

Ligações/Juntas

Estruturas Aeroespaciais I (10362)

Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica

2022

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais
Faculdade de Engenharia



1. Introdução

O fabrico de componentes aeronáuticos envolve geralmente a ligação de um componente com outro.

Por exemplo, o revestimento da fuselagem é ligado às cavernas e/ou aos tensores longitudinais, enquanto o revestimento da asa é ligado às nervuras e/ou tensores.

Com o advento da construção em ligas de alumínio, as juntas rebitadas tornaram-se a forma predominante de ligação juntamente com algumas juntas soldadas e juntas coladas com resina epóxi.

Em geral, as juntas rebitadas são carregadas de forma complexa, e uma análise precisa é comumente difícil de obter devido a descontinuidades na região da junta.

Alguns pressupostos simplificadores relativamente ao funcionamento das juntas são necessários.



2. Juntas sobrepostas simples

A *figura 4.33* mostra duas placas de espessura t ligadas por uma linha simples de rebites: isto é uma junta sobreposta, a mais simples usada.

Suponha-se que as placas têm um carregamento nas extremidades de P por unidade de largura, que os rebites têm diâmetro d e um espaçamento b e que a distância dos rebites à aresta da placa é a .

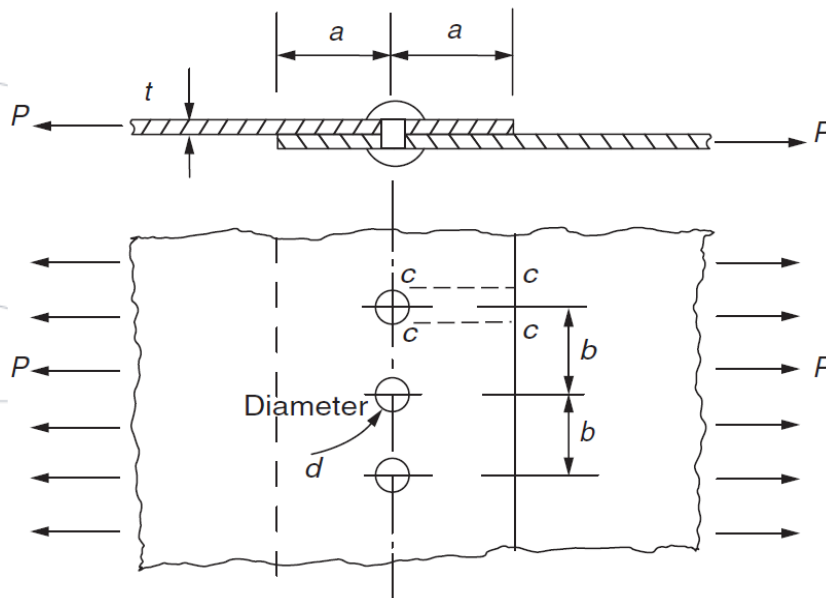


Figura 4.33 Junta sobreposta simples rebitada.



2. Juntas sobrepostas simples

Existem quatro modos de falha possíveis que têm que ser considerados:

- corte nos rebites
- compressão nos furos
- tração das placas
- corte nas placas.



2. Juntas sobrepostas simples

2.1. Corte nos rebites

Os rebites podem falhar ao corte no seu diâmetro no interface entre as placas.

Assim, se a tensão de corte máxima que os rebites suportam é τ_1 , então a falha ocorre quando

$$Pb = \tau_1 \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)$$

o que dá

$$P = \frac{\pi d^2 \tau_1}{4b} \quad (4.37)$$



2. Juntas sobrepostas simples

2.2. Compressão nos furos

Tanto os rebites como a placa podem falhar devido à pressão no furo/rebite.

Suponha-se que p_b é a pressão de falha, então a falha ocorre quando

$$\frac{Pb}{td} = p_b$$

e então

$$P = \frac{p_b td}{b} \quad (4.38)$$



2. Juntas sobrepostas simples

2.3. Tração nas placas

A área da placa sob tração ao longo da linha de rebites é reduzida devido à presença dos furos dos rebites.

Assim, se a tensão de rutura da placa é σ_{ult} , a falha ocorre quando

$$\frac{Pb}{t(b-d)} = \sigma_{ult}$$

o que dá

$$P = \frac{\sigma_{ult} t(b-d)}{b} \quad (4.39)$$



2. Juntas sobrepostas simples

2.4. Corte nas placas

A falha ao corte das placas pode ocorrer nos planos *cc* (*figura 4.33*), o que leva os rebites a serem arrancados da placa.

Se a tensão de corte de rutura da placa é τ_2 , a falha deste tipo ocorre quando

$$Pb = 2at\tau_2$$

o que dá

$$P = \frac{2at\tau_2}{b} \quad (4.40)$$



2. Juntas sobrepostas simples

Exemplo 4.17: A junta da casca de uma fuselagem é construída rebitando as duas chapas entre duas placas como mostra a *figura 4.34*. A espessura da casca da fuselagem é 2,5 mm; cada placa tem 1,2 mm de espessura; e o diâmetro dos rebites é 4 mm. Sabendo que a tensão de tração na casca não pode exceder 125 N/mm^2 e que a tensão de corte nos rebites está limitada a 120 N/mm^2 , determine o espaçamento máximo entre rebites permitido de forma a que a junta seja tão forte à tração quanto ao corte.

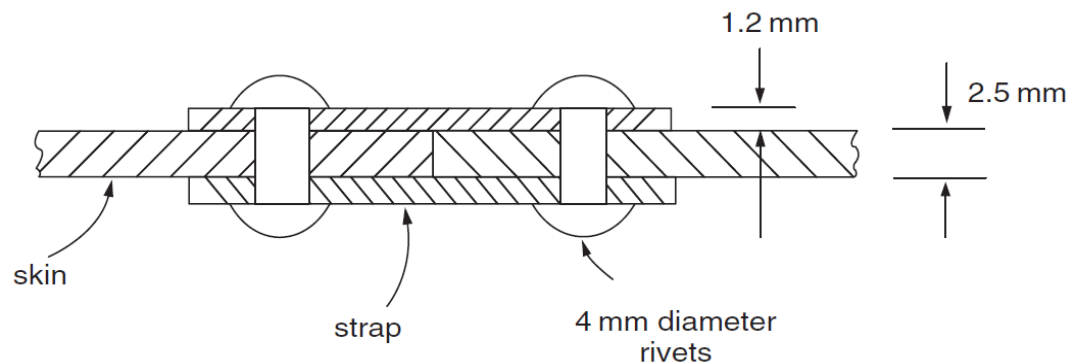


Figura 4.34 Junta do exemplo 4.17.



2. Eficiência da junta

A eficiência de uma junta ou ligação mede-se pela comparação da carga real de falha com a carga que seria necessária caso não houvesse furos na placa.

Assim, para a junta da *figura 4.33*, a eficiência da junta η é dada por

$$\eta = \frac{\sigma_{ult}t(b-d)}{\sigma_{ult}bt} = \frac{b-d}{b} \quad (4.41)$$



3. Juntas rebitadas em grupo

Os rebites podem ser agrupados de cada lado da junta por forma a maximizar a eficiência da junta.

Suponha-se que duas placas são unidas como mostra a *figura 4.35* e que são necessários seis rebites de cada lado.

Assumindo que cada rebite suporta a mesma força, então o rebite isolado da linha aa suporta um sexto do carregamento total.

Os dois rebites da linha bb suportam dois sextos da carga e os três rebites da linha cc suportam três sextos.

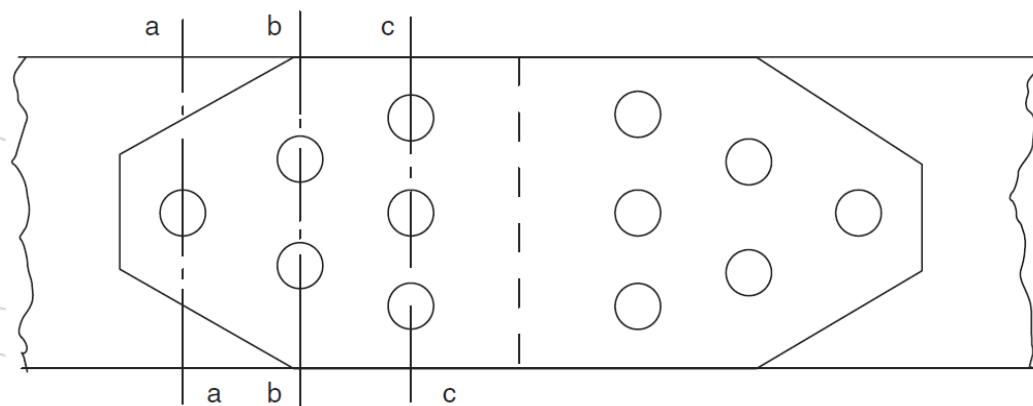


Figura 4.35 Junta rebitada em grupo.



3. Juntas rebitadas em grupo

Na linha bb, a área da secção transversal é reduzida por dois furos de rebite e na linha cc por três furos de rebite.

Em termos relativos, a junta é tão forte nessas secções quanto na secção aa.

Assim, obtém-se uma eficiência da junta mais elevada do que se tivesse os rebites agrupados em duas linhas de três.



4. Juntas rebitadas excêntricas

A ligação mostrada na *figura 4.36* suporta uma força P deslocada do centroide de um grupo de rebites.

O grupo de rebites está sujeito a uma força de corte P que passa no seu centroide e a um momento Pe em torno do centroide.

Assume-se que a força de corte P é distribuída igualmente pelos seis rebites, provocando uma força de corte em cada rebite paralela à linha de ação da força P .

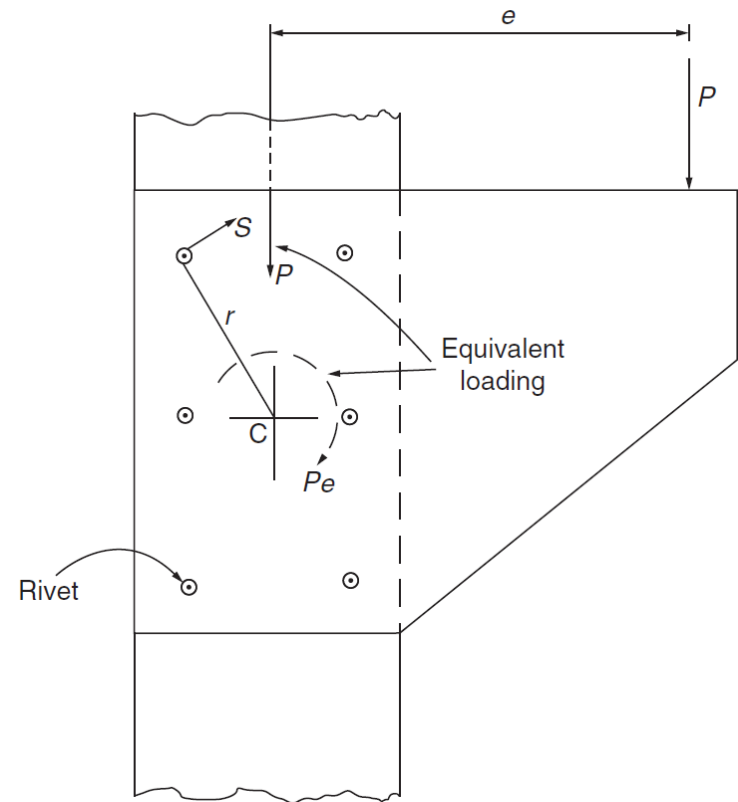


Figura 4.36 Junta carregada excentricamente.



4. Juntas rebitadas excêntricas

Assume-se que o momento Pe produz uma força de corte S em cada rebite, onde S atua numa direção perpendicular à linha que une um dado rebite ao centroide de todos os rebites do grupo.

Além disso, o valor de S tem que ser proporcional à distância do rebite ao centroide do grupo de rebites.

Assim,

$$Pe = \sum Sr$$

Se $S=kr$, onde k é uma constante para todos os rebites, então

$$Pe = k \sum r^2$$



4. Juntas rebitadas excêntricas

de onde se obtém

$$k = \frac{Pe}{\sum r^2}$$

e

$$S = \frac{Pe}{\sum r^2} r \quad (4.42)$$

A força resultante num rebite é a soma vetorial das forças resultantes de P e de Pe .



Ligações/Juntas



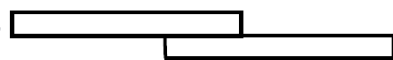


5. Juntas coladas

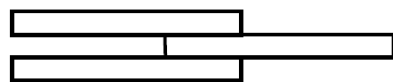
Para além das juntas rebitadas, as juntas coladas também têm tido extensa aplicação na fabricação de aeronaves.

O adesivo mais usado nestas juntas é a resina epoxídica pois tem boas propriedades de adesão, pouca contração durante a cura resultando em baixas tensões residuais, boas propriedades mecânicas e boa estabilidade térmica.

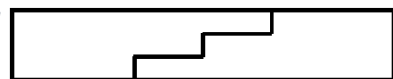
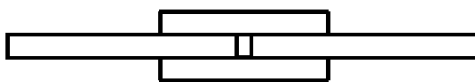
Ligações/Juntas



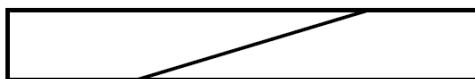
sobreposição simples



sobreposição dupla



escada



rampa

Figura 4.37 Juntas coladas mais comuns.



6. Projeto e análise de olhais

No projeto de olhais podem ser considerados carregamentos estáticos axiais, transversais e oblíquos como mostrado na *figura 4.38*.

Vamos ver a análise para olhais em liga de alumínio ou aço.

Introduz-se um fator de eficiência de tensão para ter em conta o efeito de concentração de tensões.

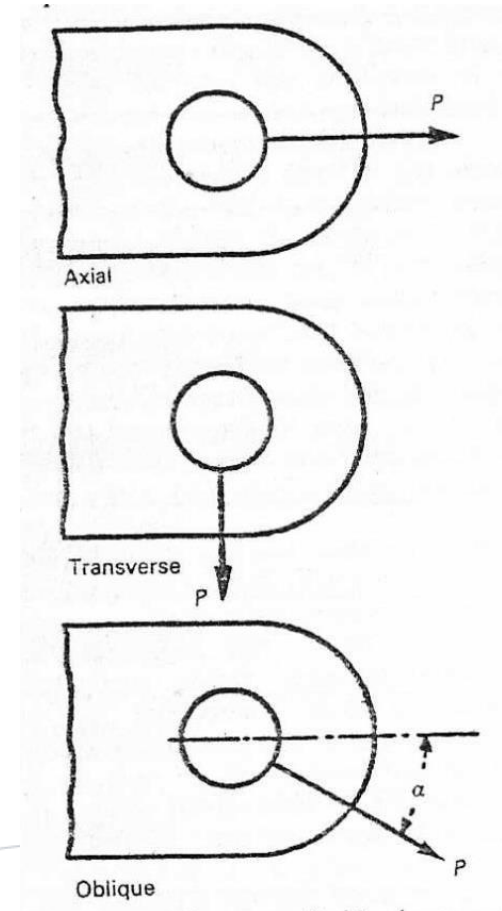


Figura 4.38 Três tipos de carregamento no olhal.



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

Existem três modos de carregamento (*figura 4.39*):

- Tração na secção efetiva
- Arrancamento por corte, assumindo que a força é transmitida em planos a 40°
- Carregamento à compressão

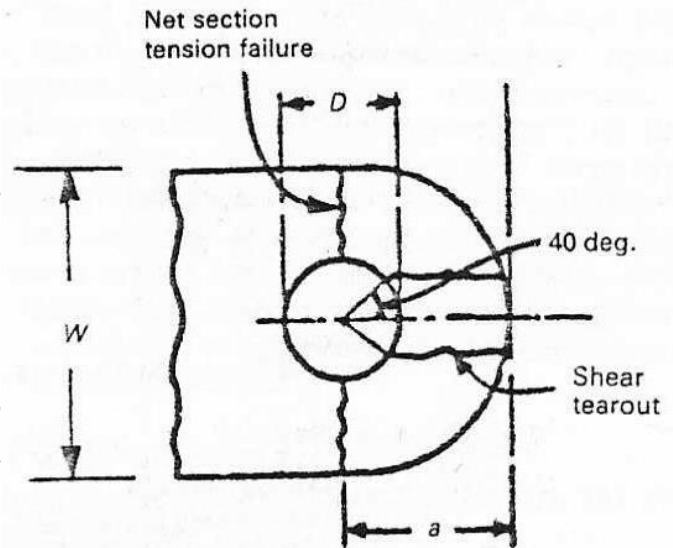


Figura 4.39 Modos de falha de um olhal sujeito a um carregamento axial.



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

Pode considerar-se que os modos de corte e de compressão são um único modo e que a carga final admissível neste modo de corte-compressão é

$$P_{bru} = K_{br} A_{br} F_{tu} \quad (4.43)$$

onde K_{br} é o fator de eficiência no modo de corte-compressão (*figura 4.40*), F_{tu} é a resistência à tração do material e $A_{br} = Dt$ é a área de compressão.

D e t são o diâmetro do furo e espessura do olhal, respetivamente.

Para uma gama de formas de olhais encontrados na prática, depende da razão a/D e da razão D/t , onde a é a distância desde o eixo do furo até à borda do olhal.



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

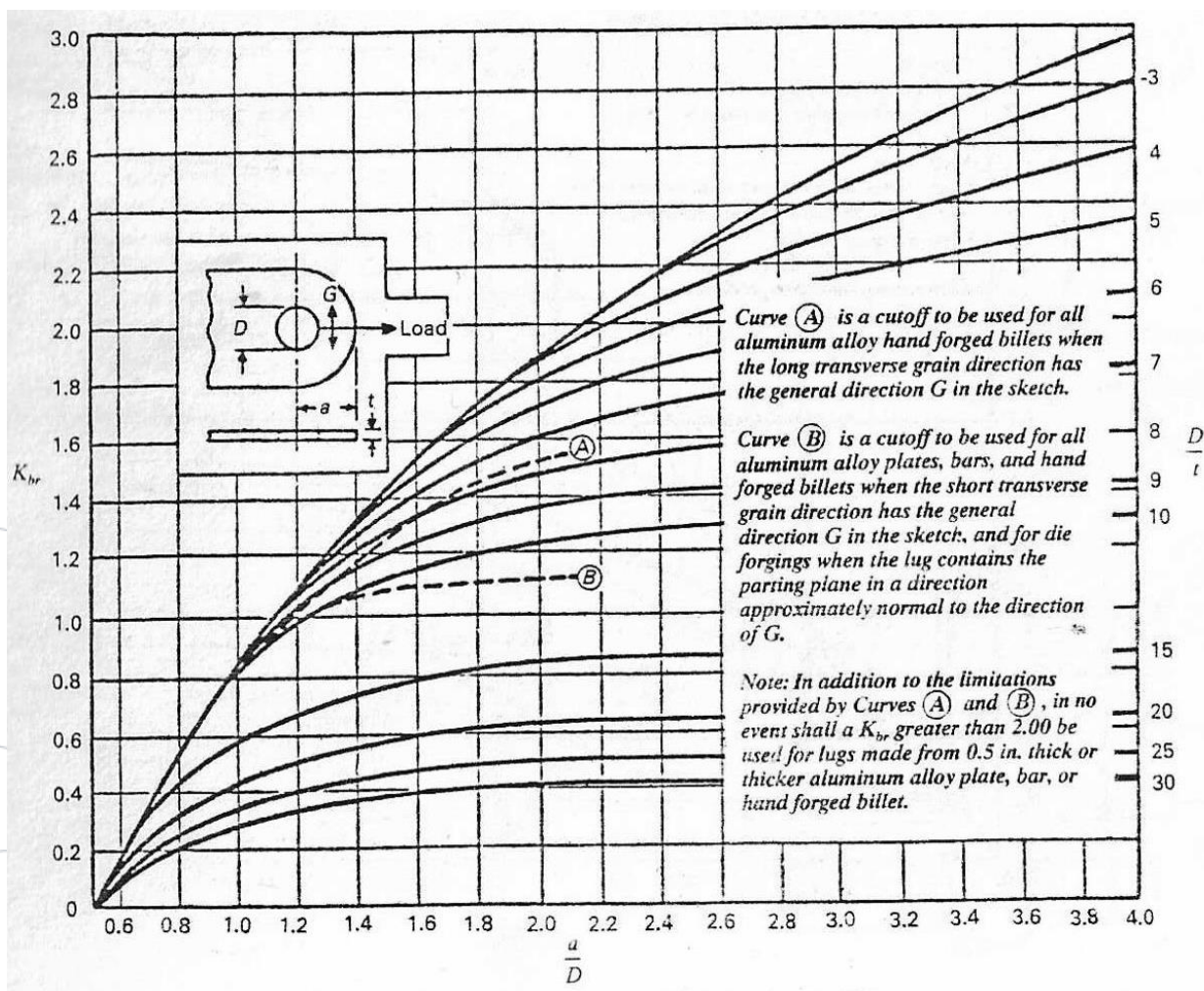


Figura 4.40 Fator de eficiência no modo de corte-compressão K_{br} .



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

A carga final admissível no modo de tração é

$$P_{tu} = K_t A_t F_{tu} \quad (4.44)$$

onde K_t é o fator de eficiência no modo de tração (*figura 4.41*) e $A_t = (W-D)t$ é a área efetiva de tração.

W é a largura do olhal.

Para uma gama de formas de olhais encontrados na prática, depende da razão W/D e do tipo de liga de alumínio ou aço usada.



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

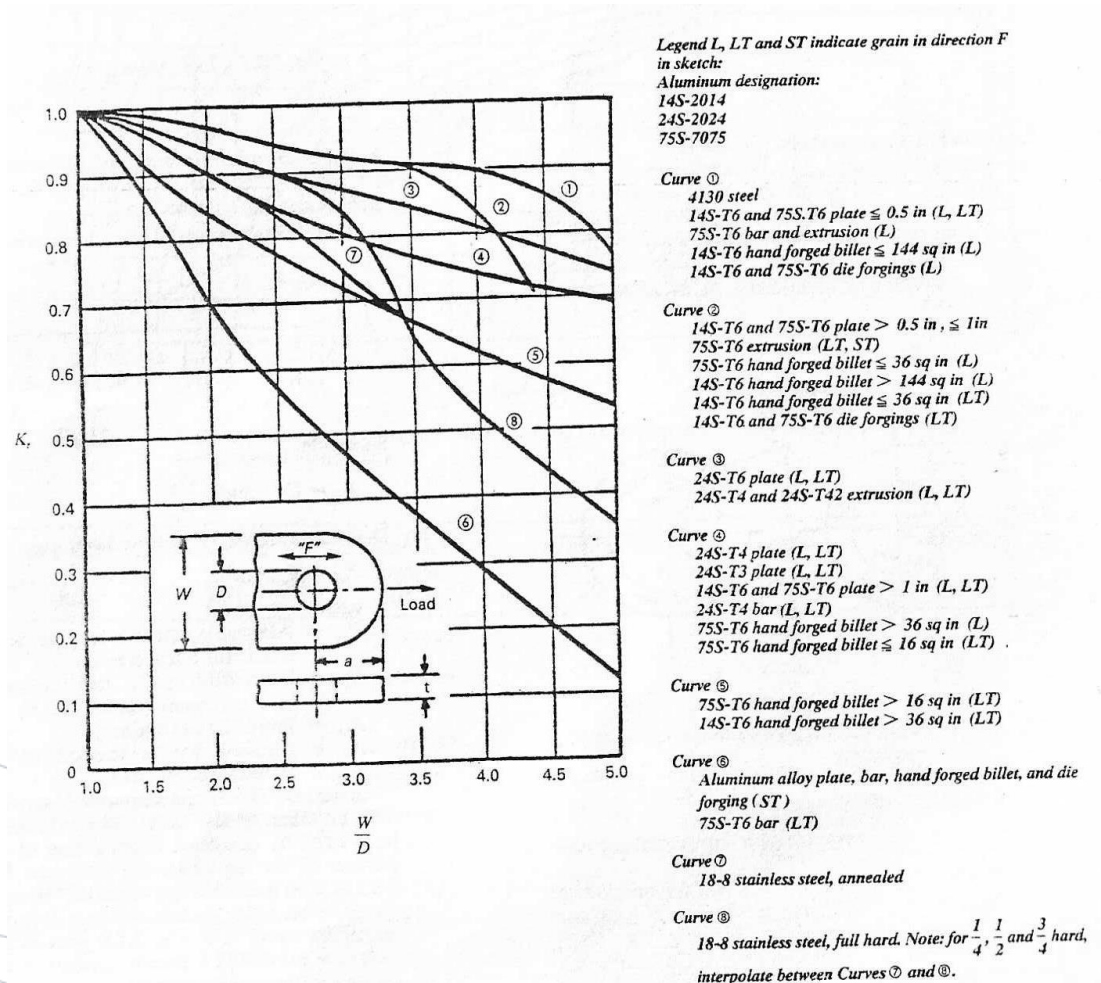


Figura 4.41 Fator de eficiência no modo de tração K_t .



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

A carga axial de cedência atribuída ao modo de corte-compressão é dada por

$$P_y = C \frac{F_{ty}}{F_{tu}} \min(F_{bru}, F_{tu}) \quad (4.45)$$

onde C é o fator de cedência (*figura 4.42*) e F_{ty} e F_{tu} são a tensão de cedência à tração e a resistência à tração do material transversalmente ao grão, respetivamente.

A carga de cedência admissível no casquilho é

$$P_{bry} = 1.85 F_{cy} A_{brb} \quad (4.46)$$

onde F_{cy} é a tensão de cedência à compressão do material e A_{brb} é a menor área de compressão entre o pino e o casquilho ou o casquilho e o olhal.



6. Projeto e análise de olhais

6.1. Olhais carregados axialmente

Para se dimensionar o olhal é necessário calcular as margens de segurança e definir D , t , a e W .

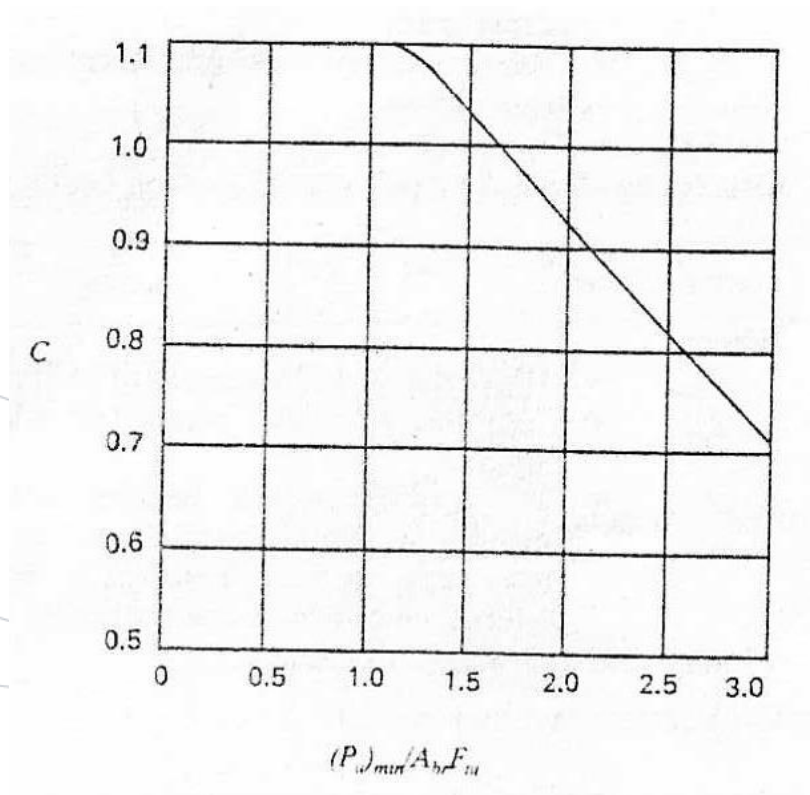


Figura 4.42 Fator de cedência C .



6. Projeto e análise de olhais

6.2. Olhais carregados transversalmente

A *figura 4.43* mostra a geometria do olhal com carregamento transversal.

As áreas A_1 , A_2 , e A_4 são medidas nos planos indicados na *figura 4.43a* que são perpendiculares ao eixo axial.

No caso de haver um pescoço, A_1 e A_4 devem ser medidas perpendicularmente à linha de eixo local como na *figura 3.43b*.

A_3 é a área mais pequena em qualquer secção radial à volta do furo.

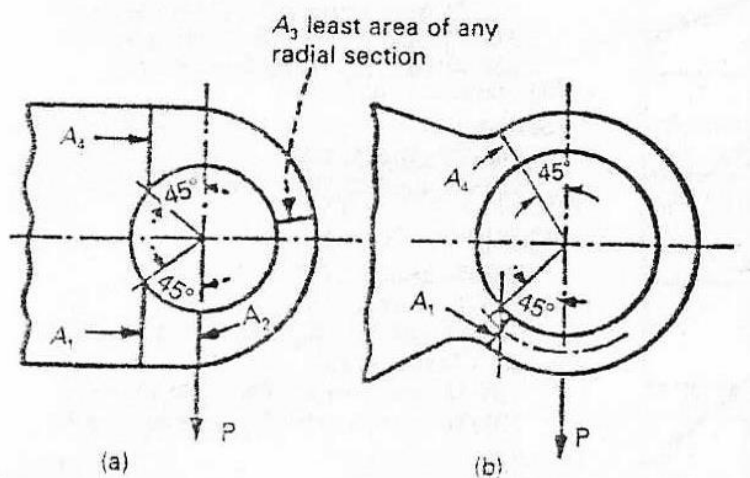


Figura 4.43 Posição das áreas de secção transversal A_1 , A_2 , A_3 e A_4 .



6. Projeto e análise de olhais

6.2. Olhais carregados transversalmente

Uma vez que a escolha das áreas e do método de ponderação das áreas se baseia em olhais com as formas da *figura 4.44*, é necessário garantir que com outras geometrias as áreas escolhidas A_1 , A_2 , A_3 e A_4 permitem representar a resistência de forma adequada.

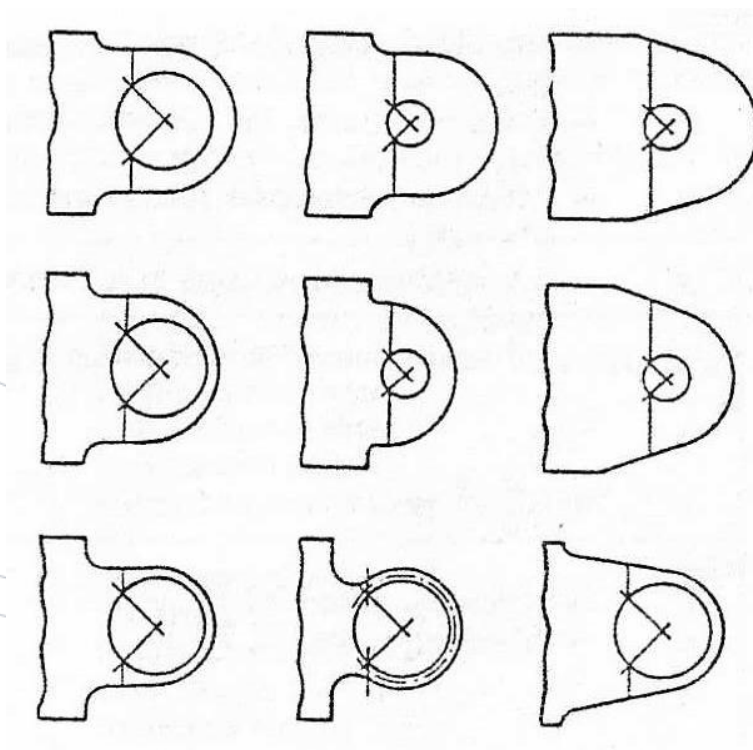


Figura 4.44 Formas de olhais.



6. Projeto e análise de olhais

6.2. Olhais carregados transversalmente

No caso de o olhal ter uma forma pouco usual, é necessário representar um olhal equivalente, como mostra a *figura 4.45*, para se usar a análise aqui apresentada.

Obtém-se a área transversal ponderada na forma

$$A_{av} = \frac{6}{\frac{3}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} + \frac{3}{A_4}} \quad (4.47)$$

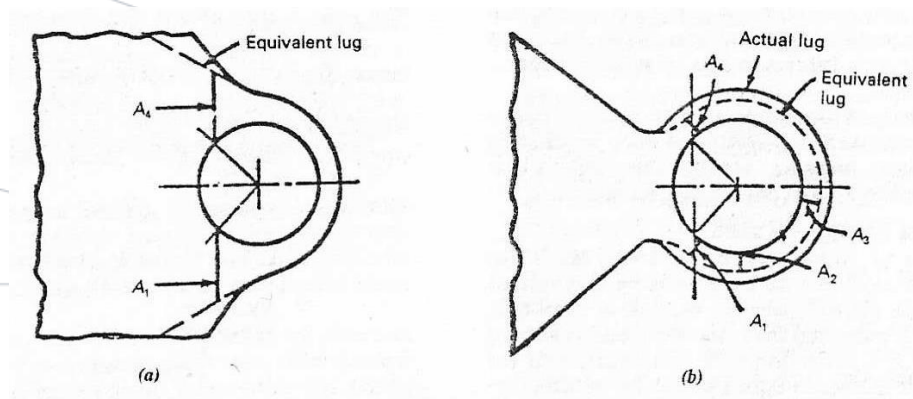


Figura 4.45 Olhal equivalente de uma forma pouco usual.



6. Projeto e análise de olhais

6.2. Olhais carregados transversalmente

e a razão de áreas

$$K_{av} = \frac{A_{av}}{A_{br}} \quad (4.48)$$

A carga transversal final admissível é

$$P_{tru} = K_{tru} A_{br} F_{tux} \quad (4.49)$$

onde K_{tru} é o fator de eficiência para carga transversal final (*figura 4.46*), F_{tux} é a resistência à tração do material perpendicular ao grão e $A_{br} = Dt$ é a área resistente projetada.

Em nenhuma situação, a força transversal admissível deve ser considerada inferior àquela que uma viga encastrada com a mesma secção transversal pode resistir conforme mostra a *figura 4.47*.



6. Projeto e análise de olhais

6.2. Olhais carregados transversalmente

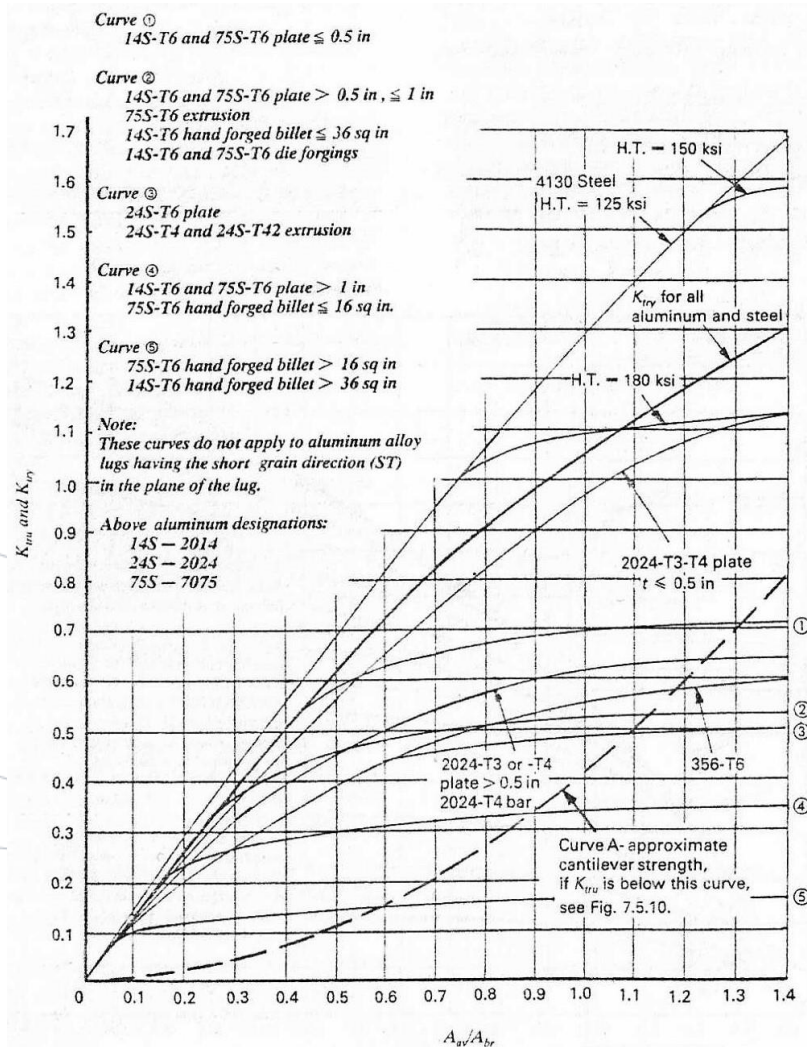


Figura 4.46 Fator de eficiência para carga transversal, K_{trv} .



6. Projeto e análise de olhais

6.2. Olhais carregados transversalmente

A linha A na *figura 4.46* mostra a resistência da viga encastrada. A carga de cedência admissível do olhal é

$$P_{try} = K_{try} A_{br} F_{tyx} \quad (4.50)$$

onde K_{try} é o fator de eficiência para carga transversal de cedência (*figura 4.46*), F_{tyx} é a tensão de cedência à tração perpendicularmente ao grão do material.

É necessário calcular a carga admissível no casquilho (*equação 4.46*) e as margens de segurança.

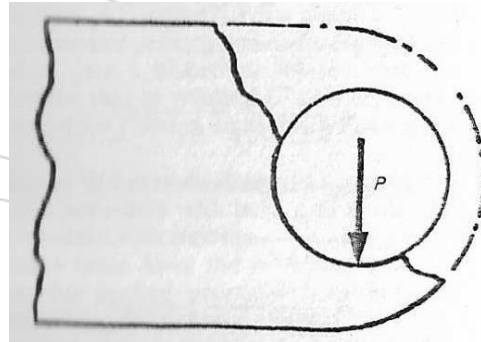


Figura 4.47 Ação da viga encastrada na porção do olhal sujeito ao carregamento.