



Analysis and modelling of stress concentration on riveted zones of thin structures

43168-AEA

2024/2025

Alexandre Silva-107957

Magner Gusse-110180

Martim Correia-107661

Rúben Abreu-107421

Índice

Introdução	2
Rebites e Juntas rebitadas	3
Equações de Kirsch	4
Casos de falha em ligações rebitadas	6
Carregamento de pino	7
Projeto	8
Efeito da distribuição de rebites numa placa	9
Efeito do diâmetro do rebite	10
Efeito do espaçamento entre rebites	10
Caso de separação/corte de juntas rebitadas.....	11
Caso de estudo: Longarina de uma asa	15
Conclusão	19
Referências Bibliográficas	20
Anexos.....	21

Introdução

No dia a dia, os rebites são usados em diversas aplicações práticas devido à sua versatilidade, durabilidade e facilidade de instalação. São facilmente encontrados na indústria automóvel, nomeadamente na fixação de painéis de chassi e de portas. Também apresentam uma ampla aplicação na indústria da construção civil, principalmente em estruturas metálicas, pontes, edifícios e outras obras em que a principal função é unir peças da estrutura com vigas e pilares.

Na indústria aeroespacial e aeronáutica, as juntas rebitadas também são amplamente utilizadas. Estas podem ser encontradas na fuselagem da aeronave, pois as placas da fuselagem são frequentemente unidas por rebites devido à necessidade de conexões leves e robustas que possam suportar tensões causadas por pressurização ou depressurização cíclica durante o voo. As juntas rebitadas são essenciais para unir os painéis metálicos que formam as asas e as superfícies móveis, como os flaps, slats e ailerons, onde são necessárias conexões de alta resistência que suportem cargas aerodinâmicas significativas. Além disso, as longarinas, nervuras e reforços internos da fuselagem e das asas são frequentemente unidos por rebites para criar uma estrutura leve, mas robusta, que distribui as cargas de maneira eficiente.



Figura 1- Rebites na asa de uma aeronave [1]

Deste maneira, as juntas rebitadas são amplamente utilizadas na montagem de estruturas em diversas aplicações da engenharia, incluindo as indústrias aeroespacial, automóvel e civil. Estas juntas garantem a integridade estrutural ao unir componentes de forma segura, distribuindo as cargas ao longo da junta. No entanto, a presença de rebites introduz inevitavelmente concentrações de tensão no material ao seu redor, o que pode impactar significativamente a durabilidade e o desempenho da estrutura. Compreender e prever essas concentrações de tensão é essencial para otimizar o projeto e garantir a segurança das estruturas.

Este trabalho tem como objetivo a análise e modelagem das concentrações de tensão em zonas rebitadas, com foco especial na influência dessas tensões no comportamento estrutural sob cargas operacionais. Por meio da aplicação de métodos, busca-se caracterizar detalhadamente os padrões de distribuição de tensões e identificar fatores críticos que intensificam ou mitigam essas concentrações.

Rebites e Juntas rebitadas

O rebite é um fixador mecânico que pode ser considerado semipermanente. Antes de ser aplicado na junção, o rebite consiste numa haste cilíndrica de metal, com uma cabeça em uma das suas extremidades. A sua aplicação na junta é feita através de um achatamento, que faz com que a haste cilíndrica preencha o orifício da junta. Deste modo, o rebite fica preso e é expandido, até 1.5 vezes o seu diâmetro inicial [2].

Existem vários tipos de rebites. Os rebites sólidos, que é dos mais antigos, e apresenta um formato simples, com uma haste e uma cabeça, e a sua aplicação ocorre devido à deformação através do impacto de um martelo.



Figura 2- Rebite sólido [2]

Os rebites semi-tubulares são semelhantes aos rebites sólidos, mas possuem uma parte da haste oca, na extremidade contrária à cabeça. O objetivo desta parte oca é reduzir a quantidade de força exigida para a aplicação, e são utilizados principalmente em projetos que necessitem de movimento, visto que apenas a parte da haste oca é deformada.



Figura 3- Rebite semi tubular [3]

Também existem os rebites de repuxo, que são os mais utilizados atualmente. Neste caso, a haste é tubular, trazendo dentro de si um mandril, e este rebite é introduzido no orifício de união das peças e, com a utilização de um rebitador manual, seu mandril é puxado, fazendo sua cabeça expandir a extremidade da haste até o seu travamento [4].



Figura 4- Rebite de repuxo [2]

A utilização de rebites apresenta algumas vantagens, tais como a possibilidade de conectar placas de diferentes materiais, podem servir de aperto, espaçadores, eixos e até mesmo de contactos elétricos. Além disso, podem ser montados por máquinas automáticas de alta velocidade, e o processo é simples e barato, e ainda possui grande confiabilidade. No entanto, a utilização de rebites também apresenta desvantagens, tais como apresentar resistência a tração e a fadiga menor que nas ligações por parafusos e

roscas. Na maior parte dos casos, os rebites precisam ser destruídos para manutenção ou substituição, e quando produzidos em massa não têm a mesma precisão que as ligações enroscadas [5].

Em relação à tecnologia de rebiteagem existem várias técnicas de rebiteagem.

A rebiteagem convencional utiliza a deformação plástica do rebite para unir placas. O rebite é colocado no orifício das placas, de forma que a cabeça da fábrica seja fixada pela matriz inferior. A matriz superior é conduzida por energia hidráulica ou pelo martelo para perfurar o rebite. A cabeça de rebite é deformada pelo impacto, formando uma protrusão que junta as duas placas. No entanto, o ajuste de interferência produzido pela rebiteagem convencional não é uniforme e trará perigo oculto à estabilidade da estrutura [6].

Na rebiteagem cega, o rebite consiste em duas partes, que são o corpo do rebite e o caule do rebite. O corpo de rebite é colocado no furo das placas. Um grampo é usado para fixar o caule do rebite. Em seguida, a haste do rebite é puxada, fazendo com que o corpo do rebite seja espremido e deformado.

Mais recentemente surgiu a rebiteagem modelada. Esta técnica tem tido crescente atenção na junção de material leve devido à sua alta eficiência, baixo custo e capacidade de unir placas revestidas sem danos. É considerada uma técnica de “clinch”, visto que não é necessário a perfuração das placas.

Também recentemente surgiu a rebiteagem restaurada que permite restaurar ou renovar uma junta fechada danificada, sem causar o desperdício de material. Esta tecnologia também é considerada uma técnica de “clinch”.

Por fim, tem-se a rebiteagem autoperfurante, que é uma tecnologia de junção de conformação a frio que pressiona o rebite diretamente nas placas através cilindro hidráulico ou servo motor. Esta tecnologia supera muitas desvantagens das técnicas convencionais, como a aparência deficiente, baixa eficiência e formas complicadas. A grande vantagem desta tecnologia é que a perfuração e rebiteagem podem ser alcançadas ao mesmo tempo e a placa revestida pode ser unida sem destruir o revestimento. Além disso, não só a articulação produzida possui alta resistência estática e à fadiga, mas também pode reduzir o peso da estrutura [7].

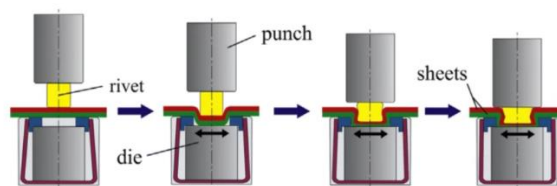


Figura 5- Tecnologia de “clinch” [7]

Equações de Kirsch

As equações de Kirsch são usualmente utilizadas para a análise de concentrações de tensões em torno de furos, em placas finas em estado plano de tensão. Estas apenas

são utilizadas quando se considera um único furo circular numa placa infinita. As tensões em coordenadas polares, em qualquer ponto à volta do furo, são obtidas pelas equações 1, 2 e 3, onde “a” é o raio do furo, “r” a distância entre o centro do furo e ponto, e “σ” é o ângulo com direção da força aplicada [8].

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{\sigma}{2} \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin\theta \quad (3)$$

$$\sigma_{result} = \sqrt{\sigma_{rr}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2 + 2\sigma_{r\theta}^2} \quad (4)$$

Apesar de as equações de Kirsch apresentarem-se como uma abordagem simplista e que não leva em conta múltiplos furos ou interações entre eles, o que é comum em zonas rebitadas, decidiu-se, como ponto de partida, comprovar estas equações analiticamente e computacionalmente.

Assim, começou-se por definir uma placa fina, com comprimento suficiente para ser considerada infinita em relação ao furo. Esta placa apresenta 200 mm de largura e 2 mm de espessura, e está sujeita a uma força de tração igual a 1000N, que se traduz numa tensão nominal igual a 2,5 MPa. Quanto ao furo, este apresenta 10 mm de diâmetro. Também se definiu vários pontos em torno do furo, e para cada ponto calculou-se as tensões em coordenadas polares pelas equações 1, 2 e 3, e a tensão resultante através da equação 4. Na tabela 1 estão representados os pontos considerados, assim como as tensões em coordenadas polares e tensão resultante nesses pontos.

Tabela 1- Pontos definidos e respetivas tensões, calculadas analiticamente

P1	r = 100mm θ = 0°	σ _{rr} = 2,484 MPa	σ = 2,484 MPa
		σ _{θθ} = 0,0031 MPa	
		σ _{rθ} = 0 MPa	
P2	r = 50mm θ = 60°	σ _{rr} = 0,6373 MPa	σ = 2,5311 MPa
		σ _{θθ} = 1,8877 MPa	
		σ _{rθ} = -1,1039 MPa	
P3	r = 20mm θ = 80°	σ _{rr} = 0,2771 MPa	σ = 3,1884 MPa
		σ _{θθ} = 2,5165 MPa	
		σ _{rθ} = -1,3705 MPa	
P4	r = 30mm θ = 230°	σ _{rr} = 1,0218 MPa	σ = 3,8937 MPa
		σ _{θθ} = 1,5023 MPa	
		σ _{rθ} = 1,0085 MPa	

De seguida, realizou-se a análise computacional através do software Ansys.

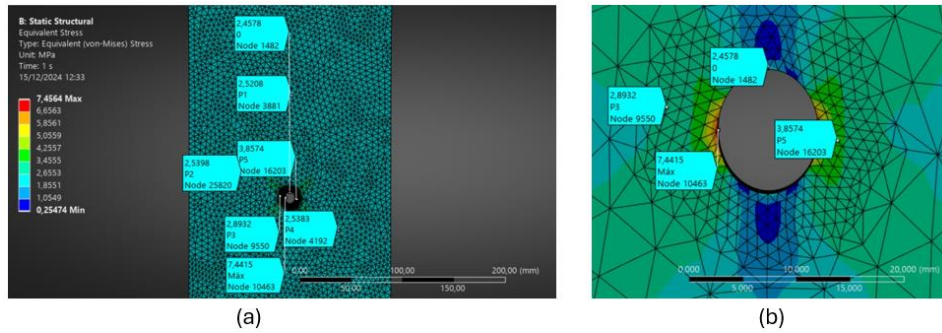


Figura 6- Resultado da análise analítica

Na Figura 6a estão representados os pontos considerados e a tensão nesses pontos. Como se observa, as tensões determinadas na maioria dos pontos, por ambos os métodos são bastante próximos. Como é de esperar, estas não são exatamente iguais, pois no software Ansys não se conseguiu obter com a precisão absoluta a posição dos pontos, devido à inexistência de uma ferramenta para tal.

Além disso, através das equações de Kirsch notou-se que a tensão máxima ocorre na zona do furo ($r=a$), na zona em que o ponto apresenta um ângulo $\theta=90^\circ$ com a direção da força aplicada. Segundo as equações de Kirsch, esse ponto está sujeito a uma tensão três vezes superior à tensão nominal (2,5 MPa). Isto verifica-se pela Figura 6b, em que a tensão máxima da placa encontra-se na região do furo, e é aproximadamente três vezes a tensão nominal.

Casos de falha em ligações rebitadas

As ligações rebitadas apresentam diversas condições de carregamento, dependendo da sua aplicação no veículo, no entanto, assumindo uma Carga P /unidade de comprimento nas extremidades de duas placas sobrepostas e ligadas por rebites de diâmetro d , e afastados uns dos outros a uma distância b e uma distância a entre o eixo dos rebites e a extremidade das placas e uma espessura t das placas, conforme a Figura 7, existem 4 casos possíveis de falha [9]:

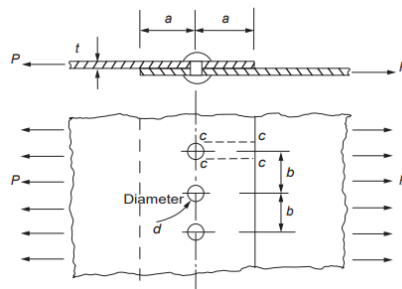


Figura 7 Junta sobreposta simples com rebites[9]

1. Cisalhamento do rebite: Se a tensão de corte máxima que o rebite suporta for τ_1 , ocorre falha para:
$$P = \frac{\pi d^2 \tau_1}{b} \quad (5).$$
2. Pressão de Contacto: Se essa pressão for p_b (Tensão de cedência), no rebite ou na placa, esta falha ocorre para:
$$P = \frac{p_b t d}{b} \quad (6).$$

3. Falha da placa em tensão: Se a tensão última na placa for σ_{ult} , esta falha ocorre para: $P = \frac{\sigma_{ult} t (b-d)}{b}$ (7).
4. Cisalhamento na placa: Se a tensão de corte máxima que a placa suporta for τ_2 , ocorre falha para: $P = 2at\tau_2$ (8).

Tabela 2-Dimensões de junta sobreposta

a	100mm
b	100mm
d	14mm
t	7mm
L	500mm

Tabela 3 Propriedades do AL6061

Tensão última	310MPa
Tensão de cedência	276Mpa
Tensão de corte	207Mpa
Módulo de Young	68.9Gpa
Razão de Poisson	0.33

Assim sendo, para uma junta sobreposta de duas placas com 3 rebites, com as dimensões da tabela 2, assumindo que tanto as placas como os rebites são de feitos de liga de alumínio AL6061T6 (Tabela 3) as condições de falha seriam as seguintes:

Tabela 4-Resultados teóricos dos casos de falha

Força / unidade de comprimento para cada modo de falha [N/m]			
Cisalhamento do rebite	Pressão de contacto	Falha da placa em tensão	Cisalhamento da Placa
3.19E+05	270+05	1.87E+06	2.90E+06
Força necessária para cada modo de falha[L=0.5m] [N]			
Cisalhamento do rebite	Pressão de contacto	Falha da placa em tensão	Cisalhamento da Placa
1.59E+05	1.35E+05	9.33E+05	1.45E+06

Os resultados obtidos mostram que o primeiro caso de falha corresponde à falha por pressão de contacto, esta que pode ocorrer tanto na placa como nos rebites, indicando assim que é o mais importante a ser considerado para este caso, onde as placas e os rebites são feitas mesmo material, podendo os resultados diferir para combinações de material e geometria diferentes desta.

Carregamento de pino

As concentrações de tensões devido à carga de pino são causadas pelo rebite ao transferir a força da alma para o perfil da flange. Isto significa que as concentrações de tensões na chapa são baseadas na transferência de força no rebite. Deste modo, os fatores de concentração de tensões relacionados com a carga de pino podem ser determinados utilizando a secção do fator de concentração de tensões de apoio. O fator de concentração, K_{in} , é determinado pela equação 9 [10].

$$K_{in} = 0,288 - 8,820 \left(\frac{d}{H}\right) - 23,169 \left(\frac{d}{H}\right)^2 + 29,167 \left(\frac{d}{H}\right)^3 \quad (9)$$

Além disso, a tensão máxima ocorrida devido ao carregamento de pino é obtida pela equação 10.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = K_{in} \cdot \sigma_{nom} \quad (10)$$

Deste modo, procedeu-se ao cálculo da tensão num rebite, novamente de forma analítica e computacional. Para isso definiu-se uma placa considerada infinita, com largura (H) igual a 100 mm e espessura (t) igual a 5 mm. O furo localiza-se no centro da placa e apresenta 10 mm de diâmetro (d), assim como o rebite. Aplicou-se uma força de tração igual a 1000 N, que se traduz numa tensão nominal de 2 MPa.

Primeiramente, através da equação 9 determinou-se o fator de concentração de tensão, K_{in} , que é igual a 0,7965. De seguida, pela equação 10 obteve-se a tensão máxima ocorrida no rebite, que é igual a 1,593 MPa.

Através do software Ansys realizou-se a análise computacional. Na figura 8a está representado a placa com a força aplicada. Ainda é importante referir que se fixou a face superior e inferior do rebite. Na figura 8b pode se observar que a máxima tensão ocorrida no rebite é 1,5317 MPa, sendo bastante próxima da tensão máxima obtida de forma analítica.

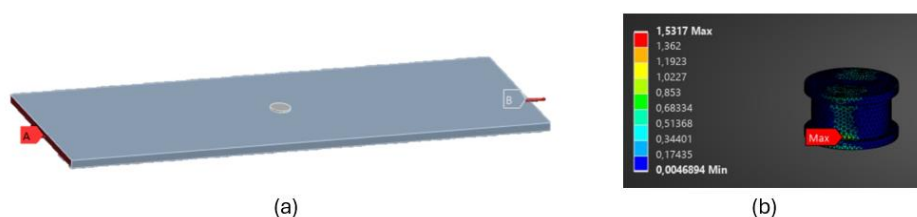


Figura 8- Tensão num rebite: (a) placa e força aplicada; (b) resultado

Os resultados obtidos neste estudo são satisfatórios, visto que o resultado obtido de forma computacional é bastante parecido do resultado analítico. No entanto, é importante referir que este estudo apenas considera a interação entre uma placa e um rebite.

Projeto

Após ter-se comprovado as equações de Kirsch, explorado os diferentes casos de falhas em ligações rebitadas, e verificado o carregamento de pino, focou-se no objetivo principal. Este objetivo consiste na projeção da melhor distribuição de rebites numa placa, tendo em conta a sua orientação, espaçamento entre rebites e respetivo diâmetro. Os resultados obtidos destes estudos podem ser aplicados, por exemplo, na junção de uma longarina com as nervuras numa asa de uma aeronave. Ambos os estudos foram realizados através do software Ansys, onde considerou-se as faces dos rebites fixas. Além disso, é importante referir que na definição das regiões de contacto, selecionou-se “frictional” com coeficiente de atrito 0.2 entre as placas, “frictionless” entre os furos das placas e os rebites. Em relação ao número de elementos e nós tentou-se usar o número máximo permitido pela licença de estudante, de forma a obter-se os melhores resultados possíveis. Quanto ao material utilizado, considerou-se o Alumínio 2024-0 tanto para a placa como para os rebites, cujas propriedades estão na tabela 1 do anexo.

Efeito da distribuição de rebites numa placa

Nesta secção estudou-se o efeito da distribuição de rebites na concentração de tensões em juntas rebitadas, e a influência do número de rebites. Para tal, considerou-se duas placas geometricamente iguais, 300x150 mm, e quatro casos distintos. Em cada caso adicionou-se um rebite na placa, sempre distanciados de igual forma e com a mesma dimensão, formando uma linha perpendicular à direção da força aplicada nas placas, como se pode observar na figura 9. Os furos apresentam 8mm de diâmetro e encontram-se distanciados 15 mm. Aplicou-se uma força de tração de 2000 N, e fixou-se as faces superior e inferior do rebite.



Figura 9- Casos de estudo

No gráfico 1, está representado os resultados obtidos, através do software Ansys, referentes à tensão máxima que a placa e os rebites estão sujeitos para os casos considerados. Do gráfico conclui-se que à medida que se adiciona rebites a tensão máxima, quer na placa quer no rebite, diminui, sendo que os valores de ambas as tensões tendem a se aproximar. Isto era de esperar, pois quanto maior a quantidade de rebites, as tensões irão estar mais distribuídas. Notou-se também que, mesmo não sendo uma diferença significativa, os rebites mais próximos do eixo central das placas apresentam uma tensão máxima inferior.

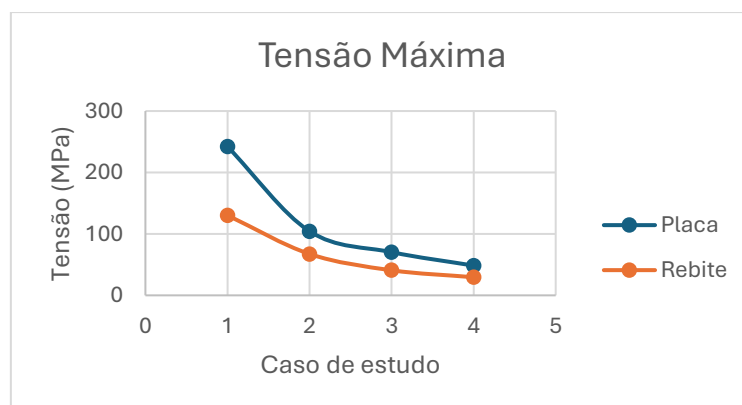


Gráfico 1- Tensão Máxima na placa e no rebite nos diferentes casos de estudo

Ainda se considerou outro caso de estudo, caso 5, que consiste em quatro rebites com as mesmas dimensões e igualmente distanciados, mas estão distribuídos segundo uma linha paralela à direção da força aplicada na placa. Este caso é semelhante ao caso 4, diferindo apenas na direção que os rebites estão dispostos. Tendo em conta, os resultados obtidos e comparando-se com os resultados do caso 4, conclui-se que quando os rebites estão distribuídos segundo a direção da força aplicada a tensão máxima verificada na placa e nos rebites das extremidades é maior. Deste modo, tendo em conta

os resultados de todos os casos de estudo (Tabelas 2-6 do Anexo), conclui-se que o caso 4 assegura a menor tensão máxima experimentada pela placa e pelos rebites.

Efeito do diâmetro do rebite

Nesta secção estudou-se o efeito do diâmetro do rebite na concentração de tensões em juntas rebitadas. Para isso, e tendo em conta o resultado obtido no estudo anterior, considerou-se a disposição dos rebites segundo uma linha perpendicular à direção de aplicação da força nas placas. Para este estudo considerou-se duas placas geometricamente iguais, 500x250 mm. Considerou-se que apenas três furos são suficientes para obter bons resultados, e esses furos estão distanciados 100 mm entre si. Além disso a força de tração aplicada nas placas é de 15000 N, tal como se pode observar na Figura 1 do anexo. Em relação ao diâmetro dos rebites, este é variado desde 12 mm até 17 mm.

No gráfico 2 são apresentados os resultados relativos a este estudo, da tensão máxima resultante nas placas(a) e nos rebites (b). É possível verificar o decréscimo na tensão tanto nos rebites como nas placas com o aumento do diâmetro, sendo esta tensão maior nos rebites laterais, seguido das placas e por fim do rebite do meio. É possível ainda, em relação aos rebites verificar que conforme esperado, as tensões nos rebites 1 e 3 são muito próximos, o que demonstra a simetria do problema. Nas placas, apesar de haver uma certa descontinuidade entre os diâmetros 13 e 14, onde não segue o padrão normal, no geral a tensão tende ainda a decrescer com o aumento do diâmetro, o que pode indicar que esta descontinuidade pode estar associada a malha de cálculo usada. O aumento do diâmetro proporciona maior área de contacto entre o rebite e as placas e aumenta ainda a rigidez dos rebites, o que resulta numa melhor distribuição de tensões entre as placas e os rebites, provando que quanto maior o diâmetro dos rebites, menor as tensões nos rebites e nas placas.

Na tabela 7 do anexo está representado os resultados deste estudo referentes às tensões e deformações máximas nas placas e nos rebites, e ainda o número de nodes e elementos utilizados na simulação.

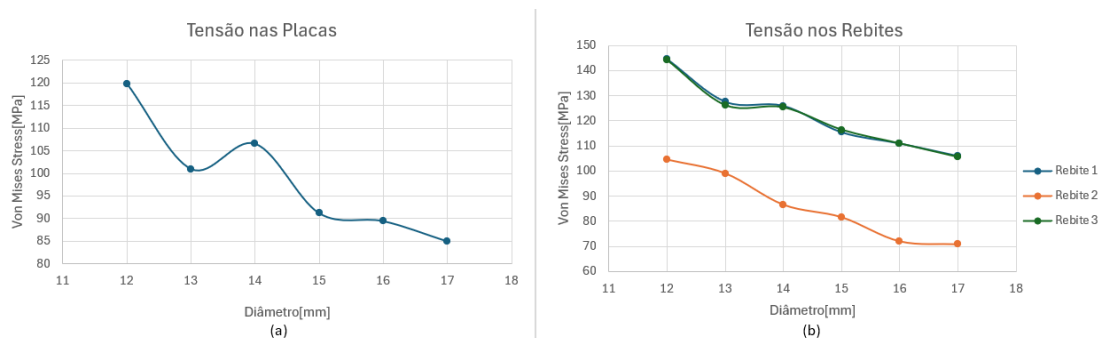


Gráfico 2 - Tensão Máxima: (a) placa; (b) rebites

Efeito do espaçamento entre rebites

Nesta secção estudou-se o efeito do espaçamento entre rebites na concentração de tensões em juntas rebitadas. Para isso, e novamente tendo em conta os resultados dos

estudos anteriores, considerou-se a disposição dos rebite segundo uma linha perpendicular à direção da força aplicada, e considerou-se furos e rebites com diâmetros igual a 17 mm. Para este estudo, considerou-se as mesmas condições e esforços do estudo anterior, ou seja, duas placas 500x250mm, três furos, e força de tração de 15000 N aplicada nas placas. Assim, apenas variou-se o espaçamento entre rebites desde os 30 mm até aos 90 mm.

No gráfico 3 está representado o resultado obtido referente à tensão máxima verificada na placa (a) e nos rebite (b). Em relação à tensão máxima na placa, verifica-se que esta oscila com o aumento do espaçamento, sendo que o maior valor ocorre para a distancia inicial, 30 mm, e os valores mais baixos para os espaçamentos de 40 mm e 60 mm. Quanto à tensão máxima nos rebites, nota-se que a tensão máxima é sempre maior nos rebites das extremidades, ou seja, nos rebites 1 e 3. Além disso, as tensões máximas nos três rebites tendem a aproximar-se para um espaçamento de 60 mm. No entanto, tendo em conta que a tensão máxima no rebite 2 é muito maior para o espaçamento de 60 mm, em comparação com o espaçamento 40 mm, e a menor tensão máxima na placa verificar-se para o espaçamento 40 mm, considerou-se que este espaçamento é o ideal.

Na tabela 8 do anexo está representado os resultados deste estudo referentes às tensões e deformações máximas nas placas e nos rebites, e ainda o número de nodes e elementos utilizados na simulação.

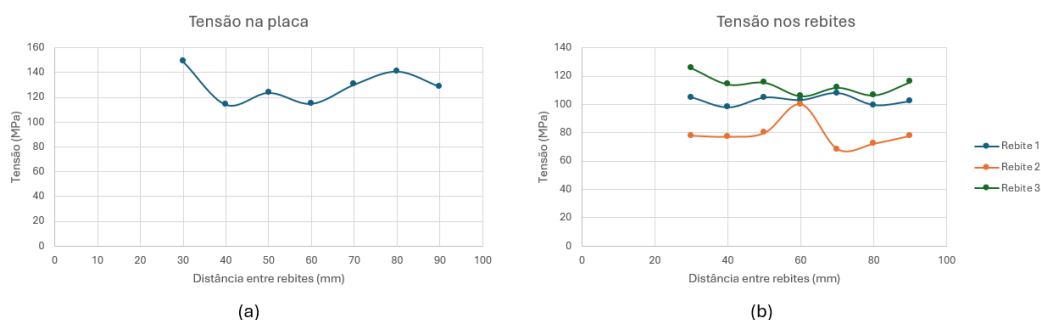


Gráfico 3-Tensão Máxima: (a) placa; (b) rebites

Caso de separação/corte de juntas rebitadas

Outro teste realizado foi o presente na imagem abaixo. Consiste em duas placas com ângulos de 90 graus ligadas por um rebite e é realizado um teste de tração neste sistema até à sua falha. Este teste pode ser importante no estudo da longarina, abordado posteriormente, porque estuda a separação de placas ligadas por rebites com esforços alinhados com a linha de revolução do rebite, esforços estes que apesar de serem pequenos podem ser encontrados no tipo de longarinas exploradas.



Figura 10- Teste de separação de placas

Foi encontrado um teste experimental com a geometria do teste definida, possível visualizar na imagem. São 3 peças, duas placas iguais em forma de L, com base de 110mm, 30mm de altura, 40mm de largura e 2mm de espessura. A outra é um rebite de 6mm colocado no meio da “perna” do L [11].

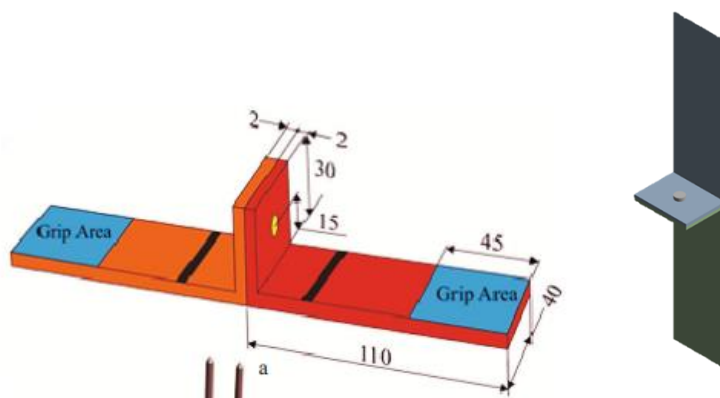
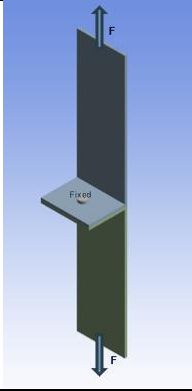
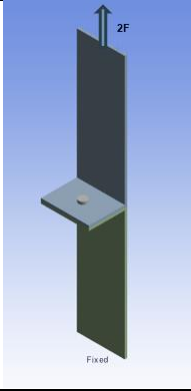


Figura 11- Geometria utilizada no teste e na simulação

Sendo assim foi criada este sistema no SpaceClaim do Ansys, obtendo-se a geometria. No entanto foi adicionada alguma geometria no início e fim do rebite. Todas as peças foram criadas a partir de sólidos, obtendo a geometria encontrada abaixo.

Este estudo pode ser realizado de duas maneiras tendo em conta as condições fronteiras.

Tabela 5-Comparação dos casos possíveis de estudo

1º Caso	2º Caso
	
<p>Caso usado no estudo</p> <p>Este teste tem o rebite fixo com F aplicado em cada lado com sentidos diferentes</p>	<p>Caso usado na simulação</p> <p>Este teste tem o rebite livre, com a face inferior da peça debaixo com 2F aplicado na face superior na peça de cima</p>

Foi escolhido o segundo caso por ser mais estável e porque energeticamente e mecanicamente é similar ao outro caso.

Além disso, foi iniciado uma análise de convergência de malha, para a resposta do sistema a uma força de 1000N.

Tabela 6-Tabela da análise de convergência de malha

	1º Caso	2º Caso	3º Caso
Nº de nós	36969	83796	122422
Nº de elementos	23075	55965	83176
Tensão Máx de Von Mises	1580MPa	1735MPa	1800MPa

Foi escolhida a malha do caso 2, por ter um resultado similar, apenas difere 3%, e por ser mais eficiente, sendo cerca de 2,5 vezes mais rápido que o resultado com melhor a precisão. A malha obtida é apresentada na Figura 12, onde está representada a malha da estrutura e a malha com enfase no rebite. Foi criado um *sizing* no rebite para que este tenha uma malha fina e ainda um *refinement* nas paredes de contacto entre o rebite e as placas para que a transição de malha entre o rebite e as placas tenha uma boa qualidade.

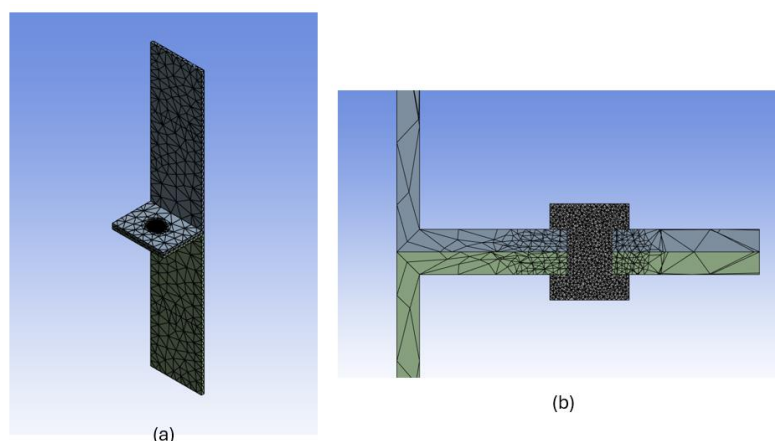


Figura 12- Malha: (a) na estrutura; (b) no rebite

Assim foram realizadas várias simulações para diferentes forças, sendo apresentado o resultado da maior tensão encontrada, presentes na tabela 9 do anexo.

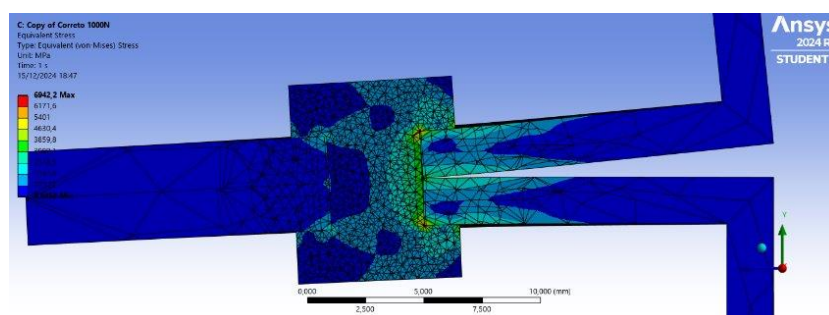


Figura 13-Resposta do Sistema para $2F=4000N$

Em nenhuma das forças apresentadas o sistema rompeu, contrariando o teste experimental do estudo. É possível ver a força em função do deslocamento do mesmo no gráfico 4 [11]. É de notar que para uma força entre 1000N e 1200N o sistema rompe, e na simulação apesar de força ser maior que essa, o sistema não rompe. É importante mencionar que em todas as simulações a tensão máxima de Von Mises encontrada foi maior que a tensão de cedência do material, sendo esta 250MPa, mostrando ser um pouco irrealista que este não rompesse.

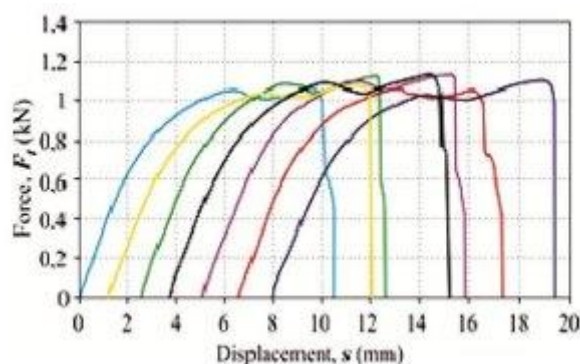


Gráfico 4-Resultados da Força em função do deslocamento no teste experimental do estudo

Sendo assim, foi realizado outro teste, similar ao anterior, no entanto, invés de aplicar uma força, seria aplicado um deslocamento da mesma face, e retirado a reação da

força na face inferior da peça debaixo, com vários *sub-time steps*, para posteriormente realizar um gráfico da força em função do deslocamento.

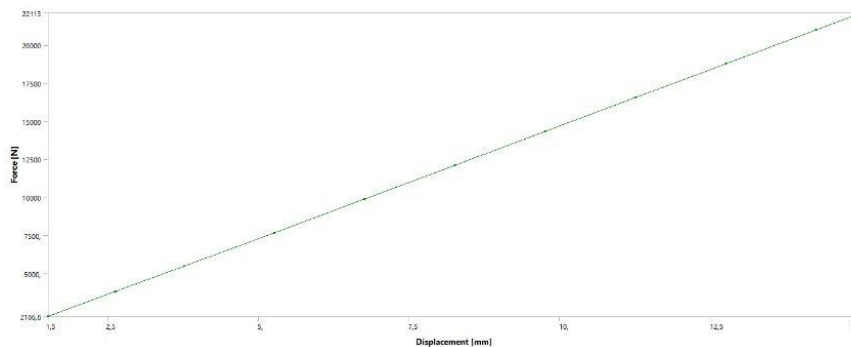


Gráfico 5- Força em função do deslocamento da segunda simulação

Tal como nas simulações anteriores o sistema não rompeu e permaneceu em regime elástico ao longo da simulação. O máximo deslocamento permitido foi de 16mm, visto que aconteceriam muitos erros. Sendo assim, é de estimar que a partir de um deslocamento maior o sistema entrasse em regime plástico. Sendo assim, esta simulação também revelou ser pouco útil no estudo comparando com os resultados experimentais do estudo.

Em suma, em nenhum dos casos o sistema rompeu. Sendo assim, o trabalho não foi muito bem realizado, devido aos resultados não encontrarem os valores da literatura. Uma das razões por isso ter acontecido, pode ter sido do material não ser exatamente o mesmo que no teste, pois no *Ansys*, este não existia. Outra seria que a geometria dos rebites usadas no teste experimental não são totalmente iguais às usadas. O tipo de simulação usado no *Ansys*, *Ansys Statical*, pode não ter sido o melhor e pode ser uma das razões por a simulação não se ter realizado.

Caso de estudo: Longarina de uma asa

De forma a realizar um estudo que se encontre relacionado com a área aeronáutica, foi selecionado um caso de estudo particular, uma longarina em I, rebitada, de uma asa de aeronave. As dimensões utilizadas encontram-se na Figura 14 que pode ser aplicada a uma aeronave ligeira ou UAV advinda da referência [12], com exceção das dos furos e dos *fillets*.

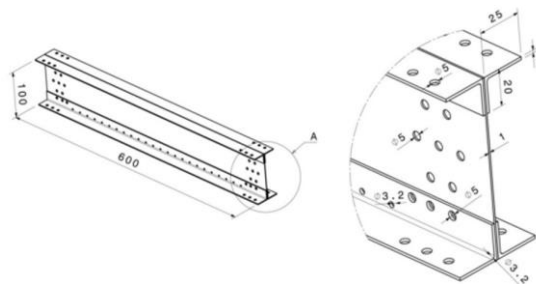


Figura 14-Dimensões da longarina utilizadas (exceto furos e fillet)

As arestas vivas são muitas vezes alvo de concentrações de tensões, porém, devido ao facto de não terem sido visualizadas essas concentrações nas zonas onde deveriam estar situados os *fillets*, estes não foram realizados. Relativamente aos furos, foram apenas adicionadas duas filas destes (uma no topo e uma na zona inferior) de forma a conectarem os banzos à alma da viga, de forma a especificarem o local onde seriam colocados os rebites. Os furos possuem diâmetro igual a 5mm e estão situados a metade da altura da face do *banzo* onde são realizados. O modelo construído no *SolidWorks* é passível de ser visualizado na Figura 2 do anexo.

Esta geometria foi importada para o *Ansys Mechanical*, de maneira a realizar a simulá-la. Depois de algumas iterações e impondo também plano de simetria, não foi possível levar a cabo esta tarefa, por ser imposto um limite de elementos disponíveis na licença de estudante deste software. Como tal, e sendo também uma vantagem na redução de tempo de simulação, foi realizado um corte no comprimento de maneira que esta nova secção da longarina apenas contenha 5 rebites por fila, mantendo o resto da estrutura, visível nas figuras seguintes.

Relativamente à definição do problema, foi então seleccionado o material *aluminium alloy* da biblioteca do *Ansys* por muitas vezes este componente ser formado por um material similar, os contactos entre banzos e alma definidos assumidos como sem fricção, e foram aplicados elementos viga em cada um dos furos, com o respetivo diâmetro e profundidade, de modo a representarem de uma maneira simplificada os rebites.

Foi aplicada a restrição *Fixed* a 5 faces laterais (1 de cada corpo) de uma ponta da longarina para simular o encastramento da mesma na zona em que é conectada à fuselagem da aeronave. Foi também aplicada uma força constante de 3000 N tanto às 3 faces superiores como inferiores, de modo a simular uma força de sustentação a que a longarina estivesse sujeita. Na Figura 15 podem ser visualizadas estas condições bem como os elementos viga.

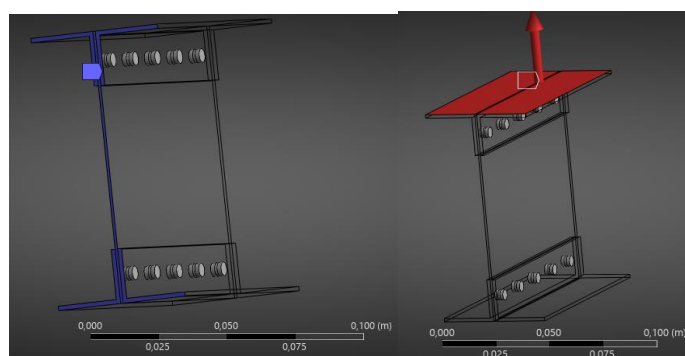


Figura 15 - A azul: zona de encastramento; A vermelho: força aplicada; A cinzento: Elementos viga

Como maneira de descobrir a melhor malha a utilizar, uma que defina corretamente o problema, mas que não estenda em demasia o tempo de simulação e aumente a necessidade de recursos computacionais, foi também para este modelo realizada uma análise de convergência com os dados na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise de convergência da secção da longarina

	1º Caso	2ºCaso	3ºCaso	4ºcaso
Nº de nós	25433	56903	102060	110360
Nº de elementos	12276	30366	56187	61360
Tensão Máx de Von Mises	0,91 GPa	1,02 GPa	1,616 GPa	1,617 GPa

Assim, como do 2ºcaso para o 3º existe uma grande variação na tensão, ao contrário da 3ª para a 4ª foi selecionada a malha do 3º caso. Para esse quarto caso não foi também possível aumentar mais o número de nós devido à licença disponível. A malha contém nível de refinamento 3 do Ansys (*máximo*) em todos os furos, e na zona mais central da longarina esta encontra-se mais grosseira (Figura 16).

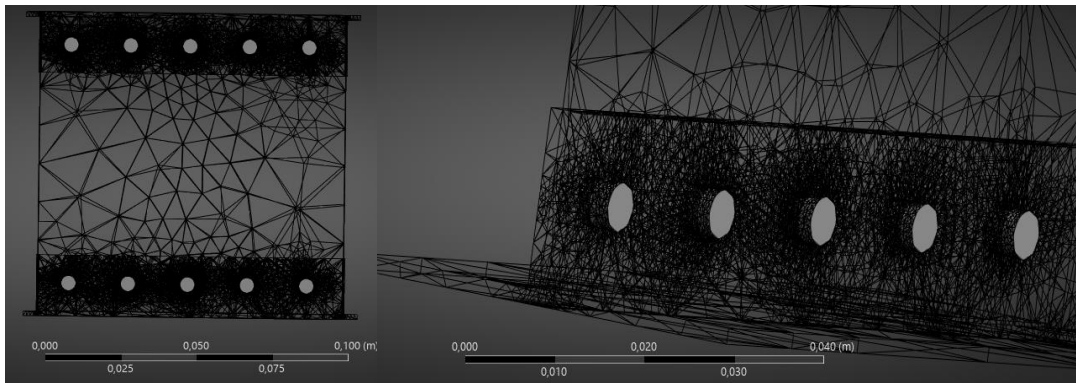


Figura 16-Diferentes vistas da malha utilizada para a secção da longarina

Com esta malha foi realizada a simulação e retirados os resultados correspondentes à variação no modelo da tensão de Von Mises equivalente e à deformação total (escala real – fator de 1) que estão Figura 17-a e 17-b

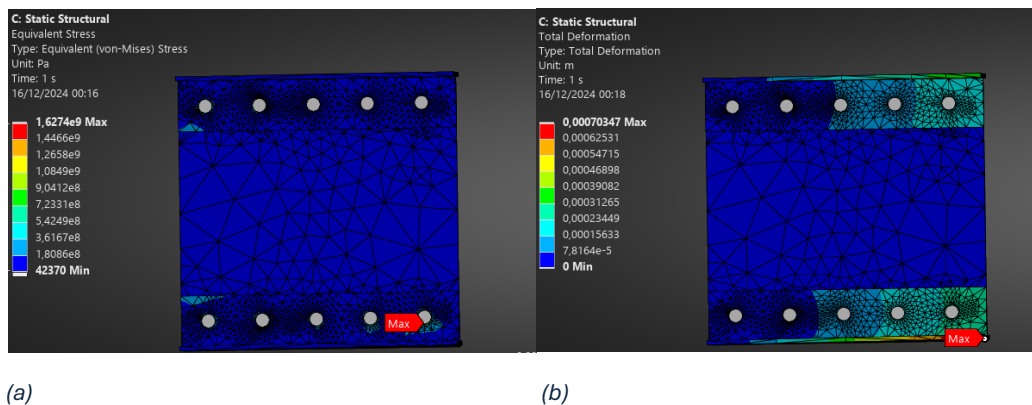


Figura 17- Para a secção de longarina com furos ao centro: (a) Tensão Equivalente; (b) Deformação Total

A tensão máxima de Von Mises é visualizada, como esperado, na zona próxima de colocação de rebite, neste caso no inferior mais próximo da ponta. É possível observar valores de deformação superiores no topo do banzo superior, com valor máximo de 0.7 mm o que já se revela considerável tendo em conta as dimensões reduzidas desta longarina.

Após isso, alterou-se a posição dos rebites para dois outros casos de modo a verificar a influência na mesma na tensão máxima. Manteve-se o diâmetro, o espaçamento e a posição vertical. Apenas se alterou a posição ao longo da altura do banzo, um caso com os furos a $\frac{1}{4}$ da altura e outro a $\frac{3}{4}$ (Figura 18).

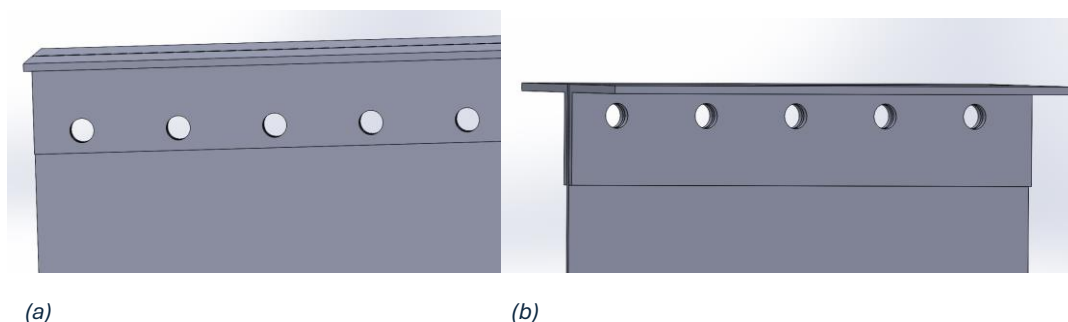


Figura 18- Modelo da secção da longarina com: (a) Furos em baixo; (b) Furos em cima

A simulação foi realizada da mesma forma e aplicadas as condições de malha da análise de convergência. Foram retirados os resultados e verificou-se nos contornos que as posições dos valores máximos de tensão de von Mises e de deformação total se encontravam nos mesmos locais, variando a magnitude, conforme a Tabela 8 (“Cima” corresponde à zona mais afastada do centro da alma da viga, “Baixo” à zona mais próxima e “Centro” à simulação inicial).

Tabela 8- Comparação do deslocamento e tensão máxima equivalente para as 3 posições de rebites na longarina

	Cima	Centro	Baixo
Deslocamento máximo	0,55 mm	0,70 mm	0,47 mm
Tensão Máx de Von Mises	2,28 GPa	1,63 GPa	0,21 GPa

É possível constatar que à medida que se aproxima do centro da viga as tensões máximas diminuem significativamente. Já o deslocamento é superior com os furos no centro. O modelo com os furos mais próximos apresenta as menores tensões juntamente com um menor valor de deslocamento, revelando-se como o melhor candidato de entre estes três para valores mais reduzidos destas grandezas. Apesar de esta posição indicar-se a melhor, é necessário ter consciência de que este teste em específico por si só não define completamente o problema, por haver outro tipo de esforços a atuarem sobre a longarina em condições realistas, bem como a necessidade de ter em conta a compatibilidade da posição outros componentes internos de uma asa (ex. nervuras,

eletrônica). Para além disso, a realização de outros testes como por exemplo ensaio à fadiga são necessário para avaliar a posição, até porque a proximidade do furo ao limite do material torna mais perigosa por exemplo a propagação de uma fenda microscópica.

Analisando o processo, verifica-se que a definição da força não é a mais realista, isto porque mesmo que a corda seja constante ao longo da asa, a força de sustentação varia com a posição ao longo desta [13], não sendo constante, sendo um possível ponto de melhoria.

Apesar do objetivo não ser o projeto de uma longarina que sustente a força aplicada, repara-se que em nenhum dos casos deste estudo estas dimensões de longarina seriam suficientes, dado que para todos os valores se encontram consideravelmente acima da tensão de cedência típica das ligas de alumínio (30-500MPa)[14] ou pelo menos com um fator de segurança não elevado o suficiente (no caso dos furos em baixo).

Em adição, foi analisado em aproximação à zona de maior tensão, que esta se encontra próxima de um vértice do elemento viga, o que pode ser esta magnitude elevada ser causada por uma área de contacto tão reduzida (Figura 19).

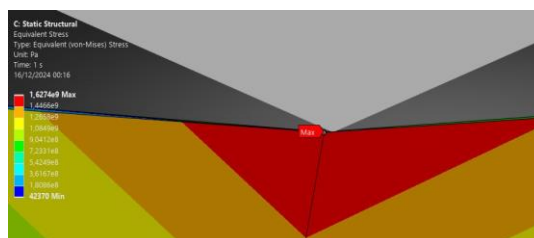


Figura 19- Aproximação à zona de contacto elemento viga-banzo de maior tensão equivalente na longarina

Assim, outra trajetória que melhoraria a qualidade da simulação a tomar seria a substituição desta simplificação realizada (uso de elementos viga como rebites) por modelos construídos de rebites, caso haja disponibilidade de número de elementos de modo a os definirem corretamente.

Conclusão

A análise das juntas rebitadas, abordada ao longo deste estudo, revelou-se fundamental para compreender as complexidades inerentes à distribuição de tensões e os diversos fatores que influenciam o desempenho estrutural dessas ligações. As juntas rebitadas desempenham um papel crucial em várias indústrias, particularmente na aeroespacial, onde a combinação de leveza e robustez é imperativa. A partir das equações de Kirsch, pudemos obter uma compreensão inicial das concentrações de tensão em torno de furos, servindo como base para análises mais complexas.

O estudo dos casos de falha em ligações rebitadas mostrou que a pressão de contacto é frequentemente o modo de falha mais crítico, especialmente quando as placas e os rebites são feitos do mesmo material. Isto sublinha a importância de considerar tanto as propriedades materiais quanto a geometria na fase de projeto. Além disso, o efeito do espaçamento entre rebites foi um ponto central, demonstrando que o espaçamento

otimizado pode minimizar as tensões máximas nas placas e nos rebites, assegurando uma distribuição de tensões mais uniforme e eficiente.

As simulações computacionais realizadas no Ansys, tanto para os efeitos do diâmetro quanto do espaçamento entre rebites, permitiram uma análise detalhada da interação entre os elementos da junta. Estas simulações, embora limitadas pela capacidade de malha disponível, forneceram insights valiosos sobre como pequenas variações nos parâmetros de projeto podem impactar significativamente o desempenho estrutural.

O caso de estudo focado na longarina de uma asa de aeronave destacou a importância da localização dos rebites na redução das tensões máximas. Foi evidente que a posição dos rebites tem um impacto direto na distribuição das tensões e na deformação global da estrutura. A configuração otimizada dos rebites demonstrou ser essencial para garantir a integridade estrutural e prolongar a vida útil do componente.

Por fim, os resultados obtidos sugerem que uma abordagem integrada, combinando análise analítica e computacional, é crucial para o desenvolvimento de juntas rebitadas mais eficientes e seguras. O futuro do design estrutural pode se beneficiar enormemente de avanços em técnicas de simulação e análise, especialmente quando aplicadas a estruturas complexas e críticas como as encontradas na indústria aeroespacial.

Referências Bibliográficas

- [1] “Por que aviões são rebitados em vez de soldados - Conhecimento - Wuxi Mayshee Developing Company Ltd.” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <http://pt.all-rivet.com/info/why-are-airplanes-riveted-instead-of-welded-55501359.html>
- [2] “Rebite: principais tipos e aplicações| CRV Industrial Parafusos.” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.crvindustrial.com/blog/rebite-principais-tipos-e-aplicacoes>
- [3] “Rebite Semi-tubular - Tecnologia de Rebitagem - Rebitagem | DESICAD,” Sep. 2013.
- [4] “Rebites ou parafusos? :: Olhar Conceito.” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.olharconceito.com.br/noticias/exibir.asp?id=19684¬icia=rebites-ou-parafusos&edicao=1>
- [5] “Vantagens e desvantagens de rebitagem - máquinas SLS.” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://pt.slsmachinery.com/Vantagens-e-desvantagens-de-id46434667.html>

- [6] “Ferramentas e técnicas de rebitagem: Um guia abrangente | Artizono.” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: https://artizono.com/pt_br/ferramentas-e-tecnicas-de-rebitagem/?utm_content=cmp-true
- [7] J. Wu, C. Chen, Y. Ouyang, D. Qin, and H. Li, “Recent development of the novel riveting processes,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021 117:1, vol. 117, no. 1, pp. 19–47, Jul. 2021, doi: 10.1007/S00170-021-07689-W.
- [8] “MECÂNICA DOS SÓLIDOS.”
- [9] T. H. G. Megson, *Aircraft Structures for Engineering Students*. Elsevier, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-822868-5.09989-7.
- [10] “Enhanced Reader.”
- [11] J. Mucha and W. Witkowski, “Mechanical Behavior and Failure of Riveting Joints in Tensile and Shear Tests,” *Strength of Materials*, vol. 47, no. 5, pp. 755–769, Sep. 2015, doi: 10.1007/s11223-015-9712-5.
- [12] A. Grbović, G. Kastratović, A. Sedmak, I. Balać, and M. D. Popović, “Fatigue crack paths in light aircraft wing spars,” *Int J Fatigue*, vol. 123, pp. 96–104, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2019.02.013.
- [13] “Lift Distribution - an overview | ScienceDirect Topics.” Accessed: Jan. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lift-distribution>
- [14] M. Ashby, “Material property data for engineering materials,” 2021.

Anexos

Tabela 1- Propriedades do Al2024-O

Property	Value	Units
Elastic Modulus	7.24e+10	N/m ²
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Shear Modulus	2.8e+10	N/m ²
Mass Density	2780	kg/m ³
Tensile Strength	185000000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	75000000	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient	2.32e-05	/K
Thermal Conductivity	193	W/(m·K)
Specific Heat	875	J/(kg·K)

Nas tabelas 1-5, apresenta-se os resultados referentes ao estudo do efeito da distribuição dos rebites. Nas tabelas, os resultados referentes à tensão e deformação máxima no rebite estão assinalados com “(x)”, que se refere ao número do rebite assinalado na Figura 9.

Tabela 2- Caso 1

Tensão Máx (MPa)	242,15
Rebite Tensão Máx (MPa)	130,15
Rebite Deformação Máx (mm)	0,0036196

Tabela 3- Caso 2

Tensão Máx (MPa)	104,3	
Rebite Tensão Máx (MPa)	(1) 68,362	(2) 66,336
Rebite Deformação Máx (mm)	(1) 0,0018511	(2) 0,0018511

Tabela 4- Caso 3

Tensão Máx (MPa)	70,335		
Rebite Tensão Máx (MPa)	(1) 41,892	(2) 37,192	(3) 43,349
Rebite Deformação Máx (mm)	(1) 0,0012465	(2) 0,0011354	(3) 0,0012640

Tabela 5- Caso 4

Tensão Máx (MPa)	48,38			
Rebite Tensão Máx (MPa)	(1) 30,769	(2) 28,032	(3) 29,489	(4) 29,639

Rebite Deformação Máx (mm)	(1) 0,00099413	(2) 0,00088067	(3) 0,00092543	(4) 0,00097243
----------------------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Tabela 6- Caso 5

Tensão Máx (MPa)	83,485			
Rebite Tensão Máx (MPa)	(1) 41,094	(2) 27,889	(3) 27,133	(4) 42,365
Rebite Deformação Máx (mm)	(1) 0,001355	(2) 0,00091267	(3) 0,00089161	(4) 0,0013499

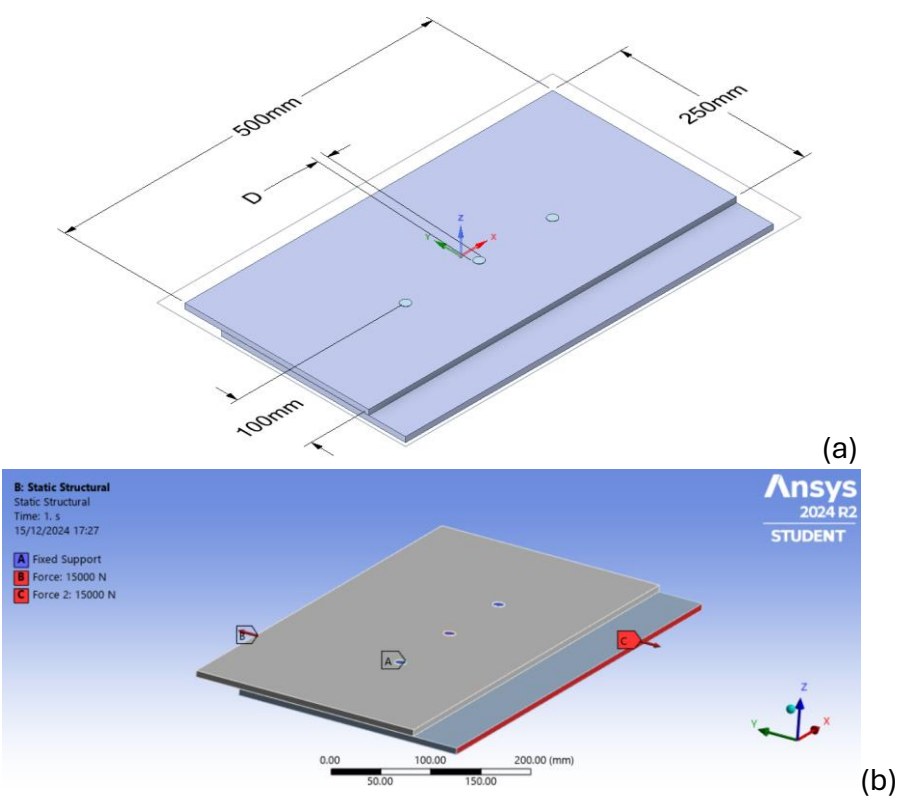


Figura 1- Esquema do estudo do efeito do diâmetro do rebite: a) Dimensões; b) Condições Fronteira.

Tabela 7 -Resultados do estudo do efeito do diâmetro dos rebites

Diâmetros (mm)	12	13	14	15	16	17
elementos	26164	25551	25560	26905	26774	26918
nodes	125729	123,155	123971	127377	126281	
Placa (MPa)	119,69	100,94	106,51	91,186	89,44	84,979

Rebite 1 (MPa)	144,65	127,61	125,97	115,41	110,95	105,92
Rebite 2 (MPa)	104,5	99,054	86,625	81,678	72,118	70,954
Rebite 3 (MPa)	144,19	126,22	125,35	116,42	110,95	105,53
Rebite 1 (mm)	0,0017176	0,0016116	0,001555	0,0014672	0,0013807	0,0013367
Rebite 2 (mm)	0,0012595	0,0012548	0,0010898	0,0010723	0,00098076	0,00092253
Rebite 3 (mm)	0,0017176	0,0016301	0,0015541	0,001456	0,0013798	0,0013371

Tabela 8-Resultados do estudo do efeito do espaçamento entre rebites

Espaçamento (mm)	30	40	50	60	70	80	90
elementos	42729	41076	43030	42994	43104	39680	42298
nodes	120336	110068	115907	115639	116974	105690	115035
Placa (MPa)	149,06	114,03	123,68	114,75	130,33	140,94	128,53
Rebite 1 (MPa)	104,85	97,86	104,71	102,99	107,83	99,481	102,13
Rebite 2 (MPa)	77,887	77,156	79,929	99,936	68,436	72,297	77,835
Rebite 3 (MPa)	125,66	114,13	115,43	105,75	111,83	106,4	115,83
Rebite 1 (mm)	0,0040644	0,0040057	0,004041	0,0040571	0,0040665	0,0045184	0,0041154
Rebite 2 (mm)	0,0029476	0,0030557	0,0031363	0,0029528	0,0029293	0,0035909	0,0028665
Rebite 3 (mm)	0,004027	0,0040049	0,0040579	0,0041015	0,0040953	0,00453	0,0040916

Tabela 9-Tabela dos resultados das simulações

2F (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (Mpa)
250	433
500	867
1000	1735
1500	2602
2000	3470
4000	6940
8000	14500
12000	23166

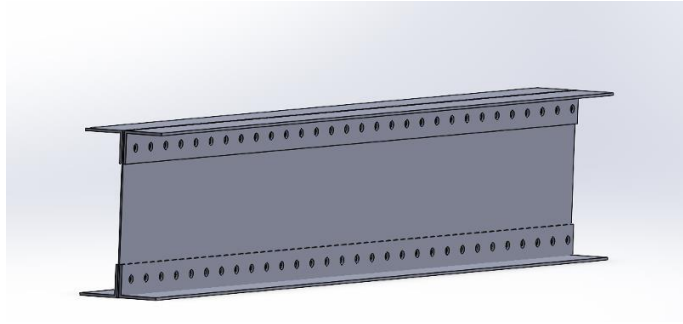


Figura 2- Modelo da longarina realizado no Solidworks