

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA

Modelagem de junta aeronáutica por
prendedores

Flávio Amorati

São Paulo

2008

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

MECÂNICA

Modelagem de junta aeronáutica por prendedores

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Graduação em Engenharia Mecânica**

Autor: Flávio Amorati

Orientador: Walter Ponge Ferreira

Área de Concentração:

Engenharia Aeronáutica

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Amorati, Flávio

**Modelagem de junta aeronáutica de prendedores / F.
Amorati. -- São Paulo, 2008.
50 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Estruturas metálicas 2.Aeronáutica (Estrutura) 3.Juntas
rebitadas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

Resumo

O presente trabalho reúne elementos para a projeto e modelagem de juntas aeronáuticas unidas por rebites. A preocupação do texto esta centrada em contextualizar o leitor no assunto e permitir que este possa ter uma maior intimidade no assunto. Para tanto, literaturas foram consultadas e através do uso de elementos finitas modelos foram desenvolvidos e analisados. Ao final das analises foram identificados todos os parâmetros relevantes para a idealização da junta.

Além do cumprimento da formalidade de conclusão de curso, este texto tem a pretensão de transmitir algumas experiência da prática do uso de elementos finitos e dificuldades encontradas em projeto, vividas pelo autor, a futuros projetistas de estruturas aeronáuticas.

Abstract

Part of a bigger project lead by Embraer with the objective to develop technology for the production of lighter metal structures.

The current text gathers elements to a project and modeling of a aeronautic joint united by rivets. The meaning of this text is focused on instruct the reader and allow that the reader be able to have a better familiarity of this subject. Papers and Authors were consulted and making use of a finite element program, several models were made and analyzed. The conclusion of all analyses was that several relevant parameters were discovered to make the joint idealization.

Besides the accomplishment of formality of this dissertation, this text have the intend to pass though all the knowledge that have gathering by this author though the overcoming of difficulties of this joint idealization problem.

Índice

1.	Introdução	8-9
2.	Objetivos	10
3.	Resumo do Projeto	11-12
4.	Comportamento esperado	13
5.	Definição da Junta	14
6.	Características e numeração dos Rebites	15-17
7.	Configuração das Juntas	18-19
8.	Metodologia da Modelagem	20
9.	Elemento Finito	21
10.	Modelo Preliminar II	22-24
11.	Análise do Carregamento	25
12.	Modelo Preliminar II	26-29
13.	Modelo Preliminar III	30-33
14.	Considerações para Modelos Finais	34-35
15.	Modelos Finais I	36-38
16.	Modelos Finais II	39-41
17.	Comparação de Modelos	42-44
18.	Conclusão	45-46
19.	Bibliografia	47

Trabalho Final

1 – INTRODUÇÃO

Um prendedor é um elemento que uni mecanicamente dois ou mais objetos. Prendedores são comumente usados em estruturas metálicas, como a da figura 1, este tipo de configuração é usualmente utilizado para facilitar o reparo da estrutura, onde os prendedores são retirados para a troca de parte da estrutura e em seguida substituídos ou recolocados. Em estruturas soldadas ou coladas não é possível tal procedimento, pois a solda ou o adesivo não são facilmente removidos. No entanto, estes prendedores acarretam em um peso estrutural maior do que uma simples solda e também em uma concentração de tensões.



Figura 1. Ponte metálica.

Nas estruturas aeronáuticas este tipo de elemento sempre esteve presentes, seja no início da aviação, quando os aviões feitos de madeira e tecido, até os dias modernos, onde são empregadas centenas ou até mesmo milhares de prendedores em toda a estrutura de um avião, dependendo de seu porte. Esta configuração é utilizada com o intuito de facilitar o reparo e simplificá-lo, uma vez que os painéis danificados são removidos e substituídos de forma fácil e simples sem a necessidade de utilizar equipamentos mais sofisticados. Para o dimensionamento dessas juntas atualmente, o método utilizado é considerar uma junta perfeita: onde os

prendedores são calculados em separado para resistir ao cisalhamento e a compressão; A junta também é considerada perfeita ignorando os efeitos dos prendedores onde efeitos como a força de atrito gerada pelo prendedor à placa e a pré tensão gerada pela montagem com interferência não são considerados. Este método acarreta um super dimensionamento da estrutura, acarretando em um “excesso” de peso na estrutura da aeronave ou até mesmo em um acréscimo do custo de produção. Não menos importante que a questão do custo de fabricação é a questão do peso da aeronave, por estar diretamente relacionada a todo o seu desempenho:

- Consumo de combustível;
- Carga bruta de decolagem;
- Autonomia de vôo;
- Velocidade máxima de cruzeiro entre outros;

A questão do desempenho é extremamente importante no mercado de aeronaves, pois esse fator é importantíssimo para a escolha do modelo e fabricante do avião, para a operadora que compra uma aeronave. A figura 2 mostra um DC3 um avião mundialmente conhecido que utiliza a estrutura em questão.



Figura 2. DC3.

2 – OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi modelar uma junta aeronáutica por prendedores. Para isso foi realizado um estudo de artigos científicos sobre o assunto, para obter conhecimento do problema e de suas dificuldades. Em seguida definiu-se um método de abordagem.

Modelar uma junta aeronáutica em elementos finitos através de softwares de elementos finitos da MSC (Patran, Nastran e Marc) em seguida fazer uma análise da resposta da simulação para tentar entender o significado e validade deste resultado e sua implicação na definição da junta.

Por ultimo fazer um experimento com o intuito de comprovar o comportamento obtido pela análise de forma a validar o modelo em elementos finitos.

3 – RESUMO DO PROJETO

Foi aprovado recentemente um projeto que visa o desenvolvimento de tecnologia capaz de realizar a construção de estruturas aeronáuticas mais leves, onde um dos vetores deste projeto será realizar um estudo para melhorar o método de dimensionamento da estrutura dos aviões atuais (juntas por prendedores), com isso foi adquirido o apoio da Embraer e do IPT neste trabalho de formatura. Abaixo segue um resumo deste projeto.

Estruturas mais leves

– O Parque Tecnológico de São José dos Campos, no interior paulista, ganhará o primeiro laboratório brasileiro voltado para a pesquisa de estruturas leves. Um dos principais objetivos da iniciativa é ajudar o país a dominar tecnologias essenciais à competitividade no setor aeroespacial internacionalmente, desenvolvendo novos materiais capazes de reduzir o peso das aeronaves.



Figura 3. Aeronave da Embraer.

O Laboratório de Pesquisas de Estruturas Leves está sendo instalado em terreno cedido pela prefeitura de São José dos Campos. O IPT é responsável pela operação, pelo plano de negócios e pela manutenção das instalações.

O laboratório opera por meio de quatro projetos de pesquisa financiados pela FAPESP, pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), pelo IPT e pela Empresa Brasileira de Aeronáutica (Embraer).

O IPT é responsável por coordenar o estudo de melhorias em juntas por prendedores (fastners).

4 – COMPORTAMENTO ESPERADO

Roark[1982] aponta para um comportamento esperado ao se trabalhar com juntas de chapas com espessuras finas e grande razão de aspecto.

Tanto para juntas com sobreposição de chapas (nosso caso) como para juntas sem sobreposição de chapas, em placas com grandes razões de aspecto, a tensão desenvolvida pela unidade da junta é maior do que a tensão desenvolvida pela placa sozinha, caracterizando uma concentração de tensão próximas aos prendedores.

As juntas sobrepostas são tão fortes para carregamentos de torção quando as juntas não sobrepostas.

Testes em juntas rebitadas usando chapas com pequena espessura, especialmente em ligas de alumínio, mostram que é necessário considerar fatores que geralmente não são considerados em juntas em aço usuais, como a tensão radial nas arestas dos furos das chapas causadas pela a pressão de rebite e do processo de acomodamento das chapas da junta.

Na junta real a força de instalação do rebite é relevante. Esta força influencia tanto no rebite como na junta, pois a tensão residual existente no rebite caminhará para as bordas do furo na junta, afetando todo o comportamento da junta uma vez que essas regiões próximas dos furos são as mais solicitadas.

5 – DEFINIÇÃO DA JUNTA

Para o estudo, foram escolhidas duas juntas: a junta mostrada na figura II-4 e na figura II-5 apresentadas posteriormente, estas juntas são do tipo sobrepostas, onde as placas que serão rebitadas são sobrepostas para sua união. Esta junta é utilizada na fuselagem. O motivo desta escolha se deve em grande parte pela disponibilidade para teste, por ser uma junta barata e relativamente simples. Uma amostra será proporcionada pela Embraer para a realização de ensaios de tração. Nestas duas juntas foram testados dois tipos de prendedores, um prendedor para cada tipo de junta, os prendedores são apresentados na tabela 1. Configurações como estas são usuais na indústria aeronáutica e no caso destas juntas são partes de um avião da Embraer.

Tabela 1. Tabela de prendedores

#	Joint Material	Fastener	Type
1	ALCLAD	PE26118AD5S5	ALLFAST
2	2024-T3-0.063 in	PE26118AD6S6	Briles Rivets

6 – CARACTERÍSTICAS E NUMERAÇÃO DOS REBITES

6.1 Características

O tipo de prendedor é o ALLFAST Briles Rivets

- ALLFAST é o nome da empresa que fabrica estes rebites. Esta empresa é responsável por rebites de grandes indústrias do setor aeronáutico tais como: Boeing, Embraer, Lockheed, Airbus, Bombardier entre outros.

- Ambos os rebites que serão utilizados são rebites sólidos.

Rebites sólidos são rebites comumente utilizados na indústria aeronáutica, eles são ideais para cisalhamento, fadiga, estancam a superfície e a deixam aerodinâmica. Ver figura 4.

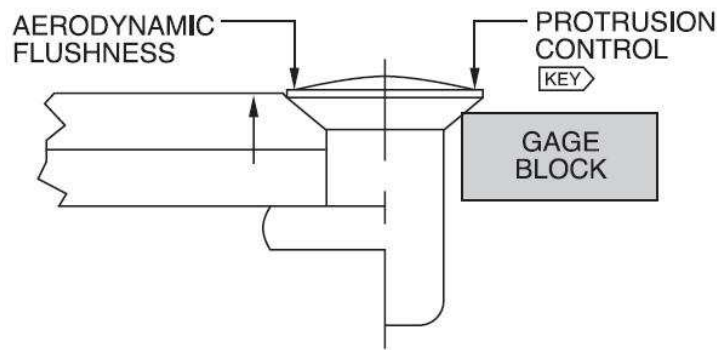


Figura 4.

- Os rebites estudados são do tipo “Briles”.

Este tipo de rebite possui um bom acabamento superficial e boa relação de vida em fadiga. Ele é ideal para fuselagens, não precisa de acabamento na superfície e este é ideal para juntas de baixa espessura. Na figura 3 um prendedor do tipo Briles é apresentado.



Figura 5. Rebite.

A cabeça do rebite tem um formato já moldando para o acabamento do avião. Vale lembrar que rebites sem tais características podem ser geradores de arrasto ou até mesmo possuir uma massa elevada em comparação ao rebite apresentado.

6.2 Numeração

Esses rebites seguem uma numeração e identificação, mostrada na tabela 2, onde também é apresentada a marca de identificação que este rebite possui.

Tabela 2. Identificação dos rebites.

MATERIAL CODE & IDENTIFICATION MARKING	1 ALLOY & DRIVEN SHEAR STRENGTH (MINIMUM)	Shear 2,5
		 120° CSK W/ C'BORE
AD  DIMPLE	2117-T3 30 KSI	MS14218AD BRFZAD PE23118AD

A numeração dos rebites que são empregados nas juntas estudadas pode ser observada na tabela 3. O rebite PE23118AD5S5 possui 5/32 de polegada que equivale a 3,97mm de diâmetro e o rebite PE23118AD6S6 possui 3/16 de polegada que equivale a 4,76mm de diâmetro.

Tabela 3. Numeração dos rebites.

120° CSK / SHEAR HEAD (USE APPROPRIATE DENSITY CORRECTION FACTOR)											BRFZ, BACR15FV and MS14218 *BACR15FV not available in 3 diameter										
APPROXIMATE PIECES PER POUND • LENGTH DASH NUMBERS (and inches) • Check drawing for allowable dash numbers																					
DIAMETER (DASH#) (INCHES)	3 0.188	4 0.250	5 0.313	6 0.375	7 0.438	8 0.500	9 0.563	10 0.625	11 0.688	12 0.750	14 0.875	16 1.000	18 1.125	20 1.250	22 1.375	24 1.500	26 1.625	28 1.750	30 1.875	32 2.000	
3* 3/32	7233	5519	4462	3744	3226	2833	2526	2279	2076	1906	1638	1436	1278	1152	1048	962	888	825	771	723	
4 1/8	4024	3082	2498	2100	1811	1592	1420	1282	1168	1073	923	809	721	650	591	543	501	466	435	408	
5 5/32	2493	1926	1568	1323	1144	1008	900	814	742	682	588	516	460	415	378	347	320	298	298	261	
6 3/16	-	1302	1066	903	783	691	618	559	511	470	405	356	318	287	261	240	222	206	193	181	
7 7/32	-	891	734	624	543	481	431	391	357	329	284	250	223	202	184	169	156	146	136	126	
8 1/4	-	-	563	481	420	372	334	304	278	256	222	195	175	158	144	133	123	114	107	100	
9 9/32	-	-	-	370	324	287	259	235	215	199	172	152	136	123	112	103	95	89	83	78	
10 5/16	-	-	-	299	263	234	211	192	176	163	141	125	112	101	92	85	79	73	69	65	

PARTS IN SHADED AREA TOO SHORT TO ROLL SORT

Where permitted by drawing, shaded lengths are square ends unless otherwise specified.

PARTS IN SHADED AREA TOO SHORT TO ROL. SORT

Where permitted by drawing, shaded lengths are square ends unless otherwise specified.

7 – CONFIGURAÇÃO DAS JUNTAS

7.1 Configuração I

A configuração I consiste em utilizar a junta mostrada na figura 4 (junta I) com os rebites PE26118AD5S5, estes rebites têm 3,97mm de diâmetro e esta junta possui 1,60 mm de espessura (0.063 polegadas).

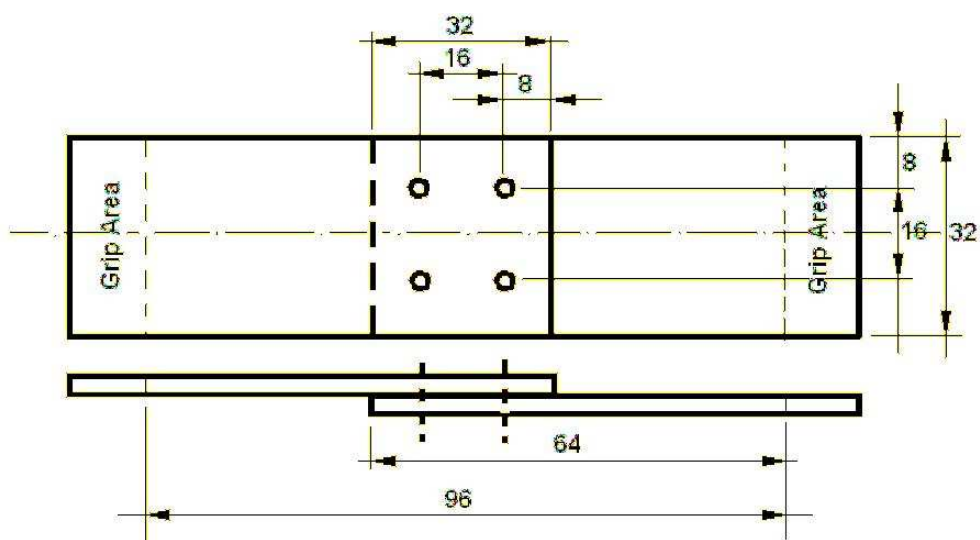


Figura 6. Junta I.

7.2 Configuração II

A configuração II consiste em utilizar a junta mostrada na figura 5 (junta II) com os rebites PE26118AD6S6, estes rebites têm 4,76mm de diâmetro e esta junta possui 1,60 mm de espessura (0.063 polegadas).

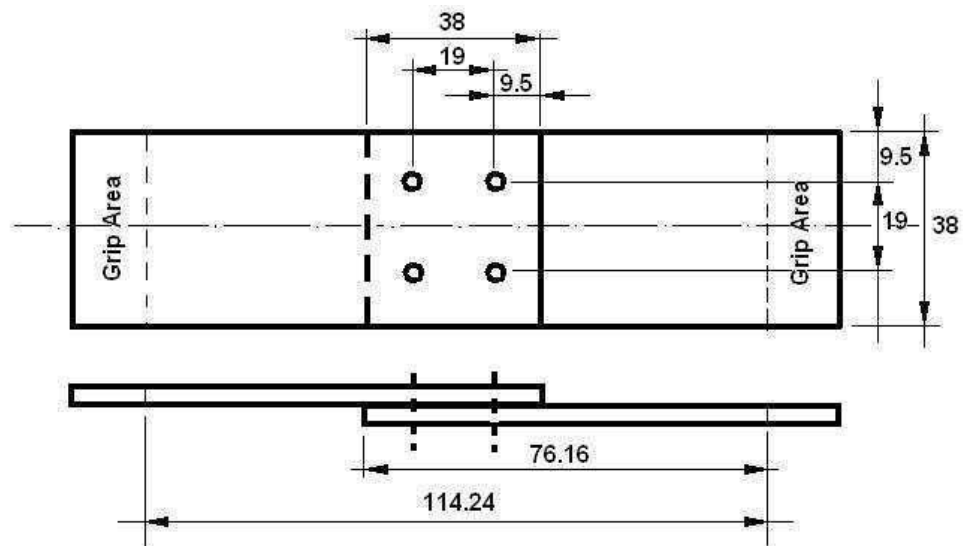


Figura 7. Junta II.

8 – METODOLOGIA DA MODELAGEM

O nosso modelo tem uma força tangente à superfície da junta. Esta força pode ser de tração ou compressão dependendo do caso. Como essa junta está localizada na fuselagem do avião, a tensão não possui nenhuma direção preferencial, uma vez que as tensões na fuselagem são provenientes de cargas originadas por quase todas as partes do avião e esta está submetida à forças e momentos em todos os eixos, conseqüentemente na junta, forças normais e torção surgiram.

8.1-Modelagem preliminar

Para a região dos rebites estudamos, neste primeiro modelo, o engaste dos elementos presentes no furo, considerando o rebite como um ponto, engaste da região interna ao furo tentando simular a ação do rebite na parede do furo e elementos de contato com o intuito de acrescentar ao modelo um deslocamento restrito na região onde o rebite será fixado.

9 –ELEMENTO FINITO

O elemento escolhido para a análise foi o elemento de casca 3D. Um elemento de casca é um elemento de superfície típico. Este elemento é na verdade um elemento 2D mas é chamado de 3D porque ele não é restrito ao plano como o sólido 2D; pode ser alocado em qualquer posição no espaço e pode se deformar fora do plano.

Um elemento de casca é chamado de “abstração” de engenharia porque este elemento não possui em sua geometria espessura física. Na interface do Patran ao se modelar este elemento uma constante é usada para definir a espessura deste elemento de casca. Elementos de casca também são conhecidos como elementos de placa e são utilizados principalmente em modelos onde a espessura é muito menor comparada as outras dimensões, ainda possibilitando um ótimo resultado. Principalmente por este motivo que utilizaremos este tipo de elemento ao invés dos elementos 3D para as modelagens.

Os elementos de cascas permitem carregamentos no plano (também conhecidos como carregamento de membrana) e também fora do plano como momentos e torção.

No Patran, o pré-processador utilizado, há a possibilidade de se escolher entre apenas um tipo de elemento de casca e foram utilizados elementos quadrados por serem melhores que os triangulares para análises estruturais por serem capazes de mostrar gradientes de tensões dentro dos elementos.

10- MODELO PRELIMINAR I

10.1-Definição do modelo

- Modelo com a geometria da configuração I, mas apresentando apenas um furo com as mesmas dimensões do rebite utilizado. Este furo é centrado no meio da chapa.
- Uma força de tração com 1kN de intensidade é aplicada na região oposta aos rebites, ver figura 9, região A.
- Os nós da malha que fazem contato com a face comprimida do rebite são fixados, como mostrado na figura 8, impondo aos pontos mostrados em azul claro, uma translação zero em todos os eixos.

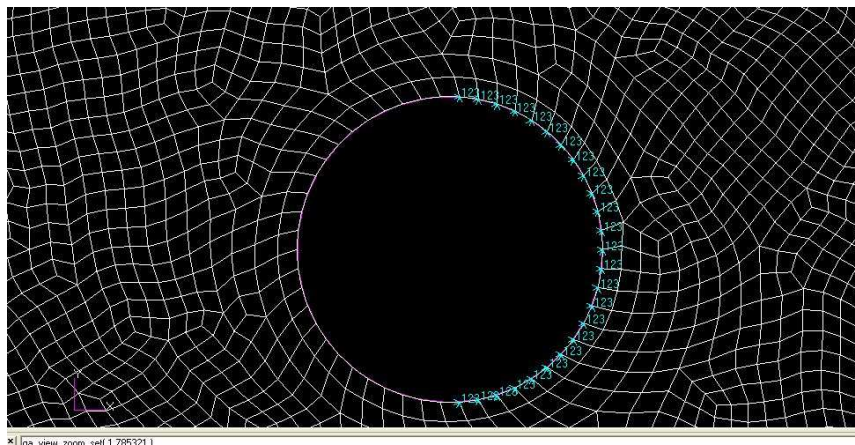


Figura 8. Engaste do modelo I.

- Utilizou-se elementos bi-dimensionais, quadriláteros, elementos de casca.
- Elementos com, “global edge” 0.5, este termo poderia ser traduzido por arestas global.

Na figura 9 é apresentado o modelo. Por causa da simetria é possível simplificar o modelo, sendo apenas necessário o estudo do modelo de um dos lados da junta. Na região A é colocada uma força, com direção paralela ao eixo x e com sentido oposto a este mesmo eixo, na região B é fixado, ou engastado, elementos que são limitados de qualquer tipo de translação conforme já mencionados anteriormente.

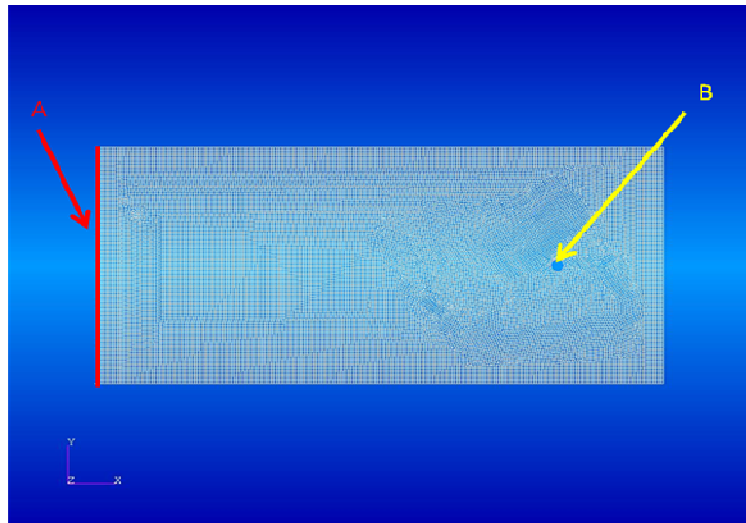


Figura 9. Condições de contorno do modelo I.

10.2 - Resultado da análise.

Na figura 10, é mostrado o resultado gráfico da simulação, tensões de Von Mises, apresentando um Maximo de 15MPa . Analisando a figura, observa-se que:

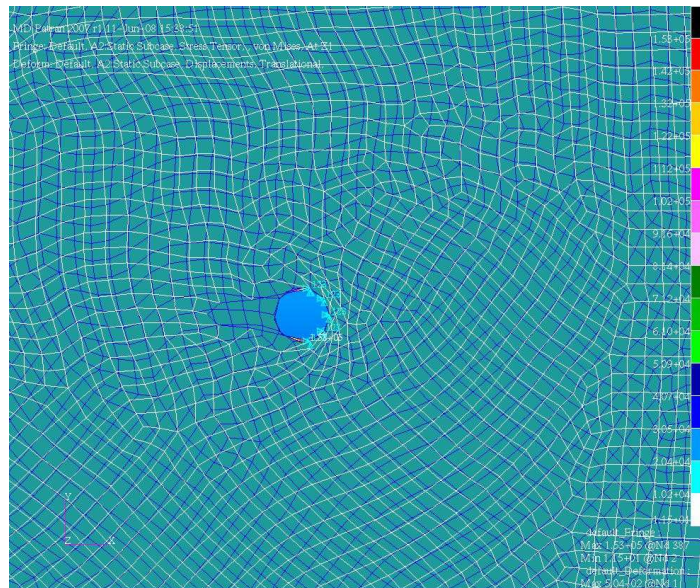


Figura 10. Resultado Modelo I.

A carga utilizada não foi o suficiente para deformar a chapa de forma considerável e não atingiu uma tensão máxima no modelo próxima do limiar de escoamento do alumínio, deve ser feita uma melhor estimativa quanto à carga aplicada à chapa para que ao se trabalhar com elementos de contato que é um método não linear.

10.3- Conclusões do Modelo

O ensaio teve não teve o comportamento esperado, sendo pouco conclusivo por causa do carregamento de pouca intensidade. Este teste demonstrou que para os próximos modelos é necessário aumentar a carga aplicada na junta uma vez que deseja trabalhar com contato que é um método não linear.

11 – ANÁLISE DO CARREGAMENTO

Mesmo o modelo sendo um modelo com comportamento totalmente linear perante a intensidade da força, foi decidido que a força imposta pelo carregamento será superior, pois isto facilitará futuramente quando tivermos que trabalhar de fato com contato, que é um fenômeno não-linear.

Uma nova estimativa foi feita e foi definido que a carga será de 10kN que foi considerada uma magnitude razoável para a junta, já que esta força geraria uma tensão admitida próxima a tensão de escoamento do alumínio e foi considerada razoável e suficientemente para os próximos modelos.

12 – MODELO PRELIMINAR II

12.1 - Definição do modelo.

- Modelo com a geometria da configuração II, mas apresentando apenas um furo com as mesmas dimensões do rebite utilizado. Este furo é centrado no meio da chapa.
- Uma força de tração com 10 kN de intensidade é aplicada na região oposta aos rebites, ver figura 12, região A.
- Os nós da malha que fazem contato com a face comprimida do rebite são fixados, como mostrado na figura 11, impondo aos pontos mostrados em azul claro, uma translação zero em todos os eixos.

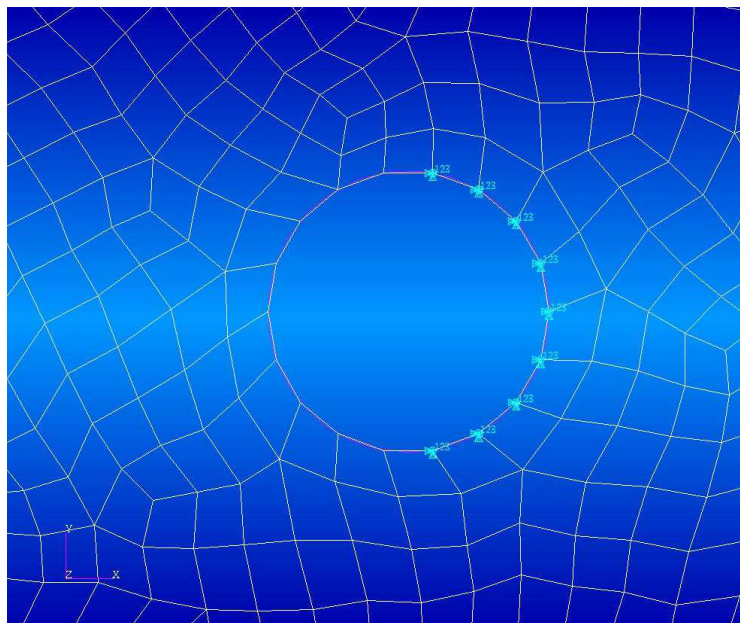


Figura 11. Engaste do modelo II.

- Utilizou-se elementos bi-dimensionais, quadriláteros, elementos de casca.
- Elementos com, “global edge” um. Houve uma diminuição do número de elementos para um processamento mais veloz nesta etapa.

Na figura 12 é apresentado o modelo. Por causa da simetria é possível simplificar o modelo, sendo apenas necessário o estudo do modelo de um dos lados da junta. Na região **A** é colocada uma força, com direção paralela ao eixo x e com sentido oposto a este mesmo eixo, na região **B** é fixado, ou engastado, elementos que são limitados de qualquer tipo de translação conforme já mencionados anteriormente.

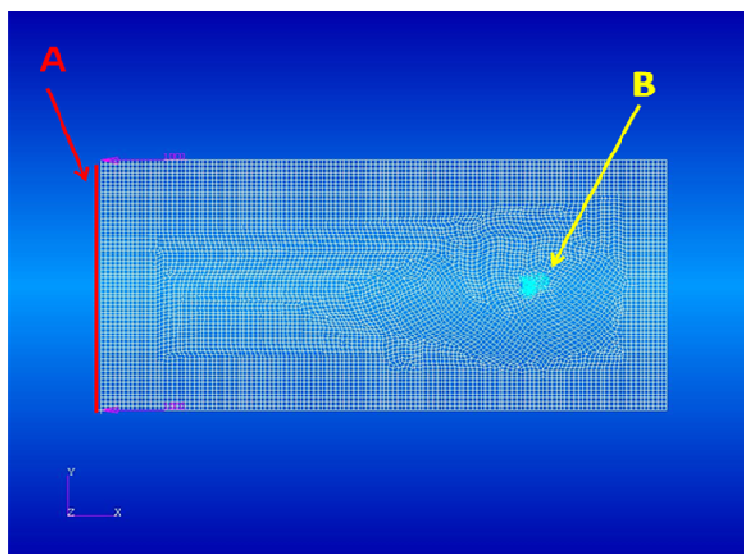


Figura 12. Condições de contorno do modelo II.

Comparando as figuras 9 e 12 podemos observar a diferença do “global edge” que foi feita referencia há pouco. A figura 12 possui “global edge” de 1 e a figura 9, do ensaio preliminar I, possui duas vezes menor, 0,5, impondo ao modelo o dobro de elementos.

O intuito deste modelo é avaliar a discretização da malha perto dos furos e no alem, tentando refinar a malha apenas nos lugares necessários onde as maiores tensões estão localizadas e onde elas variam com maior rapidez e também avaliar a diferença de resultados entre a junta I e a junta II.

12.3 - Resultado da análise

Na figura 13, é mostrado o resultado gráfico da simulação, tensões de Von Mises, apresentando um máximo de 200 MPa . Analisando a figura, observa-se que:

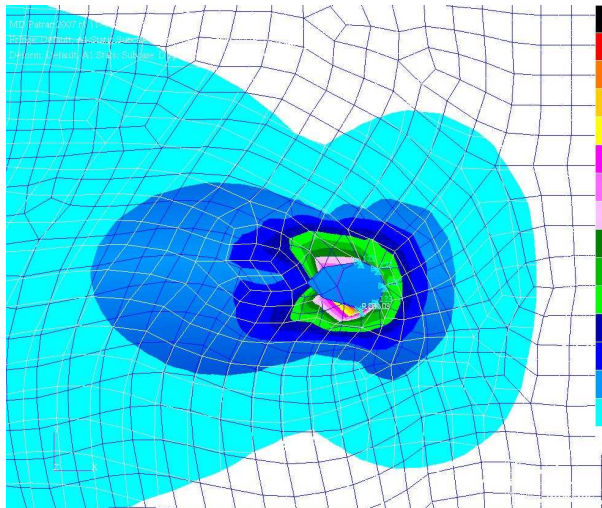


Figura 13. Resultado do modelo II.

- Neste ensaio houve maior deformação do que apresentado no primeiro ensaio, validando a estimativa de força inicial para estes modelos menos refinados.
- Não há simetria das tensões na horizontal, isso se deve pela falta de simetria da malha e principalmente a falta de simetria do engaste.
- A grande concentração de tensões é dada em uma região muito próxima ao furo, sendo necessário aumentar a quantidade de elementos próximos apenas do furo e diminuir o número de elementos em regiões distantes do furo, pois como foi possível observar na figura 13 em regiões próximas ao furo há uma rápida variação de tensões.

12.4 - Conclusão do modelo

O modelo teve comportamento esperado, exibindo concentrações de tensões nos elementos próximos ao furo, seja por causa do engaste ou da fragilidade gerada pelo furo na membrana. Este teste apresentou que no modelo final é necessário aumentar a quantidade de elementos apenas nas regiões próximas aos furos.

Conseguimos observar que a princípio as duas juntas tiveram comportamento semelhante, não precisando ser realizado esses modelos preliminares para os dois tipos de junta.

Conseguimos visualizar que a estimativa de carga é razoável, uma vez que o modelo sofreu uma deformação significativa e surgiram tensões próximas as estimadas.

13 – MODELO PRELIMINAR III

13.1 - Definição do modelo.

Uma chapa com dimensões iguais ao da nossa junta de número 1 com quatro furos de mesma dimensão dos rebites utilizados na junta. A geometria do modelo é apresentada na figura 14.

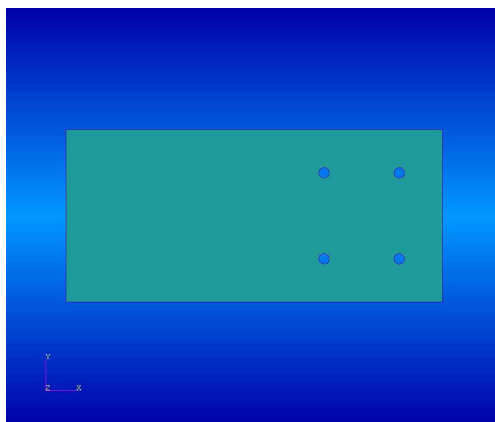


Figura 14. Geometria do modelo III.

- Uma força de tração é aplicada na aresta oposta aos rebites, na aresta do retângulo com sentido paralelo a horizontal.
- Os rebites não são analisados nesse modelo, para substituí-los o ponto mais distante do furo da chapa dos rebites é fixado (é fixado um ponto, para cada furo, apenas). O intuito é observar a diferença de engastar todos os elementos da superfície contra engastar apenas um ponto e ainda descobrir a direção em que a força de reação esta atuando.
- Utilizaram-se elementos bi-dimensionais, quadriláteros, elementos de membrana.
- Neste ensaio será utilizado um método diferente para a criação da malha o “mesh seed”. Define-se a quantidades de nós na aresta e isso permite uma aglomeração de elementos nas regiões mais importantes, próximas aos furos.

13.2 - Comentários quanto à malha.

Neste modelo, a malha é mais refinada perto dos rebites, esta malha pode ser observada na figura 15.

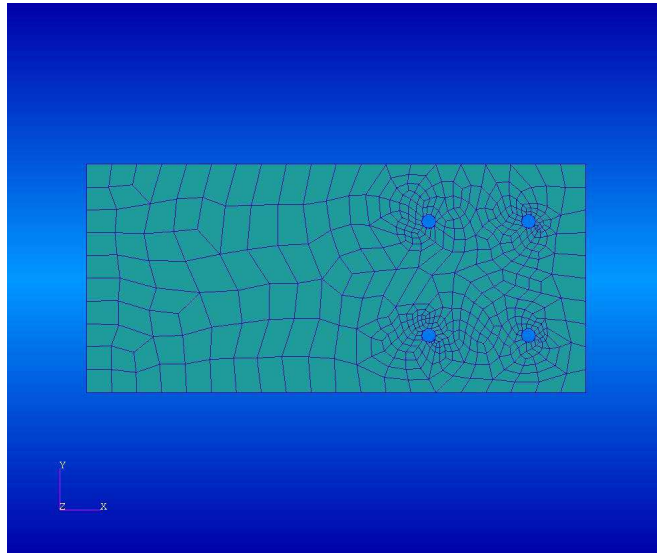


Figura 15 Modelo preliminar III.

13.3 - Resultados da análise

Na figura 16 é possível visualizar as forças de reação dos pontos engastados. As setas em vermelho indicam as setas de forças, em branco, geradas pela reação ao carregamento.

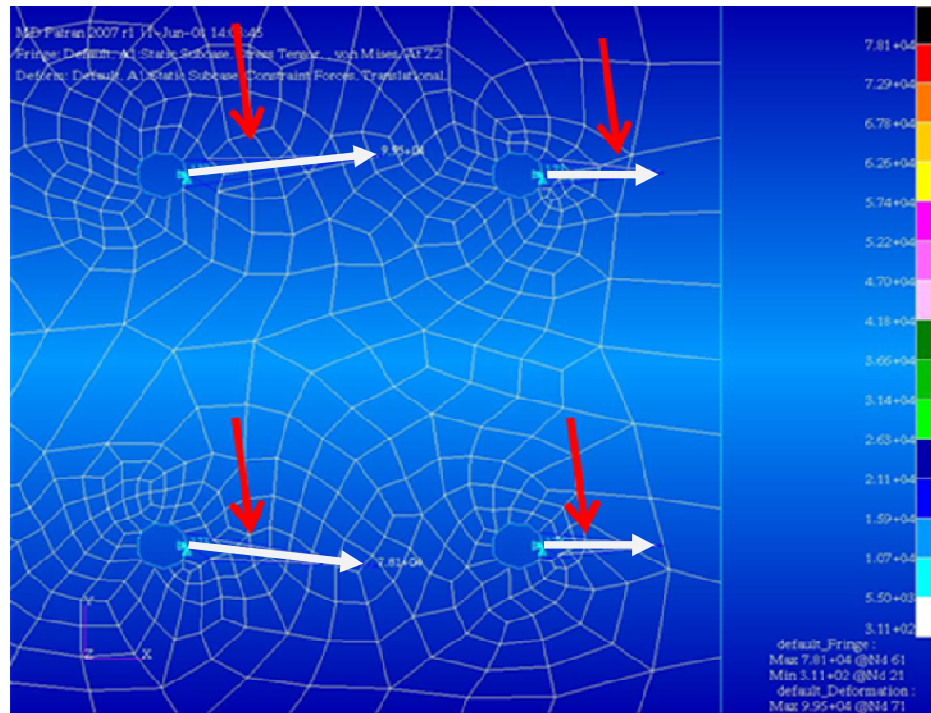


Figura 16. Direção da força de reação do modelo III.

É possível observar que as setas à direita possuem direções diferentes dos cones à esquerda esses cones possuem intensidade maior. É perceptível que há uma interação entre os furos, a distância entre os furos é tal que eles se influenciam.

As setas da esquerda estão ligeiramente inclinadas para fora da chapa, isso é mais intensificado por causa da condição do engaste

As setas brancas que representam as forças dos furos da esquerda são ligeiramente deslocadas para fora e relativamente maior em relação às dos furos da direita. No caso de cargas de compressão é esperado que este comportamento semelhante, porém invertido, as setas da direita ficariam sendo maiores e apontando para fora, quando os cones de força da esquerda seriam menores e retos.

Um modelo similar é apresentado na figura 17 onde diferente do modelo da figura 16 todos os pontos do furo são engastados, fixando apenas a translações

dos nós. Comparando os modelos é possível identificar uma semelhança quanto a direção da força dos furos a esquerda da chapa.

Analisando as tensões geradas no modelo é perceptível que os furos a esquerda possuem uma tensão menor que os a direita. Fica assim comprovado que há essa distancia os furos estão interagindo.

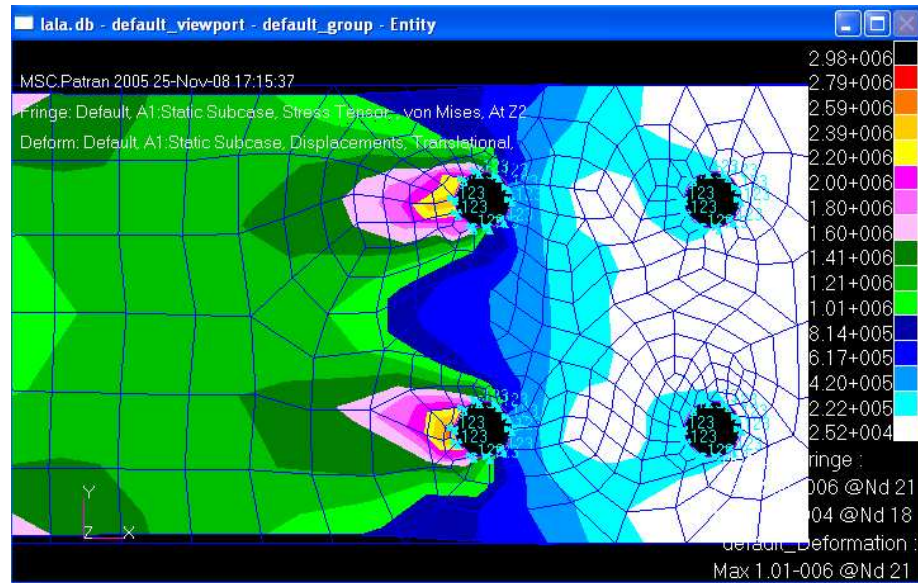


Figura 17. Tensões de Von Mises do modelo similar ao modelo preliminar III.

13.4 - Conclusões do modelo

Apenas um ponto de engaste no furo não é o suficiente, porque ele deforma a malha e, portanto o modelo se torna pouco conclusivo, fazendo com que o furo fique muito deformado invalidando as condições reais, com o rebite dentro do furo.

É verificado que nesta distância entre os rebites, há interferência de um furo com o outro, ou seja, estes rebites têm que ser considerados em conjunto e a sua configuração e posições influenciarão no desempenho da junta.

Para estes modelos em três dimensões há a possibilidade de se colocar “contato” entre peças distintas. Podendo agora tentar modelar uma junta que seja capaz de considerar o contato entre rebite e chapa.

Porem devido às grandes dificuldades em modelar uma junta em 3D e utilizando elementos de contato e as limitações do MSC Nastran em modelar elementos de contato, tendo que optar por outro solver (MSC Marc), foi analisado diversos modelos alterando a região do “contato”, que foi substituída por engastes.

15 – MODELO FINAL I

A modelagem segue a mesma metodologia dos modelos anteriores. Mas agora é analisado o contato que por simplificação serão as condições do engaste.

Definição do modelo:

- Carregamento igual à anteriormente definido.
- Malha produzida a partir do método “mesh seed” com um refinamento de 10 elementos na região do furo.

15. 1 – Objetivos da modelagem

O objetivo desta modelagem é analisar a condição do engaste na região do furo, fixando as translações e avaliando a influencia de fixar as rotações.

Na figura 19 observa-se o modelo com as rotações fixadas nos elementos. Na figura 20 observa-se o mesmo modelo, com a malha, geometria e carregamento idêntico diferindo apenas na região do furo onde os pontos são fixados ou não quanto à rotação.

Esses modelos apresentados são apresentadas o gradiente das tensões pelo critério de von Mises e as deformações dos elementos.

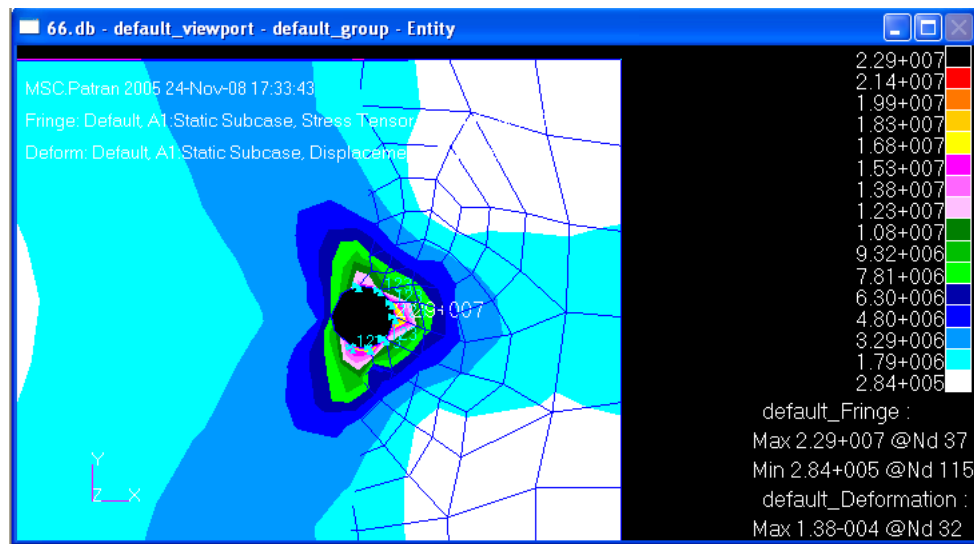


Figura 19, Modelo final I com engaste livre para rotacionar.

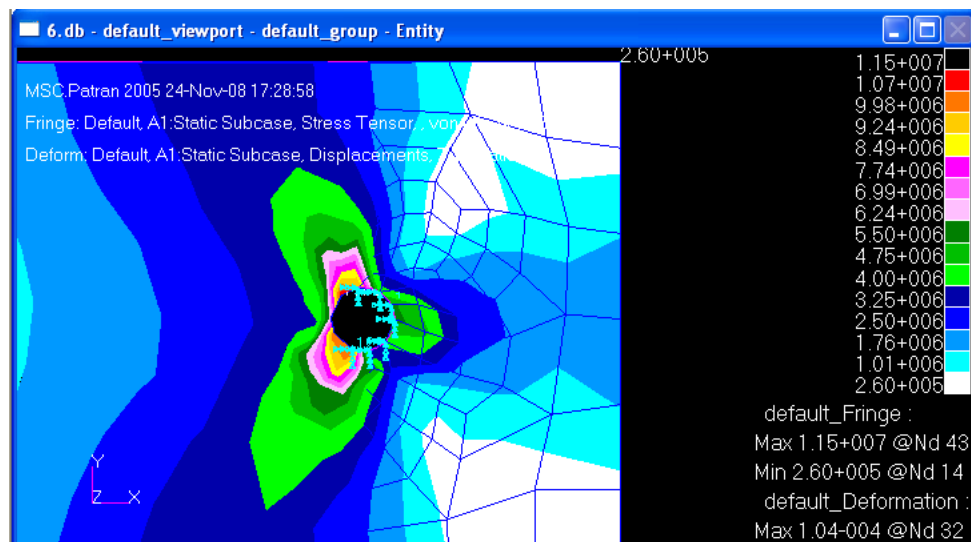


Figura 20, Modelo final I com engaste fixado para rotacionar.

15.2 – Resultados dos modelos

Da comparação entre as figuras 19 e 20 é possível observar que a imposição da rotação zero nos pontos engastados é bastante sensível para com o resultado das tensões máximas. Produzindo uma diferença entre máximos de até duas

vezes maior entre os modelos, sendo superior para o modelo onde não foi fixada a rotação dos elementos do engaste.

Este é possivelmente um dos efeitos que o rebite, devido a sua normal de contato gera na junta. Alterando significativamente a tensão máxima encontrada na junta.

O resultado destes modelos deveria possuir simetria, mas devido à falta de simetria da malha as tensões são prejudicadas e o resultado perde sua simetria, no entanto ainda é suficiente para esta análise comparativa.

16 – MODELO FINAL II

A modelagem segue a mesma metodologia dos modelos anteriores. Mas agora é analisado o contato que por simplificação serão as condições do engaste, onde será alterado o numero de elementos fixos na região do furo do rebite.

Definição do modelo:

- Carregamento igual à anteriormente definido.
- Malha produzida a partir do método “mesh seed” com um refinamento de 20 elementos na região do furo. Para tentar diminuir a não simetria das tensões geradas próximas ao furo.

16. 1 – Objetivos da modelagem

O objetivo desta modelagem é analisar a condição do engaste na região do furo, fixando as translações e avaliando a influencia de fixar as rotações e também analisar a influencia da quantidade de nós engastados.

Na figura 21 observa-se o modelo com as rotações fixadas nos elementos. Na figura 22 observa-se o mesmo modelo, com a malha, geometria e carregamento idêntico diferindo apenas na região do furo onde os pontos são fixados ou não quanto à rotação.

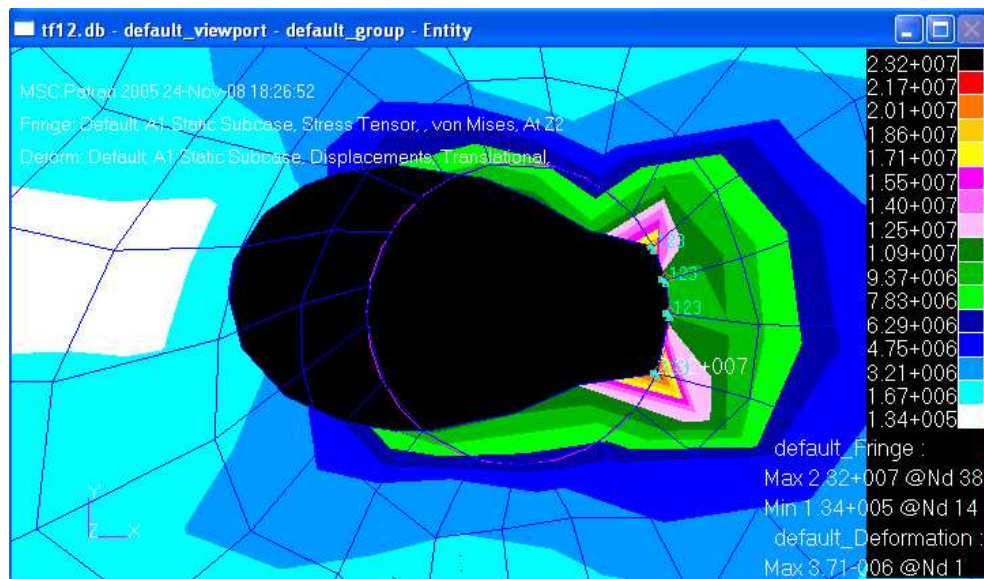


Figura 21. Modelo final II com engaste livre para rotacionar.

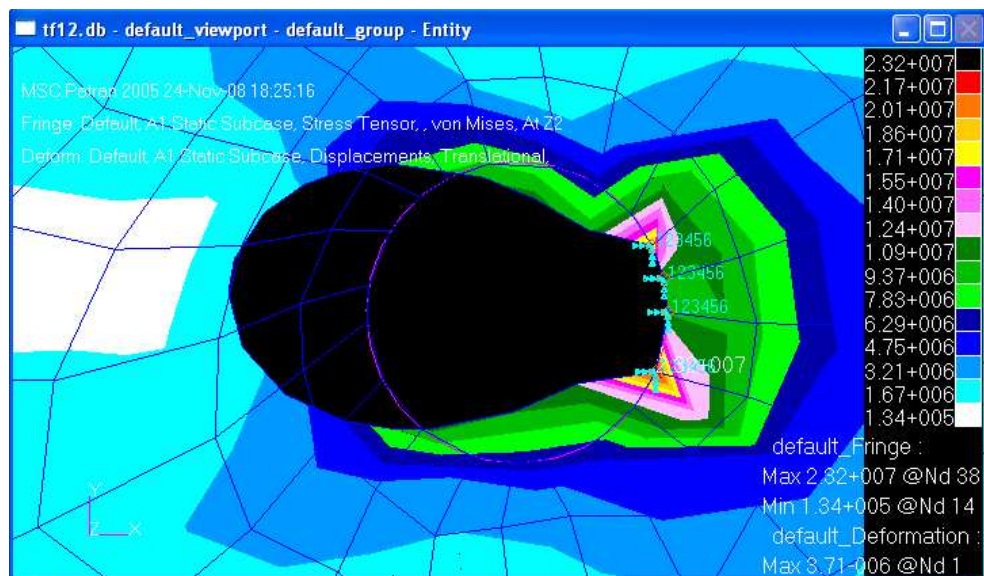


Figura 22. Modelo final II com engaste fixado para rotacionar.

16.2 – Resultados dos modelos

Das figuras 21 e 22 é possível observar que a imposição da rotação zero nos pontos engastados com esses pontos já não é tão sensível quanto no modelo final I. Produzindo nenhuma diferença significativa nas tensões máximas na região do furo do rebite.

Comparando as tensões máximas entre as figuras 21 e 22 não diferem sensivelmente. Isso se deve por causa da região dos nós engastados, como os nós engastados já estão em uma região quase vertical dos furos nas figuras o resultado das tensões não é influenciada pela imposição da rotação nula dos nós. Intuitivamente, se fixarmos uma região menor do furo não haverá diferenças sensíveis quanto às tensões máximas.

Comparando com o modelo final I, o modelo final II possui uma diferença quanto ao número de elementos engastados. As tensões máximas são parecidas entre o modelo V(nos dois casos) e o modelo final I quando não fixada às rotações dos nós engastados.

O resultado destes modelos deveria possuir simetria, mas mesmo com o aumento de elementos no furo, a malha ainda permaneceu não simétrica. As tensões são prejudicadas e o resultado perde sua simetria, no entanto ainda é suficiente para esta análise comparativa.

17 – COMPARAÇÃO DE MODELOS

Nas figuras 23 e 24 são apresentadas as tensões de Von Mises do resultado gerado pela mesma modelagem do modelo final II diferindo apenas no número de nós do engaste. Comparando as figuras 22 as figuras 23 e 24, que possuem respectivamente 4, 8 e 12 pontos engastados e com suas translações e rotações fixas.

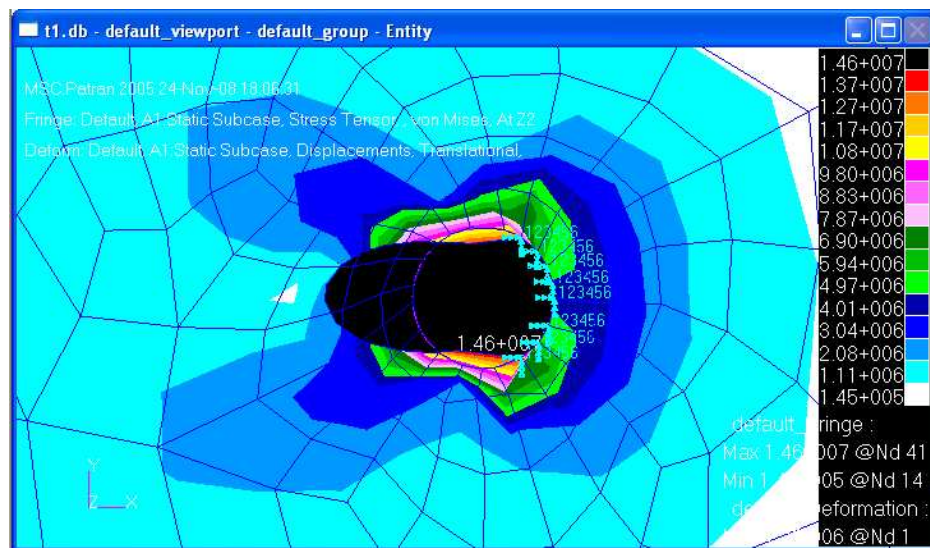


Figura 23. Modelo com 8 engaste fixado para rotação.

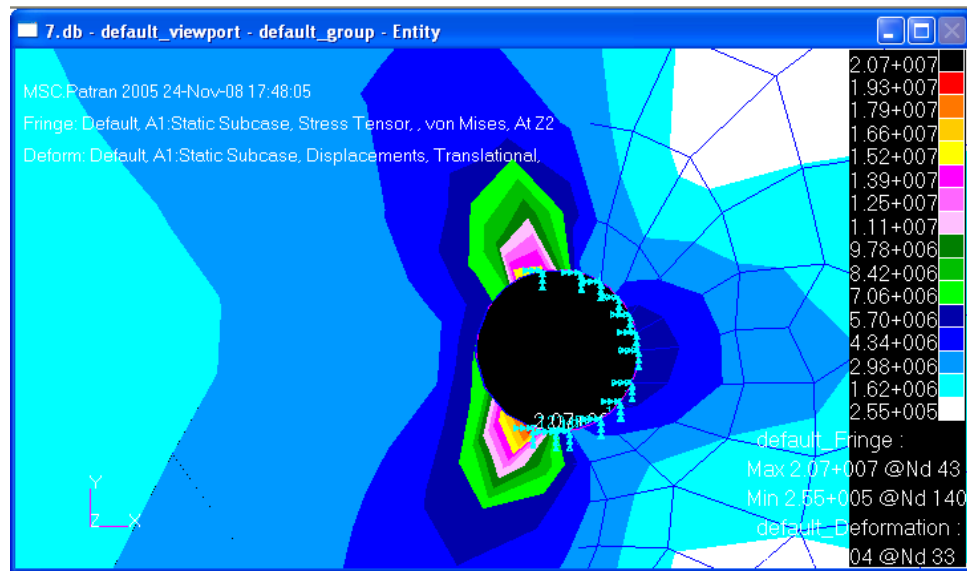


Figura 24. Modelo com 12 engastes fixado para rotação.

Na tabela 5 é apresentado os valores das tensões máximas encontradas em cada modelo.

Tabela 5, comparação entre resultados de tensões variando o número de nós fixos.

Figura	Numero de nós engastados	Tensão máxima obtida
22	4	232
23	8	146
24	12	207

Na figura 24 pode-se observar que as maiores tensões estão mais alocadas na região da esquerda do furo, isso se deve principalmente aos nós do engaste estarem alocados a esquerda do centro do furo, impedindo que o material se deforme como nas outras figuras (22 e 23) para a direita da figura. Este engaste não está próximo a realidade, porque o rebite sendo redondo ele exerceria apenas forças de reação nas paredes do furo do centro para frente. No entanto devido ao atrito gerado pela força

de contato do acoplamento do rebite poderia gerar uma resistência à rotação da superfície a esquerda do centro do furo.

18 – CONCLUSÕES

A modelagem proposta neste trabalho de formatura se demonstrou muito mais complexa do que o esperado. Sendo passível de um estudo muito mais aprofundado.

Pelos modelos de elementos finitos realizados foi possível identificar diversas variáveis que se mostraram de grande importância para a solução do problema, tais como:

1. Força de contato entre os rebites e a chapa.

A força de contato se demonstrou de grande importância para a resolução do problema proposto, pois ela rege todo o fenômeno do atrito com entre as paredes do furo e o rebite, em outras palavras ela irá impor o grau de rotação das paredes do furo e segundo as análises realizadas neste trabalho este parâmetro poderá impor uma resistência da junta de até 200% (o máximo encontrado nos modelos) superior a uma junta onde o fenômeno do atrito não é analisado.

2. Coeficiente de atrito dos materiais da junta.

Este parâmetro está diretamente relacionado com a força de contato existente entre os elementos da junta, por regirem ao mesmo tempo o fenômeno do atrito.

3. Configuração da junta e espaçamento dos rebites

Como sugerido por Roark [1982] e comprovado em nossos modelos uma junta com as placas sobrepostas (configuração da junta estudada) possui tensões na região dos furos superior a o da placa, por este motivo o espaçamento e o número de fileiras de rebites é de grande importância para análise da junta, pelo menos em nosso caso onde os

rebites estão relativamente próximos. Esta interferência se deve basicamente devido a inteiração do campo de tensões dos rebites, onde as tensões originadas por cada junta interagem.

Quanto às modelagens apresentadas devido à utilização de elementos de casca: elementos que simulam sólidos sem perder a validade dos modelos quando se trabalha com espessuras muito inferiores as do restante da chapa como sugerido pelas referencias. Posso concluir mesmo sem a comprovação física do modelo que todas as modelagens estão de acordo com o exigido pelo elemento e pelos manuais do programa, portanto apresentam bons resultados.

A grande dificuldade de obtenção do corpo de prova e o cronograma justo foi o motivo para o cancelamento da iniciativa de se realizar um ensaio físico da junta (ensaio de tração) para a validação do modelo em elementos finitos.

Ao final deste trabalho não foi possível concluir a modelagem completa, com elementos de contato e em três dimensões da junta. Isto se deve as grandes dificuldades ao se utilizar o programa oferecido. Junto com as limitações do MSC Nastran e com a tentativa de simular a junta no MSC Marc (programa propício para simulações de contato) acarretou na alternativa de estudar casos com ferramentas conhecidas do programa para a solução do problema proposto. Ao final das análises foi possível adquirir o conhecimento das variáveis que verdadeiramente influenciam o resultado do modelo e a junta.

19 - Bibliografia

Terada [2001], Structural fatigue and joint degradation, Hiroyuki Terada.

Roark [1982], Formulas for Stress and Strain, Raymond J. Roark and Warren C. Young.

Ansys Tips - Picking an Element Type For Structural Analysis.

Acesso em 19/10/2008

http://www.lubanren.com/weblog/upload/Struct_Element_Types.pdf