

JOAQUIM BORGES RODRIGUES NETO

**Análise da influência de elementos de vedação na rigidez de juntas
parafusadas em tração utilizando o software Excel**

JOAQUIM BORGES RODRIGUES NETO

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
2018

R696a Rodrigues Neto, Joaquim Borges
Análise da influência de elementos de vedação na rigidez de juntas parafusadas em tração utilizando o software Excel / Joaquim Borges Rodrigues Neto. – Guaratinguetá, 2018.
32 f : il.
Bibliografia: f. 25

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Ligações parafusadas. 2. Dureza. 3. Gaxetas. 4. Vedação (Tecnologia) I.
Título

CDU: 669

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

JOAQUIM BORGES RODRIGUES NETO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO 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. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG



ENG. GERALDO CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA
UNESP-FEG

Novembro de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais, Joaquim e Dirce, ao meu irmão João Pedro e à minha namorada, Olivia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, que me auxiliou desde o início e me motivou a realizar este trabalho.

À minha família e à minha namorada.

RESUMO

Algumas aplicações de juntas parafusadas requerem que não exista nenhuma possibilidade de afrouxamento e um posterior vazamento. É o caso de vasos de pressão e tubulações que contenham materiais tóxicos ou perigosos. Para esse tipo de aplicação normalmente são utilizadas gaxetas entre as duas superfícies do material da junta. Uma gaxeta nada mais é do que um elemento de vedação, normalmente polimérico. Por haver a introdução de um elemento diferente é necessário avaliar os parâmetros construtivos da junta, como coeficientes de segurança e fator de rigidez. Neste trabalho são analisados quatro métodos para cálculo de rigidez de junta por meio de uma planilha de Microsoft Excel, avaliando a influência da espessura da gaxeta e do diâmetro do parafuso na rigidez, verificando o comportamento de uma junta com relação aos seus coeficientes de segurança. Os cálculos dos métodos mostram que é possível a aplicação de todos eles, e a escolha do melhor é baseada na preferência do projetista. Além disso, nota-se que o uso de uma gaxeta realmente permite possuir maiores coeficientes de segurança contra separação, sendo assim, é recomendado em situações em que o vazamento é intolerável.

Palavras-chave: Juntas aparafusadas. Constante de rigidez. Gaxetas

ABSTRACT

Some applications of bolted joints require that there is no possibility of loosening and subsequent leakage, such as pressure vessels and pipes containing toxic or hazardous materials. For this type of application, gaskets are usually used between the two surfaces of the bolted joint material. A gasket is nothing more than a sealing element, usually polymeric. Because of the introduction of a different element, it is necessary to evaluate the constructive parameters of the joint, such as safety coefficients and stiffness factor. In this work, four methods for calculating joint stiffness are analyzed through a Microsoft Excel spreadsheet. In addition, the influence of the thickness of the gasket and of the bolt diameter on the stiffness verified the behavior of a joint with respect to its safety coefficients is analyzed. Finally, the behavior of a joint in relation to its safety coefficients is verified. The calculations of the methods show that it is possible to apply all of them, being the choice of the best based on the preference of the designer, and that the use of a gasket really allows to have higher coefficients of security against separation and is therefore recommended in situations where the leakage is intolerable.

Keywords: Bolted joints. Stiffness constant. Gaskets

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de utilização de uma gaxeta.....	14
Figura 2 - Gaxeta confinada, anel O confinado e gaxeta não confinada.....	15
Figura 3- Dimensões do parafuso.....	16
Figura 4 - Comportamento de C em função de t.....	20
Figura 5 - Coeficiente de segurança contra fadiga x espessura da gaxeta.....	21
Figuras 6 e 7 - Comportamento do coeficiente de segurança a fadiga e da constante de junta com relação ao aumento do diâmetro do parafuso.....	22
Figuras 8 e 9 - Coeficiente de separação x espessura da gaxeta e coeficiente de separação x diâmetro do parafuso.....	22

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Módulos de elasticidade de gaxetas.....	15
Tabela 2 - Valores dos coeficientes de Cornwell.....	17
Tabela 3 - Dados de entrada da junta aparafusada estudada.....	18
Tabela 4 - Resultados de constante de juntas e coeficientes de segurança.....	20
Tabela 5 - Variação percentual do coeficiente contra separação.....	23

Sumário

1 Introdução.....	11
1.1 Considerações gerais.....	11
1.2 Objetivos.....	11
1.3 Motivação.....	11
1.4 Revisão bibliográfica.....	12
1.5 Estrutura do trabalho.....	13
2 Fundamentos teóricos.....	14
3 Materiais e métodos.....	18
4 Resultados.....	20
5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	25
Referências bibliográficas.....	26
Apêndice.....	28

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma junta parafusada consiste em um conjunto parafuso-porca-arruela e duas superfícies onde este conjunto irá tracionar. A distribuição da força de aperto do parafuso se dá entre o material da junta e o próprio parafuso – e a esta proporção se dá o nome de constante de rigidez de junta (C), cujo valor depende diretamente das constantes de mola do parafuso e do material da junta.

Uma gaxeta é um elemento de vedação, geralmente de material menos rígido que o material da junta, utilizado entre as partes da junta parafusada com o objetivo principal de vedar e proteger contra vazamentos. Graças ao material menos rígido, a constante de mola da gaxeta é determinante no valor final da constante de rigidez de junta.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a influência da introdução de uma gaxeta na junta parafusada, e principalmente na constante de rigidez de junta. Para tanto foi desenvolvida uma planilha no *software* Microsoft Excel, onde são comparados quatro métodos de cálculo e, posteriormente, verificada a influência da espessura da gaxeta e do diâmetro do parafuso.

Os métodos de cálculo utilizados são a aproximação da seção transversal, como de diâmetro efetivo equivalente ao da arruela, o modelo cone-frusta, o método de Wileman et al. (1991) e o método de Cornwell (2008). Por fim, ainda é observada a influência do uso de uma gaxeta nos coeficientes de segurança referentes a uma junta parafusada em carregamento repetido.

1.3 MOTIVAÇÃO

A constante de rigidez da junta é de suma importância em um projeto que contém juntas parafusadas, uma vez que possui influência direta na parcela de carga que será aplicada ao parafuso e às peças da união. O entendimento com relação à introdução de um elemento de vedação ao conjunto é necessário pela necessidade de se garantir os parâmetros construtivos.

Além da importância desta constante em um projeto, e do uso de gaxetas em determinadas aplicações, ressalta-se o interesse do autor, despertado pela disciplina de Elementos de Máquinas, e principalmente pelo funcionamento de juntas parafusadas.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Wileman, Choudhury e Green (1991) estudaram juntas parafusadas utilizando elementos finitos e determinaram uma expressão capaz de calcular o coeficiente de rigidez da junta diretamente através da sua geometria e material.

Já Abid e Nash (2005) realizaram um estudo experimental onde compararam o comportamento de uma junta com gaxeta e outra sem gaxeta com relação à condição de tensão em dois momentos distintos – no momento do aperto e no da operação. Concluíram que para a situação sem gaxeta, no momento da montagem e da operação, todas as tensões estavam abaixo do limite de escoamento. Por outro lado, na situação com gaxetas essas tensões ultrapassaram este limite em alguns casos.

Cornwell (2008) realizou uma série de simulações usando *software* de elementos finitos para determinar o coeficiente de rigidez de uma junta. Sua pesquisa chegou a uma expressão do tipo polinomial baseada na relação entre o módulo de elasticidade do material e do parafuso, e na relação entre o diâmetro do parafuso e o comprimento sujeitado. Com essas informações é possível usar a expressão polinomial utilizando as constantes apresentadas pelo autor.

A eficácia do uso de uma gaxeta em uma junta parafusada foi comprovada por Han, Duan e Qin (2011), que tinham o objetivo de impedir um vazamento. Por meio de testes em que uma junta parafusada estava sujeita à tensão axial, os autores concluíram, também, que o atrito entre o material da gaxeta e o material da junta é relevante para o estudo de juntas gaxetadas.

Em 2016 Rino, Prasad e Sekhar estudaram o comportamento de uma junta parafusada com gaxeta com relação a uma carga externa aplicada. Neste estudo foi criado um modelo 3D de elementos finitos para simular uma situação de um flange em alta temperatura, submetida a uma carga de pressão interna e flexão externa. Os dados foram validados utilizando um teste de flexão de quatro pontos.

Abid e Kahn (2017) estudaram o comportamento de uma junta com gaxeta em um caso em que forças de três naturezas são aplicadas: pressão interna, carga axial e flexão utilizando método de elementos finitos. Posteriormente os resultados foram comparados utilizando a literatura já consagrada. Os autores verificaram que as forças de pressão interna e axial causam grande efeito na junta, ao passo que a flexão possui pouca ou quase nenhuma influência.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para analisar a influência da introdução de uma gaxeta na junta parafusada, e principalmente na constante de rigidez de junta, esta pesquisa foi dividida em cinco seções. No capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, contendo os objetivos e a revisão bibliográfica.

Já o capítulo 2 apresenta um resumo dos fundamentos teóricos sobre o tema do trabalho, e no capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos usados no procedimento de análise da constante de rigidez de junta.

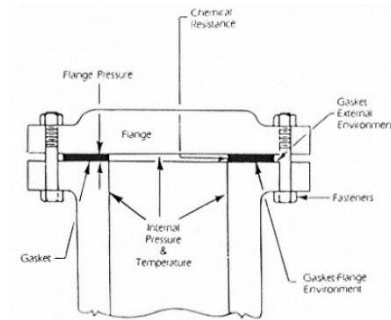
Os resultados obtidos por meio das planilhas são apresentados no capítulo 4, e as conclusões da presente pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros, estão apresentadas no capítulo 5.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Gaxetas são elementos mecânicos utilizados para criar uma vedação entre dois materiais em uma junta parafusada – tanto no momento da montagem quanto na operação, independentemente da condição de temperatura e pressão que esta junta esteja sujeita.

Como são elementos de custo relativamente baixo, as gaxetas são largamente utilizadas em montagens de tubulações industriais e vasos de pressão. Ela utiliza as forças existentes na junta, e por possuir baixa resistência à compressão, adere ao material das partes envolvidas impedindo que pequenas imperfeições e corrosão dos elementos da junta, por exemplo, sejam motivos de um vazamento – que pode causar acidentes sérios e até mesmo a morte. Um fator muito importante na seleção de uma gaxeta é que esta deve ser capaz de resistir à pressão exercida contra a junta, conforme figura 1.

Figura – 1 Exemplo de utilização de uma gaxeta (em preto).



Fonte: BICKFORD (1998)

No cálculo do coeficiente de junta (C) a gaxeta entrará como mais um fator a ser considerado na avaliação do fator de rigidez do material, ou seja, trabalhará como uma mola em paralelo. A Equação 1 mostra esta relação:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_g} \quad (1)$$

Neste caso, k_1 e k_2 são os fatores de rigidez dos materiais da junta (usualmente $k_1 = k_2$, ou seja, ambos os materiais são iguais) e k_g é o fator de rigidez da gaxeta.

As gaxetas podem ser de materiais não metálicos, por exemplo cortiça, asbesto comprimido e polímeros no geral, ou de materiais semimetálicos, que são geralmente uma combinação de materiais não metálicos com algum metal. Podem ser, ainda, constituídas de materiais metálicos, como o cobre. Excluindo a situação das gaxetas metálicas, geralmente o módulo de elasticidade das gaxetas é bem menor do que dos materiais da junta parafusada. Por

esta razão, este módulo dominará a equação, sendo possível inclusive ignorar a influência do material da junta. A Tabela 1, adaptada de Norton (2013), mostra alguns materiais utilizados para a confecção de gaxetas e seus respectivos módulos de elasticidade.

Tabela 1 - Módulos de Elasticidade de Gaxetas.

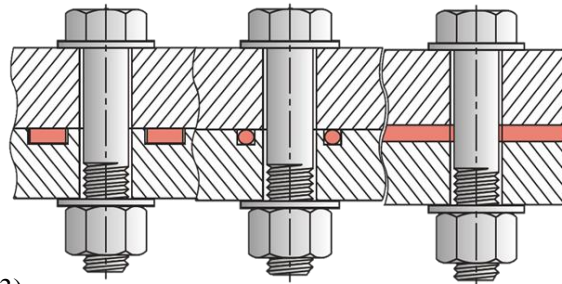
Material	Módulo de Elasticidade (Pa)
Cortiça	8,60E+07
Asbesto Comprimido	4,80E+08
Cobre Asbesto	9,30E+10
Cobre Puro	1,21E+11
Borracha Pura	6,90E+07
Enrolamento em Espiral	2,80E+08
Teflon	2,40E+08
Fibra Vegetal	1,20E+08

Fonte: elaborado pelo autor com base em NORTON (2013)

Outro fator fundamental para o entendimento do funcionamento de uma gaxeta é sua posição em relação à junta parafusada. Neste quesito, uma gaxeta pode ser confinada, anel O confinado e não confinada.

O caso mais crítico quando se fala de comportamento da junta é o caso não confinado, em que os materiais da junta ficam totalmente separados um do outro pela gaxeta. Este caso é o único em que se considera haver uma influência da gaxeta no cálculo do coeficiente de junta. A Figura 2 a seguir mostra os casos de acoplamentos possíveis.

Figura 2 - Gaxeta confinada, anel O confinado e gaxeta não confinada (respectivamente).



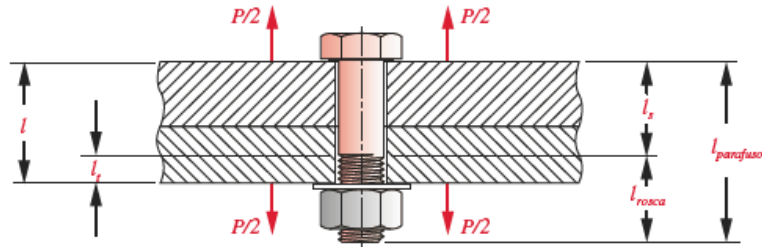
Fonte: NORTON (2013)

Como foi dito anteriormente o cálculo do coeficiente de rigidez de junta é realizado através de uma parcela, que é o fator de rigidez do material (k_m). Porém, nesta equação existe também uma variável, que é o fator de rigidez do parafuso (k_b). Este fator é em função das dimensões características do parafuso, e a Equação 2 mostra o cálculo:

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

A Figura 3 evidencia as dimensões da junta parafusada que são relevantes para o cálculo do fator de rigidez do material.

Figura 3 - Dimensões do parafuso.



Fonte: NORTON (2013)

Por fim, o coeficiente de rigidez é dado pela Equação 3:

$$C = \frac{k_b}{k_m + k_b} \quad (3)$$

A literatura possui uma série de métodos para o cálculo do coeficiente de rigidez, por exemplo, o método da aproximação, em que é realizada uma aproximação da área de material sujeitado, como as dimensões de uma arruela, cone-frusta, em que se considera que a área sujeitada é aproximadamente a de um cone. Este resultado está baseado em estudos com elementos finitos (WILEMAN et al., 1991), em que o cálculo é realizado por meio de uma equação exponencial experimental, desenvolvida através de elementos finitos e, por fim, pelo método de Cornwell (2009), que consiste na aplicação de uma equação polinomial experimental desenvolvida por elementos finitos, em que é levado em consideração a relação entre o diâmetro do parafuso com o comprimento sujeitado (j), a relação entre os módulos de elasticidade do parafuso e do material (r) e a relação entre as espessuras das chapas (t). Para chapas de espessuras iguais a expressão de Cornwell é mostrada na Equação 4:

$$C_r = p_3 * r^3 + p_2 * r^2 + p_1 * r + p_0 \quad (4)$$

Os coeficientes p_3 , p_2 , p_1 e p_0 são retirados da Tabela 2 a seguir, que relaciona os valores de j com os valores das constantes.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de Cornwell

d/L	p_0	p_1	p_2	p_3
0.1	0.4389	-0.9197	0.8901	-0.3187
0.2	0.6118	-1.1715	1.0875	-0.3806
0.3	0.6932	-1.2426	1.1177	-0.3845
0.4	0.7351	-1.2612	1.1111	-0.3779
0.5	0.7580	-1.2632	1.0979	-0.3708
0.6	0.7709	-1.2600	1.0851	-0.3647
0.7	0.7773	-1.2543	1.0735	-0.3595
0.8	0.7800	-1.2503	1.0672	-0.3571
0.9	0.7797	-1.2458	1.0620	-0.3552
1	0.7774	-1.2413	1.0577	-0.3537
1.25	0.7667	-1.2333	1.0548	-0.3535
1.5	0.7518	-1.2264	1.0554	-0.3550
1.75	0.7350	-1.2202	1.0581	-0.3574
2	0.7175	-1.2133	1.0604	-0.3596

Fonte: CORNWELL (2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para análise do comportamento de uma junta parafusada foi desenvolvida uma planilha no *software* Excel, que se inicia com a determinação das dimensões do parafuso. Posteriormente é selecionada a gaxeta que será utilizada na junta. Com estes dados iniciais é possível realizar o cálculo da constante de rigidez de junta através dos métodos propostos. Desta forma, é possível avaliar os coeficientes de segurança existentes num caso de junta parafusada em tração com carregamento repetido. A tabela 3 mostra os valores iniciais das dimensões do parafuso e da seleção da gaxeta.

Tabela 3 – Dados de entrada da junta aparafusada estudada.

Dimensões do Parafuso		Seleção da Gaxeta	
Diâmetro Maior - d (mm)	12,00	Retentor (Gaxeta)	Não Confinadas
Tipo de Rosca	Roscas Grossas	Material Gaxeta	Asbesto Comprimido
Número de Classe	5,80	Módulo de Elasticidade da Gaxeta - E_g (Pa)	4,80E+08
Passo p (mm)	1,75	d (mm)	12,7
Diâmetro Menor - d_r (mm)	9,85	D (mm)	25,4
Comprimento da Zona de Sujeição - l (mm)	38,10	A_m (m ²)	3,80E-04
Comprimento Rosca Sujeitada - l_t (mm)	20,48	A_g (m ²)	3,94E-04
Comprimento Sem Rosca - l_s (mm)	17,63	Espessura da Gaxeta - t (mm)	3
Comprimento do Parafuso - $l_{parafuso}$ (mm)	47,63	Número de Parafusos (N)	6
Comprimento de Rosca - l_{rosca} (mm)	30,00		
Área sob Tração - A_t (mm ²)	84,27		
Diâmetro da Arruela - D (mm)	25,40		
Módulo de Elasticidade do Parafuso - E_b (Pa)	2,07E+11		
Módulo de Elasticidade do Material da Junta - E_m (Pa)	2,07E+11		
Área Total da Secção Transversal - A_b (mm ²)	113,10		
Rigidez do Parafuso - k_b (N/m)	5,19E+08		

Fonte: elaborado pelo autor (2018)

Foi considerado aço como o material da junta e do parafuso. Foi selecionado um parafuso M12x1,75, roscas grossas, de classe 5.8 para a realização da simulação. A gaxeta foi determinada como não confinada e de asbesto comprimido com espessura de 3,0 mm. Foram considerados seis parafusos em uma disposição circular.

O cálculo da constante de junta foi realizado para os quatro métodos propostos no trabalho tanto para o caso sem o uso de gaxeta como para o caso com uso.

Utilizando os valores de resistência mínima de prova, resistência mínima de escoamento e resistência mínima à tração de 380 MPa, 420 MPa e 520 MPa respectivamente e adotando uma faixa de carga operacional entre 0 N e 4500 N, com pré carga de 90% chegou-se a um valor de carga inicial de 28820,34 N.

Com esses valores foi possível realizar os cálculos necessários para a determinação dos coeficientes de segurança à fadiga, ao escoamento e à separação, valores estes importantes para garantir o bom funcionamento da junta parafusada.

Para o cálculo do coeficiente de segurança à fadiga foi considerado o tipo de carregamento como normal, a superfície como retificada, a temperatura como 100 °C e a confiabilidade como 90%.

Por fim, foi gerada uma série de gráficos com o objetivo de estudar o comportamento da junta parafusada com variações de espessura da gaxeta e diâmetro do parafuso para o método da aproximação, assim como o comportamento da junta simulada com relação aos coeficientes de segurança realizando mudanças de dimensões de espessura e diâmetro. Com relação ao coeficiente de segurança à separação foi realizado uma comparação do caso com gaxeta para o caso sem gaxeta.

A planilha elaborada pode ser vista no Apêndice A.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos para os valores de constante de rigidez de junta C e para os coeficientes de segurança contra fadiga, escoamento e separação foram reunidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de constante de juntas e coeficientes de segurança

Método	Valores de C		C.S. Fadiga		C.S. Escoamento		C.S. Separação	
	Sem Gaxeta	Com Gaxeta	Sem Gaxeta	Com Gaxeta	Sem Gaxeta	Com Gaxeta	Sem Gaxeta	Com Gaxeta
Aproximação	0,1953	0,8945	2,3210	0,7676	1,1917	1,0776	7,9590	60,6925
Cone Frusta	0,1486	0,8937	2,9417	0,7680	1,2002	1,0777	7,5224	60,2559
Willeman	0,1788	0,8942	2,5031	0,7678	1,1947	1,0776	7,7992	60,5327
Cornwell	0,1910	0,9090	2,3654	0,7605	1,1925	1,0754	7,9168	70,3446

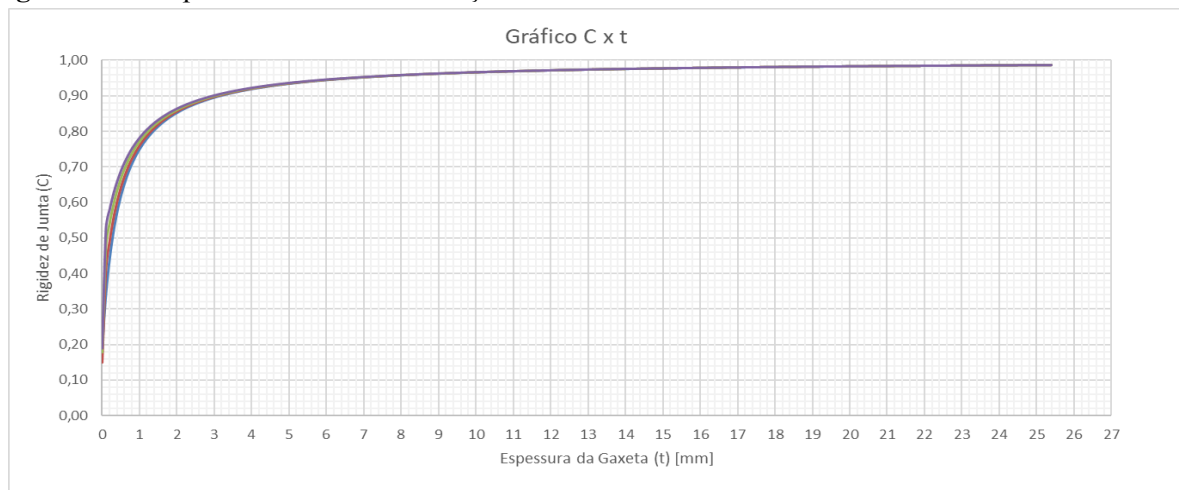
Fonte: elaborado pelo autor (2018)

É possível observar que os valores de C obtidos para os diferentes métodos não apresentam grandes diferenças. Todos os valores de coeficiente de segurança (C.S.) contra fadiga utilizando gaxeta estão abaixo de 1,0, portanto, foi constatado que as juntas podem falhar por fadiga no caso de uso de gaxeta. Entretanto, é possível observar que o coeficiente contra separação tem um aumento considerável.

Para as análises do comportamento da junta foi escolhido o método da aproximação, por se tratar de um método mais simples, e que facilitou a realização das interações.

A primeira análise realizada foi a de comportamento do fator de junta com o aumento da espessura da gaxeta, mantendo o valor do diâmetro em 12 mm. A Figura 4 mostra um gráfico que apresenta esta relação:

Figura 4 – Comportamento de C em função de t .

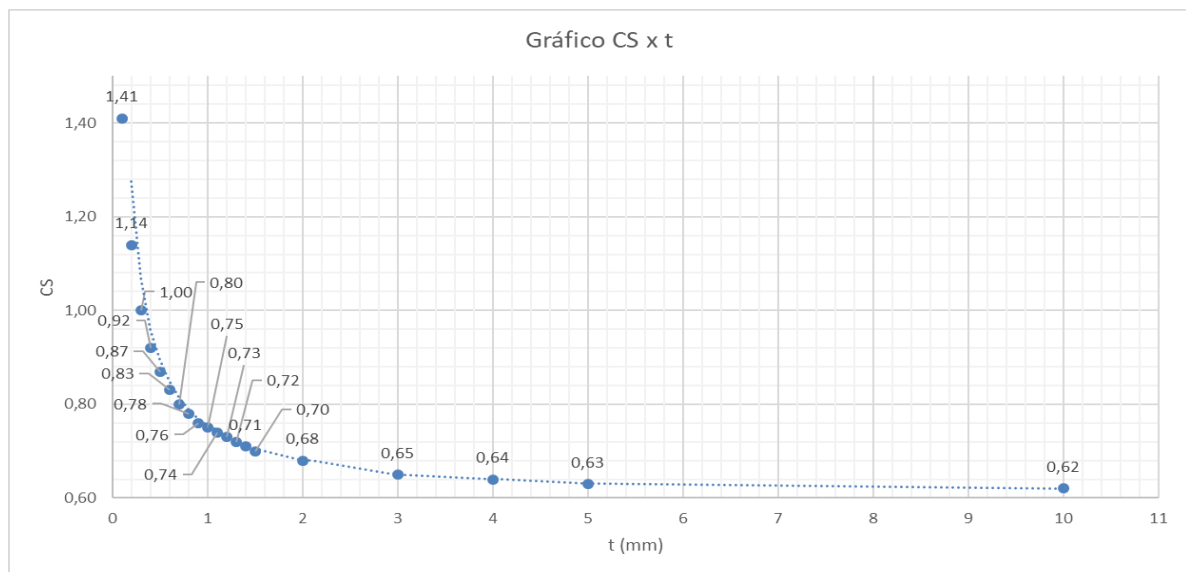


Fonte: elaborado pelo autor (2018)

Pode-se notar que o uso de uma gaxeta causa grande variação na constante de junta, uma vez que em 0,0 mm tem-se algo próximo de 0,20 como valor de C; para 1,0 mm fica-se com algo em torno de 0,75. Para valores exagerados e não reais como acima de 6,0 mm até 25,0 mm é possível notar uma tendência a se ter um valor de C próximo a 1, o que resultaria na totalidade da força externa aplicada à junta sendo absorvida pelo parafuso.

Com relação ao coeficiente de segurança à fadiga, quanto à espessura da gaxeta, foi plotado um gráfico na Figura 5:

Figura 5 – Coeficiente de segurança contra fadiga x espessura da gaxeta.

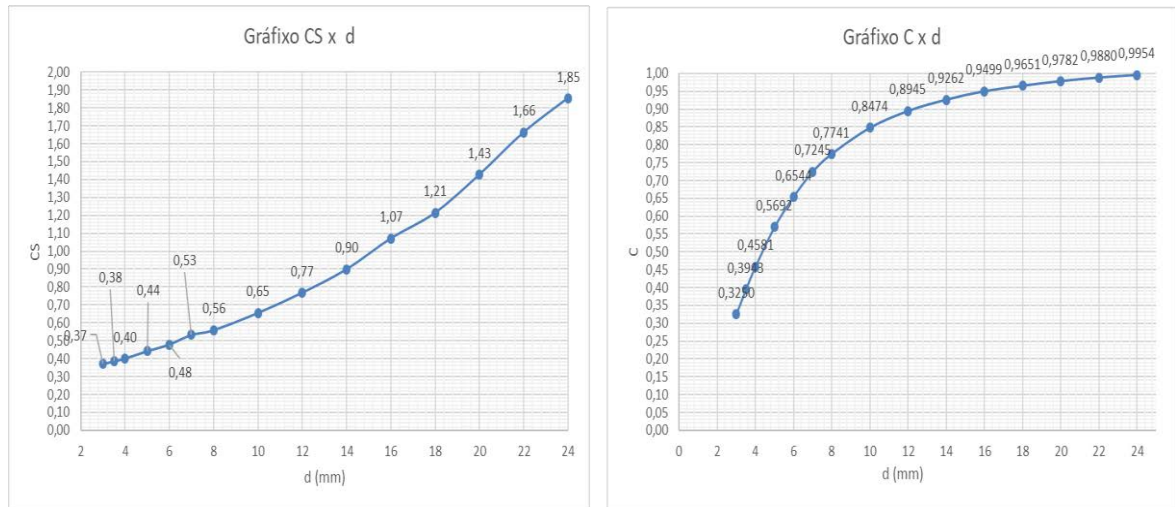


Fonte: elaborado pelo autor (2018)

Pode-se verificar que a junta parafusada, se utilizada sem a gaxeta, estaria bem projetada com relação à fadiga, uma vez que o coeficiente está em 1,41 para 0,0 mm, e à medida em que há um aumento na espessura este coeficiente vai diminuindo até tender a algo em torno de 0,62 para 10,0 mm. No valor de gaxeta utilizado na simulação (3,0 mm) tem-se um valor de 0,65 – que seria preocupante se a aplicação da junta fosse um carregamento alternado com grande número de ciclos. Porém, por se tratar de um carregamento repetido com poucos ciclos, o valor é aceitável (um vaso de pressão, por exemplo).

Foi também simulada a tendência do coeficiente de segurança contra fadiga e da constante de junta para o mesmo valor de espessura de gaxeta, porém aumentando o valor do diâmetro do parafuso. Os resultados obtidos estão nos gráficos apresentados nas Figuras 6 e 7.

Figuras 6 e 7 – Comportamento do coeficiente de segurança a fadiga e da constante de junta com relação ao aumento do diâmetro do parafuso.

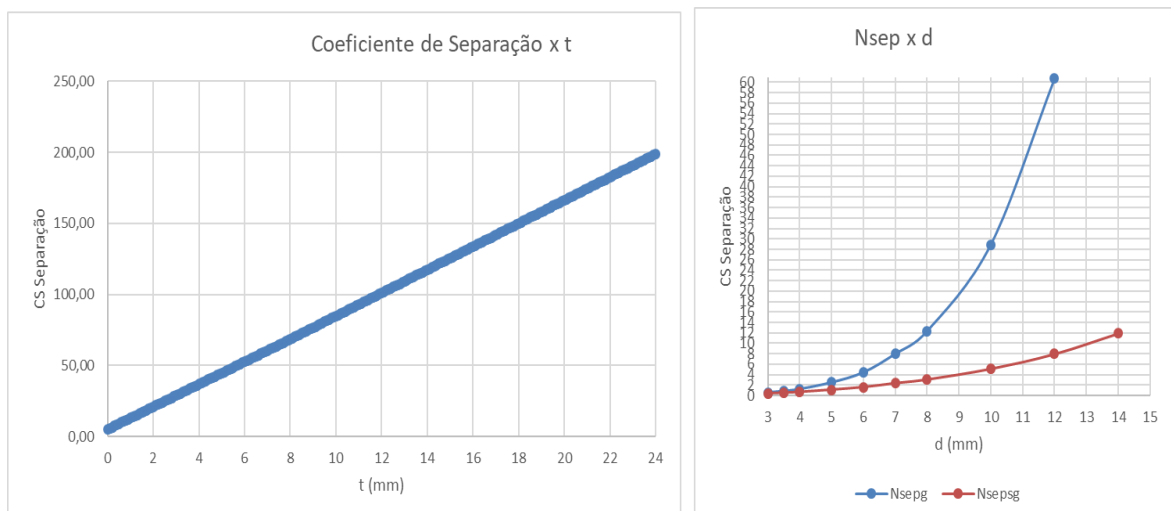


Fonte: elaborado pelo autor (2018)

Pode-se verificar que para um valor de 3,0 mm de espessura de gaxeta é necessário um parafuso M16 para que haja segurança contra fadiga. Este valor pode não ser possível em uma aplicação, assim como nota-se ainda que com o aumento do diâmetro do parafuso há uma tendência da constante de junta a chegar na unidade – assim como foi observado na experiência com o aumento da espessura, tratando-se também de um caso inviável.

Por fim, foi analisado o comportamento do coeficiente contra separação com relação à espessura da gaxeta e ao diâmetro do parafuso. Essa análise gerou os gráficos apresentados nas Figuras 8 e 9:

Figuras 8 e 9 – Coeficiente de Separação x espessura da gaxeta e coeficiente de separação x diâmetro do parafuso



Fonte: elaborado pelo autor (2018)

Pode-se notar que o uso de uma gaxeta causa um grande aumento no coeficiente contra separação, e mais uma vez nas Figuras 8 e 9 são mostrados valores de espessuras de gaxetas inviáveis com o único objetivo de se evidenciar uma tendência. Com relação ao diâmetro do parafuso, sabe-se que não é possível também utilizar um parafuso de grande diâmetro em uma aplicação que exija um diâmetro menor, porém, os mencionados gráficos também evidenciam um aumento substancial do coeficiente de segurança contra separação quando utilizada uma gaxeta. Ambos os gráficos explicam o motivo da decisão de se utilizar uma gaxeta em uma junta parafusada.

A Tabela 5, na sequência, dá uma visão da variação percentual do coeficiente de segurança contra separação, no caso com e sem gaxeta.

Tabela 5 – Variação percentual do coeficiente contra separação

d (mm)	Nsep _g	Nsep _{sg}	
3	0,57	0,39	46%
3,5	0,85	0,52	63%
4	1,23	0,68	81%
5	2,50	1,12	123%
6	4,42	1,61	175%
7	7,96	2,36	237%
8	12,32	3,06	303%
10	28,89	5,11	465%
12	60,69	7,96	662%
14	118,89	11,93	897%

Fonte: elaborado pelo autor (2018)

Nota-se que para 3,0 mm tem-se um valor de 46% de aumento, podendo chegar até quase 900% num caso hipotético de parafuso de 14,0 mm.

Uma análise final que deve ser realizada é se a junta parafusada testada realmente é capaz de suportar a carga atuante nela. Para isso Shigley (2016 apud BUDYNAS, 2011) sugere uma série de equações que ao final é capaz de chegar a um valor de pressão máxima atuante nesta gaxeta.

Define-se fator de carga (n) na Equação 5:

$$n = \frac{S_p * A_t - F_i}{C * P} \quad (5)$$

Deste modo chega-se a um valor de $n = 0,7956$, e o valor da pressão, considerando seis parafusos e utilizando a Equação 6 temos:

$$p = [F_i - n * P * (1 - C) * \frac{N}{A_g}] \quad (6)$$

Onde $p = -5,73E+6$ Pa. Este valor é negativo por se tratar de uma pressão de compressão. Analisando o catálogo de gaxetas de asbestos comprimido do fabricante Klinger é possível verificar-se a existência do material “Klingerit 3XA” que possui resistência a pressões de até 130 bar. Convertendo este valor para unidades do Sistema Internacional tem-se uma pressão de $1,30E+7$ Pa, o que significa um coeficiente de segurança contrapressão de 2,27, ou seja, é totalmente possível uma gaxeta suportar a pressão do carregamento simulado neste trabalho.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dos resultados obtidos nesta pesquisa, ficou claro que o uso de uma gaxeta em uma junta parafusada depende principalmente da análise do carregamento empregado, ou seja, quando se tratar de um carregamento alternado com muitos ciclos não é recomendada a adoção desse elemento de vedação, uma vez que o coeficiente de proteção contra fadiga fica prejudicado em relação a uma situação sem uso de gaxeta. Por outro lado, graças à natureza do material da gaxeta, o seu uso é essencial em situações em que vazamento não é uma opção – uma vez que isto causa um aumento de mais de 600% no coeficiente de segurança contra separação.

Com relação ao método adotado para o cálculo da constante de rigidez de junta, foi possível verificar que não houve grandes diferenças nos resultados obtidos. Sendo assim, a escolha do método a ser utilizado fica a cargo do projetista, ficando somente a ressalva de que métodos mais novos facilitam a posterior análise por elementos finitos, uma vez que as expressões de Cornwell (2009), por exemplo, vieram justamente de uma simulação deste tipo.

É necessário observar que a simulação que gerou este trabalho é fruto de algumas simplificações, por exemplo, os materiais das duas partes da junta como o mesmo e o uso do método da aproximação para análise da influência do diâmetro do parafuso e da espessura da gaxeta. Assim, a aplicação dos resultados aqui obtidos deve ser realizada com as devidas modificações para um caso real.

A decisão do uso do *software* Excel foi acertada, uma vez que ele permite uma série de interações de forma simples e, ao mesmo tempo, não exige o conhecimento de nenhum outro programa complexo de CAD, CAM e CAE. A visualização dos dados obtidos através de gráficos facilita também as conclusões que surgem.

Para os próximos trabalhos relacionados com o tema, é sugerido que se realizem modelagens com *software* de elementos finitos, ou até mesmo ensaios com juntas parafusadas reais, sendo posteriormente comparados com os resultados teóricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, M.; B KHAN, N. Behavior of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure, axial, and bending load: Three-dimensional numerical study. 2017. 9 p., **Journal Of Process Mechanical Engineering**, 2017.

ABID, M.; NASH, D. H. Structural strength: Gasketed vs non-gasketed flange joint under bolt up and operating condition. 2005. 14 p., **International Journal Of Solids And Structures**, 2005.

ASSIS, P.C. de. **Determinação do fator de rigidez de junta aparafusada em tração utilizando o software Excel**. 2013. 36 p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2013.

BICKFORD, J.H. **Gaskets and Gasketed Joints**. Middletown: CRC Press, 1997.

Handbook of Bolts and Bolted Joints. Middletown: CRC Press, 1998.

BUDYNAS, R. **Elementos de Máquina de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8°. ed. Porto Alegre: McGrawHill, 2011.

CORNWELL, R. E. Computation of load factors in bolted connections. 2008. 15 p. **Journal Of Mechanical Engineering Science**, 2008.

Computation of Load Factors in Bolted Connections. Proc. IMechE, J. Mech. Eng. Sci., 223c, pp. 795-808, 2009.

HAN, Y.; DUAN, J.; QIN, Y. Study on the Mechanical Properties of Rubber Gasketed Joints in Segmented Pipeline. 5 p., **Advanced Materials Research** Vols. 368-373, 2011.

KLINGER. **Material Properties**. Disponível em: <<http://www.uniklinger.com/wp-content/uploads/CAF.pdf>>. Acesso em: 12 de setembro de 2018.

NORTON, R. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4°. ed. [S.l.]: Bookman, 2013.

RINO, N.; N., SIVA, P.N.; SEKHAR, A. S. **A Study on the Behavior of Single – and Twin-Gasketed Flange Joint Under External Bending Load**, Proc. IMechE, Part E, 230(6), pp. 464-473. 2016.

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.

APÊNDICE – Imagens da planilha de cálculos no software Excel.

Figura 1a – Parte inicial da planilha.

Dimensões do Parafuso		Seleção da Gaxeta	
Diâmetro Maior - d (mm)	12,00	Retentor (Gaxeta)	Não Confinadas
Tipo de Rosca	Roscas Grossas	Material Gaxeta	Asbesto Comprimido
Número de Classe	5,80	Módulo de Elasticidade da Gaxeta - Eg (Pa)	4,80E+08
Passo p (mm)	1,75	d (mm)	12,7
Diâmetro Menor - dr (mm)	9,85	D (mm)	25,4
Comprimento da Zona de Sujeição - l (mm)	38,10	Am (m ²)	3,80E-04
Comprimento Rosca Sujeitada - Lt (mm)	20,48	Ag (m ²)	3,94E-04
Comprimento Sem Rosca - ls (mm)	17,63	Espessura da Gaxeta - t (mm)	3
Comprimento do Parafuso - lparafuso (mm)	47,63		
Comprimento de Rosca - lrosca (mm)	30,00		
Área sob Tração - At (mm ²)	84,27		
Diâmetro da Arruela - D (mm)	25,40		
Módulo de Elasticidade do Parafuso - Eb (Pa)	2,07E+11		
Módulo de Elasticidade do Material da Junta - Em (Pa)	2,07E+11		
Área Total da Secção Transversal - Ab (mm ²)	113,10		
Rigidez do Parafuso - kb (N/m)	5,19E+08		

Fonte: produzido pelo autor (2018)

Figura 1b – Complemento da planilha.

Aproximação			
Sem Gaxeta		Com Gaxeta	
d (mm)	12,00		
D (mm)	25,40	Rididez do Material - Km (N/m)	2,14E+09
Am (m ²)	3,94E-04	Rididez da Gaxeta - Kg (N/m)	6,30E+07
Rididez do Material - Km (N/m)	2,14E+09	Rididez Equivalente - Km' (N/m)	6,12E+07
Constante de Junta - C	0,1953	Constante de Junta - C	0,8945
Cone Frusta			
Sem Gaxeta		Com Gaxeta	
espessura da porca - tw (mm)	2,50	Rididez do Material - Km (N/m)	2,97E+09
Comprimento Sujeitado do Material - lm (mm)	38,10	Rididez da Gaxeta - Kg (N/m)	6,30E+07
d2 (mm)	18,00	Rididez Equivalente - Km' (N/m)	6,17E+07
φ (°)	30,00	Constante de Junta - C	0,8937
d3 (mm)	40,00		
Am (m ²)	5,47E-04		
Rididez do Material - Km (N/m)	2,97E+09		
Constante de Junta - C	0,1486		
Willeman			
Material	Aço	V	2,91E-01
		E (Pa)	2,07E+11
		A	7,87E-01
		b	6,29E-01
Sem Gaxeta		Com Gaxeta	
Comprimento Sujeitado do Material - lm (mm)	38,10	Rididez do Material - Km (N/m)	2,38E+09
Rididez do Material - Km (N/m)	2,38E+09	Rididez da Gaxeta - Kg (N/m)	6,30E+07
Constante de Junta - C	0,1788	Rididez Equivalente - Km' (N/m)	6,14E+07
		Constante de Junta - C	0,8942
Cornwell			
Razão de Aspecto de Junta - j	0,31		
Razão do Módulo do Parafuso - r	1,00		
Razão de Espessura de Chapa - t	0,50		
p0	0,68		
p1	-1,19		
p2	1,06		
p3	-0,36		
Cr	0,1910		
Rigidez da cabeça do parafuso - kb' (N/m)	6,14E+08		
Sem Gaxeta		Com Gaxeta	
Rididez do Material - Km (N/m)	2,60E+09	Rididez da Gaxeta - Kg (N/m)	6,30E+07
Constante de Junta - C	0,1910	Rididez Equivalente - Km' (N/m)	6,15E+07
		Constante de Junta - C	9,09E-01

Fonte: produzido pelo autor (2018)

Figura 1c – Dados do Carregamento

Valores Fixos	
Resistência Mínima de Prova - S_p (MPa)	380,00
Resistência Mínima de Escoamento - S_y (MPa)	420,00
Resistência Mínima à Tração - S_{ut} (MPa)	520,00
Carga Operacional Mínima - P_{min} (N)	0,00
Carga Operacional Máxima - P_{max} (N)	4500,00
Pré Carga (%)	0,90
Força Inicial - F_i (N)	28820,34

Fonte: produzido pelo autor (2018)

Figura 1d – Cálculos da planilha

Willeman	Cornwell	
	Sem Gaxeta	Com Gaxeta
Força Absorvida pelo Parafuso - P_b (N)	804,72	4023,89
Força Absorvida pelo Material - P_m (N)	3695,28	476,11
Força Resultante no Parafuso - F_b (N)	29625,06	32844,23
Força Resultante no Material - F_m (N)	25125,06	28344,23
Força Repetida Atuante no Parafuso - F_{alt} (N)	402,36	2011,94
Força Média Atuante no Parafuso - F_{med} (N)	29222,70	30832,28
Tensão Repetida Nominal no Parafuso - $\sigma_{a,nom}$ (Pa)	4,77E+06	2,39E+07
Tensão Média Nominal no Parafuso - $\sigma_{m,nom}$ (Pa)	3,47E+08	3,66E+08
Tipo de Roscas	Filetes	Filetes
Fator de Concentração de Tensões à Fadiga - k_f	2,1	2,1
Fator de Concentração de Tensões Média - $k_f m$	1,18	1,01
Tensão da Pré Carga Inicial - σ_i (Pa)	4,04E+08	3,46E+08
Tensão da Carga no Parafuso - σ_b (Pa)	3,52E+08	3,90E+08
Tensão Repetida no Parafuso - σ_a (Pa)	1,00E+07	5,01E+07
Tensão Média no Parafuso - σ_m (Pa)	4,10E+08	3,70E+08
Limite de Resistência à Fadiga Não Corrigido - S_e' (MPa)	2,60E+08	2,60E+08
Tipo de Carregamento	Normal	Normal
C_{car}	0,7	0,7
C_{tam}	0,93	0,93
Tipo de Superfície	Retificado	Retificado
A	1,58	1,58
b	-0,085	-0,085
C_{sup}	0,93	0,93
Temperatura	100	100
C_{temp}	1,00	1,00
% Confiabilidade	99,00	99,00
C_{conf}	0,814	0,814
Limite de Resistência à Fadiga Corrigido - S_e (MPa)	1,29E+08	1,29E+08
Coefficiente de Segurança à Fadiga - N_f	2,50	0,77
Coefficiente de Segurança ao Escoamento - N_y	1,19	1,08
Coefficiente de Separação - N_{sep}	7,80	60,53
Força Absorvida pelo Parafuso - P_b (N)	859,59	4090,30
Força Absorvida pelo Material - P_m (N)	3640,41	409,70
Força Resultante no Parafuso - F_b (N)	29679,93	32910,64
Força Resultante no Material - F_m (N)	25179,93	28410,64
Força Repetida Atuante no Parafuso - F_{alt} (N)	429,80	2045,15
Força Média Atuante no Parafuso - F_{med} (N)	29250,14	30865,49
Tensão Repetida Nominal no Parafuso - $\sigma_{a,nom}$ (Pa)	5,10E+06	2,43E+07
Tensão Média Nominal no Parafuso - $\sigma_{m,nom}$ (Pa)	3,47E+08	3,66E+08
Tipo de Roscas	Filetes	Filetes
Fator de Concentração de Tensões à Fadiga - k_f	2,1	2,1
Fator de Concentração de Tensões Média - $k_f m$	1,18	1,01
Tensão da Pré Carga Inicial - σ_i (Pa)	4,03E+08	3,45E+08
Tensão da Carga no Parafuso - σ_b (Pa)	3,52E+08	3,91E+08
Tensão Repetida no Parafuso - σ_a (Pa)	1,07E+07	5,10E+07
Tensão Média no Parafuso - σ_m (Pa)	4,09E+08	3,69E+08
Limite de Resistência à Fadiga Não Corrigido - S_e' (MPa)	2,60E+08	2,60E+08
Tipo de Carregamento	Normal	Normal
C_{car}	0,7	0,7
C_{tam}	0,93	0,93
Tipo de Superfície	Retificado	Retificado
A	1,58	1,58
b	-0,085	-0,085
C_{sup}	0,93	0,93
Temperatura	100	100
C_{temp}	1,00	1,00
% Confiabilidade	99,00	99,00
C_{conf}	0,814	0,814
Limite de Resistência à Fadiga Corrigido - S_e (MPa)	1,29E+08	1,29E+08
Coefficiente de Segurança à Fadiga - N_f	2,37	0,76
Coefficiente de Segurança ao Escoamento - N_y	1,19	1,08
Coefficiente de Separação - N_{sep}	7,92	70,34

Fonte: produzido pelo autor (2018)

Figura 1e – Cálculos da planilha

Aproximação			Cone Frusta		
	Sem Gaxeta	Com Gaxeta		Sem Gaxeta	Com Gaxeta
Força Absorvida pelo Parafuso - Pb (N)	878,89	4025,14	Força Absorvida pelo Parafuso - Pb (N)	668,71	4021,70
Força Absorvida pelo Material - Pm (N)	3621,11	474,86	Força Absorvida pelo Material - Pm (N)	3831,29	478,30
Força Resultante no Parafuso - Fb (N)	29699,23	32845,48	Força Resultante no Parafuso - Fb (N)	29489,05	32842,04
Força Resultante no Material - Fm (N)	25199,23	28345,48	Força Resultante no Material - Fm (N)	24989,05	28342,04
Força Repetida Atuante no Parafuso - Falt (N)	439,45	2012,57	Força Repetida Atuante no Parafuso - Falt (N)	334,35	2010,85
Força Média Atuante no Parafuso - Fmed (N)	29259,79	30832,91	Força Média Atuante no Parafuso - Fmed (N)	29154,69	30831,19
Tensão Repetida Nominal no Parafuso - σ_a ,nom (Pa)	5,21E+06	2,39E+07	Tensão Repetida Nominal no Parafuso - σ_a ,nom (Pa)	3,97E+06	2,39E+07
Tensão Média Nominal no Parafuso - σ_m ,nom (Pa)	3,47E+08	3,66E+08	Tensão Média Nominal no Parafuso - σ_m ,nom (Pa)	3,46E+08	3,66E+08
Tipo de Roscas	Filetes	Filetes	Tipo de Roscas	Filetes	Filetes
Fator de Concentração de Tensões à Fadiga - kf	2,1	2,1	Fator de Concentração de Tensões à Fadiga - kf	2,1	2,1
Fator de Concentração de Tensões Média - kf m	1,18	1,01	Fator de Concentração de Tensões Média - kf m	1,19	1,01
Tensão da Pré Carga Inicial - σ_i (Pa)	4,03E+08	3,46E+08	Tensão da Pré Carga Inicial - σ_i (Pa)	4,07E+08	3,46E+08
Tensão da Carga no Parafuso - σ_b (Pa)	3,52E+08	3,90E+08	Tensão da Carga no Parafuso - σ_b (Pa)	3,50E+08	3,90E+08
Tensão Repetida no Parafuso - σ_a (Pa)	1,10E+07	5,02E+07	Tensão Repetida no Parafuso - σ_a (Pa)	8,33E+06	5,01E+07
Tensão Média no Parafuso - σ_m (Pa)	4,09E+08	3,70E+08	Tensão Média no Parafuso - σ_m (Pa)	4,12E+08	3,70E+08
Limite de Resistência à Fadiga Não Corrigido - Se' (Pa)	2,60E+08	2,60E+08	Limite de Resistência à Fadiga Não Corrigido - Se' (MPa)	2,60E+08	2,60E+08
Tipo de Carregamento	Normal	Normal	Tipo de Carregamento	Normal	Normal
Ccar	0,7	0,7	Ccar	0,7	0,7
Ctam	0,93	0,93	Ctam	0,93	0,93
Tipo de Superfície	Retificado	Retificado	Tipo de Superfície	Retificado	Retificado
A	1,58	1,58	A	1,58	1,58
b	-0,085	-0,085	b	-0,085	-0,085
Csup	0,93	0,93	Csup	0,93	0,93
Temperatura (°C)	100	100	Temperatura	100	100
Ctemp	1,00	1,00	Ctemp	1,00	1,00
% Confiabilidade	99,00	99,00	% Confiabilidade	99,00	99,00
Cconf	0,814	0,814	Cconf	0,814	0,814
Limite de Resistência à Fadiga Corrigido - Se (Pa)	1,29E+08	1,29E+08	Limite de Resistência à Fadiga Corrigido - Se (MPa)	1,29E+08	1,29E+08
Coefficiente de Segurança à Fadiga - Nf	2,32	0,77	Coefficiente de Segurança à Fadiga - Nf	2,94	0,77
Coefficiente de Segurança ao Escoamento - Ny	1,19	1,08	Coefficiente de Segurança ao Escoamento - Ny	1,20	1,08
Coefficiente de Separação - Nsep	7,96	60,69	Coefficiente de Separação - Nsep	7,52	60,26

Fonte: produzido pelo autor (2018)