

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

VICTOR NICOLA GRISON DEBORTOLI

**DESENVOLVIMENTO DAS JUNTAS APARAFUSADAS FRONTAIS DE IMPLEMENTO
RODOVIÁRIO TIPO *SIDER***

CAXIAS DO SUL

2018/2

VICTOR NICOLA GRISON DEBORTOLI

**DESENVOLVIMENTO DAS JUNTAS APARAFUSADAS FRONTAIS DE IMPLEMENTO
RODOVIÁRIO TIPO *SIDER***

Trabalho de conclusão da disciplina de TCC II (MEC0291AD), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Elementos de Máquinas.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano

CAXIAS DO SUL

2018/2

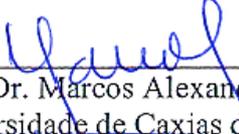
VICTOR NICOLA GRISON DEBORTOLI

**DESENVOLVIMENTO DAS JUNTAS APARAFUSADAS FRONTAIS DE IMPLEMENTO
RODOVIÁRIO TIPO *SIDER***

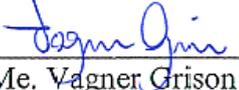
Trabalho de conclusão da disciplina de TCC II (MEC0291AD), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Elementos de Máquinas.

Aprovado em 26/06/2018

Banca Examinadora



Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Me. Wagner Grison
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Dr. Eduardo Nabinger
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho à Maria de Lurdes Grison, minha mãe, por ser a responsável de eu ter me tornado a pessoa que sou hoje e por todo o incentivo nesta longa trajetória.

RESUMO

Implementos *sider* são amplamente utilizados nas rodovias brasileiras e tem por característica suas laterais abertas para a operação de carga e descarga. Por isso, as estruturas do painel frontal, quadro traseiro e teto devem suportar os esforços sofridos em rodagem. O foco deste trabalho é o desenvolvimento de novo formato de junta aparafusada frontal para sanar problemas estruturais. Propostas de alteração da junta frontal foram modeladas e submetidas a análises pelo método de elementos finitos para sua validação em comparação aos resultados obtidos pela junta atual. A distribuições de tensões verificadas evidenciaram a significativa melhora do comportamento estrutural da proposta, sendo que o pico de concentração baixou 111 MPa. Novos parafusos para união da junta foram definidos com base nos valores de pré-carga das tabelas da norma VDI 2230 (2003), sendo que a substituição dos parafusos proporcionou um aumento de 126% na pré-carga suportada. Para garantir a atuação da pré-carga definida, testes para medição dos coeficientes de atrito foram realizados em função da pintura padrão do implemento *sider*. Os valores obtidos foram utilizados no roteiro de cálculo, adaptado da literatura técnica da Metalac (201-?), para a definição da janela de torque ideal a nova junta. Por fim, foram realizadas medições de torque em implementos com certo tempo em pátio e evidenciou-se que os torques aplicados estavam abaixo da janela de torque ideal.

Palavras-chave: Implemento *sider*. Painel frontal. Junta aparafusada. Pré-carga.

ABSTRACT

Sider semitrailers are widely used at Brazilian roads and it has as a characteristic four open sides for the charge and discharge operation. For that, the structure of front panel, back panel and roof must bear the suffered efforts in road running conditions. This work aim is the development of a new front bolted joint format to solve structural problems. Front panel alteration proposals were modeled and analyzed by the finite elements method for your validation in comparison with the results of current joint. The stress distribution verified has shown the significant improvement of the proposal structure behavior, with 111 MPa drop in the concentration peak. New bolts for the joint were defined based in the preload values of the VDI 2230's (2003) tables, the bolt's change provided a 126% rise to the supported preload. To ensure the preload defined actuation, measurement tests of the friction coefficients were realized in function of the sider semitrailer's default painting. The obtained values were applied at the calculation roadmap, adapted from Metalac's (201-?) technical literature, to define the ideal torque range for the new joint. Finally, torque measurements were made at in stock semitrailers and it has shown that the applied torques were above of the ideal range.

Keywords: *Sider* semitrailer. Front panel. Bolted joint. Preload.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Implemento <i>sider</i>	12
Figura 2 – Identificação das classes de resistência métricas.	18
Figura 3 – Número finito de divisões do parafuso	19
Figura 4 – Representação do cone-frusta	20
Figura 5 – Gráficos de carga-deflexão da pré-carga e de carga estática aplicada.....	23
Figura 6 – Gráficos de carga-deflexão da pré-carga e de carga dinâmica aplicada	23
Figura 7 – Juntas aparafusadas frontal e traseira de implemento <i>sider</i>	29
Figura 8 – Formato da junta frontal atual.	30
Figura 9 – Tensões na junta aparafusada frontal atual do <i>sider</i>	31
Figura 10 – Evidências de concentração de tensões na junta aparafusada frontal do <i>sider</i>	32
Figura 11 – Carregamento inicial com sobrecarga.	33
Figura 12 – Modelo 3D com carregamento uniforme.	33
Figura 13 – Fluxograma representativo do método de trabalho.	35
Figura 14 – Vista superior evidenciando o vão livre lateral.	37
Figura 15 – Peças com alterações da proposta 1	38
Figura 16 – Peças com alterações da proposta 2	39
Figura 17 – Vista externa da junta proposta com concentrações de tensão.	40
Figura 18 – Vista interna da junta proposta com concentrações de tensão.	41
Figura 19 – Composições de parafusos, contra-peças, arruelas e porcas	45

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Alongamento
F	Força (N)
l	Comprimento inicial do parafuso (mm)
E	Módulo de elasticidade (MPa)
A	Área da secção transversal (mm ²)
δ_s	Resiliência do parafuso (mm/N)
l_i	Comprimento de um corpo cilíndrico qualquer (mm)
A_i	Área de secção transversal qualquer (mm ²)
δ_{SK}	Resiliência elástica da parte da cabeça sob tensão (mm/N)
δ_{Gew}	Resiliência da parte da rosca sem contato com a porca (mm/N)
δ_G	Resiliência do núcleo da rosca (mm/N)
δ_M	Resiliência do deslocamento elástico dos filetes (mm/N)
A_N	Área da secção transversal nominal (mm ²)
E_S	Módulo de elasticidade do parafuso (MPa)
l_{SK}	Comprimento para cálculo da resiliência de parafusos com cabeça sextavada (mm)
A_{d3}	Área da menor secção transversal de rosca (mm ²)
l_G	Comprimento do núcleo de rosca sob tensão (mm)
l_M	Comprimento do deslocamento elástico dos filetes por flexão (mm)
l_{Gew}	Comprimento da parte da rosca sem contato com a porca (mm)
A_{ers}	Área substitutiva (mm ²)
d_k	Diâmetro equivalente da cabeça do parafuso (mm)
D_A	Diâmetro externo da junta (mm)
x	Fator de cálculo para montagem da junta utilizando porca
l_k	Comprimento de carregamento (mm)
d	Diâmetro nominal do parafuso (mm)
δ_P	Resiliência das placas carregadas (mm/N)
E_P	Módulo de elasticidade do material das placas (MPa)
M_A	Torque total (N.mm)
F_M	Força tensora de montagem (N)
p	Passo da rosca (mm)
μ_G	Coefficiente de atrito de rosca

d_2	Diâmetro primitivo da rosca do parafuso (mm)
D_{Km}	Diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso ou da porca (mm)
μ_K	Coefficiente de atrito da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou da porca
d_K	Diâmetro externo da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou da porca (mm)
D_B	Diâmetro de passagem do parafuso nas juntas (mm)
$P_{m\acute{a}x}$	Pressão superficial máxima (N/mm ²)
f_a	Constante de aperto abaixo ou acima da região elástica do material do parafuso
A_P	Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca (mm ²)
α_A	Fator de aperto
F_Q	Carregamento externo transversal
q	Número de interfaces
μ_{Tr}	Coefficiente de atrito nas interfaces
δ	Resiliência (mm/N)
Φ	Fator de carga
F_Z	Perda de pré-carga devida ao assentamento de operação (N)
f_Z	Deformação plástica resultante do assentamento (mm)
$F_{Mm\acute{a}x}$	Força máxima em função do fator de aperto (N)
F_{Mmin}	Força mínima requerida pelo projeto (N)
F_{SP}	Força máxima gerada pelo parafuso (N)
F_{SA}	Força máxima de trabalho permissível no parafuso (N)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVO GERAL.....	14
1.4	OBJETIVO ESPECÍFICOS	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	TRABALHOS CORRELATOS EM JUNTAS APARAFUSADAS.....	15
2.2	PARAFUSOS DE FIXAÇÃO	17
2.3	CLASSES DE RESISTÊNCIA	17
2.4	RESILIÊNCIA	18
2.4.1	Resiliência dos Parafusos.....	19
2.4.2	Resiliência das placas sobrepostas	20
2.5	PRÉ-CARGA DE JUNTAS APARAFUSADAS	22
2.5.1	Junta pré-carregada sob carga estática.....	22
2.5.2	Junta pré-carregada sob carga dinâmica.....	23
2.6	MÉTODO DE APARAFUSAMENTO	24
2.7	ROTEIRO DE CÁLCULO PARA UM CASO BÁSICO LINEAR	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	HISTÓRICO DE FABRICAÇÃO DE IMPLEMENTOS <i>SIDER</i>	28
3.1.1	Análise MEF e teste de durabilidade.....	30
3.2	MÉTODO DE TRABALHO	34
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	36
4.1	MODELAMENTO DAS PROPOSTAS DE NOVAS JUNTAS.....	36
4.1.1	Limitações do projeto e materiais disponíveis.....	36
4.1.2	Propostas e justificativas.....	38
4.2	ANÁLISES MEF COMPARATIVAS	40
4.3	DIMENSIONAMENTO DA JUNTA APARAFUSADA.....	42
4.3.1	Definição dos parafusos de fixação da junta.....	42
4.3.2	Roteiro de cálculo com base na VDI 2230.....	43

4.3.3	Medições de atrito das juntas aparafusadas	44
4.3.4	Roteiro de cálculo com base nos atritos medidos	47
4.3.5	Aferição dos torques de montagem da nova junta frontal	47
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A	53
	APÊNDICE B.....	58
	APÊNDICE C	61
	APÊNDICE D	67
	ANEXO A.....	70
	ANEXO B.....	73
	ANEXO C.....	74

1 INTRODUÇÃO

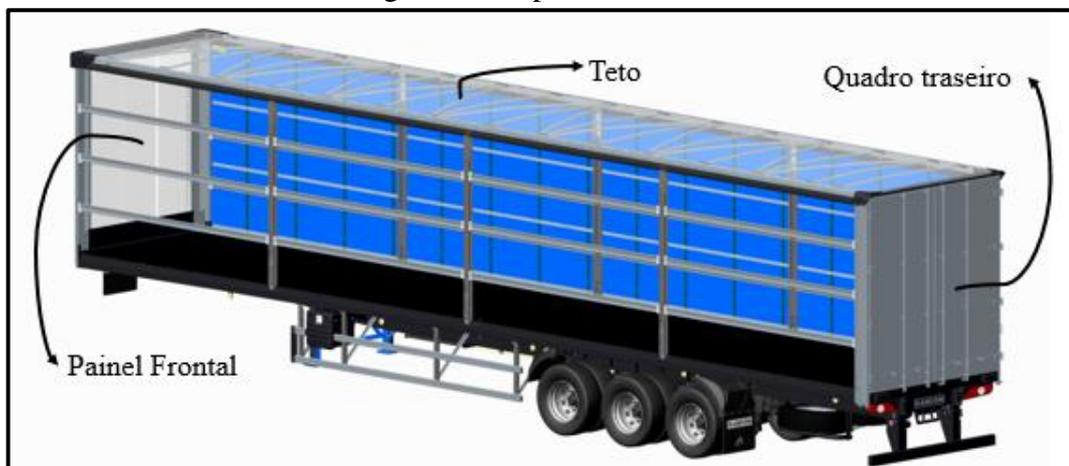
O país tem vasta extensão territorial e todo o tipo de mercadoria comercializada necessita ser transportada a seu destino final. Dentre as formas de transporte possíveis, pode-se citar 3 meios para o deslocamento de cargas: aéreo, ferroviário, rodoviário e hidroviário.

Transporte aéreo é viável para que a entrega seja realizada para lugares distantes em um prazo menor, mas seu custo é elevado. O transporte ferroviário, no território brasileiro, desenvolveu-se mais em específico para o transporte de minérios, sendo que há regiões sem malha ferroviária. O transporte rodoviário possui ampla abrangência de territórios e melhor relação custo/benefício, sendo o meio utilizado para a maioria dos transportes de carga no país através da utilização de diversos tipos de implementos (FLEURY; WANKE; FIGUEIREDO, 2013).

Um implemento rodoviário *sider* é o ideal para o transporte de cargas caracterizadas por volume e acomodadas em racks ou pallets, entre centros urbanos e centros de distribuição logística. Suas lonas laterais podem ser totalmente abertas e os pallets são carregados pelas laterais do implemento, por meio de empilhadeiras, tornando a operação de carga e descarga mais ágil e fácil.

Implementos *sider* são compostos de um painel frontal e um quadro traseiro, que são fixados à base do implemento, além de um teto, fixado aos dois conjuntos citados anteriormente, conforme ilustra a Figura 1. Por terem as laterais abertas, necessitam que seus conjuntos de montagem, quando unidos, resistam aos esforços gerados no carregamento e transporte de suas cargas.

Figura 1 – Implemento *sider*



Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

A Randon S.A. Implementos e Participações possui duas famílias de implementos *sider* destinadas a aplicações específicas. O *sider* de bebidas é destinado ao transporte de *pallets* de latas e garrafas de bebidas e o *sider* versátil é utilizado no transporte de cargas não paletizadas ou mistas. Sua comercialização realiza-se através de variações de comprimento, em função da quantidade de *pallets*, e alturas, em função da capacidade volumétrica interna. Os comprimentos disponibilizados são: 15,45 metros (30 *pallets*), 15,00 metros e 14,60 metros (28 *pallets*) e 12,50 metros (24 *pallets*). As alturas partem de 2,50 metros a 2,90 metros, variando a cada 0,10 metro.

O *sider* versátil é assim denominado por ter agregado conceitos de montagem, operação e reparo, após uma reformulação de projeto. O conceito de montagem anterior era totalmente soldado, processo demorado, deixava os conjuntos extremamente rígidos e, por consequência, propiciava trincas em algumas regiões específicas.

Após a reformulação, as interfaces de montagem dos conjuntos são totalmente parafusadas, sendo este um processo de montagem mais ágil e que torna os conjuntos menos rígidos, evitando acúmulo de tensões e trincas.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

A Randon S.A. Implementos e Participações está a mais de 65 anos fabricando semirreboques e carrocerias e tem forte atuação no mercado de implementos rodoviários através de uma ampla gama de produtos nos seguintes segmentos: graneleiro, carga seca, tanque, basculante, silos, frigorífico, canavieiro, florestal, *sider*, furgões, entre outros. Também possui expressiva participação no segmento ferroviário, produzindo vagões *hopper*, gôndola, tanque, carga geral e plataforma.

Este trabalho será desenvolvido no setor de Engenharia de furgão, frigorífico e *sider*, que é responsável pelo desenvolvimento e customização de projetos dos segmentos de furgão carga geral, furgão frigorífico e *sider*.

Dentre estes segmentos, o foco será no de *sider*, visto que serão seus painéis e juntas parafusadas os objetos de estudo deste trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para que a estrutura do painel frontal resista aos esforços, é necessário que os materiais utilizados, o formato das juntas e os elementos de fixação sejam dimensionados para tal

propósito. Com este objetivo, devem ser empregados métodos de análise e cálculos de resistência, além de restrições dimensionais e legislativas serem consideradas. Por fim, os modelos 3D dos conjuntos podem ser submetidos a análises de elementos finitos para validação.

Em vista das uniões parafusadas serem menos rígidas que um conjunto soldado, se faz importante a análise e dimensionamento dos pontos e formato das juntas para dar robustez a montagem, viabilizar as variações disponibilizadas ao mercado e evitar danos e quebras em campo nestas regiões de fixação, frequentes nos conjuntos montados segundo o conceito soldado.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de juntas aparafusadas frontais aplicadas em implemento rodoviário tipo *sider*.

1.4 OBJETIVO ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja atingido, abaixo estão definidos os seguintes objetivos específicos a serem cumpridos:

- a) Analisar a junta frontal atual pelo método de elementos finitos e obter as tensões nas uniões aparafusadas;
- b) Desenvolver propostas de uniões aparafusadas para minimizar concentração de tensão nestas regiões;
- c) Analisar as propostas pelo método de elementos finitos;
- d) Realizar testes físicos pertinentes as propostas desenvolvidas;
- e) Validar a melhor proposta com base nas análises de elementos finitos e testes físicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo abordar tópicos e conceitos teóricos pertinentes às atividades de análise, modelamento e validação a serem desenvolvidas, de modo a fundamentar e validar os dados deste estudo de caso. Primeiramente serão apresentadas as propriedades e características dos elementos de fixação, parafuso e porca, bem como suas normas de padronização e classes de resistência. A seguir são abordados métodos, fatores de influência e formatos de juntas aparafusadas. E, por fim, uma breve revisão quanto à resistência de materiais comumente utilizados em juntas aparafusadas.

2.1 TRABALHOS CORRELATOS EM JUNTAS APARAFUSADAS

As juntas aparafusadas são amplamente utilizadas na indústria por serem de fácil montagem e desmontagem, devido a sua confiabilidade e pela facilidade em futuras manutenções dos conjuntos unidos. Mas a utilização de juntas aparafusadas requer cuidados e atenção a seus modos de falha, sendo que os mais conhecidos são a perda de pré-carga e a quebra por fadiga (ARGATOV; SEVOSTIANOV, 2010; NOGUEIRA; MASSAROPPI JUNIOR; DIAS, 2014).

Com a intenção de definir parâmetros mais assertivos para o dimensionamento de juntas aparafusadas, frente as definições empíricas existentes nas literaturas pertinentes, Nogueira, Massaroppi Junior e Dias (2014) desenvolvem procedimento para determinar as distribuições de tensão e o campo de deslocamento de modo a determinar uma equação que forneça a rigidez de qualquer junta em função das propriedades dos materiais e suas características geométricas. Análises aplicando o método de elementos finitos foram realizadas em um modelo axissimétrico de flanges unidas por parafusos com pré-carga e diversas variações de elementos característicos de juntas aparafusadas foram verificados, tais como o diâmetro do parafuso, o diâmetro externo do flange, a espessura do flange, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

Atentos a questão que relaciona o torque de aperto e o pré-carregamento da junta aparafusada, Croccolo, Agostinis e Vincenzi (2011) propõem a utilização de uma metodologia experimental para determinar os coeficientes de fricção nas juntas da suspensão dianteira de motos, feitas em diferentes ligas de alumínio, onde falhas estáticas estavam ocorrendo devido ao estresse por flexão gerado pelas forças de pré-carga. Grande parte do torque de aperto é consumido na fricção entre a flange de fixação e a cabeça do parafuso e na fricção entre as

roscas do parafuso e da porca. A metodologia propõe a avaliação dos materiais que compõem a junta e suas componentes de fricção para que a pré-carga não seja nem subestimada e nem superestimada, garantindo assim sua eficácia.

Também atento à importância do torque de aperto, Griza (2000) desenvolveu estudo para avaliar o comportamento em fadiga do mesmo tipo de junta aparafusada quando montadas variando-se a pré-carga aplicada e o material dos elementos da junta. As juntas aparafusadas eram compostas de parafusos e porcas ISO M6X1 classe 8.8, foram montadas com elementos de aço e alumínio e sofreram carregamentos de forma senoidal com frequência entre 30 e 35 Hz. Através desta sistemática de testes, Griza (2000) pôde definir gráficos e tabelas de comportamento das juntas aparafusadas.

De modo geral, a falha de uma junta aparafusada é identificada somente no momento de sua quebra ou quando sua quebra afeta o funcionamento dos conjuntos que estavam unidos por ela. Com a intenção de prever o momento de ruptura da junta, Argatov e Sevostianov (2010) propõem a utilização da resistência elétrica dos materiais da junta sob pressão como um parâmetro de diagnóstico de sua integridade. Baseados no fenômeno de resistência elétrica gerada pela força de aperto em uma junta de materiais condutores, seus testes mostraram que o afrouxamento da junta aparafusada gera uma variação equivalente na resistência elétrica da junta. Deste modo, a variação da resistência elétrica da junta, em relação a seu afrouxamento, se mostrou promissor como método de monitoramento da sua integridade, a fim de propiciar a manutenção antes da quebra.

A perda de pré-carga também foi observada nas juntas de fixação de cabeçote de cilindros de motores diesel por Minetto (2010) que propôs a utilização de arruelas da liga Ti-50,67at%Ni nestas montagens. Esta liga tem a propriedade de superelasticidade, ou seja, efeito de memória de forma e, tal característica, foi avaliada a fim de minimizar as perdas de pré-carga, que atingiam valores entre 24% e 27% nas montagens sem a arruela em material superelástico.

Por fim, levando em consideração a dificuldade de determinar a janela ideal de torque em juntas aparafusadas em função dos diferentes tipos de revestimento em parafusos, Primolini (2016) propôs metodologia de avaliação do comportamento de juntas, em aplicações de torque elevado, através da utilização de equipamento DTT (Determinador de Torque Tensão). Através da aplicação do equipamento DTT, os valores de torque, força tensora e coeficientes de atrito foram identificados para cada junta aparafusada. Os parafusos utilizados possuíam os acabamentos superficiais fosfatizado ou organometálico e os materiais da junta tinham o acabamento usinada e oleada ou pintada. A junta que combinou o material com acabamento

usinado e pintado com parafuso fosfatizado necessitou da menor força de aperto, 112 kN, enquanto a junta com acabamento pintado combinado com parafuso organometálico necessitou da maior força de aperto, 177 kN.

2.2 PARAFUSOS DE FIXAÇÃO

São componentes mecânicos que tem a função de unir peças e conjuntos por meio da aplicação de uma força de ligação, de modo a suportar os carregamentos oriundos das forças de trabalho as quais o conjunto está submetido, sem que haja movimento relativo entre as partes unidas (METALAC, 201-?).

Diversas são as formas de classificação de parafusos de fixação, dentre elas destaca-se àquela em função do uso pretendido na qual diferenças sutis de aplicação podem ser compreendidas. Denomina-se parafuso de porca o fixador com cabeça, corpo reto e com filetes de rosca cuja aplicação prevê o uso de porca para compor a junta aparafusada. Este mesmo elemento é denominado parafuso de máquina quando sua fixação se dá em um furo rosqueado ao invés de uma porca.

Ainda quanto ao formato, destaca-se a classificação por tipo de cabeça que possui vários estilos diferentes, sendo mais conhecidos os parafusos com cabeça de fenda reta, fenda em cruz (*Phillips*), hexagonal ou sextavado e hexagonal de encaixe ou sextavado interno. Dentre estes, destaca-se o parafuso com cabeça sextavada como mais popular para parafusos que a aplicação requer torque no momento de aperto (NORTON, 2004).

2.3 CLASSES DE RESISTÊNCIA

Parafusos de fixação, por serem elementos com aplicação crítica e suscetíveis a falhas, são normalizados e divididos em classes de resistência, as quais levam em consideração a composição química do material e tratamento superficial para garantir as propriedades mecânicas necessárias a cada aplicação. A norma ISO 898-1 define estes limites de composição química e tratamentos térmicos, além de dividir os parafusos em classes de resistências em função das propriedades mecânicas obtidas (METALAC, 201-?; COLLINS, 2006)

A carga de conhecimento e rápida identificação, as classes de resistência métricas são representadas por uma numeração, marcada na cabeça do parafuso, em que o algarismo antes do ponto representa a resistência a tração do elemento e o algarismo após o ponto representa o limite de escoamento do elemento, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Identificação das classes de resistência métricas.



Fonte: Adaptado de Metalac SPS Ind. Com. Ltda. (201-?)

Para fins de cálculo de dimensionamento de juntas aparafusadas, considera-se a carga de prova do parafuso, que consiste na máxima força suportada por ele sem que ocorra deformação permanente. Com o valor da carga de prova obtém-se a resistência de prova de cada parafuso, obtida pela divisão da carga de prova pela área de tensão de tração, que representa grosseiramente ao limite de proporcionalidade e a 0,0001 da deformação permanente do parafuso (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

As tabelas de classificação, de diferentes órgãos de normalização, com informações quanto ao material, tratamento superficial, resistência de prova e propriedades mecânicas dos parafusos podem ser verificadas no Anexo A e uma tabela com a composição básica do material para cada classe de resistência métrica pode ser verificada no Anexo B, ao final deste trabalho.

2.4 RESILIÊNCIA

Resiliência elástica indica a capacidade de deformação de um corpo submetido a uma força F . Quanto maior for a capacidade de deformação do material, maior será sua resiliência indicando que o mesmo é mais flexível. É essencial o conhecimento da resiliência, tanto do parafuso quanto das peças por ele fixadas, para a assertiva definição do parafuso a ser utilizado.

O alongamento, f , é definido conforme mostra a equação 1:

$$f = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} \quad (1)$$

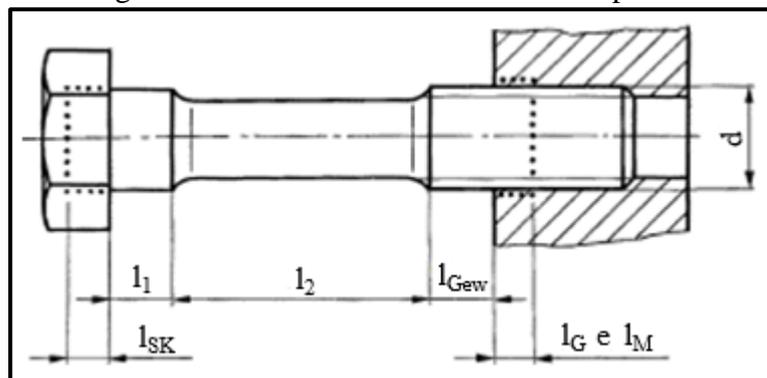
O alongamento é obtido pela divisão do produto da força da solicitação, F , com o comprimento inicial do parafuso, l , pelo produto do módulo de elasticidade, E , com a área de

secção transversal, A , do mesmo (METALAC, 201-?).

2.4.1 Resiliência dos Parafusos

Para a definição da resiliência dos parafusos δ_s , o parafuso pode ser dividido em um número finito de corpos cilíndricos de comprimento l_i e secções transversais A_i , conforme a Figura 3 (METALAC, 201-?).

Figura 3 – Número finito de divisões do parafuso



Fonte: Adaptado de VDI 2230 (2003).

Como os corpos cilíndricos são engastados uns aos outros, se define a resiliência do parafuso, δ_s , pela soma das resiliências, conforme mostra a equação 2 (METALAC, 201-?):

$$\delta_s = \delta_{SK} + \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{Gew} + \delta_G + \delta_M \quad (2)$$

Na equação 2 δ_{SK} é a resiliência elástica da parte da cabeça sob tensão; δ_{Gew} é a resiliência da parte de rosca que não está em contato com a porca; δ_G é a resiliência do núcleo da rosca; δ_M é a resiliência devido ao deslocamento elástico dos filetes (METALAC, 201-?).

Na sequência, as equações 3, 4, 5 e 6 definem as resiliências de cada segmento:

$$\delta_{SK} = \frac{l_{SK}}{A_N \cdot E_s}, \quad \text{com,} \quad l_{SK} = 0,5 \cdot d \quad (3)$$

$$\delta_{Gew} = \frac{l_{Gew}}{A_{d3} \cdot E_s} \quad (4)$$

$$\delta_G = \frac{l_G}{A_{d3} \cdot E_s}, \quad \text{com,} \quad l_G = 0,5 \cdot d \quad (5)$$

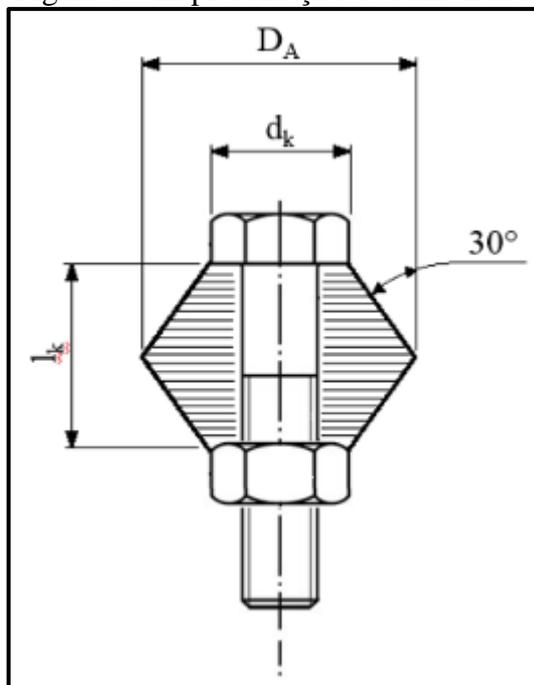
$$\delta_M = \frac{l_M}{A_N \cdot E_s}, \quad \text{com,} \quad l_M = 0,4 \cdot d \quad (6)$$

Nas equações acima A_N é a área da secção transversal nominal; l_{SK} é o comprimento para cálculo da resiliência de parafusos com cabeça sextavada; A_{d3} é a área da secção transversal da rosca de menor diâmetro; l_G é o comprimento do núcleo de rosca sob tensão; l_M é o comprimento do deslocamento elásticos dos filetes por flexão;

2.4.2 Resiliência das placas sobrepostas

Em uma junta aparafusada os elementos ou placas a serem unidas são sobrepostos e formam a região carregada entre a cabeça do parafuso e a porca, onde está presente uma tensão de compressão. Esta região é denominada cone-frusta e pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Representação do cone-frusta



Fonte: Adaptado de Metalac SPS Ind. Com. Ltda.

A região tensionada tem o formato de um cone formado a partir da cabeça do parafuso ou da porca, sendo esta a zona afetada pela tensão de compressão. Para se produzir uma

representação aproximada da região tensionada vários estudos indicam a formação do cone truncado em forma de barril com um ângulo de 30° (METALAC, 201-?; NORTON, 2004; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

De modo geral, juntas aparafusadas aplicam-se na união de chapas com dimensões relativamente grandes, em que a dimensão das chapas é maior que a área tensionada pelo conjunto parafuso e porca. Sendo assim, a área sob tensão atuante da cabeça do parafuso não abrange toda a extensão das chapas. Deste modo, para o cálculo da resiliência elástica das placas uma área substitutiva da secção transversal é utilizada (NORTON, 2004; METALAC, 201-?).

A área substitutiva A_{ers} é definida conforme mostra a equação 7:

$$A_{ers} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_A^2 - d_k^2) + \frac{\pi}{8} \cdot d_k \cdot (D_A - d_k) \cdot [(x + 1)^2 - 1] \quad (7)$$

Onde x é definido pela equação 8:

$$x = \sqrt[3]{\frac{l_k \cdot d_k}{D_A^2}} \quad (8)$$

Sendo que a equação de A_{ers} fica limitada à relação máxima da equação 9:

$$\frac{l_k}{d} \leq 10 \quad (9)$$

Nas equações acima d_k é o diâmetro equivalente da cabeça do parafuso; D_A é o diâmetro externo da junta; x fator de cálculo para montagem da junta utilizando porca; l_k é o comprimento de carregamento; d é o diâmetro nominal do parafuso.

Após obter a área substitutiva A_{ers} é possível calcular a resiliência das placas carregadas δ_P (METALAC, 201-?):

$$\delta_P = \frac{l_k}{A_{ers} \cdot E_P} \quad (10)$$

Nesta equação, E_P é o módulo de elasticidade do material das placas; l_k é o comprimento de carregamento.

2.5 PRÉ-CARGA DE JUNTAS APARAFUSADAS

Pré-cargas são induzidas em estruturas e montagens com o intuito de produzir tensões internas sem que haja a ação de uma carga externa. Montagens com pré-carga comportam-se como um sistema integrado de molas em que a compressão em alguns elementos equilibra a tração em outros elementos da junta. Este efeito mola tem o intuito de compensar o carregamento que a junta aparafusada sofrerá em sua aplicação, sendo assim, o parafuso resiste, somente, a uma fração das cargas de trabalho. Além disso, outros benefícios da pré-carga são a eliminação de folgas indesejáveis, o aumento da rigidez da montagem e o aumento da resistência a fadiga (COLLINS, 2006; GRIZA, 2000).

Como uma das funções da junta aparafusada é unir peças em que se terá cargas aplicadas, deixando a junta em tração, é comum pré-carregar a junta aplicando torque aos parafusos afim de criar cargas de tração próximas as solicitações a serem sofridas. Para juntas com carregamento estático é comum utilizar uma pré-carga de até 90% da resistência de prova. Para juntas com carregamento dinâmico uma pré-carga de cerca de 75% da resistência de prova do é frequentemente utilizada (NORTON, 2004; JUVINALL; MARSHEK, 2008).

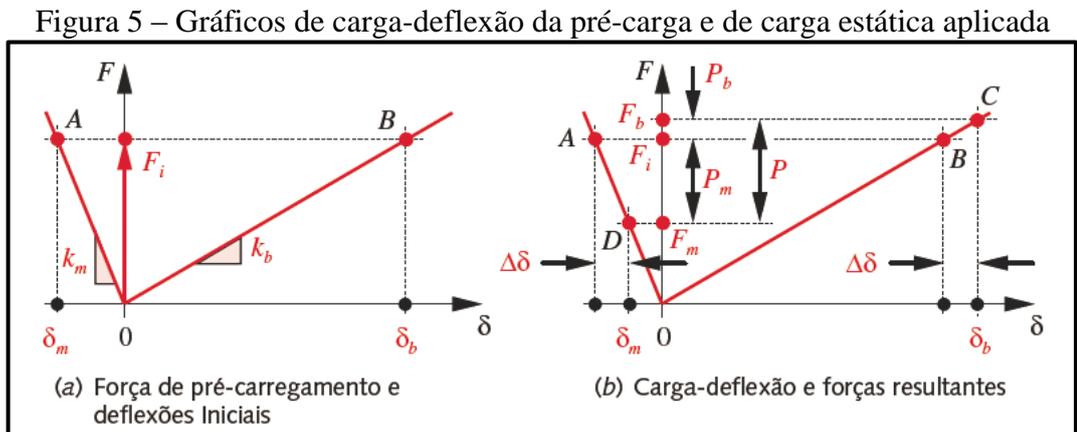
Tais valores de pré-carga podem ser considerados elevados, a primeira vista, mas justificam-se quando as aplicações são avaliadas. Para carregamentos que tendem a separar os componentes da junta, quanto mais alta a tração inicial no parafuso, menor será a possibilidade de os elementos da junta se separarem. Em carregamentos cisalhantes, quanto maior for a pré-carga, maiores serão as forças de atrito resistentes ao cisalhamento (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

2.5.1 Junta pré-carregada sob carga estática

A Figura 5 representa o comportamento de uma junta aparafusada quando pré-carregada e quando sofre a ação de uma força estática. Na Figura 5a, a inclinação da linha correspondente ao parafuso é positiva, pois o mesmo se alonga com o aumento da força devido a sua resiliência. A inclinação da linha do material é negativa, pois é comprimido pelo parafuso e porca. O material é representado como mais rígido uma vez que sua área é maior e, ambos parafuso e material, tem o mesmo módulo de elasticidade (NORTON, 2004)

Na Figura 5b, quando uma força externa P é aplicada à junta uma deflexão adicional, é introduzida tanto no parafuso quanto no material e esta deflexão deve ser a mesma em ambos a menos que seja suficiente para separar a junta. A aplicação de pré-carga “transforma” o

material da junta em uma “mola”. Sendo assim, o material suporta a maior parte da carga aplicada e no parafuso incide pouca carga além da pré-carga. Este aspecto justifica a afirmação, comumente feita, de que “se o parafuso não falha em pré-carga, então provavelmente não falhará em serviço” (NORTON, 2004; BUDYNAS; NISBETT, 2011)

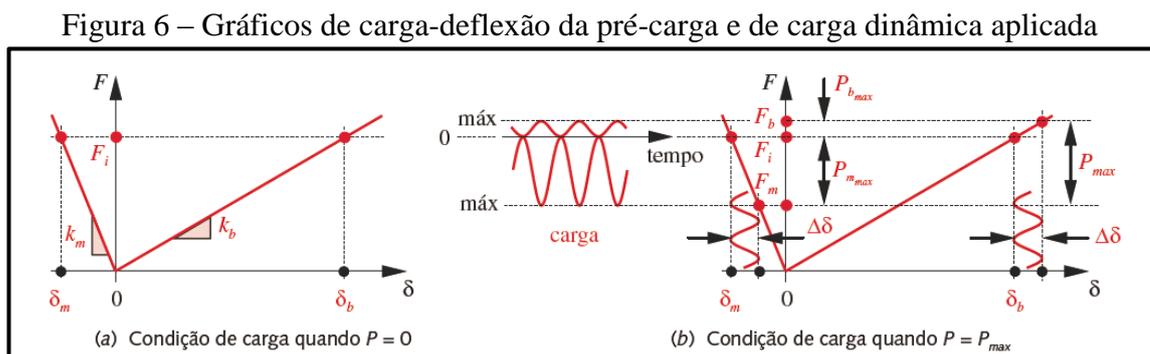


Fonte: Norton (2004)

2.5.2 Junta pré-carregada sob carga dinâmica

A importância do pré-carregamento da junta é ainda maior quando há carregamento dinâmico. Na Figura 6a, observa-se novamente o gráfico carga-deflexão da junta somente com a ação da pré-carga.

Já na Figura 6b, tem-se o gráfico carga-deflexão de uma junta aparafusada sob a ação de uma carga variada. Quando a carga varia até zero, o diagrama é exatamente o mesmo da figura 6a, somente com a ação da pré-carga. Quando a carga aumenta até o máximo, P_{max} é dividida entre o parafuso e o material da mesma forma que no carregamento estático e, ainda assim, devido a pré-carga o material absorve a maior parte das oscilações de carga, reduzindo drasticamente as tensões alternantes de tração no parafuso (NORTON, 2004).



Fonte: Norton (2004)

2.6 MÉTODO DE APARAFUSAMENTO

Para a obtenção da pré-carga são utilizadas técnicas de montagem para aperto da junta aparafusada que possuem um grau de incerteza em função do fator de dispersão de carga.

Os métodos de aperto não medem diretamente a pré-carga produzida, mas indiretamente em função do torque de aperto, do alongamento elástico, do ângulo de rotação ou pelo escoamento elástico do parafuso. Em função do método de aparafusamento escolhido, é necessário dimensionar o projeto em função o fator de aperto α_A , que pode ser obtido na tabela do ANEXO C (METALAC, 201-?).

Dentre os métodos de aperto comumente utilizados, destaca-se o de aperto por controle de torque, por ser mais conveniente a aplicação quando se tem alta produtividade. Apertos por controle de torque se utilizam de torquímetros indicadores ou, através da força motriz, de aparafusadeiras elétricas ou pneumáticas que podem ser calibradas para um nível específico de torque que ao ser atingido elas param de girar (METALAC, 201-?; NORTON, 2004; COLLINS, 2006).

O torque total M_A consiste no torque na rosca e no torque sob a cabeça do parafuso, conforme equação 11:

$$M_A = F_M \cdot \left(0,16 \cdot p + \mu_G \cdot 0,58 \cdot d_2 + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right) \quad (11)$$

Onde D_{Km} é definido pela equação 12:

$$D_{Km} = \frac{d_K + D_B}{2} \quad (12)$$

Nas equações acima, F_M é a força tensora de montagem; p é o passo da rosca; μ_G é o coeficiente de atrito de rosca; d_2 é o diâmetro primitivo da rosca do parafuso; D_{Km} é o diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso ou da porca; μ_K é o coeficiente de atrito da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou da porca; d_K é o diâmetro externo da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou da porca; e D_B é o diâmetro de passagem do parafuso nas juntas.

A força tensora de montagem deve ser definida em função da capacidade de do fixador e deve ser equivalente a 90% do limite de escoamento do parafuso, quando submetido a um estado de tensões combinado (METALAC, 201-?; NORTON, 2004; JUVINALL; MARSHEK,

2008).

As tabelas apresentadas pela norma VDI 2230 (2003) relacionam o torque em função da força tensora através de algumas simplificações, sendo que, basicamente, é fixado um valor médio e constante para o coeficiente de atrito μ_G , fazendo com que a força tensora de uma determinada classe de resistência permaneça constante, então a variação do torque ocorre somente em função da variação de μ_K .

2.7 ROTEIRO DE CÁLCULO PARA UM CASO BÁSICO LINEAR

A variação de geometria das juntas aparafusadas, em vista da grande diversidade de aplicações e projetos mecânicos, torna a definição de um procedimento de cálculos de juntas extremamente árduo e complexo. Sendo assim, a Metalac (201-?) propõe um roteiro de cálculo que pode ser definido se as juntas forem simplificadas e simetrias consideradas, conforme pode ser verificado nas etapas a seguir:

ETAPA 1: determinar o diâmetro, d , do parafuso, da relação do comprimento carregado pelo volume $\frac{l_K}{d}$ e da pressão superficial da cabeça ou porca.

$$P_{m\acute{a}x} = f_a \cdot \frac{F_M}{\frac{0,9}{A_P}} \leq P_G \quad (13)$$

Na equação 13, $P_{m\acute{a}x}$ é a pressão superficial máxima sob a cabeça do parafuso e/ou sob a porca; F_M é a força máxima referente a 90% do limite de escoamento; A_P é a área de apoio da cabeça do parafuso e/ou porca; P_G é a pressão superficial admissível dos materiais da junta e, f_a é igual a 1 para apertos na região elástica e 1,2 para apertos que excedam o limite elástico do parafuso (METALAC, 201-?; NORTON, 2004; JUVINALL; MARSHEK, 2008).

ETAPA 2: Determinação do fator de aperto, α_A , em função do método de aparafusamento escolhido, conforme tabela do ANEXO C.

ETAPA 3: Determinar a força tensora residual mínima para evitar abertura unilateral das interfaces da junta, conforme equação 14 para carregamentos axiais e equação 15 para carregamentos transversais:

$$F_{kerf} = \frac{(a - s) \cdot u}{\frac{l_{BT}}{A_D} + s \cdot u} \cdot F_A \quad (14)$$

$$F_{Kerf} = \frac{F_Q}{\mu_{Tr} \cdot q} \quad (15)$$

Nas equações acima, F_Q é o carregamento externo transversal; q é o número de interfaces; μ_{Tr} é o coeficiente de atrito nas interfaces.

ETAPA 4: Determinação das resiliências, δ , e do fator de carga, Φ . A equação 16 exemplifica o fator de carga:

$$\Phi_{en} = n \cdot \frac{\delta_p \cdot \left(1 + \frac{a \cdot S \cdot A_{ers}}{I_{ers}}\right)}{\delta_s + \delta_p \cdot \left(1 + \frac{S^2 \cdot A_{ers}}{I_{ers}}\right)} \quad (16)$$

ETAPA 5: Determinar a perda de pré-carga, F_Z , devido ao relaxamento da junta através das equações 17 e 18:

$$F_Z = \frac{f_Z}{(\delta_s + \delta_p)} \quad (17)$$

$$f_Z = 3,29 \cdot \left(\frac{l_k}{d}\right)^{0,34} \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (18)$$

ETAPA 6: Determinar o tamanho do parafuso, segundo a equação 19 utilizada para todas as técnicas de aperto na região elástica:

$$F_{Mm\acute{a}x} = \alpha_A \cdot F_{Mmin} \quad (19)$$

$$F_{Mm\acute{a}x} = \alpha_A \cdot [F_{Kerf} + (1 - \Phi) \cdot F_A + F_Z]$$

$$F_{SP} \geq F_{Mm\acute{a}x} \quad (20)$$

Nas equações acima, $F_{Mm\acute{a}x}$ é a força máxima calculada em função do fator de aperto; F_{Mmin} é a força mínima requerida pelo projeto; F_{SP} é a força máxima gerada pelo parafuso.

ETAPA 7: Verificar se a força máxima de trabalho permissível no parafuso, F_{SA} , não foi excedida. A equação 21 define F_{SA} como:

$$F_{SA} = \Phi \cdot F_A \leq 0,1 \cdot R_{P0,2} \cdot A_S \quad (21)$$

ETAPA 8: Determinar a tensão de fadiga atuante no parafuso, sendo a equação 22 para carregamentos concêntricos e a equação 23 para carregamentos excêntricos:

$$\sigma_a = \Phi \cdot \frac{F_{A0} - F_{AU}}{2 \cdot A_{d3}} \leq \sigma_A \quad (22)$$

$$\sigma_a = \pm \left[1 + \left(\frac{1}{\Phi_{en}} \pm \frac{S}{a} \right) \cdot \frac{l_K}{l_{ers}} \cdot \frac{E_s}{E_P} \cdot \frac{a \cdot \pi \cdot d_3^3}{8 \cdot I_{Bers}} \right] \cdot \frac{\Phi_{en} \cdot F_A}{2 \cdot A_{d3}} \leq \sigma_A \quad (23)$$

Se as condições não forem satisfatórias o projeto deve ser modificado através de: aumento de diâmetro, aumento na resistência a fadiga ou modificação das placas que compõem a junta.

ETAPA 9: Checar a pressão superficial sob a cabeça do parafuso ou da porca, conforme a equação 24:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F_{Mm\acute{a}x} + \Phi \cdot F_A}{A_P} \leq P_G \quad (24)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentado um breve histórico sobre a fabricação de implementos do tipo *sider*, na Randon Implementos, a fim de fundamentar o entendimento da situação atual e dos motivos os quais justificam o desenvolvimento deste estudo.

Na sequência é apresentado um procedimento em etapas para análise das informações técnicas já existentes sobre o projeto de *sider* atual, desenvolvimento de propostas visando melhorar as condições de projeto e validação das propostas viáveis para posterior implementação.

3.1 HISTÓRICO DE FABRICAÇÃO DE IMPLEMENTOS *SIDER*

Conforme citado na introdução deste trabalho, a família de implementos *sider* passou por uma importante mudança na sua forma de montagem. Anteriormente os subconjuntos que compunham um implemento *sider* eram totalmente soldados e, após a mudança, a montagem passou a ser realizada com juntas aparafusadas e somente seus componentes possuem solda.

Um implemento *sider* é composto basicamente de um painel frontal e um quadro traseiro, fixados a base do implemento, e um teto, fixado ao painel frontal e quadro traseiro. Este tipo de implemento possui as laterais livres para carregamento, conforme ilustra a Figura 1, sua estrutura sofre esforços devido a torção gerada ao longo de seu comprimento, quando em rodagem.

Os subconjuntos painel frontal e quadro traseiro do conceito soldado tinham por característica sua extrema rigidez, mas tais subconjuntos com esta característica, quando utilizados na aplicação de implementos *sider*, apresentavam problemas de trinca e dificultavam o conserto ou reposição de peças danificadas.

Segundo informações repassadas pelo setor de Pós-Vendas da Randon Implementos, a média de solicitações de garantia pelo motivo de trincas no painel frontal ou no quadro traseiro, nos últimos cinco anos, foi de 15 implementos por ano, sendo que o conserto destes implementos era dificultado pela necessidade de remover a solda para substituir o item danificado e soldar novamente.

Levando em consideração os esforços sofridos pela estrutura de um implemento *sider*, a forma de montagem do painel frontal e quadro traseiro foram alteradas prevendo uniões aparafusadas e novos subconjuntos foram desenvolvidos para substituir aqueles soldados. As juntas aparafusadas, quando solicitadas em função dos esforços de torção característicos,

suportam as cargas impostas, por causa da aplicação de pré-carga nos parafusos, e não propiciam trincas nos subconjuntos.

Atualmente o painel frontal e o quadro traseiro do implemento *sider* são montados com uniões parafusadas, sendo assim, foi modelado de modo a conceber sobreposição das chapas que o compõem para permitir sua fixação utilizando parafusos e porcas. Desta forma a montagem dos conjuntos se tornou mais ágil, além de permitir manutenção e substituição de componentes danificados de forma facilitada, posteriormente pelo cliente.

O painel frontal e o quadro traseiro são fixados à base do implemento também por parafusos e porcas, sendo estas juntas aparafusadas o foco deste estudo. As juntas aparafusadas frontal e traseira do implemento *sider* versátil podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 – Juntas aparafusadas frontal e traseira de implemento *sider*.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

O quadro traseiro é fixado à base através do uso de parafusos M16x1,75 e M10x1,50 e suas respectivas porcas e tem grande área de apoio, logo esta junta aparafusada é resistente aos esforços e adequada às solicitações de esforço mecânico.

Já o painel frontal é fixado por parafusos M10x1,50 e porcas e possui área de apoio limitada em função de restrições de projeto. A aba da coluna não pode ser aumentada, pois diminuirá o vão livre lateral do implemento. Implementos *sider* tem por característica o carregamento lateral e quanto menor for o vão livre lateral, menor será a capacidade para carregamento.

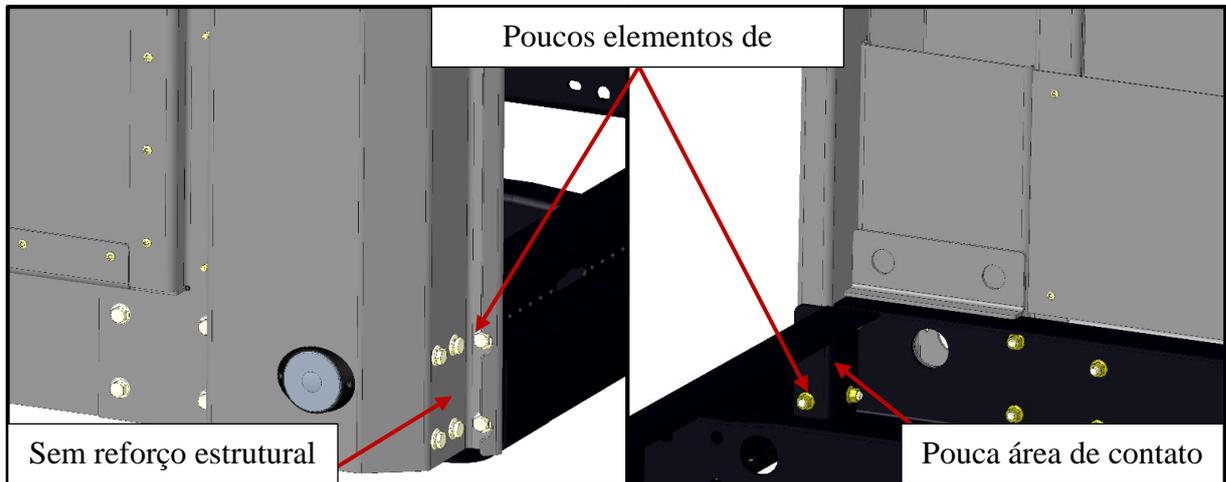
Sendo assim, a junta aparafusada frontal é crítica, pois apresenta as seguintes características:

- a) Utilizam-se parafusos de bitola pequena, comparando-se as bitolas M16 e M10;
- b) Possui poucos pontos de fixação, totalizando 6 elementos de fixação efetiva;
- c) Há pouca área de contato na junção entre painel frontal e chassi;

d) Não há reforços estruturais na região de fixação.

A Figura 8 mostra a estrutura da junta frontal atual do implemento *sider*.

Figura 8 – Formato da junta frontal atual.



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

A junta aparafusada frontal é a região foco do estudo, visto a criticidade acima explanada e a possibilidade de rompimento ser crítica a integridade do implemento.

Como forma de garantir a eficácia e validar a forma de montagem, de soldado para parafusado, a Randon Implementos realizou análises pelo método de elementos finitos (MEF), em setor próprio destinado a aplicação deste tipo de análise, e testes físicos, ao submeter o primeiro protótipo de implemento *sider* parafusado a teste de durabilidade no Campo de Provas.

3.1.1 Análise MEF e teste de durabilidade

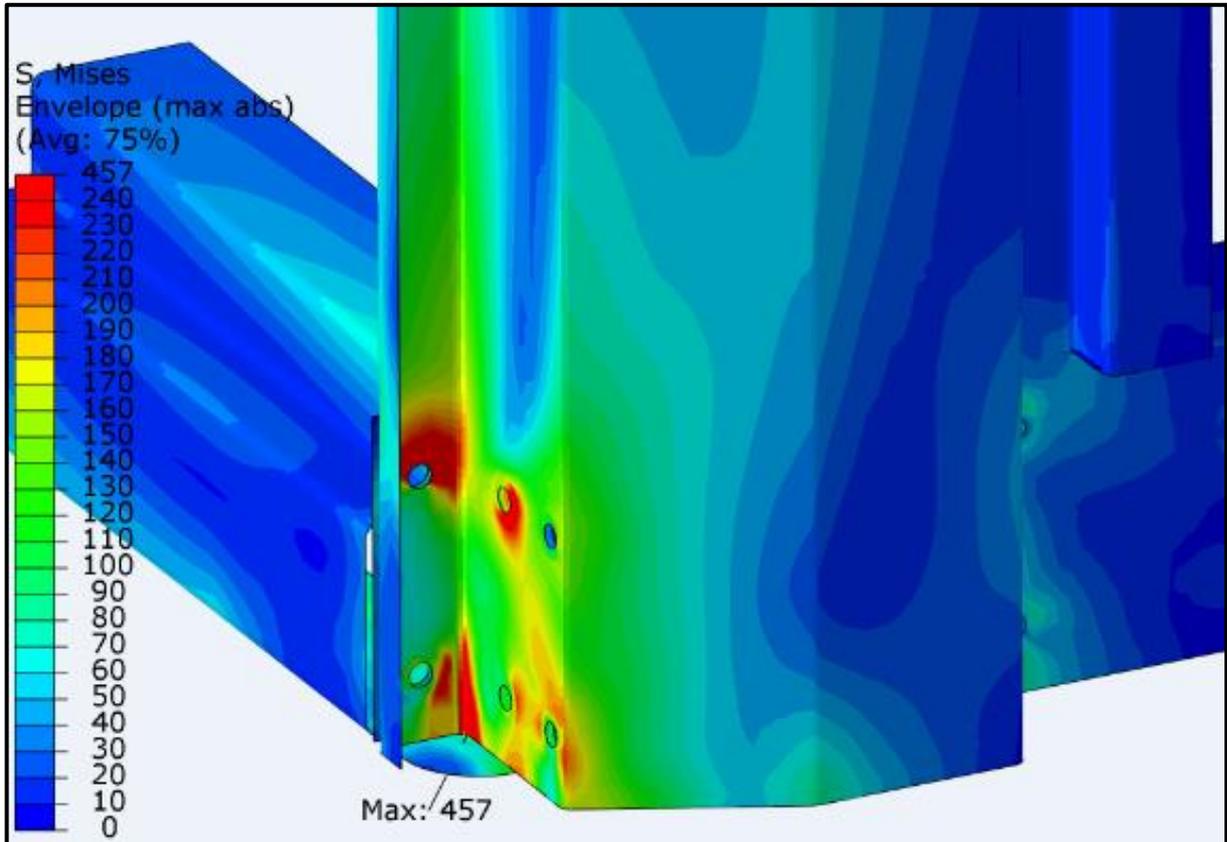
Para auxílio no desenvolvimento de novos produtos e conceitos de montagem, a Randon Implementos dispõe de um setor específico à análise de seus projetos pelo método de elementos finitos.

No desenvolvimento do projeto *sider* versátil, nova família de implementos *sider* montados de forma parafusada, a análise de elementos finitos foi aplicada como forma de validação parcial do projeto, sendo esta análise uma simulação das solicitações sofridas por um implemento *sider* em rodagem.

Na Figura 9, podem ser observadas as tensões de Von Mises na junta aparafusada do painel frontal atual que podem ser percebidas pela mudança de coloração conforme a

intensidade, partindo da cor azul, nas regiões sem tensões, até a cor vermelha, onde as máximas tensões ocorrem. Percebe-se que as máximas tensões estão concentradas justamente na região onde estão os parafusos da junta.

Figura 9 – Tensões na junta aparafusada frontal atual do *sider*.



Fonte: Randon Implementos (2016)

Após o projeto *sider* versátil ser validado pela análise de elementos finitos, o primeiro protótipo foi produzido e montado para envio ao Campo de Provas para realização do teste de durabilidade.

Os setores de engenharia da Randon Implementos e do Campo de Provas, em conjunto, definiram as metodologias e as formas de análise as quais o implemento *sider* seria submetido. Primeiro foram efetuados testes dinâmicos em pistas externas e internas do Campo de Provas, já com o implemento instrumentado, para a obtenção de sinais e validação dos dados da análise de elementos finitos. Após, foi realizado teste de durabilidade acelerada, na pista off-road, sendo que o implemento rodou 5000 km na condição carregado e mais 5000 km na condição vazio por cerca de 8 meses.

Na Figura 10 podem ser observadas evidências de concentração de tensões ocorridas na junta aparafusada frontal do *sider*: perda de pré-carga, cisalhamento de parafusos e

propagação de trincas a partir dos furos de fixação da junta.

Figura 10 – Evidências de concentração de tensões na junta aparafusada frontal do *sider*.



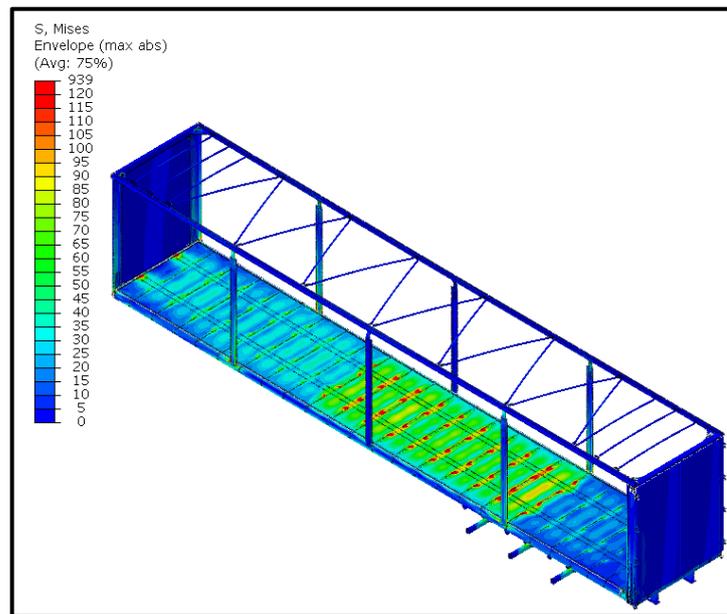
Fonte: Randon Implementos (2016)

A realização dos testes dinâmicos serviu para obtenção de sinais e verificação dos esforços sofridos pelo implemento. Depois destes testes, o implemento foi carregado para a realização dos testes de durabilidade avançada.

Após rodar por um período, os sinais obtidos foram analisados e constatou-se que a carga estava distribuída de forma incorreta gerando sobrecarga na região da suspensão. Para carregamento do implemento foram utilizados *pallets* 2,5 toneladas de sucata de aço e fardos de 1 tonelada de papelão.

A Figura 11 representa o carregamento inicial realizado no implemento, no qual os *pallets* de sucata foram concentrados ligeiramente a frente da região da suspensão. Este carregamento gera sobrecarga na suspensão e não distribui os esforços de carregamento ao longo do comprimento do implemento, sendo assim, não é o ideal para avaliar o desempenho estrutural.

Figura 11 – Carregamento inicial com sobrecarga.

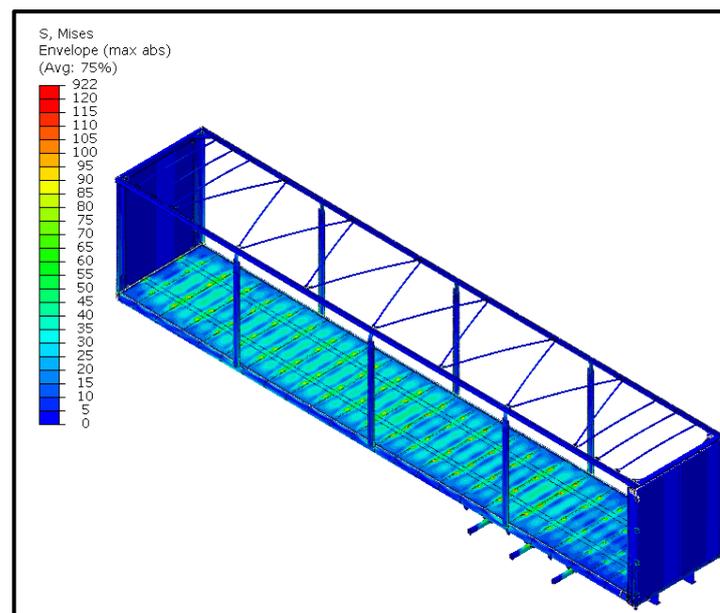


Fonte: Randon Implementos (2016)

O carregamento ideal é aquele que distribui a carga líquida total de forma uniforme ao longo de toda a extensão do implemento. Desta forma, foi solicitado que as cargas fossem redistribuídas de forma a produzir um carregamento mais uniforme possível, considerando os pallets de sucata e os fardos de papelão.

O modelo 3D que representa o carregamento uniforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Modelo 3D com carregamento uniforme.



Fonte: Randon Implementos (2016)

Após a redistribuição, os sinais gerados foram analisados novamente e os resultados

ficaram bem próximos a análise MEF, comprovando que a malha do modelo 3D reproduz de forma fiel a realidade dos carregamentos e concentrações de tensão. Desta forma, este modelo 3D pode ser utilizado para análises de alterações futuras, sem a necessidade de novos testes físicos.

3.2 MÉTODO DE TRABALHO

Como forma de organizar o projeto da nova junta aparafusada frontal do *sider* versátil, um método de trabalho foi definido, sendo suas etapas apresentadas na sequência, com uma breve explicação de cada atividade.

Primeiramente, os dados técnicos existentes sobre o desenvolvimento do conceito parafusado do projeto *sider* versátil, sendo estes a análise de elementos finitos e o teste de durabilidade, foram analisados a fim de obter informações sobre deformações, carregamentos e falhas na junta aparafusada frontal. A obtenção destes dados se fez importante para determinar as regiões críticas da junta, onde houveram as ocorrências de falha, e direcionar os esforços das etapas seguintes nestas regiões.

Com base nas informações técnicas obtidas, foram modeladas em *software* 3D as novas propostas de junta aparafusada para a região frontal. Além de considerar os pontos que sofreram as maiores deformações e falhas, também se levaram em consideração as restrições de projeto, sendo uma delas o vão livre lateral do implemento que não pode ser diminuído, e os materiais e elementos de fixação disponíveis para compor a nova junta.

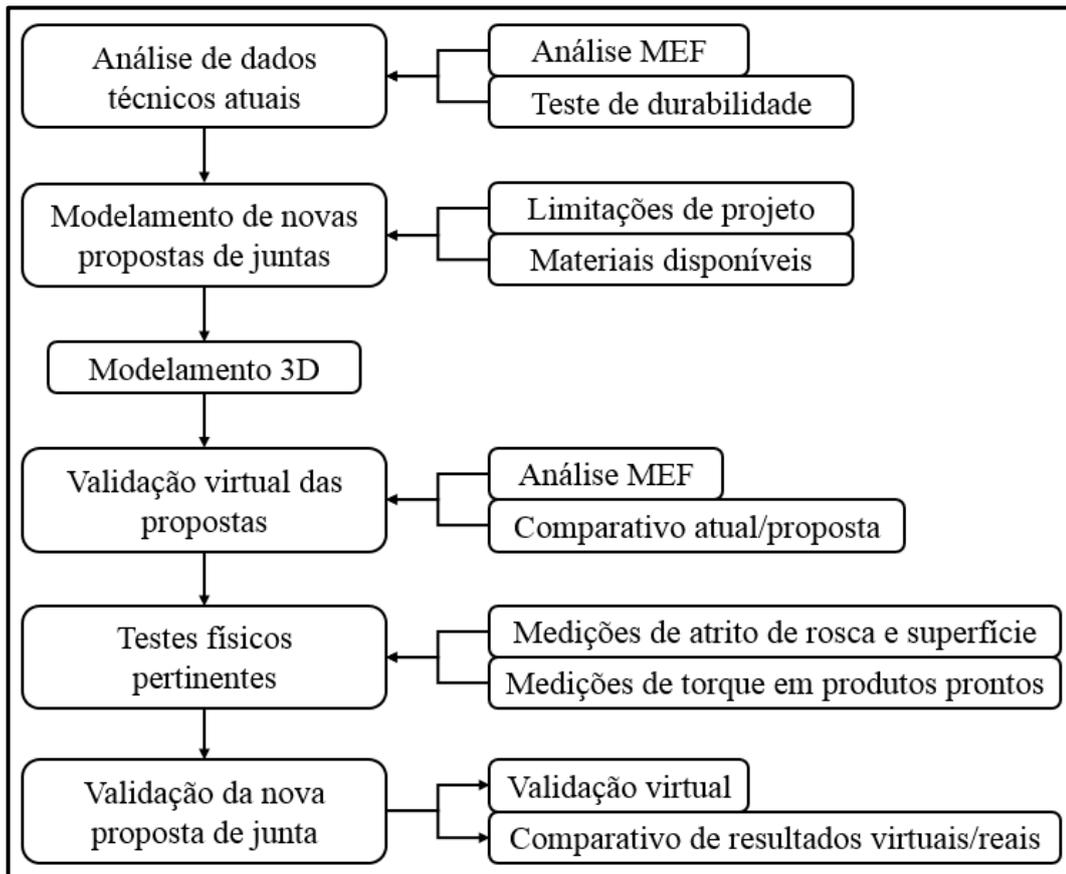
As novas propostas de junta aparafusada frontal foram submetidas a análise de elementos finitos, seguindo os mesmos critérios em que foi avaliada a junta atual, para que as tensões fossem comparadas, como forma de validação parcial para considerar as propostas viáveis.

Após a validação das propostas consideradas válidas para substituir a junta aparafusada frontal atual, testes físicos para determinar a pré-carga e os coeficientes de atrito foram realizados. Tais testes evidenciaram a influência da pintura padrão, utilizada nos implementos, na aplicação de pré-carga através dos torques de montagem.

Com a validação estrutural da nova junta e os valores de torque de montagem, recalculados em função das medições de atrito, obteve-se a validação final da proposta ao comparar-se estes resultados com os resultados da junta atual.

Um fluxograma representativo das etapas do método de trabalho, com a sequência de realização em forma de tópicos, pode ser observado na Figura 13, a seguir.

Figura 13 – Fluxograma representativo do método de trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo constam as etapas do desenvolvimento deste trabalho, descritas conforme sua realização. Desta forma, as atividades realizadas apresentam-se nesta ordem: modelamento das propostas, análises MEF comparativas, cálculos de dimensionamento e os resultados obtidos.

4.1 MODELAMENTO DAS PROPOSTAS DE NOVAS JUNTAS

Para o modelamento de propostas, limitações de projeto e aplicação foram respeitadas e a utilização de qualidades de matéria-prima de aço e elementos de fixação se restringiram aos disponíveis na empresa.

4.1.1 Limitações do projeto e materiais disponíveis

Para realizar alterações no projeto do *sider* versátil, existem características do produto que devem ser mantidas para não interferir na eficiência operacional, bem como, interfaces de montagem e geometrias com função estrutural.

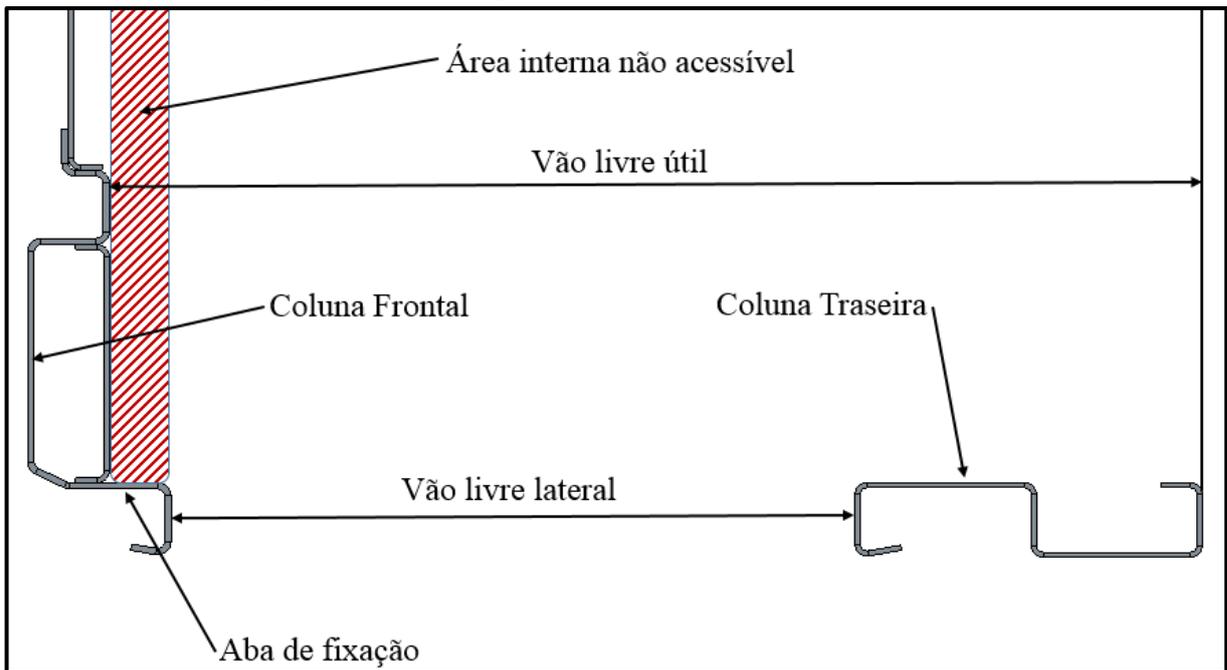
Também é necessário levar em consideração as matérias primas de aço e os elementos de fixação a serem utilizados que, preferencialmente, devem ser itens já desenvolvidos e utilizados pela empresa, visando a facilidade e rapidez na alteração do projeto e na sua fabricação na linha de produção.

Dentre as características de produto a serem mantidas, a com maior impacto operacional e de percepção de cliente é o vão livre lateral de carregamento, previamente citado e identificado na Figura 7.

A coluna frontal do *sider* versátil possui um recuo em sua geometria para possibilitar sua fixação à base do implemento, mas aumentar este recuo, visando maior área de contato e fixação, afeta diretamente o vão livre lateral de carregamento. A diminuição do vão livre lateral aumenta a área interna não acessível para acomodação da carga, ou seja, o vão livre útil é consideravelmente maior, mas não é possível utilizá-lo por completo ao realizar o carregamento lateral do implemento.

A Figura 14 exemplifica a questão da diminuição do vão livre lateral com relação ao aumento da aba de fixação da coluna frontal.

Figura 14 – Vista superior evidenciando o vão livre lateral.



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

O comprimento atual do vão de área interna não utilizável é de 67 mm. Esta dimensão, embora pareça pequena, gera um impacto no carregamento do implemento que pode ser analisado de duas formas:

- a) Ao multiplicar-se as medidas de comprimento não utilizado, largura e altura do implemento, considerando a largura de 2,60 metros e a altura interna de 2,77 m, se tem o volume de 0,4825 m³ não utilizado no carregamento.
- b) Para distribuição dos *pallets* no implemento, é considerado um espaçamento padrão de 20 mm entre eles, possibilitando acomodá-los mesmo a carga excedendo suas dimensões. Seguindo esta lógica, este comprimento não utilizado poderia ser utilizado como folga entre quatro *pallets*.

Com relação às matérias primas de aço, a empresa possui ampla gama disponível para utilização, com diferentes limites de escoamento, sendo os mais comumente utilizados os de 250 MPa, 300 MPa, 350 MPa e 380 MPa. Sendo que cada uma destas chapas, com diferentes limites de escoamento, possui diversas espessuras disponíveis que variam de 1,5 mm até 25,4 mm.

O mesmo ocorre com elementos de fixação, a gama é diversificada em função de bitolas, comprimentos e classes de resistência. Sendo sempre necessária a verificação destas características em função da aplicação a ser utilizada tal junta aparafusada.

4.1.2 Propostas e justificativas

Levando-se em consideração as limitações, propostas de alteração para a junta frontal foram modeladas para que fossem submetidas a análises MEF, posteriormente.

Com relação aos elementos de fixação, a proposta inicial foi de aumentar seu diâmetro, além de considerar a utilização de uma classe de resistência superior. Nas propostas modeladas, várias bitolas de elementos de fixação foram consideradas, mas a decisão sobre eles foi refinada com cálculos de dimensionamento.

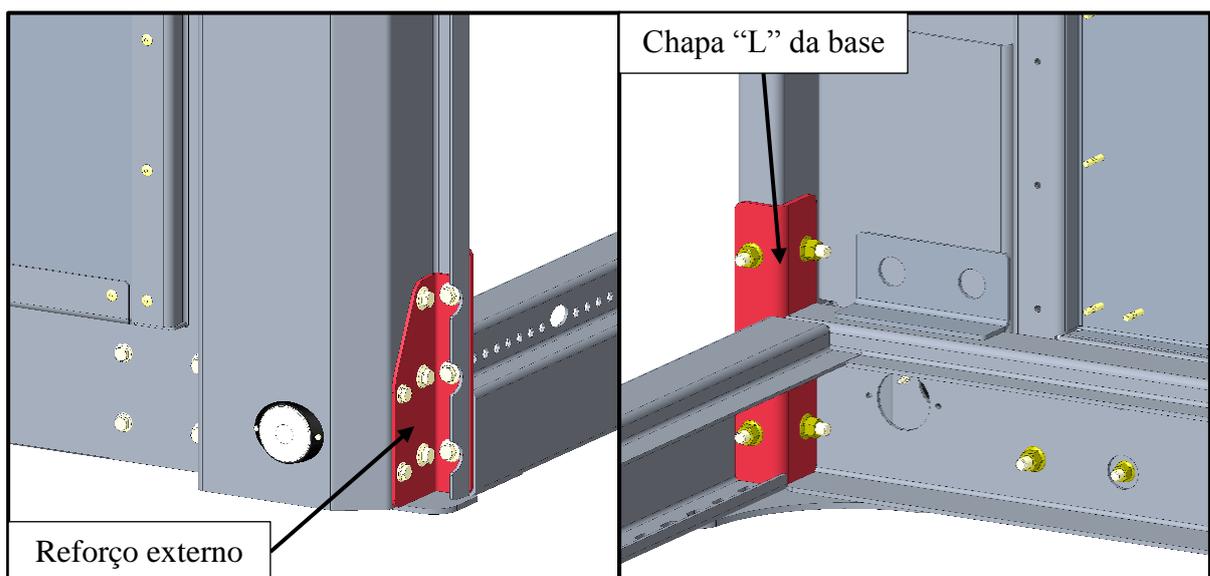
Deste modo, as propostas a seguir estão direcionadas ao formato da junta, aumento na quantidade de pontos de fixação e inserção de reforços nos pontos críticos.

A primeira proposta considerou as seguintes modificações:

- Chapa de reforço externo abrangendo todos os pontos de fixação, com o intuito de aumentar a resistência com o aumento na espessura da junta;
- Aumento na altura da chapa “L” soldada na base do implemento, prevendo 3 alturas de pontos de fixação;
- Aumento da bitola dos elementos de fixação de M10 para M12.

As peças com as características alteradas, em vermelho, podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 – Peças com alterações da proposta 1



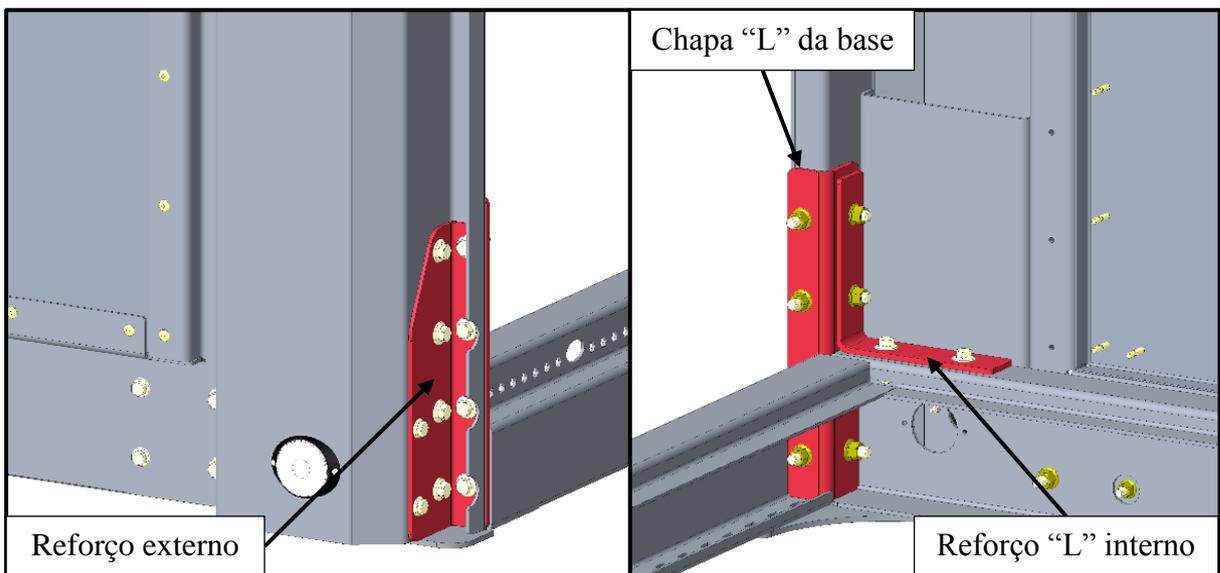
Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

A segunda proposta propõe alterações maiores nas dimensões e pontos de fixação:

- a) Chapa de reforço externo abrangendo todos os pontos de fixação, com o intuito de aumentar a resistência com o aumento na espessura da junta;
- b) Aumento na altura da chapa “L” soldada na base do implemento, prevendo 4 alturas de pontos de fixação;
- c) Reforço “L” interno prevendo pontos de fixação no perfil frontal da base;
- d) Aumento da bitola dos elementos de fixação de M10 para M16.

As modificações sugeridas pela segunda proposta de alteração podem ser observadas na Figura 16.

Figura 16 – Peças com alterações da proposta 2



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Estas duas propostas reúnem modificações que visam a melhoria estrutural da junta, mas não alteram completamente a geometria inicial das colunas frontais, logo as características de projeto são mantidas e facilitam a modificação do projeto e a fabricação na linha de produção.

Foi definido que estas duas propostas passariam pelas análises MEF inicialmente e, caso não fossem adequadas, novas propostas seriam modeladas.

Dentre estas duas propostas, a primeira foi priorizada para análise, pois era a que continha menor número de peças agregadas e modificações. Na sequência, a segunda passaria pela análise MEF, caso a primeira fosse descartada.

Os resultados obtidos da análise MEF e o comparativo com o formato inicial da junta aparafusada podem ser verificados a seguir.

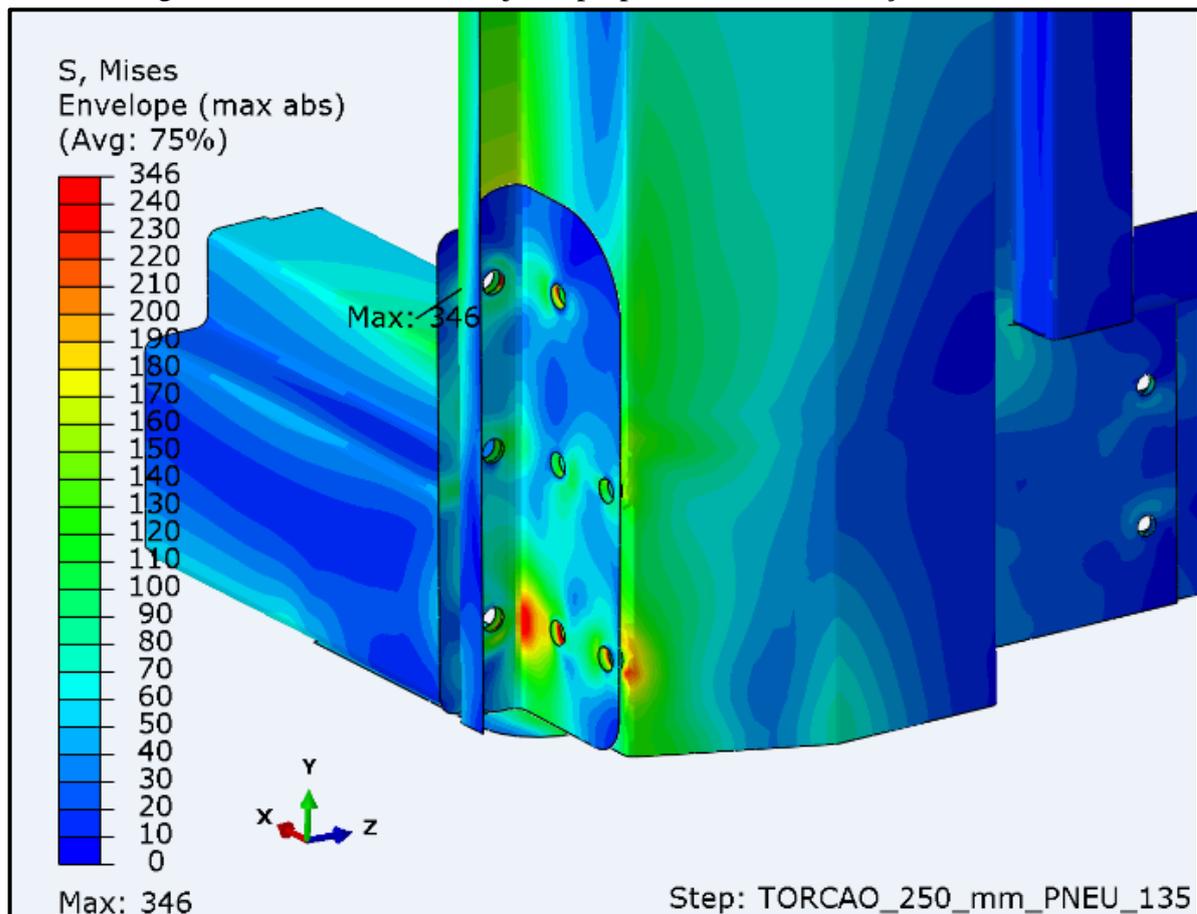
4.2 ANÁLISES MEF COMPARATIVAS

Com o objetivo de verificar a eficiência das alterações propostas e validá-las, o modelo 3D com malha refinada, segundo os dados da instrumentação do primeiro protótipo, foram alteradas conforme a proposta 1. Desta forma, foi possível comparar os resultados da junta atual com os resultados da junta proposta.

Seguindo o mesmo padrão anterior de análise, a proposta foi analisada sob esforços de flexão, em que são verificadas as concentrações de tensão no implemento com a máxima carga líquida possível, e esforços de torção, no qual é aplicado um deslocamento de 250 mm no sentido vertical em um dos lados da suspensão do implemento com a máxima carga líquida.

A distribuição e concentração de tensões resultantes podem ser observadas na Figura 17, que mostra a junta no lado externo do implemento.

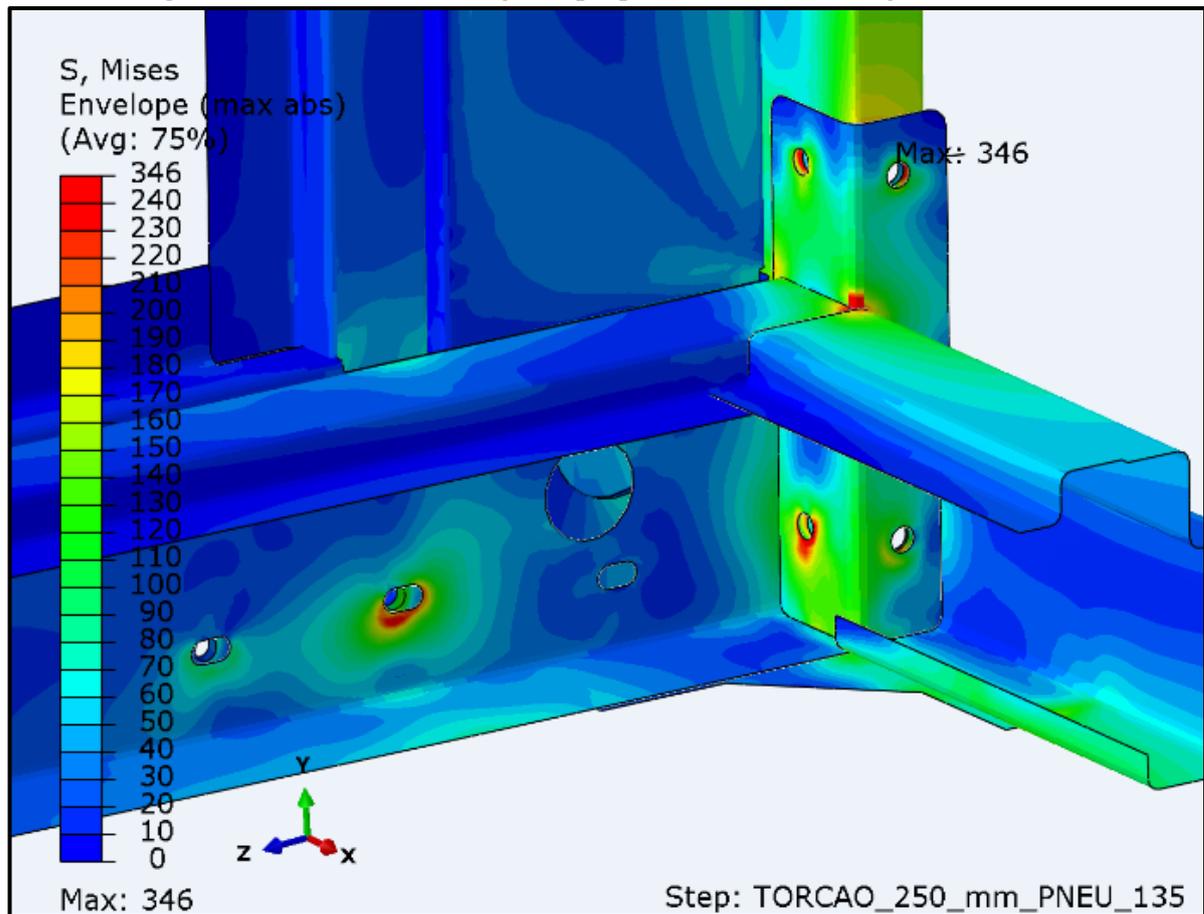
Figura 17 – Vista externa da junta proposta com concentrações de tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

E na Figura 18, podem ser observadas a distribuição e concentração de tensões da junta na parte interna do implemento.

Figura 18 – Vista interna da junta proposta com concentrações de tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Ao se verificar os resultados obtidos na análise MEF da proposta 1 e em comparação com os resultados obtidos pelo formato de junta anterior, evidenciados na Figura 8, percebe-se que as concentrações de tensão são consideravelmente menores e estão distribuídas de forma mais uniforme ao longo da estrutura.

A melhora estrutural proporcionada pela proposta 1 fica evidenciada ao se comparar os valores de pico de concentração de tensões. O formato anterior da junta registrou um pico de concentração de tensões de 457 MPa, enquanto a maior concentração de tensões registrada na proposta 1 foi de 346 MPa, justamente na região que foi estruturada com um reforço externo e fixado com um parafuso de bitola maior.

Propostas com aumentos maiores no comprimento das peças de reforço e bitolas maiores de parafuso também foram testadas. Algumas destas propostas ficaram com concentrações de tensão ainda menores, mas se mostraram inviáveis devido a dificuldades de acesso de montagem. Como exemplo, pode ser citada a utilização de parafusos M16 em que haveria interferências de acesso do ferramental para sua fixação. Os resultados de todas as propostas podem ser verificados no Apêndice A.

Considerando-se os materiais disponíveis para utilização e os resultados obtidos na análise MEF, a proposta 1 foi aprovada, desde que sua fabricação fosse realizada utilizando as qualidades de aço com limite de escoamento de 350 MPa ou 380 MPa, visto que tais materiais são mais resistentes que o pico de concentração de tensões de 346 MPa.

4.3 DIMENSIONAMENTO DA JUNTA APARAFUSADA

Com o intuito de definir de forma mais concisa os elementos de fixação utilizados, o roteiro de cálculo definido pela Metalac (201-?) foi utilizado. Este roteiro de cálculo baseia-se na norma alemã VDI 2230 (2003) e suas tabelas.

A norma alemã define valores médios padrão para os coeficientes de atrito de rosca e de atrito de superfície. Medições foram realizadas em um equipamento Determinador de Torque e Tensão para obter os coeficientes de atrito de rosca e de superfície na aplicação do *sider*.

Com os resultados das medições, o procedimento de cálculo foi refeito para definir os novos torques de montagem.

Por fim, foram realizadas medições em implementos *sider* com tempo de pátio, para conferência dos torques de montagem.

4.3.1 Definição dos parafusos de fixação da junta

Com base na análise feita do histórico de desenvolvimento e fabricação do implemento *sider*, verificou-se a ocorrência de perda de pré-carga nos parafusos da junta frontal do produto que foi submetido a testes de durabilidade acelerada, além do cisalhamento de alguns destes.

Devido a estes problemas, ficou evidente a necessidade de aumentar a bitola dos parafusos e, também, de verificar os torques de aperto utilizados nestas juntas. Para definir a bitola e a classe de resistência dos parafusos a serem utilizados, os valores das tabelas 1 e 3 da norma VDI 2230 foram considerados. As tabelas da VDI 2230 podem ser encontradas no Anexo C.

Considerando os valores das tabelas, ficou definida a utilização de parafusos de bitola M12 com passo de rosca de 1,5 mm e classe de resistência 10.9. Para tal decisão, foram analisados os parafusos de fixação disponíveis na empresa para utilização e seus valores tabelados de pré-carga. Levando em consideração um coeficiente de atrito de rosca $\mu_G = 0,12$ e um coeficiente de atrito superficial $\mu_K = 0,24$, os valores de pré-carga são:

- a) Parafuso M10x1,5 mm e classe 8.8 – pré-carga de 24,7 kN;

- b) Parafuso M12x1,75 mm e classe 8.8 – pré-carga de 35,9 kN;
- c) Parafuso M12x1,5 mm e classe 10.9 – pré-carga de 56 kN.

O parafuso utilizado até o momento era o M10x1,5 mm, classe 8.8, e sua substituição pelo parafuso M12x1,5 mm, classe 10.9, foi definida com base no aumento de, aproximadamente, 126% no valor de pré-carga suportada. Bitolas maiores de parafusos não foram consideradas devido às interferências de montagem observadas no modelamento das novas propostas.

4.3.2 Roteiro de cálculo com base na VDI 2230

Com a intenção de entender a influência dos coeficientes de atrito de rosca e atrito de superfície na definição dos torques de aperto, os cálculos do roteiro definido pela Metalac (201-?) foram refeitos para, posteriormente, serem calculados com os coeficientes de atrito medidos em função da pintura utilizada no implemento *sider*.

As considerações feitas em cada etapa do roteiro de cálculo serão explicadas, visto a necessidade de ajustá-las às características deste estudo. Algumas etapas do roteiro foram desconsideradas para tornar os cálculos genéricos à aplicação em qualquer junta aparafusada que se tenha a intenção de analisar.

A etapa 1 determina o cálculo da pressão superficial dos elementos de fixação para que o valor encontrado seja comparado ao limite de pressão superficial dos materiais que compõem a junta. Como os elementos de fixação possuem a característica de serem fusíveis mecânicos, devem falhar antes que os materiais que compõem a junta, o valor encontrado para os elementos de fixação deve ser menor em comparação com o valor do material.

Para o parafuso M12x1,5 – classe 10.9, o valor de pressão superficial obtido foi de $P_{máx} = 156,36 \text{ N/mm}^2$, enquanto o limite de pressão superficial do aço utilizado na junta é de $P_G = 260 \text{ N/mm}^2$.

A etapa 2 consiste na definição do fator de aperto em função equipamento utilizado para fixar os parafusos na junta aparafusada. Este valor foi obtido na tabela 8 da VDI 2230, sendo seu valor de $\alpha_A = 1,7$.

O cálculo da etapa 3 define a força mínima necessária para evitar a abertura das interfaces da junta e acaba por restringir os cálculos a uma junta aparafusada específica. Conforme definido previamente, esta etapa não será considerada para que os cálculos sejam genéricos a qualquer junta aparafusada.

Os cálculos da etapa 4 são para obtenção da resiliência dos parafusos, δ_s , e dos materiais da junta, δ_p . Tais cálculos são baseados nas características dos materiais e nas áreas de atuação dos elementos de fixação e os valores obtidos são utilizados para obtenção da força e do torque de montagem.

A etapa 5 define o cálculo da perda de pré-carga, F_Z , em função das dimensões da junta. Tal valor também será utilizado para obtenção da força e do torque de montagem.

Por fim, na etapa 6 são calculados os valores de força, F_M , e torque de montagem, M_A . Os torque de montagem obtidos pelos cálculos, considerando $\mu_{Gmin} = 0,08$ e $\mu_{Gmax} = 0,24$, são respectivamente $M_{Amin} = 203,45$ N/m e $M_{Amax} = 378,42$ N/m.

As etapas seguintes do roteiro consideram esforços específicos da junta para conferência dos valores calculados até o momento, sendo que o objetivo era a obtenção dos torques de montagem, tais etapas serão desconsideradas.

Os valores calculados para todas as variações de elementos de fixação considerados podem ser verificados no Apêndice B.

4.3.3 Medições de atrito das juntas aparafusadas

Para a obtenção dos coeficientes de atrito de rosca e atrito de superfície, composições de parafusos, porcas, arruelas e contra-peças com a pintura padrão utilizada no implemento *sider* foram submetidas a teste em um equipamento Determinador de Torque e Tensão.

Este equipamento possui um conjunto de sensores e células de carga que fazem a medição da força, do torque e do ângulo de aperto e, com base nestes dados, determina os coeficientes de atrito da junta.

A tabela 1 relaciona as composições de parafusos, porcas, arruelas e contra-peças foram testadas.

Tabela 1 – Composições de parafusos, porcas, arruelas e contra-peças.

(continua)

	Parafuso	Classe de Resistência	Contra-peça	Fixador	Quantidade de amostras
a	M10x1,5 mm	8.8	com pintura	arruela lisa + porca com inserto de nylon	3 composições iguais
b	M10x1,5 mm	8.8	sem pintura	arruela lisa + porca com inserto de nylon	2 composições iguais
c	M10x1,5 mm	8.8	com pintura	porca flangeada amassada	3 composições iguais

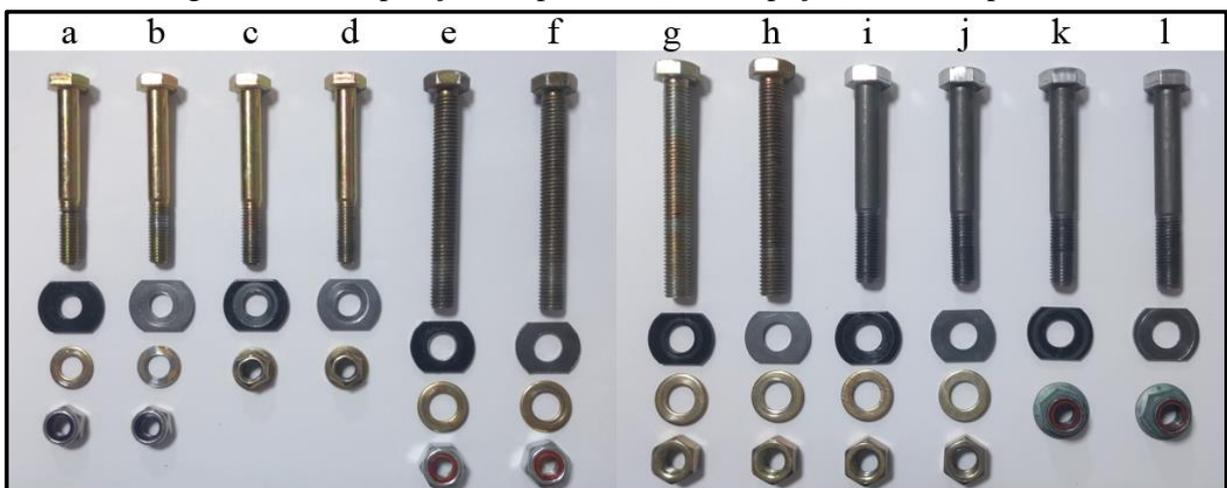
(conclusão)

	Parafuso	Classe de Resistência	Contra-peça	Fixador	Quantidade de amostras
d	M10x1,5 mm	8.8	sem pintura	porca flangeada amassada	2 composições iguais
e	M12x1,75 mm	8.8	com pintura	arruela lisa + porca com inserto de nylon	3 composições iguais
f	M12x1,75 mm	8.8	sem pintura	arruela lisa + porca com inserto de nylon	2 composições iguais
g	M12x1,75 mm	8.8	com pintura	arruela lisa + porca simples	3 composições iguais
h	M12x1,75 mm	8.8	sem pintura	arruela lisa + porca simples	2 composições iguais
i	M12x1,5 mm	5.8	com pintura	arruela lisa + porca simples	3 composições iguais
j	M12x1,5 mm	5.8	sem pintura	arruela lisa + porca simples	2 composições iguais
k	M12x1,5 mm	5.8	com pintura	porca flangeada com inserto de nylon	3 composições iguais
l	M12x1,5 mm	5.8	sem pintura	porca flangeada com inserto de nylon	2 composições iguais

Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Na Figura 19, todas as composições de parafusos, porcas, arruelas e contra-peças podem ser observadas.

Figura 19 – Composições de parafusos, contra-peças, arruelas e porcas



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

O equipamento DTT, com base nos dados dos parafusos testados, faz o aperto do parafuso e da porca, sobre a contra-peça, até o limite de resistência do parafuso. De forma

simultânea ao aperto dos elementos de fixação, faz a medição da força e do torque de montagem em função do ângulo de aperto e gera um gráfico com estas informações. Os gráficos de todas as composições de elementos de fixação podem ser analisados no Apêndice C.

Ao todo, foram testadas 30 composições com as variações citadas na Tabela 1. Todas estas variações possibilitaram o entendimento dos benefícios de algumas características dos elementos de fixação. Por exemplo, porcas amassadas ou com inserto de nylon propiciam uma pré-carga inicial entre 5 kN e 10 kN, evidenciadas nos gráficos dos parafusos M12. Esta pré-carga inicial propicia benefícios a integridade da junta quando montada.

Além do gráfico, o *software* do equipamento DTT gerou uma planilha com todos os dados da medição, que incluem os coeficientes de atrito de superfície e de atrito de rosca, sendo estes os valores utilizados para recalculer a janela de torque para os parafusos da junta frontal do implemento *sider*.

A tabela 2 mostra os valores obtidos das 5 composições de parafusos M12x1,5 mm, classe 5.8, contra peça pintada e porca flangeada com inserto de nylon. As tabelas das demais composições de elementos de fixação podem ser observadas no Apêndice D.

Tabela 2 – Valores medidos das composições de parafusos M12x1,5 mm e porcas flangeadas com inserto de nylon.

UCS - Universidade de Caxias do Sul					Relatório de coeficiente de atrito				
Peça: M12x1,5x90					C.Q.: M12,1,5 F				
Data Teste: 8/5/2018 21:21:34					Cliente: TCC Victor				
Data Relatório: 8/5/2018					Amostras: 5 de 5				
Composição	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	μ_k	Média	μ_G	Média	
1	com pintura	40,40	86,10	56,90	29,20	0,18	0,19	0,07	0,09
2	com pintura	40,30	93,40	53,90	39,50	0,19		0,10	
3	com pintura	40,20	92,60	55,80	36,80	0,19		0,09	
4	sem pintura	40,30	125,10	55,40	69,70	0,26	0,25	0,17	0,16
5	sem pintura	40,40	116,00	54,80	61,20	0,24		0,15	

Fonte: Adaptado de UCS (2018)

De forma comparativa, o valor do coeficiente de atrito de rosca padrão adotado pela VDI 2230 é de 0,12, enquanto o coeficiente de atrito de superfície varia entre os valores de 0,08

e 0,24. Os valores médios obtidos nas medições evidenciam a diferença destes coeficientes, em função da pintura padrão utilizada no implemento, e a necessidade de recalculer os torques de montagem. Tais valores foram utilizados para recalculer a janela de torque dos parafusos da nova proposta de junta aparafusada frontal.

Devido a criticidade da aplicação com a utilização de elementos de fixação, o ideal seria realizar estes testes com uma amostragem maior de composições e realizar uma análise de desvio padrão, de modo a aumentar a confiabilidade dos valores adotados para os cálculos de dimensionamento. Como a amostragem de composições era pequena, optou-se pela média simples dos valores medidos, visto a variação entre o máximo e o mínimo ser baixa.

4.3.4 Roteiro de cálculo com base nos atritos medidos

Após a realização das medições, os coeficientes de atrito de rosca e de superfície específicos para o tipo de pintura utilizado foram obtidos e, com estes, os cálculos para redefinir a janela de torques de montagem foram refeitos.

Seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente, mas substituindo os coeficientes de atrito de rosca e de superfície para os valores medidos de, respectivamente, $\mu_G = 0,09$ e $\mu_K = 0,19$ pode-se fazer a seguinte comparação:

- a) $M_{A\text{mín}} = 203,45 \text{ N.m}$;
- b) $M_{A\text{medido}} = 318,15 \text{ N.m}$;
- c) $M_{A\text{máx}} = 378,42 \text{ N.m}$.

Percebe-se que o valor de torque calculado em função dos coeficientes de atrito medidos encontra-se entre os valores de torque calculados pela norma, logo a janela de torque deve ser redefinida considerando o valor calculado como o valor inicial. Desta forma, a nova janela de torque fica definida entre $M_{A\text{medido}} = 318,15 \text{ N.m}$ até $M_{A\text{máx}} = 378,42 \text{ N.m}$.

4.3.5 Aferição dos torques de montagem da nova junta frontal

Além de remodelar o formato da junta aparafusada frontal, definir nova bitola e classe de resistência dos elementos de fixação e redefinir a janela de torques de aperto dos elementos de fixação, em função da pintura padrão utilizada, foi importante verificar o torque de aperto nos implementos *sider* com considerável tempo de pátio.

A seguir, na Tabela 3, é possível analisar os torques de montagem mensurados e o

tempo em pátio de cada implemento a espera de retirada.

Tabela 3 – Torques de montagem mensurados em produtos à espera de retirada

Número de série	Tempo em pátio	Junta frontal esquerda	Junta frontal direita
804031	5 dias	110 N.m	105 N.m
		110 N.m	105 N.m
		105 N.m	110 N.m
794947	62 dias	95 N.m	110 N.m
		65 N.m	85 N.m
		75 N.m	90 N.m
799906	18 dias	105 N.m	110 N.m
		85 N.m	110 N.m
		110 N.m	70 N.m
799888	20 dias	85 N.m	110 N.m
		110 N.m	95 N.m
		110 N.m	65 N.m
799892	18 dias	110 N.m	120 N.m
		110 N.m	110 N.m
		110 N.m	110 N.m

Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Baseando-se nos cálculos realizados, percebe-se que os torques aferidos nos implementos em pátio são inferiores às janelas de torque de ambos os parafusos de bitola M12 analisados. Os torques baixos nestas uniões facilitam a perda de pré-carga, sendo uma possível causa do afrouxamento destas juntas, prejudicando a eficiência dos elementos de fixação.

Ajustes devem ser realizados nas aparafusadeiras pneumáticas e elétricas utilizadas na linha de montagem, para que seja aplicado o torque ideal nestas uniões e a junta aparafusada exerça a função para a qual foi modelada e dimensionada.

Percebe-se, também, a variação dos torques aplicados nas juntas de um mesmo implemento, por exemplo o de número de série 799888. Esta variação evidencia a necessidade de considerar o fator de aperto, em função do dispositivo utilizado, nos cálculos de dimensionamento da junta.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos resultados obtidos em cada etapa desenvolvida neste trabalho, a

proposta 1 foi validada na análise MEF ao evidenciar redução na concentração de tensões de 457 MPa para 346 MPa. Para garantir o comportamento da junta, a qualidade de aço utilizada deve ser uma com limite de escoamento de 350 MPa ou 380 MPa, no mínimo.

Os novos elementos de fixação definidos foram os de bitola M12x1,5 – classe 10.9, devido ao aumento na pré-carga de 126%, de 24,7 kN para 56 kN, lembrando que esta definição se baseou nos valores tabelados pela norma VDI 2230 (2003).

E, por fim, a janela de torque foi redefinida considerando os coeficientes de atrito medidos em função da pintura do implemento *sider*. O valor inicial da janela de era $M_{A\text{mín}} = 203,45$ N.m e passou a ser $M_{A\text{medido}} = 318,15$ N.m. O valor final manteve-se $M_{A\text{máx}} = 378,42$ N.m.

Com os resultados obtidos, espera-se um bom comportamento da junta aparafusada como um todo, pois a estrutura da proposta 1 permite melhor distribuição das tensões impostas e os elementos de fixação foram redefinidos para atender adequadamente as solicitações. Além de considerar a resistência dos parafusos, os torques de montagem foram recalculados para garantir a eficiência da pré-carga de cada composição de elementos de fixação.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho se encerra após alcançar o objetivo geral definido, a implementação de nova junta aparafusada frontal com melhor desempenho estrutural, em comparação à condição inicial.

Para tanto, o histórico do implemento *sider* e todas as informações, sendo estas a análise MEF e o teste de durabilidade, foram minuciosamente analisados com o intuito de compreender a complexidade de operação da junta aparafusada frontal e definir um caminho e suas limitações para remodelar tal junta.

Após esta análise inicial, propostas de alteração da junta aparafusada frontal foram modeladas e submetidas a análise MEF para obtenção da concentração de tensões. Os dados numéricos obtidos foram comparados aos valores equivalentes da junta aparafusada inicial e acabaram por validar a proposta 1 com uma redução nos esforços de concentração de tensões de 457 MPa para 346 MPa.

Na sequência, se fez necessário redefinir os elementos de fixação da junta, pois de nada adiantaria remodelar a mesma, se a perda de pré-carga continuasse ocorrendo nos parafusos. Os novos parafusos foram definidos com base nos valores e tabelas da norma VDI 2230 e passaram da bitola M10x1,5 mm, classe de resistência de 8.8, para a bitola M12x1,5 mm, classe de resistência de 10.9. Tal mudança propiciou aumento da pré-carga de 126%, de 24,7 kN para 56 kN.

Além de redefinir os parafusos de fixação, testes físicos para medição dos coeficientes de atrito de rosca e atrito de superfície foram realizados com a intenção de obter estes valores condizentes com a pintura padrão utilizada nos implementos *sider*. Com os valores obtidos, foi possível verificar que o valor inicial da janela de torque, calculado em função dos valores adotados pela norma, ficava abaixo do valor calculado em função dos valores obtidos nos testes. Desta forma, o valor de torque inicial de 203,45 N.m passou a ser de 318,15 N.m

Tendo em vista as atividades realizadas e os resultados obtidos, pode-se sugerir como trabalhos futuros a implementação do mesmo roteiro de cálculos para outras aplicações de juntas aparafusadas em outros segmentos do setor de transportes rodoviários. Neste mesmo formato de junta frontal de implementos *sider*, poderia ser avaliado o impacto e o comportamento estrutural da retirada, ou quebra, de um ou mais parafusos de fixação. E outra sugestão seria o estudo de utilização de outro tipo de elemento de fixação para as juntas em questão, sendo a utilização de rebites estruturais uma boa possibilidade.

REFERÊNCIAS

- ARGATOV, Ivan; SEVOSTIANOV, Igor. Health monitoring of bolted joints via electrical conductivity measurements. **International Journal Of Engineering Science**. Las Cruces, p. 874-887. 26 jun. 2010. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722510001035?via=ihub>>. Acesso em: 14 set. 2017.
- BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre: Editora AMGH Ltda, 8ª ed., 2011.
- COLLINS, Jack A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção da Falha**. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. 740 p.
- CROCCOLO, D.; AGOSTINIS, M. de; VINCENZI, N.. Failure analysis of bolted joints:: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship. **Engineering Failure Analysis**. Bologna, p. 364-373. 1 jan. 2011. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630710001676?via=ihub>>. Acesso em: 14 set. 2017.
- FLEURY, Paulo Fernando; WANKE, Peter; FIGUEIREDO, Kleber Fossati. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e recursos**. Rio de Janeiro: Atlas, 2013. 488 p.
- GRIZA, Sandro. **Efeito do torque na vida em fadiga de uniões parafusadas**. 2000. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel**. 4 ed. Genebra, Swi: Iso, 2009. 62 p.
- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 500 p.
- METALAC SPS IND. COM. LTDA. (Sorocaba). **Comportamento das Juntas Rigidamente Fixadas por Parafusos**. Sorocaba: Metalac Sps, 201-?. 166 p.
- MINETTO, Roberto Tadeu. **Estudo do uso da liga Ti-50,67at%Ni com efeito de memória de forma na minimização de perdas de pré-carga axial em juntas fixadas por parafusos**. 2010. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- NOGUEIRA, C. E. R. C.; MASSAROPPI JUNIOR, E.; DIAS, H. P. G.. **Determinação da rigidez de flanges em uniões parafusadas sob tensão e validação pelo método dos elementos finitos**. In: Congresso nacional de engenharia mecânica, 8., 2014, Uberlândia. **CONEM 2014**. Uberlândia: Abcm, 2014. p. 1 - 10. Disponível em:
<<http://www.swge.inf.br/siteCONEM2014/anais/PDFS/CONEM2014-1863.PDF>>. Acesso em: 14 set. 2017.

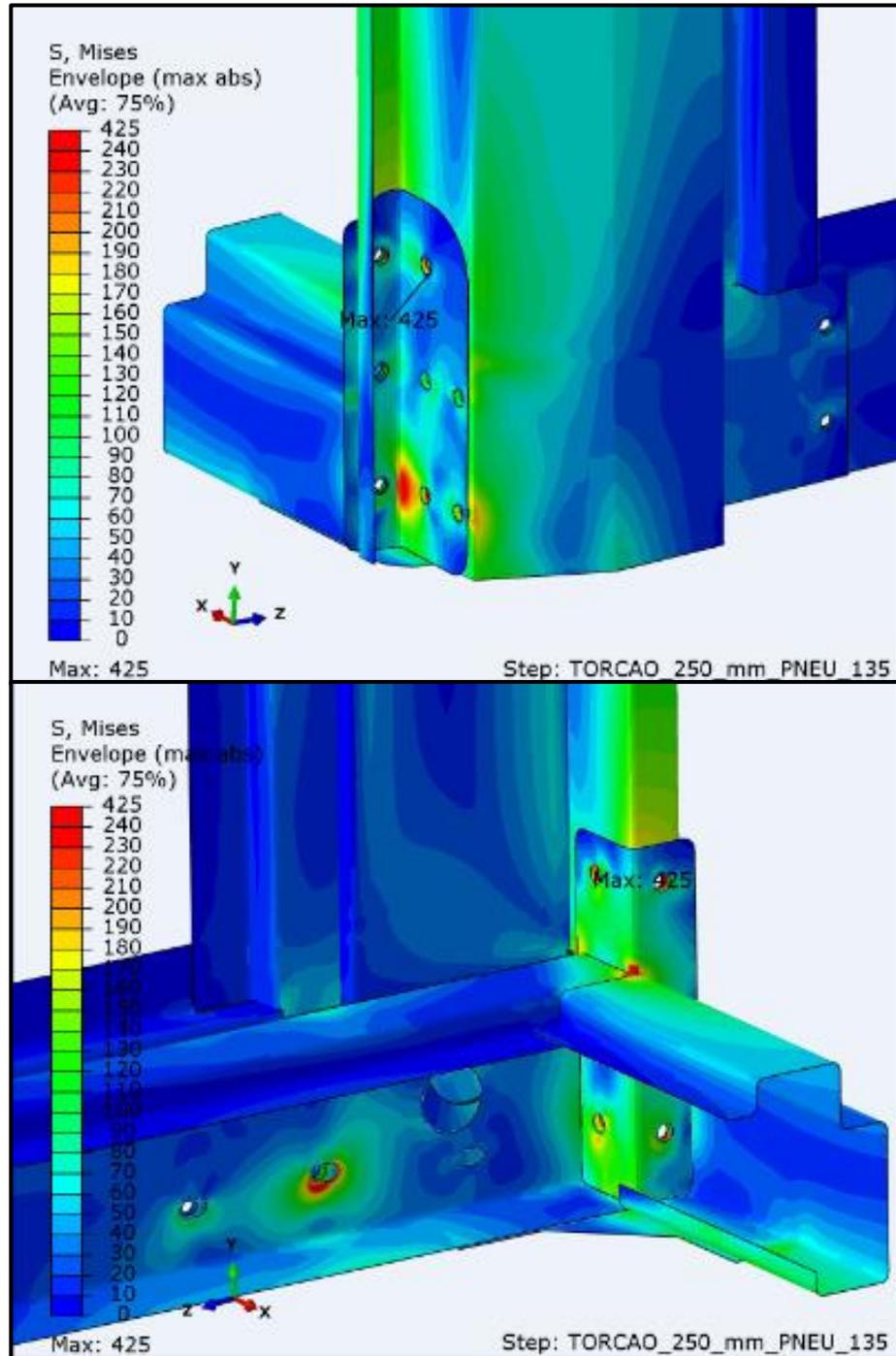
NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2ª ed., 2004.

PRIMOLINI, Alexandre. O papel dos revestimentos em juntas aparafusadas. **Revista do Parafuso**, São Bernardo do Campo, v. 1, n. 57, p.1-5, 02 jun. 2016. Bimestral. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=904>>. Acesso em: 14 set. 2017.

THE ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS. **VDI 2230**: Systematic calculation of high duty bolted joints Joints with one cylindrical bolt. Düsseldorf, Ger: Vdi, 2003. 172 p.

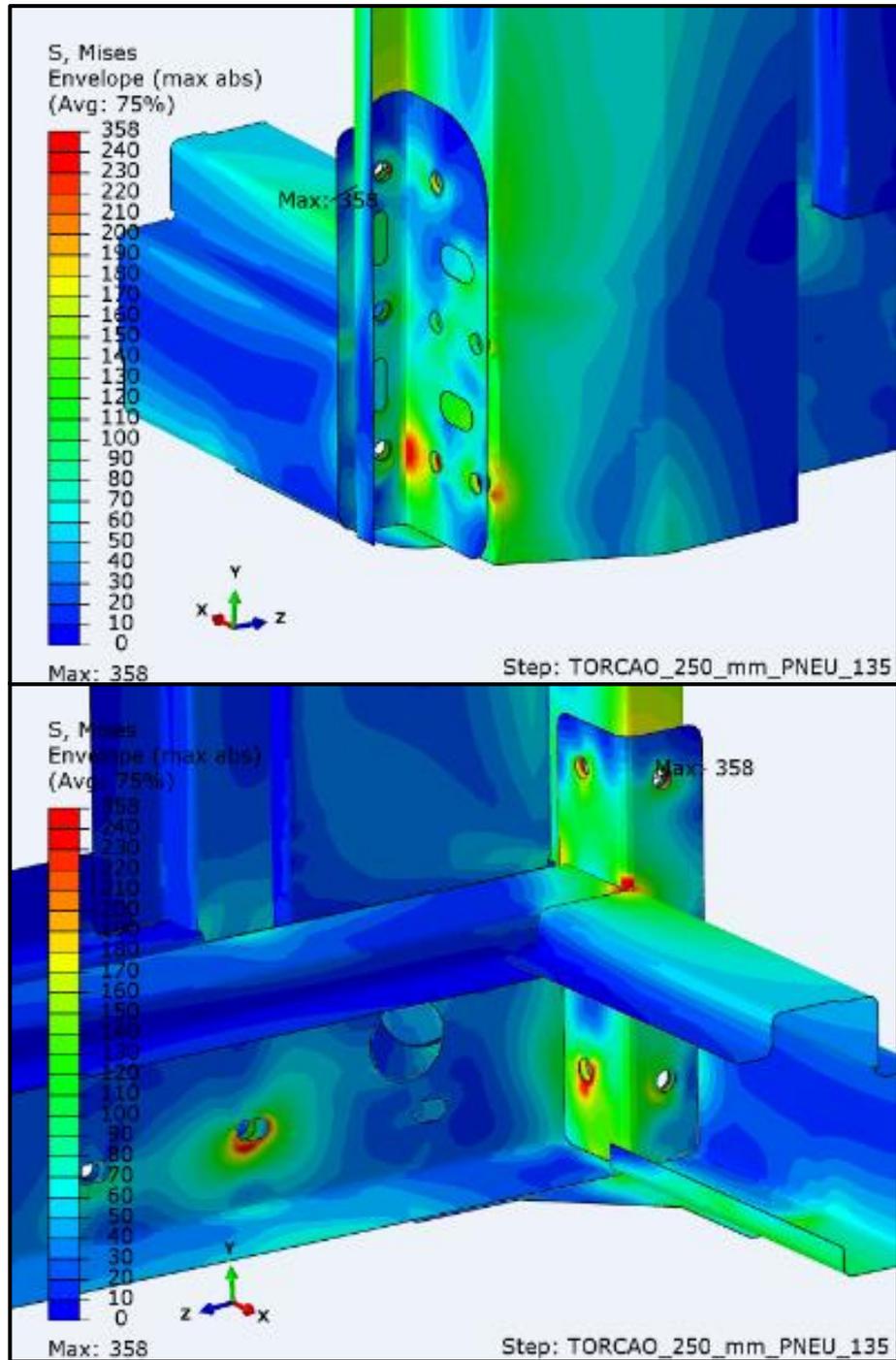
APÊNDICE A

Vista externa e interna de reforços com três alturas de fixação e parafusos M10.



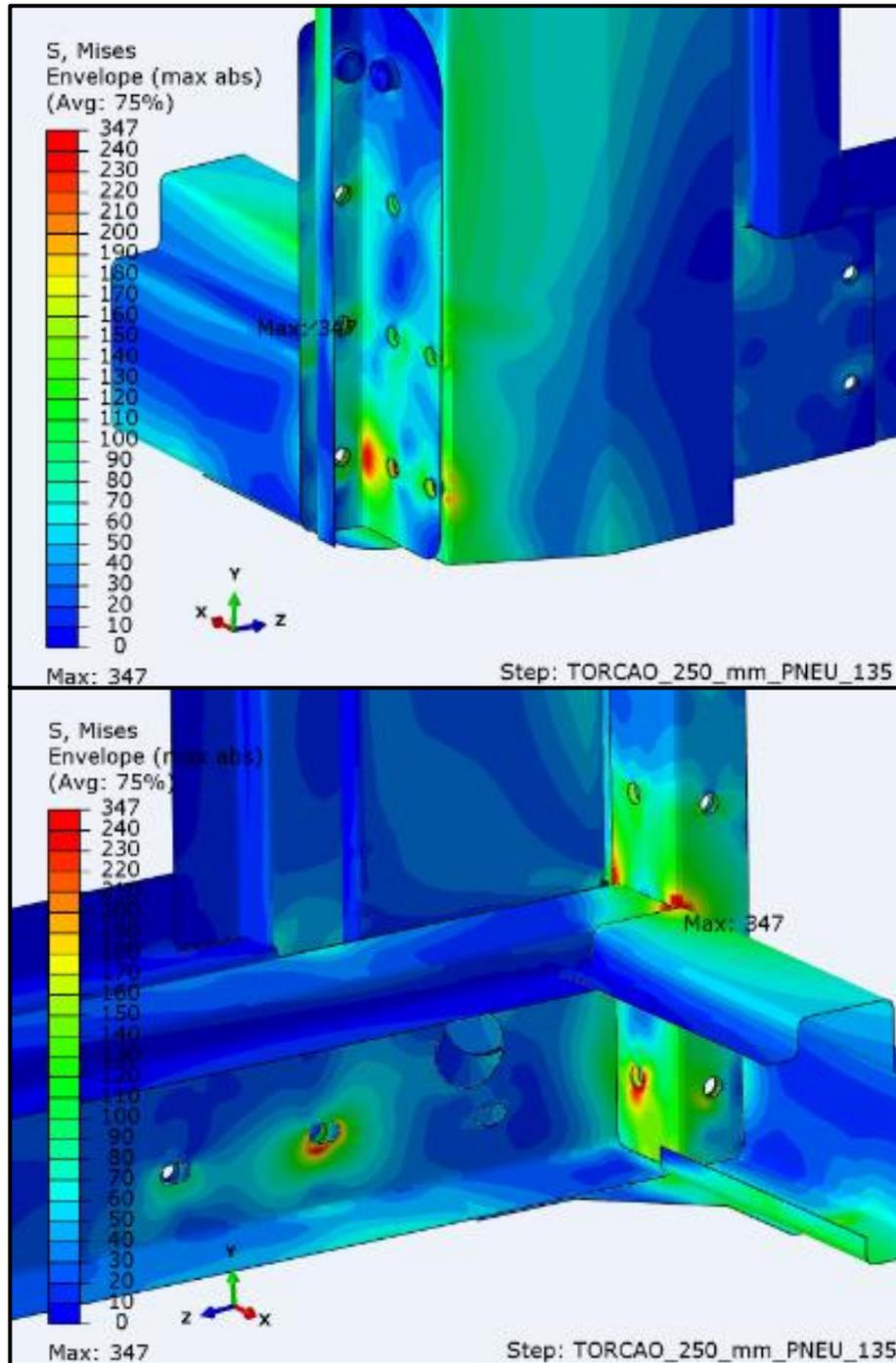
Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Vista externa e interna de reforços soldados com três alturas de fixação e parafusos M12.



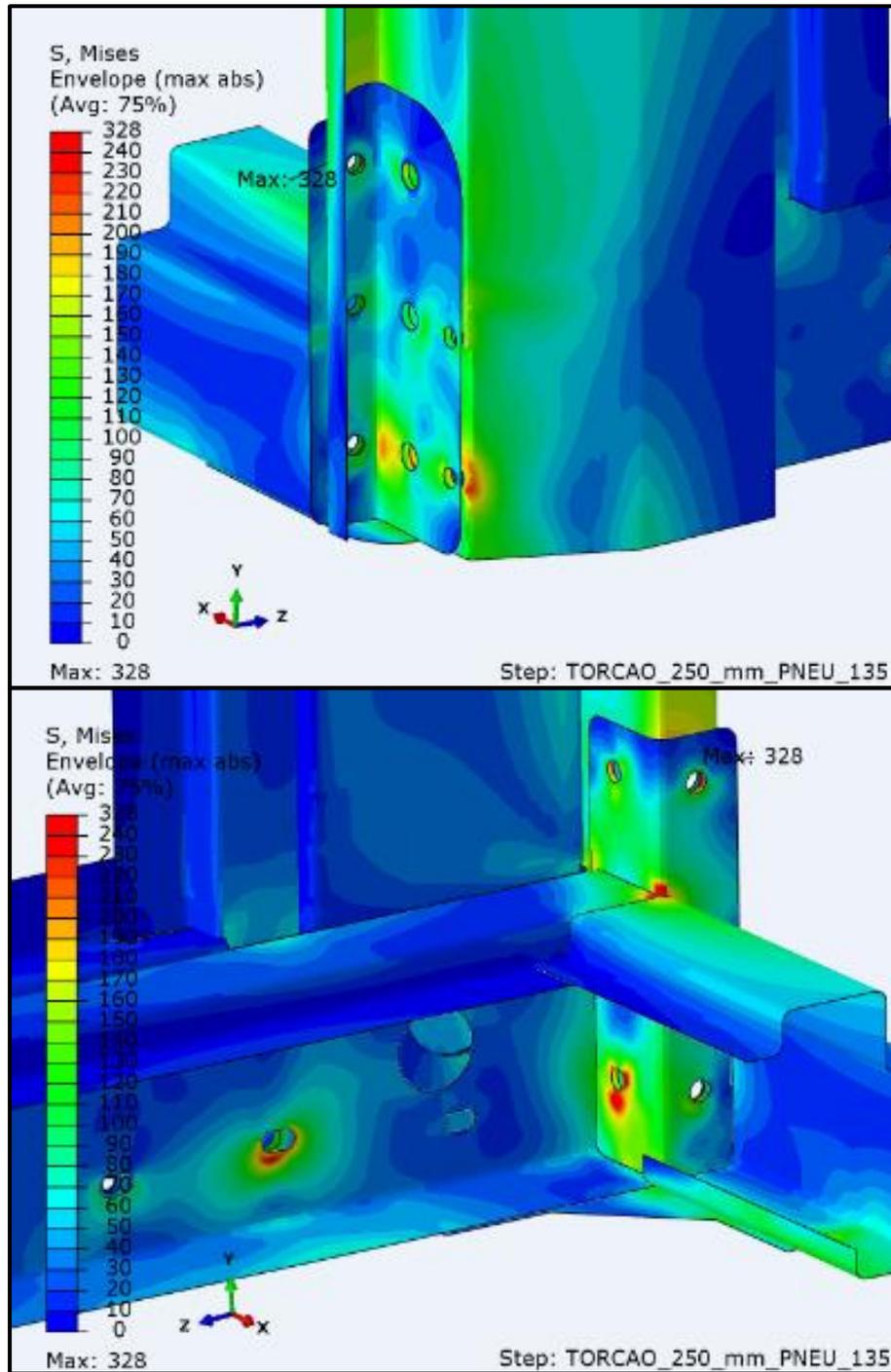
Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Vista externa e interna de reforços com quatro alturas de fixação e parafusos M12.



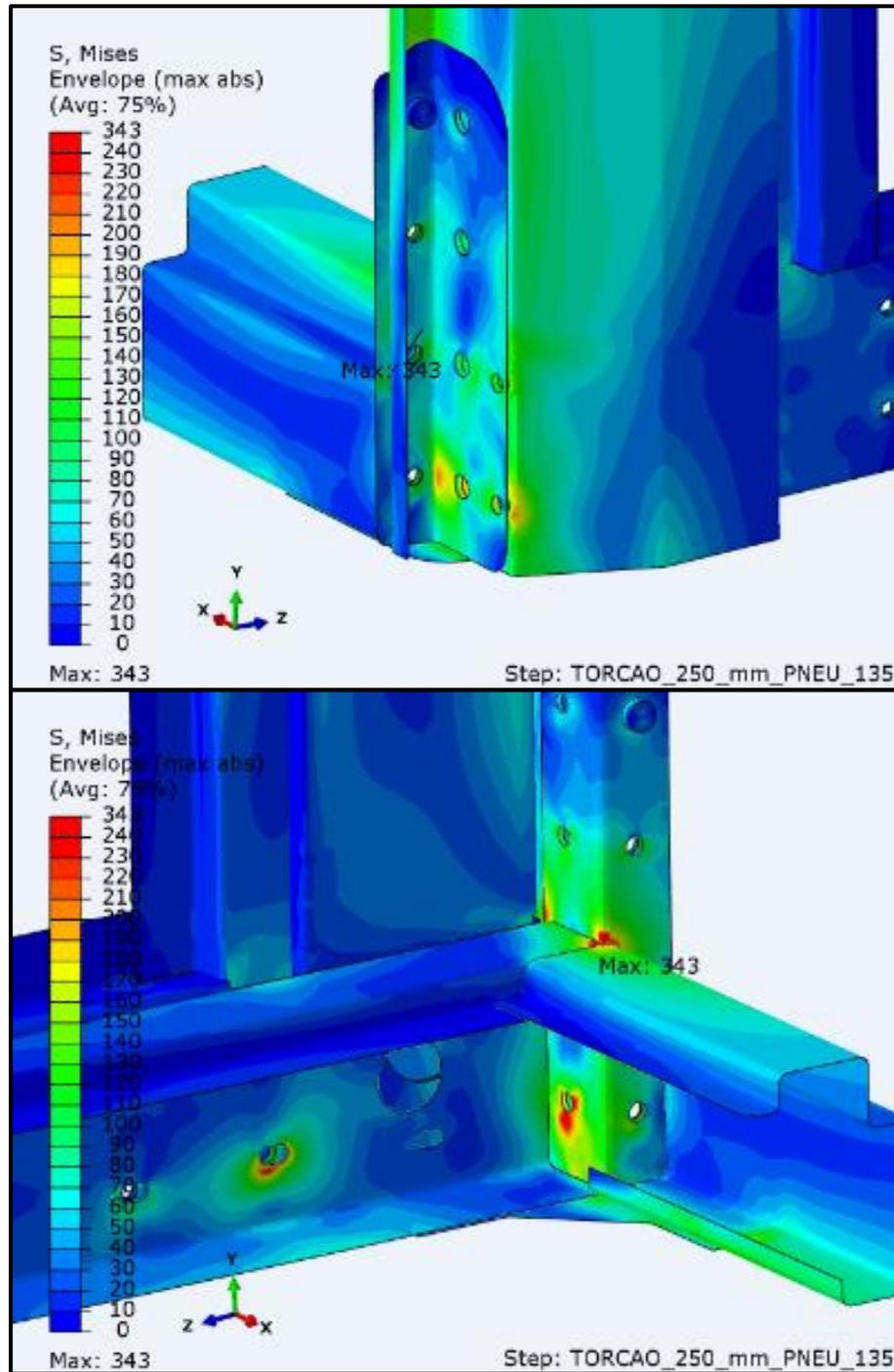
Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Vista externa e interna de reforços com três alturas de fixação e parafusos M16.



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Vista externa e interna de reforços com quatro alturas de fixação e parafusos M16.



Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

APÊNDICE B

ROTEIRO DE CÁLCULO			
PARAFUSO M12x1,5 mm - CLASSE 10.9 - COEFICIENTE DE ATRITO $\mu_{K\text{mín}}$			
DESCRIÇÃO	VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Passo de rosca	p	1,5	
Coefficiente de atrito de rosca da tabela 3	μ_G	0,12	
Coefficiente de atrito de superfície mínimo da tabela 3	$\mu_{K\text{mín}}$	0,08	
Pré-carga de montagem da tabela 3	$F_{M \text{ tab 1}}$	70000	N
Torque de aperto da tabela 3	$M_{A \text{ tab 1}}$	95	N.m
Mínimo diâmetro externo da área de contato	$d_{w \text{ flangeado}}$	25	mm
Máximo diâmetro interno da área de contato	D_h	13	mm
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	$A_{P \text{ flangeado}}$	358,1416	mm ²
Constante de aperto da região elástica do parafuso	f_a	1	
Pressão superficial máxima	$P_{\text{máx flangeado}}$	195,4534	N/mm ²
Pressão superficial do material das placas da junta	$P_{G \text{ st37}}$	260	N/mm ²
Comprimento de carregamento	L_K	14,85	mm
Diâmetro nominal do parafuso	d	12	mm
Relação entre comprimento de carregamento e diâmetro ≤ 10	L_K/d	1,2375	
Fator de aperto	$\alpha_{A \text{ tab 8}}$	1,7	
Módulo de elasticidade do material do parafuso	E_S	205000	MPa
Área da secção transversal de menor diâmetro tabela 10-B	$A_{d3 \text{ tab 10}}$	81,07	mm ²
Comprimento do núcleo de rosca sob tensão	L_G	6	mm
Resiliência do núcleo da rosca	δ_G	3,6102E-07	mm/N
Área nominal tabela 10-B	$A_{N \text{ tab 10}}$	113,1	mm ²
Comprimento do deslocamento elástico dos filetes por flexão	L_M	4,8	mm
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	2,0703E-07	mm/N
Comprimento da parte da rosca sem contato com a porca	$L_{\text{gew}} = L_K$	14,85	mm
Resiliência da parte da rosca sem contato com a porca	δ_{Gew}	8,9354E-07	mm/N
Comprimento da parte da cabeça sob tensão	L_{SK}	6	mm
Resiliência da parte da cabeça sob tensão	δ_{SK}	2,5878E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,7204E-06	mm/N
Diâmetro externo da junta	$D_{A \text{ flangeado}}$	35	mm
Fator de cálculo da junta utilizando porca	$x_{\text{flangeado}}$	0,6717	
Área substitutiva	$A_{\text{ers flangeado}}$	534,3249	mm ²
Módulo de elasticidade do material das placas	$E_P = E_S$	205000	MPa
Resiliência das placas carregadas	$\delta_{P \text{ flangeado}}$	1,3557E-07	mm/N
Deformação plástica resultante do assentamento	f_Z	0,0035	mm
Perda de pré-carga devido ao assentamento durante operação	$F_{Z \text{ flangeado}}$	1905,8866	N
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	11,026	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	10,16	mm
Relação de força da haste com diâmetro nominal	R_S	2,0818	
0,2% de deformação plástica conforme ISO 898 parte 1	$R_{P0,2}$	940	N/mm ²
Tensão de tração devido a F_M	σ_M	746,7142	N/mm ²
Área de tensão tabela 10-B	$A_{S \text{ tab 10}}$	88,13	mm ²
Pré-carga calculada	$F_{M \text{ calc}}$	115113,4727	N
Diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso ou da porca	$D_{KM \text{ flangeado}}$	19	mm
Torque de aperto	$M_{A \text{ flangeado}}$	203452,6567	N.mm
Torque de aperto	$M_{A \text{ flangeado}}$	203,4527	N.m
Torque de aperto	$M_{A \text{ flangeado}}$	20,3453	kgf.m

Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

ROTEIRO DE CÁLCULO			
PARAFUSO M12x1,5 mm - CLASSE 10.9 - COEFICIENTES DE ATRITO MEDIDOS			
DESCRIÇÃO	VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Passo de rosca	p	1,5	
Coefficiente de atrito de rosca medido	$\mu_{G\text{medido}}$	0,09	
Coefficiente de atrito de superfície mínimo medido	$\mu_{k\text{medido}}$	0,19	
Pré-carga de montagem da tabela 3	$F_{M\text{ tab 1}}$	56000	N
Torque de aperto da tabela 3	$M_{A\text{ tab 1}}$	202	N.m
Mínimo diâmetro externo da área de contato	$d_w\text{ flangeado}$	25	mm
Máximo diâmetro interno da área de contato	D_h	13	mm
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	$A_P\text{ flangeado}$	358,1416	mm ²
Constante de aperto da região elástica do parafuso	f_a	1	
Pressão superficial máxima	$P_{\text{máx flangeado}}$	156,3628	N/mm ²
Pressão superficial do material das placas da junta	$P_{G\text{ st37}}$	260	N/mm ²
Comprimento de carregamento	L_K	14,85	mm
Diâmetro nominal do parafuso	d	12	mm
Relação entre comprimento de carregamento e diâmetro ≤ 10	L_K/d	1,2375	
Fator de aperto	$\alpha_{A\text{ tab 8}}$	1,7	
Módulo de elasticidade do material do parafuso	E_S	205000	MPa
Área da secção transversal de menor diâmetro tabela 10-B	$A_{d3\text{ tab 10}}$	81,07	mm ²
Comprimento do núcleo de rosca sob tensão	L_G	6	mm
Resiliência do núcleo da rosca	δ_G	3,6102E-07	mm/N
Área nominal tabela 10-B	$A_N\text{ tab 10}$	113,1	mm ²
Comprimento do deslocamento elástico dos filetes por flexão	L_M	4,8	mm
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	2,0703E-07	mm/N
Comprimento da parte da rosca sem contato com a porca	$L_{\text{gew}} = L_K$	14,85	mm
Resiliência da parte da rosca sem contato com a porca	δ_{Gew}	8,9354E-07	mm/N
Comprimento da parte da cabeça sob tensão	L_{SK}	6	mm
Resiliência da parte da cabeça sob tensão	δ_{SK}	2,5878E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,7204E-06	mm/N
Diâmetro externo da junta	$D_A\text{ flangeado}$	35	mm
Fator de cálculo da junta utilizando porca	$X_{\text{flangeado}}$	0,6717	
Área substitutiva	$A_{\text{ers flangeado}}$	534,3249	mm ²
Módulo de elasticidade do material das placas	$E_P = E_S$	205000	MPa
Resiliência das placas carregadas	$\delta_P\text{ flangeado}$	1,3557E-07	mm/N
Deformação plástica resultante do assentamento	f_Z	0,0035	mm
Perda de pré-carga devido ao assentamento durante operação	$F_Z\text{ flangeado}$	1905,8866	N
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	11,026	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	10,16	mm
Relação de força da haste com diâmetro nominal	R_S	2,0818	
0,2% de deformação plástica conforme ISO 898 parte 1	$R_{P0,2}$	940	N/mm ²
Tensão de tração devido a F_M	σ_M	788,7196	N/mm ²
Área de tensão tabela 10-B	$A_S\text{ tab 10}$	88,13	mm ²
Pré-carga calculada	$F_{M\text{ calc}}$	121406,7737	N
Diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso ou da porca	$D_{KM\text{ flangeado}}$	19	mm
Torque de aperto	$M_{A\text{ flangeado}}$	318153,3949	N.mm
Torque de aperto	$M_{A\text{ flangeado}}$	318,1534	N.m
Torque de aperto	$M_{A\text{ flangeado}}$	31,8153	kgf.m

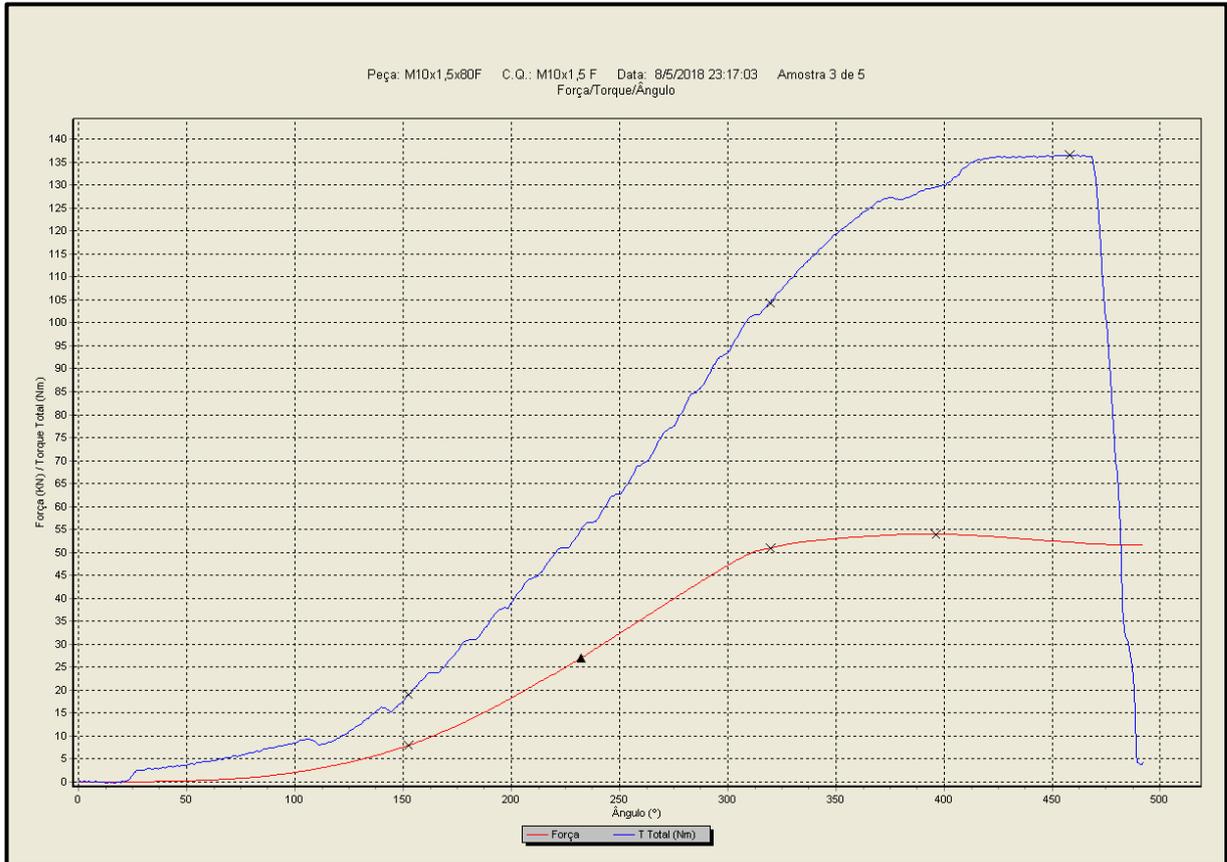
Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

ROTEIRO DE CÁLCULO			
PARAFUSO M12x1,5 mm - CLASSE 10.9 - COEFICIENTE DE ATRITO μ_{Kmax}			
DESCRIÇÃO	VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Passo de rosca	p	1,5	
Coefficiente de atrito de rosca da tabela 3	μ_G	0,12	
Coefficiente de atrito de superfície mínimo da tabela 3	μ_{Kmax}	0,24	
Pré-carga de montagem da tabela 3	$F_{M\ tab\ 1}$	56000	N
Torque de aperto da tabela 3	$M_{A\ tab\ 1}$	202	N.m
Mínimo diâmetro externo da área de contato	$d_{w\ flangeado}$	25	mm
Máximo diâmetro interno da área de contato	D_h	13	mm
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	$A_{P\ flangeado}$	358,1416	mm ²
Constante de aperto da região elástica do parafuso	f_a	1	
Pressão superficial máxima	$P_{máx\ flangeado}$	156,3628	N/mm ²
Pressão superficial do material das placas da junta	$P_{G\ st37}$	260	N/mm ²
Comprimento de carregamento	L_K	14,85	mm
Diâmetro nominal do parafuso	d	12	mm
Relação entre comprimento de carregamento e diâmetro ≤ 10	L_K/d	1,2375	
Fator de aperto	$\alpha_{A\ tab\ 8}$	1,7	
Módulo de elasticidade do material do parafuso	E_S	205000	MPa
Área da secção transversal de menor diâmetro tabela 10-B	$A_{d3\ tab\ 10}$	81,07	mm ²
Comprimento do núcleo de rosca sob tensão	L_G	6	mm
Resiliência do núcleo da rosca	δ_G	3,61025E-07	mm/N
Área nominal tabela 10-B	$A_{N\ tab\ 10}$	113,1	mm ²
Comprimento do deslocamento elástico dos filetes por flexão	L_M	4,8	mm
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	2,07026E-07	mm/N
Comprimento da parte da rosca sem contato com a porca	$L_{gew} = L_K$	14,85	mm
Resiliência da parte da rosca sem contato com a porca	δ_{Gew}	8,93537E-07	mm/N
Comprimento da parte da cabeça sob tensão	L_{SK}	6	mm
Resiliência da parte da cabeça sob tensão	δ_{SK}	2,58782E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,72037E-06	mm/N
Diâmetro externo da junta	$D_{A\ flangeado}$	35	mm
Fator de cálculo da junta utilizando porca	$X_{flangeado}$	0,6717	
Área substitutiva	$A_{ers\ flangeado}$	534,3249	mm ²
Módulo de elasticidade do material das placas	$E_P = E_S$	205000	MPa
Resiliência das placas carregadas	$\delta_{P\ flangeado}$	1,35571E-07	mm/N
Deformação plástica resultante do assentamento	f_Z	0,0035	mm
Perda de pré-carga devido ao assentamento durante operação	$F_{Z\ flangeado}$	1905,8866	N
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	11,026	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	10,16	mm
Relação de força da haste com diâmetro nominal	R_S	2,0818	
0,2% de deformação plástica conforme ISO 898 parte 1	$R_{P0,2}$	940	N/mm ²
Tensão de tração devido a F_M	σ_M	746,7142	N/mm ²
Área de tensão tabela 10-B	$A_{S\ tab\ 10}$	88,13	mm ²
Pré-carga calculada	$F_{M\ calc}$	115113,4727	N
Diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso ou da porca	$D_{KM\ flangeado}$	19	mm
Torque de aperto	$M_{A\ flangeado}$	378425,1351	N.mm
Torque de aperto	$M_{A\ flangeado}$	378,4251	N.m
Torque de aperto	$M_{A\ flangeado}$	37,8425	kgf.m

Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

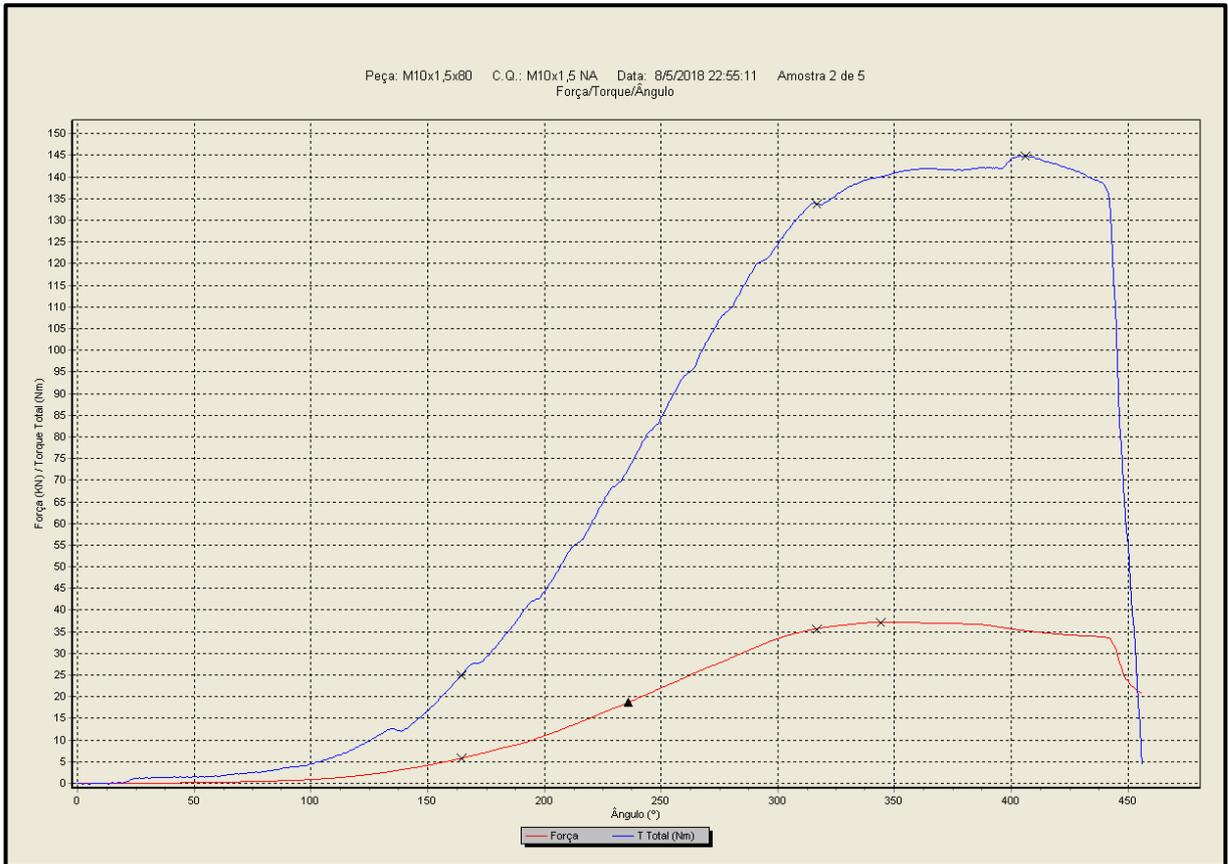
APÊNDICE C

Gráfico de força e torque de montagem versus ângulo de aperto de parafuso M10x1,5 mm, classe 8.8, contra peça pintada e porca flangeada amassada.



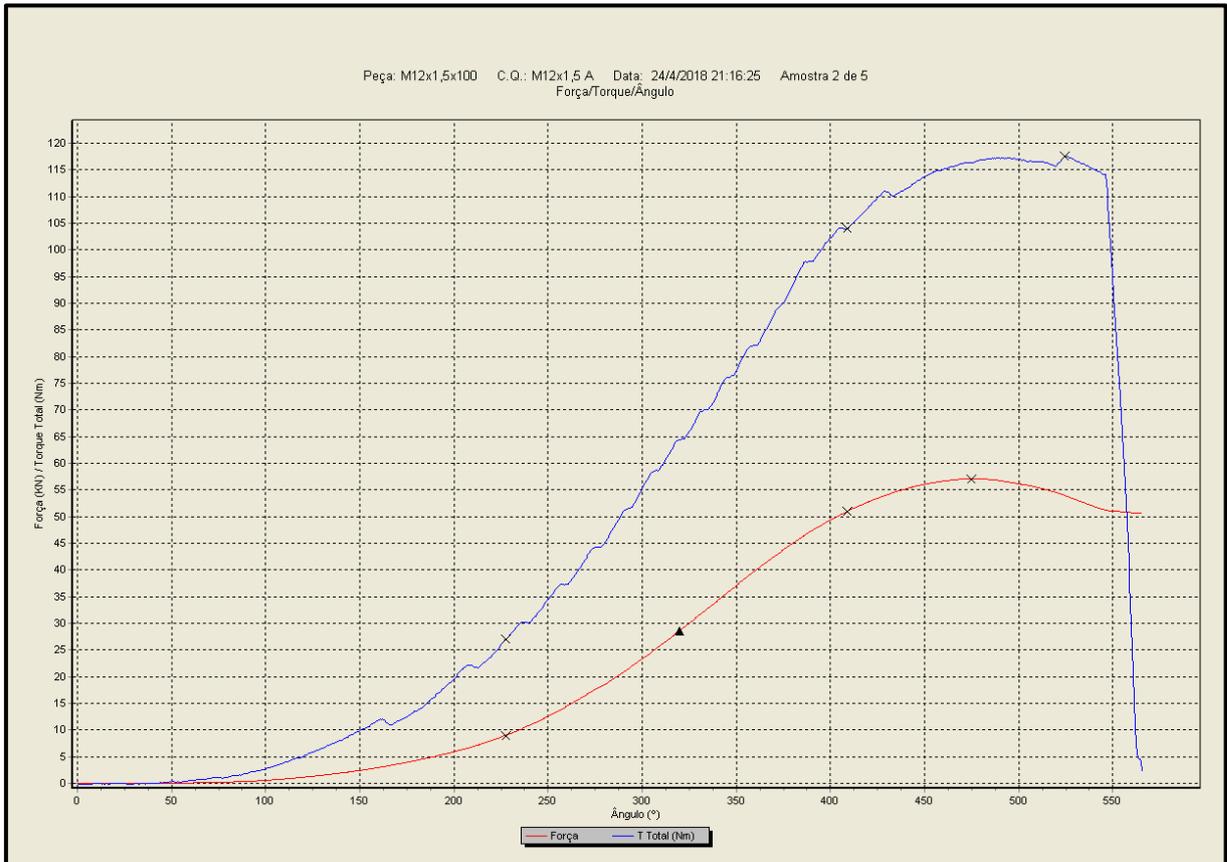
Fonte: UCS (2018)

Gráfico de força e torque de montagem versus ângulo de aperto de parafuso M10x1,5 mm, classe 8.8, contra peça pintada e porca sextavada com inserto de nylon.



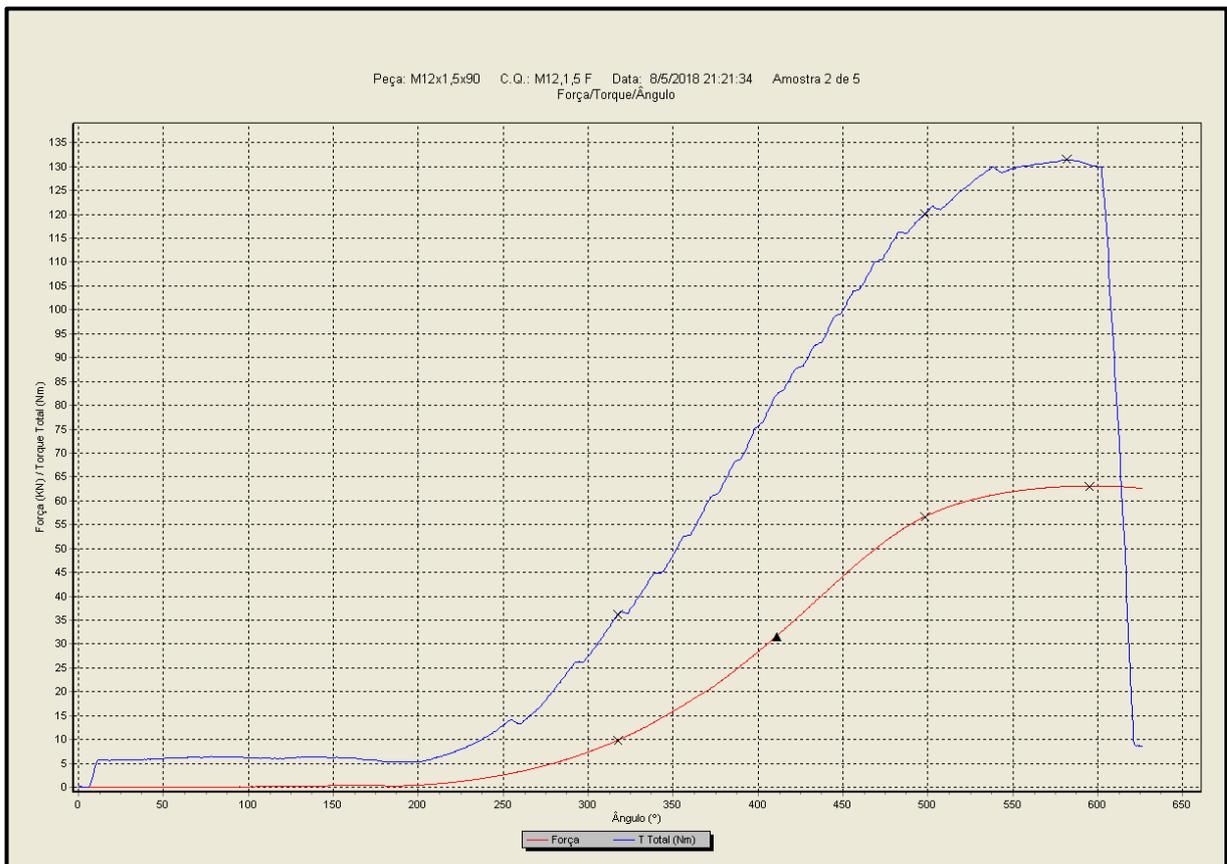
Fonte: UCS (2018)

Gráfico de força e torque de montagem versus ângulo de aperto de parafuso M12x1,5 mm, classe 5.8, contra peça pintada e porca sextavada simples.



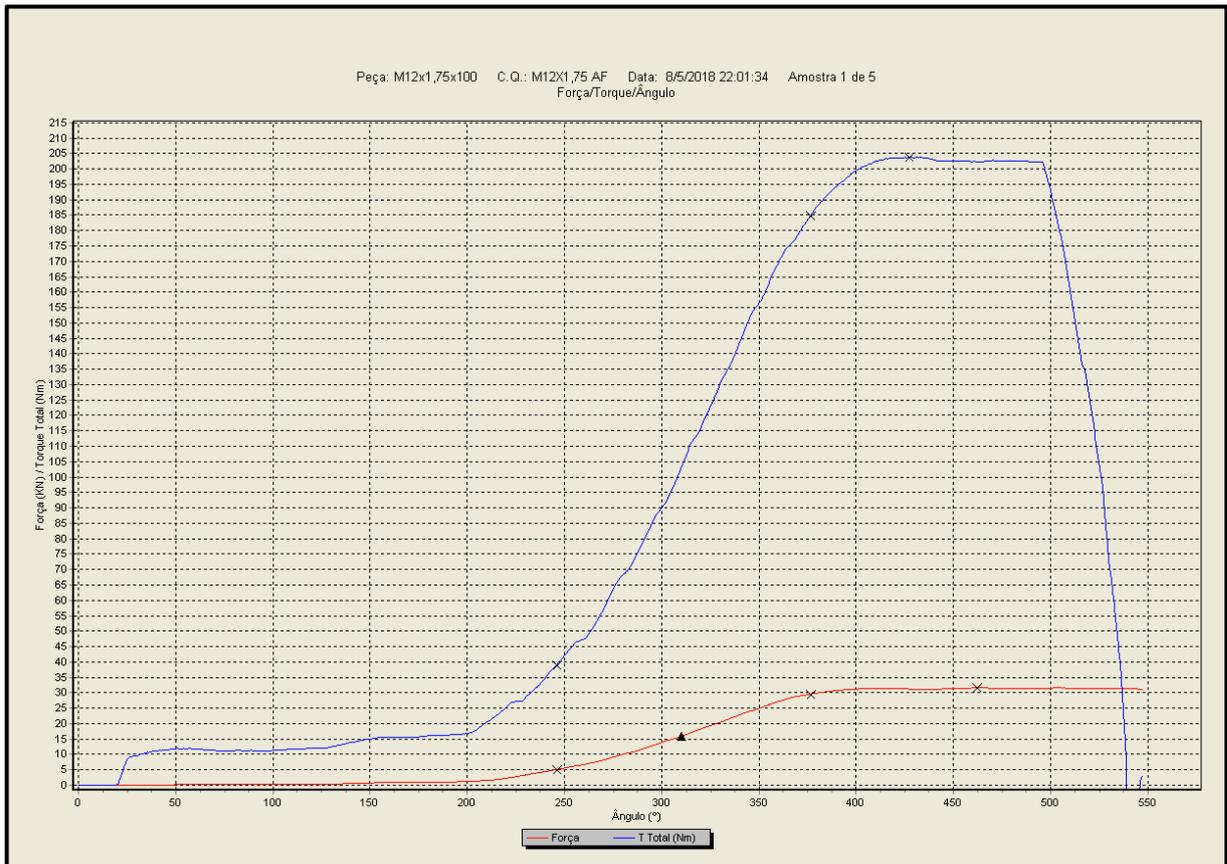
Fonte: UCS (2018)

Gráfico de força e torque de montagem versus ângulo de aperto de parafuso M12x1,5 mm, classe 5.8, contra-peça pintada e porca flangeada com inserto de nylon.



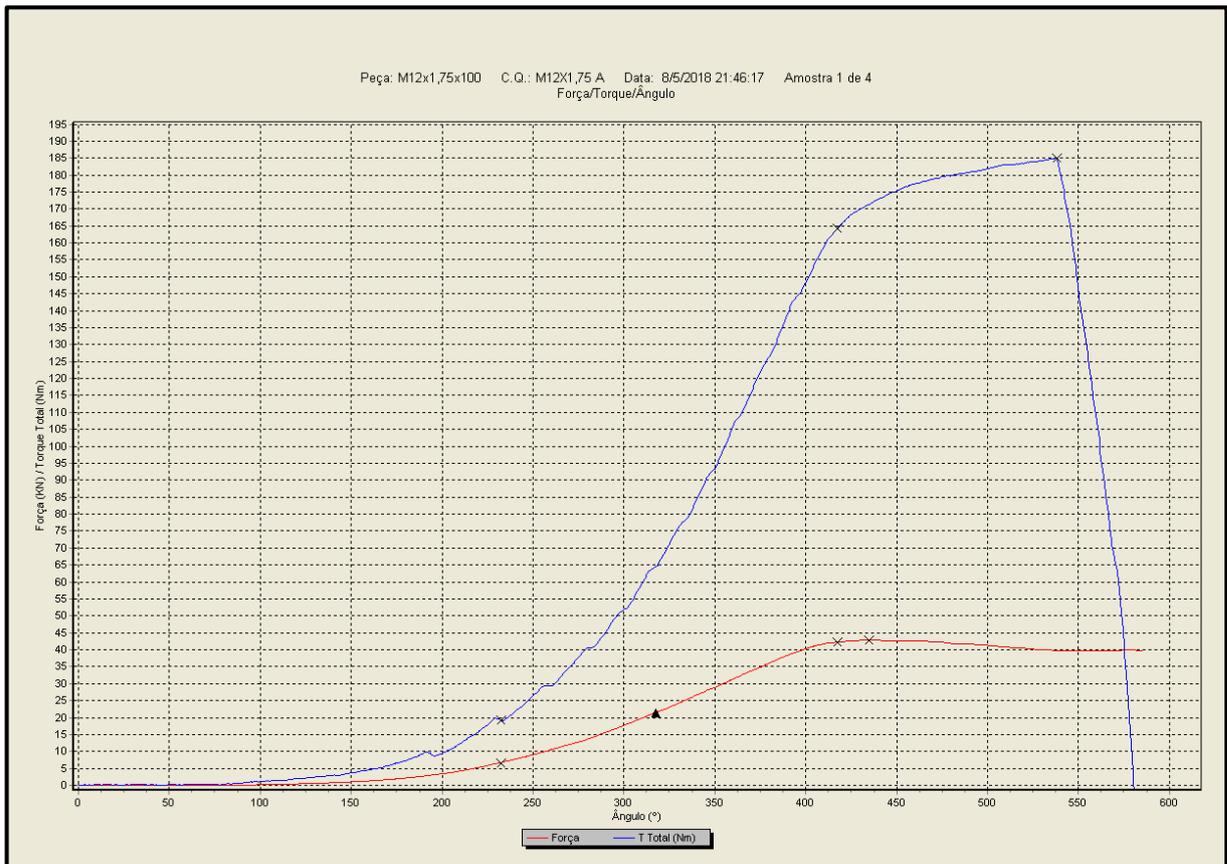
Fonte: UCS (2018)

Gráfico de força e torque de montagem versus ângulo de aperto de parafuso M12x1,75 mm, classe 8.8, contra peça pintada e porca sextavada com inserto de nylon.



Fonte: UCS (2018)

Gráfico de força e torque de montagem versus ângulo de aperto de parafuso M12x1,75 mm, classe 8.8, contra peça pintada e porca sextavada simples.



Fonte: UCS (2018)

APÊNDICE D

Valores medidos das composições de parafusos M10x1,5 mm e porcas flangeadas amassadas.

UCS - Universidade de Caxias do Sul					Relatório de coeficiente de atrito				
Peça: M10x1,5x80F					C.Q.: M10x1,5 F				
Data Teste: 8/5/2018 23:17:03					Cliente Tcc Victor				
Data Relatório: 8/5/2018					Amostras: 5 de 5				
Composição		Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	μ_k	Média	μ_G	Média
1	com pintura	36,50	67,10	37,20	29,90	0,18	0,20	0,10	0,11
2	com pintura	36,50	78,30	38,00	40,30	0,21		0,14	
3	com pintura	36,40	70,10	43,70	26,40	0,19		0,09	
4	sem pintura	36,50	95,70	38,60	57,10	0,26	0,26	0,19	0,19
5	sem pintura	36,60	97,10	39,10	58,10	0,27		0,19	

Fonte: Adaptado de UCS (2018)

Valores medidos das composições de parafusos M10x1,5 mm, arruelas e porcas com inserto de nylon.

UCS - Universidade de Caxias do Sul					Relatório de coeficiente de atrito				
Peça: M10x1,5x80					C.Q.: M10x1,5 NA				
Data Teste: 8/5/2018 22:55:11					Cliente TCC Victor				
Data Relatório: 8/5/2018					Amostras: 5 de 5				
Composição		Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	μ_k	Média	μ_G	Média
1	com pintura	25,40	91,90	80,80	11,10	0,36	0,37	0,06	0,05
2	com pintura	25,40	95,80	86,20	9,70	0,38		0,05	
3	com pintura	25,40	93,70	83,00	10,80	0,37		0,05	
4	sem pintura	25,30	90,30	73,70	16,60	0,36	0,40	0,08	0,08
5	sem pintura	25,40	112,10	95,10	17,00	0,44		0,08	

Fonte: Adaptado de UCS (2018)

Valores medidos das composições de parafusos M12x1,5 mm, arruelas e porcas simples.

UCS - Universidade de Caxias do Sul				Relatório de coeficiente de atrito					
Peça: M12x1,5x100				C.Q.: M12x1,5 A					
Data Teste: 24/4/2018 21:16:25				Cliente TCC Victor					
Data Relatório: 8/5/2018				Amostras: 5 de 5					
Composição	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	μ_k	Média	μ_G	Média	
1	com pintura	36,10	82,40	65,00	17,30	0,19	0,20	0,05	0,06
2	com pintura	36,10	76,20	54,30	21,90	0,18		0,06	
3	com pintura	36,10	96,60	77,30	19,40	0,22		0,06	
4	sem pintura	36,00	87,30	69,00	18,30	0,20	0,19	0,05	0,06
5	sem pintura	36,00	80,00	54,40	25,60	0,19		0,08	

Fonte: Adaptado de UCS (2018)

Valores medidos das composições de parafusos M12x1,75 mm, arruelas e porcas com inserto de nylon.

UCS - Universidade de Caxias do Sul				Relatório de coeficiente de atrito					
Peça: M12x1,75x100				C.Q.: M12X1,75 AF					
Data Teste: 8/5/2018 22:01:34				Cliente TCC Victor					
Data Relatório: 9/5/2018				Amostras: 5 de 5					
Composição	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	μ_k	Média	μ_G	Média	
1	com pintura	24,50	154,90	189,80	34,90	0,39	0,33	0,15	0,10
2	com pintura	24,60	119,10	131,00	11,80	0,29		0,05	
3	com pintura	24,60	124,20	145,70	21,50	0,30		0,09	
4	sem pintura	24,60	98,90	98,20	0,60	0,24	0,28	0,00	0,04
5	sem pintura	24,50	132,60	151,20	18,60	0,33		0,08	

Fonte: Adaptado de UCS (2018)

Valores medidos das composições de parafusos M12x1,75 mm, arruelas e porcas simples.

UCS - Universidade de Caxias do Sul					Relatório de coeficiente de atrito				
Peça: M12x1,75x100					C.Q.: M12X1,75 A				
Data Teste: 8/5/2018 21:46:17					Cliente TCC Victor				
Data Relatório: 9/5/2018					Amostras: 4 de 4				
	Peça	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	μ_k	Média	μ_G	Média
1	com pintura	25,10	78,10	76,10	2,00	0,18	0,24	0,01	0,05
2	com pintura	25,10	122,40	144,80	22,40	0,29		0,10	
3	sem pintura	25,10	136,20	159,50	23,30	0,33	0,32	0,10	0,08
4	sem pintura	25,10	129,90	145,00	15,10	0,31		0,06	

Fonte: Adaptado de UCS (2018)

ANEXO A

Especificações SAE de propriedades mecânicas.

Grau SAE nº	Intervalo de tamanho inclusivo, in	Resistência mínima de prova,* kpsi	Resistência mínima de tração,* kpsi	Resistência mínima de escoamento,* kpsi	Material	Marcação de cabeça
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Baixo ou médio carbono	
2	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$	55	74	57	Baixo ou médio carbono	
	$\frac{7}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Médio carbono, estirado a frio	
5	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Martensita de baixo carbono, Q&T (temperado e revenido)	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Liga de baixo carbono, Q&T (temperado e revenido)	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Liga de médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	Martensita de baixo carbono, Q&T (temperado e revenido)	

*Resistências mínimas são resistências excedidas por 99% dos fixadores.

Fonte: Budynas, Nisbett, (2011)

Especificações ASTM de propriedades mecânicas.

Designação ASTM nº	Intervalo de tamanho inclusivo, in	Resistência mínima de prova,* kpsi	Resistência mínima de tração,* kpsi	Resistência mínima de escoamento,* Kpsi	Material	Marcação de cabeça
A307	$\frac{1}{4}$ – $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Baixo carbono	
A325, tipo 1	$\frac{1}{2}$ –1 $1\frac{1}{8}$ – $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
A325, tipo 2	$\frac{1}{2}$ –1 $1\frac{1}{8}$ – $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Baixo carbono, Martensita, Q&T (temperado e revenido)	
A325, tipo 3	$\frac{1}{2}$ –1 $1\frac{1}{8}$ – $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Aço envelhecido, Q&T (temperado e revenido)	
A354, grau BC	$\frac{1}{4}$ – $2\frac{1}{2}$ $2\frac{3}{4}$ –4	105 95	125 115	109 99	Aço-liga Q&T (temperado e revenido)	
A354, grau BD	$\frac{1}{4}$ –4	120	150	130	Aço-liga Q&T (temperado e revenido)	
A449	$\frac{1}{4}$ –1 $1\frac{1}{8}$ – $1\frac{1}{2}$ $1\frac{3}{4}$ –3	85 74 55	120 105 90	92 81 58	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
A490, tipo 1	$\frac{1}{2}$ – $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Aço-liga, Q&T (temperado e revenido)	
A490, tipo 3	$\frac{1}{2}$ – $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Aço envelhecido, Q&T (temperado e revenido)	

*Resistências mínimas são resistências excedidas por 99% dos fixadores.

Fonte: Budynas, Nisbett, (2011)

Especificações métricas de propriedades mecânicas.

Categoria de propriedade	Intervalo de tamanho inclusivo	Resistência mínima de prova, [†] MPa	Resistência mínima de tração, [†] MPa	Resistência mínima de escoamento, [†] MPa	Material	Marcação de cabeça
4,6	M5-M36	225	400	240	Baixo e médio carbono	
4,8	M1,6-M16	310	420	340	Baixo e médio carbono	
5,8	M5-M24	380	520	420	Baixo e médio carbono	
8,8	M16-M36	600	830	660	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
9,8	M1,6-M16	650	900	720	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
10,9	M5-M36	830	1040	940	Baixo carbono, martensita, Q&T (temperado e revenido)	
12,9	M1,6-M36	970	1220	1100	liga, Q&T (temperado e revenido)	

*O comprimento de rosca para parafusos de porca e parafusos de rosca até a cabeça é

$$l_T = \begin{cases} 2d + 6 & l \leq 125 \\ 2d + 12 & 125 < l \leq 200 \\ 2d + 25 & l > 200 \end{cases}$$

em que l é o comprimento do parafuso de porca. O comprimento de rosca para parafusos estruturais de porca é ligeiramente menor que o fornecido acima.

[†] Resistências mínimas são resistências excedidas por 99% dos fixadores.

Fonte: Budynas, Nisbett, (2011)

ANEXO B

Tabela com a composição química do material e seu tratamento superficial.

CLASSE DE RESISTÊNCIA	MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO	LIMITES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (ANÁLISE CONFIRMATÓRIA)					TEMPERATURA MÍNIMA DE REVENIMENTO (°C)
		C		P	S	B	
		mín.	máx.	máx.	máx.	máx.	
3.6	Aço carbono	-	0,20	0,05	0,06	0,003	-
4.6 e 4.8	Aço carbono	-	0,55	0,05	0,06	0,003	-
5.6; 5.8 e 6.8	Aço carbono	0,13	0,55	0,05	0,06	0,003	-
8.8	Aço carbono com aditivos (ex.: B, Mn ou Cr) temperado e revenido	0,15	0,40	0,035	0,035	0,003	425
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,035	0,035		
9.8	Aço carbono com aditivos (ex.: B, Mn ou Cr) temperado e revenido	0,15	0,35	0,035	0,035	0,003	425
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,035	0,035		
10.9	Aço carbono com aditivos (ex.: B, Mn ou Cr) temperado e revenido	0,15	0,35	0,035	0,035	0,003	340
10.9	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,035	0,035	0,003	425
	Aço carbono com aditivos (ex.: B, Mn ou Cr) temperado e revenido	0,20	0,55	0,035	0,035		
	Aço liga temperado e revenido	0,20	0,55	0,035	0,035		
12.9	Aço liga temperado e revenido	0,28	0,50	0,035	0,035	0,003	380

Fonte: Metalac SPS Ind. Com. Ltda.

ANEXO C

Tabela 1 da VDI 2230 – Pré-carga de montagem $F_{Mm\acute{a}x}$ (calculada para 90% de $R_{P0,2}$) e torque de aperto $M_{Am\acute{a}x}$ (calculado com atrito na rosca $\mu_G=0,12$, para diferentes coeficientes de atrito sob a cabeça μ_K) para parafusos com rosca métrica normal conforme DIN ISSO 262, cabeça sextavada conforme DIN EN ISO 4014 a 4018, cabeça hexalobular externo conforme DIN 34800 ou cabeça cilíndrica conforme DIN EN ISO 4762, furo “médio” conforme DIN EN 20273, e ângulo de filete $\alpha = 60^\circ$.

Abm. Size	Fest.- Klasse Strength Grade	Montagevorspannkraft/Assembly preload							Anziehdrehmomente/Tightening torque						
		F_{MTab} in kN für $\mu_G =$							M_A in Nm für $\mu_K = \mu_G =$						
		0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,24	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,24
M 4	8.8	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	3,9	3,7	2,3	2,6	3,0	3,3	3,6	4,1	4,5
	10.9	6,8	6,7	6,5	6,3	6,1	5,7	5,4	3,3	3,9	4,6	4,8	5,3	6,0	6,6
	12.9	8,0	7,8	7,6	7,4	7,1	6,7	6,3	3,9	4,5	5,1	5,6	6,2	7,0	7,8
M 5	8.8	7,6	7,4	7,2	7,0	6,8	6,4	6,0	4,4	5,2	5,9	6,5	7,1	8,1	9,0
	10.9	11,1	10,8	10,6	10,3	10,0	9,4	8,8	6,5	7,6	8,6	9,5	10,4	11,9	13,2
	12.9	13,0	12,7	12,4	12,0	11,7	11,0	10,3	7,6	8,9	10,0	11,2	12,2	14,0	15,5
M 6	8.8	10,7	10,4	10,2	9,9	9,6	9,0	8,4	7,7	9,0	10,1	11,3	12,3	14,1	15,6
	10.9	15,7	15,3	14,9	14,5	14,1	13,2	12,4	11,3	13,2	14,9	16,5	18,0	20,7	22,9
	12.9	18,4	17,9	17,5	17,0	16,5	15,5	14,5	13,2	15,4	17,4	19,3	21,1	24,2	26,8
M 7	8.8	15,5	15,1	14,8	14,4	14,0	13,1	12,3	12,6	14,8	16,8	18,7	20,5	23,6	26,2
	10.9	22,7	22,5	21,7	21,1	20,5	19,3	18,1	18,5	21,7	24,7	27,5	30,1	34,7	38,5
	12.9	26,6	26,0	25,4	24,7	24,0	22,6	21,2	21,6	25,4	28,9	32,2	35,2	40,6	45,1
M 8	8.8	19,5	19,1	18,6	18,1	17,6	16,5	15,5	18,5	21,6	24,6	27,3	29,8	34,3	38,0
	10.9	28,7	28,0	27,3	26,6	25,8	24,3	22,7	27,2	31,8	36,1	40,1	43,8	50,3	55,8
	12.9	33,6	32,8	32,0	31,1	30,2	28,4	26,6	31,8	37,2	42,2	46,9	51,2	58,9	65,3
M 10	8.8	31,0	30,3	29,6	28,8	27,9	26,3	24,7	36,0	43,0	48,0	54,0	59,0	68,0	75,0
	10.9	45,6	44,5	43,4	42,2	41,0	38,6	36,2	53,0	63,0	71,0	79,0	87,0	100,0	110,0
	12.9	53,3	52,1	50,8	49,4	48,0	45,2	42,4	62,0	73,0	83,0	93,0	101,0	116,0	129,0
M 12	8.8	45,2	44,1	43,0	41,9	40,7	38,3	35,9	63,0	73,0	84,0	93,0	102,0	117,0	130,0
	10.9	66,3	64,8	63,2	61,5	59,8	56,3	52,8	92,0	108,0	123,0	137,0	149,0	172,0	191,0
	12.9	77,6	75,9	74,0	72,0	70,0	65,8	61,8	108,0	126,0	144,0	160,0	175,0	201,0	223,0
M 14	8.8	62,0	60,6	59,1	57,5	55,9	52,6	49,3	100,0	117,0	133,0	148,0	162,0	187,0	207,0
	10.9	91,0	88,9	86,7	84,4	82,1	77,2	72,5	146,0	172,0	195,0	218,0	238,0	274,0	304,0
	12.9	106,5	104,1	101,5	98,8	96,0	90,4	84,8	171,0	201,0	229,0	255,0	279,0	321,0	356,0
M 16	8.8	84,7	82,9	80,9	78,8	76,6	72,2	67,8	153,0	180,0	206,0	230,0	252,0	291,0	325,0
	10.9	124,4	121,7	118,8	115,7	112,6	106,1	99,6	224,0	264,0	302,0	338,0	370,0	428,0	477,0
	12.9	145,5	142,4	139,0	135,4	131,7	124,1	116,6	262,0	309,0	354,0	395,0	433,0	501,0	558,0
M 18	8.8	107,0	104,0	102,0	99,0	96,0	91,0	85,0	220,0	259,0	295,0	329,0	360,0	415,0	462,0
	10.9	152,0	149,0	145,0	141,0	137,0	129,0	121,0	314,0	369,0	421,0	469,0	513,0	592,0	657,0
	12.9	178,0	174,0	170,0	165,0	160,0	151,0	142,0	367,0	432,0	492,0	549,0	601,0	692,0	769,0
M 20	8.8	136,0	134,0	130,0	127,0	123,0	116,0	109,0	308,0	363,0	415,0	464,0	509,0	588,0	655,0
	10.9	194,0	190,0	186,0	181,0	176,0	166,0	156,0	438,0	517,0	592,0	661,0	725,0	838,0	933,0
	12.9	227,0	223,0	217,0	212,0	206,0	194,0	182,0	513,0	605,0	692,0	773,0	848,0	980,0	1092,0
M 22	8.8	170,0	166,0	162,0	158,0	154,0	145,0	137,0	417,0	495,0	567,0	634,0	697,0	808,0	901,0
	10.9	242,0	237,0	231,0	225,0	219,0	207,0	194,0	595,0	704,0	807,0	904,0	993,0	1151,0	1284,0
	12.9	283,0	277,0	271,0	264,0	257,0	242,0	228,0	696,0	824,0	945,0	1057,0	1162,0	1347,0	1502,0
M 24	8.8	196,0	192,0	188,0	183,0	178,0	168,0	157,0	529,0	625,0	714,0	798,0	875,0	1011,0	1126,0
	10.9	280,0	274,0	267,0	260,0	253,0	239,0	224,0	754,0	890,0	1017,0	1136,0	1246,0	1440,0	1604,0
	12.9	327,0	320,0	313,0	305,0	296,0	279,0	262,0	882,0	1041,0	1190,0	1329,0	1458,0	1685,0	1877,0
M 27	8.8	257,0	252,0	246,0	240,0	234,0	220,0	207,0	772,0	915,0	1050,0	1176,0	1292,0	1498,0	1672,0
	10.9	367,0	359,0	351,0	342,0	333,0	314,0	295,0	1100,0	1304,0	1496,0	1674,0	1840,0	2134,0	2381,0
	12.9	429,0	420,0	410,0	400,0	389,0	367,0	345,0	1287,0	1526,0	1750,0	1959,0	2153,0	2497,0	2787,0
M 30	8.8	313,0	307,0	300,0	292,0	284,0	268,0	252,0	1053,0	1246,0	1428,0	1597,0	1754,0	2031,0	2265,0
	10.9	446,0	437,0	427,0	416,0	405,0	382,0	359,0	1500,0	1775,0	2033,0	2274,0	2498,0	2893,0	3226,0
	12.9	552,0	511,0	499,0	487,0	474,0	447,0	420,0	1755,0	2077,0	2380,0	2662,0	2923,0	3386,0	3775,0
M 33	8.8	389,0	381,0	373,0	363,0	354,0	334,0	314,0	1415,0	1679,0	1928,0	2161,0	2377,0	2759,0	3081,0
	10.9	554,0	543,0	531,0	517,0	504,0	475,0	447,0	2015,0	2392,0	2747,0	3078,0	3385,0	3930,0	4388,0
	12.9	649,0	635,0	621,0	605,0	589,0	556,0	523,0	2358,0	2799,0	3214,0	3601,0	3961,0	4598,0	5135,0
M 36	8.8	458,0	448,0	438,0	427,0	415,0	392,0	368,0	1825,0	2164,0	2482,0	2778,0	3054,0	3541,0	3951,0
	10.9	652,0	638,0	623,0	608,0	591,0	558,0	524,0	2600,0	3082,0	3535,0	3957,0	4349,0	5043,0	5627,0
	12.9	763,0	747,0	729,0	711,0	692,0	653,0	614,0	3042,0	3607,0	4136,0	4631,0	5089,0	5902,0	6585,0
M 39	8.8	548,0	537,0	525,0	512,0	498,0	470,0	443,0	2348,0	2791,0	3208,0	3597,0	3958,0	4598,0	5137,0
	10.9	781,0	765,0	748,0	729,0	710,0	670,0	630,0	3345,0	3975,0	4569,0	5123,0	5637,0	6549,0	7317,0
	12.9	914,0	895,0	875,0	853,0	831,0	784,0	738,0	3914,0	4652,0	5346,0	5994,0	6596,0	7664,0	8562,0

Fonte: VDI 2230 (2003).

Tabela 3 da VDI 2230 – Pré-carga de montagem $F_{Mmáx}$ (calculada para 90% de $R_{P0,2}$) e torque de aperto $M_{Amáx}$ (calculado com atrito na rosca $\mu_G=0,12$, para diferentes coeficientes de atrito sob a cabeça μ_K) para parafusos com rosca métrica fina conforme DIN ISSO 262, cabeça sextavada conforme DIN EN ISO 4014 a 4018, cabeça hexalobular externo conforme DIN 34800 ou cabeça cilíndrica conforme DIN EN ISO 4762, furo “médio” conforme DIN EN 20273, e ângulo de filete $\alpha = 60^\circ$.

Abm. Size	Fest.-Klasse Strength Grade	Montagevorspannkkräfte/Assembly preload							Anziehdrehmomente/Tightening torque						
		F _{Mtab} in kN für $\mu_G =$							M _Λ in Nm für $\mu_K = \mu_G =$						
		0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,24	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,24
M 8 x 1	8.8	21,2	20,7	20,2	19,7	19,2	18,1	17,0	19,3	22,8	26,1	29,2	32,0	37,0	41,2
	10.9	31,1	30,4	29,7	28,9	28,1	26,5	24,9	28,4	33,5	38,3	42,8	47,0	54,3	60,5
	12.9	36,4	35,6	34,7	33,9	32,9	31,0	29,1	33,2	39,2	44,9	50,1	55,0	63,6	70,8
M 9 x 1	8.8	27,7	27,2	26,5	25,9	25,2	23,7	22,3	28,0	33,2	38,1	42,6	46,9	54,4	60,7
	10.9	40,7	39,9	39,0	38,0	37,0	34,9	32,8	41,1	48,8	55,9	62,6	68,8	79,8	89,1
	12.9	47,7	46,7	45,6	44,4	43,3	40,8	38,4	48,1	57,0	65,4	73,3	80,6	93,4	104,3
M 10 x 1	8.8	35,2	34,5	33,7	32,9	32,0	30,2	28,4	39,0	46,0	53,0	60,0	66,0	76,0	85,0
	10.9	51,7	50,6	49,5	48,3	47,0	44,4	41,7	57,0	68,0	78,0	88,0	97,0	112,0	125,0
	12.9	60,4	59,2	57,9	56,5	55,0	51,9	48,8	67,0	80,0	91,0	103,0	113,0	131,0	147,0
M 10 x 1,25	8.8	33,1	32,4	31,6	30,8	29,9	28,2	26,5	38,0	44,0	51,0	57,0	62,0	72,0	80,0
	10.9	48,6	47,5	46,4	45,2	44,0	41,4	38,9	55,0	65,0	75,0	83,0	92,0	106,0	118,0
	12.9	56,8	55,6	54,3	52,9	51,4	48,5	45,5	65,0	76,0	87,0	98,0	107,0	124,0	138,0
M 12 x 1,25	8.8	50,1	49,1	48,0	46,8	45,6	43,0	40,4	66,0	79,0	90,0	101,0	111,0	129,0	145,0
	10.9	73,6	72,1	70,5	68,7	66,9	63,2	59,4	97,0	116,0	133,0	149,0	164,0	190,0	212,0
	12.9	86,2	84,4	82,5	80,4	78,3	73,9	69,5	114,0	135,0	155,0	174,0	192,0	222,0	249,0
M 12 x 1,5	8.8	47,6	46,6	45,5	44,3	43,1	40,6	38,2	64,0	76,0	87,0	97,0	107,0	123,0	137,0
	10.9	70,0	68,5	66,8	65,1	63,3	59,7	56,0	95,0	112,0	128,0	149,0	157,0	181,0	202,0
	12.9	81,9	80,1	78,2	76,2	74,1	69,8	65,6	111,0	131,0	150,0	174,0	183,0	212,0	236,0
M 14 x 1,5	8.8	67,8	66,4	64,8	63,2	61,5	58,1	54,6	104,0	124,0	142,0	160,0	175,0	203,0	227,0
	10.9	99,5	97,5	95,2	92,9	90,4	86,3	80,2	153,0	182,0	209,0	243,0	257,0	299,0	333,0
	12.9	116,5	114,1	111,4	108,7	105,8	99,8	93,9	179,0	213,0	244,0	287,0	301,0	349,0	390,0
M 16 x 1,5	8.8	91,4	89,6	87,6	85,5	83,2	78,6	74,0	159,0	189,0	218,0	259,0	269,0	314,0	351,0
	10.9	134,2	131,6	128,7	125,5	122,3	115,5	108,7	233,0	278,0	320,0	374,0	396,0	461,0	515,0
	12.9	157,1	154,0	150,6	146,9	143,1	135,1	127,2	273,0	325,0	374,0	437,0	463,0	539,0	603,0
M 18 x 1,5	8.8	122,0	120,0	117,0	115,0	112,0	105,0	99,0	237,0	283,0	327,0	384,0	406,0	473,0	530,0
	10.9	174,0	171,0	167,0	163,0	159,0	150,0	141,0	337,0	403,0	465,0	539,0	578,0	674,0	755,0
	12.9	204,0	200,0	196,0	191,0	186,0	176,0	166,0	394,0	472,0	544,0	620,0	676,0	789,0	884,0
M 18 x 2	8.8	114,0	112,0	109,0	107,0	104,0	98,0	92,0	229,0	271,0	311,0	368,0	383,0	444,0	495,0
	10.9	163,0	160,0	156,0	152,0	148,0	139,0	131,0	326,0	386,0	443,0	523,0	545,0	632,0	706,0
	12.9	191,0	187,0	182,0	178,0	173,0	163,0	153,0	381,0	452,0	519,0	613,0	638,0	740,0	826,0
M 20 x 1,5	8.8	154,0	151,0	148,0	144,0	141,0	133,0	125,0	327,0	392,0	454,0	548,0	565,0	660,0	741,0
	10.9	219,0	215,0	211,0	206,0	200,0	190,0	179,0	466,0	558,0	646,0	766,0	804,0	940,0	1055,0
	12.9	257,0	252,0	246,0	241,0	234,0	222,0	209,0	545,0	653,0	756,0	881,0	941,0	1100,0	1234,0
M 22 x 1,5	8.8	189,0	186,0	182,0	178,0	173,0	164,0	154,0	440,0	529,0	613,0	711,0	765,0	896,0	1006,0
	10.9	269,0	264,0	259,0	253,0	247,0	233,0	220,0	627,0	754,0	873,0	1000,0	1090,0	1276,0	1433,0
	12.9	315,0	309,0	303,0	296,0	289,0	273,0	257,0	734,0	882,0	1022,0	1174,0	1275,0	1493,0	1677,0
M 24 x 1,5	8.8	228,0	224,0	219,0	214,0	209,0	198,0	187,0	570,0	686,0	796,0	920,0	995,0	1166,0	1311,0
	10.9	325,0	319,0	312,0	305,0	298,0	282,0	266,0	811,0	977,0	1133,0	1300,0	1417,0	1661,0	1867,0
	12.9	380,0	373,0	366,0	357,0	347,0	330,0	311,0	949,0	1143,0	1326,0	1530,0	1658,0	1943,0	2185,0
M 24 x 2	8.8	217,0	213,0	209,0	204,0	198,0	187,0	177,0	557,0	666,0	769,0	899,0	955,0	1114,0	1248,0
	10.9	310,0	304,0	297,0	290,0	282,0	267,0	251,0	793,0	949,0	1095,0	1232,0	1360,0	1586,0	1777,0
	12.9	362,0	355,0	348,0	339,0	331,0	312,0	294,0	928,0	1110,0	1282,0	1442,0	1591,0	1856,0	2080,0
M 27 x 1,5	8.8	293,0	288,0	282,0	276,0	269,0	255,0	240,0	822,0	992,0	1153,0	1304,0	1445,0	1697,0	1910,0
	10.9	418,0	410,0	402,0	393,0	383,0	363,0	342,0	1171,0	1413,0	1643,0	1858,0	2059,0	2417,0	2720,0
	12.9	489,0	480,0	470,0	460,0	448,0	425,0	401,0	1370,0	1654,0	1922,0	2174,0	2409,0	2828,0	3183,0
M 27 x 2	8.8	281,0	276,0	270,0	264,0	257,0	243,0	229,0	806,0	967,0	1119,0	1262,0	1394,0	1630,0	1829,0
	10.9	400,0	393,0	384,0	375,0	366,0	346,0	326,0	1149,0	1378,0	1594,0	1797,0	1986,0	2322,0	2605,0
	12.9	468,0	460,0	450,0	439,0	428,0	405,0	382,0	1344,0	1612,0	1866,0	2103,0	2324,0	2717,0	3049,0
M 30 x 2	8.8	353,0	347,0	339,0	331,0	323,0	306,0	288,0	1116,0	1343,0	1556,0	1756,0	1943,0	2276,0	2557,0
	10.9	503,0	494,0	483,0	472,0	460,0	436,0	411,0	1590,0	1912,0	2216,0	2502,0	2767,0	3241,0	3641,0
	12.9	588,0	578,0	565,0	552,0	539,0	510,0	481,0	1861,0	2238,0	2594,0	2927,0	3238,0	3793,0	4261,0
M 33 x 2	8.8	433,0	425,0	416,0	407,0	397,0	376,0	354,0	1489,0	1794,0	2082,0	2352,0	2605,0	3054,0	3435,0
	10.9	617,0	606,0	593,0	580,0	565,0	535,0	505,0	2120,0	2555,0	2965,0	3350,0	3710,0	4350,0	4892,0
	12.9	722,0	709,0	694,0	678,0	662,0	626,0	591,0	2481,0	2989,0	3470,0	3921,0	4341,0	5090,0	5725,0
M 36 x 2	8.8	521,0	512,0	502,0	490,0	478,0	453,0	427,0	1943,0	2345,0	2725,0	3082,0	3415,0	4010,0	4513,0
	10.9	742,0	729,0	714,0	698,0	681,0	645,0	609,0	2767,0	3340,0	3882,0	4390,0	4864,0	5711,0	6528,0
	12.9	869,0	853,0	836,0	817,0	797,0	755,0	712,0	3238,0	3908,0	4542,0	5137,0	5692,0	6683,0	7522,0
M 39 x 2	8.8	618,0	607,0	595,0	581,0	567,0	537,0	507,0	2483,0	3002,0	3493,0	3953,0	4383,0	5151,0	5801,0
	10.9	880,0	864,0	847,0	828,0	808,0	765,0	722,0	3537,0	4276,0	4974,0	5631,0	6243,0	7336,0	8263,0
	12.9	1030,0	1011,0	991,0	969,0	945,0	896,0	850,0	4139,0	5003,0	5821,0	6589,0	7306,0	8585,0	9669,0

Fonte: VDI 2230 (2003).

Tabela 8 da VDI 2230 - Valores guia para fator de aperto α_A .

REGIME DE MONTAGEM	FATOR DE APERTO α_A	DISPERSÃO	TÉCNICA DE APERTO	TÉCNICA DE AJUSTE	OBSERVAÇÕES	
Zona Plástica	1	$\pm 5 a \pm 12 \%$	Aperto por controle de limite de escoamento (motorizado ou operado manualmente)	Determinação experimental da curva torque-ângulo na junta original	A dispersão da força tensora é predominantemente determinada pela dispersão de limite de escoamento do lote de parafusos montados. Neste caso, os parafusos são dimensionados por $F_{N\text{mín}}$; portanto, o fator de aperto α_A é omitido para este método de aperto.	
	1	$\pm 5 a \pm 12 \%$	Aperto por controle de limite de escoamento (motorizado ou operado manualmente)	Determinação experimental da curva torque-ângulo na junta original		
Zona Elástica	1,2 a 1,6	$\pm 9 a \pm 23 \%$	Aperto por medição de alongamento (aperto hidráulico)	Ajuste por medição do alongamento do parafuso ou por medição de pressão	Valores inferiores para parafusos com grande comprimento. Valores superiores para parafusos curtos.	
	1,4 a 1,6	$\pm 17 a \pm 23 \%$	Aperto por controle de torque ou aparafusadeira de precisão com medição de torque dinâmico	Cálculo do torque de montagem através da determinação experimental dos coeficientes de atrito na junta aparafusada original	Valores inferiores para um grande número de ensaios (Ex.: 20). Pequena dispersão do torque aplicado. Limitação eletônica do torque durante a montagem em aparafusadeiras de precisão.	Valores mais baixos para: - pequenos ângulos de giro, isto é, juntas relativamente rígidas; - juntas com superfície de apoio de dureza relativamente baixa; - superfície de apoio sem tendência ao engripamento (Ex.: fosfatizada).
	1,6 a 1,8	$\pm 23 a \pm 28 \%$		Determinação do torque necessário mediante a estimativa dos coeficientes de atrito	Valores inferiores para torquímetros de precisão (Exemplo: torquímetros eletrônicos). Aperto uniforme, sem trancos. Valores superiores para torquímetros sinalizadores ou com catraca.	
	1,7 a 2,5	$\pm 26 a \pm 43 \%$	Aperto por controle de torque mediante aparafusadeira	Ajuste da aparafusadeira por torque de reaperto tomado a partir do momento teórico de aperto, por estimativa dos coeficientes de atrito e mais um acréscimo	Valores inferiores para um grande número de ensaios (Ex.: 20). Aparafusadeiras com embreagem de desacoplamento.	
	2,5 a 4	$\pm 43 a \pm 60 \%$	Aperto por controle de torque com uso de chave de impacto	Ajuste da aparafusadeira através de torque de reaperto, como acima	Valores inferiores para: - grande número de ensaios; - trabalhar no eixo horizontal da curva característica da aparafusadeira.	

Fonte: VDI 2230 (2003).

Tabela 9 da VDI 2230 - Valores guia para limite de pressão superficial P_G de diferentes materiais.

MATERIAL	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO R_m [N/mm²]	LIMITE DE PRESSÃO SUPERFICIAL* P_G [N/mm²]
St37	370	260
St50	500	420
C45	800	700
42CrMo4	1000	850
30CrNiMo8	1200	750
X5CrNiMo1810**	500 a 700	210
X10CrNiMo189**	500 a 750	220
Aço Inoxidável Estrudado ou Temperado	1200 a 1500	1000 a 1250
Titânio Puro	390 a 540	300
Ti-6Al-4V	1100	1000
GG 15	150	600
GG 25	250	800
GG 35	350	900
GG 40	400	1100
GGG 35.3	350	480
GD MgAl9	300 (200)	220 (140)
GK MgAl9	200 (300)	140 (220)
GK AlSi6 Cu4	-	200
AlZnMgCu0.5	450	370
Al99	160	140

* Para aperto motorizado, os valores de tensão superficial deverão ser multiplicados por 0,75.
 ** Para materiais conformados a frio, o limite de pressão superficial é consideravelmente maior.

Fonte: VDI 2230 (2003).

Tabela 10-A da VDI 2230 - Valores nominais para passo (DIN 13 parte 1 e 28), área de secção transversal de menor diâmetro (sob tensão) da rosca do parafuso (DIN 13 parte 28) e a força de escoamento $F_{0,2}$ para hastes de parafusos com rosca métrica standard (DIN ISO 898 parte 1).

BITOLA	PASSO	DIÂMETRO EFETIVO DA ROSCA	DIÂMETRO INTERNO DA ROSCA	ÁREA NOMINAL	ÁREA DE TENSÃO	ÁREA DE SECÇÃO TRANSVERSAL DE MENOR DIÂMETRO	FORÇA NO LIMITE DE ESCOAMENTO $F_{0,2} = R_{p0,2} \cdot A_s$		
	P	d_2	d_3	A_N	A_s	A_{d3}	CLASSE DE RESISTÊNCIA		
	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ²	8.8	10.9	12.9
ROSCA MÉTRICA STANDARD									
4	0,70	3,545	3,141	12,57	8,78	7,75	5618	8252	9657
5	0,80	4,480	4,019	19,63	14,18	12,68	9077	13332	15601
6	1,00	5,350	4,773	28,27	20,12	17,89	12879	18916	22136
7	1,00	6,350	5,773	38,48	28,86	26,18	18470	27128	31746
8	1,25	7,188	6,466	50,27	36,61	32,84	23429	34412	40269
10	1,50	9,026	8,160	78,54	57,99	52,29	37113	54510	63789
12	1,75	10,863	9,853	113,10	84,27	76,25	53931	79211	92693
14	2,00	12,701	11,546	153,94	115,44	104,71	73881	108513	126983
16	2,00	14,701	13,546	201,06	156,67	144,12	100268	147268	172335
18	2,50	16,376	14,933	254,47	192,47	175,14	123182	180924	211720
20	2,50	18,376	16,933	314,16	244,79	225,19	156668	230107	269274
22	2,50	20,376	18,933	380,13	303,40	281,53	194175	285195	333739
24	3,00	22,051	20,319	452,39	352,50	324,27	225602	331354	387754
27	3,00	25,051	23,319	572,56	459,41	427,09	294020	431842	505347
30	3,50	27,727	25,706	706,86	560,59	518,99	358776	526952	616646
33	3,50	30,727	28,706	855,30	693,55	647,19	443874	651940	762909
36	4,00	33,402	31,093	1017,88	816,72	759,28	522702	767719	898395
39	4,00	36,402	34,093	1194,59	975,75	912,87	624482	917207	1073328

Fonte: VDI 2230 (2003).

Tabela 10-A da VDI 2230 - Valores nominais para passo (DIN 13 parte 1 e 28), área de secção transversal de menor diâmetro (sob tensão) da rosca do parafuso (DIN 13 parte 28) e a força de escoamento $F_{0,2}$ para hastes de parafusos com rosca métrica fina (DIN ISO 898 parte 1).

BITOLA	PASSO	DIÂMETRO EFETIVO DA ROSCA	DIÂMETRO INTERNO DA ROSCA	ÁREA NOMINAL	ÁREA DE TENSÃO	ÁREA DE SECÇÃO TRANSVERSAL DE MENOR DIÂMETRO	FORÇA NO LIMITE DE ESCOAMENTO $F_{0,2} = R_{p0,2} \cdot A_s$		
	P	d_2	d_3	A_N	A_s	A_{d3}	CLASSE DE RESISTÊNCIA		
	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ²	8.8	10.9	12.9
ROSCA MÉTRICA STANDARD									
8	1,00	7,350	6,773	50,27	39,17	36,03	25067	36817	43084
9	1,00	8,350	7,773	63,62	51,05	47,45	32669	47982	56150
10	1,00	9,350	8,773	78,54	64,49	60,45	41276	60624	70943
10	1,25	9,188	8,466	78,54	61,20	56,30	39167	57527	67318
12	1,25	11,188	10,466	113,10	92,07	86,04	58926	86548	101279
12	1,50	11,026	10,160	113,10	88,13	81,07	56401	82838	96939
14	1,50	13,026	12,160	153,94	124,55	116,13	79709	117073	137000
16	1,50	15,026	14,160	201,06	167,25	157,47	107039	157213	183973
18	1,50	17,026	16,160	254,47	216,23	205,10	138390	203260	237858
18	2,00	16,701	15,546	254,47	204,18	189,82	130676	191930	224599
20	1,50	19,026	18,160	314,16	271,50	259,00	173762	255213	298654
22	1,50	21,026	20,160	380,13	333,06	319,20	213156	313072	366361
24	1,50	23,026	22,160	452,39	400,89	385,67	256570	376838	440980
24	2,00	22,701	21,546	452,39	384,42	364,61	246026	361351	422858
27	1,50	26,026	25,160	572,56	514,43	497,17	329232	483560	565868
27	2,00	25,701	24,546	572,56	495,74	473,22	317274	465996	545314
30	1,50	29,026	28,160	706,86	642,10	622,80	410942	603571	706306
30	2,00	28,701	27,546	706,86	621,20	595,96	397596	583929	683621
33	1,50	32,026	31,160	855,30	783,91	762,56	501699	736871	862296
33	2,00	31,701	30,546	855,30	760,80	732,83	486911	715151	836879
36	1,50	35,026	34,160	1017,88	939,85	916,47	601505	883460	1033836
36	3,00	34,051	32,319	1017,88	864,94	820,38	553560	813041	651431
39	1,50	38,026	37,160	1194,59	1109,93	1084,51	710358	1043338	1220927
39	3,00	37,051	35,319	1194,59	1028,39	979,75	658168	966685	1131227

Fonte: VDI 2230 (2003).