

PAULA CARAM DE ASSIS

**DETERMINAÇÃO DO FATOR DE RIGIDEZ DE JUNTA APARAFUSADA
EM TRAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE EXCEL**

Guaratinguetá

2013

PAULA CARAM DE ASSIS

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE RIGIDEZ DE JUNTA APARAFUSADA EM
TRAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE EXCEL

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá

2013

A848d Assis, Paula Caram de
Determinação do fator de rigidez de junta aparafusada em tração utilizando o software Excel / Paula Caram de Assis. - Guaratinguetá: [s.n.], 2013
36 f.: il.
Bibliografia: f. 30

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Juntas soldadas - Fadiga 2. Excel (Programa de computador) I. Título

CDU 620.178.3

PAULA CARAM DE ASSIS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO COMO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Antonio Wagner Forti

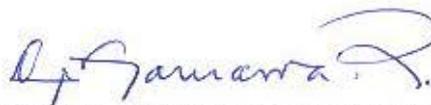
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA

Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. VICTOR ORLANDO GAMARRA ROSADO

UNESP-FEG


Dr. ERICK-SIQUEIRA GUIDI

UNESP-FEG

Dezembro de 2013

de modo especial, à minha mãe Rosana e ao meu pai Odilio, que sempre me amaram e me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva*, que despertou ainda mais meu interesse por este trabalho, e sempre esteve dedicado a auxiliar o seu desenvolvimento,

às amizades que fiz durante a faculdade, em especial aos meus amigos de curso *Francine, Natália, Renan e Rodrigo*, e ao meu namorado *Alex*,

aos funcionários do Campus de Guaratinguetá pela dedicação em diversos momentos durante a Graduação.

DE ASSIS, P. C. Determinação do Fator de Rigidez de Junta Aparafusada em Tração Utilizando o Software Excel. 2013. 36 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP).

RESUMO

Quando uma junta aparafusada é carregada em tração com carga dinâmica, parte desta carga é absorvida pelo parafuso e o restante é absorvido pelo material da junta. O que determina a porção que será absorvida pelo parafuso é o fator de rigidez de junta. Este fator tem influência sobre a tensão correspondente à pré-carga inicial e o coeficiente de segurança à falha por fadiga, sendo assim um fator importante no projeto de juntas aparafusadas. Neste trabalho, três métodos de cálculo do fator de rigidez são comparados por meio de uma planilha elaborada no software Excel. A relação da pré-tensão inicial e do coeficiente de segurança à falha por fadiga em função do fator de rigidez é gerada por gráfico. Os cálculos para cada método apresentam resultados com pequena diferença. É recomendado então, que cada caso de projeto seja analisado, e dependendo das condições e do intervalo de valores de rigidez, seja escolhido o método mais ou menos rigoroso quanto ao coeficiente de segurança à falha por fadiga. De modo geral, o método de aproximação apresenta resultados coerentes e pode ser facilmente calculado.

PALAVRAS-CHAVE: Juntas aparafusadas. Constante de rigidez. Pré-carga. Falha por fadiga. Excel.

DE ASSIS, P. C. Determination of Joint Stiffness of a Bolted Joint under Tensile Tension by Using Software Excel. 2013. 36 f. Graduation Thesis (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP).

ABSTRACT

When a bolted joint is loaded in tension with dynamically, part of this load is absorbed by the bolt and rest is absorbed by the joint material. What determines the portion that is to absorbed by the bolt is the joint stiffness factor. This factor influences the tension which corresponds to pre-load and the safety factor for fatigue failure, thus being an important factor in the design of bolted joints. In this work, three methods of calculating the stiffness factor are compared through a spreadsheet in Excel software. The ratio of initial pre-load and the safety factor for fatigue failure depending on the stiffness factor graph is generated. The calculations for each method show results with a small difference. It is therefore recommended that each project case is analyzed, and depending on its conditions and the range of stiffness values, the more or less rigid method about the safety factor for fatigue failure is chosen. In general, the approximation method provides consistent results and can be easily calculated.

KEYWORDS: Bolted joints. Stiffness constant. Preload. Fatigue failure. Excel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de junta aparafusada em tração.....	11
Figura 2 – Arruela.....	13
Figura 3 – Cone-frusta para parafuso comum.....	14
Figura 4 – Cone-frusta para parafuso de cabeça.....	14
Figura 5 – Gráfico N_f x C	26
Figura 6 – Gráfico σ_i x C	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficientes da equação de Wileman.....	16
Tabela 2 – Fatores de concentração de tensão à fadiga para parafusos.	18
Tabela 3 – Dados de entrada da junta aparafusada estudada.	21
Tabela 4 – Parâmetros iniciais específicos para junta dada.	23
Tabela 5 – Resultados para parafuso comum.	25
Tabela 6 – Resultados para parafuso de cabeça.	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	6
1.2	OBJETIVOS	6
1.3	MOTIVAÇÃO	7
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO	8
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1	DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE RIGIDEZ DE JUNTA.....	10
2.1.1	Método de aproximação de diâmetro equivalente ao diâmetro efetivo da arruela 12	
2.1.2	Método de cone-frusta	13
2.1.3	Método de Wileman et al.....	15
2.2	PRÉ-CARGA EM CARREGAMENTOS DINÂMICOS.....	16
2.3	COEFICIENTE DE SEGURANÇA À FALHA POR FADIGA	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4	RESULTADOS.....	25
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	28
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Quando uma junta aparafusada é carregada com uma carga externa, esta será distribuída entre o parafuso e os membros da junta, sendo que cada um sentirá uma parte desta carga. O que diz a fração da carga que será sentida por cada um é a constante de rigidez da junta, que depende das constantes de mola do parafuso e do material da junta.

A constante de mola do parafuso pode ser calculada de forma simples considerando este como uma barra sob tensão normal de tração. No entanto, a constante de rigidez do material gera uma discussão sobre seu cálculo correto, já que possui uma complexa distribuição de pressão no interior do material. Por essa razão, por vezes a área sob compressão do material é aproximada à de um cilindro sólido de área efetiva correspondente à da arruela da junta.

A constante de rigidez da junta tem grande influência sobre o valor da pré-carga, o coeficiente de segurança à falha por separação da junta e sobre a vida em fadiga. Desta forma, é desenvolvida neste trabalho uma planilha que compara resultados provindos de métodos diferentes do cálculo dessa constante.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos calcular valores de constante de rigidez de junta utilizando diferentes métodos por meio de uma planilha de cálculos desenvolvida no software Microsoft Excel, para que então esses valores possam ser comparados e discutidos. Os modelos utilizados como base de comparação serão a aproximação da seção transversal como de diâmetro efetivo equivalente ao da arruela, o modelo cone-frusta e o método de Wileman.

Ainda, tem como objetivos analisar a influência da constante de rigidez de junta na determinação do valor da pré-carga e na vida em fadiga da junta aparafusada.

1.3 MOTIVAÇÃO

A constante de rigidez da junta tem significativa importância num projeto que contém juntas aparafusadas, já que seu valor tem grande influência sobre a pré-carga aplicada a ser determinada e a vida em fadiga, podendo assim reduzir falhas no projeto. Por essa razão, muitas propostas de cálculo da rigidez têm sido apresentadas na literatura.

Além da importância desta constante em um projeto, ressalto o interesse despertado pela disciplina de Elementos de Máquinas e pela área de Projeto Mecânico durante a graduação.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Wileman, Choudhury e Green (1991), apresentaram uma técnica de cálculo de rigidez de junta por meio de uma expressão encontrada com análise de elementos finitos que permite que a rigidez do membro de alguns tipos de juntas seja calculada diretamente da geometria da junta e das propriedades do material. No trabalho, foram assumidas apenas juntas perfeitamente simétricas em relação ao eixo. Análises foram realizadas para juntas que continham membros de alumínio, ferro, cobre e aço. A rigidez dos membros foi calculada para diferentes pressões, e resultou em um mesmo valor, como esperado. Para ajustar as curvas para os dados, os resultados obtidos da análise foram adimensionalizados. A função de relação escolhida foi uma função exponencial, e os valores da rigidez adimensional (rigidez do material pelo módulo de elasticidade deste) foram providenciados como uma função da proporção do conjunto (diâmetro do furo pelo comprimento da junta). Como foi notada uma pequena dependência do coeficiente de Poisson, para materiais diferentes daqueles testados no trabalho, devem ser utilizados os dados do material que tem o coeficiente de Poisson mais próximo daquele referente ao material desejado.

Ito, Toyoda e Nagata (1979), analisaram as influências da topografia e do material na superfície de junta sobre a distribuição de pressão no material. Os experimentos foram realizados com um único conjunto parafuso-flange, sendo que a espessura da

flange de baixo foi mantida constante e apenas a flange de cima foi variada. A influência da qualidade da superfície de junta, a espessura da flange e do material na junta foram estudados. Segundo os autores, a forma de distribuição de pressão na superfície de junta depende do material da flange e especialmente da qualidade do acabamento, além da espessura da flange. A rigidez de junta tem uma grande influência sobre a forma de distribuição de pressão. A distribuição de pressão medida no experimento é bastante diferente da teórica, e a área efetiva de força de conexão medida é maior que a teórica.

Motosh (1976), assumiu em seu trabalho que a distribuição de pressão em qualquer plano perpendicular ao eixo do parafuso tem gradiente zero na parede do furo e no ponto do diâmetro máximo onde há tensão, a fim de atingir um mínimo estacionário. Assim, desenvolveu um método de cálculo de rigidez da junta composto por uma soma de integrais.

Gould e Mikic (1972) determinaram a área de contato de duas chapas parafusadas e validade do método de aproximação da chapa única. Placas de aço inoxidável foram usinadas para diferentes espessuras. O raio interior de uma polegada de um lado de cada placa (uma de cada espessura) foi eletroliticamente banhado. Então, a chapa superior foi rotacionada várias vezes em relação à chapa correspondente enquanto eram aparafusadas. A observação das figuras dos resultados mostrou que o modelo de duas placas cria uma diferença na distribuição de tensão na zona de contato se comparado com a placa única, e ainda, o modelo de duas placas gera um valor menor para o raio de separação, que resulta numa redução significativa para a área de contato.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

No capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, contendo os objetivos e a revisão bibliográfica, entre outros.

No capítulo 2 é apresentado um resumo dos fundamentos teóricos sobre o tema do trabalho.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos usados no procedimento de análise da constante de rigidez de junta.

Os resultados obtidos por meio das planilhas são apresentados no capítulo 4.

As conclusões do Trabalho de Graduação, assim como sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas no capítulo 5.

O capítulo 6 contém as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE RIGIDEZ DE JUNTA

Como mencionado anteriormente, a constante de rigidez de junta do material influencia na vida em fadiga da junta aparafusada, assim como na pré-tensão inicial que deve ser aplicada ao parafuso, sendo assim um fator importante no projeto de juntas aparafusadas.

A constante de rigidez de junta (nomeada neste trabalho de C) é uma relação da constante de mola do material da junta e do parafuso. No caso de aplicação de força externa a uma junta, esta constante determina a porção desta força que será sentida pelo parafuso e a porção restante que será sentida pelo material.

$$C = \frac{k_b}{k_m + k_b} \quad (1)$$

Sendo:

k_b = Constante de mola do parafuso

k_m = Constante de mola do material

Neste trabalho será estudada uma junta submetida a uma força externa de tração. Como numa junta aparafusada o parafuso está em tração e o material em compressão, de acordo com o pré-aperto fornecido à junta, neste caso de força externa de tração, a porção de força sentida pelo parafuso será somada ao pré-aperto, enquanto o material terá o pré-aperto reduzido da força sentida por este.

A constante de mola do parafuso (k_b) é calculada de forma simples, já que é considerada como sendo uma associação em série da rigidez do comprimento de rosca dentro da zona sujeitada, com a rigidez do comprimento liso (sem rosca) do parafuso.

$$\frac{1}{k_b} = \frac{l_t}{A_t E_b} + \frac{l_s}{A_b E_b} \quad (2)$$

Sendo:

l_t = Comprimento de rosca carregada axialmente dentro do comprimento de zona sujeitada

l_s = comprimento liso do parafuso (sem rosca)

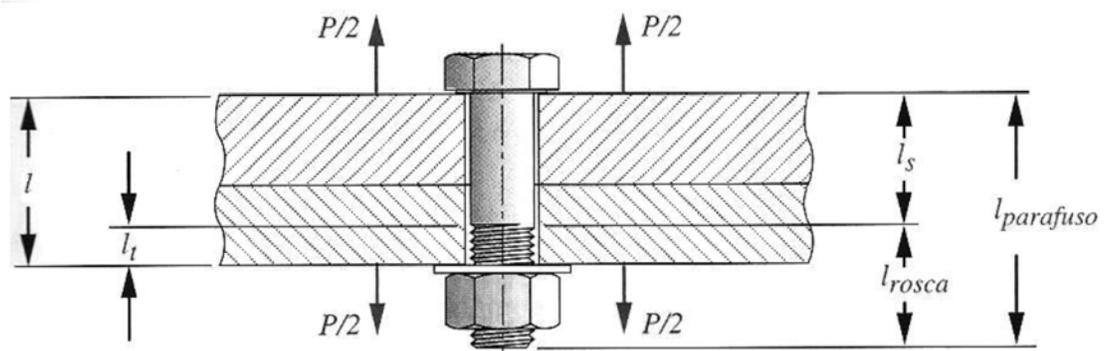
A_t = Área da seção transversal do parafuso sujeita à tração

A_b = Área total de seção transversal (seção lisa)

E_b = Módulo de elasticidade do parafuso

Um esquema de junta aparafusada em tração ilustrando os comprimentos necessários para o cálculo de constante de mola e do material pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de junta aparafusada em tração.



Fonte: Norton, 2004.

O parâmetro determinante para o valor de constante de rigidez de junta é, no entanto, a constante de mola do material (k_m). Na literatura, diferentes métodos de definição do contorno da região afetada pela tensão foram sugeridos, portanto, a área efetiva sob compressão no material (A_m) pode ser considerada de diferentes formas, dependendo do método utilizado para o cálculo.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{l_1}{A_{m1}E_{m1}} + \frac{l_2}{A_{m2}E_{m2}} \quad (3)$$

Sendo:

l_1 = Comprimento do material 1

l_2 = Comprimento do material 2

A_{m1} = Área sujeitada efetiva do material 1

A_{m2} = Área sujeitada efetiva do material 2

E_{m1} = Módulo de elasticidade do material 1

E_{m2} = Módulo de elasticidade do material 2

No caso de a junta ser composta por duas placas de materiais diferentes. Caso o material das duas placas seja o mesmo, a equação da constante de mola do material (k_m) se resume ao primeiro termo da equação.

Neste trabalho, são abordados três métodos de determinação da constante de mola do material, para que assim se determine a constante de rigidez de junta.

2.1.1 Método de aproximação de diâmetro equivalente ao diâmetro efetivo da arruela

Neste método, mais comum por sua simplicidade, a área efetiva do material sujeitado é definida como um cilindro sólido de diâmetro efetivo D_{ef} , sendo a diferença entre o diâmetro externo e interno da arruela, representada na Figura 2.

$$A_m = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (4)$$

Sendo:

D = Diâmetro externo da arruela

d = Diâmetro interno da arruela

Figura 2 – Arruela.

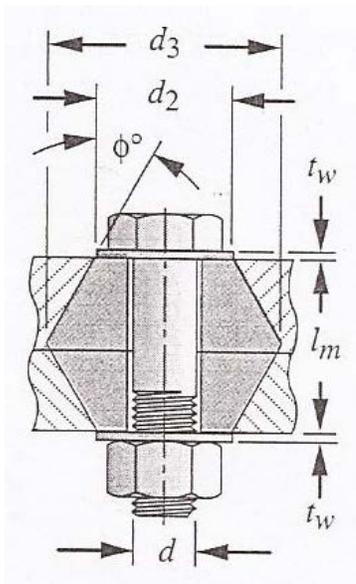


Fonte: <http://www.bartofil.com.br/>

2.1.2 Método de cone-frusta

Um estudo de distribuições de tensões em uma junta de duas partes, carregadas, com parafuso pré-carregado, feito por meio de análise de elementos finitos, mostra que a distribuição de tensões no interior do material tem a forma de um cone, como na Figura 3 e Figura 4, e o método de determinação a área efetiva correspondente a essa forma recebeu o nome de Método de cone-frusta, e pode ser aplicado tanto para um parafuso comum como para um parafuso de cabeça. Este método está representado na Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 – Cone-frusta para parafuso comum.



Fonte: Norton, 2004.

Sendo:

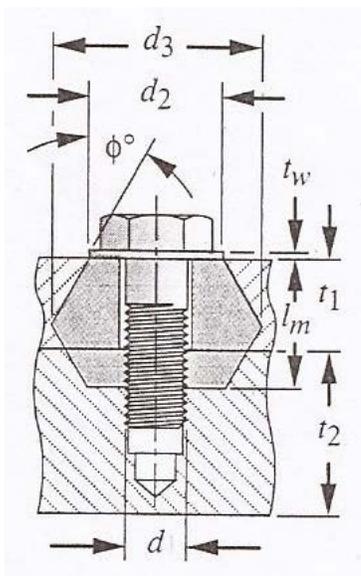
t_w = Espessura da arruela

l_m = Comprimento sujeitado do material

$$d_2 = 1,5d \quad (5)$$

$$d_3 = 1,5d + l_m \tan \phi \quad (6)$$

Figura 4 – Cone-frusta para parafuso de cabeça.



Fonte: Norton, 2004.

Sendo:

$$l_m = t_1 + t_2/2 \text{ se } t_2 < d \quad (7)$$

$$l_m = t_1 + \frac{d}{2} \text{ se } t_2 \geq d \quad (8)$$

$$d_2 = 1,5d$$

$$d_3 = 1,5d + l_m \tan \phi$$

É importante ressaltar que um parafuso de cabeça (ou parafuso de máquina) é rosqueado apenas ao furo e não ultrapassara o material, portanto não há fixação com porca. Dessa forma, a distribuição de tensão no interior do material se dá em uma geometria um pouco diferente daquela para parafuso comum, já que esta não toma todo o comprimento da junta, pois a carga se concentra nas proximidades dos primeiros filetes do parafuso.

Considerando o ângulo ϕ indicado na figura $\phi=30^\circ$, como considerado razoável na literatura, o cálculo da área efetiva se resume a:

$$A_m = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 - d^2 \right] \quad (9)$$

Sendo que os parâmetros d_2 , d_3 e d foram apresentados na Figura 3 e na Figura 4.

2.1.3 Método de Wileman et al

O terceiro método analisado neste trabalho, é o de Wileman et al, que foi estudado e apresentado na revisão bibliográfica (seção 1.4). Como explicado, uma equação foi ajustada aos modelos analisados por elementos finitos, relacionando a constante de mola do material k_m e o módulo de elasticidade do material E_m como uma função do diâmetro do parafuso d e do comprimento da junta sujeitado l_m . Diferente dos dois outros métodos anteriores, o método de Wileman et al providencia diretamente o valor de k_m , sendo dispensado o cálculo da área efetiva sob compressão.

$$k_m = d E_m A e^{b\left(\frac{d}{l_m}\right)} \quad (10)$$

Os materiais de junta testados foram aço, alumínio, cobre, e ferro fundido cinza, sendo que cada um deles tem um valor individual também para as constantes A e b , como mostra a Tabela 1.

Tabela 1- Coeficientes da equação de Wileman.

Material	V	E (GPa)	A	b
Aço	0,291	206,8	0,78715	0,62873
Alumínio	0,334	71,0	0,79670	0,63816
Cobre	0,326	118,6	0,79568	0,63553
Ferro fundido cinza	0,211	100,0	0,77871	0,61616

Fonte: (Norton, 2004)

Em que ν representa os valores do coeficiente de Poisson para cada material, que deve ser usado como referência para materiais não descritos na Tabela 1.

2.2 PRÉ-CARGA EM CARREGAMENTOS DINÂMICOS

As pré-cargas são aplicadas em juntas com a finalidade de reduzir a probabilidade de rompimento dos parafusos em serviço, já que se garante que estes não rompam durante o aperto. Para juntas carregadas de forma estática, recomenda-se uma tensão no parafuso de até 90% da carga de prova (Norton, 2004). Para o caso estudado neste trabalho, em que há carregamento dinâmico, será admitida também pré-carga de 90% da resistência de prova.

Em carregamentos dinâmicos, a pré-carga é especialmente importante. Como discutido anteriormente, em situação de carregamento externo, uma porção da carga será sentida pelo parafuso e o restante, a porção maior, pelo material. O parafuso absorve a porção menor da carga externa de tração devido ao efeito da pré-carga, o que significa que o material absorve a maior porção. Seja P a carga externa aplicada na junta:

$$P_b = CP \quad (11)$$

$$P_m = (1 - C)P \quad (12)$$

Sendo:

P_b = Porção da força absorvida pelo parafuso

P_m = Porção da força absorvida pelo material da junta

Dessa forma, as forças resultantes no parafuso e no material são:

$$F_b = F_i + P_b \quad (13)$$

$$F_m = F_i - P_m \quad (14)$$

Sendo:

F_b = Força resultante no parafuso

F_m = Força resultante no material

F_i = Pré-carga

Sabendo que neste caso, será considerada uma pré-carga de 90%, comumente aplicada tanto para cargas estáticas e dinâmicas, temos que:

$$F_i = 0,9S_pA_t \quad (15)$$

Sendo

F_i = Pré-carga aplicada

S_p = Resistência mínima de prova

Sendo assim, tendo valores de força máxima e mínima atuantes na junta, é possível determinar as forças médias e alternadas presentes no parafuso e, por conseguinte, as respectivas tensões.

Neste trabalho, será considerada força externa flutuante, ou seja, a carga dinâmica externa varia de um valor máximo de força a zero. Portanto, o valor máximo é a força resultante no parafuso, e a força mínima é a pré-carga já existente no mesmo.

$$F_{alt} = \frac{F_b - F_i}{2} \quad (16)$$

$$F_{med} = \frac{F_b + F_i}{2} \quad (17)$$

Sendo:

F_{alt} = Força alternada atuante no parafuso

F_{med} = Força média atuante no parafuso

Relacionando estas forças com a área de superfície roscada sob tração do parafuso, determinam-se as tensões médias e alternadas atuantes. Essas tensões, em seus valores nominais, devem ser corrigidas. No caso da tensão alternada, o fator a ser multiplicado é K_f , fator de concentração de tensões à fadiga; no caso da tensão média, o fator a ser multiplicado é K_{fm} , fator de concentração para as tensões médias.

$$\sigma_a = K_f \frac{F_{alt}}{A_t} \quad (18)$$

$$\sigma_m = K_{fm} \frac{F_{med}}{A_t} \quad (19)$$

Sendo:

σ_a = Tensão alternada no parafuso

σ_m = Tensão média no parafuso

O fator de concentração de tensões à fadiga, K_f , é definido de acordo com o valor do grau SAE e do tipo de rosca do parafuso, como representado na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de concentração de tensão à fadiga para parafusos.

Fatores de concentração de tensão à fadiga para parafusos						
Dureza Brinell	Grau (UNS)	SAE	Classe (ISO)	K_f		
				Roscas laminadas	Roscas cortadas	Filetes
< 200 (recozido)	≤ 2		$\leq 5,8$	2,2	2,8	2,1
>200 (endurecido)	≥ 4		$\geq 6,6$	3,0	3,8	2,3

Fonte: (Norton, 2004)

O fator de concentração para tensões médias, K_{fm} , por sua vez, depende da relação de $K_f \left| \sigma_{max_{nom}} \right|$ com o limite de escoamento do material, S_y , dividida em três casos.

$$1^\circ \text{ Caso: Se } K_f \left| \sigma_{max_{nom}} \right| < S_y, \text{ então,} \quad K_{fm} = K_f \quad (20)$$

$$2^\circ \text{ Caso: Se } K_f \left| \sigma_{max_{nom}} \right| > S_y, \text{ então,} \quad K_{fm} = \frac{S_y - K_f \sigma_{a_{nom}}}{\left| \sigma_{m_{nom}} \right|} \quad (21)$$

$$3^\circ \text{ Caso: Se } K_f \left| \sigma_{max_{nom}} - \sigma_{min_{nom}} \right| < 2S_y, \text{ então,} \quad K_{fm} = 0 \quad (22)$$

$$\text{Sendo que } \left| \sigma_{max_{nom}} \right| = \left| \sigma_{a_{nom}} + \sigma_{m_{nom}} \right|$$

Finalmente, a tensão correspondente à pré-carga inicial, também é corrigida de K_{fm} .

$$\sigma_i = K_{fm} \frac{F_i}{A_t} \quad (23)$$

Portanto, é o fator K_{fm} que deixa clara a relação da tensão de pré-carga inicial com a constante de rigidez de junta C .

2.3 COEFICIENTE DE SEGURANÇA À FALHA POR FADIGA

A constante de rigidez de junta tem influência sobre um fator de extrema importância para o projeto, o coeficiente de segurança à falha por fadiga, N_f . Este coeficiente é normalmente determinado pelo diagrama modificado de Goodman, e pode ser encontrado pela equação (24):

$$N_f = \frac{S_e(S_{ut} - \sigma_i)}{S_e(\sigma_m - \sigma_i) + S_{ut}\sigma_a} \quad (24)$$

Sendo:

S_e = Resistência à fadiga corrigida

S_{ut} = Resistência à tração

O limite de resistência à fadiga corrigido, S_e , por sua vez, é uma combinação do limite de resistência teórico, S'_e , com os fatores de redução de resistência:

$$S_e = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S'_e \quad (25)$$

Sendo:

C_{carreg} = Fator de carregamento axial

$C_{tamanho}$ = Fator de tamanho de parafuso

C_{superf} = Fator de acabamento da superfície

C_{temp} = Fator de temperatura ambiente

C_{conf} = Fator de confiabilidade

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise da constante de rigidez de junta pelos métodos propostos neste trabalho, foi elaborada uma planilha de cálculo no software Microsoft Excel. Este foi o software escolhido para análise dos dados, já que é de fácil acesso e programação simples. A planilha do Excel permite que os resultados para uma dada junta sejam facilmente vistos e então comparados, além de fornecer a possibilidade de mudança dos valores de entrada, como propriedades do material da junta e do parafuso, dimensões do parafuso e da arruela e comprimentos sujeitados. Por meio do software também é possível gerar gráficos que ajudam na comparação dos métodos propostos.

Como mencionado anteriormente, nesta planilha foram calculados valores de constante de rigidez de junta por meio dos métodos de aproximação de diâmetro efetivo equivalente ao diâmetro efetivo da arruela; método de cone-frusta e método de Wileman et al. Os cálculos foram realizados tanto para um parafuso comum como para um parafuso de cabeça. A planilha elaborada pode ser vista no Apêndice A.

Foram inseridos na planilha dados de uma junta aparafusada hipotética para que os cálculos fossem realizados. As informações essenciais sobre a junta que foi estudada neste trabalho estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de entrada da junta aparafusada estudada.

Entrada: Dados da junta		
Diâmetro maior do parafuso (d):	10,000	mm
Comprimento de zona sujeitada (l):	38,100	mm
Comprimento de rosca sujeitada (lt):	12,700	mm
Comprimento sem rosca do parafuso (ls):	25,400	mm
Módulo de Elasticidade do parafuso (Eb):	2,068E+11	Pa
Módulo de Elasticidade do material (Em):	2,068E+11	Pa
Diâmetro da arruela (D):	25,400	mm

Tanto o material do parafuso como o material da junta foi considerado aço. O parafuso considerado na junta foi M10x1,50 de roscas grossas, de classe 5.8, com área sob tração (A_t) igual a 57,99 mm². O valor da constante de mola do parafuso encontrado foi $k_b = 3,813E+08$ N/m. Foram calculadas então pela planilha, para cada

caso, a área efetiva em compressão do material, a constante de mola do material (k_m) e a partir desta a constante de rigidez de junta (C). Para o método de cone-frusta aplicado ao caso de parafuso de cabeça, foram assumidos para a espessura da chapa superior (t_1) e inferior (t_2) respectivamente 12, 7 e 25, 4 mm.

Em uma junta com parafuso de cabeça o comprimento do parafuso sujeitado é menor que o comprimento do material da junta, por isso, para estudo desse caso, o comprimento da junta foi aumentado de 20%, para que houvesse diferença de comprimentos entre o parafuso e o material. Dessa maneira, o comprimento da junta passa a ser 45, 72 mm para a junta com parafuso de cabeça.

Para as juntas estudadas, foi considerado que a carga aplicada variasse entre 0 e 4500 N. Para este parafuso, tem-se que sua resistência mínima de prova é 380 MPa. Sendo assim, da equação (15) a pré-carga inicial é:

$$F_i = 0,90S_pA_t = 0,90 \times 380 \times 10^6 \times 57,99 \times 10^{-6} = 19832,58 \text{ N}$$

A partir deste valor de pré-carga, foi então possível calcular os parâmetros necessários para determinar a tensão correspondente à pré-carga e o coeficiente contra falha por fadiga em cada caso, de acordo com as equações apresentadas anteriormente. Estes valores se encontram em tabelas mais adiante.

Para roscas laminadas de classe 5,8, toma-se da tabela Tabela 2, o valor do fator de concentração de tensões de fadiga para parafusos, K_f , igual à 2,2. Para o fator de concentração para tensões médias, K_{fm} , temos sempre a relação da equação

(21), 2º caso, apresentada no item 2.2, em que se $K_f \left| \sigma_{max_{nom}} \right| > S_y$, portanto K_{fm} é determinado na planilha de cálculo como

$$K_{fm} = \frac{S_y - K_f \sigma_{anom}}{|\sigma_{nom}|} .$$

Para o parafuso selecionado, as resistências mínimas de prova e à tração são respectivamente 420 e 520 MPa. Sabe-se que para o limite de resistência à fadiga não-corrigido S'_e , para $S_{ut} \leq 200$ ksi (1300 MPa), (Collins, 2006):

$$S'_e = 0,5S_{ut} \tag{26}$$

$$S'_e = 0,5S_{ut} = 0,5 \times 520 \times 10^6 = 260 \text{ MPa}$$

Sendo que, da equação (25), o limite de resistência à fadiga corrigido é:

$$S_e = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S'_e$$

Dessa forma, para o cálculo do limite de resistência à fadiga corrigido foram considerados 99% de confiabilidade e temperatura de operação de 150°C. Temos da literatura que:

$$C_{carreg} = 0,70 \text{ para força normal}$$

$$C_{tamanho} = 0,95 \text{ para diâmetro do parafuso 10 mm}$$

$$C_{superf} = 0,65 \text{ para acabamentos laminados a quente}$$

$$C_{temp} = 1 \text{ para } T \leq 450^\circ\text{C}$$

$$C_{conf} = 0,814 \text{ para confiabilidade} = 99\%$$

Sendo assim,

$$S_e = 0,70 \times 0,95 \times 0,65 \times 1 \times 0,81 \times 260 = 91,50 \text{ MPa}$$

Sendo assim, na Tabela 4 estão reunidos os parâmetros referentes à junta para cálculo de constante de rigidez da junta, tensão correspondente à pré-carga e coeficiente de segurança contra a falha por fadiga, válidos para todos os casos estudados.

Tabela 4 – Parâmetros iniciais específicos para junta dada.

F_i	19832,6 N
S_y	420 MPa
S_{ut}	520 MPa
S_e	91,5 MPa

Estando esses itens da Tabela 4 determinados, é possível iniciar a segunda parte dos cálculos, em que se quer encontrar a tensão correspondente à pré-carga inicial e o coeficiente de segurança à falha por fadiga para cada caso a fim de comparação, além de traçar uma curva que represente a variação de σ_i e N_f em função de C .

Calculou-se então como apresentado nos itens 2.2 e 2.3 os termos necessários para o resultado final em cada caso. Por fim, valores de C foram variados e seus resultados

correspondentes de σ_i e N_f plotados em gráfico para que seu comportamento pudesse ser observado em função de C .

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos para os valores de constante de rigidez de junta C , tensão correspondente à pré-carga inicial σ_i e coeficiente de segurança contra falha por fadiga N_f foram reunidos na Tabela 5, para parafuso comum e na Tabela 6, para parafuso de cabeça, para análise.

Tabela 5 – Resultados para parafuso comum.

Parafuso Comum			
	C	σ_i (MPa)	N_f
Cilindro coincidente	0,1409	401,55	1,58
Cone-frusta	0,1344	402,39	1,65
Wileman	0,1657	398,37	1,38

Tabela 6 – Resultados para parafuso de cabeça.

Parafuso de cabeça			
	C	σ_i (MPa)	N_f
Cilindro coincidente	0,1644	398,53	1,39
Cone-frusta	0,1300	402,96	1,70
Wileman	0,1545	399,80	1,47

É possível observar que os valores de C obtidos para os diferentes métodos não apresentam grandes diferenças, para o parafuso comum e o de cabeça. Todos os valores de N_f estão acima de 1,0, portanto não foi constatada falha por fadiga em nenhum dos casos. Ainda, apenas da observação das tabelas acima fica claro que a constante de rigidez de junta C tem relação de efeito inverso com a tensão correspondente à pré-carga inicial no parafuso e o coeficiente de segurança à falha por fadiga.

Para o caso de parafuso comum, o método de cilindro de área coincidente ao diâmetro efetivo da arruela apresentou valores intermediários, ressaltando sua característica de método de aproximação razoável. O método de cone-frusta apresentou valores próximos do método de aproximação, com coeficiente de segurança pouco maior. O método de Wileman, por sua vez, foi o que apresentou maior valor de C ,

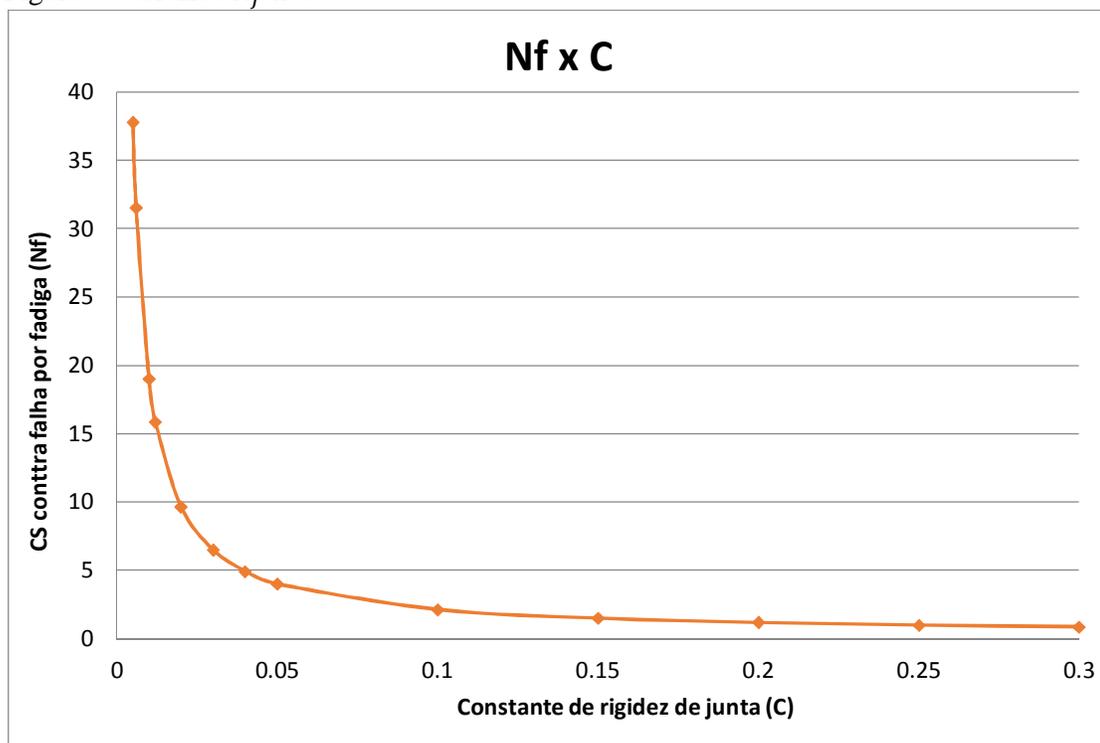
portanto menor valor de coeficiente de segurança N_f , mostrando-se um método mais conservador quanto aos limites de segurança do projeto.

Para o caso de parafuso de cabeça, o método de diâmetro coincidente ao diâmetro efetivo da arruela apresentou maior C e, portanto menor N_f , sendo neste caso o método mais conservador quanto aos limites de segurança. O método de cone-frusta apresentou novamente a menor constante de rigidez de junta, tendo resultados mais próximos do método de Wileman, que apresentou valores intermediários.

A relação entre C e N_f foi representada na Figura 5 – Gráfico $N_f \times C$, situação em que foram simulados na planilha diferentes valores de C , e os resultados para N_f assim como para σ_i foram armazenados para que a relação gráfica entre os termos fosse gerada.

Para elaboração deste gráfico foram simulados valores aleatórios de C , sem relação com as juntas estudadas neste trabalho, para que N_f e σ_i fossem calculados a partir dos valores de C determinados aleatoriamente e das condições de carregamento. Os resultados foram então relacionados, tendo como resultado as curvas ilustradas na Figura 5 – Gráfico $N_f \times C$. e na Figura 6 – Gráfico $\sigma_i \times C$.

Figura 5 – Gráfico $N_f \times C$.



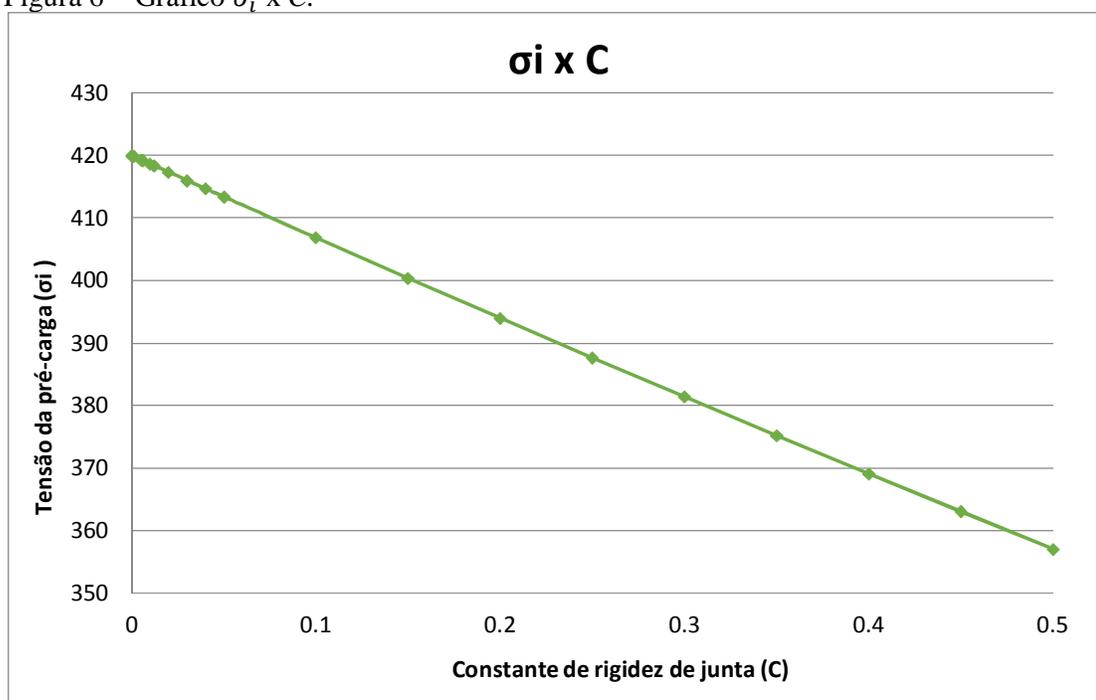
Fonte: Produção da autora.

Na Figura 5 fica clara a relação inversa do coeficiente de segurança à falha por fadiga com a constante de rigidez. Para valores de C de 0 a 0,1 há brusca queda de N_f , sendo assim uma região em que pequenas variações de C podem acarretar valores de segurança significativamente discrepantes para o projeto.

De 0,1 a 0,2 os valores de N_f tendem a cair levemente, e a partir deste ponto os valores são praticamente estáveis para qualquer C maior.

A relação da tensão correspondente à pré-carga inicial σ_i em função de C está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico $\sigma_i \times C$.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 6 apresenta a relação também inversa entre σ_i e C , sendo possível observar que esta relação acontece quase de forma linear, tendendo a 420 MPa quando C é igual a 0. Dessa forma, uma variação no valor de C representa uma diferença proporcional na tensão suportada pelo parafuso.

A tensão correspondente à pré-carga inicial, como mostrado na seção 2.3, tem influência no valor do coeficiente de segurança à falha por fadiga. Dessa forma, no gráfico da Figura 5 já estão considerados os efeitos da pré-tensão. No entanto, é interessante observar o comportamento deste efeito no parafuso em função de C .

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dos resultados obtidos neste trabalho, ficou claro que o método adotado para o cálculo da constante de rigidez de junta influencia de forma significativa a tensão correspondente à pré-carga inicial e principalmente o coeficiente de segurança à falha por fadiga, que são de grande importância no projeto de juntas aparafusadas.

No entanto, as diferenças notadas não foram tão contrastantes a ponto de se definir um método ideal para a ocasião. No caso de um projeto em que são bem conhecidos os materiais e as condições, é sugerido, então, utilizar o método de aproximação, já que este apresenta cálculo mais simples e pode ser aplicado mais facilmente. Para o caso de parafuso comum, como discutido nos Resultados, o método de Wileman apresentou menor coeficiente de segurança, mostrando ser mais conservador quanto aos limites do projeto. Sugere-se então que este método seja aplicado em casos em que haja incertezas sobre as características do material ou da carga externa a ser aplicada na junta, garantindo assim que o projeto será realizado para garantir o coeficiente de segurança do método mais rígido. É importante lembrar, no entanto, que um projeto baseado em um coeficiente de segurança estimado em valor menor que o ideal pode apresentar gastos desnecessários.

Deve-se tomar especial atenção para juntas com valor de constante de rigidez entre o intervalo crítico mostrado na Figura 5 (entre 0 e 0,1), já que um pequeno desvio desse valor pode influenciar fortemente no coeficiente de segurança, podendo ser sub ou superestimado.

É importante ressaltar que os dados obtidos neste trabalho colaboram com uma visão geral da relação entre a constante de rigidez de junta e o coeficiente de segurança à falha por fadiga do projeto, mas os valores encontrados são adequados apenas para esta junta nas condições descritas no trabalho. Para outras possíveis juntas aparafusadas analisadas, deve-se considerar o material utilizado (da junta e do parafuso), suas dimensões, a intensidade da força dinâmica externa, as superfícies de contato e o ambiente em que a junta será exposta. Dessa forma, os resultados poderão apresentar algumas diferenças de valores em relação aos obtidos neste trabalho, mesmo que as relações entre os parâmetros aqui estudados se comportem como esperado.

A ferramenta utilizada para análise de dados, o software Excel, teve importante papel no desenvolvimento do trabalho já que é de fácil acesso e programação simples. Além disso, fornece a possibilidade de mudança dos valores de entrada, permitindo que outra junta seja

futuramente analisada. Por meio deste software também foi possível gerar os gráficos que foram essenciais na ilustração da relação entre os parâmetros estudados neste trabalho.

Para trabalhos futuros relacionados com o tema, é sugerido que se realize ensaios com juntas aparafusadas reais e os dados sejam coletados a fim de que a constante de rigidez de junta seja calculada e comparada com os valores teóricos obtidos pelos métodos apresentados neste trabalho. Pode também ser feita modelagem da junta e simulação das forças atuantes em software de elementos finitos, também para comparação com valores teóricos.

Sendo o método de Wileman, o mais rígido quanto ao coeficiente de segurança à falha por fadiga em parafuso comum, é proposto também fazer um ensaio experimental de fadiga que estude a adequação desses valores menores de coeficiente de segurança a uma junta real.

Por fim, é proposto um trabalho de comparação entre o método de Cornwell, adotado para determinação da constante de rigidez de junta na edição mais atual do livro-texto de Robert L. Norton (4ª edição, 2013), com o método de aproximação e possivelmente também com resultados experimentais. O método de Cornwell consiste em uma equação polinomial em que os parâmetros são tomados de acordo com a relação do diâmetro do parafuso sobre o comprimento sujeitado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NORTON, Robert L..Projeto de Máquinas:Uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NORTON, Robert L..Projeto de Máquinas:Uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

COLLINS, Jack A..Projeto mecânico de elementos de máquinas: Uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: Ltc, 2006.

WILEMAN, J.; CHOUDHURRY, M.; GREEN, I. Computation of Member Stiffnes in Bolted Joints. Journal Of Mechanical Design, Atlanta, v. 113, p.432-437, dez. 1991.

GOULD, H. H.; MIKIC, B. B.. Areas of Contact and Pressure Distribution in Bolted Joints. Journal Of Engineering For Industry, Cambridge, p.864-870, ago. 1972.

ITO, Y.; TOYODA, J.; NAGATA, S.. Interface Pressure Distribution in a Bolt-Flange Assembly. Journal Of Mechanical Design, Tokyo, v. 101, p.330-337, abr. 1979.

MOTOSH, Ing. Nabil. Determination of Joint Stiffness in Bolted Connections. Journal Of Engineering For Industry, Asalut, p.858-861, ago. 1976.

GUIDI, Erick Siqueira. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E OPERACIONAIS NA VIDA EM FADIGA DE UNIÕES APARAFUSADAS EM TRAÇÃO. 2013. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

APÊNDICE A – Imagens da planilha de cálculos no software Excel.

Figura 1a – Parte inicial da planilha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Cálculo do fator de rigidez da junta												
2													
3	Entrada: Dados da junta				Método de Wileman: Escolher material								
4	Diâmetro maior do parafuso (d) :	10,00	mm	Material	v	E (GPa)	A	b					
5	Comprimento de zona sujeitada (l):	38,10	mm	Aço	0,291	206,8	0,78715	0,62873					
6	Comprimento de rosca sujeitada (lt):	12,70	mm	Alumínio	0,334	71	0,7967	0,63816					
7	Comprimento sem rosca do parafuso (ls):	25,40	mm	Cobre	0,326	118,6	0,79568	0,63553					
8	Módulo de Elasticidade do parafuso (Eb):	2,07E+11	Pa	FoFo cinza	0,211	100	0,77871	0,61616					
9	Módulo de Elasticidade do material (Em):	2,07E+11	Pa										
10	Diâmetro da arruela (D) :	25,40	mm	Aço	0,291	206,8	0,78715	0,62873					
11													
12					Ab =	7,85E-05	m ²	Kb=	3,81E+08	N/m			
13					At =	5,80E-05	m ²						
14													
15	Parafuso Comum												
16	1. Cilindro coincidente ao diâmetro das arruelas				2. Parafuso Frusta				3. Wileman				
17													
18	Área ef. do material:	428,17	mm ²	d2=	15,00	d3=	37,00	km=	1,92E+09	N/m			
19	Km=	2,32E+09	N/m	Am=	452,33	mm ²			C=	0,1657			
20	C=	0,1409			Km=	2,46E+09	C=	0,1344					
21													
22	Parafuso de cabeça												
23					l=	45,72	mm						
24													
25	1. Cilindro coincidente ao diâmetro das arruelas				2. Parafuso Frusta				3. Wileman				
26													
27	Área ef. do material:	428,17	mm ²	t1	20,32	mm			Km=	2,09E+09	N/m		
28	Km=	1,94E+09	N/m	t2	25,40	mm			C=	0,1545			
29	C=	0,1645			lm=	25,32	mm						
30													
31					d2=	15,00	d3=	29,62					
32					Am=	312,36	mm ²						
33					Km=	2,55E+09	N/m						
34					C=	0,1300							

Fonte: Produção da autora.

Figura 1b – Complemento da planilha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
3	Parafuso Comum											
4	1. Cilindro coincidente ao diâmetro das arruelas			2. Parafuso Frusta					3. Wileman			
5	C=	0,1409			C=	0,1344				C=	0,1657	
6	Pb=	634,20	N		Pb=	604,88	N			Pb=	745,58	N
7	Pm=	3865,80	N		Pm=	3895,12	N			Pm=	3754,42	N
8	Fb=	20466,78	N		Fb=	20437,46	N			Fb=	20578,16	N
9	Fm=	15966,78	N		Fm=	15937,46	N			Fm=	16078,16	N
10	Falt=	317,10	N		Falt=	302,44	N			Falt=	372,79	N
11	Fmed=	20149,68	N		Fmed=	20135,02	N			Fmed=	20205,37	N
12	σ_{anom}	5468171,24	Pa		σ_{anom}	5215351,78	Pa			σ_{anom}	6428504,91	Pa
13	σ_{nmom}	347468171,24	Pa		σ_{nmom}	347215351,78	Pa			σ_{nmom}	348428504,91	Pa
14	Kfm=	1,17			Kfm=	1,18				Kfm=	1,16	
15	σ_a	12029976,72	Pa		σ_a	11473773,93	Pa			σ_a	14142710,81	Pa
16	σ_m	407970023,28	Pa		σ_m	408526226,07	Pa			σ_m	405857289,19	Pa
17	σ_i	401549723,15	Pa		σ_i	402389953,67	Pa			σ_i	398369223,37	Pa
18	σ_i	401,55	MPa		σ_i	402,39	MPa			σ_i	398,37	MPa
19	Nf=	1,58			Nf=	1,65				Nf=	1,38	
20												
21	Parafuso de cabeça											
22	1. Cilindro coincidente ao diâmetro das arruelas			2. Parafuso Frusta					3. Wileman			
23	C=	0,1644			C=	0,1300				C=	0,1545	
24	Pb=	739,80	N		Pb=	585,00	N			Pb=	695,25	N
25	Pm=	3760,20	N		Pm=	3915,00	N			Pm=	3804,75	N
26	Fb=	20572,38	N		Fb=	20417,58	N			Fb=	20527,83	N
27	Fm=	16072,38	N		Fm=	15917,58	N			Fm=	16027,83	N
28	Falt=	369,90	N		Falt=	292,50	N			Falt=	347,63	N
29	Fmed=	20202,48	N		Fmed=	20125,08	N			Fmed=	20180,21	N
30	σ_{anom}	6378685,98	Pa		σ_{anom}	5043973,10	Pa			σ_{anom}	5994568,03	Pa
31	σ_{nmom}	348378685,98	Pa		σ_{nmom}	347043973,10	Pa			σ_{nmom}	347994568,03	Pa
32	Kfm=	1,17			Kfm=	1,18				Kfm=	1,17	
33	σ_a	14033109,16	Pa		σ_a	11096740,82	Pa			σ_a	13188049,66	Pa
34	σ_m	405966890,84	Pa		σ_m	408903259,18	Pa			σ_m	406811950,34	Pa
35	σ_i	398533785,95	Pa		σ_i	402960216,80	Pa			σ_i	399804191,78	Pa
36	σ_i	398,53	MPa		σ_i	402,96	MPa			σ_i	399,80	MPa
37	Nf=	1,39			Nf=	1,70				Nf=	1,47	

Fonte: Produção da autora.

PAULA CARAM DE ASSIS

**DETERMINAÇÃO DO FATOR DE RIGIDEZ DE JUNTA APARAFUSADA
EM TRAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE EXCEL**

Guaratinguetá

2013