

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2011**

**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**ALEXANDRA ALVIM ARBEX**

**ANÁLISE ESTRUTURAL E DE FADIGA DE JUNTAS REBITADAS DE  
USO AERONÁUTICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS  
FINITOS**

Guaratinguetá  
2011

ALEXANDRA ALVIM ARBEX

ANÁLISE ESTRUTURAL E DE FADIGA DE JUNTAS REBITADAS  
DE USO AERONÁUTICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá  
2011

Arbex, Alexandra Alvim  
A664a Análise estrutural e de fadiga de juntas rebitadas de uso aeronáutico utilizando o método dos elementos finitos / Alexandra Alvim Arbex – Guaratinguetá : [s.n], 2011.  
126 f : il.  
Bibliografia: f. 125-126

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.  
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Fadiga 2. Método dos elementos finitos I. Título

CDU 620.178.3(043)

**ALEXANDRA ALVIM ARBEX**

**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. Marcelo dos Santos Pereira**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



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



**Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI**  
Unesp/Feg



**Prof.ª Dr.ª SILVANA APARECIDA BARBOSA**  
DCTA/IAE

## **DADOS CURRICULARES**

**ALEXANDRA ALVIM ARBEX**

NASCIMENTO	27.07.1984 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Sebastião Nagib Arbex Ligia Imam Alvim Arbex
2002/2006	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Presbiteriana Mackenzie
2010/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

De modo especial, à minha mãe, Ligia, por sua lição de vida que sempre me serviu de inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desse trabalho é conseqüência do auxílio direto e indireto de muitas pessoas, e agradeço em especial:

ao meu orientador Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, por me auxiliar com todo seu conhecimento e dedicação;

ao meu colega Erick Guidi, pela sua ajuda e troca de informações tão importantes e valiosas para realizar esse trabalho;

à UNESP pelo apoio financeiro;

aos meus colegas Anselmo Fioranelli Jr. e Celso Noronha Neto que me auxiliaram no início do meu contato com análise de elementos finitos, o que fez ser possível o desenvolvimento dessa dissertação;

aos meus pais por terem me dado a oportunidade de prosseguir com os estudos e por serem inspirações para toda minha vida;

à minha irmã, Adriana, por estar ao meu lado em todos os momentos;

ao meu marido, Rafael, pelo apoio, compreensão e carinho.



“Nenhuma atividade no bem é  
insignificante. As mais altas árvores são oriundas  
de minúsculas sementes”

Chico Xavier

ARBEX, A. A. **Análise estrutural e de fadiga de juntas rebitadas de uso aeronáutico utilizando o método dos elementos finitos.** 2011. 126 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## **RESUMO**

Juntas rebitadas sobrepostas representam elementos críticos na construção de estruturas aeronáuticas quando projetadas à fadiga. Por serem elementos de fixação largamente utilizados na indústria aeronáutica, o estudo de suas propriedades e variáveis à fadiga tem sido cada vez mais amplo. A variável que tem mostrado possuir alta influência na resistência à fadiga de juntas rebitadas é a força de aperto aplicada no processo de rebitagem. A vida da peça tende a ser maior quando o valor dessa força é aumentado. O método dos elementos finitos, que é uma ferramenta de cálculo aplicada nos mais diversos campos de atuação e tem se tornado parte indispensável de projetos mecânicos, é utilizado nesta dissertação para a análise de uma junta rebitada sobreposta de uso aeronáutico. A junta é simulada levando em conta as etapas do processo de fabricação e aplicação, a fim de realizar a análise de seu comportamento mecânico e calcular sua vida em fadiga. Através de um teste experimental de tração monotônica foram obtidos valores de deformação com extensômetros, e é feita a correlação desses dados com o modelo numérico a fim de validar a modelagem. Em seguida são feitas mais duas análises com diferentes forças de aperto, com o objetivo de verificar a influência dessa variação na vida em fadiga da peça.

**PALAVRAS-CHAVE:** Juntas Rebitadas. Fadiga. Método dos Elementos Finitos. Força de aperto.

ARBEX, A. A. **Structural and fatigue analyses of a riveted joint of aeronautical application, using Finite Elements Method.** 2011. 126 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

### **ABSTRACT**

Riveted lap joints represent a critical element in metallic airframe construction when designing against fatigue. These elements are widely used in the aerospace industry, so the study of the fatigue's properties and variables has been increasingly broad. The variable that has shown to have a high influence on the fatigue strength of riveted joints is the clamping force applied to the riveting process. The life of the part tends to be higher when the clamping force applied is increased. The finite element method, which is a calculation tool applied in various fields of activity and has become an indispensable step of mechanical design, is used in this dissertation for the analysis of a riveted lap joint of aeronautic use. The joint is simulated considering the stages of the manufacturing process and application, in order to perform analysis of mechanical behavior and calculate the fatigue life. Through an experimental test of monotonic tensile, strain values were obtained with strain-gauges, and is made the correlation of these data with the numerical model to validate the modeling. Finally two more tests are made with different clamping forces, in order to check the influence of this variation in fatigue life of the joint.

**KEY-WORDS:** Riveted joints. Fatigue. Finite Elements Method. Squeeze force.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Junta sobreposta com uma fileira de rebites .....	29
Figura 2 - Junta sobreposta com 2 fileiras de rebites .....	30
Figura 3 - Junta de topo: cobrejunta simples .....	30
Figura 4 - Junta de topo: cobrejunta dupla .....	30
Figura 5 - Variáveis geométricas (adaptado de MÜLLER, 1995) .....	32
Figura 6 - Excentricidade em juntas rebitadas sobrepostas (SPINELLI, 2004).....	32
Figura 7 - Momento secundário da junta sobreposta (adaptado de MÜLLER, 1995) .....	33
Figura 8 - Estágios do processo de rebitagem (adaptado de MÜLLER, 1995).....	35
Figura 9 - Transmissão de carga na junta (adaptado de XAVIER, 2006).....	37
Figura 10 - Distribuição transferência de carga (adaptado de MÜLLER, 1995) .....	38
Figura 11 - S-N ou Curva de Wöhler (adaptado de NORTON, 2004).....	39
Figura 12 - Funções Tensão-tempo (adaptado de NORTON, 2004).....	41
Figura 13 - Efeito da tensão média na vida de fadiga (NORTON, 2004) .....	44
Figura 14 - Critérios de falha (adaptado de NORTON, 2004) .....	45
Figura 15 - Curvas S-N: Junta e material sem entalhe (adaptado de MÜLLER, 1995).....	46
Figura 16 - Propagação da trinca na junta rebitada sobreposta .....	47
Figura 17 - Curva S-N: Juntas de topo e sobreposta (adaptado de MÜLLER, 1995).....	47
Figura 18 - Influência da força de aperto na vida à fadiga .....	49
Figura 19 - Trinca para força de aperto baixa (SKORUPA et al, 2009) .....	50
Figura 20 - Trinca para força de aperto alta (SKORUPA et al, 2009) .....	50
Figura 21 - Função polinomial contínua na região (adaptado de GRANDIN, 1986) .....	51
Figura 22 - Aproximação com funções lineares (adaptado de GRANDIN, 1986).....	51
Figura 23 - Chapa solicitada com uma carga P (adaptado de GRANDIN, 1986).....	52
Figura 24 - Chapa com elementos triangulares (adaptado de GRANDIN, 1986).....	52
Figura 25 - Chapa com elementos quadrangulares (adaptado de GRANDIN, 1986) .....	53
Figura 26 - Refinamento da malha em uma região (adaptado de GRANDIN, 1986).....	53
Figura 27 - Elemento barra (adaptado de GRANDIN, 1986).....	54
Figura 28 - Elementos sólidos .....	56
Figura 29 - Fluxograma do método dos elementos finitos (SPINELLI, 2004).....	58
Figura 30 - Tensão repetida .....	59
Figura 31 - Tensão alternada .....	59

Figura 32 - Razão de tensão .....	60
Figura 33 - Histórico de cargas.....	60
Figura 34 - Corpo de prova da junta rebitada [mm] (adaptado de SPINELLI, 2004).....	62
Figura 35 - Curva S-N da liga de Alumínio2024-T3 (KAUFMAN, 2008).....	63
Figura 36 - Máquina de testes universal MTS 25” (SPINELLI, 2004).....	64
Figura 37 - Fixação do corpo de prova na máquina de teste (SPINELLI, 2004) .....	65
Figura 38 - Corpo de prova instrumentado (SPINELLI, 2004).....	65
Figura 39 - Posicionamento dos extensômetros (SPINELLI, 2004) .....	66
Figura 40 - Configurações da amostra para os ensaios (SPINELLI, 2004) .....	66
Figura 41 - Definição do tipo de análise .....	67
Figura 42 - Opção para definição dos dados do material .....	68
Figura 43 - Definição do material das chapas, Al 2024-T3.....	68
Figura 44 - Definição do material das chapas, curva S-N.....	69
Figura 45 - Definição do material dos rebites, Al 2117-T4.....	69
Figura 46 - Opção de importar geometria .....	70
Figura 47 – Descrição das peças da montagem importada.....	70
Figura 48 - Montagem da junta, considerando 1/5 da largura.....	71
Figura 49 - Opção de modelamento .....	71
Figura 50 - Material atribuído à chapa 1 .....	72
Figura 51 - Material atribuído à chapa 2 .....	72
Figura 52 - Material atribuído ao rebite 1.....	73
Figura 53 - Material atribuído ao rebite 2.....	73
Figura 54 - Material atribuído ao rebite 3.....	74
Figura 55 - Sistemas de coordenadas locais .....	74
Figura 56 - Definição do tamanho do elemento .....	75
Figura 57 - Peças selecionadas - chapas da junta .....	75
Figura 58 - Detalhe da malha da chapa .....	76
Figura 59 - Definição do tamanho do elemento dos rebites .....	76
Figura 60 - Corpos selecionados - três rebites.....	77
Figura 61 - Malha dos rebites .....	77
Figura 62 - Definição do número de divisões .....	78
Figura 63 - Detalhe de uma aresta selecionada .....	78
Figura 64 - Malha resultante na região.....	79

Figura 65 - Definição do método.....	80
Figura 66 - Chapas selecionadas .....	80
Figura 67 - Detalhe da malha casada entre as chapas.....	80
Figura 68 - Malha completa .....	81
Figura 69 - Detalhe da malha na região sobreposta .....	81
Figura 70 - Definição do contato entre as chapas.....	82
Figura 71 - Seleção das faces de aplicação do contato das chapas.....	82
Figura 72 - Definição do contato entre chapas e o rebite 1 .....	83
Figura 73 - Região de contato entre as chapas e o rebite 1 .....	83
Figura 74 - Definição do contato entre chapas e o rebite 2 .....	84
Figura 75 - Região de contato entre as chapas e o rebite 2 .....	84
Figura 76 - Região do contato entre chapas e o rebite 3.....	85
Figura 77 - Região de contato entre as chapas e o rebite 3 .....	85
Figura 78 - Definição do número de estágios da análise.....	86
Figura 79 - Seleção da análise de fadiga .....	87
Figura 80 - Definição da interferência entre chapas e rebite 1 .....	88
Figura 81 - Definição da interferência entre chapas e rebite 2.....	89
Figura 82 - Definição da interferência entre chapas e rebite 3.....	89
Figura 83 - Engaste na face da junta.....	90
Figura 84 - Face de aplicação do engaste .....	90
Figura 85 - Definição da restrição das faces das chapas no eixo y .....	91
Figura 86 - Faces selecionadas para restrição no eixo y.....	91
Figura 87 - Restrição do grau de liberdade no 1° estágio.....	92
Figura 88 - Definição da restrição .....	92
Figura 89 - Faces selecionadas para restrição no eixo z.....	93
Figura 90 - Definição da restrição .....	93
Figura 91 - Face de aplicação da restrição .....	94
Figura 92 - Valores para o primeiro estágio .....	94
Figura 93 - Seleção da opção da Força de reação.....	94
Figura 94 - Restrição das faces dos rebites no eixo z desabilitadas para o 2° estágio .....	95
Figura 95 - Aplicação do deslocamento na face selecionada .....	96
Figura 96 - Valor do deslocamento para o 2° estágio .....	96
Figura 97 - Tipo de carregamento aplicado.....	99

Figura 98 - Aplicação da curva de Goodman .....	99
Figura 99 - Parâmetros para análise da fadiga.....	100
Figura 100 - Definição da interferência entre chapas e rebite 1 .....	101
Figura 101 - Definição da interferência entre chapas e rebite 2.....	101
Figura 102 - Definição da interferência entre chapas e rebite 3.....	102
Figura 103 - Definição da interferência entre chapas e rebite 1 .....	103
Figura 104 - Definição da interferência entre chapas e rebite 2.....	103
Figura 105 - Definição da interferência entre chapas e rebite 3.....	104
Figura 106 - Definição dos resultados a serem calculados.....	104
Figura 107 - Comando para solução da análise.....	105
Figura 108 - Definição das respostas para a análise de fadiga .....	105
Figura 109 - Comando de cálculo da análise de fadiga.....	106
Figura 110- Ferramenta de contato.....	107
Figura 111 - Valor da tensão radial no furo .....	108
Figura 112 - Seleção do rebite 1 e coordenada local 1 .....	109
Figura 113 - Seleção do rebite 2 e coordenada local 2.....	109
Figura 114 - Seleção do rebite 3 e coordenada local 3.....	109
Figura 115 - Tensão residual axial no rebite .....	110
Figura 116 - Força de reação .....	111
Figura 117 - Valor de tensão nas chapas .....	111
Figura 118 - Valor de tensão nos rebites .....	112
Figura 119 - Valor de tensão na junta completa.....	112
Figura 120 - Detalhe da deformação da junta após aplicação do deslocamento.....	113
Figura 121 - Valor máximo da tensão na junta .....	113
Figura 122 - Local da tensão máxima na chapa superior .....	114
Figura 123 - Local da tensão máxima na chapa inferior .....	114
Figura 124 - Elementos utilizados para medição dos valores de deformação.....	115
Figura 125 - Posição dos extensômetros no ensaio (adaptado de SPINELLI, 2004).....	115
Figura 126 - Resultado de vida à fadiga.....	116
Figura 127 - Local da vida mínima da junta.....	117
Figura 128 - Local crítico à fadiga na chapa superior .....	117
Figura 129 - Tensão radial residual .....	118
Figura 130 - Tensão axial residual .....	119

Figura 131 - Resultado de vida em fadiga para força de aperto baixa .....	119
Figura 132 - Local crítica à fadiga para força de aperto baixa.....	120
Figura 133 - Tensão residual radial .....	121
Figura 134 - Tensão residual axial .....	121
Figura 135 - Resultado da vida em fadiga.....	122
Figura 136 - Local crítico à fadiga .....	123
Figura 137 - Gráfico da intensidade da força de aperto x vida em fadiga.....	124



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transmissão de carga (adaptado de MÜLLER, 1995).....	38
Tabela 2 - Elementos sólidos de 1ª e 2ª ordem.....	57
Tabela 3 - Propriedades da liga de Alumínio 2024-T3 (MATWEB, 2011).....	63
Tabela 4 - Propriedades da liga de Alumínio 2117-T4 (MATWEB, 2011).....	64
Tabela 5 - Coeficientes do fator de superfície (adaptado de NORTON, 2004).....	97
Tabela 6 - Fatores de confiabilidade (adaptado de NORTON, 2004).....	98
Tabela 7 - Valores de deformação experimentais e simulados ( $\times 10^{-6}$ ).....	116
Tabela 8 – Valores comparativos de vida em fadiga.....	123

## LISTA DE SÍMBOLOS

$p$	Passo entre as colunas de rebites
$s$	Passo entre rebites
$t$	Espessura da chapa
$P$	Carga
$W$	Largura da chapa
$E$	Módulo de elasticidade
$I$	Momento de Inércia
$l$	Comprimento da viga
$\sigma_{total}$	Tensão total
$\sigma_n$	Tensão normal
$\sigma_{MS}$	Tensão do momento secundário
$\varepsilon$	Deformação transversal
$\sigma_r$	Tensão na direção radial
$\sigma_\theta$	Tensão na direção tangencial
$p_{furo}$	Pressão aplicada na face interna do furo
$r$	Distância do centro do furo até o ponto de medição
$R_0$	Raio do furo
$F_0$	Força total transferida
FBR	Força de esmagamento ( <i>bearing load</i> )
FFR	Força de atrito devido aos rebites ( <i>friction load</i> )
FBP	Força de atrito entre as chapas ( <i>bypass load</i> )
$N$	Número de ciclos
$S_{ut}$	Tensão última à tração
$\Delta\sigma$	Intervalo de tensões
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima
$\sigma_a$	Amplitude da variação de tensão
$\sigma_m$	Tensão média
$R$	Razão de tensão
$A$	Razão de amplitude
$S_e$	Limite de fadiga corrigido
$S_e'$	Limite de fadiga teórico
$C_{carregamento}$	Fator de correção do carregamento
$C_{tamanho}$	Fator de correção do tamanho
$C_{superfície}$	Fator de correção da superfície
$C_{temperatura}$	Fator de correção da temperatura
$C_{confiabilidade}$	Fator de correção da confiabilidade

$K_t$	Fator de concentração de tensão normal teórico
$K_{ts}$	Fator de concentração de tensão cisalhante teórico
$K_f$	Fator de concentração de tensão em fadiga
$S_y$	Tensão de escoamento
$\Delta S$	Variação de tensão
$\sigma_{sq}$	Tensão de aperto
$N_f$	Número de ciclos até a falha
$F_1, F_2$	Força
$L_1$	Comprimento da barra prismática
$A_0$	Área
$x_1, x_2$	Distância no eixo x
$u_1, u_2$	Deslocamento do nó da direção x
$\delta$	Deslocamento
$k$	Rigidez
$\{Q\}$	Vetor das forças nodais dos elementos
$[k]$	Matriz de rigidez
$\{q\}$	Vetor dos deslocamentos nodais dos elementos
$S$	Tensão
$\varepsilon$	Alongamento
$L$	Comprimento da junta
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_{radialfuro}$	Tensão residual radial no furo
$\sigma_{y-2024-T3}$	Tensão de escoamento da liga de alumínio 2024-T3
$S_f$	Resistência à fadiga corrigida
$k_f$	Fator de resistência à fadiga
$A_1$	Coefficiente para equação do fator de superfície
$b$	Coefficiente para equação do fator de superfície
$\sigma_{y-materialchapa}$	Tensão de escoamento do material da chapa
$\sigma_{y-2117-T4}$	Tensão de escoamento da liga de alumínio 2117-T4
$F_t$	Força total aplicada
$S_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima
$S_{f'}$	Resistência à fadiga teórica

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Objetivos e justificativas .....	24
1.1.1 Objetivo geral .....	24
1.1.2 Objetivo específico .....	24
1.2 Revisão bibliográfica.....	25
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	29
2.1 Juntas rebitadas.....	29
2.1.3 Variáveis geométricas .....	31
2.1.4 Momento secundário .....	32
2.1.5 Cálculo do momento secundário – aproximação não linear.....	33
2.1.6 Processo de rebitagem .....	34
2.1.7 Tensão residual devido ao processo de rebitagem .....	36
2.1.8 Transferência de carga na junta rebitada sobreposta .....	37
2.2 Fadiga .....	39
2.2.1 Mecanismos de falha por fadiga.....	40
2.2.2 Regimes de fadiga .....	40
2.2.3 Carregamentos cíclicos.....	41
2.2.4 Critérios para estimar a falha por fadiga .....	42
2.2.5 Concentradores de tensão .....	43
2.2.6 Critérios de falha .....	44
2.3 Fadiga em juntas rebitadas .....	46
2.3.1 Efeito da força de aperto na vida à fadiga de juntas.....	49
2.4 Método dos elementos finitos.....	50
2.4.1 Definição .....	51
2.4.2 Elemento barra – Matriz de rigidez .....	53
2.4.3 Elementos sólidos.....	56
2.4.4 Etapas da análise.....	57
2.5 Fadiga em elementos finitos .....	58
2.5.1 Propriedades de fadiga do material .....	58
2.5.2 Análise de fadiga e carregamento.....	59
2.5.3 Resultados.....	61

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 Corpo de prova da junta sobreposta .....	62
3.2 Ensaio monotônico de tração.....	64
4 MODELAGEM DA JUNTA REBITADA SOBREPOSTA .....	67
4.1 Modelagem da junta .....	67
4.2 Malha.....	75
4.3 Contato .....	82
4.4 Definição dos estágios da análise .....	86
4.5 Primeira análise – Força de aperto média.....	87
4.5.1 Primeiro estágio – Análise de interferência.....	87
4.5.1.1 Contato .....	88
4.5.1.2 Condições de contorno .....	90
4.5.2 Segundo estágio – Aplicação do deslocamento.....	94
4.5.2.1 Contato .....	95
4.5.2.2 Condições de contorno .....	95
4.5.3 Terceiro estágio – fadiga .....	96
4.5.3.1 Fator de resistência à fadiga (kf) .....	97
4.5.3.2 Parâmetros da análise de fadiga .....	99
4.6 Segunda análise – Força de aperto baixa.....	100
4.6.1 Primeiro estágio – Análise de interferência.....	100
4.7 Terceira análise – Força de aperto alta .....	102
4.7.1 Primeiro estágio – Análise de interferência.....	102
4.8 Solução .....	104
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	107
5.1 Primeira análise – Força de aperto média.....	107
5.1.1 Primeiro estágio – Análise de interferência.....	107
5.1.2 Segundo estágio – Aplicação do deslocamento.....	110
5.1.3 Terceiro estágio – Fadiga .....	116
5.2 Segunda análise – Força de aperto baixa.....	118
5.2.1 Primeiro estágio – Análise de interferência.....	118
5.2.2 Terceiro estágio – Fadiga .....	119
5.3 Terceira análise – Força de aperto alta .....	120
5.3.1 Primeiro estágio – Análise de interferência.....	120

5.3.2 Terceiro Estágio - Fadiga .....	122
5.4 Resultados comparativos de vida em fadiga .....	123
6 CONCLUSÕES .....	125
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	126
REFERÊNCIAS .....	127

## 1 INTRODUÇÃO

Juntas rebitadas sobrepostas compostas de chapas de ligas de alumínio são largamente adotadas no projeto de estruturas aeronáuticas. A utilização de aeronaves para transporte civil aumentou consideravelmente na segunda metade do século passado e o número de vôos a que essas aeronaves devem ser solicitadas é, atualmente, entre 50.000 a 100.000, segundo Rijck et al (2007).

Este aumento tem como resultado a necessidade de uma maior atenção na durabilidade e tolerância ao dano no projeto das juntas rebitadas de fuselagens aeronáuticas. Além disso, a operação da aeronave requer uma manutenção fácil e inspeções limitadas, e a indústria aeronáutica necessita possuir uma produção simples e com bom custo-benefício.

No projeto de estruturas aeronáuticas, as juntas são elementos reconhecidos como críticos à fadiga, devendo ser considerado que suas propriedades sob este aspecto são afetadas por diversas variáveis como material e tipo do rebite, material da chapa, processo de produção, geometria, entre outros.

Desses fatores, a influência do aumento da força de aperto na instalação do rebite no comportamento à fadiga, é bem documentada na literatura. Durante o processo de rebitagem, a expansão da haste do rebite produz uma interferência que resulta em um campo de tensões residuais compressivas em torno do furo, benéfico para a resistência à fadiga. Estudos sugerem que esse aumento pode ampliar a vida da peça de três a dez vezes, segundo Castro (2007).

O método dos elementos finitos tem sido cada vez mais difundido e utilizado em diversas áreas de aplicação. Tendo em vista que atualmente a indústria busca a otimização do projeto e de suas peças em relação ao desempenho, peso, custo, tempo, entre outros pontos, este método é amplamente utilizado no cálculo e dimensionamento de componentes.

Assim sendo, o método dos elementos finitos exerce papel fundamental na análise de fadiga, calculando vida, regiões críticas, entre outras variáveis, otimizando o tempo de projeto e garantido um cálculo mais preciso.

O presente trabalho estuda o comportamento de uma junta rebitada sobreposta de uso aeronáutico, utilizando o método dos elementos finitos para definir as etapas de cálculo para a análise de fadiga e comparar a vida em fadiga da junta para diferentes forças de aperto.

## 1.1 Objetivos e justificativas

Em estudo iniciado por Spinelli (2004), uma junta rebitada sobreposta de uso aeronáutico foi submetida a um ensaio de tração monotônico e através da análise por elementos finitos, esse teste foi reproduzido de modo a se obter a melhor correlação do modelo real para a simulação.

Devido à importância da solicitação dinâmica dessa junta, a presente dissertação tem como objetivo simular a junta rebitada à fadiga, utilizando o software de elementos finitos *ANSYS*.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é realizar a simulação em elementos finitos da junta rebitada à fadiga, definindo as etapas necessárias para esse propósito. A primeira análise é feita em três estágios. Inicialmente o processo de rebitagem é simulado através de uma análise de interferência, em seguida é feita a análise estática, de forma a representar o teste experimental realizado por Spinelli (2004). Após a validação do modelo, é realizado o terceiro estágio que consiste na análise de fadiga na junta, onde são obtidos os resultados de vida e locais críticos.

### 1.1.2 Objetivo específico

Como mostram estudos, a força de aperto aplicada no processo de rebitagem é uma variável que modifica o valor da vida em fadiga de juntas, pelo fato de criar um campo de tensões residuais de compressão. O objetivo específico da dissertação é verificar a influência da variação dos valores da análise de interferência na vida em fadiga da peça, realizando mais duas análises com valores resultantes de tensões residuais maiores e menores em relação à primeira simulação.



## 1.2 Revisão bibliográfica

Os estudos significativos sobre o tema abordado na presente dissertação estão mostrados a seguir.

Müller (1995) realizou uma ampla investigação em juntas rebitadas sobrepostas, incluindo análises teóricas e experimentais, cálculos e experimentos de fadiga e tensão residual. Foram estudados a liga de alumínio 2024-T3 e o Glare3, que é um laminado de fibras metálicas com boa resistência à fadiga. Estudou a importância da força de aperto, testou a flexibilidade do rebite, realizou medições do momento secundário, obtendo dados importantes para a literatura. Uma maior atenção foi dada para a expansão do furo do rebite durante o aperto na rebiteagem, aspectos da transmissão de força entre rebites e as diferentes colunas, efeitos de borda e dano por fadiga.

Algumas das conclusões do trabalho foram o aprimoramento da vida à fadiga com o aumento da força de aperto, o efeito dessa variação na localização da trinca de fadiga e o crescimento da trinca ao redor do furo do rebite.

Fung e Smart (1997) realizaram um estudo numérico paramétrico, onde juntas rebitadas de uma e duas colunas de rebites foram submetidas a carregamentos alternados e foram consideradas não-linearidade geométrica e plasticidade. As tensões em torno do furo do rebite e as formas deformadas das juntas foram obtidas, juntamente com os efeitos da variação da força de aperto, interferência do rebite, coeficiente de atrito entre as peças e a geometria das juntas quando essas são submetidas a vários históricos de carregamentos. No estudo, encontraram os efeitos da mudança dessas variáveis de acordo com dados publicados na literatura.

Em outro trabalho, Fung e Smart (1997) pesquisaram a previsão da vida em fadiga para juntas rebitadas com uma e duas fileiras de rebites, aplicando leis de fadiga, utilizando tanto a faixa de valores local total de deformação quanto à tensão efetiva obtida através de análises de elementos finitos e dados obtidos de testes de fadiga em corpos de prova de chapas com furo. Os modelos de elementos finitos das juntas foram submetidos a um carregamento cíclico alternado, considerando plasticidade e não-linearidade geométrica. Realizaram também uma análise metalográfica da fratura, que mostrou evidências de dano por fricção.

Spinelli (2004) estudou dois tipos de juntas rebitadas, sobrepostas e de topo simples. Realizou a modelagem das juntas utilizando software de elementos finitos e através das simulações, reproduziu, de forma satisfatória, o comportamento das juntas quando submetidas

a esforços de tração uniaxial. Realizou a correlação dos modelos numéricos com testes experimentais, utilizando dados de extensômetros e fotoelasticidade. Para a correlação foram propostas diversas modelagens do rebite, concluindo que aquela que resulta em valores mais próximos do real é a modelagem utilizando elementos sólidos para os rebites e chapas.

Rans, Straznicky e Alderliesten (2007) apresentaram em seu estudo, através de uma simulação de uma junta rebitada utilizando um modelo tridimensional de elementos finitos, o impacto da instalação do rebite nos componentes de tensão residual devido ao aperto e de tensão devido ao momento secundário, resultante da excentricidade da junta. Realizaram também uma investigação do desempenho resultante à fadiga.

Analysaram a junta através de um modelo de dois estágios, no primeiro, foi simulado o processo de rebiteagem em uma junta com duas colunas de rebites e no segundo estágio, foi aplicado um carregamento uniaxial na junta.

Os resultados encontrados forneceram dados sob a formação desses componentes de tensão. A compressão através da espessura das chapas unidas durante a rebiteagem foi identificada como uma importante contribuição para a formação da tensão residual abaixo da cabeça do rebite. A tensão devido ao momento secundário nas chapas mostrou-se influenciada principalmente pela geometria da contra-cabeça do rebite.

Castro *et al* (2007) realizaram uma pesquisa do comportamento à fadiga de diferentes tipos de amostras, aumentando o nível de complexidade geométrica e mecânica. Abordaram questões do efeito da tensão residual devido ao processo de trabalho a frio nos furos das chapas, transferência de carga e fator de calibração da intensidade da tensão de juntas rebitadas. Para estudarem experimentalmente o campo de tensões residuais, criado pela expansão a frio, utilizaram técnicas de raio-X.

Realizaram uma análise de elementos finitos dos diferentes detalhes estruturais, de modo a modelar a tensão residual, o fator de intensidade de tensão, transferência de carga e propagação de trincas de fadiga. Os testes de fadiga foram complementados por análises de amostras testadas após a falha, verificando a superfície de fratura, a fim de medir a localização e a extensão do dano de fadiga e o espaçamento entre as estrias da região que sofreu ruptura.

Os resultados encontrados pelos testes mostraram que a tensão residual induzida pelo processo de trabalho a frio melhora de forma significativa a vida em fadiga da peça. Essa tensão residual também diminui o espaçamento entre as estrias, o que indica um efeito de travamento na taxa de propagação da trinca. Concluíram que resultados aceitáveis de análises

de problemas complexos podem ser obtidos utilizando simplificações como modelos bidimensionais, ou modelos que só consideram o modo um de propagação de trinca.

Rijck *et al* (2007) investigaram a relação entre a força de aperto e as dimensões da contra-cabeça do rebite durante o processo de rebitagem de uma junta com aperto controlado. As medições do diâmetro e da altura da contra-cabeça permitiram a estimativa da força de aperto aplicada para o controle de qualidade do processo de rebitagem com relação às propriedades da junta.

Realizaram diversos testes com variados tipos de materiais, diâmetro de rebites e material das chapas de juntas rebitadas. Desenvolveram, então, uma equação derivada da força de aperto em função do diâmetro da contra-cabeça e outra da força de aperto em função da altura da contra-cabeça, assumindo volume constante do rebite durante a deformação plástica. De forma empírica, duas constantes do material nas equações foram determinadas para os materiais do rebite. Obtiveram uma correlação satisfatória dos resultados.

Rans, Alderliesten e Straznicky (2009) utilizaram técnicas de fractografia para avaliar a influência da força de aperto e do campo de tensão residual resultante em amostras de juntas rebitadas, após a ruptura no comportamento da trinca. Os resultados demonstraram que, dentro da faixa de valores de forças de aperto no rebite estudado, uma redução de três vezes na taxa de crescimento da trinca é alcançada em forças de aperto altas, o que representa uma melhoria significativa na tolerância ao dano da junta.

Skorupa *et al* (2009) realizaram testes experimentais, em amostras de juntas rebitadas sobrepostas simples, da influência de diversos fatores de produção no comportamento à fadiga destas, sob condições de carregamento com amplitude constante. Nos testes foram utilizadas geometrias representativas de juntas longitudinais da fuselagem de aeronaves. Para a pesquisa, consideraram como variáveis o material e tipo de rebite, material das chapas e a força de aperto do processo de instalação dos rebites. Os resultados dos testes com ligas de alumínio de diferentes fornecedores tanto dos rebites quanto das chapas foram comparados.

As dimensões encontradas da contra-cabeça do rebite para uma faixa de valores de forças de aperto e os resultados dos testes de fadiga para rebites instalados com variação dessa força, indicaram que a tensão de aperto é, além das dimensões da contra-cabeça, um padrão seguro para a qualidade da instalação do rebite. Neste trabalho, ao variarem os tipos de rebites, notaram um desempenho melhor à fadiga utilizando rebites com compensador em comparação com os de cabeça redonda e universal. Concluíram que a razão básica para esse

resultado é o melhor preenchimento do furo. Também observaram que, no crescimento da trinca, a inicialização é a etapa que consome a maior parte da vida em fadiga da junta.

Baha, Klapp e Hesebeck (2010) estudaram, utilizando o método dos elementos finitos, os fenômenos que ocorrem durante o processo de instalação do rebite e a previsão das propriedades mecânicas de juntas rebitadas dependendo dos parâmetros de instalação e características das chapas. A simulação consistiu em um rebite sólido universal e chapas da liga de alumínio 2024-T351. O modelo do processo de instalação desenvolvido foi validado através da comparação dos resultados simulados com diferentes testes experimentais, com relação às características geométricas da contra-cabeça, as curvas de força-deslocamento e a deformação residual superficial de uma das chapas.

Com a simulação do processo de rebitagem, que considera deformação plástica em níveis altos e o estado de tensões residuais causadas pelo processo de instalação, obtiveram uma base para a previsão das propriedades mecânicas da junta rebitada.

Boni e Lanciotti (2011) submeteram amostras rebitadas de juntas de duplo cisalhamento a testes de fadiga, utilizando a liga de alumínio 7075-T73, com espessura de 3 mm. As amostras passaram por tratamento superficial para proteção. Em alguns corpos de prova, foram utilizados selantes nas superfícies de contato das chapas. Obtiveram como resultado, uma resistência menor das amostras com selantes em relação às amostras sem selantes. No estudo, observaram os modos de falha, encontrando nucleação da trinca de fadiga fora do furo, em um local próximo aos rebites nas amostras sem selantes e nas amostras com selante a nucleação se deu em ambos os lados dos furos.

Realizaram também análises utilizando o método dos elementos finitos, variando o coeficiente de atrito entre as superfícies das chapas em contato, confirmando a localização diferente das áreas críticas à fadiga de amostras seladas e não seladas.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Juntas rebitadas são amplamente utilizadas na indústria, possuindo diversos tipos e configurações. O processo de rebitagem é uma variável importante para o estudo dessas juntas, causando tensões residuais e influenciando as características do produto final. As juntas rebitadas sobrepostas possuem aplicações onde são encontradas cargas dinâmicas, e por isso devem ser bem projetadas à fadiga.

Atualmente, no projeto de peças e componentes, o uso do método dos elementos finitos tem sido cada vez maior e suas aplicações mais amplas, incluindo a análise de fadiga.

### 2.1 Juntas rebitadas

A união de peças feitas por elementos de fixação pode ser móvel ou permanente. Quando a união é do tipo móvel, os elementos de fixação podem ser colocados e retirados do conjunto sem causarem dano às peças que foram unidas. Exemplos desse caso são as uniões feitas com parafusos, porcas e arruelas. No tipo de união permanente, os elementos de fixação uma vez instalados, não podem ser retirados sem que fiquem inutilizados. É o caso de uniões feitas com rebites.

O mecanismo de fixação dos rebites é através de deformação plástica do elemento, retendo duas ou mais chapas planas ou curvas. Quando a peça é solicitada, os rebites transmitem a carga entre as partes envolvidas.

No caso de juntas rebitadas, pode-se dividir em duas categorias:

Juntas sobrepostas → As peças a serem unidas estão sobrepostas, conforme Figura 1 e Figura 2:

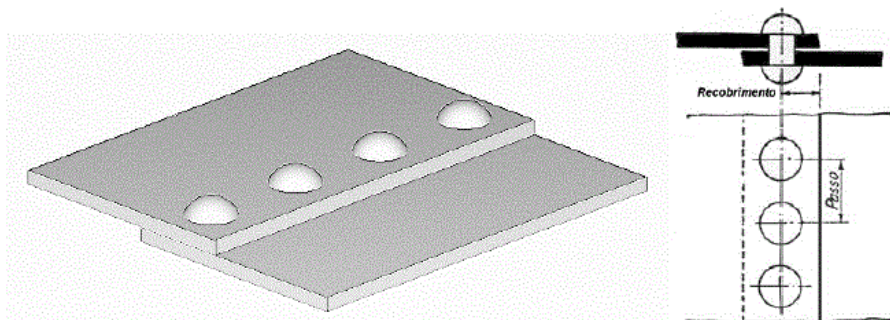


Figura 1 - Junta sobreposta com uma fileira de rebites

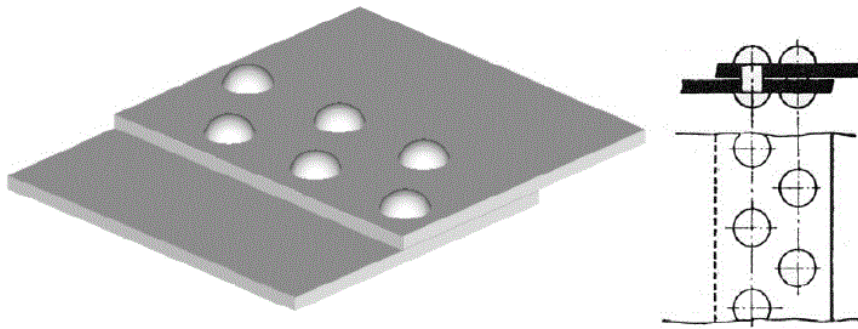


Figura 2 - Junta sobreposta com 2 fileiras de rebites

Juntas de topo → As peças são colocadas de topo e a união é feita por intermédio de uma ou duas chapas suplementares, denominadas cobrejuntas, podendo ser simples ou duplas, como mostram as Figuras 3 e 4:

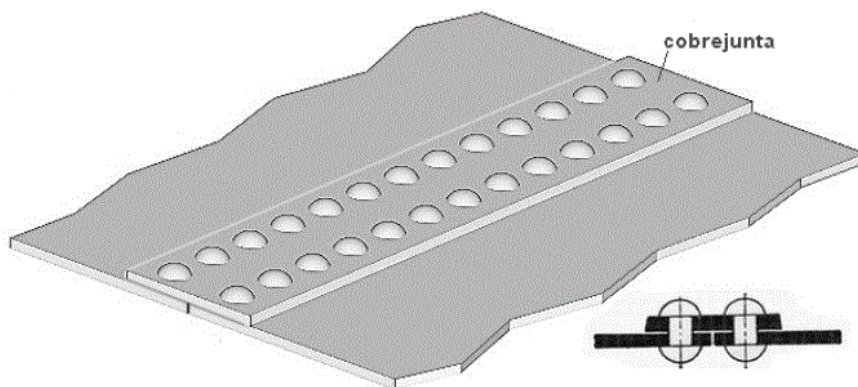


Figura 3 - Junta de topo: cobrejunta simples

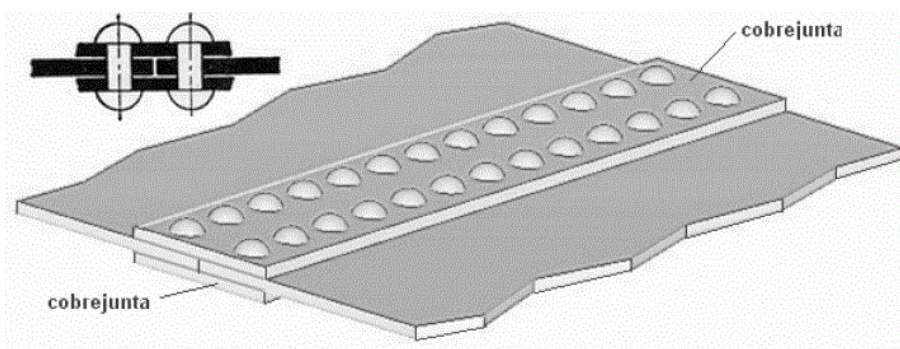


Figura 4 - Junta de topo: cobrejunta dupla

Conforme Müller (1995), as juntas rebitadas são muito presentes em aeronaves. A estrutura completa de uma aeronave é fabricada através de várias peças, onde as chapas são unidas para formar pré-montagens que devem então ser unidas para formar montagens maiores e por fim, é obtida a estrutura completa.

As juntas presentes na fuselagem de aviões usualmente são juntas de topo circunferenciais e juntas sobrepostas longitudinais. Essas últimas são o objeto de investigação da presente dissertação.

Alguns fatores que influenciam sua aplicação são:

- Baixo custo de produção e possibilidade de automação do processo de rebiteagem;
- Boas propriedades de preenchimento dos furos por rebites sólidos;
- Facilidade de inspeção;
- Alta confiabilidade.

Porém, existem desvantagens, como os aspectos a seguir:

- Redução da resistência das chapas devido à presença de furos;
- Problemas de logística (por exemplo, tratamento térmico dos rebites);
- Necessidade de um projeto cuidadoso.

### 2.1.3 Variáveis geométricas

As principais variáveis geométricas das juntas rebitadas sobrepostas longitudinais estão ilustradas na Figura 5:

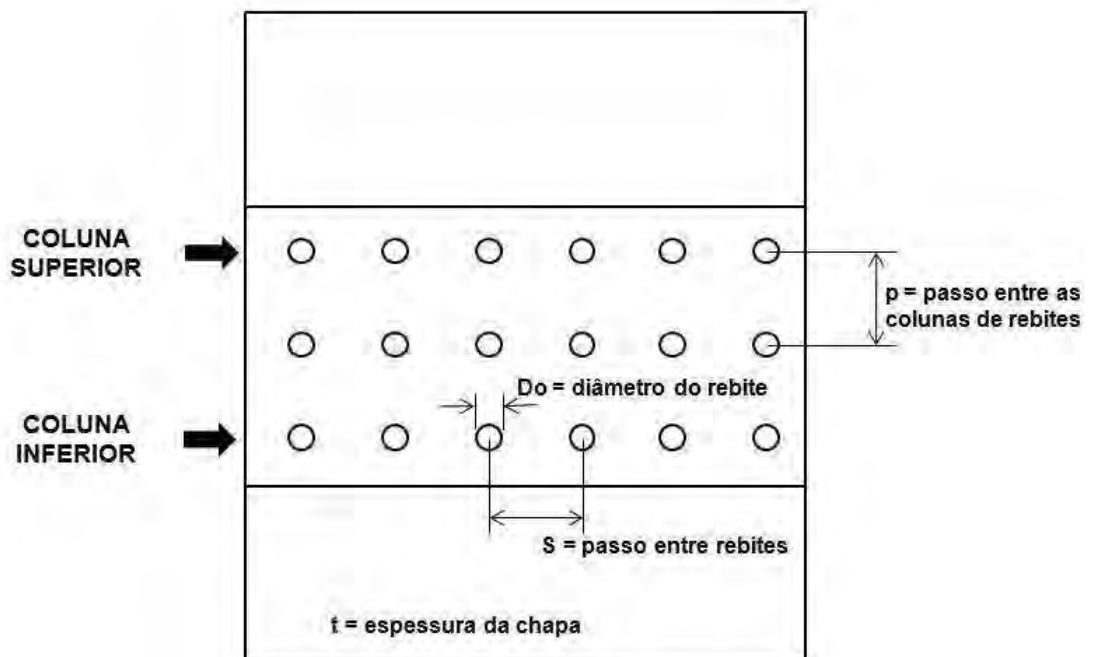


Figura 5 - Variáveis geométricas (adaptado de MÜLLER, 1995)

Outras variáveis importantes são:

- Número de colunas de rebites;
- Padrão dos rebites (em linha, por exemplo).

#### 2.1.4 Momento secundário

A aplicação de uma força normal em juntas sobrepostas resulta em um deslocamento fora do plano, devido à linha neutra da junta possuir uma excentricidade em relação à linha de carga, conforme mostra a Figura 6. Como consequência, ocorre uma flexão nas chapas, ilustrada na Figura 7.

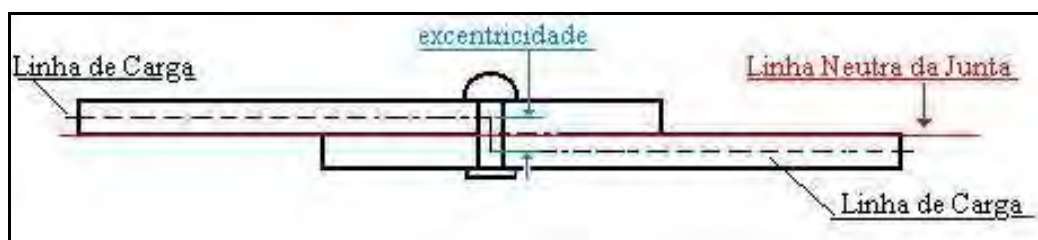


Figura 6 - Excentricidade em juntas rebitadas sobrepostas (SPINELLI, 2004)



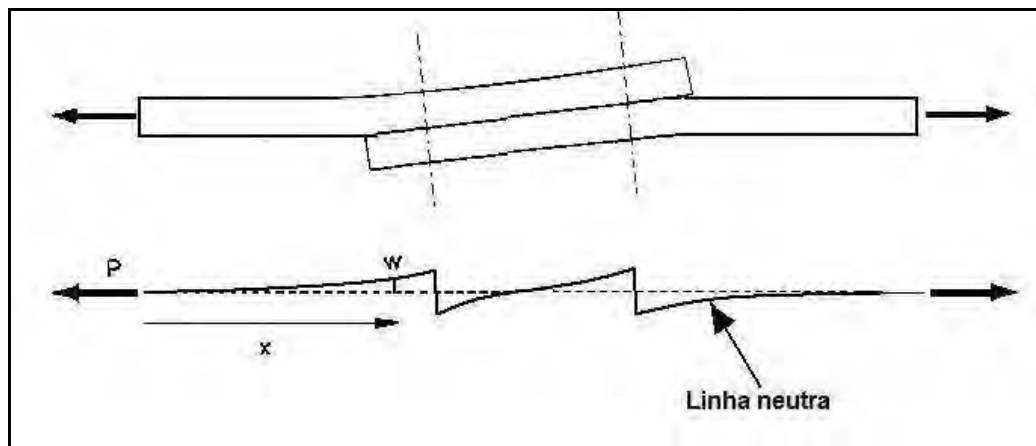


Figura 7 - Momento secundário da junta sobreposta (adaptado de MÜLLER, 1995)

Essa flexão é conhecida como momento secundário e é uma função não linear da força aplicada (SPINELLI, 2004).

Por aumentar a tensão resultante na junta, esse efeito é desfavorável para o projeto. Algumas variáveis que o influenciam são a espessura da chapa e a região sobreposta entre as chapas.

#### 2.1.5 Cálculo do momento secundário – aproximação não linear

Conforme Spinelli (2004) pode-se observar que, na prática, o cálculo para o momento secundário, sem considerar a não-linearidade, não é exato, pois a estrutura não se comporta como um corpo rígido, tendo pequenas deformações ao longo dela. Estas podem gerar grandes deslocamentos na junta e a linha neutra se deformará como mostrado na Figura 7.

Analiticamente é possível calcular esses valores pela teoria da viga elástica. O equacionamento através de diferenciais resulta, segundo Spinelli (2004), na equação (1) que mostra a tensão gerada pelo momento secundário utilizando a aproximação não-linear.

$$\sigma_{MS} = \frac{P}{W \cdot t} \cdot \left[ \frac{6 \cdot E \cdot I}{2 \cdot E \cdot I + P \cdot l^2} \right] \quad (1)$$

Sendo:

$\sigma_{MS}$  : Tensão gerada pelo momento secundário;

P: Carga normal aplicada;

W: Largura da chapa;

t: Espessura da chapa;

E: Módulo de elasticidade do material;

I: Momento de inércia da chapa;

l: comprimento do ponto de deflexão ao ponto no qual a deflexão é igual a zero.

Assim, a tensão total ( $\sigma_{total}$ ) na junta, é definida pela equação (2).

$$\sigma_{total} = \sigma_n \pm \sigma_{MS} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_n$  : tensão normal aplicada na junta.

### 2.1.6 Processo de rebitagem

Para a compreensão do comportamento das juntas rebitadas, deve-se analisar o processo envolvido. O aperto do rebite envolve um fluxo plástico neste que, enquanto é comprimido, gera uma expansão radial na haste.

A Figura 8 mostra esquematicamente quatro estágios que podem ser distinguidos durante a instalação do rebite.

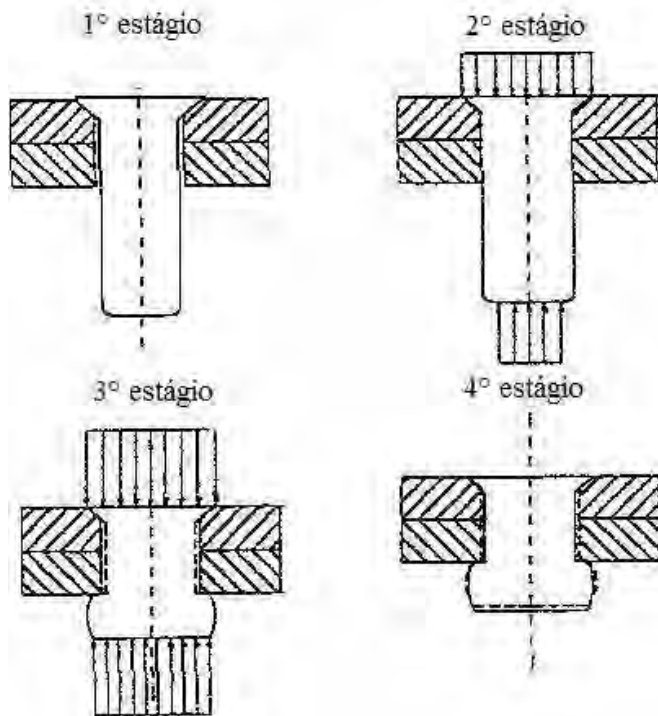


Figura 8 - Estágios do processo de rebiteagem (adaptado de MÜLLER, 1995)

1º estágio: O diâmetro do furo é feito inicialmente com uma folga em relação ao diâmetro nominal do rebite. Assim que a força de aperto é aplicada, a compressão axial do rebite resulta em uma expansão radial. O diâmetro da haste do rebite aumenta com o crescimento da magnitude da força de aperto, até tocar a face do furo. A deformação transversal pode ser definida, considerando uma folga inicial de 0,1 mm, com valor aproximado segundo a equação (3).

$$\varepsilon \cong \frac{0,1}{D} \geq 2\% , \text{ para } D \leq 5mm \quad (3)$$

2º Estágio: O segundo estágio é marcado pelo aumento da tensão no material da chapa devido à expansão do rebite em contato com a face do furo. Com a resistência maior no sentido radial, inicia-se a deformação da extremidade livre do rebite. Como resultado, a contra-cabeça começa a ser formada. Ao mesmo tempo, o aumento da deformação plástica do rebite irá também aumentar a pressão radial do furo.

3º estágio: Com a formação da contra-cabeça, parte da força de aperto passa a ser transferida pela superfície de contato das chapas.

4º estágio: O quarto estágio é a remoção da força de aperto. Durante esse estágio, os materiais do rebite e da chapa retornam elasticamente e a fixação é finalizada.

### 2.1.7 Tensão residual devido ao processo de rebitagem

Ao final da rebitagem haverá a presença de tensões residuais, como consequência da força de aperto aplicada no processo, que são muito relevantes para o estudo do comportamento de juntas rebitadas.

Para uma chapa (considerada infinita) com um furo, conforme Müller (1995), uma pressão aplicada na face interna do furo pode representar a pressão de um rebite sobre a chapa devido ao seu aperto. A solução elástica para esse problema é mostrada nas equações (4) e (5). A distância do centro do furo com raio  $R_0$  é definida como  $r$ , e a pressão radial na face do furo por  $P_{furo}$ .

As tensões na direção radial ( $\sigma_r$ ) e tangencial ( $\sigma_\theta$ ) possuem magnitudes iguais e sinais opostos.

$$\sigma_r = -P_{furo} \cdot \left( \frac{r}{R_0} \right)^{-2} \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = P_{furo} \cdot \left( \frac{r}{R_0} \right)^{-2} \quad (5)$$

A tensão máxima ocorre na borda do furo, onde  $r = R_0$ ,  $\sigma_r = -\sigma_\theta = P_{furo}$ . As tensões diminuem quanto mais distante for a região em relação à borda do furo.

Essa tensão residual compressiva das juntas rebitadas possui aspectos benéficos para o conjunto. Conforme Skorupa *et al* (2009), com o aumento da força de aperto, que gera esse campo de tensões, encontra-se um aumento da vida à fadiga e um melhor preenchimento do furo. Isso previne uma inclinação do rebite, sendo favorável para a transmissão da força e diminuindo a sensibilidade para o acabamento da superfície do furo.

### 2.1.8 Transferência de carga na junta rebitada sobreposta

Segundo Müller (1995), a distribuição da força entre as colunas dos rebites depende da variação de rigidez ao longo da junta sobreposta.

A transferência de carga pode ser dividida como mostrada a seguir:

#### CHAPAS

1) Força de atrito entre as superfícies das chapas em contato – *bypass load* (**F<sub>BP</sub>**);

#### REBITES

2) Força de esmagamento do corpo do rebite contra as faces dos furos das chapas – *bearing load* (**F<sub>BR</sub>**);

3) Força de atrito entre as superfícies das chapas na região de influência da compressão do rebite – *friction load* (**F<sub>FR</sub>**)

A soma das forças transmitidas pelo rebite – **F<sub>BR</sub>** e **F<sub>FR</sub>** – é denominada *load-transfer* (**F<sub>LT</sub>**). Assim, é determinada a força total (**F<sub>0</sub>**), conforme equação (6)

$$F_0 = F_{BP} + F_{LT} \quad (6)$$

A Figura 9 mostra essas componentes em uma junta rebitada.

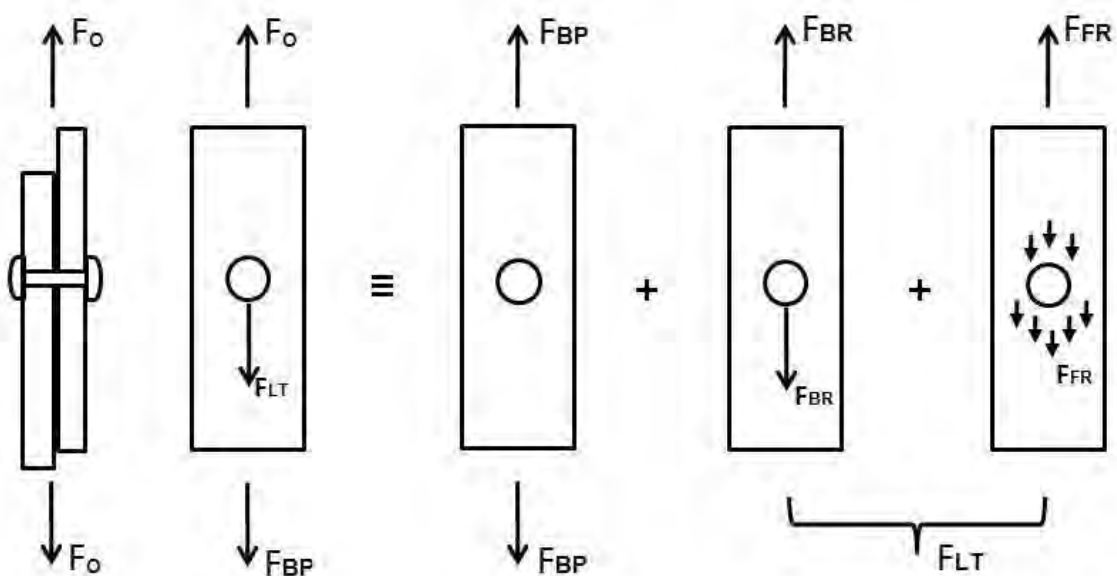


Figura 9 - Transmissão de carga na junta (adaptado de XAVIER, 2006)

Através de experimentos, resultados encontrados por Müller (1995) mostram que para uma junta rebitada sobreposta com três colunas de rebites, a coluna superior e a inferior transmitem uma proporção maior de força, como mostra a Figura 10.

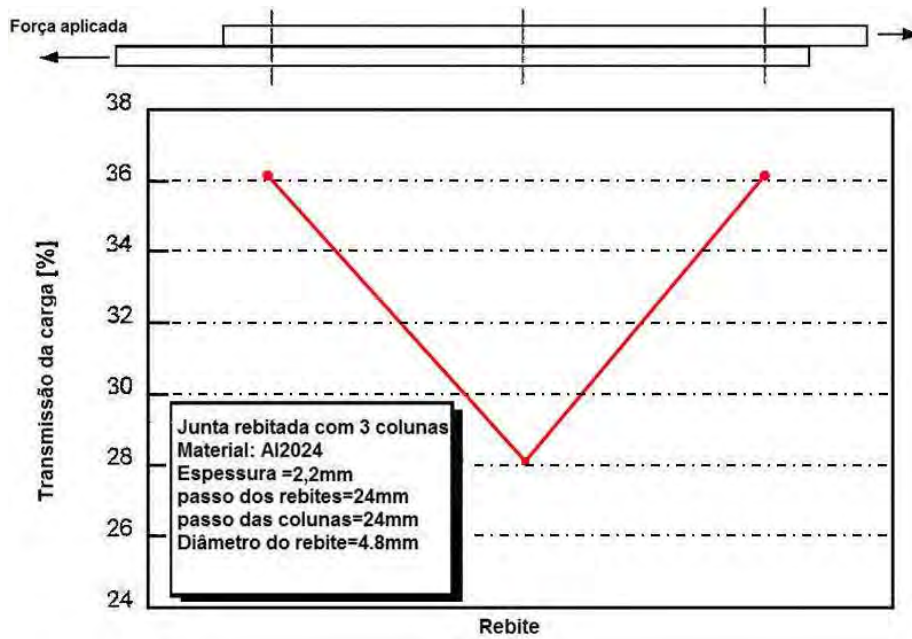


Figura 10 - Distribuição transferência de carga (adaptado de MÜLLER, 1995)

Em outro estudo realizado por Müller (1995), utilizando o método dos elementos finitos, foram encontrados valores de aproximadamente 35% da carga transmitida pelas colunas superior e inferior e 30% pela coluna do meio, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Transmissão de carga (adaptado de MÜLLER, 1995)

MATERIAL DA CHAPA	DIMENSÕES [mm]			PASSO [mm]	DISTRIBUIÇÃO DA FORÇA TRANSFERIDA-MODELO MEF [%]
	t	Do	Do/t		
2024-T3	1.0	4.0	4.0	20	35.0 - 30.0 - 35.0
	1.27	4.1	3.2	24	35.2 - 29.6 - 35.2
	2.2	4.8	2.2	24	34.3 - 30.4 - 34.8
3 COLUNAS DE REBITES, 8 REBITES POR COLUNA					
PASSO DO REBITE = PASSO DA COLUNA					
COMPRIMENTO DA AMOSTRA = 472 mm					

## 2.2 Fadiga

Conforme Norton (2004), a fadiga é um fenômeno no qual uma peça pode sofrer fratura quando submetida a cargas dinâmicas que geram tensões menores do que as necessárias para causar falha em uma aplicação estática, isto é, dentro do regime elástico do material. A fadiga deve ser estudada com atenção nos projetos de peças mecânicas, pois, a maioria das falhas ocorre devido a esse efeito.

O fenômeno da fadiga foi observado pela primeira vez em meados de 1800, quando engenheiros notaram falhas em eixos de vagões ferroviários depois de um curto período de solicitação. Esses eixos eram constituídos de material dúctil, porém, falhavam com fraturas repentinas e características de materiais frágeis. Eles haviam sido projetados estaticamente, pois, na época, as cargas dinâmicas eram um fenômeno novo a ser observado. Como esses eixos eram fixos às rodas, giravam junto com elas, possuindo uma solicitação de carregamento alternado.

August Wöhler realizou a primeira investigação científica sobre a falha por fadiga e suas descobertas foram publicadas em 1870, onde foi identificado o número de ciclos de tensão variante no tempo como o causador do colapso e a descoberta de uma tensão limite de resistência à fadiga. O diagrama tensão-vida (S-N) ou Curva de Wöhler, mostrada na Figura 11, tornou-se uma maneira padronizada de caracterizar os materiais à fadiga (NORTON, 2004).

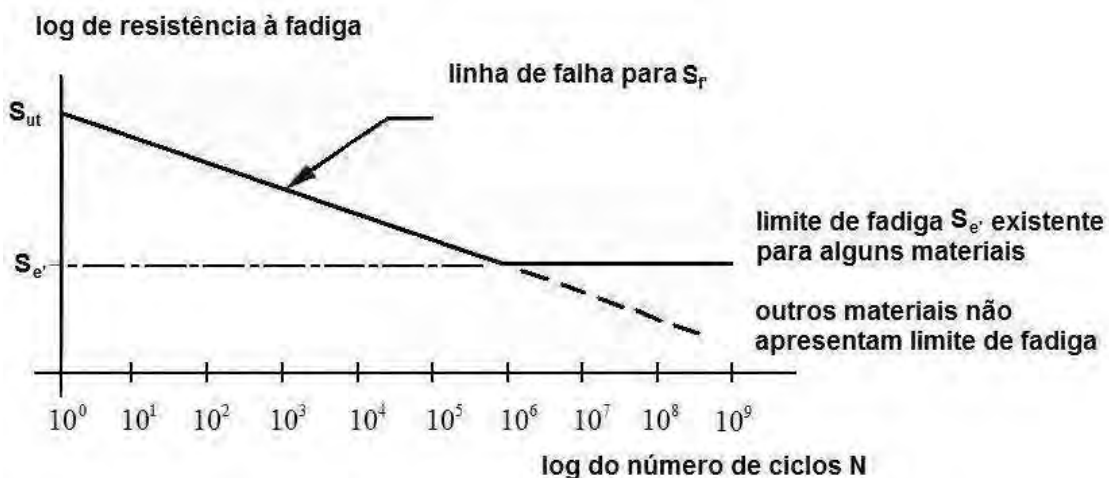


Figura 11 - S-N ou Curva de Wöhler (adaptado de NORTON, 2004)

Nesta curva é possível observar que a resistência à fadiga decai linearmente em função de  $N$ , até atingir um ponto próximo a  $10^6$  ciclos. Essa inflexão define o limite de fadiga  $S_e$ , para o material, que é o nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga.

Porém, nem todos os materiais apresentam esse comportamento. Segundo Norton (2004), alumínio, magnésio, cobre, ligas de níquel, alguns aços inoxidáveis, aços-ligas e de alto carbono, entre outros, exibem curvas S-N onde o decaimento da resistência continua com o aumento de  $N$ , embora a inclinação possa ser menor em valores além de  $10^7$  ciclos, aproximadamente. Para solicitações que necessitem um tempo de operação inferior a  $10^6$  ciclos, é possível definir uma resistência à fadiga, definida como  $S_f$ .

### 2.2.1 Mecanismos de falha por fadiga

As falhas por fadiga iniciam-se através de trincas que podem ser oriundas do processo de fabricação do material ou que se desenvolvem devido a concentradores de tensão. Existem três estágios de falha por fadiga: início da trinca, propagação da trinca e ruptura.

O estágio em que a trinca se inicia pode durar um curto espaço de tempo. Sua propagação possui a característica de ter uma duração maior, já o terceiro estágio de falha, a ruptura, ocorre de forma repentina (NORTON, 2004).

### 2.2.2 Regimes de fadiga

De acordo com Norton (2004), existem dois regimes nos quais as peças solicitadas à fadiga podem estar submetidas, a Fadiga de baixo ciclo e a Fadiga de alto ciclo. Apesar do valor que distingue um do outro não ser exato, assume-se que o regime de alto ciclo se dá quando a fadiga tem início acima de  $10^3$  ciclos. Para esse caso, o modelo de falha por fadiga pela abordagem tensão-vida (S-N) é o mais antigo e frequentemente utilizado. Através desse modelo, que é baseado nas tensões, encontra-se o valor da resistência à fadiga para o material.



### 2.2.3 Carregamentos cíclicos

Dependendo da aplicação do componente, o comportamento do carregamento dinâmico será diferente. Em alguns casos, as cargas possuem uma amplitude ao longo do tempo e frequência bem definidas. Utilizando ondas senoidais para caracterizar os tipos de carregamentos cíclicos, têm-se, com a tensão em função do tempo, as representações conforme Figura 12, de tensão alternada, repetida e pulsante, respectivamente.

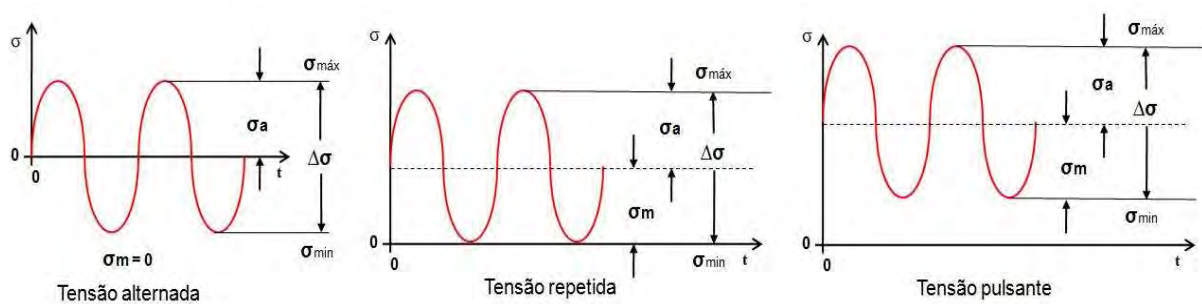


Figura 12 - Funções Tensão-tempo (adaptado de NORTON, 2004)

No carregamento do tipo tensão alternada, o valor médio é igual a zero. Na tensão repetida, a onda varia de zero até um valor máximo tendo, portanto, seu valor médio igual ao da componente alternada. Para a tensão pulsante, todos os valores são diferentes de zero. Os parâmetros dos tipos de carregamentos mostrados, conforme Norton (2004), são definidos nas equações (7), (8), (9), (10) e (11):

Intervalo de tensões ( $\Delta\sigma$ )

$$\Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{mín} \quad (7)$$

Amplitude da variação de tensão ( $\sigma_a$ )

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2} \quad (8)$$

Tensão média ( $\sigma_m$ )

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (9)$$

Razão de tensão ( $R$ )

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

Razão de amplitude ( $A$ )

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (11)$$

#### 2.2.4 Critérios para estimar a falha por fadiga

Segundo Norton (2004) o estudo preciso do comportamento à fadiga de componentes provém principalmente de dados de testes feitos através de ensaios com as montagens em escala real ou com protótipos. Porém, quando não é possível realizá-los, os dados necessários para o cálculo da fadiga são obtidos através de ensaios em corpos de prova. Os valores de resistência ou limite à fadiga encontrados nesses testes devem ser modificados de modo a considerar, para seu valor final, as diferenças entre o corpo de prova e a peça real.

Esse processo é feito para se obter a resistência à fadiga corrigida ou limite de fadiga corrigido, através de fatores de redução. Esses fatores levam em consideração diferenças de condições de carregamentos, tamanho da peça, acabamento da superfície, temperatura de trabalho e confiabilidade. O valor corrigido é dado pela equação (12).

$$\begin{aligned}
 S_e &= C_{\text{carregamento}} \cdot C_{\text{tamanho}} \cdot C_{\text{superfície}} \cdot C_{\text{temperatura}} \cdot C_{\text{confiabilidade}} \cdot S_{e'} \\
 S_f &= C_{\text{carregamento}} \cdot C_{\text{tamanho}} \cdot C_{\text{superfície}} \cdot C_{\text{temperatura}} \cdot C_{\text{confiabilidade}} \cdot S_{f'}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Onde:

$S_e$  : Limite de fadiga corrigido;

$S_{e'}$  : Limite de fadiga teórico;

$S_f$  : Resistência à fadiga corrigida;

$S_{f'}$  : Resistência à fadiga teórica;

$C_{\text{carregamento}}$  : Fator de correção do carregamento;

$C_{\text{tamanho}}$  : Fator de correção do tamanho;

$C_{\text{superfície}}$  : Fator de correção da superfície;

$C_{\text{temperatura}}$  : Fator de correção da temperatura;

$C_{\text{confiabilidade}}$  : Fator de correção da confiabilidade.

Esses fatores são determinados através de gráficos e tabelas tirados de ensaios experimentais para diversos materiais e condições.

### 2.2.5 Concentradores de tensão

Quando uma peça possui descontinuidade na geometria como furos, chanfros, ranhuras, mudanças abruptas de seção transversal, entre outros, ela fica sujeita a uma concentração de tensões nessa região.

Essa característica para carregamentos estáticos pode causar uma deformação plástica localizada, sendo um aspecto crítico para o projeto. Em casos de cargas dinâmicas, esse efeito é ainda maior, pois na ruptura por fadiga, materiais dúcteis têm comportamento frágil rompendo repentinamente. Esses níveis de tensão elevados nessas regiões requerem, portanto, especial atenção.

Para considerar esse efeito, é utilizado um fator de concentração teórico (chamado  $Kt$  para tensões normais e  $Kts$  para tensões de cisalhamento). Porém, para cargas dinâmicas esse fator deve ser modificado, levando em consideração a sensibilidade ao entalhe do material a essas discontinuidades. Assim, encontra-se o fator de concentração de tensão em fadiga – definido como  $K_f$  (NORTON, 2004).

### 2.2.6 Critérios de falha

Para carregamentos com tensões alternadas ou pulsantes, existe uma componente de tensão média não-nula que deve ser levada em consideração no coeficiente de segurança do projeto. Quando essa componente é de tração, ocorre uma redução na vida em fadiga, como mostra a Figura 13.

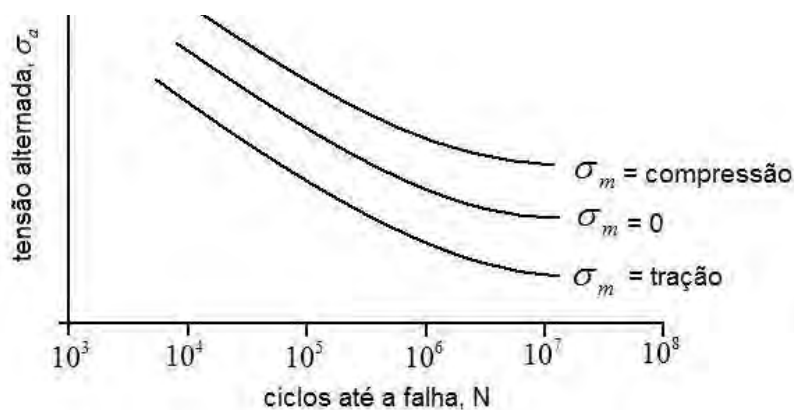


Figura 13 - Efeito da tensão média na vida de fadiga (NORTON, 2004)

Em diagramas plotados com valores de tensão média no eixo x e tensão alternada no eixo y, é possível obter critérios de falha para o projeto. A Figura 14 mostra a curva de Goodman, a parábola de Gerber, a curva de Soderberg e a curva de escoamento. A curva de Goodman e a parábola de Gerber unem os pontos de tensão última à tração ( $S_{ut}$ ) em x e resistência à fadiga em y. A curva de Soderberg utiliza o escoamento, sendo a mais conservadora entre as citadas.

Independentemente da curva escolhida para o critério de falha, o projeto é aprovado à fadiga quando o ponto  $(\sigma_m, \sigma_a)$  estiver à esquerda e abaixo desta (NORTON, 2004).

A Figura 14 também mostra a curva de escoamento, conectando os pontos da tensão de escoamento ( $S_y$ ) nos dois eixos, que serve de parâmetro para verificar se a peça ultrapassa esse limite independente da fadiga.

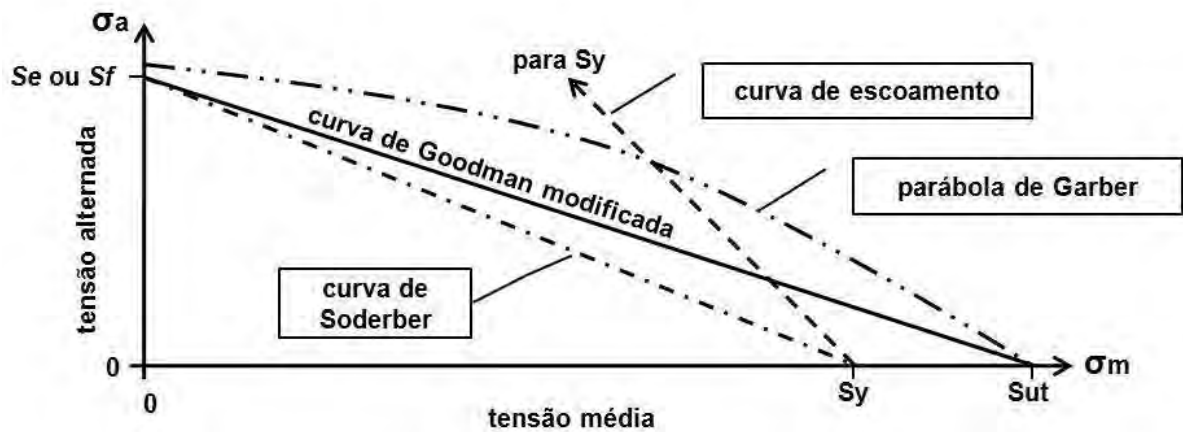


Figura 14 - Critérios de falha (adaptado de NORTON, 2004)

As equações (13), (14) e (15) definem as curvas mostradas na Figura 14.

Parábola de Gerber

$$\sigma_a = S_e \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2} \right) \quad (13)$$

Curva de Goodman modificada

$$\sigma_a = S_e \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right) \quad (14)$$

Curva de Soderberg

$$\sigma_a = S_e \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_m}{S_y} \right) \quad (15)$$

### 2.3 Fadiga em juntas rebitadas

A fadiga é um fator crítico no projeto de juntas rebitadas sobrepostas longitudinais. Considerando a operação desses componentes, os aspectos seguintes estão associados com altos níveis de concentração de tensão:

- Força transferida do rebite para a chapa na região ao redor do furo;
- Transferência de carga de outras colunas de rebites da junta;
- Momento secundário devido à excentricidade;
- Corrosão por atrito entre as duas chapas conectadas na área próxima aos furos dos rebites e nas paredes dos furos dos rebites.

Segundo Müller (1995), juntas rebitadas possuem uma resistência à fadiga relativamente baixa, como nota-se na Figura 15, onde são mostradas as curvas S-N de juntas rebitadas e do material sem o entalhe (neste caso, os furos), mostrando a queda da resistência à fadiga.

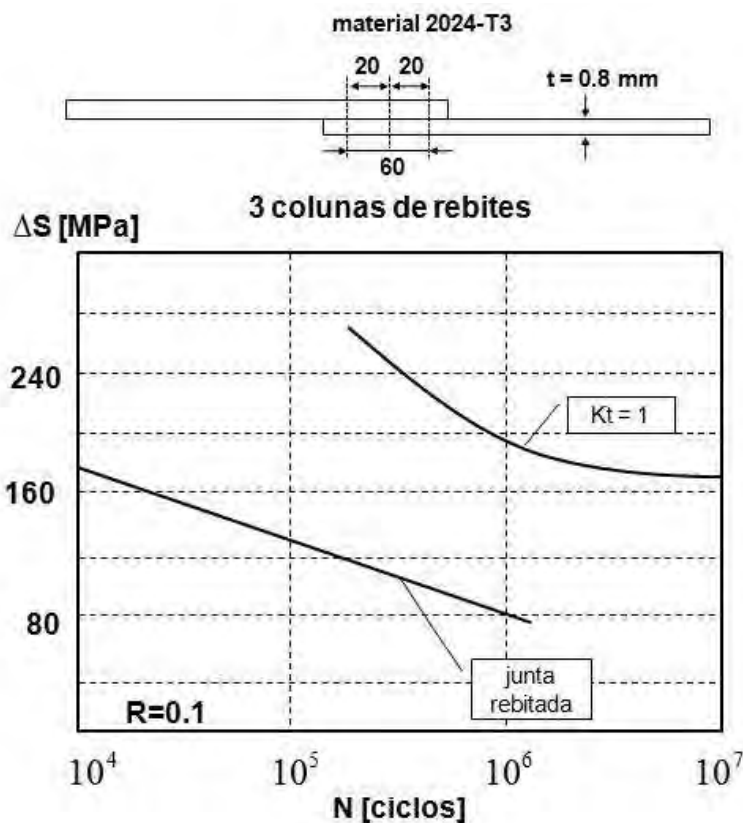


Figura 15 - Curvas S-N: Junta e material sem entalhe (adaptado de MÜLLER, 1995)

Em estudo realizado por Skorupa et al (2009), todas as amostras de juntas rebitadas sobrepostas solicitadas à fadiga obtiveram como resultado a propagação da trinca através dos furos dos rebites em um plano ligeiramente deslocado da secção mínima, conforme mostra a Figura 16.

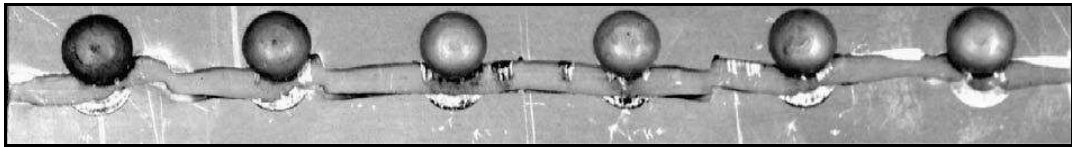


Figura 16 - Propagação da trinca na junta rebitada sobreposta

O momento secundário reduz a eficiência à fadiga como mostra a Figura 17, que compara a curva S-N da junta sobreposta com a da junta de topo simétrica, que não possui excentricidade.

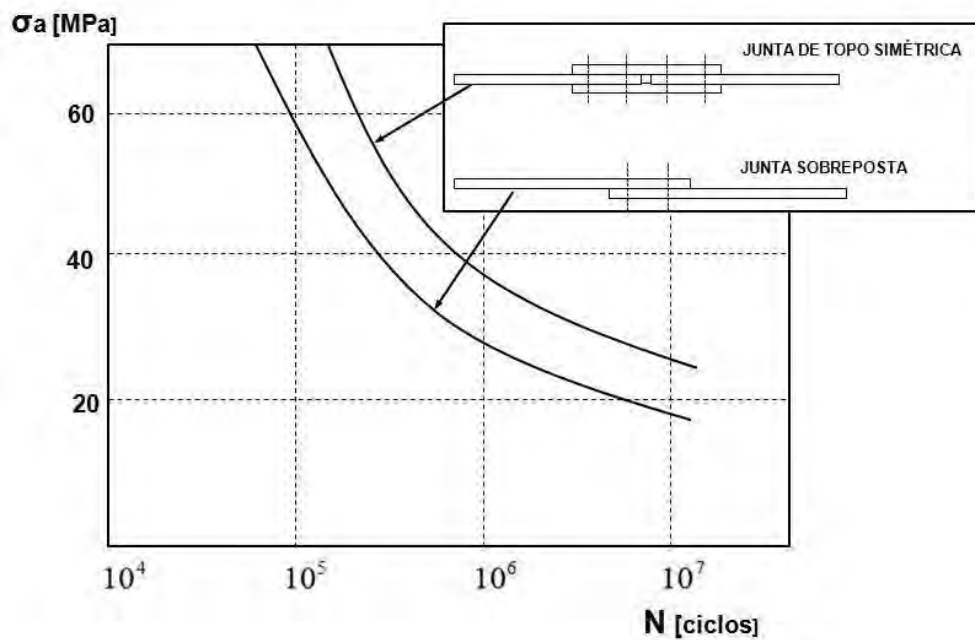


Figura 17 - Curva S-N: Juntas de topo e sobreposta (adaptado de MÜLLER, 1995)

Como visto anteriormente, a transmissão da força em juntas rebitadas com mais de duas colunas não é distribuída de forma homogênea pelas colunas dos rebites. Como consequência, de acordo com Müller (1995), os níveis de tensão de fadiga nos rebites das colunas superior e inferior são maiores, por essas transferirem uma parte maior da carga. Tendo o momento

secundário valor máximo também nas colunas das extremidades, essas se mostram mais críticas à fadiga.

O diâmetro do rebite é uma variável importante para a resistência à fadiga da junta. Um diâmetro maior resulta em uma redução da pressão de rolamento nos furos das chapas, reduzindo o nível de tensão concentrada nessa região.

Com o crescimento da demanda e condições mais críticas para o projeto aeronáutico, alguns pontos devem ser levados em conta. Entre eles têm-se:

- O crescimento significativo do número de vôos faz com que uma maior vida em fadiga das juntas rebitada deva ser atingida;
- Exigências de diminuição de peso causam um aumento nos níveis de tensão de projeto;
- A necessidade de projetar com tolerância ao dano requer considerações de segurança mais cuidadosas.

Para provar a integridade da junta, diversos testes de fadiga têm sido feitos nos últimos anos. Eles variam de ensaios com amostras simples para testes em escala real. Embora a produção seja muito cuidadosa, nota-se diferença nos resultados de vida encontrados.

De acordo com Müller (1995), estudos comparativos revelaram diferenças com um fator na vida de 1,7 até 5 vezes para amostras idênticas em diferentes períodos de produção. Valores similares foram encontrados para juntas presentes em uma frota de aeronaves carregadas no ambiente real de trabalho. Muitas causas são sugeridas como motivo dessa dispersão:

- Material;
- Efeitos de tamanho e superfície;
- Manufatura;
- Tensões de aperto na montagem;
- Condições de carregamento;
- Atrito;
- Efeitos do ambiente.

Outras diferenças no desempenho à fadiga para testes com corpos de prova simples foram relacionadas à geometria curva e carregamentos bi-axiais da estrutura real, que não são levados em conta nos testes com amostras.



### 2.3.1 Efeito da força de aperto na vida à fadiga de juntas

A força de aperto aplicada na rebiteagem das juntas possui alta influência em sua vida à fadiga. Quando um rebite é instalado, primeiramente é expandido para preencher o furo e então, ao continuar sendo comprimido, gera um campo de tensões residuais compressivas benéficas para a fadiga.

A natureza desse campo possui um papel importante na nucleação e crescimento da trinca na região próxima ao furo do rebite, atrasando os danos por fadiga e retardando a propagação da trinca (RANS, ALDERLIESTEN, STRAZNICKY, 2009).

É possível verificar essa influência na Figura 18, onde é mostrada a relação encontrada por Skorupa *et al* (2009) para diferentes tensões de aperto e a relativa vida a fadiga.

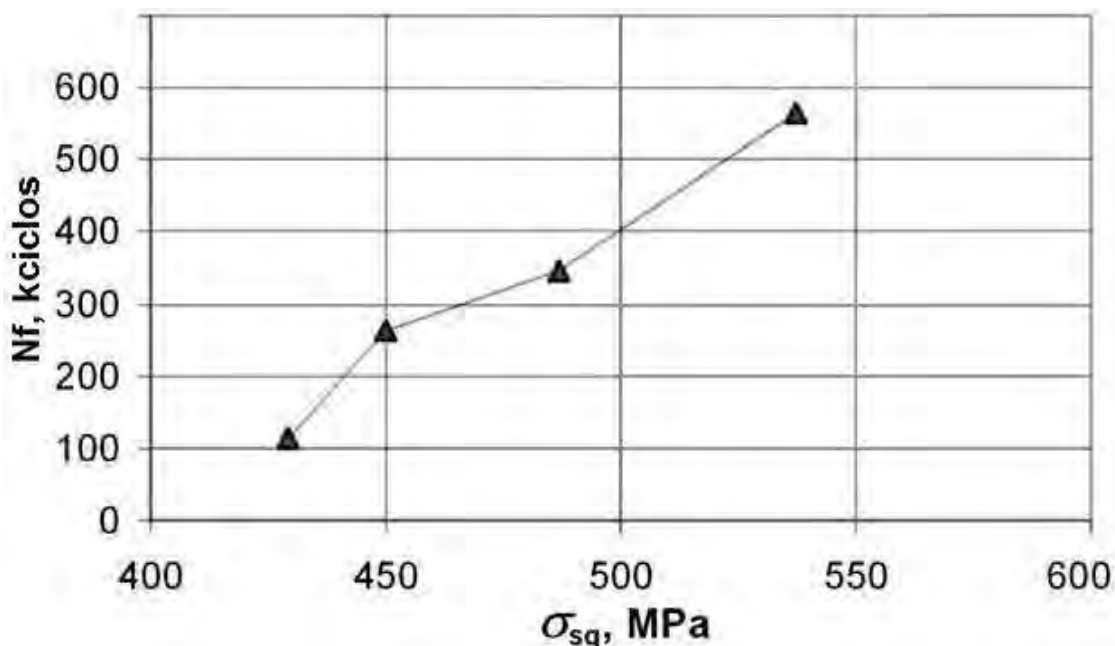


Figura 18 - Influência da força de aperto na vida à fadiga

De acordo com Skorupa *et al* (2009), a trinca de fadiga em juntas rebiteadas normalmente se inicia em uma das colunas externas dos rebites, ou em alguns casos em ambas. Para forças de aperto menores, a trinca começa a nucleação no furo do rebite que dá origem a uma trinca com formato de um quarto de elipse. Aumentando a força de aperto, a localização do início da trinca tende a se afastar da borda do furo e a trinca resultante possui

um formato semi-elíptico. Esses efeitos podem ser vistos nas Figuras 19 e 20, para forças baixas e mais altas, respectivamente.

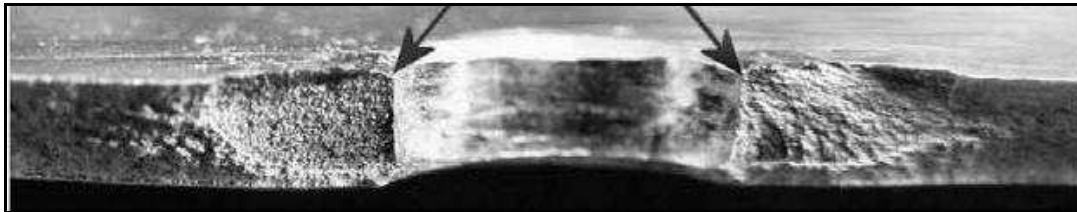


Figura 19 - Trinca para força de aperto baixa (SKORUPA et al, 2009)



Figura 20 - Trinca para força de aperto alta (SKORUPA et al, 2009)

Segundo Castro *et al* (2007), observações experimentais têm mostrado que o aumento da força de aperto pode ampliar a vida em fadiga para falha em uma faixa de valores de 3 a 10 vezes, dependendo do nível de tensão que a peça é submetida.

## 2.4 Método dos elementos finitos

Conforme Ribeiro (2003), muitos problemas da engenharia encontram solução na mecânica do contínuo, onde os princípios físicos são escritos sob a forma de equações diferenciais. Para ser possível a solução de problemas complexos são utilizados métodos numéricos. O método dos elementos finitos teve suas primeiras aplicações na análise estrutural e quando os primeiros computadores digitais surgiram na década de 50, foi possível um desenvolvimento significativo dos métodos matriciais.

Com o crescimento da demanda de estruturas mais leves e complexas, como as encontradas na indústria aeronáutica, o desenvolvimento de métodos numéricos foi conduzido para que pudessem ser utilizados em análises desse tipo.

Os primeiros trabalhos nesta área foram conduzidos por Turner e Argyris. Zienkiewicz, em seu artigo “*The Finite Element Methods: from Intuition to Generality*” apresenta uma descrição mais detalhada da evolução do método dos elementos finitos nesta fase inicial.

Na década de 70 teve suas aplicações estendidas a problemas de mecânica dos fluidos e, desde então, vem consolidando-se como um método geral de solução de equações diferenciais parciais (RIBEIRO,2003).

#### 2.4.1 Definição

O conceito básico do método dos elementos finitos, de acordo com Grandin (1986), é a subdivisão de uma região em outras suficientemente pequenas para que a solução em cada uma dessas sub-regiões (definidas como elementos) possa ser representada por uma função simples.

Como exemplo, uma região que possui uma função polinomial, conforme a Figura 21, pode ser aproximada com funções lineares em cada uma das quatro sub-regiões mostradas na Figura 22.

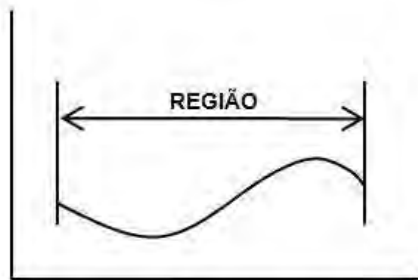


Figura 21 - Função polinomial contínua na região (adaptado de GRANDIN, 1986)

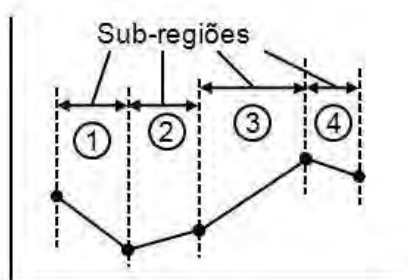


Figura 22 - Aproximação com funções lineares (adaptado de GRANDIN, 1986)

Neste exemplo, a continuidade da função é forçada na junção das sub-regiões (definidas como nós). Com uma quantidade suficientemente grande de elementos, a montagem da solução representa uma solução com boa aproximação em relação à região completa.

Esta divisão em sub-regiões (denominada de discretização) gera a malha constituída de elementos e nós. De acordo com algumas variáveis como a geometria da peça, complexidade do problema, número de dimensões da análise, etc., são utilizados diferentes tipos de elementos. Para cada um, diferentes graus de liberdade estão associados, como translação e rotação nos eixos x, y e z.

Em um problema bi-dimensional como o mostrado por Grandin (1986) na Figura 23, pode-se ver a discretização de uma chapa com a malha composta por elementos triangulares, na Figura 24 e na Figura 25, por elementos quadrangulares.

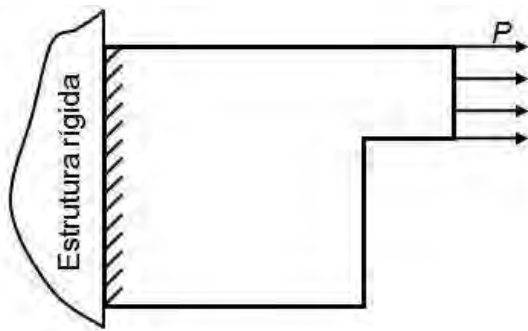


Figura 23 - Chapa solicitada com uma carga  $P$  (adaptado de GRANDIN, 1986)

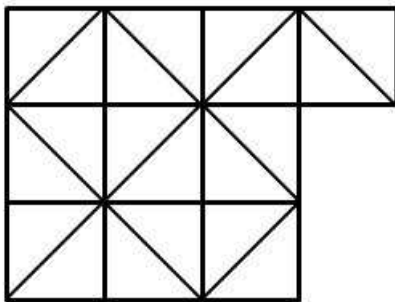


Figura 24 - Chapa com elementos triangulares (adaptado de GRANDIN, 1986)

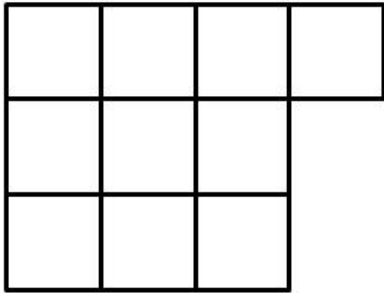


Figura 25 - Chapa com elementos quadrangulares (adaptado de GRANDIN, 1986)

Observa-se na Figura 26, que uma área possui uma concentração maior de elementos. Esse refinamento é feito em regiões que sofrem maiores solicitações ou requerem um estudo mais apurado. Em termos computacionais – economia de tempo, memória do computador – a limitação do número de elementos pode ser desejável.

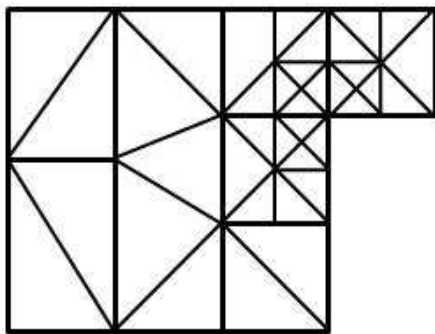


Figura 26 - Refinamento da malha em uma região (adaptado de GRANDIN, 1986)

#### 2.4.2 Elemento barra – Matriz de rigidez

Para uma introdução do cálculo por elementos finitos ser mostrada, é possível verificar o equacionamento do elemento de barra, que é unidimensional.

Conforme Grandin (1986) considera-se uma barra prismática solicitada por duas forças  $F_1$  e  $F_2$ , de comprimento  $L$ , seção transversal  $A_0$  e módulo de elasticidade do material  $E$ . A posição da barra está restrita no eixo  $x$ . As forças estão aplicadas nas extremidades da barra, identificadas como nó1 e nó2. Na Figura 27, pode-se observar o elemento barra e os deslocamentos desses nós, que são representados pelos símbolos  $u_1$  e  $u_2$ , respectivamente.

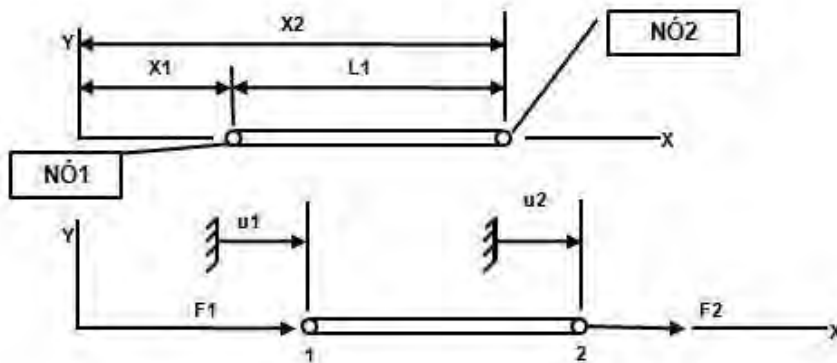


Figura 27 - Elemento barra (adaptado de GRANDIN, 1986)

As seguintes convenções são estabelecidas:

- 1) Forças e deslocamentos são definidos como positivos quando estão agindo no sentido positivo da coordenada x;
- 2) A posição de um nó na estrutura indeformada é definida como sua posição de referência. O deslocamento, portanto, é a mudança na posição deste, conforme a estrutura se deforma durante o carregamento.

Da mecânica, sabe-se que a peça irá apresentar uma mudança no comprimento de acordo com a relação da equação (16):

$$u_2 - u_1 = \delta = \frac{F_t \cdot L_1}{A_0 \cdot E} \quad (16)$$

Onde  $\delta$  é o deslocamento,  $F_t$  é a força total aplicada e as outras variáveis foram definidas anteriormente. Define-se então a rigidez  $k$  do elemento como sendo a razão da força atuante com a mudança no seu comprimento.

A equação (17) mostra a rigidez:

$$k = \frac{F_t}{\delta} \quad (17)$$

De (16), tem-se a rigidez em termos das propriedades do material e da geometria da peça, na equação (18):

$$k = \frac{A_0 \cdot E}{L_1} \quad (18)$$

Aplicando essa definição no problema mostrado na Figura 27, se expressa a força em cada nó da peça em termos dos deslocamentos nodais  $u_1$  e  $u_2$  e da rigidez  $k$ , como se pode verificar nas equações (19) e (20):

$$F_1 = k \cdot (u_1 - u_2) \quad (19)$$

$$F_2 = k \cdot (u_2 - u_1) \quad (20)$$

Essas duas equações podem ser representadas de maneira matricial, conforme a equação (21) e, de maneira simplificada, como mostra a equação (22):

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

$$\{Q\} = [k] \cdot \{q\} \quad (22)$$

onde:

$\{Q\}$  – Vetor das forças nodais do elemento

$[k]$  – Matriz de rigidez do elemento

$\{q\}$  – Vetor dos deslocamentos nodais do elemento.

### 2.4.3 Elementos sólidos

Elementos sólidos tridimensionais são definidos no espaço global X, Y, Z, e possuem graus de liberdade nodais nos três eixos, tanto para translação quanto para rotação. Estes elementos são utilizados quando a geometria e/ou a carga aplicada são complexas demais para qualquer outro tipo de elemento com menos dimensões espaciais (ABAQUS DOCUMENTATION, 2010).

Os dois tipos de elementos sólidos disponíveis nos softwares são os tetraedros e hexaedros, mostrados na Figura 28:

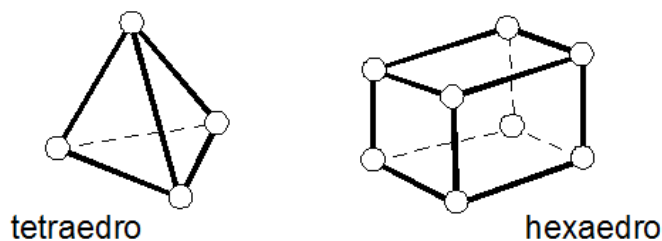


Figura 28 - Elementos sólidos

Podem ser destacadas algumas características dos elementos sólidos:


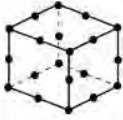
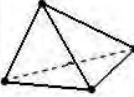
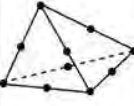
- São os elementos de volume padrão dos softwares;
- Podem ser compostos de um único material homogêneo ou podem incluir várias camadas de diferentes materiais, para a análise de compósitos laminados sólidos;
- São mais precisos, se não distorcidos, particularmente para hexaedros. Os elementos tetraédricos são menos sensíveis à distorção;
- Podem ser usados para problemas lineares e não-lineares que envolvem contato, plasticidade e grandes deformações.
- Estão disponíveis para análises estáticas, de transferência de calor, acústicas, etc.

Os elementos sólidos podem ser de primeira e segunda ordem, conforme o número de nós. O equacionamento dos elementos de segunda ordem é mais complexo, por ser uma função parabólica, dando um resultado mais preciso. Porém, o tempo de processamento é consideravelmente maior do que os de primeira ordem.

Os tipos de elementos sólidos disponíveis nos softwares e suas características são mostrados na Tabela 2:



Tabela 2 - Elementos sólidos de 1ª e 2ª ordem

<u>Elemento de primeira ordem hexaédrico:</u> - 8 nós; - 6 graus de liberdade por nó (análise estática).	
<u>Elemento de segunda ordem hexaédrico:</u> - 20 nós; - 6 graus de liberdade por nó (análise estática); - Maior grau da função de forma.	
<u>Elemento de primeira ordem tetraédrico:</u> - 4 nós - 6 graus de liberdade por nó (análise estática)	
<u>Elemento modificado de segunda ordem tetraédrico</u> - 10 nós - 6 graus de liberdade por nó (análise estática) - Maior grau da função de forma.	

#### 2.4.4 Etapas da análise

Para a realização do processamento de uma análise de elementos finitos, existem três estágios:

Pré-processamento → Definição da geometria, propriedades do material, escolha do elemento, discretização, aplicação das condições de contorno, aplicação do carregamento, definição de conexões/contatos entre peças, escolha das respostas desejadas para a análise;

Processamento → Cálculo computacional;

Pós-processamento → Verificação dos resultados com as respostas definidas no pré-processamento.

Uma visão geral do projeto e utilização do método dos elementos finitos pode ser feita através do fluxograma da Figura 29.

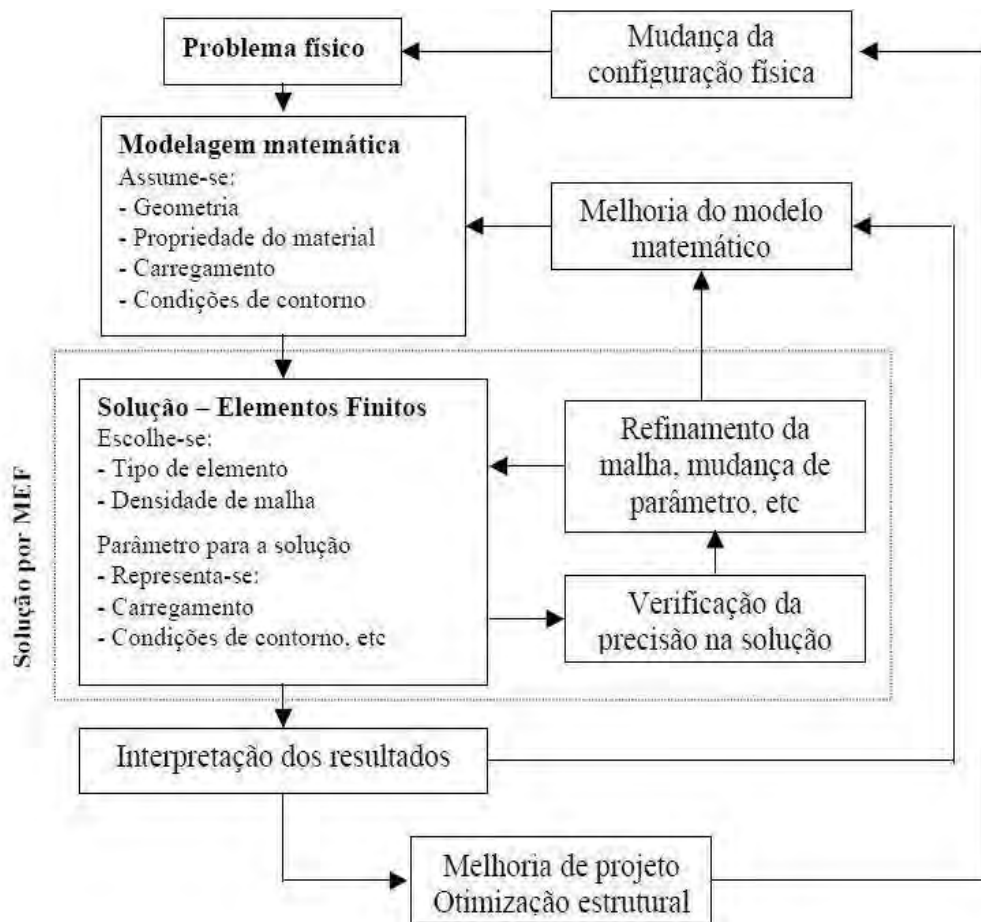


Figura 29 - Fluxograma do método dos elementos finitos (SPINELLI, 2004)

## 2.5 Fadiga em elementos finitos

A análise de fadiga utilizando o método dos elementos finitos pode fornecer diversos resultados utilizando como entrada os dados de Tensão-vida ou Deformação-vida do material (ANSYS WORKBENCH MANUAL, 2010).

Os componentes da análise de fadiga são mostrados a seguir.

### 2.5.1 Propriedades de fadiga do material

Para análises que utilizam a abordagem Tensão-vida, a curva S-N é o dado de entrada necessário para a ferramenta de fadiga calcular os resultados solicitados.

## 2.5.2 Análise de fadiga e carregamento

Para realizar a análise da fadiga, é necessário definir as variáveis do problema a ser estudado. De acordo com Ansys Workbench Manual (2010), são elas:

### Fator de resistência à fadiga

É o fator de redução da resistência no cálculo da fadiga. Esta configuração é usada para corrigir condições para a análise que podem ser diferentes do que um ambiente de laboratório rigidamente controlado em que os dados foram coletados.

### Tipo de carregamento

Define-se, de acordo com o carregamento da peça física, qual o tipo a ser aplicado na análise: tensão repetida ( $R=0$ ), tensão alternada ( $R=-1$ ), razão entre tensões e histórico de dados. O último é um gráfico de dados normalmente coletados na peça física através de instrumentação e não possui frequência e período bem definidos.

É possível verificar alguns exemplos dos tipos de carregamento nas Figuras 30, 31, 32, 33:

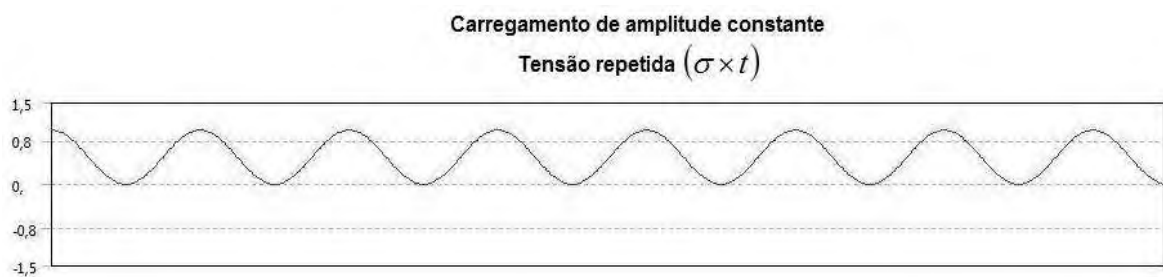


Figura 30 - Tensão repetida

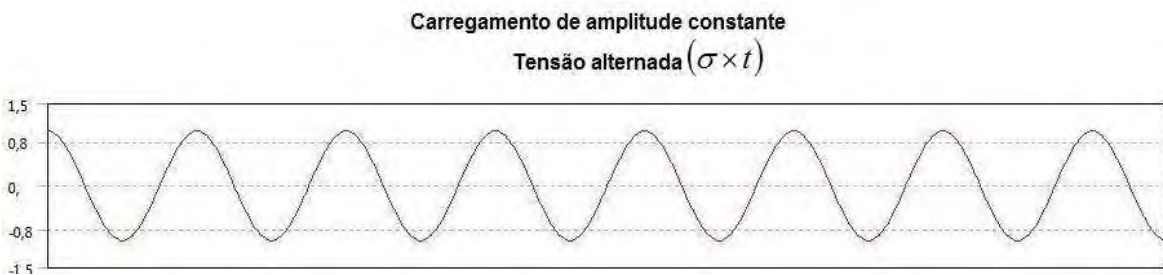


Figura 31 - Tensão alternada

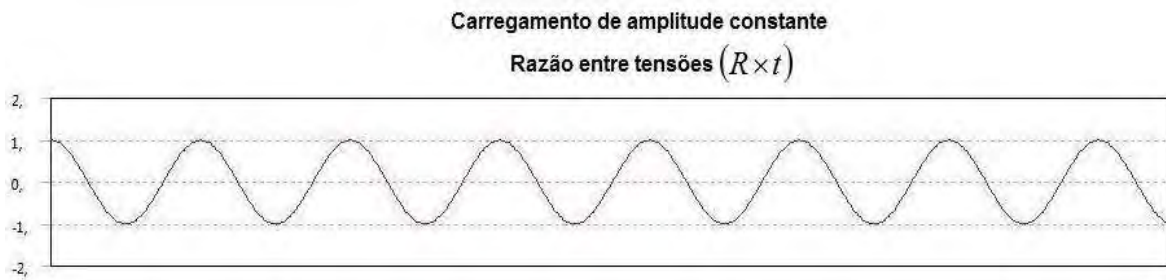


Figura 32 - Razão de tensão



Figura 33 - Histórico de cargas

### Fator de escala

Esse campo é destinado para o caso do carregamento a ser estudado na fadiga não ter a mesma magnitude estudada na análise estática. Dessa forma é possível atribuir um fator de escala para reduzir ou aumentar esse valor.

### Tipo de análise

Pode-se escolher entre Tensão-vida ou Deformação-Vida

### Teoria aplicada para verificação de resultados do projeto

No caso do tipo de análise ser Tensão-Vida, pode-se escolher por Goodman, Soderberg e Gerber, definidas anteriormente.

### Componente de tensão

Como as tensões são normalmente multiaxiais, mas dados experimentais de fadiga utilizam carga uniaxial, a tensão deve ser convertida do estado multiaxial para o uniaxial. Para isso é possível escolher diversos tipos de respostas como Von Mises, Máxima principal, entre outras.

### Definição da unidade

Nesta opção, define-se a unidade de vida. Entre elas estão: ciclos, blocos, segundos, minutos, horas, dias, meses ou pode-se definir outro.

### 2.5.3 Resultados

Existem vários resultados disponíveis para análise de fadiga por elementos finitos. É possível obter o resultado para todas as peças de uma montagem, ou para peças ou faces em separado. Algumas opções são: vida, dano, coeficiente de segurança, entre outros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o cálculo utilizando o método dos elementos finitos em uma junta rebitada sobreposta foi feita a correlação da análise estática com um teste experimental realizado por Spinelli (2004).

As características do corpo de prova e configurações do ensaio são mostradas a seguir.

#### 3.1 Corpo de prova da junta sobreposta

O corpo de prova utilizado em testes por Spinelli (2004) possui dimensões conforme a Figura 34:

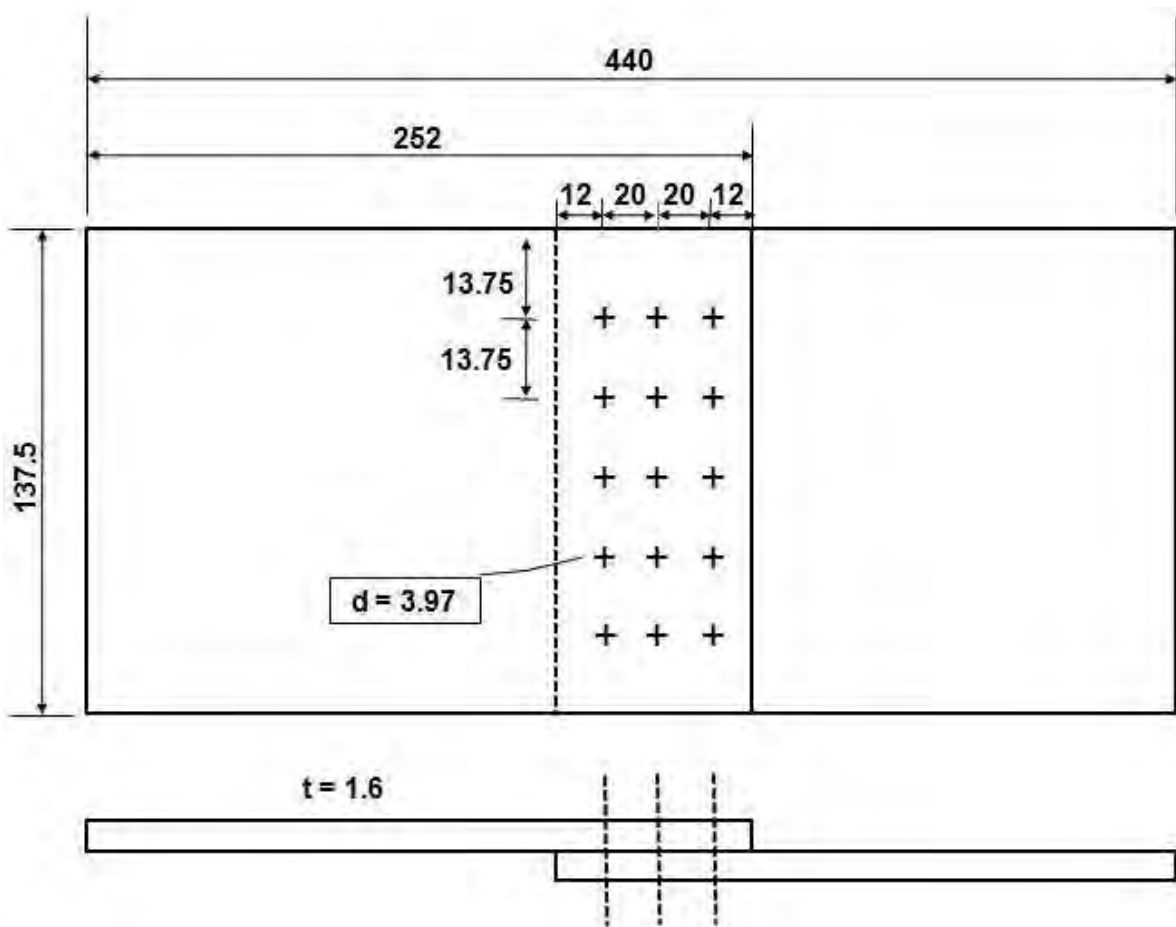


Figura 34 - Corpo de prova da junta rebitada [mm] (adaptado de SPINELLI, 2004)

As dimensões principais da junta são:

Passo entre os rebites (s): 13,75 mm

Passo entre as colunas (p): 20,0 mm

Espessura da chapa (t): 1,6 mm

Largura da chapa (W): 137,5 mm

Comprimento da junta (L): 440 mm

Diâmetro do rebite (Do): 3,97 mm

O material das chapas é a liga de Alumínio 2024-T3, suas propriedades mecânicas são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades da liga de Alumínio 2024-T3 (MATWEB, 2011)

Propriedades Mecânicas	CHAPA Al 2024-T3
Módulo de Elasticidade (E) [GPa]	73,1
Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )	0,33
Tensão última à tração (Sut) [MPa]	483
Tensão de escoamento (Sy) [MPa]	345
Alongamento ( $\xi$ ) [%]	18%

A curva Tensão-vida (S-N) do material é mostrada na Figura 35:

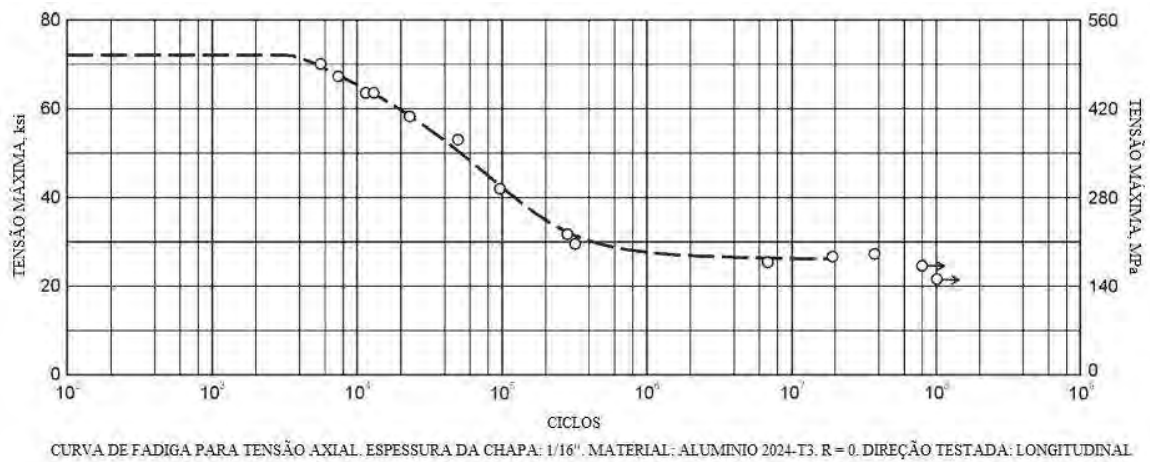


Figura 35 - Curva S-N da liga de Alumínio 2024-T3 (KAUFMAN, 2008)

Os rebites utilizados são fabricados da liga de Alumínio 2117-T4, que possui propriedades mecânicas conforme Tabela 4:

Tabela 4 - Propriedades da liga de Alumínio 2117-T4 (MATWEB, 2011)

Propriedades Mecânicas	REBITE Al 2117-T4
Módulo de Elasticidade (E) [GPa]	71
Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )	0,33
Tensão última à tração (Sut) [MPa]	296
Tensão de escoamento (Sy) [MPa]	165
Alongamento ( $\xi$ ) [%]	27%

### 3.2 Ensaio monotônico de tração

Foi realizado no trabalho de Spinelli (2004), um ensaio de tração monotônico utilizando uma máquina de testes universal MTS 25". Através de garras, com cinco parafusos de proteção em cada lado, foi feita a fixação da amostra na máquina de ensaio, como mostra a Figura 36.



Figura 36 - Máquina de testes universal MTS 25" (SPINELLI, 2004)



A Figura 37 mostra o detalhamento esquemático da fixação. Foram utilizados calços com o objetivo de alinhar a junta e minimizar efeitos de excentricidade.

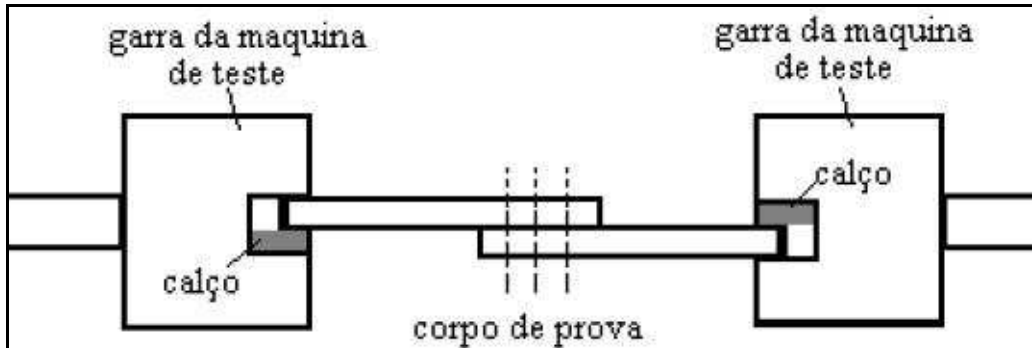


Figura 37 - Fixação do corpo de prova na máquina de teste (SPINELLI, 2004)

O ensaio foi feito tracionando a amostra lentamente, configurando um carregamento quase-estático, com uma carga crescente de 0 até 15600 N e depois a descarregando.

Para investigar a distribuição da deformação, o corpo de prova foi instrumentado com treze extensômetros uniaxiais, como é possível ver na Figura 38.



Figura 38 - Corpo de prova instrumentado (SPINELLI, 2004)

As posições dos extensômetros na amostra são mostradas na Figura 39, sendo eles numerados de 1 a 13:

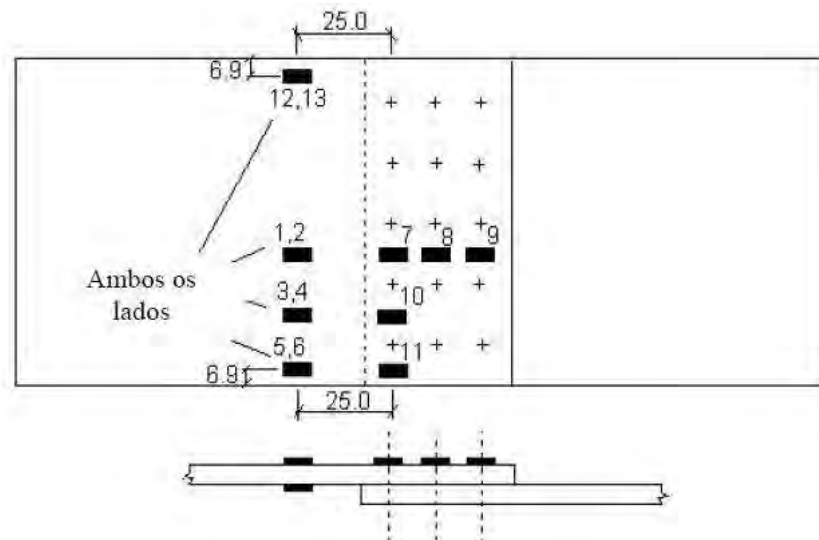


Figura 39 - Posicionamento dos extensômetros (SPINELLI, 2004)

Para uma coleta de dados mais precisa, foram realizados por Spinelli (2004) quatro ensaios, para as configurações da amostra no equipamento mostradas na Figura 40, em quatro corpos de prova de mesmas dimensões, onde se obteve o mesmo valor de deformação.

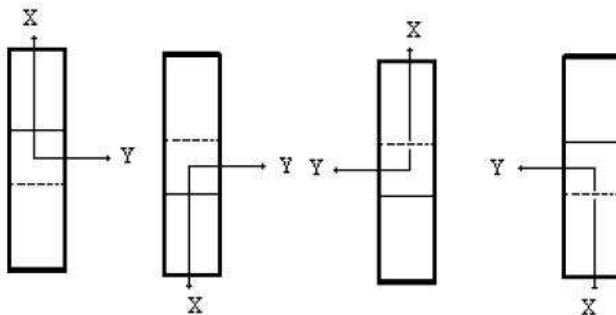


Figura 40 - Configurações da amostra para os ensaios (SPINELLI, 2004)

Os resultados de deformação obtidos são utilizados para validar o modelo em elementos finitos da presente dissertação.

## 4 MODELAGEM DA JUNTA REBITADA SOBREPOSTA

Para realizar as simulações em elementos finitos da junta rebitada sobreposta, foi utilizado o software ANSYS versão 12.0, módulo *Workbench*. As análises possuem três estágios. No primeiro calcula-se a pré-tensão na junta devido ao processo de rebitagem, no segundo é feita a análise estática e por último a fadiga é simulada.

Após a obtenção dos resultados da primeira análise, foram realizadas mais duas simulações, variando a pré-tensão e mantendo os outros estágios com as mesmas condições.

O pré-processamento foi feito de maneira a representar o modelo real, a malha possui um refinamento alto, e foram utilizados elementos sólidos para a análise.

### 4.1 Modelagem da junta

Ao iniciar a modelagem no software Ansys, o tipo de análise é definido como Estrutural Estático, conforme mostra a Figura 41.

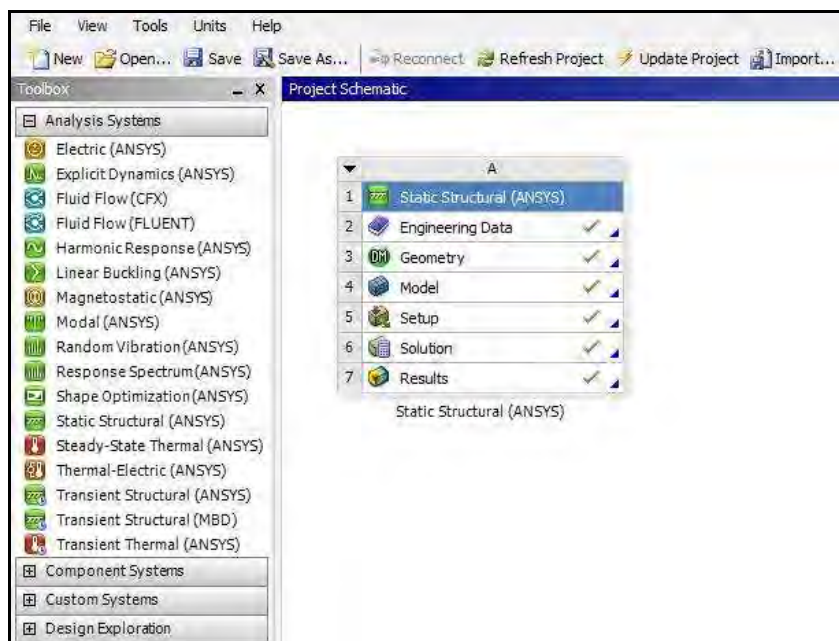


Figura 41 - Definição do tipo de análise

O próximo passo é definir os dados dos materiais que serão utilizados na análise, através da opção *Engineering Data*, mostrado na Figura 42.

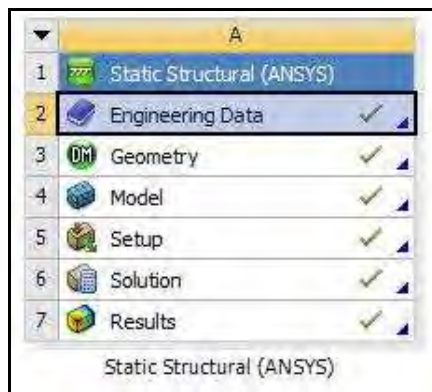


Figura 42 - Opção para definição dos dados do material

Dentro dessa opção, definem-se as propriedades mecânicas e a curva S-N do material das juntas - Al 2024-T3 (com as tensões alternadas como dados de entrada), e as propriedades mecânicas do material dos rebites, Al 2117-T4, como mostram as Figuras 43, 44 e 45, respectivamente.

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	
1	Contents of Engineering Data		S...	Description	
2	Material				
3	Al2024-T3	<input type="checkbox"/>		Material das chapas	
4	Al2117-T4	<input type="checkbox"/>		Material dos rebites	
Properties of Outline Row 3: Al2024-T3					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2,78	g cm <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Young's Modulus	73100	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Poisson's Ratio	0,33		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Alternating Stress R-Ratio	Tabular		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Scale	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Offset	0	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Interpolation	Semi-Log		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Tensile Yield Strength	345	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Compressive Yield Strength	345	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Tensile Ultimate Strength	483	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 43 - Definição do material das chapas, Al 2024-T3

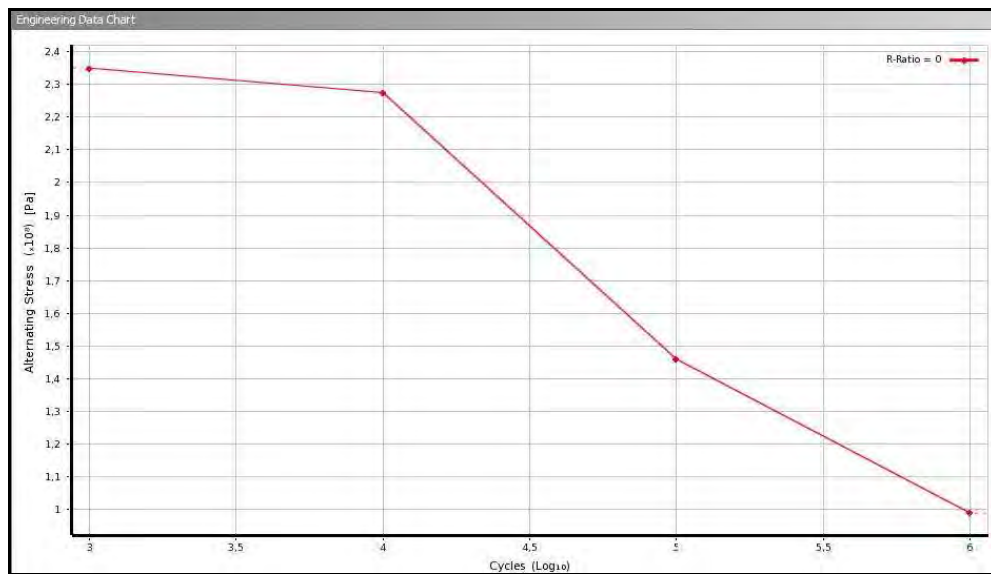


Figura 44 - Definição do material das chapas, curva S-N

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	
1	Contents of Engineering Data		S..	Description	
2	Material				
3	Al2024-T3	<input type="checkbox"/>		Material das chapas	
4	Al2117-T4	<input type="checkbox"/>		Material dos rebites	
Properties of Outline Row 4: Al2117-T4					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2,75	g cm <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
4	Young's Modulus	71000	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Poisson's Ratio	0,33		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Tensile Yield Strength	165	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Compressive Yield Strength	165	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Tensile Ultimate Strength	296	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 45 - Definição do material dos rebites, Al 2117-T4

Em seguida, a geometria é definida na opção *Geometry*. Neste módulo, pode-se desenhar a geometria ou importar um arquivo com a geometria a ser utilizada. A junta a ser estudada foi modelada em um software de desenho, e é importada para o ANSYS, como mostra a Figura 46.

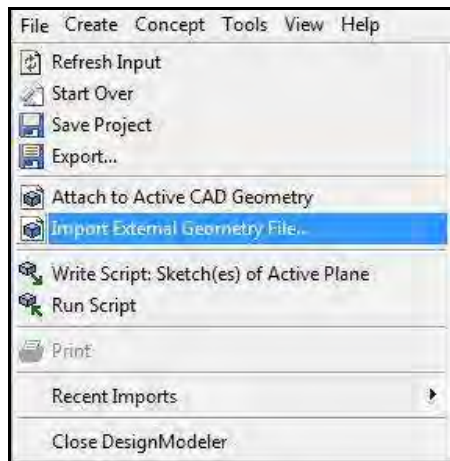


Figura 46 - Opção de importar geometria

Para o modelo, foi considerado, devido à simetria, 1/5 da junta completa em sua largura. Essa simplificação é feita para facilitar a análise em relação ao tempo de processamento, modelamento, entre outros fatores. Outra consideração da análise é o rebite, que é representado apenas pelo corpo, por ser responsável pela transmissão de carga. A descrição de cada peça e a montagem são mostradas nas Figuras 47 e 48, respectivamente:

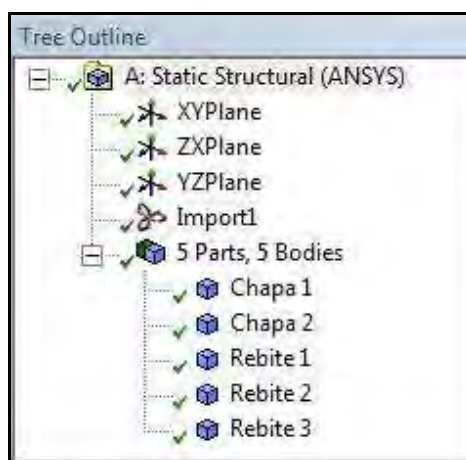


Figura 47 – Descrição das peças da montagem importada

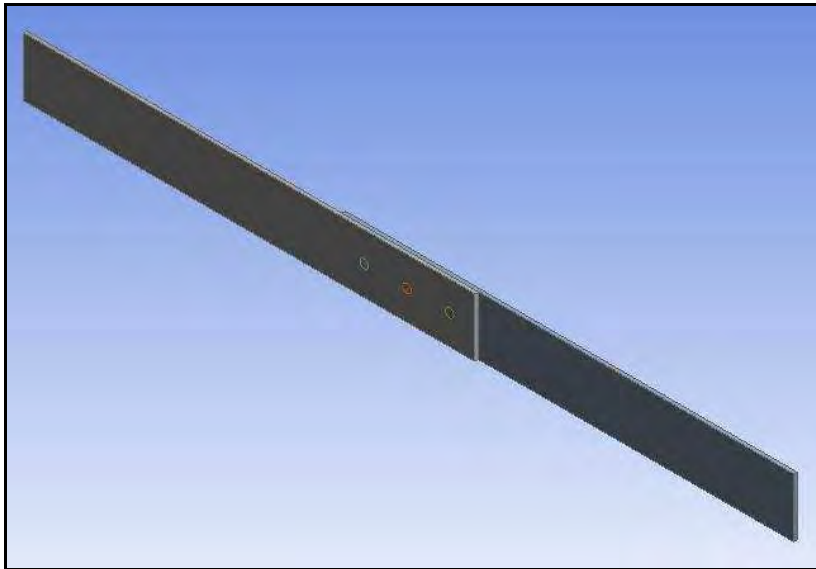


Figura 48 - Montagem da junta, considerando 1/5 da largura

Após a definição dos materiais e geometria, a opção de modelamento (*Model*) é iniciada, conforme Figura 49:

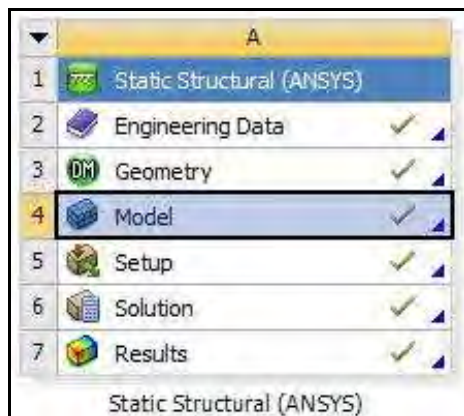


Figura 49 - Opção de modelamento

Dentro desse módulo, é feito o pré-processamento. Inicialmente, atribui-se o material a cada peça, como mostram as Figuras 50 e 51 para as chapas e 52, 53 e 54 para os rebites.

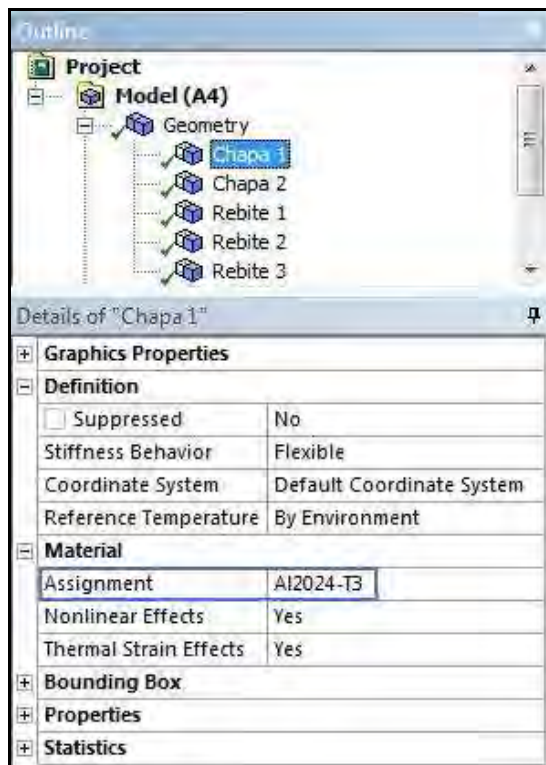


Figura 50 - Material atribuído à chapa 1

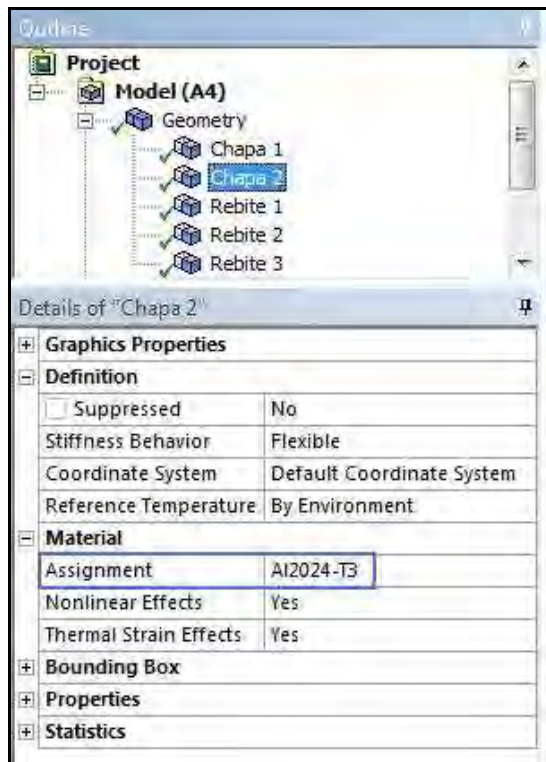


Figura 51 - Material atribuído à chapa 2



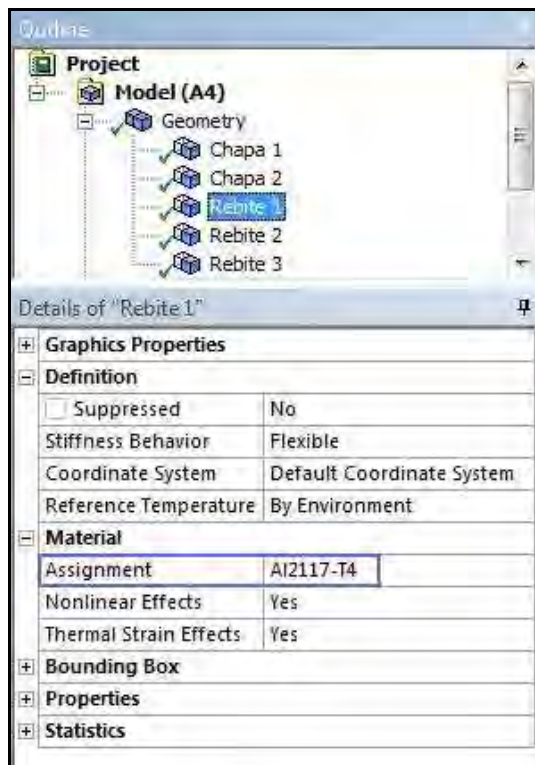


Figura 52 - Material atribuído ao rebite 1

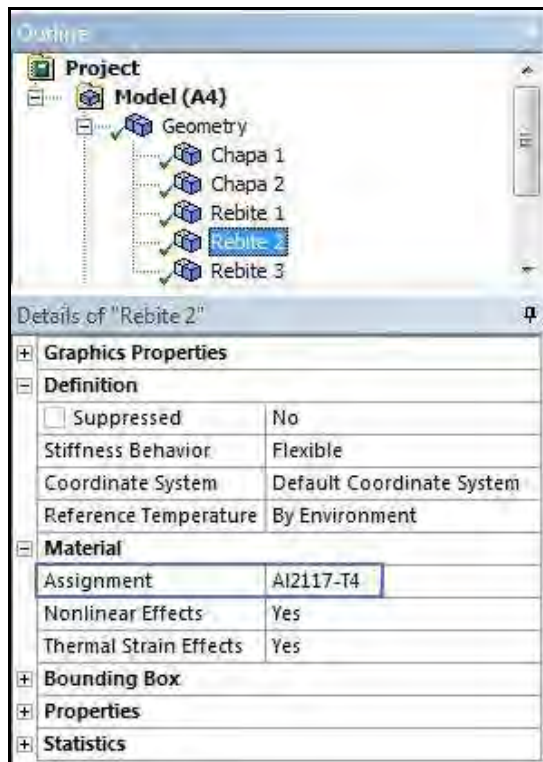


Figura 53 - Material atribuído ao rebite 2

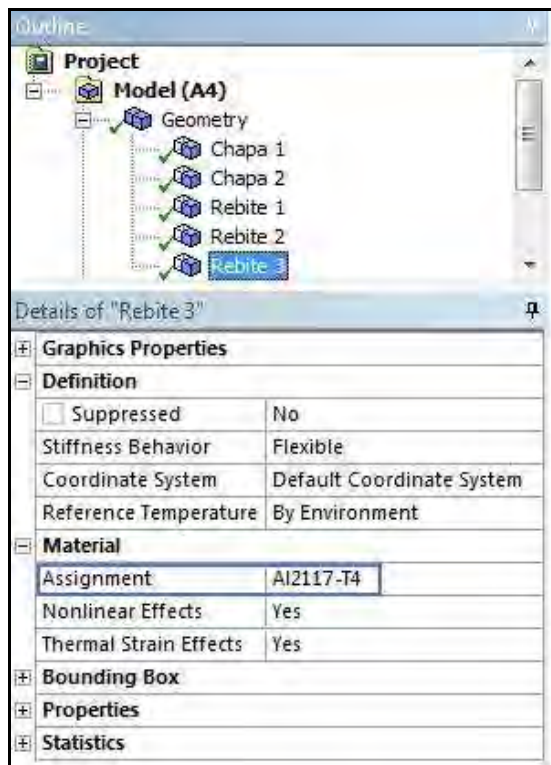


Figura 54 - Material atribuído ao rebite 3

São criados três sistemas de coordenadas locais, para análises futuras de resultados, cada um com a origem no centro de um rebite e direções dos eixos como mostrados na Figura 55:

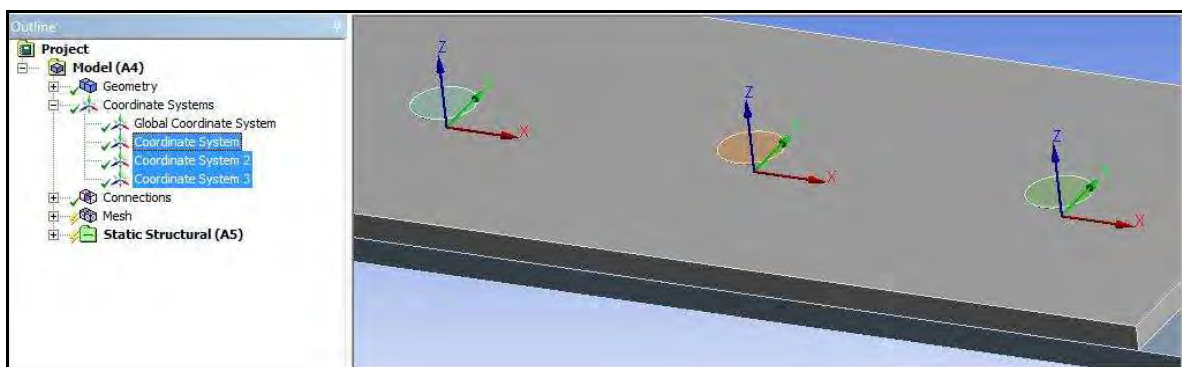


Figura 55 - Sistemas de coordenadas locais

## 4.2 Malha

O elemento utilizado na análise é do tipo sólido hexaédrico de primeira ordem. A malha é feita utilizando os seguintes métodos de controle:

### 1) Tamanho do elemento das chapas

Foi definido um tamanho de elemento de 2 mm para as chapas da junta, como mostram as Figuras 56, 57 e 58:

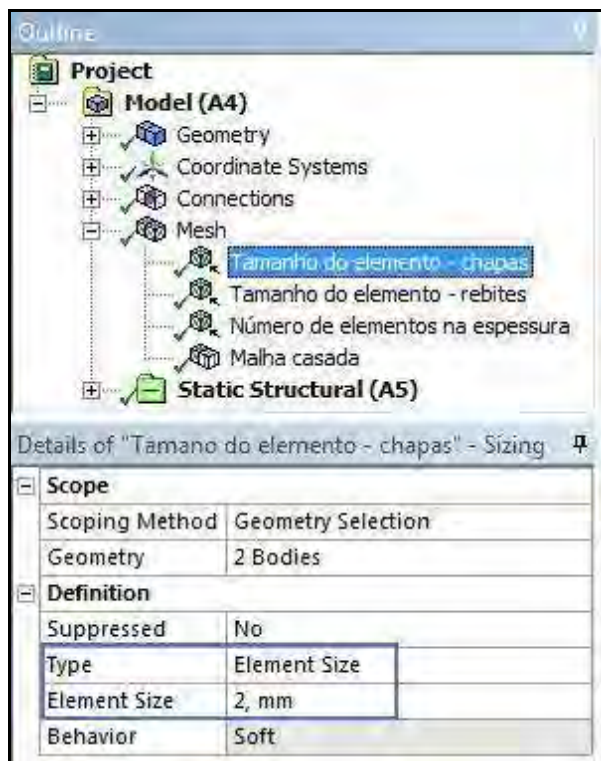


Figura 56 - Definição do tamanho do elemento

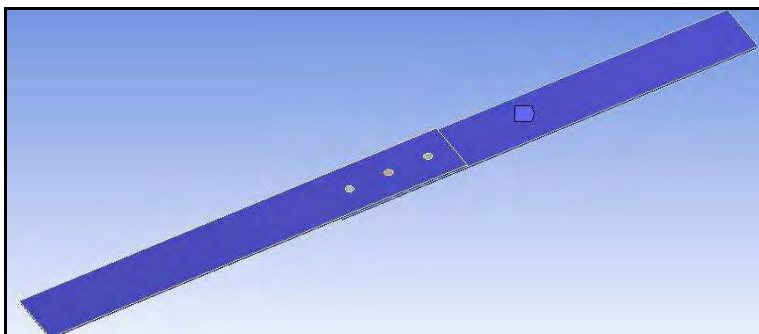


Figura 57 - Peças selecionadas - chapas da junta

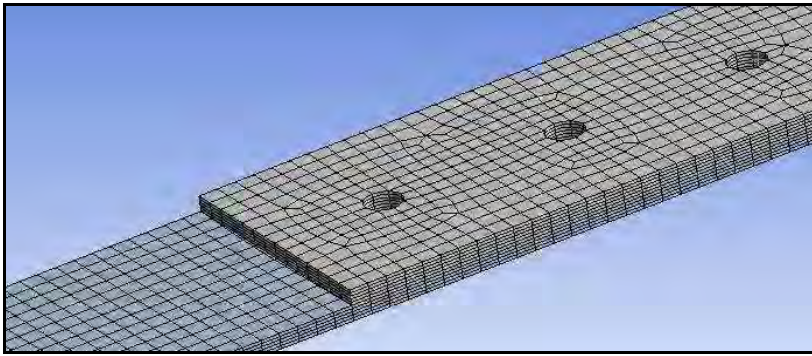


Figura 58 - Detalhe da malha da chapa

## 2) Tamanho do elemento dos rebites

Foi definido um tamanho de elemento de 1,5 mm para os rebites. Esse valor, que resulta em um refinamento adequado, se deve à necessidade de observar a flexão nas peças. Para um resultado mais preciso são necessários no mínimo três elementos ao longo do comprimento dos rebites. As Figuras 59, 60 e 61, mostram a definição do tamanho do elemento, os corpos selecionados e a malha resultante, respectivamente.

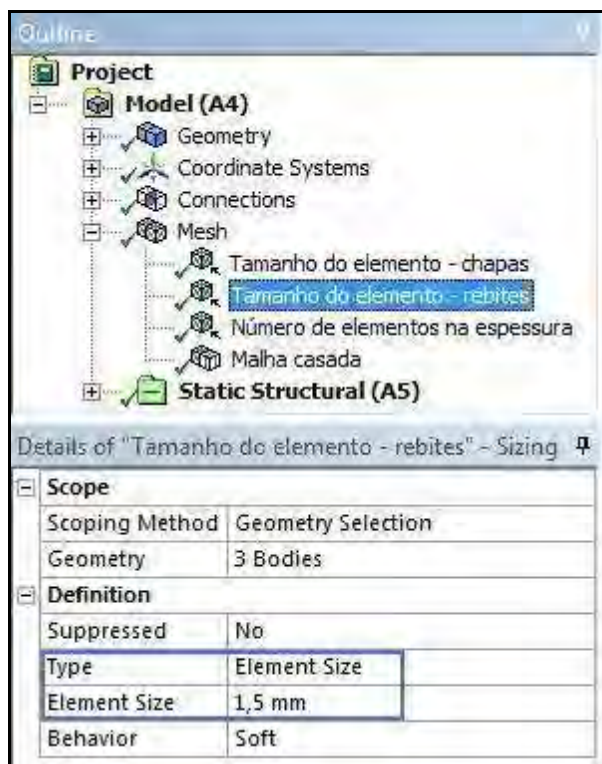


Figura 59 - Definição do tamanho do elemento dos rebites

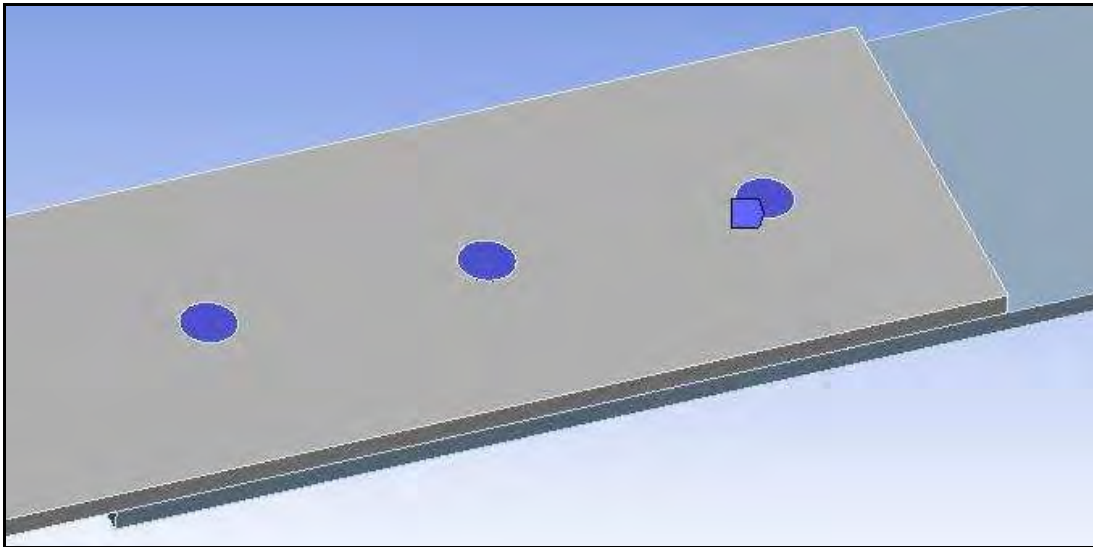


Figura 60 - Corpos selecionados - três rebites

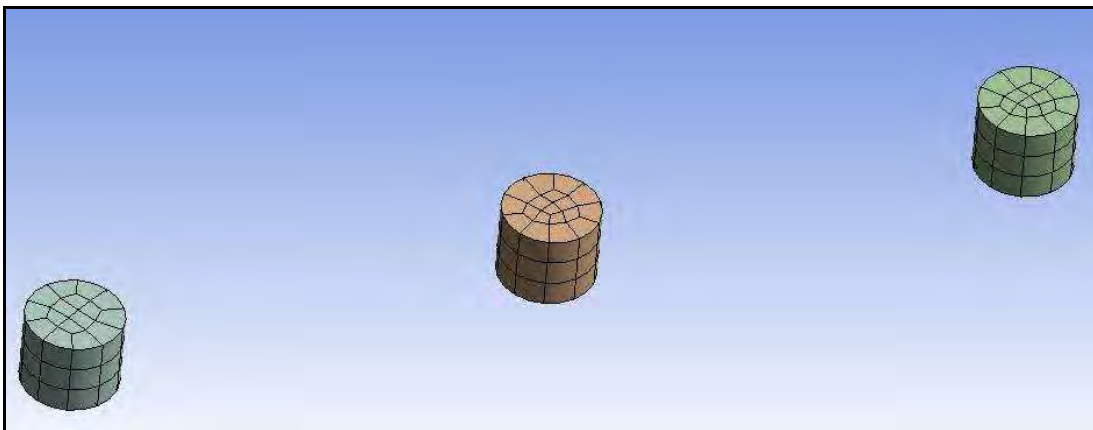


Figura 61 - Malha dos rebites

### 3) Número de elementos na espessura

Devido à excentricidade que causa flexão na junta, a espessura das chapas deve possuir um número de elementos de forma que esse resultado seja obtido com precisão. Foram definidas cinco divisões na espessura, que é um refinamento alto sem causar distorções no elemento. A definição do número de divisões, o detalhe de uma das arestas selecionadas e a malha resultante na região, são mostrados nas Figuras 62, 63 e 64, respectivamente.

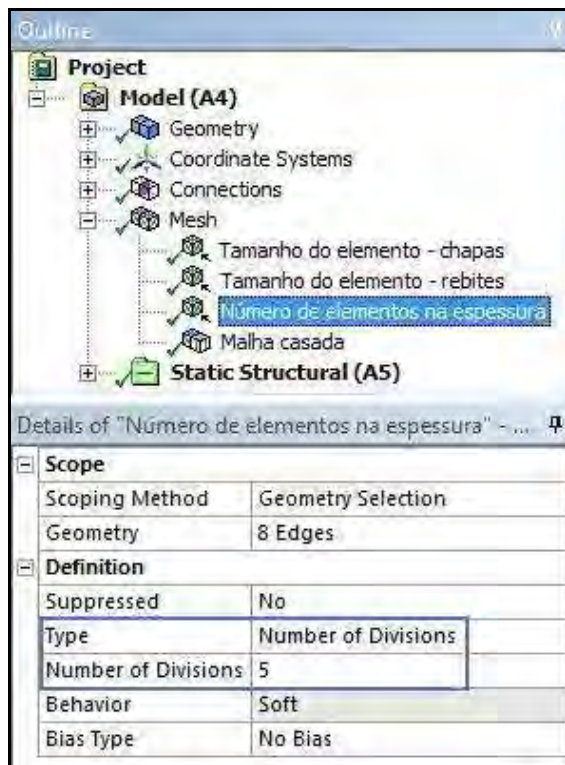


Figura 62 - Definição do número de divisões

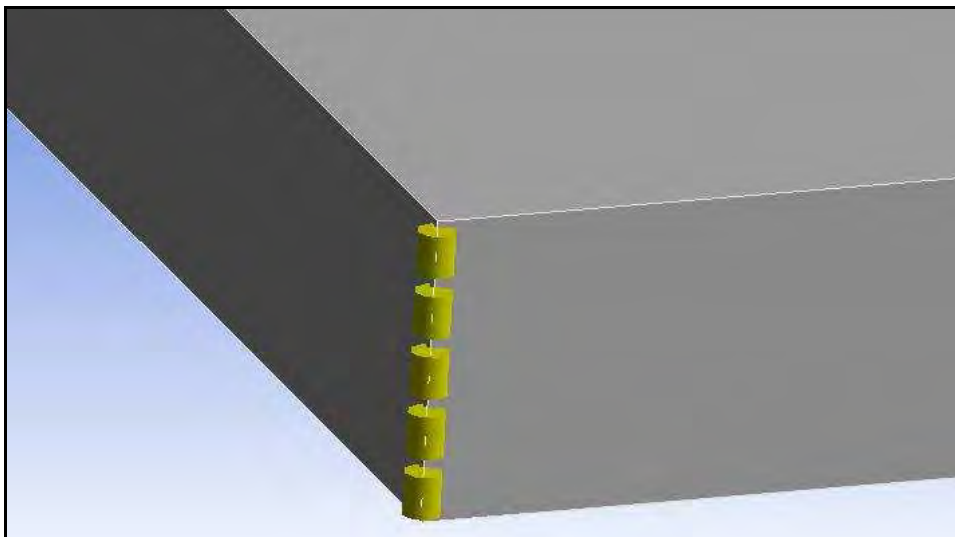


Figura 63 - Detalhe de uma aresta selecionada

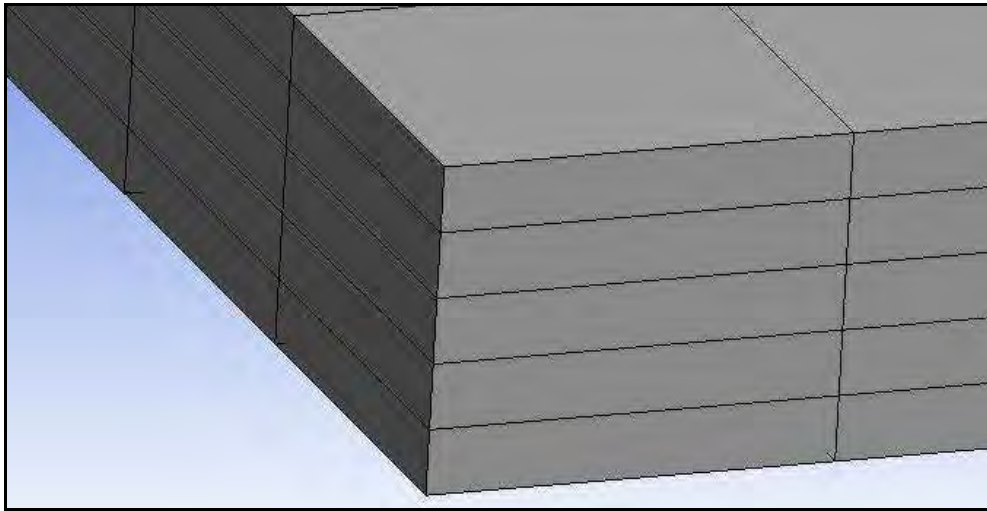


Figura 64 - Malha resultante na região

#### 4) Malha casada

Esse recurso é utilizado para facilitar o cálculo e se baseia em fazer com que os nós de duas ou mais peças de uma montagem sejam coincidentes no local do contato. No caso estudado, devido ao contato entre as chapas possuir uma região relativamente grande e não-linearidade no decorrer da análise, foi feita a malha casada nessas duas peças, através do método *Multizone*. Também é definido neste recurso o mapeamento da malha utilizando o elemento hexaédrico, para uma precisão maior nos cálculos. As definições do método, as chapas selecionadas e o detalhe da malha casada entre as chapas são vistos nas Figuras 65, 66 e 67.

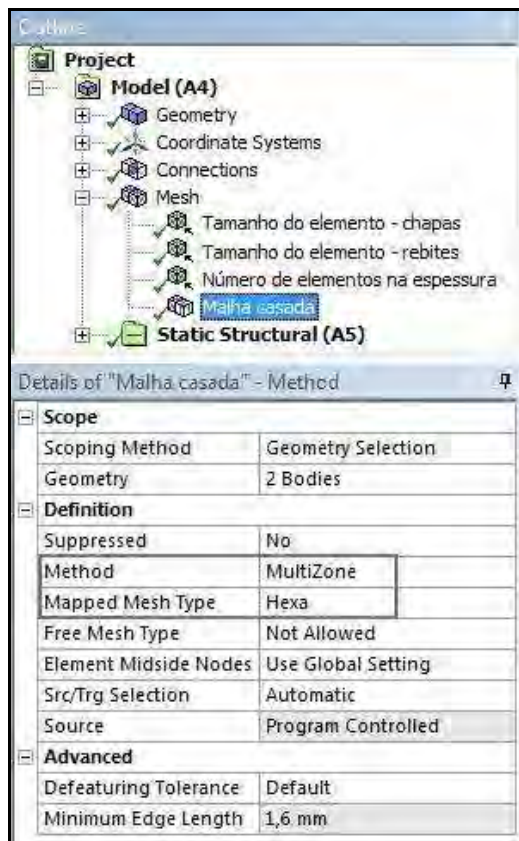


Figura 65 - Definição do método

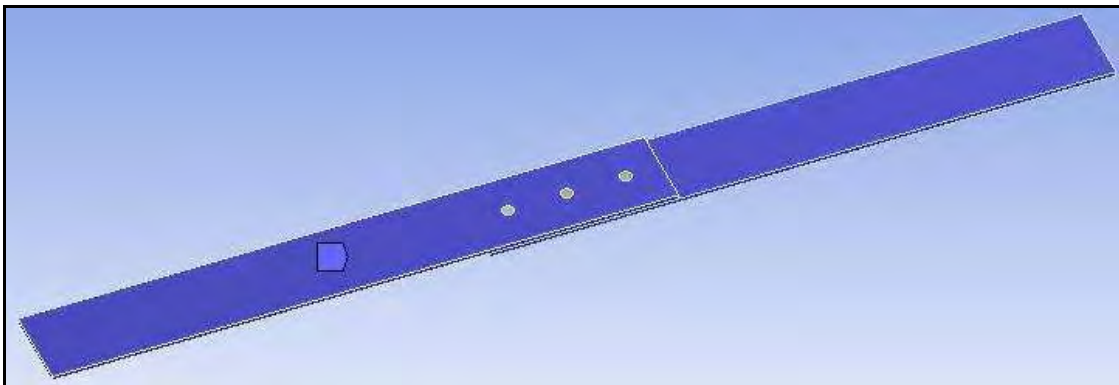


Figura 66 - Chapas selecionadas

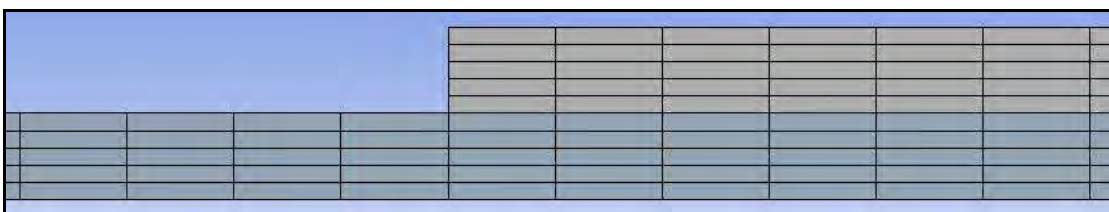


Figura 67 - Detalhe da malha casada entre as chapas



A malha completa e o detalhe na região sobreposta podem ser vistos nas Figuras 68 e 69, respectivamente.

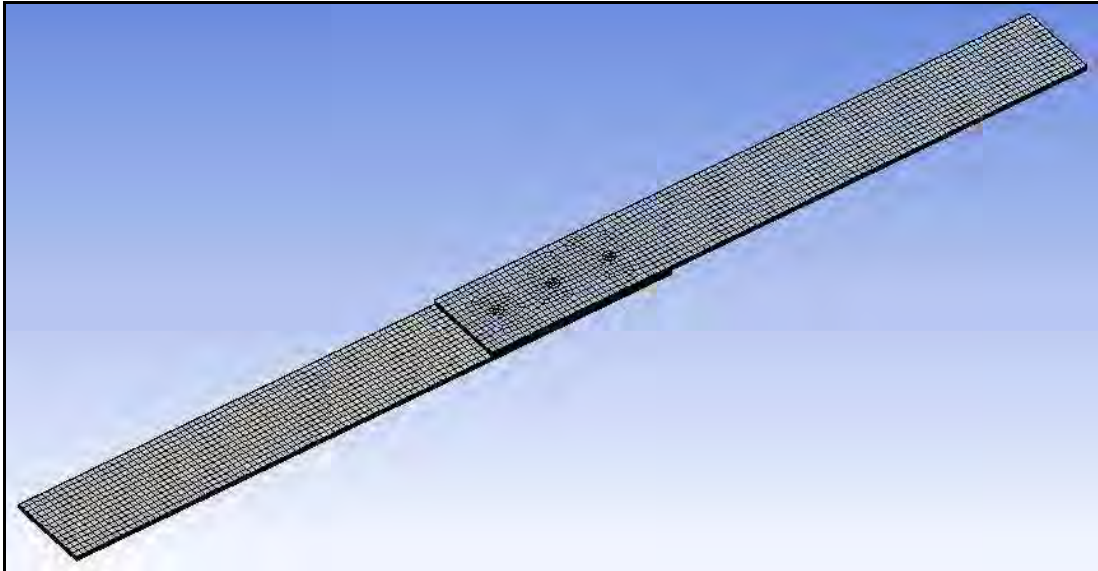


Figura 68 - Malha completa

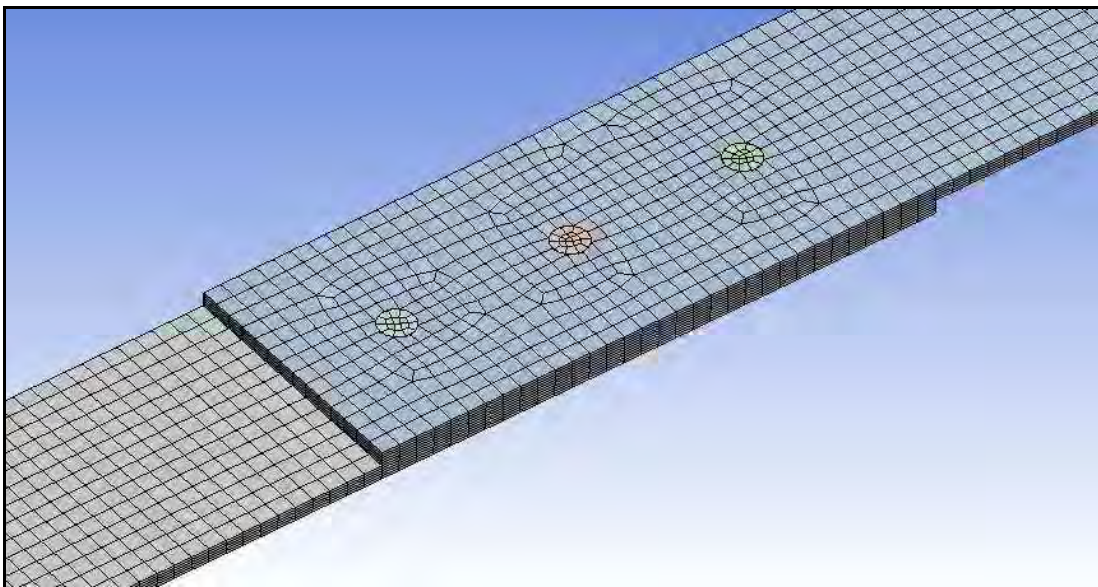


Figura 69 - Detalhe da malha na região sobreposta

### 4.3 Contato

Quando a análise é realizada em uma montagem, é necessário definir o contato existente entre as peças, podendo ser colado, com atrito, sem atrito, etc. Na junta estudada, todas as regiões em contato são consideradas com atrito e o coeficiente de atrito adotado é 0,2, conforme Xavier (2006). Para a análise são definidas:

1) Contato entre as chapas: A definição do contato com atrito e coeficiente de atrito e as faces de aplicação são mostradas nas Figuras 70 e 71.

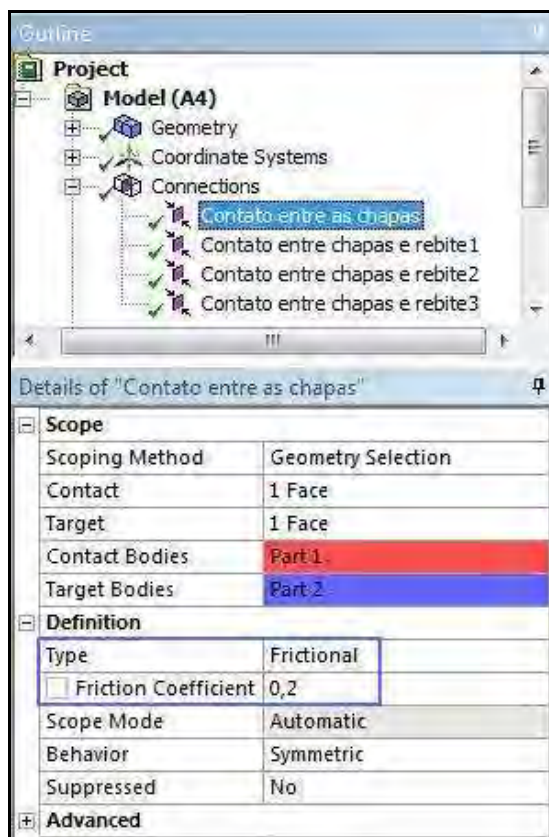


Figura 70 - Definição do contato entre as chapas

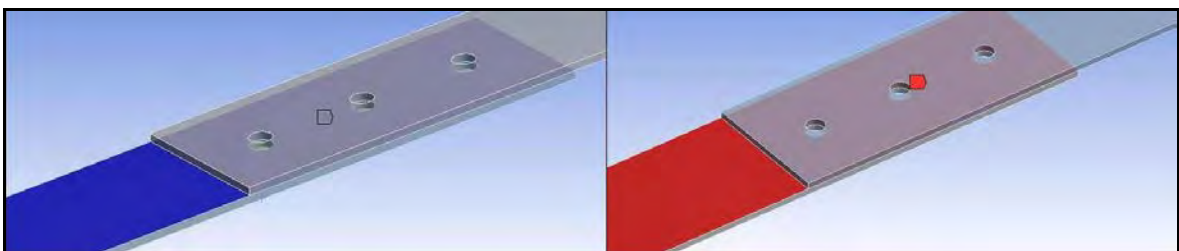


Figura 71 - Seleção das faces de aplicação do contato das chapas

2) Contato entre chapas e rebite 1: A definição do contato com atrito e coeficiente de atrito e as faces de aplicação são mostradas nas Figuras 72 e 73.

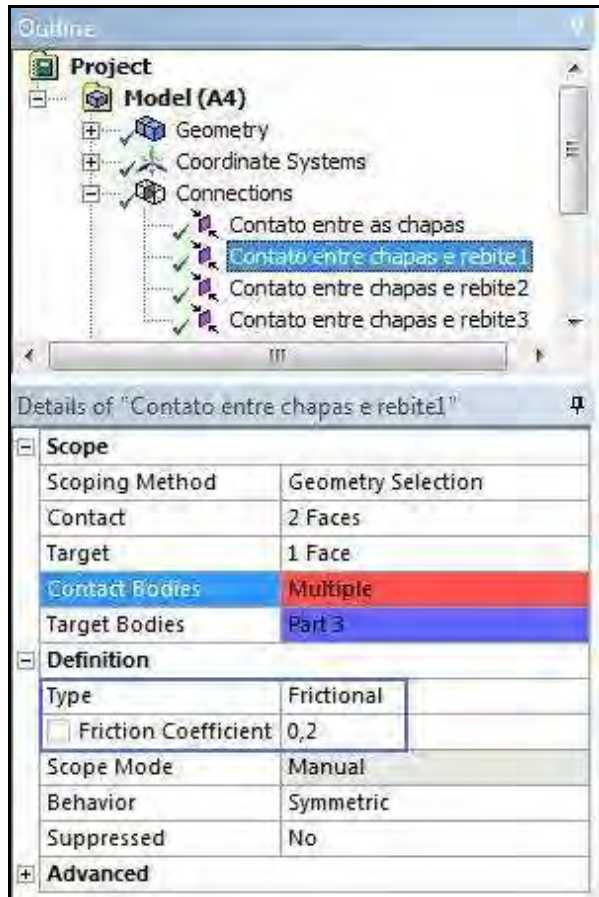


Figura 72 - Definição do contato entre chapas e o rebite 1

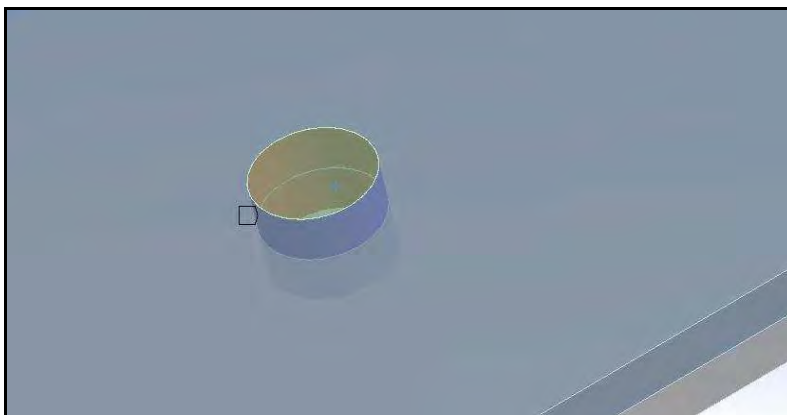


Figura 73 - Região de contato entre as chapas e o rebite 1

3) Contato entre as chapas e o rebite 2: A definição do contato com atrito e coeficiente de atrito e as faces de aplicação são mostradas nas Figuras 74 e 75.

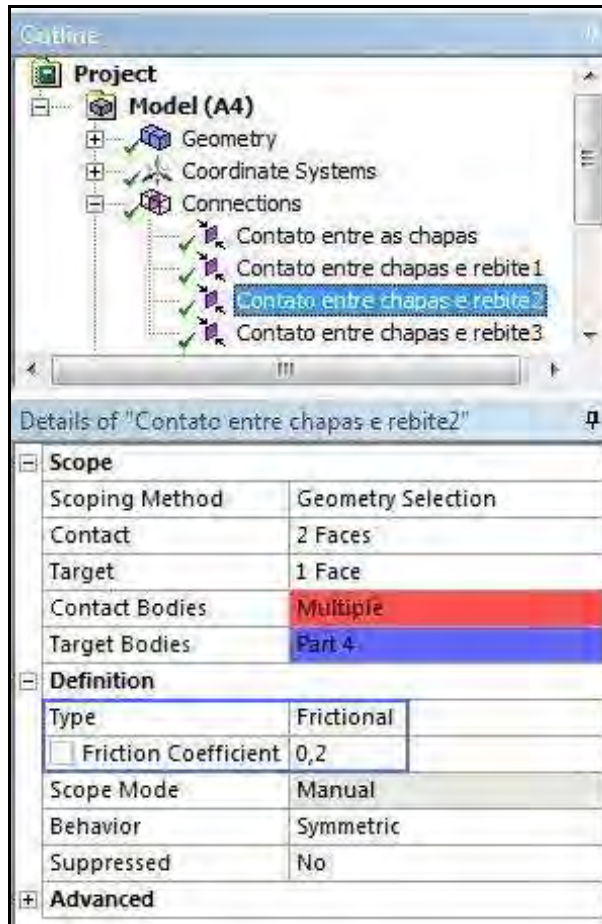


Figura 74 - Definição do contato entre chapas e o rebite 2

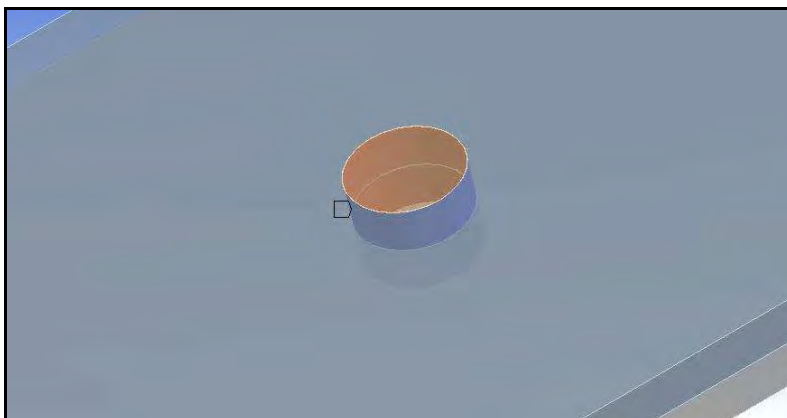


Figura 75 - Região de contato entre as chapas e o rebite 2

4) Contato entre as chapas e o rebite 3: A definição do contato com atrito e coeficiente de atrito e as faces de aplicação são mostradas nas Figuras 76 e 77.

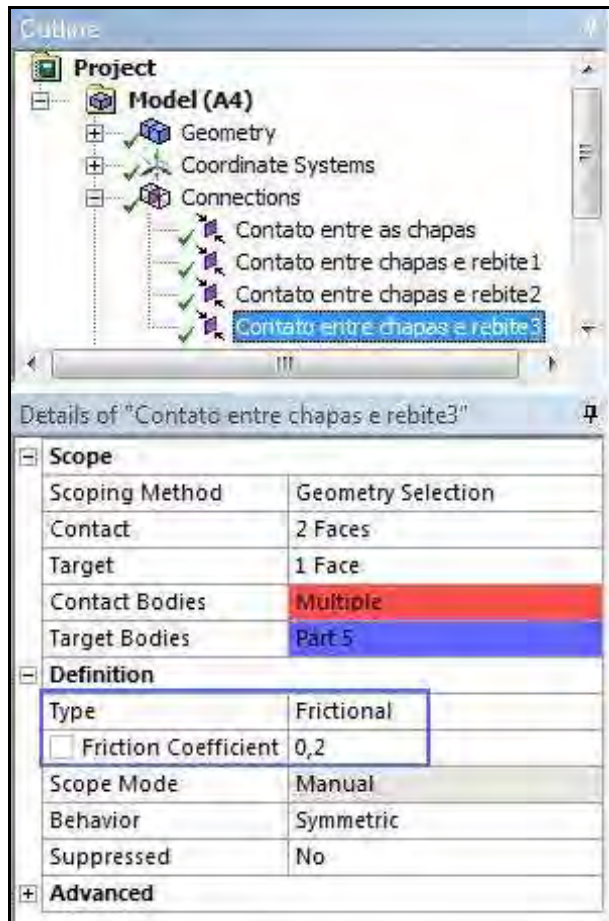


Figura 76 - Região do contato entre chapas e o rebite 3



Figura 77 - Região de contato entre as chapas e o rebite 3

#### 4.4 Definição dos estágios da análise

As análises são realizadas em três partes: Ajuste de interferência (resultando em tensões residuais, como ocorre no processo de rebiteagem), carregamento estático e análise de fadiga. Para tanto, no software ANSYS são definidos os dois primeiros estágios, como mostra a Figura 78, sendo que a duração, por serem análises estáticas, significa o valor máximo do incremento da carga a ser aplicada.

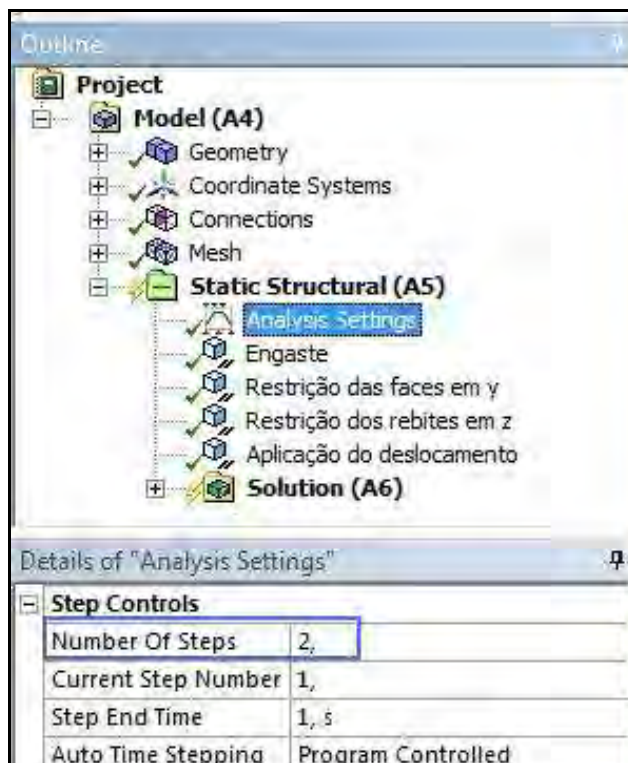


Figura 78 - Definição do número de estágios da análise

O estágio da fadiga é incluso como uma opção na solução, definido como uma ferramenta de fadiga no software, como mostrado na Figura 79:

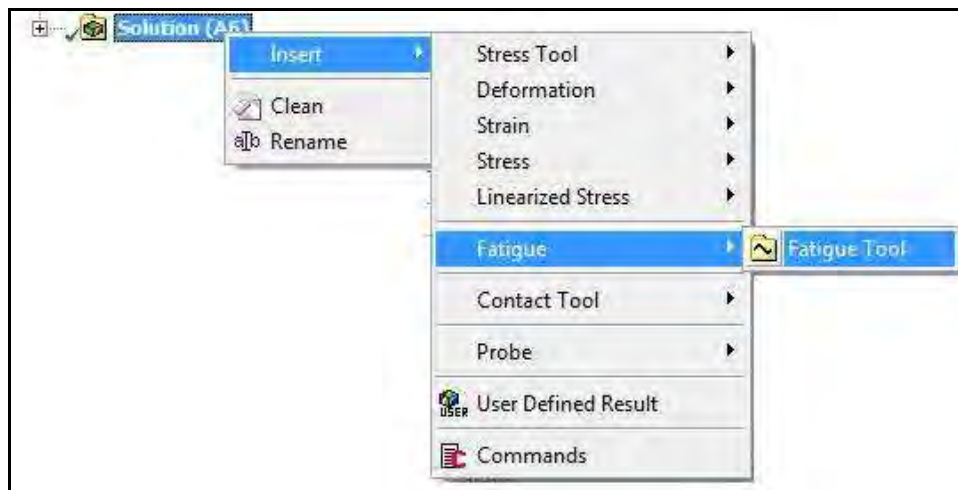


Figura 79 - Seleção da análise de fadiga

#### 4.5 Primeira análise – Força de aperto média

É realizada uma análise considerando um valor médio para a força de aperto onde é feita a verificação teórica de tensão residual, locais críticos, a correlação de valores experimentais de deformação e vida em fadiga.

##### 4.5.1 Primeiro estágio – Análise de interferência

Devido ao processo de rebitagem deve-se considerar, para a análise da junta, uma tensão residual antes do estágio de carregamento. Considerando uma força de aperto média, o valor da razão entre a tensão radial resultante no furo e a tensão de escoamento do material da chapa é adotado conforme Fung e Smart (1997), como mostra a equação (23).

$$0,03 \cong \frac{\sigma_{\text{radialfuro}}}{\sigma_{\text{y-materialchapa}}} \quad (23)$$

#### 4.5.1.1 Contato

Para representar a pré-tensão na análise inicial, foi utilizado um ajuste de interferência com um valor de 0,0017 mm, nas faces de contato de cada furo da chapa com o rebite. O valor da interferência é determinado empiricamente, de forma a encontrar uma tensão residual radial de acordo com a literatura – equação (23). Este é o único carregamento deste estágio. Esta condição pode ser vista nas Figuras 80, 81 e 82.

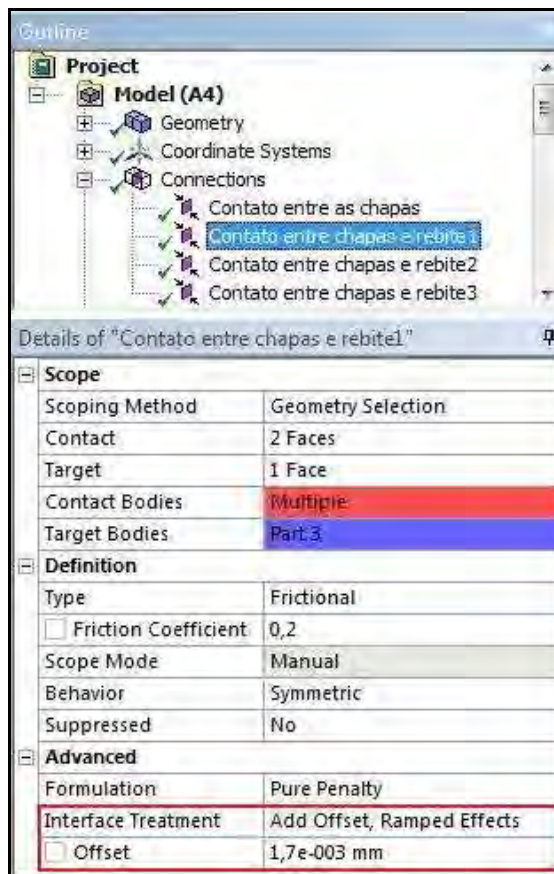


Figura 80 - Definição da interferência entre chapas e rebite 1



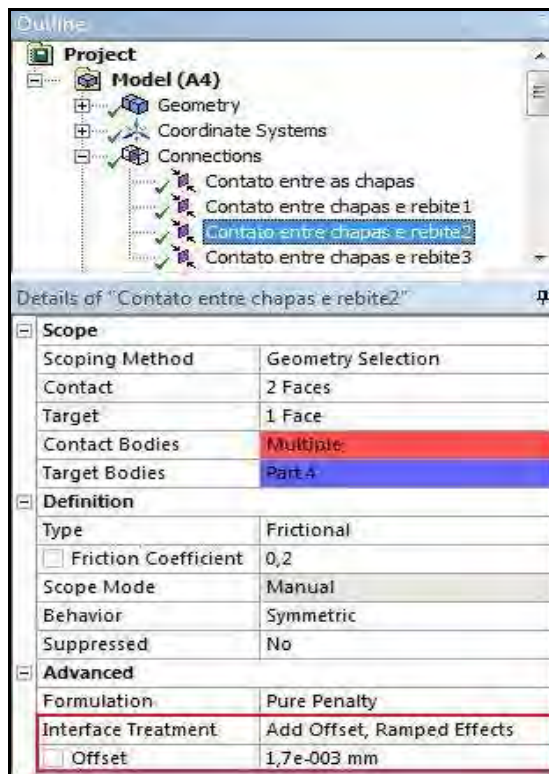


Figura 81 - Definição da interferência entre chapas e rebite 2

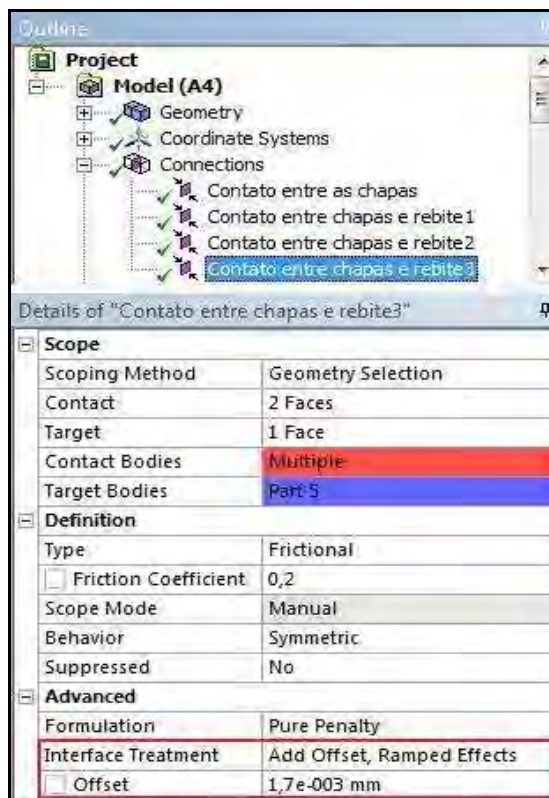


Figura 82 - Definição da interferência entre chapas e rebite 3

#### 4.5.1.2 Condições de contorno

As condições de contorno para a aplicação do ajuste de interferência são:

##### 1) Engaste na extremidade 1

Na face oposta à que será aplicada o deslocamento no segundo estágio, é definida uma condição de contorno de engaste, onde todos os graus de liberdade são restritos, conforme mostrado nas Figuras 83 e 84:

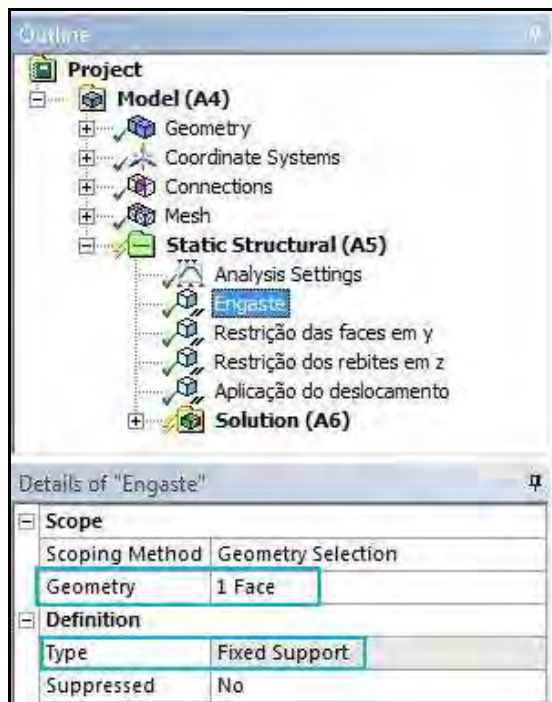


Figura 83 - Engaste na face da junta

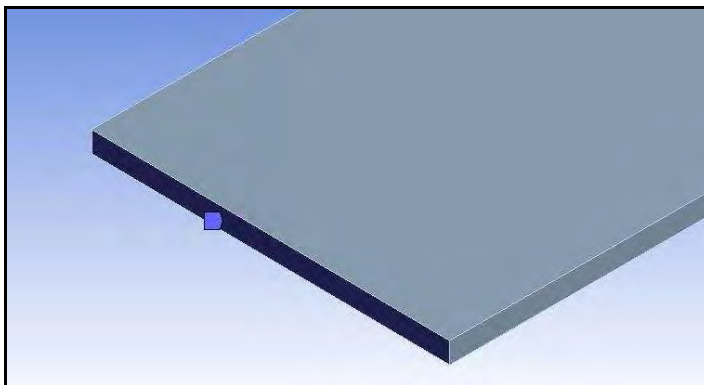


Figura 84 - Face de aplicação do engaste

## 2) Restrição das faces no eixo y

Essa restrição é atribuída às faces laterais das chapas, de modo a considerá-las infinitas, evitando deformações locais. Sua definição, local de aplicação e valores para o primeiro estágio, são mostrados nas Figuras 85, 86 e 87.

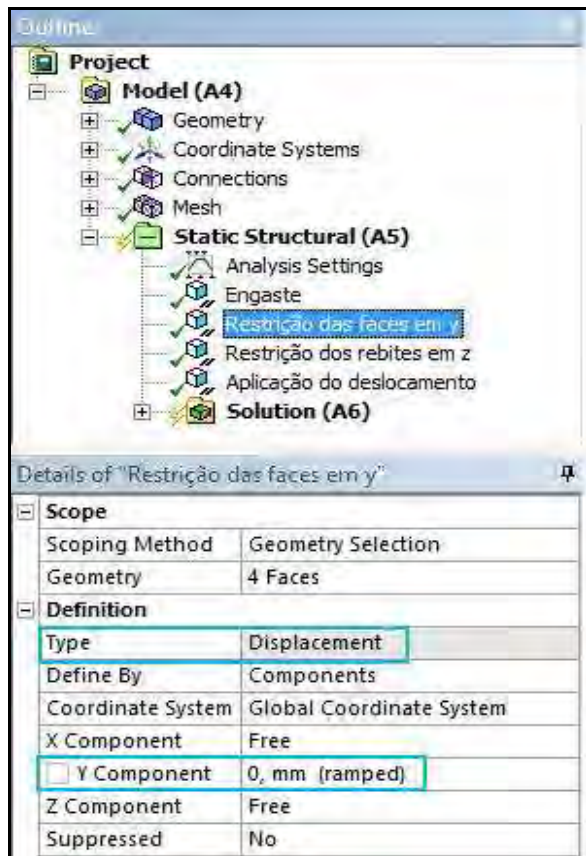


Figura 85 - Definição da restrição das faces das chapas no eixo y

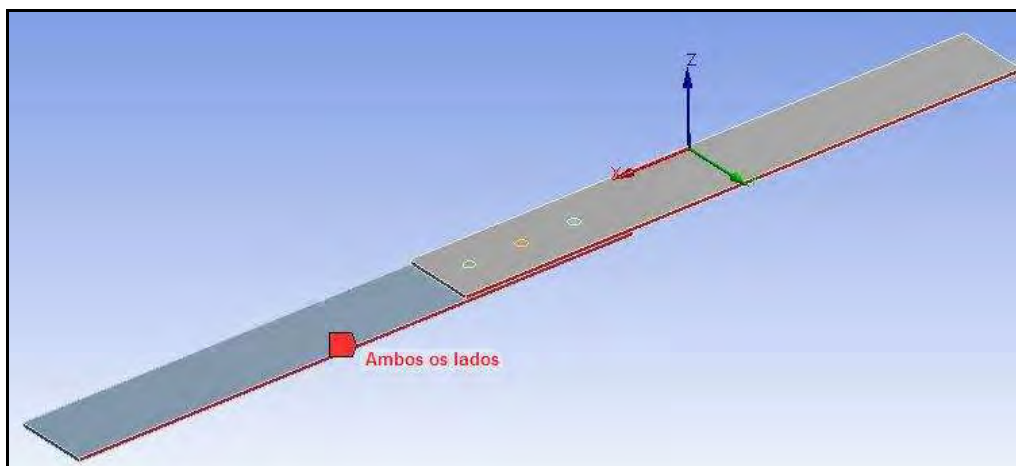


Figura 86 - Faces selecionadas para restrição no eixo y

Tabular Data			
	Steps	Time [s]	Y [mm]
1	1	0,	0,
2	1	1,	0,
3	2	2,	= 0,
*			

Figura 87 - Restrição do grau de liberdade no 1º estágio

### 3) Restrição dos rebites no eixo z

Para a simulação do ajuste de interferência, restringem-se as faces superiores e inferiores dos rebites no eixo z de maneira que, para a análise, o rebite só esteja livre para deslocar em seu sentido radial. A descrição da restrição e as faces dos rebites são mostradas nas Figuras 88 e 89.

The image shows the ANSYS Workbench interface. The Outline pane on the left displays the project hierarchy: Project > Model (A4) > Static Structural (A5) > Restrição dos rebites em z. The Details pane on the right shows the configuration for this constraint:

Details of "Restrição dos rebites em z"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	6 Faces
<b>Definition</b>	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	Free
<input type="checkbox"/> Y Component	Free
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
Suppressed	No

Figura 88 - Definição da restrição

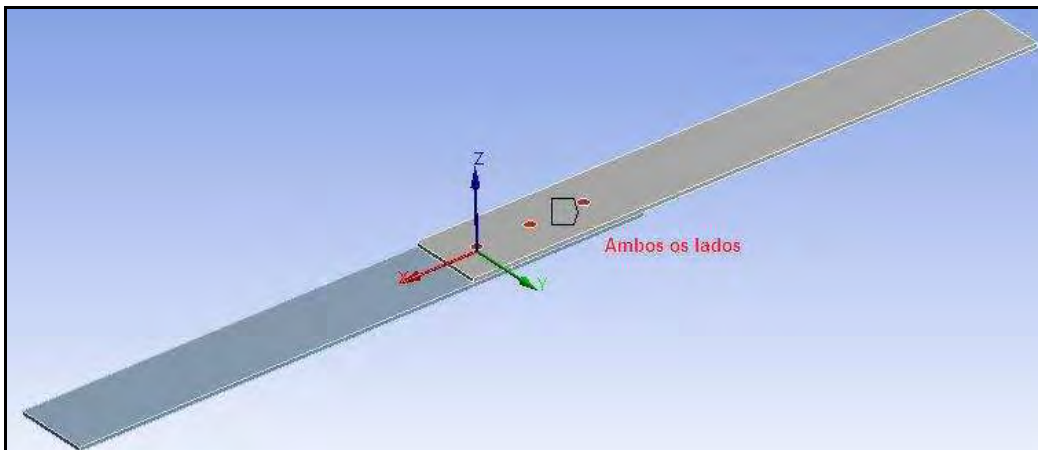


Figura 89 - Faces selecionadas para restrição no eixo z

#### 4) Restrição/Aplicação do deslocamento

No primeiro estágio, ambas as extremidades estão restritas nos seis graus de liberdade. A definição da condição de contorno, a face de aplicação e os valores são vistos nas Figuras 90, 91 e 92:

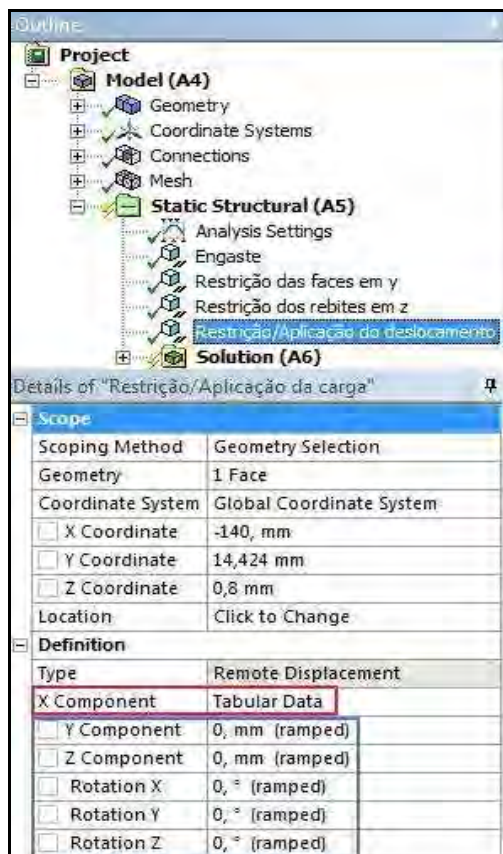


Figura 90 - Definição da restrição

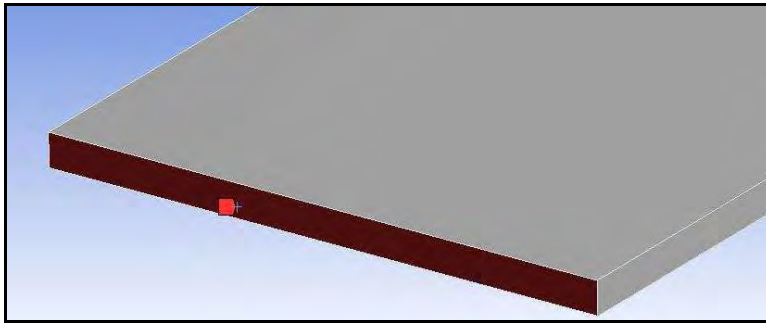


Figura 91 - Face de aplicação da restrição

Steps	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	1	0,	0,	0,	0,	0,	0,
2	1	0,	0,	0,	0,	0,	0,
3	2	-0,1	= 0,	= 0,	= 0,	= 0,	= 0,

Figura 92 - Valores para o primeiro estágio

#### 4.5.2 Segundo estágio – Aplicação do deslocamento

Na análise de carregamento estático observa-se uma não-linearidade geométrica, quando há um deslocamento fora do plano. Esta condição ocorre devido ao momento secundário, que faz com que as chapas percam o contato em algumas regiões. Para um cálculo mais direto, aplica-se um deslocamento na face livre, como ocorre na máquina de testes. O valor da força resultante é obtido como uma opção de solução, conforme Figura 93:

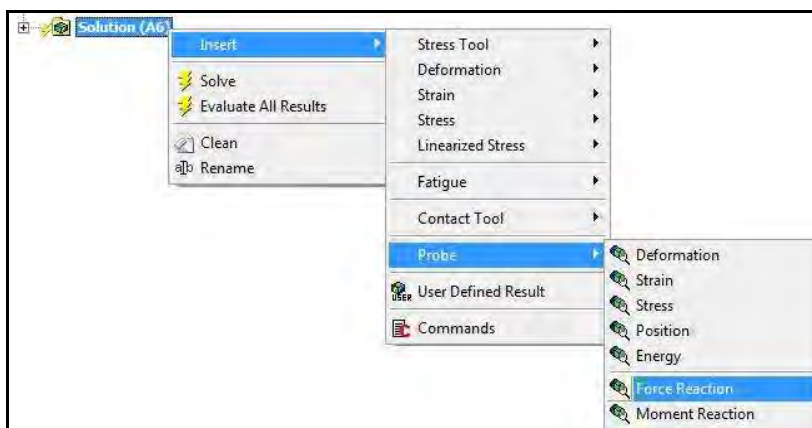


Figura 93 - Seleção da opção da Força de reação

As deformações resultantes são então comparadas entre os valores obtidos nos extensômetros e nos elementos referentes ao posicionamento destes na simulação. A

correlação entre o modelo real e o modelo numérico é um passo determinante para a validação da simulação.

#### 4.5.2.1 Contato

Após a análise de interferência, o corpo do rebite possui o mesmo diâmetro do furo, e a definição do contato continua sendo com atrito e o mesmo coeficiente de atrito é mantido.

#### 4.5.2.2 Condições de contorno

No segundo estágio, a montagem deve ter as condições de contorno do teste experimental. Para tanto, essas condições são modificadas com relação ao primeiro estágio, possuindo as seguintes configurações:

##### 1) Engaste na extremidade 1

A restrição de todos os graus de liberdade é mantida na face anteriormente selecionada.

##### 2) Restrição das faces no eixo y

Essa condição também é mantida para garantir o comportamento correto da junta devido à simetria.

##### 3) Restrição dos rebites no eixo z

Essa condição é desabilitada nesse estágio, em vista que os rebites já possuem a pré-tensão e na aplicação do deslocamento não possuem restrição. A Figura 94 mostra o processo para desabilitar a condição de contorno no segundo estágio.

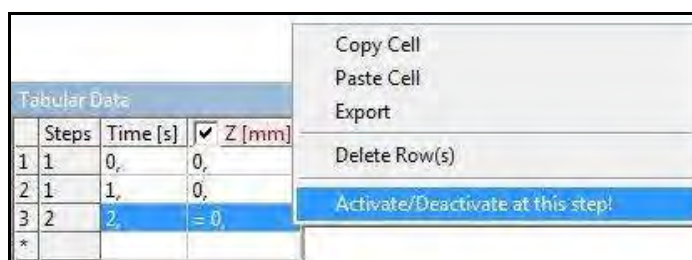


Figura 94 - Restrição das faces dos rebites no eixo z desabilitadas para o 2º estágio

#### 4) Restrição/Aplicação do deslocamento

Utilizando o recurso de deslocamento remoto, para considerar o comprimento das garras da máquina de teste, é aplicado um valor de 0,1 mm na direção negativa de x, com os outros graus de liberdades restritos. A aplicação de deslocamento ao invés de força é feita para facilitar a convergência da análise, e o valor é adotado de forma que as tensões resultantes nas chapas e rebites não sejam maiores que a tensão de escoamento das peças. A aplicação e o valor do deslocamento são mostrados nas Figuras 95 e 96.

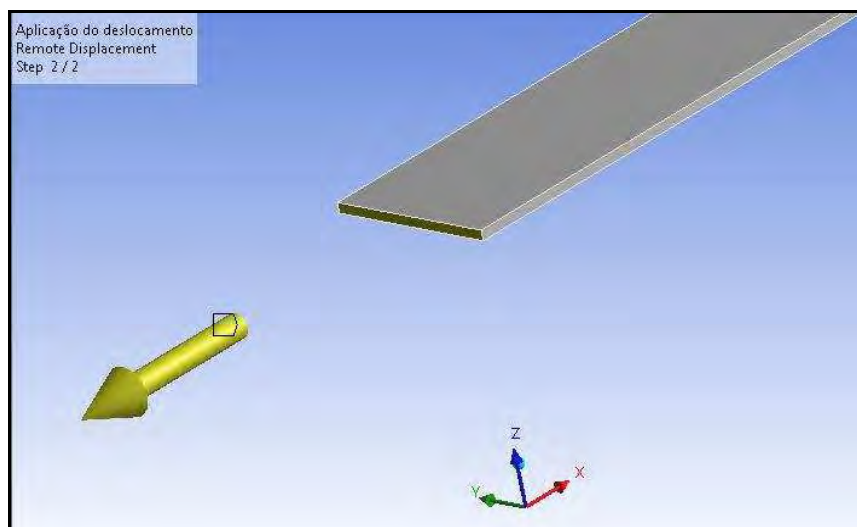


Figura 95 - Aplicação do deslocamento na face selecionada

Steps	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
2	1,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
3	2,	-0,1	= 0,	= 0,	= 0,	= 0,	= 0,

Figura 96 - Valor do deslocamento para o 2º estágio

#### 4.5.3 Terceiro estágio – fadiga

Após a análise estática é realizada a análise de fadiga, considerando o carregamento aplicado anteriormente. A fadiga é calculada apenas para as chapas da junta e os parâmetros são definidos conforme mostrado a seguir.



#### 4.5.3.1 Fator de resistência à fadiga (kf)

Como visto no Capítulo 2, o fator de resistência à fadiga, definido como kf no software Ansys, é calculado através da multiplicação dos fatores de correção. Para o modelo da junta simulada, têm-se os seguintes valores, conforme descrito por Norton (2004):

Fator de Carregamento

Para força normal aplicada na simulação:

$$C_{carregamento} = 0,7$$

Fator de tamanho

“Seções transversais solicitadas à força normal têm  $C_{tamanho}=1,0$ , porque as falhas que ocorrem em corpos-de-prova sob esse tipo de solicitação não são sensíveis ao tamanho da seção transversal.” (NORTON, 2004, p.318).

$$C_{tamanho} = 1,0$$

Fator de superfície

Pela equação (24), têm-se:

$$C_{superfície} \cong A_1 \cdot (S_{ut})^b \quad (24)$$

Na Tabela 5 têm-se os valores de A e b para diferentes acabamentos superficiais:

Tabela 5 - Coeficientes do fator de superfície (adaptado de NORTON, 2004)

Acabamento superficial	MPa	
	A1	b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou estirado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Considerando o material da chapa fabricado através do processo de laminação a quente, os coeficientes  $A_1=57,7$  e  $b=-0,718$  são encontrados, para valores na unidade MPa.

Substituindo os valores na equação (24), tem-se o resultado de  $C_{superfície}$  conforme equação (25):

$$C_{superfície} \cong 57,7 \cdot (483)^{-0,718} = 0,6742 \quad (25)$$

Fator de temperatura

Considerando  $T \leq 450^{\circ}C$ , define-se:

$$C_{temperatura} = 1,0$$

Fator de confiabilidade

Conforme Tabela 6, considerando confiabilidade de 99%, têm-se  $C_{confiabilidade} = 0,814$ .

Tabela 6 - Fatores de confiabilidade (adaptado de NORTON, 2004)

Confiabilidade	% Cconf
50	1,000
90	0,897
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659

Assim, conforme equações (26) e (27), é possível obter o valor de  $K_f$  para a ferramenta de fadiga:

$$k_f = C_{carregamento} \cdot C_{tamanho} \cdot C_{superfície} \cdot C_{temperatura} \cdot C_{confiabilidade} \quad (26)$$

$$k_f = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 0,6742 \cdot 1,0 \cdot 0,814 = 0,384 \quad (27)$$

#### 4.5.3.2 Parâmetros da análise de fadiga

Definem-se para a análise de fadiga, além do fator de redução encontrado anteriormente, outros parâmetros mostrados abaixo:

1) Tipo de carregamento: Como descrito na análise experimental e simulado, a força é aplicada e então o corpo-de-prova é descarregado. Desta forma, têm-se o tipo de carregamento repetido, como mostra a Figura 97.



Figura 97 - Tipo de carregamento aplicado

2) Fator de Escala: Na análise da junta, o carregamento solicitado à fadiga é o mesmo da análise estática, portanto o fator de escala é 1.

3) Tipo de análise: O modelo Tensão-Vida é utilizado para a análise.

4) Teoria de tensão utilizada: Utiliza-se a curva de Goodman, pelo carregamento apresentar tensões médias não-nulas e por este critério ser mais usual e menos conservador. A aplicação pode ser vista na Figura 98.

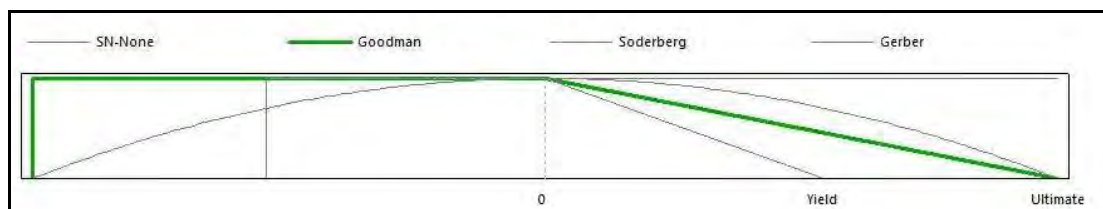


Figura 98 - Aplicação da curva de Goodman

5) Componentes de Tensão: O tipo escolhido na análise da junta é o valor equivalente de Von-Mises.

6) Unidade: No caso da junta, a unidade para a vida é definida em ciclos.

Os parâmetros inseridos na opção “*Fatigue Tool*”, podem ser vistos na Figura 99.



Details of "Fatigue Tool"	
<b>Materials</b>	
Fatigue Strength Factor (Kf)	0,38
<b>Loading</b>	
Type	Zero-Based
<input type="checkbox"/> Scale Factor	1,
<b>Definition</b>	
Display Time	End Time
<b>Options</b>	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Goodman
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
<b>Life Units</b>	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

Figura 99 - Parâmetros para análise da fadiga

#### 4.6 Segunda análise – Força de aperto baixa

Na segunda análise realizada, a força de aperto é considerada mais baixa em relação à primeira análise. Isso é feito modificando o valor da interferência entre os rebites e as chapas. O segundo e terceiro estágios possuem as mesmas especificações da primeira análise realizada – com a força de aperto média.

##### 4.6.1 Primeiro estágio – Análise de interferência

Para a condição de força de aperto baixa, o valor da interferência entre os rebites e as chapas é adotada como 1/3 do valor da interferência inicial, tendo-se um valor de 0,000567 mm. Esta definição é mostrada nas Figuras 100, 101 e 102 para o contato com as chapas e os rebites 1, 2 e 3 respectivamente:

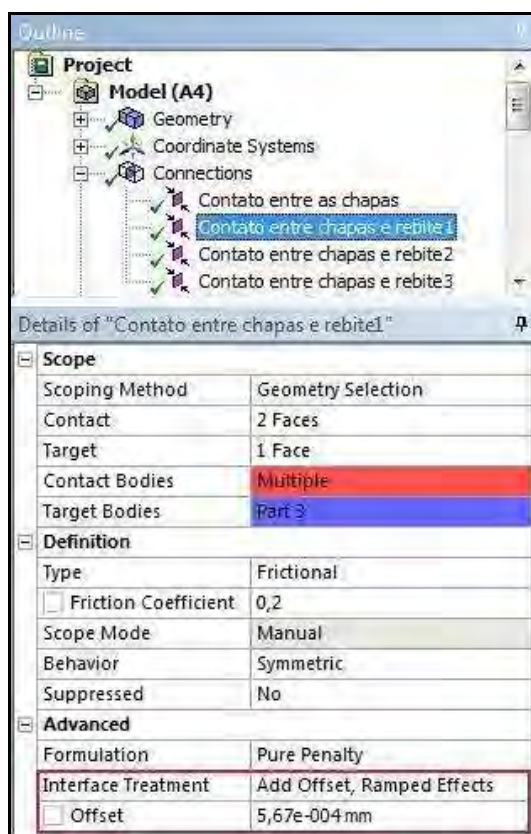


Figura 100 - Definição da interferência entre chapas e rebite 1

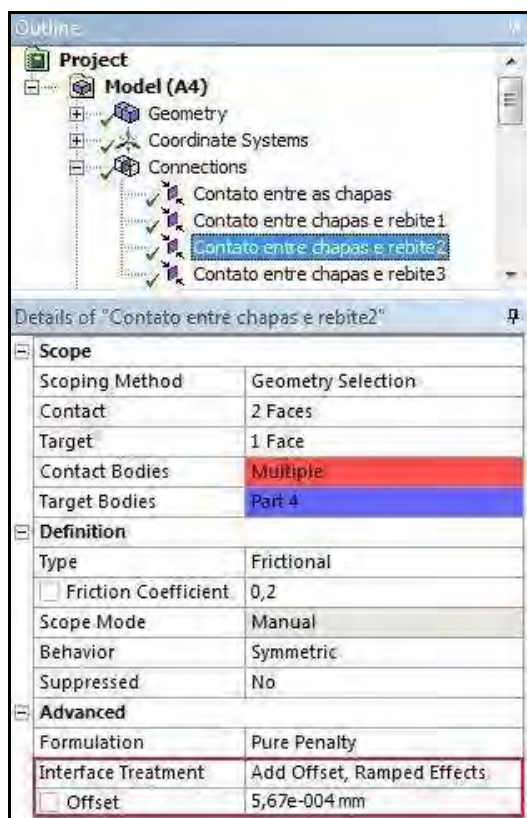


Figura 101 - Definição da interferência entre chapas e rebite 2

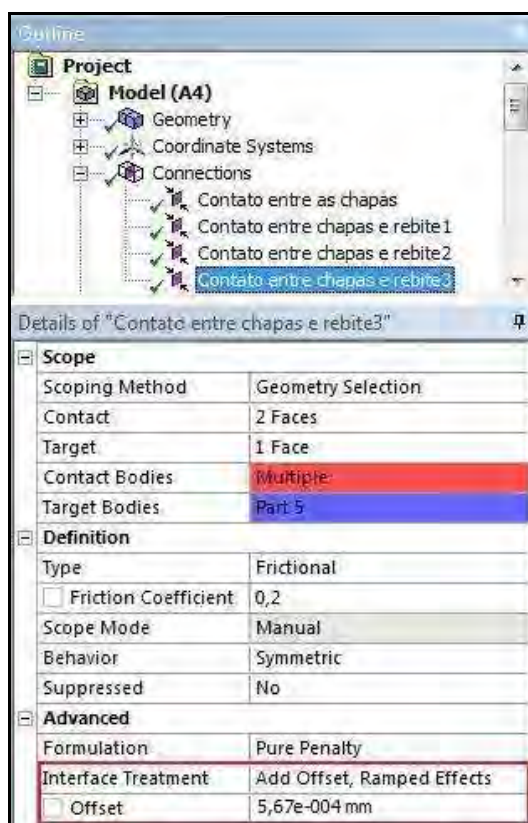


Figura 102 - Definição da interferência entre chapas e rebite 3

#### 4.7 Terceira análise – Força de aperto alta

Na terceira análise realizada, a força de aperto é considerada mais alta em relação à primeira análise, modificando o valor da interferência entre os rebites e as chapas. O segundo e terceiro estágios ficam inalterados com relação à primeira análise – com a força de aperto média

##### 4.7.1 Primeiro estágio – Análise de interferência

Para a condição de força de aperto alta, o valor da interferência entre os rebites e as chapas é adotado como sendo três vezes o valor da interferência inicial, tendo-se um valor de 0,0051 mm. As Figuras 103, 104 e 105 mostram o contato das chapas com os rebites 1, 2 e 3 respectivamente:

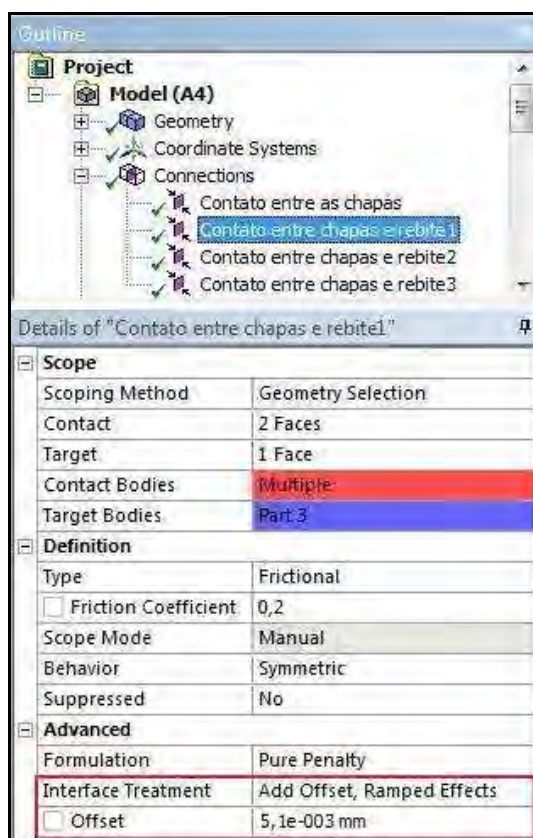


Figura 103 - Definição da interferência entre chapas e rebite 1

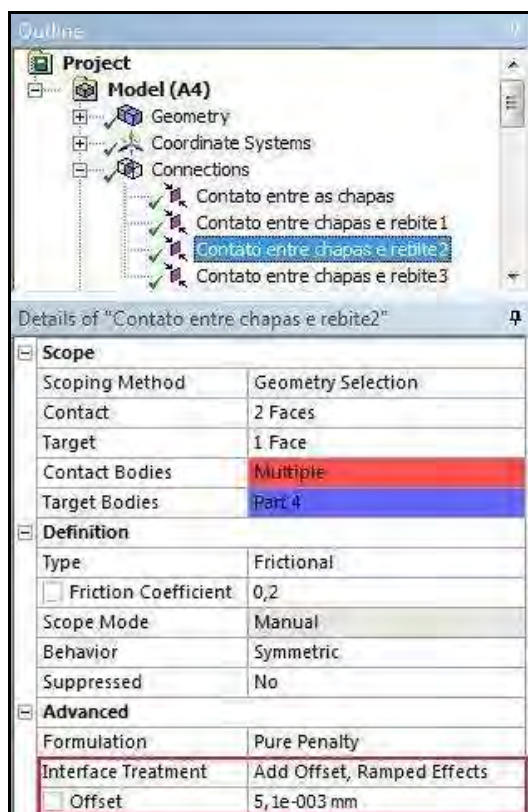


Figura 104 - Definição da interferência entre chapas e rebite 2

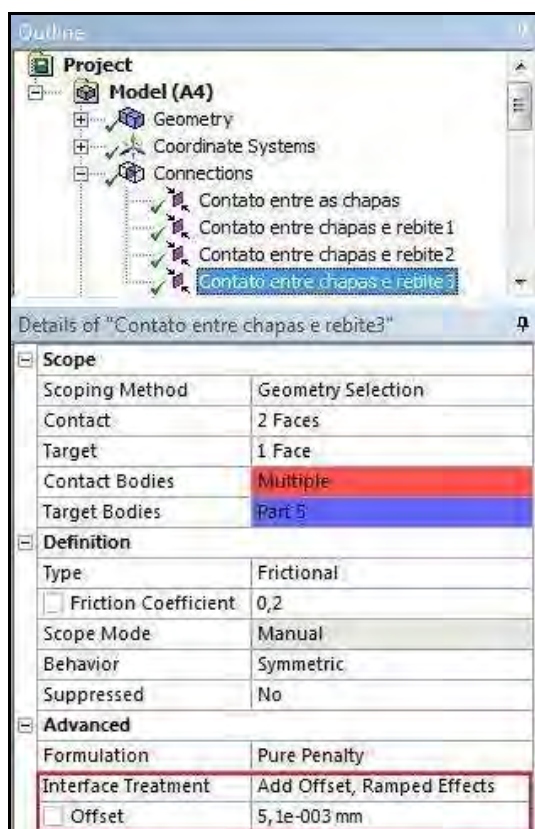


Figura 105 - Definição da interferência entre chapas e rebite 3

#### 4.8 Solução

Após a modelagem da junta, é realizada a etapa de processamento das análises, onde é feito o cálculo. Os resultados desejados da análise de interferência (primeiro estágio) e da análise estática (segundo estágio) são definidos como mostra a Figura 106.

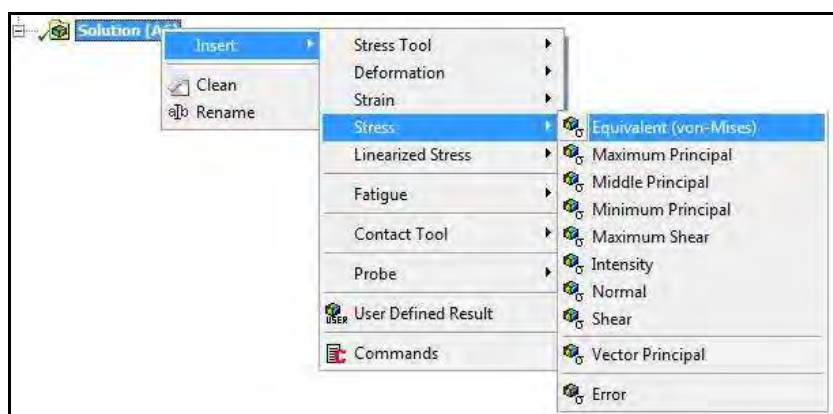


Figura 106 - Definição dos resultados a serem calculados



Através dessa opção, é possível selecionar soluções de tensão, deformação, força de reação, etc. Após a definição dos resultados desejados, inicia-se o processo de solução, através do comando *Solve*, como mostrado na Figura 107.

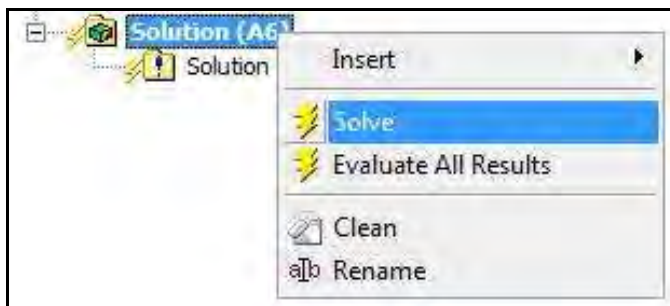


Figura 107 - Comando para solução da análise

A análise da fadiga é inserida no comando de solução, através da ferramenta de fadiga, onde é possível definir as respostas desejadas, como mostra a Figura 108.

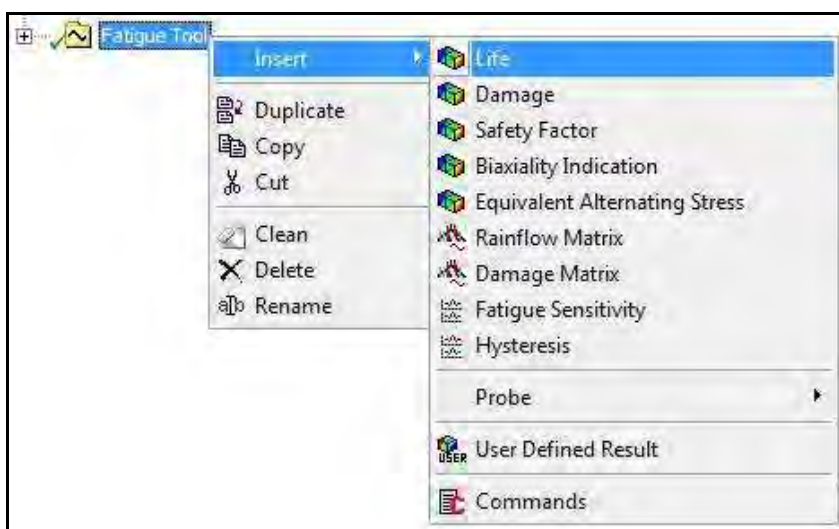


Figura 108 - Definição das respostas para a análise de fadiga

Após a definição das respostas desejadas, os resultados são calculados no comando *Evaluate All Results*, como se pode ver na Figura 109.

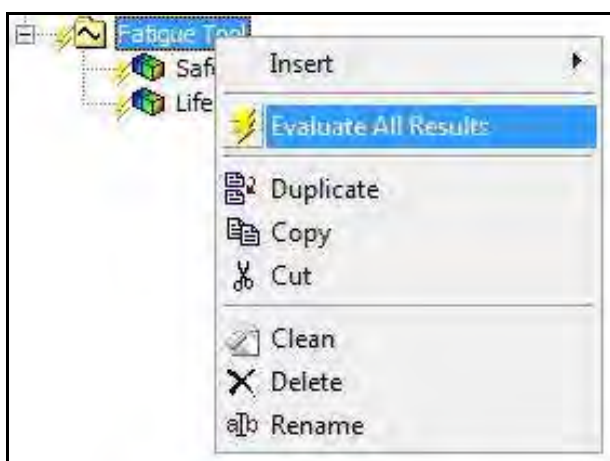


Figura 109 - Comando de cálculo da análise de fadiga

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados das análises numéricas realizadas. São mostradas as tensões residuais do estágio de interferência, o comportamento da junta após o carregamento, a correlação com o teste experimental e os resultados da análise de fadiga são verificados.

### 5.1 Primeira análise – Força de aperto média

Nessa análise foi realizada a simulação com três estágios, considerando uma força de aperto média. São mostrados os valores de tensão residual resultantes, o comportamento da junta quando carregada, é feita a correlação com valores do teste experimental e a verificação da vida em fadiga.

#### 5.1.1 Primeiro estágio – Análise de interferência

Este estágio tem como objetivo inserir tensões residuais, derivadas da instalação do rebite, para a análise correta do comportamento da junta, tanto estático quanto dinâmico. A interferência entre os rebites e as chapas é o único carregamento aplicado.

Para se obter a tensão no sentido radial dos furos, resultante do ajuste de interferência, foram selecionadas as duas faces dos furos das chapas da junta através da ferramenta de contato, como pode ser visto na Figura 110. O resultado de pressão nessas faces é apresentado na Figura 111.

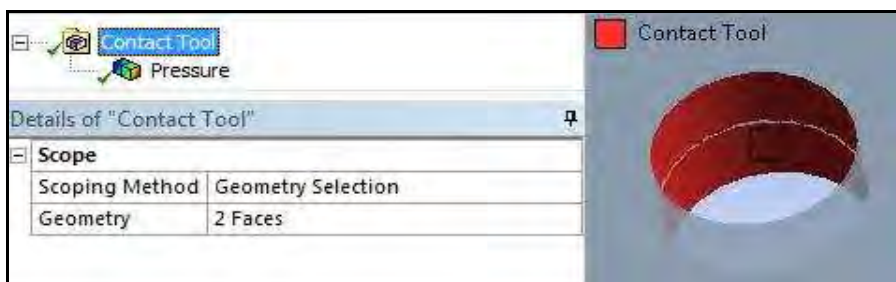


Figura 110- Ferramenta de contato

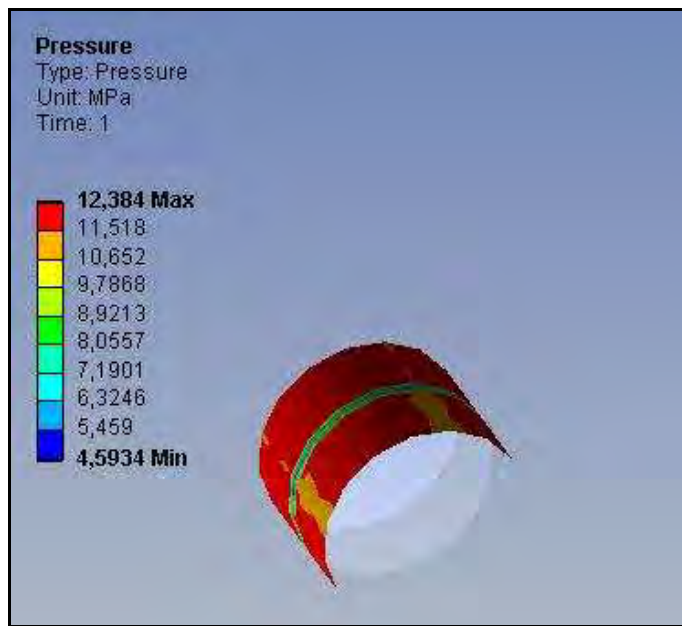


Figura 111 - Valor da tensão radial no furo

Conforme Fung e Smart (1995), o valor da tensão residual se dá conforme a equação (28).

$$0,03 \cong \frac{\sigma_{radialfuro}}{\sigma_{y-2024T3}} \quad (28)$$

onde:

$\sigma_{radialfuro}$  : Tensão residual no furo no sentido radial;

$\sigma_{y-2024-T3}$  : Tensão de escoamento da liga de alumínio 2024-T3.

Substituindo-se o valor máximo de tensão residual radial encontrado - 12,384 MPa - e o valor da tensão de escoamento da liga de alumínio 2024-T3 - 354 MPa – têm-se, na equação (29):

$$\frac{12,384}{345} = 0,0356 \quad (29)$$

O valor encontrado mostra que a interferência adotada tem como resultado uma tensão residual radial conforme equação (28).

Para os resultados de tensão axial na haste do rebite, foram selecionados os rebites e coordenadas locais na análise da tensão normal, calculando-se o resultado em relação ao eixo z, como mostram as Figuras 112, 113 e 114.



Figura 112 - Seleção do rebite 1 e coordenada local 1



Figura 113 - Seleção do rebite 2 e coordenada local 2



Figura 114 - Seleção do rebite 3 e coordenada local 3

A Figura 115 mostra a distribuição de tensão axial do rebite, sendo os valores iguais para os três rebites.

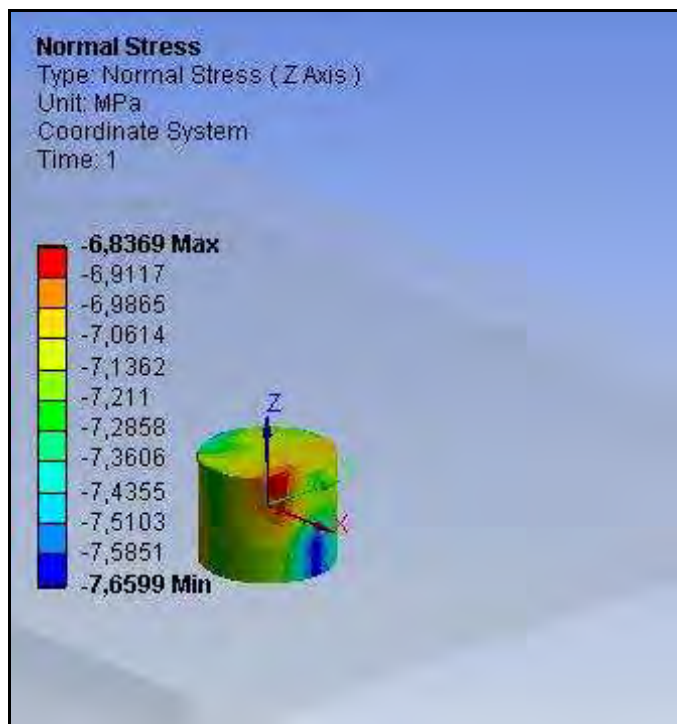


Figura 115 - Tensão residual axial no rebite

Como esperado para a simulação do processo de rebite, o campo de tensões axiais residuais possui valores negativos, isto é, de compressão, possuindo o valor máximo de -7,66 MPa, como mostra a Figura 115. Esta condição é garantida pela aplicação da interferência e condição de contorno para as faces dos rebites.

### 5.1.2 Segundo estágio – Aplicação do deslocamento

Com a aplicação do deslocamento, encontra-se a força resultante, com um valor de 466,4 N como mostra a Figura 116.

Details of "Force Reaction"	
<b>Definition</b>	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
<b>Options</b>	
Result Selection	All
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	466,39 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	-3,5367e-007 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-3,0418 N
<input type="checkbox"/> Total	466,4 N

Figura 116 - Força de reação

Essa força causa um campo de tensões menor do que o escoamento, tanto para as chapas com  $\sigma_{\max} = 112,46 \text{ MPa}$  - sendo  $\sigma_{y-2024-T3} = 345 \text{ MPa}$  - quanto para os rebites com  $\sigma_{\max} = 63,56 \text{ MPa}$  - sendo  $\sigma_{y-2117-T4} = 165 \text{ MPa}$  - como mostram as Figuras 117 e 118, respectivamente. A Figura 119 mostra o campo de tensões da junta completa.

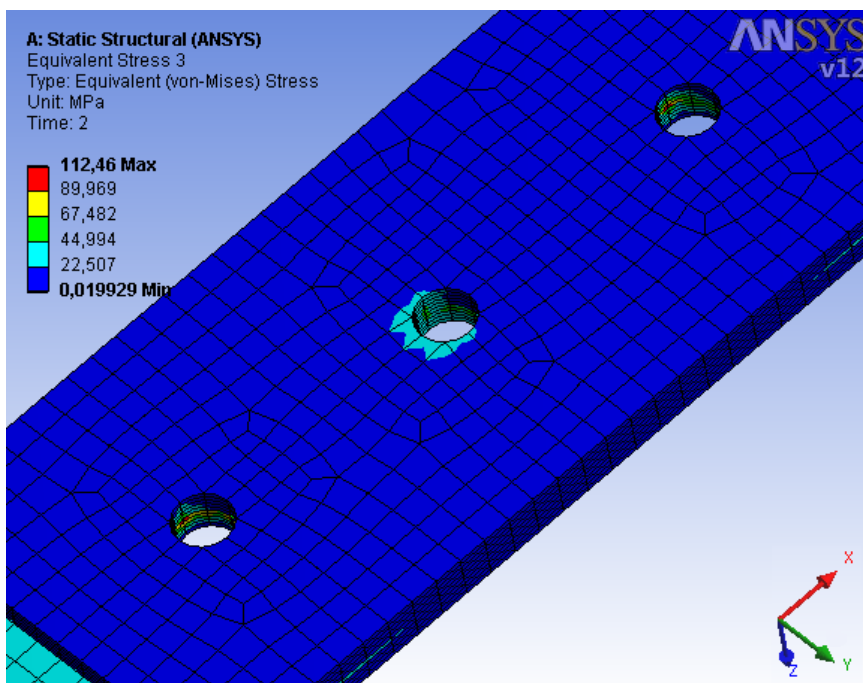


Figura 117 - Valor de tensão nas chapas

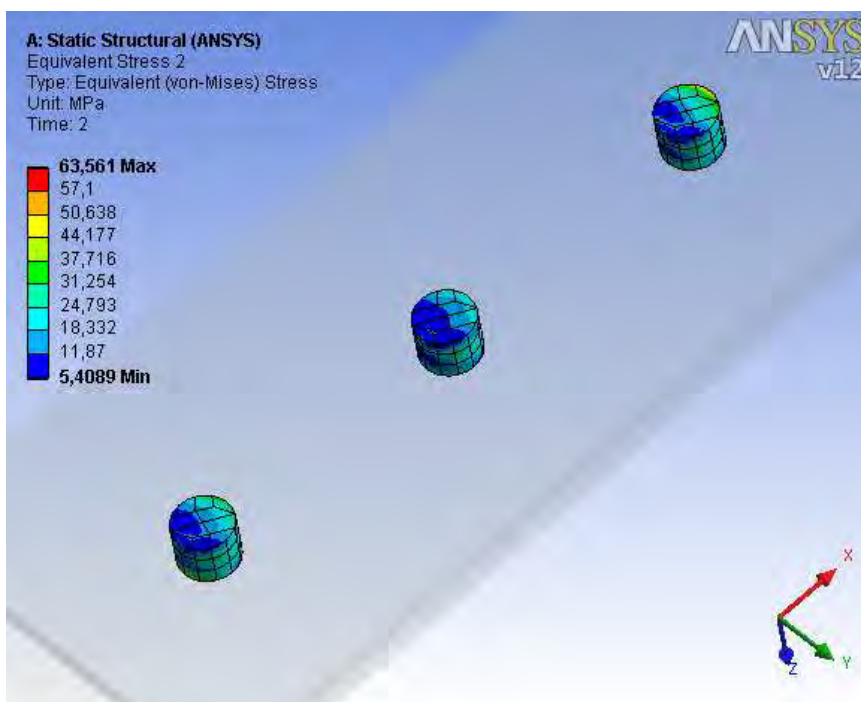


Figura 118 - Valor de tensão nos rebites

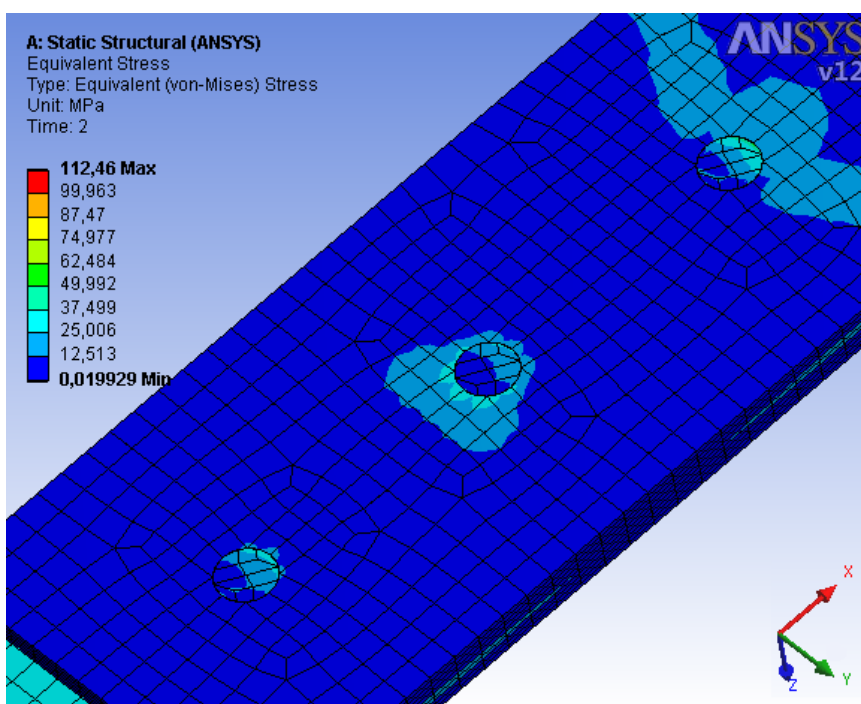


Figura 119 - Valor de tensão na junta completa

Da análise dos resultados da aplicação do deslocamento é possível verificar a deformação fora do plano, causada pelo momento secundário, conseqüente da excentricidade da junta, como mostra a Figura 120.



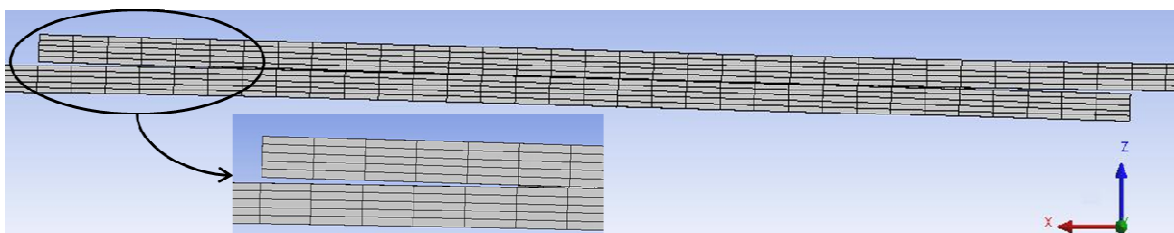


Figura 120 - Detalhe da deformação da junta após aplicação do deslocamento

A transmissão da carga pode ser analisada pelo valor máximo de tensão, que está localizado na coluna de rebites da extremidade. A Figura 121 mostra o campo de tensões da junta completa e o local do valor máximo. Como definido na simulação, o deslocamento é aplicado no sentido negativo do eixo x, sendo as colunas de rebites indicadas a partir dessa referência.

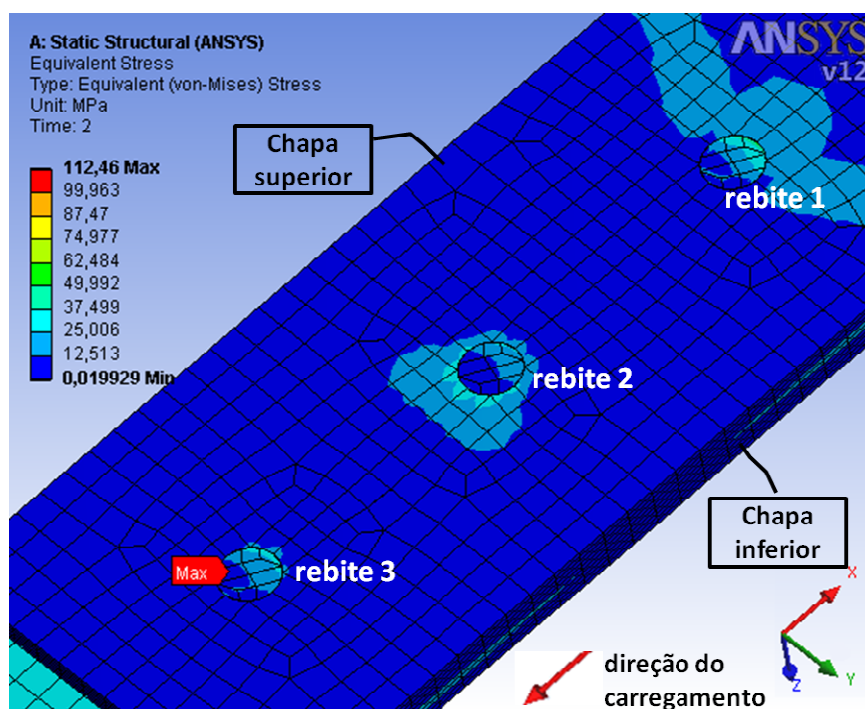


Figura 121 - Valor máximo da tensão na junta

É possível verificar o local das tensões máximas isolando a chapa superior e inferior – sendo que o carregamento é aplicado na chapa inferior.

Pode ser observado na Figura 122, que o local da máxima tensão na chapa superior é a região do furo da primeira coluna de rebites.

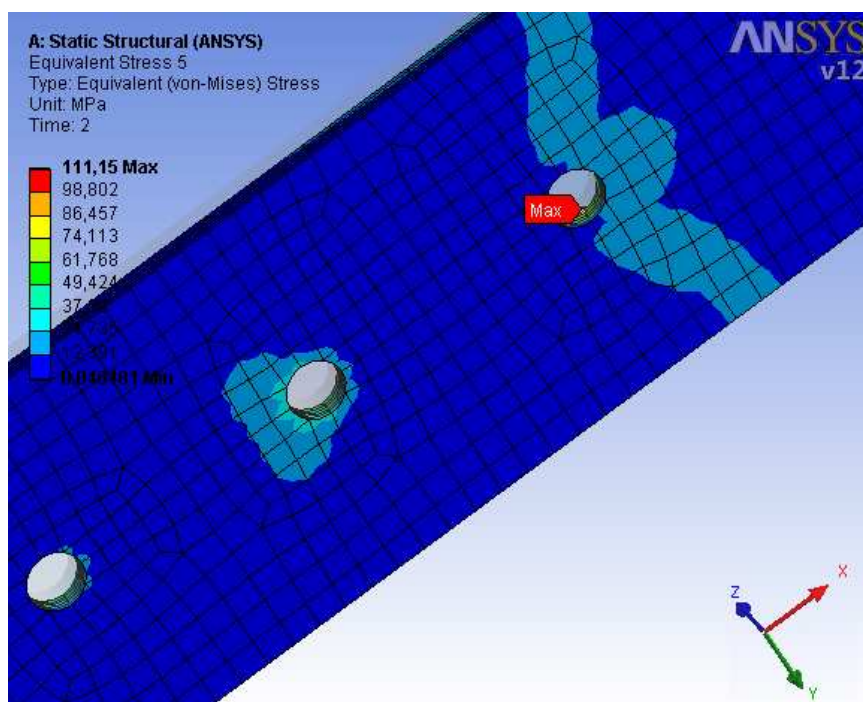


Figura 122 - Local da tensão máxima na chapa superior

A Figura 123 mostra que a máxima tensão na chapa inferior está localizada na região do furo da terceira coluna. Isso indica que as fileiras de rebites das extremidades transmitem um valor maior de força, possuindo também valores de tensão maiores.

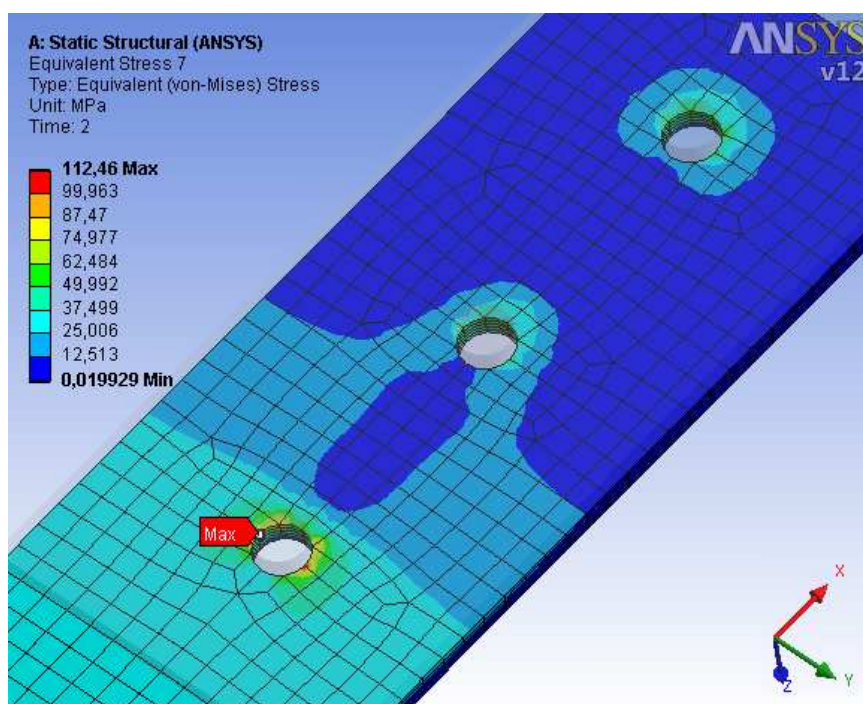


Figura 123 - Local da tensão máxima na chapa inferior

Em seguida, é feita a correlação entre os valores de deformação encontradas no teste experimental através da medição pelos extensômetros uniaxiais e os valores de deformação na direção do eixo x encontrados na simulação para a força aplicada de 466,4 N.

Os elementos que representam o posicionamento dos extensômetros e a posição física destacada destes são mostrados nas Figuras 124 e 125, respectivamente.

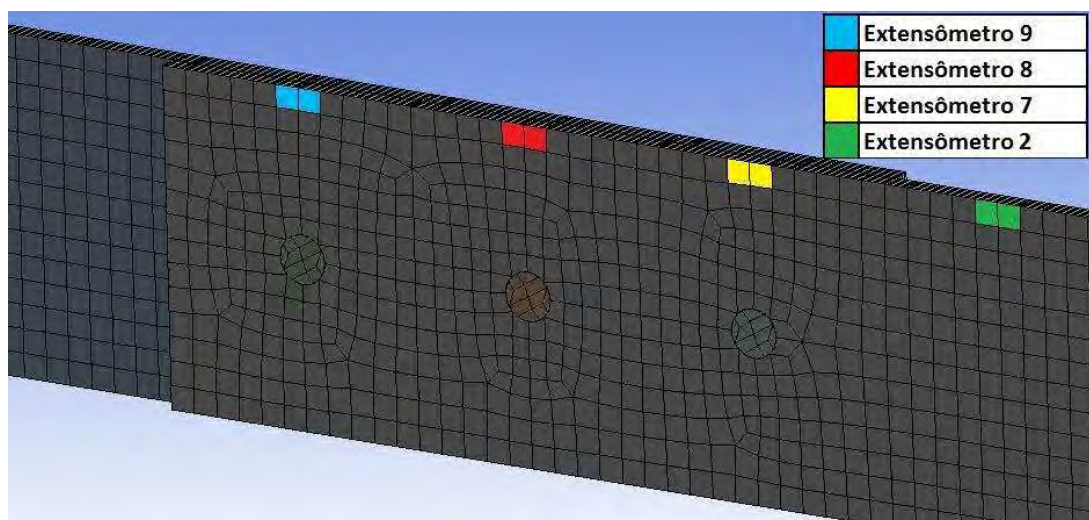


Figura 124 - Elementos utilizados para medição dos valores de deformação

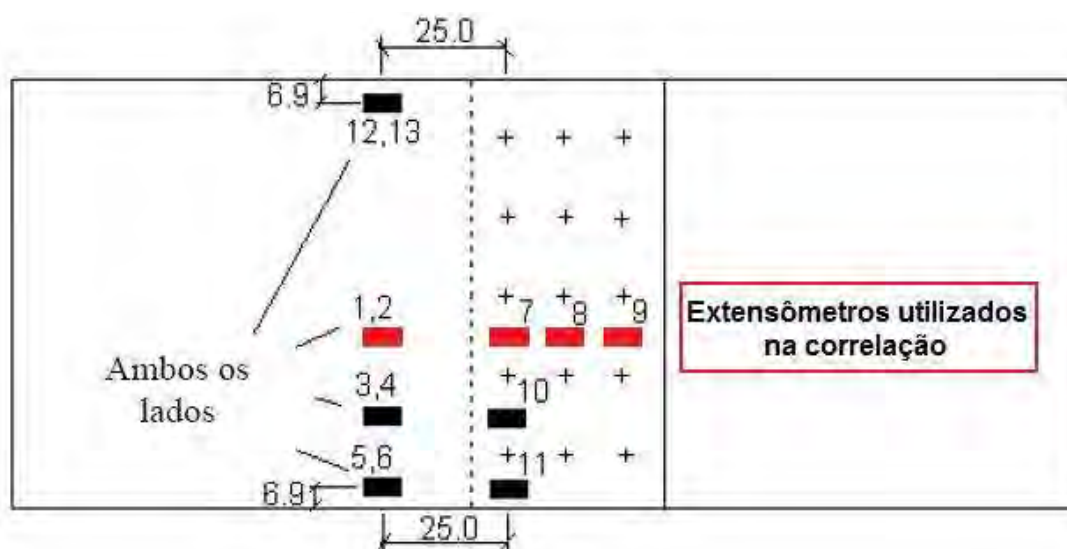


Figura 125 - Posição dos extensômetros no ensaio (adaptado de SPINELLI, 2004)

Os valores das deformações experimentais, conforme testes realizados por Spinelli (2004), e os simulados são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de deformação experimentais e simulados ( $\times 10 E-6$ )

Extensômetro	Valor experimental	Valor simulado	Erro
7	62,5	66,5	6,40%
8	80	83,3	4,13%
9	110	116,8	6,18%
2	320	351,7	9,91%

Essa correlação tem como objetivo a validação do modelo numérico da junta rebitada sobreposta. Os resultados mostram um erro máximo de aproximadamente 10%, que representa um valor aceitável para a correlação entre o modelo físico e o modelo numérico.

### 5.1.3 Terceiro estágio – Fadiga

No último estágio da simulação, é realizada a análise de fadiga nas chapas da junta. O resultado solicitado é a vida à fadiga. Como mostra a Figura 126, a peça possui vida finita de 54531 ciclos.

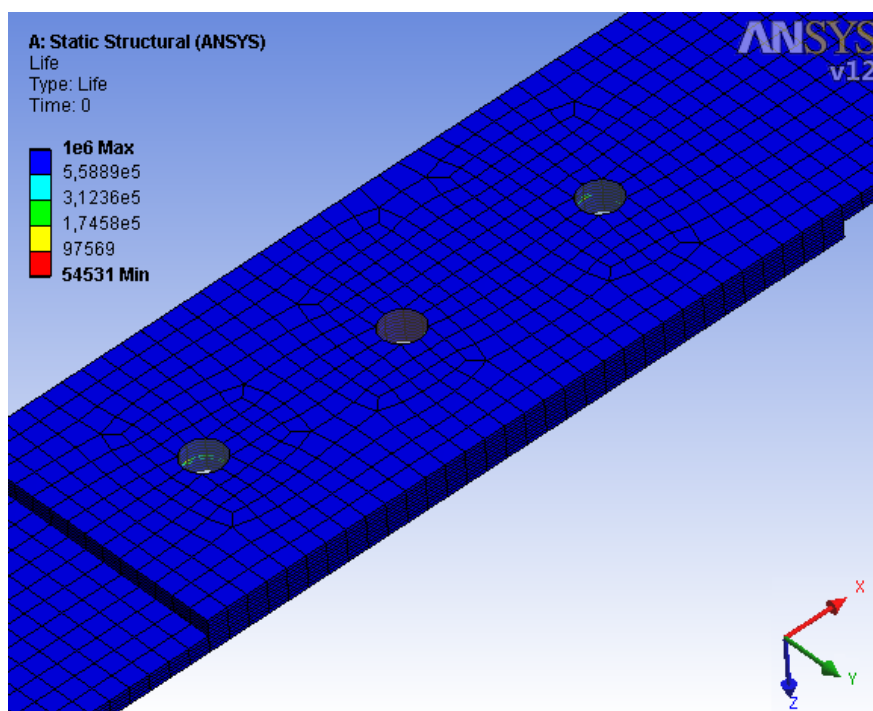


Figura 126 - Resultado de vida à fadiga

Na análise, verifica-se que o furo da terceira coluna de rebites da chapa inferior é o local crítico à fadiga da junta, como mostra a Figura 127.

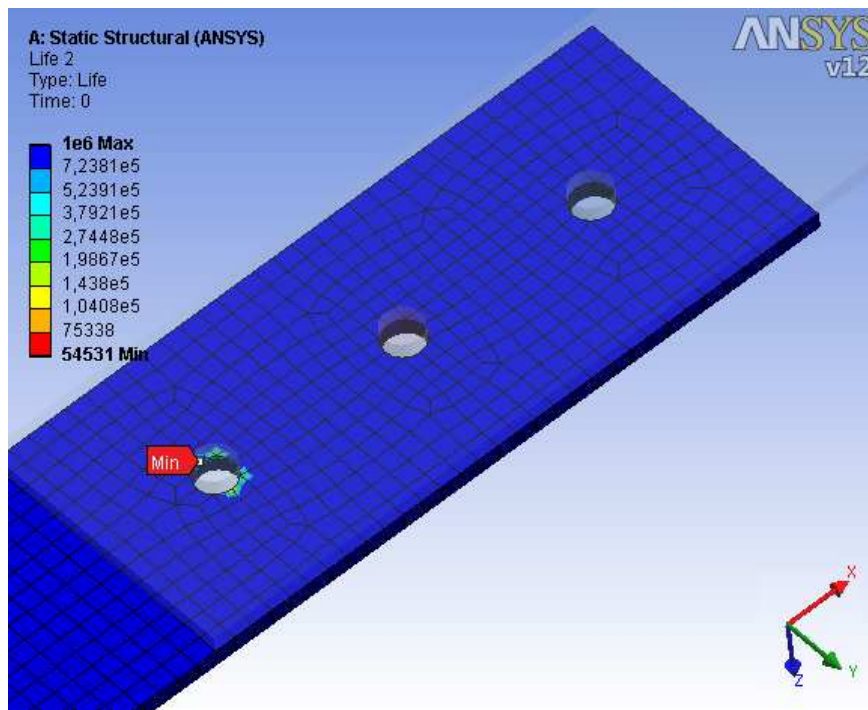


Figura 127 - Local da vida mínima da junta

Na Figura 128 é possível verificar o local crítico à fadiga na chapa superior da junta, sendo esse o furo da primeira fileira de rebites.

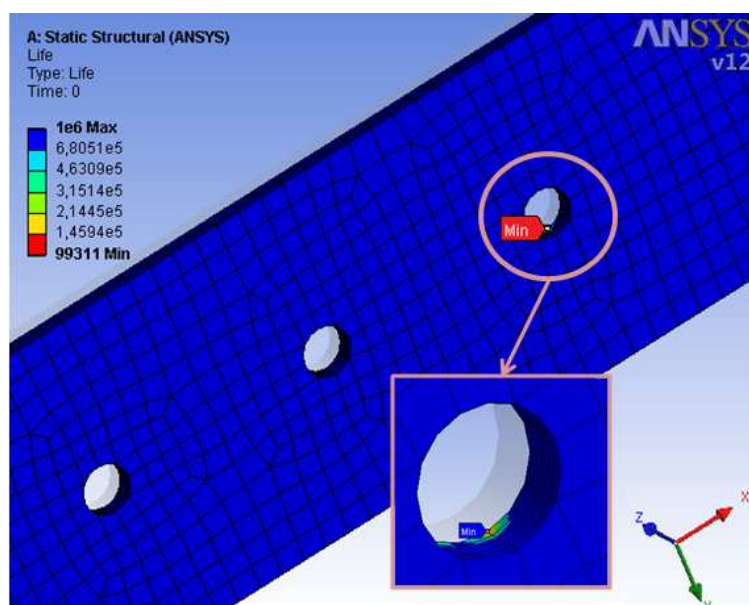


Figura 128 - Local crítico à fadiga na chapa superior

## 5.2 Segunda análise – Força de aperto baixa

Nesta simulação a interferência é menor do que a da primeira análise, simulando uma força de aperto menor na instalação dos rebites. O segundo estágio possui as mesmas condições da primeira simulação, e não há relevância no foco desses resultados. Em seguida é calculada a vida em fadiga.

Dessa forma é possível observar o comportamento da junta à fadiga com a variação da força de aperto.

### 5.2.1 Primeiro estágio – Análise de interferência

A interferência entre os rebites e as chapas aplicada nesta análise é três vezes menor do que a considerada na primeira análise. Dessa forma, simula-se uma força de aperto mais baixa durante o processo de rebitagem. O cálculo é feito utilizando as mesmas condições da primeira análise.

Com essa redução da força de aperto, os valores de tensão residual radial e axial também diminuem como mostram as Figuras 129 e 130.

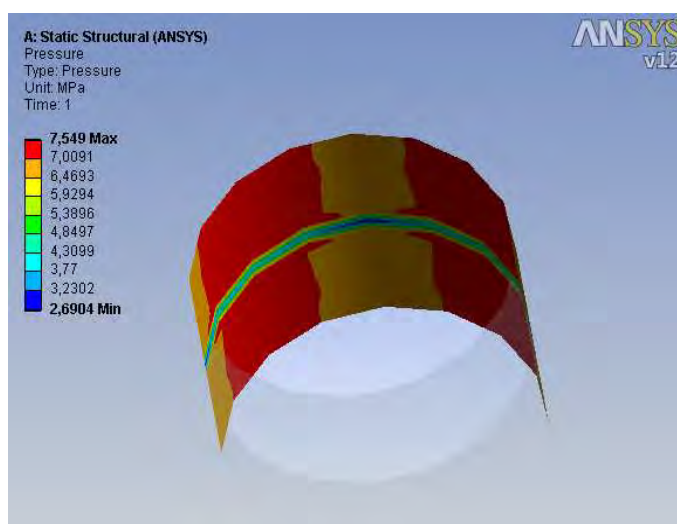


Figura 129 - Tensão radial residual

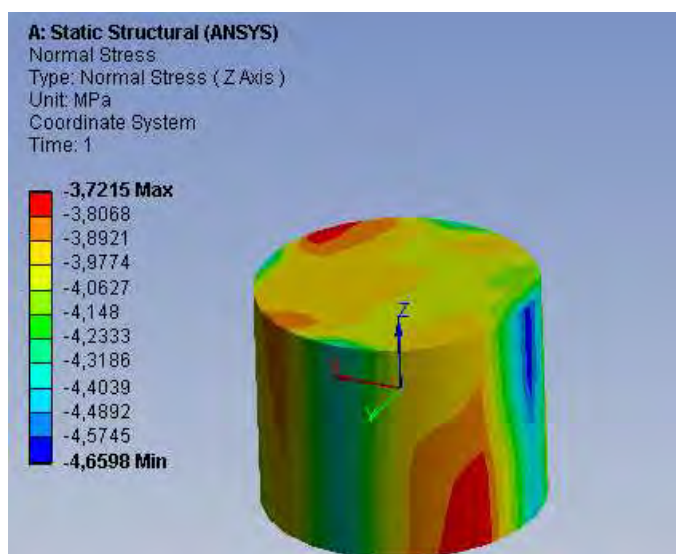


Figura 130 - Tensão axial residual

A tensão residual radial possui um valor máximo de 7,55 MPa e a axial de -4,66 MPa.

### 5.2.2 Terceiro estágio – Fadiga

Com a aplicação da carga com condições e resultados iguais aos da primeira análise, é feita a simulação da fadiga no modelo com a única alteração sendo a força de aperto. A Figura 131 mostra que a vida da peça diminui com a redução da força de aperto.

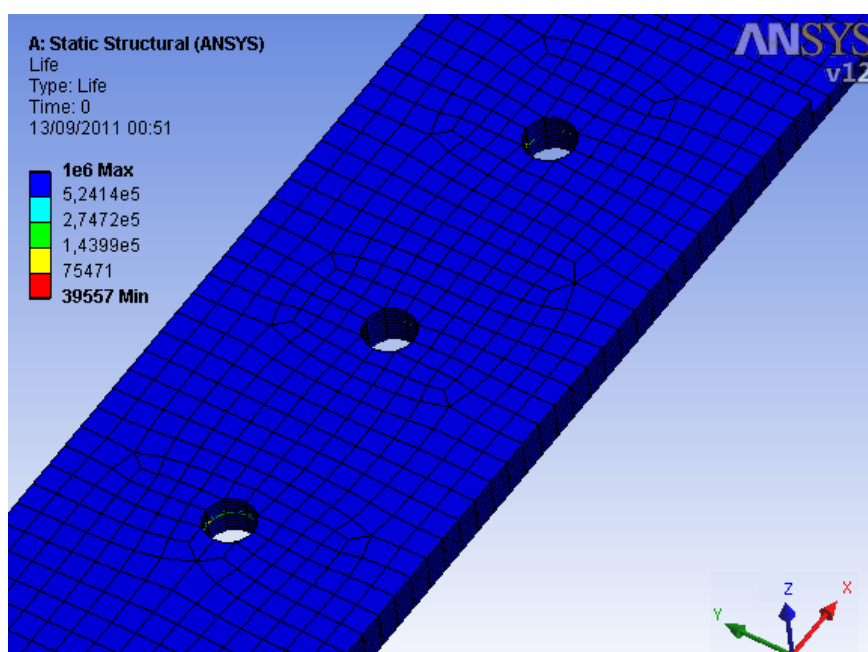


Figura 131 - Resultado de vida em fadiga para força de aperto baixa

A vida da peça é de 39557 ciclos, tendo como local crítico à fadiga o furo da terceira coluna de rebites da chapa inferior, como mostra a Figura 132.

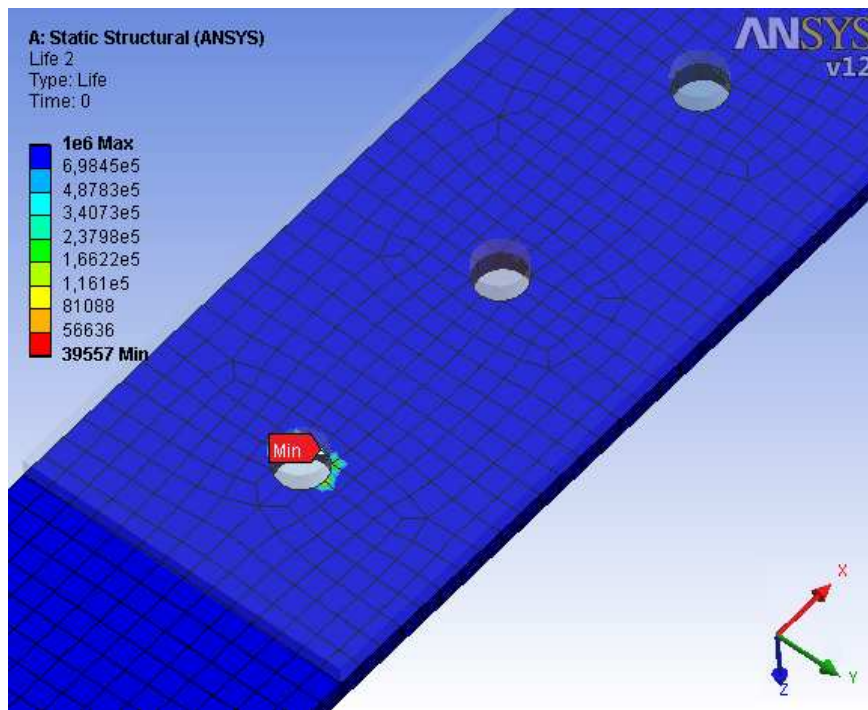


Figura 132 - Local crítica à fadiga para força de aperto baixa

### 5.3 Terceira análise – Força de aperto alta

A última simulação considera uma interferência maior do que a aplicada na primeira análise. A aplicação do carregamento se mantém com as mesmas condições da primeira análise, não sendo necessária a abordagem de seus resultados. Por fim é feita a análise à fadiga da peça.

#### 5.3.1 Primeiro estágio – Análise de interferência

É aplicada uma interferência três vezes maior do que a considerada na primeira análise, simulando uma força de aperto alta durante o processo de rebiteagem. O cálculo considera as mesmas condições da primeira análise.



O aumento da interferência gera campos de tensão residual radial e axial com valores maiores em relação aos encontrados na primeira análise, como mostram as Figuras 133 e 134, respectivamente.

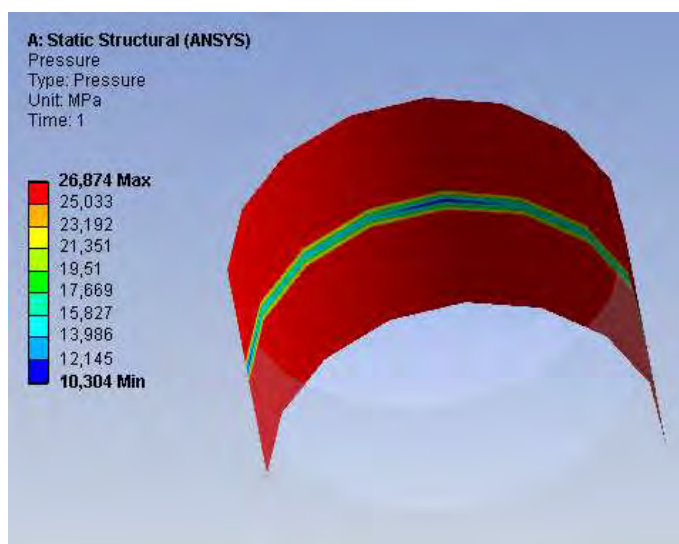


Figura 133 - Tensão residual radial

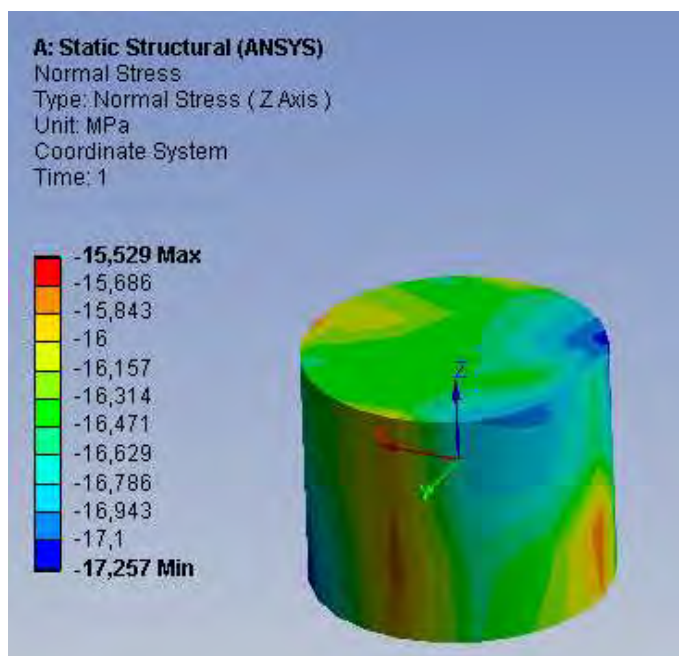


Figura 134 - Tensão residual axial

A tensão residual radial possui valor máximo de 26,87 MPa e a axial de -17,257 MPa.

### 5.3.2 Terceiro Estágio - Fadiga

Com o estágio da aplicação de carga idêntico ao da primeira análise, é feita a simulação da fadiga para a peça com a força de aperto alta. A Figura 135 mostra o resultado da vida para essa condição.

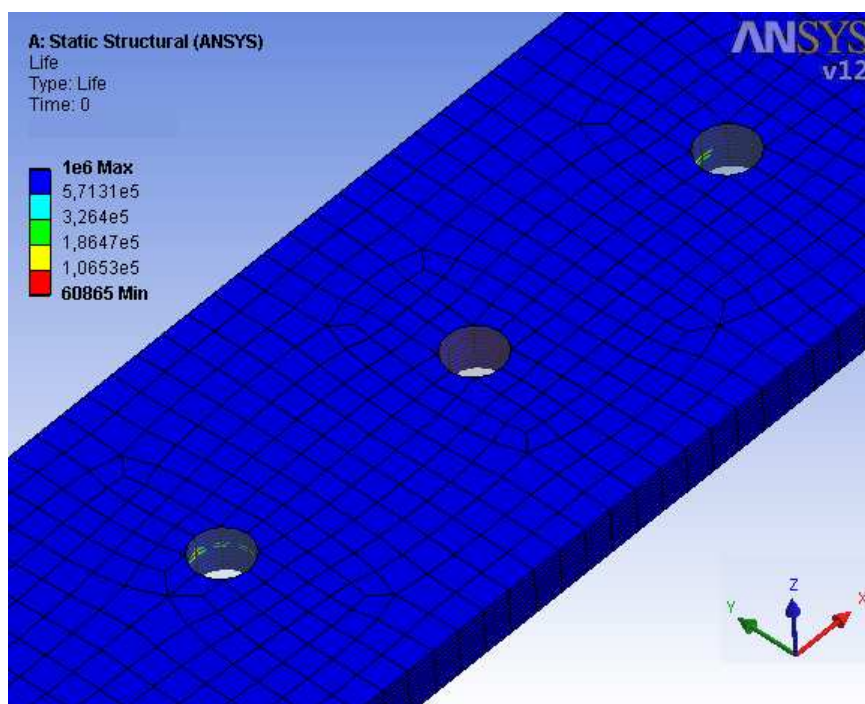


Figura 135 - Resultado da vida em fadiga

É possível notar um aumento na vida da peça, sendo agora 60865 ciclos. No furo da terceira coluna de rebites da chapa inferior está localizada a região crítica à fadiga da junta, como mostra a Figura 136.

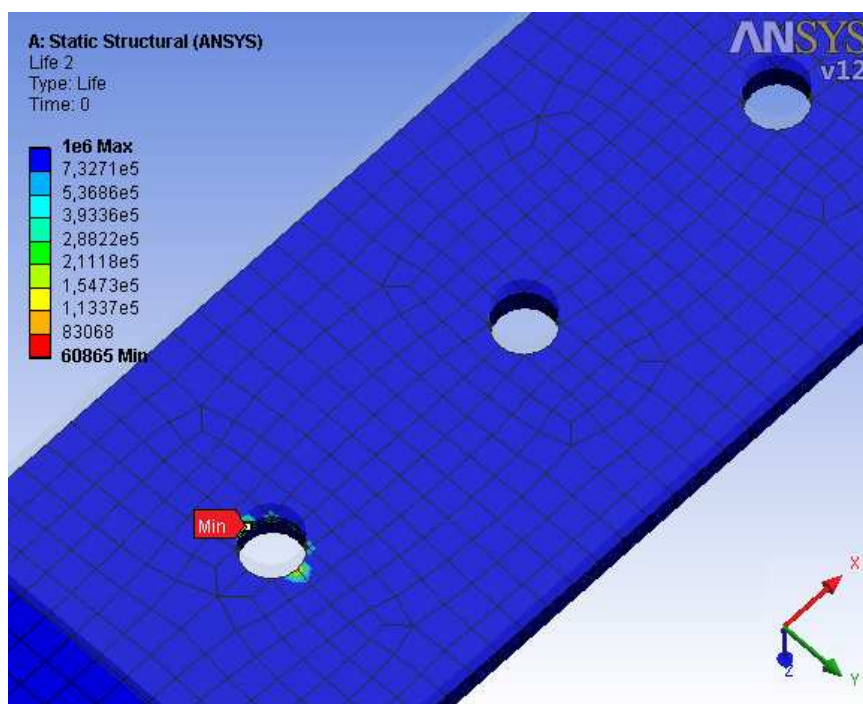


Figura 136 - Local crítico à fadiga

#### 5.4 Resultados comparativos de vida em fadiga

Após as simulações da junta rebitada sobreposta à fadiga, é possível verificar a influência da força de aperto, aplicada no processo de rebiteagem, na vida à fadiga da peça.

Conforme os resultados apresentados, a Tabela 8 mostra a vida em ciclos para cada valor de interferência, referentes a uma intensidade de força de aperto. No gráfico da Figura 137 pode-se observar o aumento da vida devido ao aumento da intensidade da força de aperto.

Tabela 8 – Valores comparativos de vida em fadiga

Intensidade	Interferência [mm]	Vida em fadiga [ciclos]
Força baixa	5,67E-04	39557
Força média	1,70E-03	54331
Força alta	5,10E-03	60865

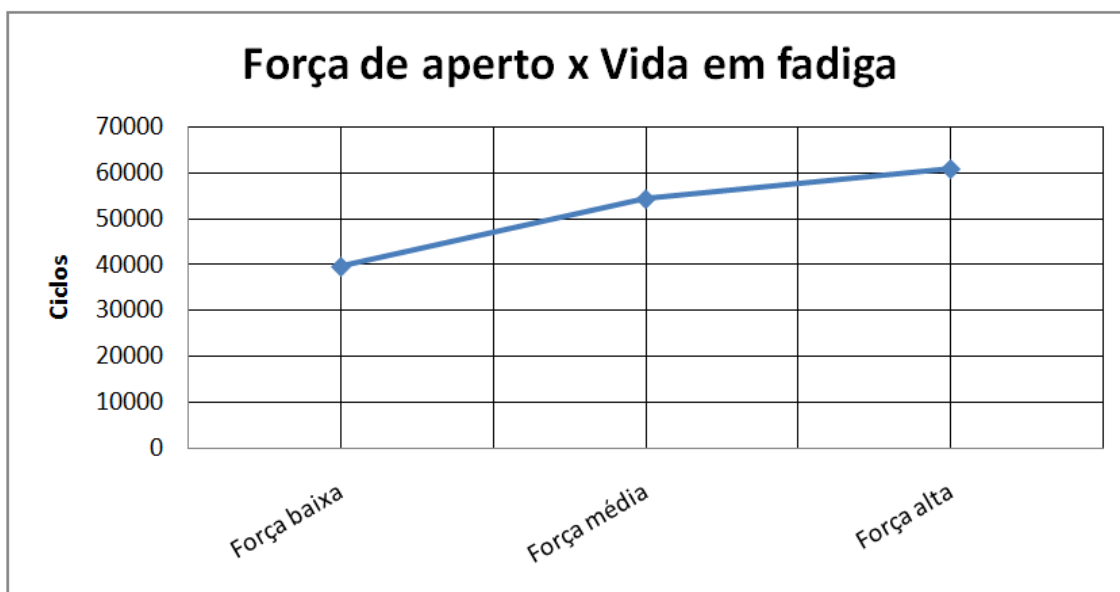


Figura 137 - Gráfico da intensidade da força de aperto x vida em fadiga

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos para este estudo, conclui-se que:

1) A interferência aplicada inicialmente, com o intuito de simular o processo de rebiteagem, gera tensões residuais com valores conforme adotados na literatura, de acordo com a Equação (29);

2) Quando a junta rebitada sobreposta é submetida à um esforço de tração uniaxial, devido à sua excentricidade, é gerada uma flexão fora do plano – momento secundário. Na simulação é possível observar esse efeito através da deformação, na Figura 120;

3) A transmissão de carga ocorre, com maior intensidade, nas fileiras externas de rebites, como mostra o campo de tensões resultantes da simulação mostrado nas Figuras 122, e 123, comportamento de acordo com os dados da literatura;

4) Através da correlação dos valores de deformação do modelo numérico com os valores do teste experimental, relacionados na Tabela 7, foi possível validar o modelo da simulação;

5) Pelos resultados de fadiga da primeira análise é possível verificar que a peça possui uma vida finita (54531 ciclos) para o carregamento solicitado, e o local crítico, resultante da simulação, é o furo de uma extremidade da junta, como se pode observar na Figura 127, em conformidade com os resultados mostrados em estudos anteriores;

6) Nos resultados das análises de diferentes forças de aperto aplicadas na instalação do rebite, foi possível verificar uma influência alta nessa variável com relação à vida em fadiga da junta. Com o aumento da força de aperto, a vida foi ampliada como mostrado na Figura 137, o que confirma que as tensões residuais, devido ao processo de rebiteagem, são benéficas para a resistência à fadiga da peça, corroborando os estudos da literatura.

## **7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar o estudo de fadiga em juntas rebitadas de topo;
- Estudar juntas rebitadas fabricadas em materiais compósitos;
- Realizar a simulação do processo de rebitagem para verificar a tensão residual resultante;
- Realizar análise de fadiga após a simulação de rebitagem;
- Realizar a análise experimental de fadiga para levantar a curva S-N da junta rebitada sobreposta.

## REFERÊNCIAS

ABAQUS DOCUMENTATION - Abaqus Analysis User's Manual, SIMULIA Dassault Systèmes, 2010.

ANSYS WORKBENCH MANUAL, 2010, Ansys 12.0 Program Documentation, SAS IP, Inc.

CASTRO, P. M. S. T.; MATOS, P. F. P.; MOREIRA, P. M. G. P.; SILVA L. F. M. An overview on fatigue analysis of aeronautical structural details: Open hole, single rivet lap-joint, and lap-joint panel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 468-470, p. 144-157, Nov. 2007.

FUNG, C-P; SMART, J. Riveted single lap joints. Part 1: a numerical parametric study. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 211, n. 1, p 13-27, 1997.

FUNG, C-P; SMART, J. Riveted single lap joints Part 2: fatigue life prediction. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 211, n. 2, p 123-128, 1997.

GRANDIN, H., **Fundamental of the Finite Element Method**. 1st ed. New York, USA: Macmillan Publishing Company, 1986. 528p.

KAUFMAN, J. G. **Properties of Aluminum Alloys: Fatigue Data and Effects of Temperature, Product Form, and Processing**: ASM International, 2008. 574p.

MATWEB - Material Property Data. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

MÜLLER, R. P. G. **An Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Behavior of Fuselage Riveted Lap Joints: The Significance of the Rivet Squeeze Force, and a Comparison of 2024-T3 and Glare 3**. 1995. 516 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Delft, Holanda, 1995.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre - RS: Bookman, 2004. 919p.

RANS, C. D.; ALDERLIESTEN, R. C.; STRAZNICKY, P. V. Assessing the effects of riveting induced residual stresses on fatigue crack behavior in lap joints by means of fractography. **International Journal of Fatigue**, v. 31, p. 300–301, Apr. 2007.

RIBEIRO, F. L. B. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Notas de Aula do Programa de Engenharia Civil, 2003. 93 p. Disponível em: <[http://wwwp.coc.ufrj.br/~fernando/downloads/Curso\\_MEF1.pdf](http://wwwp.coc.ufrj.br/~fernando/downloads/Curso_MEF1.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2011.

RIJCK, J. J. M.; HOMAN, J. J.; SCHIJVE, J.; BENEDICTUS, R. The driven rivet head dimensions as an indication of the fatigue performance of aircraft lap joints. **International Journal of Fatigue**, v. 29, p. 2208–2218, Jan. 2007.

SPINELLI, H. A., **Análise Estrutural de Juntas Rebitadas de Uso Aeronáutico**. 2004. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

SKORUPA, M.; SKORUPA, A.; MACHNIEWICZ, T.; KORBEL, A. Effect of production variables on the fatigue behavior of riveted lap joints. **International Journal of Fatigue**, v. 32, Issue 7, p. 996-1003, Nov. 2009.

SWIFT, T., Development of the Fail-Safe Design Feature of the Dc-10. Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, **American Society for Testing and Materials**, p 164-214, 1971.

XAVIER, A. C. B., **Considerações para a análise de juntas aeronáuticas unidas mecanicamente**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.