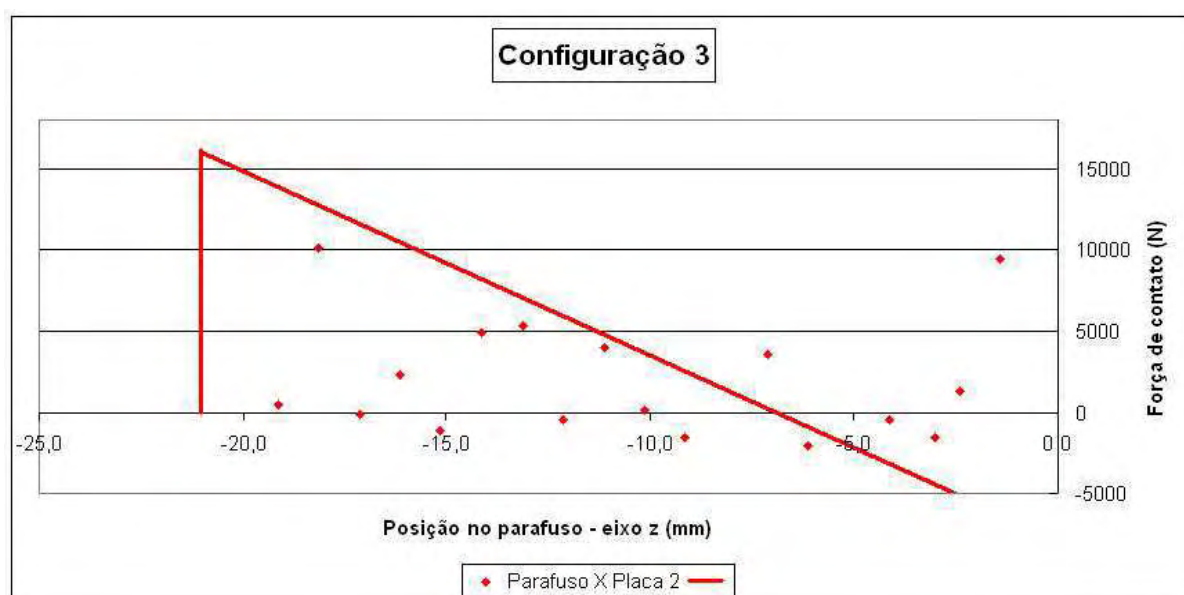


Figura 59 – Distribuição de carregamento na configuração 3 – Placa 2 X Parafuso.

Com o mesmo intuito do que foram apresentadas para os modelos bidimensionais, nas figuras Figura 60, Figura 61 e Figura 62 são mostrados os deslocamentos translacionais das juntas submetidas aos carregamentos anteriormente definidos.

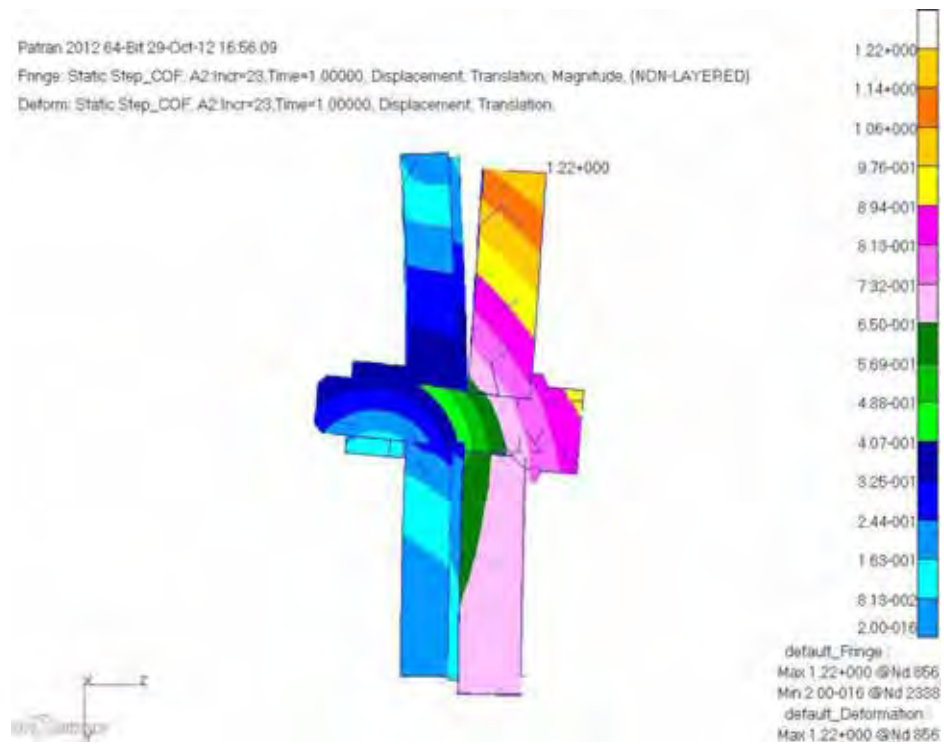


Figura 60 - Deslocamento translacional – modelo tridimensional - configuração 1.

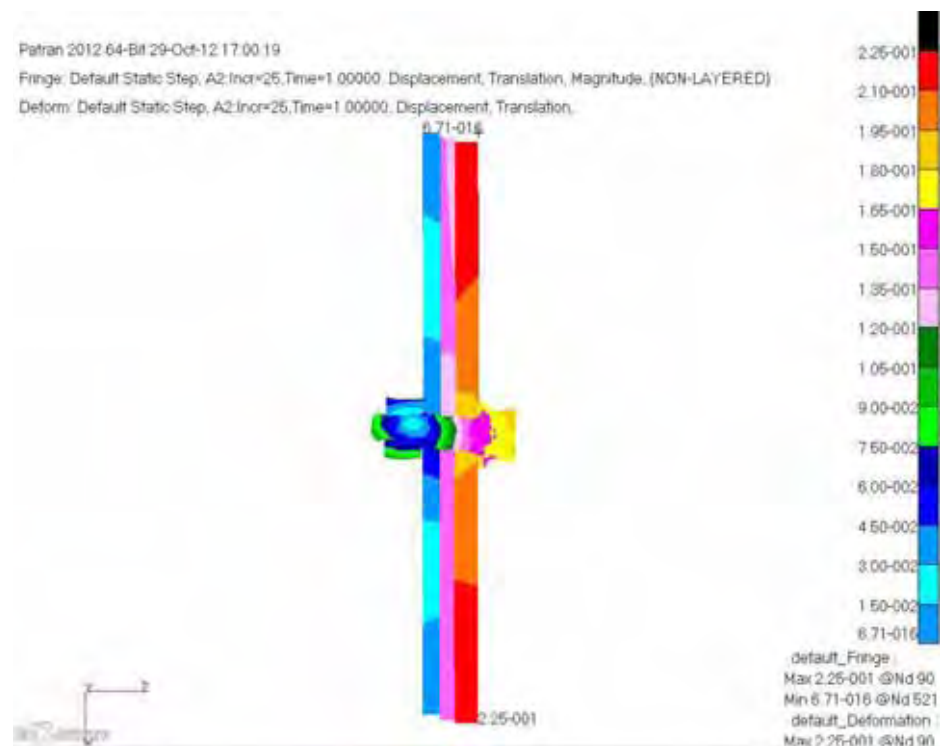


Figura 61 - Deslocamento translacional – modelo tridimensional - configuração 2.

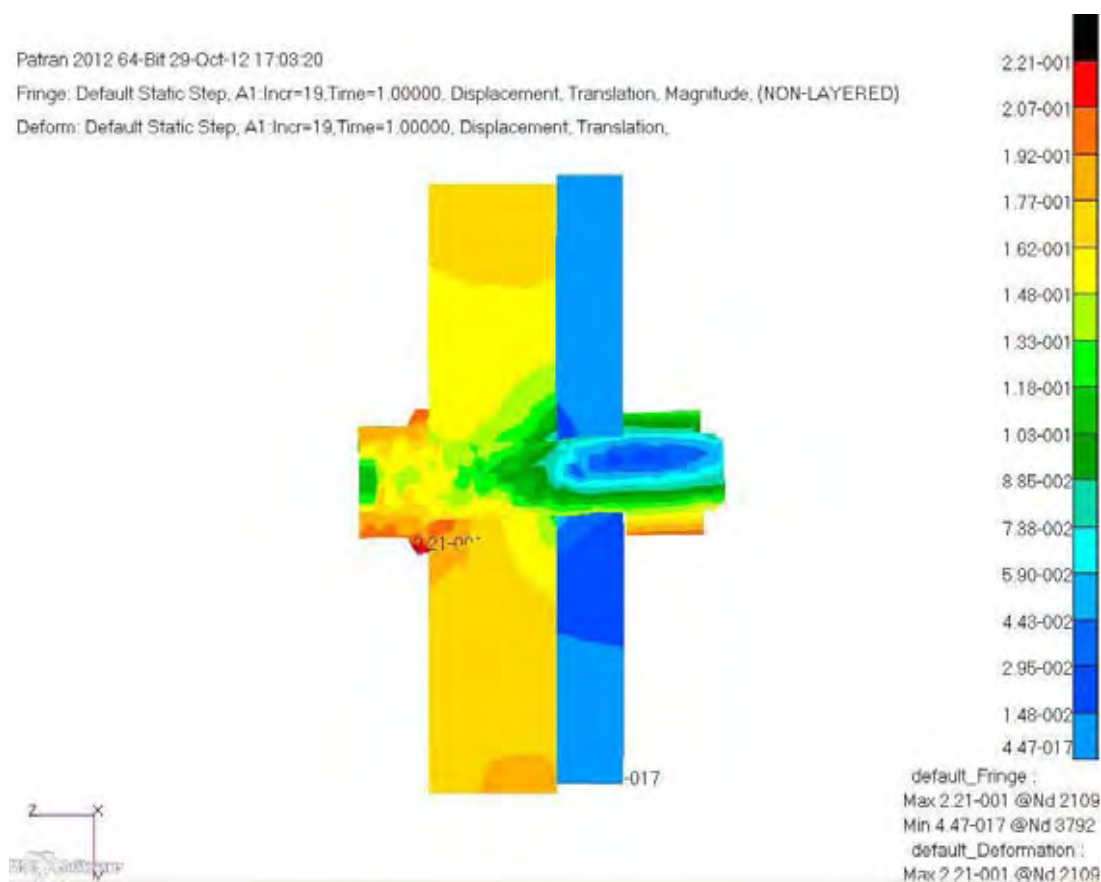


Figura 62 - Deslocamento translacional – modelo tridimensional - configuração 3.

As diferenças entre a modelagem bidimensional e tridimensional na magnitude do deslocamento translacional das juntas como um todo são resumidas de forma clara na Tabela 27.

Tabela 27 – Comparação dos deslocamentos translacionais entre modelagem bidimensional e tridimensional das juntas.

Configuração de junta	Deslocamento – modelo bidimensional [mm]	Deslocamento – modelo tridimensional [mm]	Diferença [%]
1	1,10	1,22	9,83
2	0,91	0,22	24,17
3	0,25	0,22	12,00

Os deslocamentos resultantes das simulações realizadas com os modelos bidimensionais apresentaram valores com diferenças absolutas de aproximadamente 10% para as configurações de juntas 1 e 3, sendo considerado uma variação pequena devido a magnitude das respostas. No entanto, para a configuração 2, a diferença foi bem significativa principalmente pelo efeito de momento secundário presente no modelo de elementos finitos bidimensional. Segundo Schijve (1972), esse efeito está presente em todas as simulações

devido à excentricidade de aplicação do carregamento, mas apresentou uma característica acentuada nos modelos bidimensionais por se ter determinado uma rigidez de contato entre os componentes de 10^6 N/mm diferentemente das condições de contornos não lineares de contato aplicados no modelo tridimensional, o que determina uma rigidez mais próxima das juntas reais e provavelmente menores.

Avaliando os resultados obtidos pelo método analítico, pelos modelos de elementos finitos bidimensionais e pelos modelos tridimensionais, as tabelas Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30 foram geradas.

Tabela 28 – Comparação dos métodos para a configuração de junta1.					
Configuração de junta 1					
	Método	b_i (mm)	B_i (mm)	Tipo de distribuição de carregamento	Diferença do braço de flexão b_i (%)
Placa 1	Analítico	3,6	10,79	Triangular	-
	MEF bidimensional	2,67	8,03	Triangular	-25,83
	MEF tridimensional	4,06	12	Trapezoidal	12,78
Placa2	Analítico	3,5	10,79	Trapezoidal	-
	MEF bidimensional	2,5	7,51	Triangular	-28,57
	MEF tridimensional	3,28	9	Trapezoidal	-6,29

Tabela 29 – Comparação dos métodos para a configuração de junta2.					
Configuração de junta 2					
	Método	b_i (mm)	B_i (mm)	Tipo de distribuição de carregamento	Diferença do braço de flexão b_i (%)
Placa 1	Analítico	1,82	6,28	Trapezoidal	-
	MEF bidimensional	1,47	4	Trapezoidal	-19,23
	MEF tridimensional	1,14	3,42	Triangular	-37,36
Placa2	Analítico	1,5	6,28	Retangular	-
	MEF bidimensional	0,87	2,6	Triangular	-42,00
	MEF tridimensional	1,07	3	Trapezoidal	-28,67

Tabela 30 – Comparação dos métodos para a configuração de junta3.

Configuração de junta 3					
	Método	b_i (mm)	B_i (mm)	Tipo de distribuição de carregamento	Diferença do braço de flexão b_i (%)
Placa 1	Analítico	1,69	5,07	Triangular	-
	MEF bidimensional	3,51	10,54	Triangular	107,69
	MEF tridimensional	1,25	3,76	Triangular	-26,04
Placa2	Analítico	4,75	14,25	Triangular	-
	MEF bidimensional	4,85	14,55	Triangular	2,11
	MEF tridimensional	4,69	14,08	Triangular	-1,26

O método analítico foi definido como a metodologia de referência para o método dos elementos finitos, pois se utiliza teorias consolidadas ou até mesmo validadas empiricamente.

Pelos valores apresentados, os tipos de distribuição de carregamento para cada método aplicado e as diferenças encontradas, analisa-se que o método dos elementos finitos com modelos tridimensionais obtêm-se resultados mais próximos do método analítico quando se utiliza modelos com elementos finitos bidimensionais. Esse efeito era esperado uma vez que o MEF com modelos tridimensionais leva em consideração efeitos não lineares como o contato, proporciona interface entre as placas e parafuso através de uma geometria bastante representativa da condição real das juntas e, além disso, condiciona a inércia ao modelo devido as reais formas geométricas, não mais utilizando correlações como realizado nos modelos bidimensionais.

A variação pontual para a placa1 da configuração 3 utilizando o MEF bidimensional ocorreu principalmente pela utilização de uma placa espessa de aço e realizar a interface com o parafuso utilizando elementos de mola com alto valor de rigidez

Outro fator importante que deve ser discutido é a influência do calço para a análise de uma junta. Como se pode avaliar, as maiores variações ocorreram para a configuração de junta 2 onde a espessura do calço é bastante significativa sendo 62,5% da espessura 1 e 83,3% da espessura 2.

As diferenças com relação aos braços de flexão encontrados nos diferentes métodos aplicados mostra que na grande maioria o método analítico fornece valores maiores que ambos os tipos de modelagem utilizando o método dos elementos finitos.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, três diferentes configurações de juntas aparafusadas foram analisadas pelo método analítico e pelo método dos elementos finitos. Pode-se afirmar que as todas as análises foram realizadas com êxito e resultados consistentes foram obtidos.

Após a comparação dos resultados, a modelagem tridimensional utilizando o método dos elementos finitos apresentou melhores respostas do que as obtidas pelos modelos de juntas bidimensionais em comparação ao método analítico uma vez que menos aproximações são adotadas e análises não lineares são realizadas (contato, atrito) de tal forma a representar de modo mais robusto as juntas reais.

O efeito de momento secundário foi constatado em todas as simulações e foi mais pronunciado na modelagem bidimensional principalmente devido à definição de um alto valor de rigidez entre as interfaces de contato dos componentes e da hipótese definida para representar o momento de inércia por meio da espessura dos elementos de placa. Esse efeito e a hipótese pode explicar a grande diferença ocorrida na configuração de junta 3 além da interface ocorrer entre dois elementos de aço e a placa possuir uma espessura relativamente grande comparada com o corpo do parafuso, prejudicando uma correta distribuição de carregamento.

A presença de calço nas juntas aparafusadas e a espessura das placas influenciam diretamente as diferenças entre os métodos. A junta sem o calço e com as placas de maiores espessuras apresentou apenas aproximadamente 2% de diferença entre o método analítico e o método dos elementos finitos, pois o método analítico não contempla a contribuição do calço e a rigidez de contato definida no modelo de elementos finitos. Além do mais, o método analítico considera apenas a geometria e as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos nas juntas de tal modo a determinar o tipo de distribuição de carregamento ao longo do corpo do parafuso.

Mesmo que as diferenças entre os métodos existam, a utilização e a escolha entre eles dependerão do compromisso entre o custo de processamento dos dados e o grau de responsabilidade imposto pelo projeto que possuir uma junta aparafusada, fazendo com que o método dos elementos finitos permita a obtenção de uma estrutura otimizada, reduzindo peso com confiabilidade aceitável e resultados coerentes. Por outro lado, a aplicação do método analítico leva a obter resultados e um projeto mais conservativo e, conseqüentemente, margens de segurança menores uma vez que todos os braços de flexão calculados são maiores daqueles obtidos pelo método dos elementos finitos.

6 PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Algumas sugestões podem ser apresentadas para estudos posteriores e novos desenvolvimentos:

- Realizar uma análise utilizando o método dos elementos finitos com modelos tridimensionais aplicando o pré carregamento nos parafusos simulando o efeito sobre os componentes unidos devido ao possível aumento da força de atrito entre eles;
- Realizar ensaios experimentais com todas as configurações de juntas analisadas analiticamente e pelo método dos elementos finitos, aplicando instrumentação ao longo do corpo do parafuso para obter as forças de contato e, conseqüentemente, o tipo de distribuição de carregamento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aerospace Industries Association, **National Aerospace Standard – NASM21133**, Washington, DC: USA, 1999.

Aerospace Industries Association, **National Aerospace Standard – NASM21134**, Washington, DC: USA, 1999.

Alves Filho, A., **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**, 5ª ed., São Paulo, Érica, 2000, 292p.

Alves Filho, A., **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE / Análise Dinâmica**, 1ª ed. São Paulo: Érica, 2005, 301p.

ASM International, **ASM Handbook Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, USA, 1997.

Bruhn, E.F., **Analysis and Design of Flight Vehicle Structures**, 1973 Edition, University of Purdue, Purdue, 1973, USA.

Carvill, J., **Mechanical Engineer's Data Handbook**, First edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, Burlington, 1993, 342 p.

Clough, R. W.; Penzien, J., **Dynamics of Structures**, 8th ed., Singapore: McGraw Hill Book, 1989, 634p.

Federal Aviation Administration, **Metallic Materials Properties Development And Standardization**, MMPDS-04, Atlantic City: USA, 2008, 1826 p.

FETTE catalogs. **Rolling Systems**. Catálogo técnico de propriedade da LMT Fette Werkzeugtechnik GmbH & Co. Disponível em: <
<http://fettetools.com/catalogs/2023%20Rollkopfkatalog%20deutsch%20englisch.pdf>>.
 Acesso em: 11 fev. 2012.

Grandin Jr., H., **Fundamentals of the Finite Element Method**, New York: McMillan Publishing Company, 1986.

Griza, S., **Efeito do torque na vida em fadiga de uniões parafusadas**, 2000. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

Lopes, P. M. B. G. S., **Parametrização e otimização de equipamentos hidromecânicos em elementos finitos**, 2002. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

Mínguez, J. M., Vogwell, J., **Theoretical Analysis of preloaded bolted joints subjected to cyclic loading**, International Journal of Mechanical Engineering Education

Moaveni, S., **Finite Element Analysis: theory and application with ANSYS**, New Jersey: Prentice Hall, 1999, 527p.

MSC. Software Corporation, **MD Nastran 2010 – Linear Static Analysis User's Guide**, 2010, Santa Ana, CA: USA, 2010.

MSC. Software Corporation, **MD Nastran 2010 – Quick Reference Guide**, 2010, Santa Ana, CA: USA, 2010.

MSC. Software Corporation, **MD Nastran 2010 – Release Guide**, 2010, Santa Ana, CA: USA, 2010.

Newport, A., Topp, D. A., Glinka, G., **The Analysis of Elastic Stress Distribution in Threaded Tether Connections**, Journal of Strain Analysis, Vol. 22 No 4, 1986.

Niemann, G., **Tratado teórico-práctico de elementos de máquinas**, Second edition, Editorial Labor S.A., Barcelona: Spain, 1973, 393 p.

Niu, M.C., **Airframe Stress Analysis and Sizing**, Second edition, Hong Kong Conmilit Press LTDA, California: USA, 2005, 795 p.

Niu, M.C., **Airframe Structural Design**, Hong Kong Conmilit Press LTDA, California: USA, 1988, 597 p.

Oberg, E., Jones, F.D., Horton, H.L., Ryffel, H.H., **Machinery's Handbook**, Twenty Seventh edition, Industrial Press Inc., New York: NY, 2004, 2640 p.

Patterson, E. A., Kenny, B., **A Modification to the Theory for the Load Distribution in Conventional Nuts and Bolts**, Journal of Strain Analysis, Vol. 21 No 1, 1986.

Xavier, A.C.B., **Considerações para a análise de juntas aeronáuticas unidas mecanicamente**, 2006. 152 f. Tese (Mestrado em Ciências na área de mecânica dos sólidos e estruturas) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

Shigley, J.E., **Elementos de Máquinas 1**, LTC Editora LTDA, Rio de Janeiro: Brazil, 1984, 347 p.

Schijve, J., **Some Elementary Calculations on Secondary Bending in Simple Lap Joints**, NLR TR 72036, National Aerospace Laboratory, Amsterdam, NL, 1972.

Wileman, J., Choudhury, M., Green, I., **Computation of Member Stiffness in Bolted Connections**, Journal of Mechanical Design, Vol. 113, 1991.

APÊNDICE A - EXEMPLOS DOS ARQUIVOS DE ENTRADA DE DADOS DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS - SOFTWARE MSC PATRAN® 2010

Com o intuito de exemplificar os arquivos de entrada de dados dos modelos, está apresentado abaixo os referentes a configuração de junta 1 tanto para o modelo bidimensional quanto para o tridimensional. Com relação ao arquivo do modelo tridimensional, por este possuir 31503 linhas, ele foi reduzido de tal modo a ser possível compreendê-lo sem grandes perdas de informação.

Modelo bidimensional - Configuração de junta 1	Modelo tridimensional - Configuração de junta 1
\$ NASTRAN input file created by the Patran 2010.1.2 64-Bit input file \$ translator on January 25, 2011 at 16:55:52. \$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section \$ Linear Static Analysis, Database SOL 101 CEND ECHO = NONE SUBCASE 1 TITLE=This is a default subcase. SPC = 2 LOAD = 347 DISPLACEMENT(SORT1,REAL)=ALL SPCFORCES(SORT1,REAL)=ALL GPFORCE=ALL STRESS(SORT1,REAL,VONMISES,BILIN)=ALL FORCE(SORT1,REAL,BILIN)=ALL \$ Direct Text Input for this Subcase BEGIN BULK PARAM POST -1 PARAM GRDPNT 0 PARAM PRTMAXIM YES \$ Elements and Element Properties for region : Bolt_head PSHELL 4 4 12.22 4 1. 4 .83333 \$ Pset: "Bolt_head" will be imported as: "pshell.4" CQUAD4 514 4 385 386 395 394 0. 0. CQUAD4 515 4 386 387 396 395 0. 0. CQUAD4 516 4 387 388 397 396 0. 0. CQUAD4 517 4 388 389 398 397 0. 0. CQUAD4 518 4 389 390 399 398 0. 0. CQUAD4 519 4 390 391 400 399 0. 0. CQUAD4 520 4 391 392 401 400 0. 0. CQUAD4 521 4 392 393 402 401 0. 0. CQUAD4 522 4 394 395 404 403 0. 0. CQUAD4 523 4 395 396 405 404 0. 0. CQUAD4 524 4 396 397 406 405 0. 0. CQUAD4 525 4 397 398 407 406 0. 0. CQUAD4 526 4 398 399 408 407 0. 0. CQUAD4 527 4 399 400 409 408 0. 0. CQUAD4 528 4 400 401 410 409 0. 0. CQUAD4 529 4 401 402 411 410 0. 0. CQUAD4 530 4 403 404 413 412 0. 0. CQUAD4 531 4 404 405 414 413 0. 0.	EXTENDED SIZING , , 23591, 6084, 122, 0, \$ \$ \$ \$ \$ \$ VERSION , 11, \$ \$ TABLE , , , 2, 1, 1, 0, 0, \$ -- PARAMETERS TITLE MSC.Marc job created on 29-Aug-12 at 08:22:28 TITLE Static Step_COF LARGE DISP UPDATE FINITE CONSTANT MPC-CHECK , 3, \$NO LIST POST ,5 ELEMENTS , 134, END \$ -- MODEL DEFINITION SOLVER 8, 0, 0, , , , 0, OPTIMIZE , 11, CONNECTIVITY 23591, 5, 0, 1, 134, 986, 740, 739, 738, 2, 134, 737, 738, 989, 736, 3, 134, 737, 735, 734, 733, 4, 134, 987, 737, 733, 735, 5, 134, 737, 985, 735, 987, 6, 134, 737, 985, 732, 735, 7, 134, 737, 986, 740, 985, 8, 134, 731, 1113, 730, 1115, 9, 134, 729, 728, 727, 731, 10, 134, 726, 725, 724, 1537, 11, 134, 726, 723, 722, 721, 12, 134, 726, 720, 721, 719,

CQUAD4	532	4	405	406	415	414	0.	0.	13, 134, 726, 721, 1680, 723,
CQUAD4	533	4	406	407	416	415	0.	0.	14, 134, 726, 1678, 1537, 724,
CQUAD4	534	4	407	408	417	416	0.	0.	15, 134, 1678, 726, 723, 724,
CQUAD4	535	4	408	409	418	417	0.	0.	16, 134, 718, 717, 716, 715,
CQUAD4	536	4	409	410	419	418	0.	0.	17, 134, 718, 714, 713, 712,
CQUAD4	537	4	410	411	420	419	0.	0.	18, 134, 718, 714, 711, 716,
CQUAD4	538	4	412	413	422	421	0.	0.	19, 134, 710, 777, 1406, 756,
CQUAD4	539	4	413	414	423	422	0.	0.	20, 134, 718, 717, 1603, 716,
CQUAD4	540	4	414	415	424	423	0.	0.	21, 134, 718, 1601, 714, 1603,
CQUAD4	541	4	415	416	425	424	0.	0.	22, 134, 718, 714, 1601, 713,
CQUAD4	542	4	416	417	426	425	0.	0.	23, 134, 709, 708, 707, 706,
CQUAD4	543	4	417	418	427	426	0.	0.	24, 134, 705, 704, 703, 702,
CQUAD4	544	4	418	419	428	427	0.	0.	25, 134, 705, 701, 703, 700,
CQUAD4	545	4	419	420	429	428	0.	0.	26, 134, 705, 699, 1420, 700,
CQUAD4	546	4	430	431	440	439	0.	0.	27, 134, 705, 698, 704, 702,
CQUAD4	547	4	431	432	441	440	0.	0.	28, 134, 704, 705, 703, 699,
CQUAD4	548	4	432	433	442	441	0.	0.	29, 134, 697, 696, 695, 694,
CQUAD4	549	4	433	434	443	442	0.	0.	30, 134, 697, 1119, 694, 695,
CQUAD4	550	4	434	435	444	443	0.	0.	31, 134, 697, 693, 692, 696,
CQUAD4	551	4	435	436	445	444	0.	0.	32, 134, 697, 691, 693, 690,
CQUAD4	552	4	436	437	446	445	0.	0.	33, 134, 697, 691, 689, 692,
CQUAD4	553	4	437	438	447	446	0.	0.	34, 134, 688, 1466, 687, 686,
CQUAD4	554	4	439	440	449	448	0.	0.	35, 134, 688, 686, 1464, 1466,
CQUAD4	555	4	440	441	450	449	0.	0.	36, 134, 688, 709, 708, 685,
CQUAD4	556	4	441	442	451	450	0.	0.	37, 134, 688, 684, 686, 685,
CQUAD4	557	4	442	443	452	451	0.	0.	38, 134, 688, 683, 685, 708,
CQUAD4	558	4	443	444	453	452	0.	0.	39, 134, 733, 682, 681, 736,
CQUAD4	559	4	444	445	454	453	0.	0.	40, 134, 699, 680, 1414, 679,
CQUAD4	560	4	445	446	455	454	0.	0.	41, 134, 678, 677, 676, 675,
CQUAD4	561	4	446	447	456	455	0.	0.	42, 134, 699, 680, 679, 674,
CQUAD4	562	4	448	449	458	457	0.	0.	43, 134, 705, 1420, 699, 673,
CQUAD4	563	4	449	450	459	458	0.	0.	44, 134, 699, 700, 1414, 1420,
CQUAD4	564	4	450	451	460	459	0.	0.	45, 134, 705, 699, 704, 673,
CQUAD4	565	4	451	452	461	460	0.	0.	46, 134, 1478, 1558, 1477, 672,
CQUAD4	566	4	452	453	462	461	0.	0.	47, 134, 677, 676, 675, 671,
CQUAD4	567	4	453	454	463	462	0.	0.	48, 134, 672, 670, 687, 669,
CQUAD4	568	4	454	455	464	463	0.	0.	49, 134, 672, 1558, 1477, 1557,
CQUAD4	569	4	455	456	465	464	0.	0.	50, 134, 693, 672, 1478, 729,
CQUAD4	570	4	457	458	467	466	0.	0.	51, 134, 672, 687, 1477, 729,
CQUAD4	571	4	458	459	111	467	0.	0.	52, 134, 668, 667, 666, 681,
CQUAD4	572	4	459	460	469	111	0.	0.	53, 134, 668, 1575, 667, 1576,
CQUAD4	573	4	460	461	470	469	0.	0.	54, 134, 682, 668, 1576, 665,
CQUAD4	574	4	461	462	471	470	0.	0.	55, 134, 738, 664, 739, 1578,
CQUAD4	575	4	462	463	472	471	0.	0.	56, 134, 663, 1225, 662, 1335,
CQUAD4	576	4	463	464	473	472	0.	0.	57, 134, 661, 663, 660, 659,
CQUAD4	577	4	464	465	474	473	0.	0.	58, 134, 663, 658, 660, 659,
\$ Elements and Element Properties for region : Bolt_body									
PSHELL	5	4	6.54	4	1.	4	.83333		59, 134, 663, 657, 656, 662,
\$ Pset: "Bolt_body" will be imported as: "pshell.5"									
CQUAD4	578	5	472	476	485	471	0.	0.	60, 134, 663, 1335, 662, 655,
CQUAD4	579	5	476	477	486	485	0.	0.	61, 134, 1459, 654, 1462, 653,
CQUAD4	580	5	477	478	487	486	0.	0.	62, 134, 652, 651, 1540, 653,
CQUAD4	581	5	478	479	488	487	0.	0.	63, 134, 652, 1540, 651, 707,
CQUAD4	582	5	479	480	489	488	0.	0.	64, 134, 650, 652, 708, 649,
CQUAD4	583	5	480	481	490	489	0.	0.	65, 134, 1462, 654, 708, 652,
CQUAD4	584	5	481	482	491	490	0.	0.	66, 134, 1325, 648, 1324, 930,
CQUAD4	585	5	482	427	426	491	0.	0.	67, 134, 735, 983, 1190, 987,
CQUAD4	586	5	471	485	494	470	0.	0.	68, 134, 647, 654, 649, 708,
CQUAD4	587	5	485	486	495	494	0.	0.	69, 134, 646, 645, 644, 1566,
CQUAD4	588	5	486	487	496	495	0.	0.	70, 134, 708, 650, 709, 707,
CQUAD4	589	5	487	488	497	496	0.	0.	71, 134, 643, 642, 641, 640,
CQUAD4	590	5	488	489	498	497	0.	0.	72, 134, 643, 639, 1319, 638,
CQUAD4	591	5	489	490	499	498	0.	0.	73, 134, 643, 639, 1174, 1319,
CQUAD4	592	5	490	491	500	499	0.	0.	74, 134, 643, 725, 642, 640,
CQUAD4	593	5	491	426	425	500	0.	0.	75, 134, 637, 1474, 636, 1480,
CQUAD4	594	5	470	494	503	469	0.	0.	76, 134, 637, 635, 634, 636,
CQUAD4	595	5	494	495	504	503	0.	0.	77, 134, 637, 633, 636, 634,
									78, 134, 637, 632, 631, 1474,
									79, 134, 637, 631, 635, 636,

CQUAD4	596	5	495	496	505	504	0.	0.	80, 134, 637, 632, 630, 631,
CQUAD4	597	5	496	497	506	505	0.	0.	81, 134, 629, 628, 627, 626,
CQUAD4	598	5	497	498	507	506	0.	0.	82, 134, 629, 625, 716, 627,
CQUAD4	599	5	498	499	508	507	0.	0.	83, 134, 629, 1710, 625, 1599,
CQUAD4	600	5	499	500	509	508	0.	0.	84, 134, 629, 628, 655, 627,
CQUAD4	601	5	500	425	424	509	0.	0.	85, 134, 1190, 1192, 1002, 983,
CQUAD4	602	5	469	503	512	111	0.	0.	86, 134, 629, 625, 656, 1599,
CQUAD4	603	5	503	504	513	512	0.	0.	87, 134, 691, 624, 690, 1198,
CQUAD4	604	5	504	505	514	513	0.	0.	88, 134, 697, 693, 691, 692,
CQUAD4	605	5	505	506	515	514	0.	0.	89, 134, 691, 624, 1198, 623,
CQUAD4	606	5	506	507	516	515	0.	0.	90, 134, 691, 624, 623, 622,
CQUAD4	607	5	507	508	517	516	0.	0.	90, 134, 691, 624, 623, 622,
CQUAD4	608	5	508	509	518	517	0.	0.	91, 134, 691, 621, 689, 620,
CQUAD4	609	5	509	424	423	518	0.	0.	92, 134, 647, 649, 1096, 1099,
\$ Elements and Element Properties for region : Plate									93, 134, 647, 1099, 619, 649,
PSHELL 6 5 11.13 5 1. 5 .83333									94, 134, 647, 619, 1091, 618,
\$ Pset: "Plate" will be imported as: "pshell.6"									95, 134, 617, 1689, 1690, 1683,
CQUAD4	610	6	519	520	534	533	0.	0.	96, 134, 647, 618, 1091, 1090,
CQUAD4	611	6	520	521	535	534	0.	0.	97, 134, 647, 1096, 616, 1090,
CQUAD4	612	6	521	522	536	535	0.	0.	98, 134, 615, 654, 1460, 1453,
CQUAD4	613	6	522	523	537	536	0.	0.	99, 134, 615, 614, 613, 618,
CQUAD4	614	6	523	524	538	537	0.	0.	100, 134, 615, 614, 647, 612,
CQUAD4	615	6	524	525	539	538	0.	0.	101, 134, 623, 611, 1197, 610,
CQUAD4	616	6	525	526	540	539	0.	0.	102, 134, 609, 618, 608, 607,
CQUAD4	617	6	526	527	541	540	0.	0.	103, 134, 615, 1452, 608, 607,
CQUAD4	618	6	527	528	542	541	0.	0.	104, 134, 615, 607, 1451, 1452,
CQUAD4	619	6	528	529	543	542	0.	0.	105, 134, 615, 1451, 613, 1453,
CQUAD4	620	6	529	530	544	543	0.	0.	106, 134, 717, 1603, 716, 1713,
CQUAD4	621	6	530	531	545	544	0.	0.	107, 134, 718, 1603, 717, 606,
CQUAD4	622	6	531	532	546	545	0.	0.	108, 134, 717, 605, 604, 603,
CQUAD4	623	6	533	534	548	547	0.	0.	109, 134, 717, 715, 626, 716,
CQUAD4	624	6	534	535	549	548	0.	0.	110, 134, 717, 603, 716, 626,
CQUAD4	625	6	535	536	550	549	0.	0.	111, 134, 718, 717, 715, 606,
CQUAD4	626	6	536	537	551	550	0.	0.	112, 134, 602, 601, 600, 599,
CQUAD4	627	6	537	538	552	551	0.	0.	113, 134, 602, 598, 597, 601,
CQUAD4	628	6	538	539	553	552	0.	0.	114, 134, 602, 601, 599, 598,
CQUAD4	629	6	539	540	554	553	0.	0.	115, 134, 602, 601, 1105, 600,
CQUAD4	630	6	540	541	555	554	0.	0.	116, 134, 602, 596, 597, 595,
CQUAD4	631	6	541	542	556	555	0.	0.	117, 134, 602, 1449, 595, 1468,
CQUAD4	632	6	542	543	557	556	0.	0.	118, 134, 632, 594, 630, 593,
CQUAD4	633	6	543	544	558	557	0.	0.	119, 134, 632, 592, 630, 631,
CQUAD4	634	6	544	545	559	558	0.	0.	120, 134, 591, 1202, 590, 610,
CQUAD4	635	6	545	546	560	559	0.	0.	121, 134, 632, 589, 1472, 594,
CQUAD4	636	6	547	548	562	561	0.	0.	122, 134, 637, 632, 1474, 588,
CQUAD4	637	6	548	549	563	562	0.	0.	123, 134, 632, 631, 1474, 1472,
CQUAD4	638	6	549	550	564	563	0.	0.	124, 134, 680, 679, 674, 587,
CQUAD4	639	6	550	551	565	564	0.	0.	125, 134, 680, 679, 587, 586,
CQUAD4	640	6	551	552	566	565	0.	0.	126, 134, 680, 585, 586, 584,
CQUAD4	641	6	552	553	567	566	0.	0.	127, 134, 699, 1414, 680, 583,
CQUAD4	642	6	553	554	568	567	0.	0.	128, 134, 680, 679, 1412, 1414,
CQUAD4	643	6	554	555	569	568	0.	0.	129, 134, 699, 680, 674, 583,
CQUAD4	644	6	555	556	570	569	0.	0.	130, 134, 725, 640, 582, 581,
CQUAD4	645	6	556	557	571	570	0.	0.	131, 134, 643, 580, 725, 582,
CQUAD4	646	6	557	558	572	571	0.	0.	132, 134, 726, 639, 580, 642,
CQUAD4	647	6	558	559	573	572	0.	0.	133, 134, 726, 725, 1537, 642,
CQUAD4	648	6	559	560	574	573	0.	0.	134, 134, 725, 1535, 640, 581,
CQUAD4	649	6	575	576	590	589	0.	0.	135, 134, 725, 640, 1535, 1537,
CQUAD4	650	6	576	577	591	590	0.	0.	136, 134, 726, 1681, 642, 1537,
CQUAD4	651	6	577	578	592	591	0.	0.	137, 134, 726, 722, 580, 639,
CQUAD4	652	6	578	579	593	592	0.	0.	138, 134, 591, 579, 590, 578,
CQUAD4	653	6	579	580	594	593	0.	0.	139, 134, 591, 645, 577, 610,
CQUAD4	654	6	580	581	595	594	0.	0.	140, 134, 591, 1205, 576, 578,
CQUAD4	655	6	581	582	596	595	0.	0.	141, 134, 591, 645, 646, 577,
CQUAD4	656	6	582	583	597	596	0.	0.	142, 134, 735, 987, 1190, 1189,
CQUAD4	657	6	583	584	598	597	0.	0.	143, 134, 591, 644, 576, 575,
CQUAD4	658	6	584	585	599	598	0.	0.	144, 134, 591, 575, 646, 644,
CQUAD4	659	6	585	586	600	599	0.	0.	145, 134, 574, 573, 1227, 572,

CQUAD4	660	6	586	587	601	600	0.	0.	146, 134, 571, 661, 1697, 1587,
CQUAD4	661	6	587	588	602	601	0.	0.	147, 134, 571, 570, 569, 568,
CQUAD4	662	6	589	590	604	603	0.	0.	148, 134, 570, 571, 567, 568,
CQUAD4	663	6	590	591	605	604	0.	0.	149, 134, 656, 571, 568, 567,
CQUAD4	664	6	591	592	606	605	0.	0.	150, 134, 663, 657, 571, 656,
CQUAD4	665	6	592	593	607	606	0.	0.	151, 134, 604, 566, 565, 564,
CQUAD4	666	6	593	594	608	607	0.	0.	152, 134, 604, 603, 605, 563,
CQUAD4	667	6	594	595	609	608	0.	0.	153, 134, 591, 577, 1203, 610,
CQUAD4	668	6	595	596	610	609	0.	0.	154, 134, 1712, 604, 562, 603,
CQUAD4	669	6	596	597	611	610	0.	0.	155, 134, 1712, 604, 1713, 1715,
CQUAD4	670	6	597	598	612	611	0.	0.	156, 134, 717, 561, 604, 605,
CQUAD4	671	6	598	599	613	612	0.	0.	157, 134, 717, 1713, 604, 561,
CQUAD4	672	6	599	600	614	613	0.	0.	158, 134, 560, 1207, 1200, 1201,
CQUAD4	673	6	600	601	615	614	0.	0.	159, 134, 646, 1566, 644, 1568,
CQUAD4	674	6	601	602	616	615	0.	0.	160, 134, 635, 1116, 559, 1110,
CQUAD4	675	6	603	604	618	617	0.	0.	161, 134, 637, 634, 635, 630,
CQUAD4	676	6	604	605	619	618	0.	0.	162, 134, 635, 1117, 694, 1116,
CQUAD4	677	6	605	606	620	619	0.	0.	163, 134, 635, 634, 1117, 1111,
CQUAD4	678	6	606	607	621	620	0.	0.	164, 134, 1448, 558, 557, 1450,
CQUAD4	679	6	607	608	622	621	0.	0.	165, 134, 589, 594, 593, 557,
CQUAD4	680	6	608	609	623	622	0.	0.	166, 134, 556, 555, 557, 558,
CQUAD4	681	6	609	610	624	623	0.	0.	167, 134, 554, 1568, 644, 1590,
CQUAD4	682	6	610	611	625	624	0.	0.	168, 134, 632, 1472, 589, 553,
CQUAD4	683	6	611	612	626	625	0.	0.	169, 134, 589, 594, 1450, 1472,
CQUAD4	684	6	612	613	627	626	0.	0.	170, 134, 632, 589, 594, 593,
CQUAD4	685	6	613	614	628	627	0.	0.	171, 134, 632, 589, 555, 553,
CQUAD4	686	6	614	615	629	628	0.	0.	172, 134, 552, 551, 1390, 550,
CQUAD4	687	6	615	616	630	629	0.	0.	173, 134, 552, 549, 1395, 1389,
CQUAD4	688	6	617	618	632	631	0.	0.	174, 134, 552, 548, 547, 550,
CQUAD4	689	6	618	619	633	632	0.	0.	175, 134, 552, 547, 546, 545,
CQUAD4	690	6	619	620	634	633	0.	0.	176, 134, 552, 545, 546, 549,
CQUAD4	691	6	620	621	635	634	0.	0.	177, 134, 958, 957, 931, 1691,
CQUAD4	692	6	621	622	636	635	0.	0.	178, 134, 544, 585, 543, 542,
CQUAD4	693	6	622	623	637	636	0.	0.	179, 134, 544, 545, 546, 542,
CQUAD4	694	6	623	624	638	637	0.	0.	180, 134, 541, 549, 1392, 544,
CQUAD4	695	6	624	625	639	638	0.	0.	181, 134, 622, 670, 611, 540,
CQUAD4	696	6	625	626	640	639	0.	0.	182, 134, 544, 546, 545, 549,
CQUAD4	697	6	626	627	641	640	0.	0.	183, 134, 544, 539, 543, 541,
CQUAD4	698	6	627	628	642	641	0.	0.	184, 134, 538, 722, 1323, 1317,
CQUAD4	699	6	628	629	643	642	0.	0.	185, 134, 538, 537, 536, 723,
CQUAD4	700	6	629	630	644	643	0.	0.	186, 134, 538, 536, 1314, 1316,
CQUAD4	701	6	645	646	660	659	0.	0.	187, 134, 538, 723, 535, 722,
CQUAD4	702	6	646	647	661	660	0.	0.	188, 134, 538, 722, 534, 723,
CQUAD4	703	6	647	648	662	661	0.	0.	189, 134, 533, 1703, 532, 531,
CQUAD4	704	6	648	649	663	662	0.	0.	190, 134, 533, 530, 529, 528,
CQUAD4	705	6	649	650	664	663	0.	0.	191, 134, 533, 527, 1692, 1701,
CQUAD4	706	6	650	651	665	664	0.	0.	192, 134, 526, 529, 531, 527,
CQUAD4	707	6	651	652	666	665	0.	0.	193, 134, 529, 531, 527, 533,
CQUAD4	708	6	652	653	667	666	0.	0.	194, 134, 533, 1701, 531, 527,
CQUAD4	709	6	653	654	668	667	0.	0.	195, 134, 525, 561, 1714, 606,
CQUAD4	710	6	654	655	669	668	0.	0.	196, 134, 525, 561, 1716, 1714,
CQUAD4	711	6	655	656	670	669	0.	0.	197, 134, 525, 524, 523, 522,
CQUAD4	712	6	656	657	671	670	0.	0.	198, 134, 525, 523, 1716, 561,
CQUAD4	713	6	657	658	672	671	0.	0.	199, 134, 525, 521, 523, 524,
CQUAD4	714	6	659	660	674	673	0.	0.	200, 134, 525, 523, 521, 1725,
CQUAD4	715	6	660	661	675	674	0.	0.	201, 134, 520, 675, 937, 519,
CQUAD4	716	6	661	662	676	675	0.	0.	202, 134, 520, 678, 675, 518,
CQUAD4	717	6	662	663	677	676	0.	0.	203, 134, 1356, 676, 938, 520,
CQUAD4	718	6	663	664	678	677	0.	0.	204, 134, 520, 678, 518, 566,
CQUAD4	719	6	664	665	679	678	0.	0.	205, 134, 520, 1356, 676, 678,
CQUAD4	720	6	665	666	680	679	0.	0.	206, 134, 517, 516, 515, 1344,
CQUAD4	721	6	666	667	681	680	0.	0.	207, 134, 514, 531, 529, 533,
CQUAD4	722	6	667	668	682	681	0.	0.	208, 134, 517, 935, 515, 516,
CQUAD4	723	6	668	669	683	682	0.	0.	209, 134, 517, 531, 513, 526,
CQUAD4	724	6	669	670	684	683	0.	0.	210, 134, 517, 516, 513, 531,
CQUAD4	725	6	670	671	685	684	0.	0.	211, 134, 512, 511, 1675, 1672,
CQUAD4	726	6	671	672	686	685	0.	0.	212, 134, 512, 1675, 510, 509,

CQUAD4	727	6	673	674	688	687	0.	0.	213, 134, 512, 509, 508, 507,
CQUAD4	728	6	674	675	689	688	0.	0.	214, 134, 512, 506, 510, 927,
CQUAD4	729	6	675	676	690	689	0.	0.	215, 134, 512, 505, 1309, 506,
CQUAD4	730	6	676	677	691	690	0.	0.	216, 134, 670, 1000, 504, 999,
CQUAD4	731	6	677	678	692	691	0.	0.	217, 134, 503, 502, 1707, 516,
CQUAD4	732	6	678	679	693	692	0.	0.	218, 134, 670, 1184, 1196, 999,
CQUAD4	733	6	679	680	694	693	0.	0.	219, 134, 516, 1341, 513, 1342,
CQUAD4	734	6	680	681	695	694	0.	0.	220, 134, 934, 935, 515, 517,
CQUAD4	735	6	681	682	696	695	0.	0.	221, 134, 517, 1340, 529, 1341,
CQUAD4	736	6	682	683	697	696	0.	0.	222, 134, 517, 532, 516, 531,
CQUAD4	737	6	683	684	698	697	0.	0.	223, 134, 531, 516, 1704, 532,
CQUAD4	738	6	684	685	699	698	0.	0.	224, 134, 501, 500, 1066, 1073,
CQUAD4	739	6	685	686	700	699	0.	0.	225, 134, 501, 499, 498, 814,
CQUAD4	740	6	687	688	702	701	0.	0.	226, 134, 501, 1066, 497, 1067,
CQUAD4	741	6	688	689	703	702	0.	0.	227, 134, 501, 496, 499, 495,
CQUAD4	742	6	689	690	704	703	0.	0.	228, 134, 501, 499, 497, 495,
CQUAD4	743	6	690	691	705	704	0.	0.	229, 134, 494, 493, 1387, 541,
CQUAD4	744	6	691	692	706	705	0.	0.	230, 134, 492, 491, 822, 490,
CQUAD4	745	6	692	693	707	706	0.	0.	231, 134, 494, 490, 492, 489,
CQUAD4	746	6	693	694	708	707	0.	0.	232, 134, 490, 491, 822, 821,
CQUAD4	747	6	694	695	709	708	0.	0.	233, 134, 494, 492, 491, 488,
CQUAD4	748	6	695	696	710	709	0.	0.	234, 134, 494, 491, 541, 488,
CQUAD4	749	6	696	697	711	710	0.	0.	235, 134, 668, 681, 487, 667,
CQUAD4	750	6	697	698	712	711	0.	0.	236, 134, 666, 667, 668, 486,
CQUAD4	751	6	698	699	713	712	0.	0.	237, 134, 666, 681, 665, 668,
CQUAD4	752	6	699	700	714	713	0.	0.	238, 134, 736, 668, 1576, 682,
CQUAD4	753	6	715	716	730	729	0.	0.	239, 134, 666, 485, 1212, 1219,
CQUAD4	754	6	716	717	731	730	0.	0.	240, 134, 1219, 666, 681, 1213,
CQUAD4	755	6	717	718	732	731	0.	0.	241, 134, 666, 1211, 484, 733,
CQUAD4	756	6	718	719	733	732	0.	0.	242, 134, 666, 1210, 484, 1211,
CQUAD4	757	6	719	720	734	733	0.	0.	243, 134, 483, 482, 1377, 884,
CQUAD4	758	6	720	721	735	734	0.	0.	.
CQUAD4	759	6	721	722	736	735	0.	0.	.
CQUAD4	760	6	722	723	737	736	0.	0.	.
CQUAD4	761	6	723	724	738	737	0.	0.	23587, 134, 5892, 6036, 6034, 6040,
CQUAD4	762	6	724	725	739	738	0.	0.	23588, 134, 5896, 5915, 5893, 5895,
CQUAD4	763	6	725	726	740	739	0.	0.	23589, 134, 5862, 5899, 6031, 6053,
CQUAD4	764	6	726	727	741	740	0.	0.	23590, 134, 6023, 6083, 6084, 6059,
CQUAD4	765	6	727	728	742	741	0.	0.	23591, 134, 5862, 6021, 6031, 5899,
CQUAD4	766	6	729	730	744	743	0.	0.	NO PRINT
CQUAD4	767	6	730	731	745	744	0.	0.	COORDINATES
CQUAD4	768	6	731	732	746	745	0.	0.	3, 6084, 5, 0,
CQUAD4	769	6	732	733	747	746	0.	0.	1, 16.6560, -60.5805, -7.99944,
CQUAD4	770	6	733	734	748	747	0.	0.	2, 13.3231, -62.3209, -3.99966,
CQUAD4	771	6	734	735	749	748	0.	0.	3, 86.6681, -52.3202, -3.99952,
CQUAD4	772	6	735	736	750	749	0.	0.	4, 13.3231, -67.3219, -3.99966,
CQUAD4	773	6	736	737	751	750	0.	0.	5, 73.3501, -47.2434, -7.99178,
CQUAD4	774	6	737	738	752	751	0.	0.	6, 86.7242, -27.4048, -4.02999,
CQUAD4	775	6	738	739	753	752	0.	0.	7, 78.3337, -58.0563, -7.99942,
CQUAD4	776	6	739	740	754	753	0.	0.	.
CQUAD4	777	6	740	741	755	754	0.	0.	.
CQUAD4	778	6	741	742	756	755	0.	0.	.
CQUAD4	779	6	743	744	758	757	0.	0.	6079, 53.6281, -46.1544, -23.0000,
CQUAD4	780	6	744	745	759	758	0.	0.	6080, 55.6599, -48.1864, -23.0000,
CQUAD4	781	6	745	746	760	759	0.	0.	6081, 56.9358, -54.5023, -23.0000,
CQUAD4	782	6	746	747	761	760	0.	0.	6082, 54.6477, -56.5350, -23.0000,
CQUAD4	783	6	747	748	762	761	0.	0.	6083, 56.9358, -54.5023, -34.1200,
CQUAD4	784	6	748	749	763	762	0.	0.	6084, 54.6477, -56.5350, -34.1200,
CQUAD4	785	6	749	750	764	763	0.	0.	ORIENTATION
CQUAD4	786	6	750	751	765	764	0.	0.	\$Orientation from element region named "Plate1"
CQUAD4	787	6	751	752	766	765	0.	0.	3D ANISO , 0., 1.00000, 0., 0., 0.,
CQUAD4	788	6	752	753	767	766	0.	0.	1.00000, 0.,
CQUAD4	789	6	753	754	768	767	0.	0.	1 TO 7207
CQUAD4	790	6	754	755	769	768	0.	0.	\$Orientation from element region named "Plate2"
CQUAD4	791	6	755	756	770	769	0.	0.	3D ANISO , 0., 1.00000, 0., 0., 0.,
CQUAD4	792	6	771	772	786	785	0.	0.	1.00000, 0.,
CQUAD4	793	6	772	773	787	786	0.	0.	

CQUAD4	794	6	773	774	788	787	0.	0.	7208 TO 12340
CQUAD4	795	6	774	775	789	788	0.	0.	\$Orientation from element region named "Shim"
CQUAD4	796	6	775	776	790	789	0.	0.	3D ANISO , 0., 1.00000, 0., 0., 0.,
CQUAD4	797	6	776	777	791	790	0.	0.	1.00000, 0.,
CQUAD4	798	6	777	778	792	791	0.	0.	12341 TO 14801
CQUAD4	799	6	778	779	793	792	0.	0.	\$Orientation from element region named "Bolt"
CQUAD4	800	6	779	780	794	793	0.	0.	3D ANISO , 0., 1.00000, 0., 0., 0.,
CQUAD4	801	6	780	781	795	794	0.	0.	1.00000, 0.,
CQUAD4	802	6	781	782	796	795	0.	0.	14802 TO 23591
CQUAD4	803	6	782	783	797	796	0.	0.	ISOTROPIC
CQUAD4	804	6	783	784	798	797	0.	0.	
CQUAD4	805	6	799	800	814	813	0.	0.	\$Isotropic from material named "Al"
CQUAD4	806	6	800	801	815	814	0.	0.	1, , , 0, 0, 0, 0,Al , , ,
CQUAD4	807	6	801	802	816	815	0.	0.	2900.00, 0.330000, 7100.00, 0., 0., 0.,
CQUAD4	808	6	802	803	817	816	0.	0.	0., 0.,
CQUAD4	809	6	803	804	818	817	0.	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0,
CQUAD4	810	6	804	805	819	818	0.	0.	1 TO 12340
CQUAD4	811	6	805	806	820	819	0.	0.	\$Isotropic from material named "St"
CQUAD4	812	6	806	807	821	820	0.	0.	2, , , 0, 0, 0, 0,St , , ,
CQUAD4	813	6	807	808	822	821	0.	0.	19500.0, 0.280000, 7900.00, 0., 0., 0.,
CQUAD4	814	6	808	809	823	822	0.	0.	0., 0.,
CQUAD4	815	6	809	810	824	823	0.	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0,
CQUAD4	816	6	810	811	825	824	0.	0.	12341 TO 23591
CQUAD4	817	6	811	812	826	825	0.	0.	FIXED DISP
\$ Elements and Element Properties for region : UX									
CELAS2	818	1.+6	713	1	786	1	0.	0.	1, 0, 0, 0, 0, 0,123456
CELAS2	819	1.+6	787	1	712	1	0.	0.	0., 0., 0.,
CELAS2	820	1.+6	788	1	711	1	0.	0.	0, 0, 0,
CELAS2	821	1.+6	789	1	710	1	0.	0.	1, 2, 3,
CELAS2	822	1.+6	790	1	709	1	0.	0.	2,
CELAS2	823	1.+6	791	1	708	1	0.	0.	n_6_1 ,
CELAS2	824	1.+6	792	1	707	1	0.	0.	1, 0, 0, 0, 0, 0,1
CELAS2	825	1.+6	793	1	706	1	0.	0.	0.,
CELAS2	826	1.+6	794	1	705	1	0.	0.	0,
CELAS2	827	1.+6	795	1	704	1	0.	0.	1,
CELAS2	828	1.+6	796	1	703	1	0.	0.	2,
CELAS2	829	1.+6	797	1	702	1	0.	0.	n_7_1 ,
CELAS2	830	1.+6	798	1	701	1	0.	0.	POINT LOAD
CELAS2	831	1.+6	771	1	757	1	0.	0.	
CELAS2	832	1.+6	772	1	758	1	0.	0.	1, 0, 0, 0, 0, 0,4000daN
CELAS2	833	1.+6	773	1	759	1	0.	0.	0., 105.263, 0., 0., 0., 0.,
CELAS2	834	1.+6	774	1	760	1	0.	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0,
CELAS2	835	1.+6	775	1	761	1	0.	0.	2,
CELAS2	836	1.+6	776	1	762	1	0.	0.	n_8_1 ,
CELAS2	837	1.+6	777	1	763	1	0.	0.	LOADCASE ,Default
CELAS2	838	1.+6	778	1	764	1	0.	0.	2,
CELAS2	839	1.+6	779	1	765	1	0.	0.	123456 , 1,
CELAS2	840	1.+6	780	1	766	1	0.	0.	1 , 1,
CELAS2	841	1.+6	781	1	767	1	0.	0.	DEFINE, NODE, SET, n_6_1,
CELAS2	842	1.+6	782	1	768	1	0.	0.	2212 2214 2216 2218 2220 2222 2224 2226 2230 2332 2334
CELAS2	843	1.+6	783	1	769	1	0.	0.	2336 2338 2340 2342 C
CELAS2	844	1.+6	784	1	770	1	0.	0.	2344 2346 2348 2350
CELAS2	845	1.+6	466	1	647	1	0.	0.	DEFINE, NODE, SET, n_7_1,
CELAS2	846	1.+6	467	1	646	1	0.	0.	743 761 866 884 3165 3168 3245 3248
CELAS2	847	1.+6	645	1	111	1	0.	0.	DEFINE, NODE, SET, n_8_1,
CELAS2	848	1.+6	421	1	726	1	0.	0.	806 TO 824 926 TO 944
CELAS2	849	1.+6	422	1	727	1	0.	0.	CONTACT
CELAS2	850	1.+6	423	1	728	1	0.	0.	5, 0,1000, 0, 1,9999, 3, , 0, 0, 0, 4, 0,
CELAS2	851	1.+6	799	1	631	1	0.	0.	1,
CELAS2	852	1.+6	800	1	632	1	0.	0.	0., 0., , , 0., 0.950000, 1.05000,
CELAS2	853	1.+6	801	1	633	1	0.	0.	0.050000,
CELAS2	854	1.+6	802	1	634	1	0.	0.	1, 0, 0, , , , 2,Bolt ,
CELAS2	855	1.+6	803	1	635	1	0.	0.	, , , , , , ,
CELAS2	856	1.+6	804	1	636	1	0.	0.	, , , , , , ,
CELAS2	857	1.+6	805	1	637	1	0.	0.	0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,
CELAS2	858	1.+6	806	1	638	1	0.	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
CELAS2	859	1.+6	807	1	639	1	0.	0.	14802,14803,14804,14805,14806,14807,14808,14809,14810,

CELAS2	860	1.+6	808	1	640	1	0.	0.	14811,14812,14813,14814,14815,14816, C					
CELAS2	861	1.+6	809	1	641	1	0.	0.	14817,14818,14819,14820,14821,14822,14823,14824,14825, C					
CELAS2	862	1.+6	810	1	642	1	0.	0.	14826,14827,14828,14829,14830,14831, C					
CELAS2	863	1.+6	811	1	643	1	0.	0.	14832,14833,14834,14835,14836,14837,14838,14839,14840, C					
CELAS2	864	1.+6	812	1	644	1	0.	0.	14841,14842,14843,14844,14845,14846, C					
CELAS2	865	1.+6	826	1	574	1	0.	0.	14847,14848,14849,14850,14851,14852,14853,14854,14855, C					
CELAS2	866	1.+6	825	1	573	1	0.	0.	14856,14857,14858,14859,14860,14861, C					
CELAS2	867	1.+6	824	1	572	1	0.	0.	14862,14863,14864,14865,14866,14867,14868,14869,14870, C					
CELAS2	868	1.+6	823	1	571	1	0.	0.	14871,14872,14873,14874,14875,14876, C					
CELAS2	869	1.+6	822	1	570	1	0.	0.	14877,14878,14879,14880,14881,14882,14883,14884,14885, C					
CELAS2	870	1.+6	821	1	569	1	0.	0.	14886,14887,14888,14889,14890,14891, C					
CELAS2	871	1.+6	820	1	568	1	0.	0.	14892,14893,14894,14895,14896,14897,14898,14899,14900, C					
CELAS2	872	1.+6	819	1	567	1	0.	0.	14901,14902,14903,14904,14905,14906, C					
CELAS2	873	1.+6	818	1	566	1	0.	0.	14907,14908,14909,14910,14911,14912,14913,14914,14915, C					
CELAS2	874	1.+6	817	1	565	1	0.	0.	14916,14917,14918,14919,14920,14921, C					
CELAS2	875	1.+6	816	1	564	1	0.	0.	14922,14923,14924,14925,14926,14927,14928,14929,14930, C					
CELAS2	876	1.+6	815	1	563	1	0.	0.	14931,14932,14933,14934,14935,14936, C					
CELAS2	877	1.+6	814	1	562	1	0.	0.	14937,14938,14939,14940,14941,14942,14943,14944,14945, C					
CELAS2	878	1.+6	813	1	561	1	0.	0.	14946,14947,14948,14949,14950,14951, C					
CELAS2	879	1.+6	474	1	577	1	0.	0.	14952,14953,14954,14955,14956,14957,14958,14959,14960, C					
CELAS2	880	1.+6	473	1	576	1	0.	0.	14961,14962,14963,14964,14965,14966, C					
CELAS2	881	1.+6	472	1	575	1	0.	0.	14967,14968,14969,14970,14971,14972,14973,14974,14975, C					
CELAS2	882	1.+6	429	1	521	1	0.	0.	14976,14977,14978,14979,14980,14981, C					
CELAS2	883	1.+6	428	1	520	1	0.	0.	14982,14983,14984,14985,14986,14987,14988,14989,14990, C					
CELAS2	884	1.+6	427	1	519	1	0.	0.	14991,14992,14993,14994,14995,14996, C					
\$ Elements and Element Properties for region : UY														
CELAS2	885	1.+6	427	2	519	2	0.	0.	14997,14998,14999,15000,15001,15002,15003,15004,15005, C					
CELAS2	886	1.+6	482	2	533	2	0.	0.	15006,15007,15008,15009,15010,15011, C					
CELAS2	887	1.+6	481	2	547	2	0.	0.	15012,15013,15014,15015,15016,15017,15018,15019,15020, C					
CELAS2	888	1.+6	480	2	561	2	0.	0.	15021,15022,15023,15024,15025,15026, C					
CELAS2	889	1.+6	479	2	631	2	0.	0.	15027,15028,15029,15030,15031,15032,15033,15034,15035, C					
CELAS2	890	1.+6	478	2	617	2	0.	0.	15036,15037,15038,15039,15040,15041, C					
CELAS2	891	1.+6	477	2	603	2	0.	0.	15042,15043,15044,15045,15046,15047,15048,15049,15050, C					
CELAS2	892	1.+6	476	2	589	2	0.	0.	15051,15052,15053,15054,15055,15056, C					
CELAS2	893	1.+6	472	2	575	2	0.	0.	15057,15058,15059,15060,15061,15062,15063,15064,15065, C					
CELAS2	894	1.+6	111	2	645	2	0.	0.	15066,15067,15068,15069,15070,15071, C					
CELAS2	895	1.+6	512	2	659	2	0.	0.	15072,15073,15074,15075,15076,15077,15078,15079,15080, C					
CELAS2	896	1.+6	513	2	673	2	0.	0.	15081,15082,15083,15084,15085,15086, C					
CELAS2	897	1.+6	514	2	687	2	0.	0.	15087,15088,15089,15090,15091,15092,15093,15094,15095, C					
CELAS2	898	1.+6	515	2	701	2	0.	0.	15096,15097,15098,15099,15100,15101, C					
CELAS2	899	1.+6	516	2	770	2	0.	0.	15102,15103,15104,15105,15106,15107,15108,15109,15110, C					
CELAS2	900	1.+6	517	2	756	2	0.	0.	15111,15112,15113,15114,15115,15116, C					
CELAS2	901	1.+6	518	2	742	2	0.	0.	15117,15118,15119,15120,15121,15122,15123,15124,15125, C					
CELAS2	902	1.+6	423	2	728	2	0.	0.	15126,15127,15128,15129,15130,15131, C					
\$ Referenced Material Records														
\$ Material Record : St														
\$ Description of Material :														
MAT1	4	19996.	7574.	.32										
\$ Material Record : Al														
\$ Description of Material :														
MAT1	5	7102.	2670.	.33										
\$ Multipoint Constraints of Group : Conf1														
RBE2	292	715	12	532										
RBE2	293	729	12	546										
RBE2	294	743	12	560										
RBE2	295	757	12	574										
RBE2	296	644	12	714										
RBE2	297	630	12	700										
RBE2	298	616	12	686										
RBE2	299	602	12	672										
RBE2	300	588	12	658										
\$ Nodes of Group : Conf1														
GRID	111	0.	0.	0.										
GRID	385	33.	4.825	0.										
GRID	386	33.	2.23125	0.										
GRID	387	33.	-3.625	0.										
GRID	388	33.	-2.95625	0.										

GRID 389	33.	-5.55	0.	15312,15313,15314,15315,15316,15317,15318,15319,15320,
GRID 390	33.	-8.14375	0.	15321,15322,15323,15324,15325,15326, C
GRID 391	33.	-10.7375	0.	15327,15328,15329,15330,15331,15332,15333,15334,15335,
GRID 392	33.	-13.3313	0.	15336,15337,15338,15339,15340,15341, C
GRID 393	33.	-15.925	0.	15342,15343,15344,15345,15346,15347,15348,15349,15350,
GRID 394	30.5	4.825	0.	15351,15352,15353,15354,15355,15356, C
GRID 395	30.5	2.23125	0.	15357,15358,15359,15360,15361,15362,15363,15364,15365,
GRID 396	30.5	-.3625	0.	15366,15367,15368,15369,15370,15371, C
GRID 397	30.5	-2.95625	0.	15372,15373,15374,15375,15376,15377,15378,15379,15380,
GRID 398	30.5	-5.55	0.	15381,15382,15383,15384,15385,15386, C
GRID 399	30.5	-8.14375	0.	15387,15388,15389,15390,15391,15392,15393,15394,15395,
GRID 400	30.5	-10.7375	0.	15396,15397,15398,15399,15400,15401, C
GRID 401	30.5	-13.3313	0.	15402,15403,15404,15405,15406,15407,15408,15409,15410,
GRID 402	30.5	-15.925	0.	15411,15412,15413,15414,15415,15416, C
GRID 403	28.	4.825	0.	15417,15418,15419,15420,15421,15422,15423,15424,15425,
GRID 404	28.	2.23125	0.	15426,15427,15428,15429,15430,15431, C
GRID 405	28.	-.3625	0.	15432,15433,15434,15435,15436,15437,15438,15439,15440,
GRID 406	28.	-2.95625	0.	15441,15442,15443,15444,15445,15446, C
GRID 407	28.	-5.55	0.	15447,15448,15449,15450,15451,15452,15453,15454,15455,
GRID 408	28.	-8.14375	0.	15456,15457,15458,15459,15460,15461, C
GRID 409	28.	-10.7375	0.	15462,15463,15464,15465,15466,15467,15468,15469,15470,
GRID 410	28.	-13.3313	0.	15471,15472,15473,15474,15475,15476, C
GRID 411	28.	-15.925	0.	15477,15478,15479,15480,15481,15482,15483,15484,15485,
GRID 412	25.5	4.825	0.	15486,15487,15488,15489,15490,15491, C
GRID 413	25.5	2.23125	0.	15492,15493,15494,15495,15496,15497,15498,15499,15500,
GRID 414	25.5	-.3625	0.	15501,15502,15503,15504,15505,15506, C
GRID 415	25.5	-2.95625	0.	15507,15508,15509,15510,15511,15512,15513,15514,15515,
GRID 416	25.5	-5.55	0.	15516,15517,15518,15519,15520,15521, C
GRID 417	25.5	-8.14375	0.	15522,15523,15524,15525,15526,15527,15528,15529,15530,
GRID 418	25.5	-10.7375	0.	15531,15532,15533,15534,15535,15536, C
GRID 419	25.5	-13.3313	0.	15537,15538,15539,15540,15541,15542,15543,15544,15545,
GRID 420	25.5	-15.925	0.	15546,15547,15548,15549,15550,15551, C
GRID 421	23.	4.825	0.	15552,15553,15554,15555,15556,15557,15558,15559,15560,
GRID 422	23.	2.23125	0.	15561,15562,15563,15564,15565,15566, C
GRID 423	23.	0.	0.	15567,15568,15569,15570,15571,15572,15573,15574,15575,
GRID 424	23.	-2.775	0.	15576,15577,15578,15579,15580,15581, C
GRID 425	23.	-5.55	0.	15582,15583,15584,15585,15586,15587,15588,15589,15590,
GRID 426	23.	-8.325	0.	15591,15592,15593,15594,15595,15596, C
GRID 427	23.	-11.1	0.	15597,15598,15599,15600,15601,15602,15603,15604,15605,
GRID 428	23.	-13.3313	0.	15606,15607,15608,15609,15610,15611, C
GRID 429	23.	-15.925	0.	15612,15613,15614,15615,15616,15617,15618,15619,15620,
GRID 430	-10.	4.825	0.	15621,15622,15623,15624,15625,15626, C
GRID 431	-10.	2.23125	0.	15627,15628,15629,15630,15631,15632,15633,15634,15635,
GRID 432	-10.	-.3625	0.	15636,15637,15638,15639,15640,15641, C
GRID 433	-10.	-2.95625	0.	.
GRID 434	-10.	-5.55	0.	.
GRID 435	-10.	-8.14375	0.	.
GRID 436	-10.	-10.7375	0.	22901,22902,22903,22904,22905,22906,22907,22908,22909,
GRID 437	-10.	-13.3313	0.	22910,22911,22912,22913,22914,22915, C
GRID 438	-10.	-15.925	0.	22916,22917,22918,22919,22920,22921,22922,22923,22924,
GRID 439	-7.5	4.825	0.	22925,22926,22927,22928,22929,22930, C
GRID 440	-7.5	2.23125	0.	22931,22932,22933,22934,22935,22936,22937,22938,22939,
GRID 441	-7.5	-.3625	0.	22940,22941,22942,22943,22944,22945, C
GRID 442	-7.5	-2.95625	0.	22946,22947,22948,22949,22950,22951,22952,22953,22954,
GRID 443	-7.5	-5.55	0.	22955,22956,22957,22958,22959,22960, C
GRID 444	-7.5	-8.14375	0.	22961,22962,22963,22964,22965,22966,22967,22968,22969,
GRID 445	-7.5	-10.7375	0.	22970,22971,22972,22973,22974,22975, C
GRID 446	-7.5	-13.3313	0.	22976,22977,22978,22979,22980,22981,22982,22983,22984,
GRID 447	-7.5	-15.925	0.	22985,22986,22987,22988,22989,22990, C
GRID 448	-5.	4.825	0.	22991,22992,22993,22994,22995,22996,22997,22998,22999,
GRID 449	-5.	2.23125	0.	23000,23001,23002,23003,23004,23005, C
GRID 450	-5.	-.3625	0.	23006,23007,23008,23009,23010,23011,23012,23013,23014,
GRID 451	-5.	-2.95625	0.	23015,23016,23017,23018,23019,23020, C
GRID 452	-5.	-5.55	0.	23021,23022,23023,23024,23025,23026,23027,23028,23029,
GRID 453	-5.	-8.14375	0.	23030,23031,23032,23033,23034,23035, C
GRID 454	-5.	-10.7375	0.	23036,23037,23038,23039,23040,23041,23042,23043,23044,
GRID 455	-5.	-13.3313	0.	23045,23046,23047,23048,23049,23050, C

GRID 456	-5.	-15.925	0.	23051,23052,23053,23054,23055,23056,23057,23058,23059,
GRID 457	-2.5	4.825	0.	23060,23061,23062,23063,23064,23065, C
GRID 458	-2.5	2.23125	0.	23066,23067,23068,23069,23070,23071,23072,23073,23074,
GRID 459	-2.5	-3.625	0.	23075,23076,23077,23078,23079,23080, C
GRID 460	-2.5	-2.95625	0.	23081,23082,23083,23084,23085,23086,23087,23088,23089,
GRID 461	-2.5	-5.55	0.	23090,23091,23092,23093,23094,23095, C
GRID 462	-2.5	-8.14375	0.	23096,23097,23098,23099,23100,23101,23102,23103,23104,
GRID 463	-2.5	-10.7375	0.	23105,23106,23107,23108,23109,23110, C
GRID 464	-2.5	-13.3313	0.	23111,23112,23113,23114,23115,23116,23117,23118,23119,
GRID 465	-2.5	-15.925	0.	23120,23121,23122,23123,23124,23125, C
GRID 466	0.	4.825	0.	23126,23127,23128,23129,23130,23131,23132,23133,23134,
GRID 467	0.	2.23125	0.	23135,23136,23137,23138,23139,23140, C
GRID 469	0.	-2.775	0.	23141,23142,23143,23144,23145,23146,23147,23148,23149,
GRID 470	0.	-5.55	0.	23150,23151,23152,23153,23154,23155, C
GRID 471	0.	-8.325	0.	23156,23157,23158,23159,23160,23161,23162,23163,23164,
GRID 472	0.	-11.1	0.	23165,23166,23167,23168,23169,23170, C
GRID 473	0.	-13.3313	0.	23171,23172,23173,23174,23175,23176,23177,23178,23179,
GRID 474	0.	-15.925	0.	23180,23181,23182,23183,23184,23185, C
GRID 476	2.875	-11.1	0.	23186,23187,23188,23189,23190,23191,23192,23193,23194,
GRID 477	5.75	-11.1	0.	23195,23196,23197,23198,23199,23200, C
GRID 478	8.625	-11.1	0.	23201,23202,23203,23204,23205,23206,23207,23208,23209,
GRID 479	11.5	-11.1	0.	23210,23211,23212,23213,23214,23215, C
GRID 480	14.375	-11.1	0.	23216,23217,23218,23219,23220,23221,23222,23223,23224,
GRID 481	17.25	-11.1	0.	23225,23226,23227,23228,23229,23230, C
GRID 482	20.125	-11.1	0.	23231,23232,23233,23234,23235,23236,23237,23238,23239,
GRID 485	2.875	-8.325	0.	23240,23241,23242,23243,23244,23245, C
GRID 486	5.75	-8.325	0.	23246,23247,23248,23249,23250,23251,23252,23253,23254,
GRID 487	8.625	-8.325	0.	23255,23256,23257,23258,23259,23260, C
GRID 488	11.5	-8.325	0.	23261,23262,23263,23264,23265,23266,23267,23268,23269,
GRID 489	14.375	-8.325	0.	23270,23271,23272,23273,23274,23275, C
GRID 490	17.25	-8.325	0.	23276,23277,23278,23279,23280,23281,23282,23283,23284,
GRID 491	20.125	-8.325	0.	23285,23286,23287,23288,23289,23290, C
GRID 494	2.875	-5.55	0.	23291,23292,23293,23294,23295,23296,23297,23298,23299,
GRID 495	5.75	-5.55	0.	23300,23301,23302,23303,23304,23305, C
GRID 496	8.625	-5.55	0.	23306,23307,23308,23309,23310,23311,23312,23313,23314,
GRID 497	11.5	-5.55	0.	23315,23316,23317,23318,23319,23320, C
GRID 498	14.375	-5.55	0.	23321,23322,23323,23324,23325,23326,23327,23328,23329,
GRID 499	17.25	-5.55	0.	23330,23331,23332,23333,23334,23335, C
GRID 500	20.125	-5.55	0.	23336,23337,23338,23339,23340,23341,23342,23343,23344,
GRID 503	2.875	-2.775	0.	23345,23346,23347,23348,23349,23350, C
GRID 504	5.75	-2.775	0.	23351,23352,23353,23354,23355,23356,23357,23358,23359,
GRID 505	8.625	-2.775	0.	23360,23361,23362,23363,23364,23365, C
GRID 506	11.5	-2.775	0.	23366,23367,23368,23369,23370,23371,23372,23373,23374,
GRID 507	14.375	-2.775	0.	23375,23376,23377,23378,23379,23380, C
GRID 508	17.25	-2.775	0.	23381,23382,23383,23384,23385,23386,23387,23388,23389,
GRID 509	20.125	-2.775	0.	23390,23391,23392,23393,23394,23395, C
GRID 512	2.875	0.	0.	23396,23397,23398,23399,23400,23401,23402,23403,23404,
GRID 513	5.75	0.	0.	23405,23406,23407,23408,23409,23410, C
GRID 514	8.625	0.	0.	23411,23412,23413,23414,23415,23416,23417,23418,23419,
GRID 515	11.5	0.	0.	23420,23421,23422,23423,23424,23425, C
GRID 516	14.375	0.	0.	23426,23427,23428,23429,23430,23431,23432,23433,23434,
GRID 517	17.25	0.	0.	23435,23436,23437,23438,23439,23440, C
GRID 518	20.125	0.	0.	23441,23442,23443,23444,23445,23446,23447,23448,23449,
GRID 519	23.	-11.1	0.	23450,23451,23452,23453,23454,23455, C
GRID 520	23.	-13.4077	0.	23456,23457,23458,23459,23460,23461,23462,23463,23464,
GRID 521	23.	-15.7154	0.	23465,23466,23467,23468,23469,23470, C
GRID 522	23.	-18.0231	0.	23471,23472,23473,23474,23475,23476,23477,23478,23479,
GRID 523	23.	-20.3308	0.	23480,23481,23482,23483,23484,23485, C
GRID 524	23.	-22.6385	0.	23486,23487,23488,23489,23490,23491,23492,23493,23494,
GRID 525	23.	-24.9462	0.	23495,23496,23497,23498,23499,23500, C
GRID 526	23.	-27.2539	0.	23501,23502,23503,23504,23505,23506,23507,23508,23509,
GRID 527	23.	-29.5615	0.	23510,23511,23512,23513,23514,23515, C
GRID 528	23.	-31.8692	0.	23516,23517,23518,23519,23520,23521,23522,23523,23524,
GRID 529	23.	-34.1769	0.	23525,23526,23527,23528,23529,23530, C
GRID 530	23.	-36.4846	0.	23531,23532,23533,23534,23535,23536,23537,23538,23539,
GRID 531	23.	-38.7923	0.	23540,23541,23542,23543,23544,23545, C
GRID 532	23.	-41.1	0.	23546,23547,23548,23549,23550,23551,23552,23553,23554,

GRID 533	20.	-11.1 0.	23555,23556,23557,23558,23559,23560, C
GRID 534	20.	-13.4077 0.	23561,23562,23563,23564,23565,23566,23567,23568,23569,
GRID 535	20.	-15.7154 0.	23570,23571,23572,23573,23574,23575, C
GRID 536	20.	-18.0231 0.	23576,23577,23578,23579,23580,23581,23582,23583,23584,
GRID 537	20.	-20.3308 0.	23585,23586,23587,23588,23589,23590, C
GRID 538	20.	-22.6385 0.	23591,
GRID 539	20.	-24.9462 0.	3, 0, 0, , , , , 2,Plate1 ,
GRID 540	20.	-27.2539 0.	, , , , , , , ,
GRID 541	20.	-29.5615 0.	, , , , , , , ,
GRID 542	20.	-31.8692 0.	0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,
GRID 543	20.	-34.1769 0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 544	20.	-36.4846 0.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,
GRID 545	20.	-38.7923 0.	14, 15, C
GRID 546	20.	-41.1 0.	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27,
GRID 547	17.	-11.1 0.	28, 29, 30, C
GRID 548	17.	-13.4077 0.	31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42,
GRID 549	17.	-15.7154 0.	43, 44, 45, C
GRID 550	17.	-18.0231 0.	46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
GRID 551	17.	-20.3308 0.	58, 59, 60, C
GRID 552	17.	-22.6385 0.	61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72,
GRID 553	17.	-24.9462 0.	73, 74, 75, C
GRID 554	17.	-27.2539 0.	76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87,
GRID 555	17.	-29.5615 0.	88, 89, 90, C
GRID 556	17.	-31.8692 0.	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102,
GRID 557	17.	-34.1769 0.	103, 104, 105, C
GRID 558	17.	-36.4846 0.	106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116,
GRID 559	17.	-38.7923 0.	117, 118, 119, 120, C
GRID 560	17.	-41.1 0.	121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131,
GRID 561	14.	-11.1 0.	132, 133, 134, 135, C
GRID 562	14.	-13.4077 0.	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146,
GRID 563	14.	-15.7154 0.	147, 148, 149, 150, C
GRID 564	14.	-18.0231 0.	151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161,
GRID 565	14.	-20.3308 0.	162, 163, 164, 165, C
GRID 566	14.	-22.6385 0.	166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176,
GRID 567	14.	-24.9462 0.	177, 178, 179, 180, C
GRID 568	14.	-27.2539 0.	181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191,
GRID 569	14.	-29.5615 0.	192, 193, 194, 195, C
GRID 570	14.	-31.8692 0.	.
GRID 571	14.	-34.1769 0.	.
GRID 572	14.	-36.4846 0.	.
GRID 573	14.	-38.7923 0.	13856,13857,13858,13859,13860,13861,13862,13863,13864,
GRID 574	14.	-41.1 0.	13865,13866,13867,13868,13869,13870, C
GRID 575	0.	-11.1 0.	13871,13872,13873,13874,13875,13876,13877,13878,13879,
GRID 576	0.	-13.4077 0.	13880,13881,13882,13883,13884,13885, C
GRID 577	0.	-15.7154 0.	13886,13887,13888,13889,13890,13891,13892,13893,13894,
GRID 578	0.	-18.0231 0.	13895,13896,13897,13898,13899,13900, C
GRID 579	0.	-20.3308 0.	13901,13902,13903,13904,13905,13906,13907,13908,13909,
GRID 580	0.	-22.6385 0.	13910,13911,13912,13913,13914,13915, C
GRID 581	0.	-24.9462 0.	13916,13917,13918,13919,13920,13921,13922,13923,13924,
GRID 582	0.	-27.2539 0.	13925,13926,13927,13928,13929,13930, C
GRID 583	0.	-29.5615 0.	13931,13932,13933,13934,13935,13936,13937,13938,13939,
GRID 584	0.	-31.8692 0.	13940,13941,13942,13943,13944,13945, C
GRID 585	0.	-34.1769 0.	13946,13947,13948,13949,13950,13951,13952,13953,13954,
GRID 586	0.	-36.4846 0.	13955,13956,13957,13958,13959,13960, C
GRID 587	0.	-38.7923 0.	13961,13962,13963,13964,13965,13966,13967,13968,13969,
GRID 588	0.	-41.1 0.	13970,13971,13972,13973,13974,13975, C
GRID 589	3.	-11.1 0.	13976,13977,13978,13979,13980,13981,13982,13983,13984,
GRID 590	3.	-13.4077 0.	13985,13986,13987,13988,13989,13990, C
GRID 591	3.	-15.7154 0.	13991,13992,13993,13994,13995,13996,13997,13998,13999,
GRID 592	3.	-18.0231 0.	14000,14001,14002,14003,14004,14005, C
GRID 593	3.	-20.3308 0.	14006,14007,14008,14009,14010,14011,14012,14013,14014,
GRID 594	3.	-22.6385 0.	14015,14016,14017,14018,14019,14020, C
GRID 595	3.	-24.9462 0.	14021,14022,14023,14024,14025,14026,14027,14028,14029,
GRID 596	3.	-27.2539 0.	14030,14031,14032,14033,14034,14035, C
GRID 597	3.	-29.5615 0.	14036,14037,14038,14039,14040,14041,14042,14043,14044,
GRID 598	3.	-31.8692 0.	14045,14046,14047,14048,14049,14050, C
GRID 599	3.	-34.1769 0.	14051,14052,14053,14054,14055,14056,14057,14058,14059,

GRID 600	3.	-36.4846 0.	14060,14061,14062,14063,14064,14065, C
GRID 601	3.	-38.7923 0.	14066,14067,14068,14069,14070,14071,14072,14073,14074,
GRID 602	3.	-41.1 0.	14075,14076,14077,14078,14079,14080, C
GRID 603	6.	-11.1 0.	14081,14082,14083,14084,14085,14086,14087,14088,14089,
GRID 604	6.	-13.4077 0.	14090,14091,14092,14093,14094,14095, C
GRID 605	6.	-15.7154 0.	14096,14097,14098,14099,14100,14101,14102,14103,14104,
GRID 606	6.	-18.0231 0.	14105,14106,14107,14108,14109,14110, C
GRID 607	6.	-20.3308 0.	14111,14112,14113,14114,14115,14116,14117,14118,14119,
GRID 608	6.	-22.6385 0.	14120,14121,14122,14123,14124,14125, C
GRID 609	6.	-24.9462 0.	14126,14127,14128,14129,14130,14131,14132,14133,14134,
GRID 610	6.	-27.2539 0.	14135,14136,14137,14138,14139,14140, C
GRID 611	6.	-29.5615 0.	14141,14142,14143,14144,14145,14146,14147,14148,14149,
GRID 612	6.	-31.8692 0.	14150,14151,14152,14153,14154,14155, C
GRID 613	6.	-34.1769 0.	14156,14157,14158,14159,14160,14161,14162,14163,14164,
GRID 614	6.	-36.4846 0.	14165,14166,14167,14168,14169,14170, C
GRID 615	6.	-38.7923 0.	14171,14172,14173,14174,14175,14176,14177,14178,14179,
GRID 616	6.	-41.1 0.	14180,14181,14182,14183,14184,14185, C
GRID 617	9.	-11.1 0.	14186,14187,14188,14189,14190,14191,14192,14193,14194,
GRID 618	9.	-13.4077 0.	14195,14196,14197,14198,14199,14200, C
GRID 619	9.	-15.7154 0.	14201,14202,14203,14204,14205,14206,14207,14208,14209,
GRID 620	9.	-18.0231 0.	14210,14211,14212,14213,14214,14215, C
GRID 621	9.	-20.3308 0.	14216,14217,14218,14219,14220,14221,14222,14223,14224,
GRID 622	9.	-22.6385 0.	14225,14226,14227,14228,14229,14230, C
GRID 623	9.	-24.9462 0.	14231,14232,14233,14234,14235,14236,14237,14238,14239,
GRID 624	9.	-27.2539 0.	14240,14241,14242,14243,14244,14245, C
GRID 625	9.	-29.5615 0.	14246,14247,14248,14249,14250,14251,14252,14253,14254,
GRID 626	9.	-31.8692 0.	14255,14256,14257,14258,14259,14260, C
GRID 627	9.	-34.1769 0.	14261,14262,14263,14264,14265,14266,14267,14268,14269,
GRID 628	9.	-36.4846 0.	14270,14271,14272,14273,14274,14275, C
GRID 629	9.	-38.7923 0.	14276,14277,14278,14279,14280,14281,14282,14283,14284,
GRID 630	9.	-41.1 0.	14285,14286,14287,14288,14289,14290, C
GRID 631	12.	-11.1 0.	14291,14292,14293,14294,14295,14296,14297,14298,14299,
GRID 632	12.	-13.4077 0.	14300,14301,14302,14303,14304,14305, C
GRID 633	12.	-15.7154 0.	14306,14307,14308,14309,14310,14311,14312,14313,14314,
GRID 634	12.	-18.0231 0.	14315,14316,14317,14318,14319,14320, C
GRID 635	12.	-20.3308 0.	14321,14322,14323,14324,14325,14326,14327,14328,14329,
GRID 636	12.	-22.6385 0.	14330,14331,14332,14333,14334,14335, C
GRID 637	12.	-24.9462 0.	14336,14337,14338,14339,14340,14341,14342,14343,14344,
GRID 638	12.	-27.2539 0.	14345,14346,14347,14348,14349,14350, C
GRID 639	12.	-29.5615 0.	14351,14352,14353,14354,14355,14356,14357,14358,14359,
GRID 640	12.	-31.8692 0.	14360,14361,14362,14363,14364,14365, C
GRID 641	12.	-34.1769 0.	14366,14367,14368,14369,14370,14371,14372,14373,14374,
GRID 642	12.	-36.4846 0.	14375,14376,14377,14378,14379,14380, C
GRID 643	12.	-38.7923 0.	14381,14382,14383,14384,14385,14386,14387,14388,14389,
GRID 644	12.	-41.1 0.	14390,14391,14392,14393,14394,14395, C
GRID 645	0.	0. 0.	14396,14397,14398,14399,14400,14401,14402,14403,14404,
GRID 646	0.	2.30769 0.	14405,14406,14407,14408,14409,14410, C
GRID 647	0.	4.61539 0.	14411,14412,14413,14414,14415,14416,14417,14418,14419,
GRID 648	0.	6.92308 0.	14420,14421,14422,14423,14424,14425, C
GRID 649	0.	9.23077 0.	14426,14427,14428,14429,14430,14431,14432,14433,14434,
GRID 650	0.	11.5385 0.	14435,14436,14437,14438,14439,14440, C
GRID 651	0.	13.8462 0.	14441,14442,14443,14444,14445,14446,14447,14448,14449,
GRID 652	0.	16.1539 0.	14450,14451,14452,14453,14454,14455, C
GRID 653	0.	18.4615 0.	14456,14457,14458,14459,14460,14461,14462,14463,14464,
GRID 654	0.	20.7692 0.	14465,14466,14467,14468,14469,14470, C
GRID 655	0.	23.0769 0.	14471,14472,14473,14474,14475,14476,14477,14478,14479,
GRID 656	0.	25.3846 0.	14480,14481,14482,14483,14484,14485, C
GRID 657	0.	27.6923 0.	14486,14487,14488,14489,14490,14491,14492,14493,14494,
GRID 658	0.	30. 0.	14495,14496,14497,14498,14499,14500, C
GRID 659	3.	0. 0.	14501,14502,14503,14504,14505,14506,14507,14508,14509,
GRID 660	3.	2.30769 0.	14510,14511,14512,14513,14514,14515, C
GRID 661	3.	4.61539 0.	14516,14517,14518,14519,14520,14521,14522,14523,14524,
GRID 662	3.	6.92308 0.	14525,14526,14527,14528,14529,14530, C
GRID 663	3.	9.23077 0.	14531,14532,14533,14534,14535,14536,14537,14538,14539,
GRID 664	3.	11.5385 0.	14540,14541,14542,14543,14544,14545, C
GRID 665	3.	13.8462 0.	14546,14547,14548,14549,14550,14551,14552,14553,14554,
GRID 666	3.	16.1539 0.	14555,14556,14557,14558,14559,14560, C

GRID 667	3.	18.4615	0.	14561,14562,14563,14564,14565,14566,14567,14568,14569,
GRID 668	3.	20.7692	0.	14570,14571,14572,14573,14574,14575, C
GRID 669	3.	23.0769	0.	14576,14577,14578,14579,14580,14581,14582,14583,14584,
GRID 670	3.	25.3846	0.	14585,14586,14587,14588,14589,14590, C
GRID 671	3.	27.6923	0.	14591,14592,14593,14594,14595,14596,14597,14598,14599,
GRID 672	3.	30.	0.	14600,14601,14602,14603,14604,14605, C
GRID 673	6.	0.	0.	14606,14607,14608,14609,14610,14611,14612,14613,14614,
GRID 674	6.	2.30769	0.	14615,14616,14617,14618,14619,14620, C
GRID 675	6.	4.61539	0.	14621,14622,14623,14624,14625,14626,14627,14628,14629,
GRID 676	6.	6.92308	0.	14630,14631,14632,14633,14634,14635, C
GRID 677	6.	9.23077	0.	14636,14637,14638,14639,14640,14641,14642,14643,14644,
GRID 678	6.	11.5385	0.	14645,14646,14647,14648,14649,14650, C
GRID 679	6.	13.8462	0.	14651,14652,14653,14654,14655,14656,14657,14658,14659,
GRID 680	6.	16.1539	0.	14660,14661,14662,14663,14664,14665, C
GRID 681	6.	18.4615	0.	14666,14667,14668,14669,14670,14671,14672,14673,14674,
GRID 682	6.	20.7692	0.	14675,14676,14677,14678,14679,14680, C
GRID 683	6.	23.0769	0.	14681,14682,14683,14684,14685,14686,14687,14688,14689,
GRID 684	6.	25.3846	0.	14690,14691,14692,14693,14694,14695, C
GRID 685	6.	27.6923	0.	14696,14697,14698,14699,14700,14701,14702,14703,14704,
GRID 686	6.	30.	0.	14705,14706,14707,14708,14709,14710, C
GRID 687	9.	0.	0.	14711,14712,14713,14714,14715,14716,14717,14718,14719,
GRID 688	9.	2.30769	0.	14720,14721,14722,14723,14724,14725, C
GRID 689	9.	4.61539	0.	14726,14727,14728,14729,14730,14731,14732,14733,14734,
GRID 690	9.	6.92308	0.	14735,14736,14737,14738,14739,14740, C
GRID 691	9.	9.23077	0.	14741,14742,14743,14744,14745,14746,14747,14748,14749,
GRID 692	9.	11.5385	0.	14750,14751,14752,14753,14754,14755, C
GRID 693	9.	13.8462	0.	14756,14757,14758,14759,14760,14761,14762,14763,14764,
GRID 694	9.	16.1539	0.	14765,14766,14767,14768,14769,14770, C
GRID 695	9.	18.4615	0.	14771,14772,14773,14774,14775,14776,14777,14778,14779,
GRID 696	9.	20.7692	0.	14780,14781,14782,14783,14784,14785,
GRID 697	9.	23.0769	0.	14786,14787,14788,14789,14790,14791,14792,14793,14794,
GRID 698	9.	25.3846	0.	14795,14796,14797,14798,14799,14800, C
GRID 699	9.	27.6923	0.	14801,
GRID 700	9.	30.	0.	CONTACT TABLE
GRID 701	12.	0.	0.	10,
GRID 702	12.	2.30769	0.	1, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 2, 0,
GRID 703	12.	4.61539	0.	0,
GRID 704	12.	6.92308	0.	0, 0, 0,
GRID 705	12.	9.23077	0.	0., 0.400000, 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 706	12.	11.5385	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 707	12.	13.8462	0.	3,
GRID 708	12.	16.1539	0.	1, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 2, 0,
GRID 709	12.	18.4615	0.	0,
GRID 710	12.	20.7692	0.	0, 0, 0,
GRID 711	12.	23.0769	0.	0., 0.400000, 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 712	12.	25.3846	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 713	12.	27.6923	0.	4,
GRID 714	12.	30.	0.	1, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0, 0,
GRID 715	23.	30.	0.	0,
GRID 716	23.	27.6923	0.	0, 0, 0,
GRID 717	23.	25.3846	0.	0., 0., 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 718	23.	23.0769	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 719	23.	20.7692	0.	5,
GRID 720	23.	18.4615	0.	1, 0., 0., 0., 0., 0., 1.00000, 0, 0,
GRID 721	23.	16.1539	0.	0,
GRID 722	23.	13.8462	0.	0, 0, 0,
GRID 723	23.	11.5385	0.	0., 0., 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 724	23.	9.23077	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 725	23.	6.92307	0.	2,
GRID 726	23.	4.61538	0.	2, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0, 0,
GRID 727	23.	2.30769	0.	0,
GRID 728	23.	0.	0.	0, 0, 0,
GRID 729	20.	30.	0.	0., 0., 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 730	20.	27.6923	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 731	20.	25.3846	0.	3,
GRID 732	20.	23.0769	0.	2, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0, 0,
GRID 733	20.	20.7692	0.	0,

GRID 734	20.	18.4615	0.	0, 0, 0,
GRID 735	20.	16.1539	0.	0., 0., 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 736	20.	13.8462	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 737	20.	11.5385	0.	4,
GRID 738	20.	9.23077	0.	2, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0, 0,
GRID 739	20.	6.92307	0.	0,
GRID 740	20.	4.61538	0.	0, 0, 0,
GRID 741	20.	2.30769	0.	0., 0., 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 742	20.	0.	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 743	17.	30.	0.	5,
GRID 744	17.	27.6923	0.	3, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0, 0,
GRID 745	17.	25.3846	0.	0,
GRID 746	17.	23.0769	0.	0, 0, 0,
GRID 747	17.	20.7692	0.	0., 0., 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 748	17.	18.4615	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 749	17.	16.1539	0.	4,
GRID 750	17.	13.8462	0.	3, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 2, 0,
GRID 751	17.	11.5385	0.	0,
GRID 752	17.	9.23077	0.	0, 0, 0,
GRID 753	17.	6.92307	0.	0., 0.400000, 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 754	17.	4.61538	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 755	17.	2.30769	0.	5,
GRID 756	17.	0.	0.	4, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 2, 0,
GRID 757	14.	30.	0.	0,
GRID 758	14.	27.6923	0.	0, 0, 0,
GRID 759	14.	25.3846	0.	0., 0.400000, 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 760	14.	23.0769	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 761	14.	20.7692	0.	5,
GRID 762	14.	18.4615	0.	POST
GRID 763	14.	16.1539	0.	3, 16, 17, 0, 0, 19, 20, 0, 1, 0, 12, 0, 4,
GRID 764	14.	13.8462	0.	0, 0, 0,
GRID 765	14.	11.5385	0.	301,
GRID 766	14.	9.23077	0.	311,
GRID 767	14.	6.92307	0.	321,
GRID 768	14.	4.61538	0.	NODAL , 1,
GRID 769	14.	2.30769	0.	NODAL , 5,
GRID 770	14.	0.	0.	NODAL , 34,
GRID 771	14.	30.	0.	NODAL , 35,
GRID 772	14.	27.6923	0.	END OPTION
GRID 773	14.	25.3846	0.	\$ -- HISTORY DEFINITION
GRID 774	14.	23.0769	0.	\$ -- BEGIN STEP "Static Step_COF"
GRID 775	14.	20.7692	0.	TITLE This is a default static analysis step.
GRID 776	14.	18.4615	0.	TITLE Static Step_COF
GRID 777	14.	16.1538	0.	SOLVER
GRID 778	14.	13.8462	0.	8, 0, 0, , , , , 0,
GRID 779	14.	11.5385	0.	LOADCASE ,Default
GRID 780	14.	9.23076	0.	3,
GRID 781	14.	6.92307	0.	123456 , 1,
GRID 782	14.	4.61538	0.	4000daN , 1,
GRID 783	14.	2.30769	0.	1 , 1,
GRID 784	14.	0.	0.	CONTROL
GRID 785	12.	30.	0.	, 20, 0, 0, 0, 1, , , 1, 0, 1,
GRID 786	12.	27.6923	0.	0.100000, 0., 0., 0., 0., 0.,
GRID 787	12.	25.3846	0.	CONTACT TABLE
GRID 788	12.	23.0769	0.	10,
GRID 789	12.	20.7692	0.	1, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 2, 0,
GRID 790	12.	18.4615	0.	0,
GRID 791	12.	16.1538	0.	0, 0, 0,
GRID 792	12.	13.8462	0.	0., 0.400000, 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 793	12.	11.5385	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 794	12.	9.23076	0.	3,
GRID 795	12.	6.92307	0.	1, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 2, 0,
GRID 796	12.	4.61538	0.	0,
GRID 797	12.	2.30769	0.	0, 0, 0,
GRID 798	12.	0.	0.	0., 0.400000, 0.,1.0000E+20, 0., 0., 0.,
GRID 799	12.	-11.1	0.	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
GRID 800	12.	-13.4077	0.	4,

