unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RODRIGO RABELO DA ENCARNAÇÃO

Análise do torque de aperto em uniões parafusadas

Guaratinguetá - SP
2019

Rodrigo Rabelo da Encarnação

Análise do torque de aperto em uniões parafusadas

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na Área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP
2019

Encarnação, Rodrigo Rabelo da
E56a Análise do torque de aperto em uniões parafusadas / Rodrigo Rabelo da Encarnação – Guaratinguetá, 2019.
112 f : il.
Bibliografia: f. 79-81

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Peças de máquinas. 2. Torque. 3. Parafusos e porcas. I. Título

CDU 621.81(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RODRIGO RABELO DA ENCARNAÇÃO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Profª. Drª. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP/FEG

Prof. Dr. MAURICIO GUIMARÃES DA SILVA
IAE/DCTA

Fevereiro de 2019

DADOS CURRICULARES

RODRIGO RABELO DA ENCARNAÇÃO

NASCIMENTO	23/12/1986 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Benedito Gonçalo da Encarnação Maria Isolete Rabelo da Encarnação
2002/2006	Técnico em Mecânica Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá - UNESP
2007/2013	Engenheiro Mecânico Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP
2013/2014	Licenciatura Plena Faculdade Paulista São José
2013/2016	Pedagogia-Licenciatura Faculdade Paulista São José

Dedico este trabalho aos meus pais que com muito carinho sempre me deram discernimento para trilhar os melhores caminhos. E a minha esposa que sempre me incentivou a realizar mais essa etapa de minha carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

ao meu orientador Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva que possibilitou a realização deste trabalho.

aos meus pais Benedito e Maria Isolete que sempre incentivaram os meus estudos.

a minha esposa Andresa Marcondes da Silva que nos momentos mais difíceis me incentivou a continuar.

ao professor Dr. José Elias Tomazini e ao professor Dr. Erick Siqueira Guidi por acompanharem a elaboração da parte experimental.

ao amigo e técnico do departamento de mecânica Walter Luiz Medeiros Tupinambá (TUPI) meu agradecimento especial por todo o apoio e suporte na parte experimental, disponibilizando grande parte do seu tempo para a realização deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

As uniões parafusadas possuem uma grande aplicação na indústria, mas quando se pensa na utilização de parafusos existe uma impressão de ser um elemento de simples dimensionamento e de fácil aplicação. No entanto, o desenvolvimento de uniões por parafusos possui uma complexa sistemática de cálculo e sua montagem requer um cuidado para proporcionar o torque correto e consequentemente a pré-carga ideal. O intuito do trabalho foi a análise da pré-carga de uniões parafusadas a partir do torque de aperto. Para isso foi desenvolvido um torquímetro instrumentado com extensômetros para a aquisição do torque aplicado, foi desenvolvida também uma célula de carga para a aquisição da pré-carga aplicada na junta parafusada. Ambos os sinais foram aquisitados instantaneamente e a partir destes sinais foram feitas as análises das uniões parafusadas. Foram analisadas três condições diferentes de lubrificação para o parafuso e porca, estas foram: com lubrificação, sem lubrificação e lubrificação seca (grafite). Foram analisadas também duas condições de aplicação de torque, estas foram: torque pela porca e torque pelo parafuso. Portanto, foram analisados seis grupos diferentes de uniões parafusadas. Para cada um dos grupos foram aplicados 3 torqueamentos para cada conjunto de parafuso, porca e arruela, simulando três situações de montagem e desmontagem. Ao final foram feitas considerações sobre a influência das diferentes condições de lubrificação no torque aplicado e na pré-carga gerada na junta parafusada, e a influência de sucessivos torqueamentos em uma junta parafusada. Também foram geradas tabelas de coeficiente de torque e coeficiente de atrito para os seis grupos discutidos.

PALAVRAS-CHAVES: Elementos de máquinas. Parafusos. Juntas parafusadas. Torque de aperto. Pré-carga. Coeficiente de torque. Coeficiente de atrito.

ABSTRACT

Bolted joints are broadly used in the industry, but when it comes to their use there is a false impression of being a simple component, of easy dimensioning and easy application. However, designing bolted joints requires a complex calculus systematic and its assembly requires attention in order to apply the correct torque and consequently the ideal pre-load. The purpose of this dissertation was to analyze the pre-load of bolted joints from the tightening torque. Therefore, it was developed a torque wrench with strain gauges to measure the applied torque, and also developed a load cell to collect the pre-load onto the bolted joint. Both signals were instantaneous collected, and from this data, analysis were made over the bolted joints. Three different lubrication conditions for bolt and nut were analyzed: with and without lubrication and dry lubrication (graphite). Two torque application conditions were analyzed: the torque onto the nut and onto the bolt. Therefore, six different groups of bolted joints were analyzed. For each group of bolt, nut and washer, it was applied three torques simulating three assembly and disassembly operations. At the end, considerations were made on the influence of the different lubrication conditions on the applied torque and the generated pre-load onto the bolted joint, and the influence of successive torques on a bolted joint. Torque and friction coefficient tables were generated for all the above mentioned six groups.

KEYWORDS: Machine elements. Bolts. Bolted joints. Tightening torque. Pre-load. Torque coefficient. Friction coefficient.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades para a classe de resistência 8.8.....32
Tabela 2 – Propriedades para o parafuso M10 33
Tabela 3 – Propriedades para a porca M10 33
Tabela 4 – Deformação específica da célula de carga em função da força de compressão 46
Tabela 5 – Variação do sinal elétrico da célula de carga em função da força de compressão .48
Tabela 6 – Calibração do torquímetro utilizando equacionamento.....51
Tabela 7 – Calibração do torquímetro utilizando uma curva de calibração 52
Tabela 8 – Dimensões d_2 e D_{Km} 56
Tabela 9 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo A 58
Tabela 10 – Análise estatística para o Grupo A 58
Tabela 11 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo B 61
Tabela 12 – Análise estatística para o Grupo B.....61
Tabela 13 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo C 63
Tabela 14 – Análise estatística para o Grupo C.....63
Tabela 15 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo D 65
Tabela 16 – Análise estatística para o Grupo D 66
Tabela 17 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo E 68
Tabela 18 – Análise estatística para o Grupo E.....68
Tabela 19 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo F.....70
Tabela 20 – Análise estatística para o Grupo F 70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Junta parafusada 22
Figura 2 – Aparelho Skidmore - Wilhelm 24
Figura 3 – Circuito da Ponte de Wheatstone 28
Figura 4 – Extensômetria do torquímetro 29
Figura 5 – Barra carregada sobre compressão. 31
Figura 6 – Montagem I 36
Figura 7 – Montagem II 37
Figura 8 – Representação da célula de carga. 38
Figura 9 – Representação do Torquímetro 39
Figura 10 – Sistema de aquisição de dados HBM – Quantum MX1615 40
Figura 11 – Software CATMAN AP V3.3.58 41
Figura 12 – Célula de carga 41
Figura 13 – Torquímetro 42
Figura 14 – Ensaio de compressão da célula de carga 43
Figura 15 – Dispositivo de Compressão 44
Figura 16 – Prato inferior de compressão da SHIMADZU com escala em graus e componentes do dispositivo de compressão 45
Figura 17 – Simulação da célula de carga no Autodesk – Inventor 2019 47
Figura 18 – Sistema de aquisição de dados da calibração do torquímetro 49
Figura 19 – Ensaio de calibração do torquímetro 50
Figura 20 – Dispositivo para aplicação da pré-carga 53
Figura 21 – Nomenclatura de identificação do parafuso 54
Figura 22 – Medição das dimensões com o projetor de perfil 55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Torque x Pré-carga – Grupo A – 1° Torqueamento 57
Gráfico 2 – Torque x Pré-carga – Grupo A – 2° Torqueamento 57
Gráfico 3 – Torque x Pré-carga – Grupo A – 3° Torqueamento 58
Gráfico 4 - Torque x Pré-carga – Grupo B – 1° Torqueamento 59
Gráfico 5 – Torque x Pré-carga – Grupo B – 2° Torqueamento 60
Gráfico 6 – Torque x Pré-carga – Grupo B – 3° Torqueamento 60
Gráfico 7 – Torque x Pré-carga – Grupo C – 1° Torqueamento 62
Gráfico 8 – Torque x Pré-carga – Grupo C – 2° Torqueamento 62
Gráfico 9 – Torque x Pré-carga – Grupo C – 3° Torqueamento 62
Gráfico 10 – Torque x Pré-carga – Grupo D – 1° Torqueamento 64
Gráfico 11 – Torque x Pré-carga – Grupo D – 2° Torqueamento 64
Gráfico 12 – Torque x Pré-carga – Grupo D – 3° Torqueamento 65
Gráfico 13 – Torque x Pré-carga – Grupo E – 1° Torqueamento 66
Gráfico 14 – Torque x Pré-carga – Grupo E – 2° Torqueamento 67
Gráfico 15 – Torque x Pré-carga – Grupo E – 3° Torqueamento 67
Gráfico 16 – Torque x Pré-carga – Grupo F – 1° Torqueamento 69
Gráfico 17 – Torque x Pré-carga – Grupo F – 2° Torqueamento 69
Gráfico 18 – Torque x Pré-carga – Grupo F – 3° Torqueamento 69
Gráfico 19 – Comparativo da pré-carga por grupo e por número de torqueamentos para um torque aplicado de 55Nm 71
Gráfico 20 – Variação percentual da pré-carga com relação a condição de lubrificação 72
Gráfico 21 – Variação percentual da pré-carga quando o torque é aplicado pela porca em relação ao torque aplicado pelo parafuso 73
Gráfico 22 - Variação percentual do 2º com 1º e 3º com 2º torqueamentos 74
Gráfico 23 – Comparativo do coeficiente de torque por grupo e por número de torqueamentos para um torque aplicado de 55Nm 74
Gráfico 24 – Comparativo do coeficiente de atrito total por grupo e por número de torqueamentos para um torque aplicado de 55Nm 75

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	Society of Automotive Engineers
TA	Torque Aquisitado
TC	Torque Calculado

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da secção transversal da barra
a	distância para fixação dos extensômetros no torquímetro
A_f	área da secção transversal do fio
A_t	área de resistência a tração do parafuso
c	distância da linha neutra até a fibra mais afastada
d	diâmetro nominal do parafuso
d_2	diâmetro interno da rosca
d_K	diâmetro do furo da arruela
D_K	diâmetro maior da superfície de contato de baixo da cabeça do parafuso
D_{Km}	diâmetro médio da superfície de contato do parafuso ou da porca
D_P	diâmetro maior da superfície de contato da porca
d_P	diâmetro menor da superfície de contato da porca
E	módulo de elasticidade longitudinal
E	tensão de saída
E_r	erro relativo
F_i	pré-carga
F_p	carga de prova
I	momento de inércia
K	coeficiente de torque
k	sensibilidade do extensômetro
L	comprimento base do extensômetro
M	momento fletor
P	carga aplicada no torquímetro
p	passo da rosca
R	resistência elétrica do condutor
S_P	tensão de prova
T	torque de aperto
V	tensão de entrada
x	distância do ponto de aplicação da carga no torquímetro
$\bar{x}$	média
$\Delta E/V$	variação unitária de tensão
ΔL	variação de comprimento do extensômetro

ΔR	variação da resistência elétrica do extensômetro
$\Delta R/R$	variação unitária de resistência
ε	deformação específica
ε_a	deformações específicas na direção axial
ε_t	deformações específicas na direção transversal
μ_G	coeficiente de atrito da rosca
μ_{GES}	coeficiente de atrito total
μ_K	coeficiente de atrito da cabeça do parafuso ou da porca
ν	coeficiente de Poison
ρ	resistividade elétrica
σ	tensão normal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 16
1.2 OBJETIVO 17
1.3 JUSTIFICATIVAS 17
1.4 ESTADO DA ARTE 17
1.5 CONTRIBUIÇÃO 20
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 22
2.1 JUNTA PARAFUSADA 22
2.2 EXTENSÔMETROS 26
2.2.1 Extensômetros – Aplicação prática em um torquímetro 28
2.2.2 Extensômetros – Aplicação prática para compressão 30
3 MATERIAIS E MÉTODOS 32
3.1 CÁLCULOS PRELIMINARES 32
3.2 ELABORAÇÃO DOS DESENHOS 34
3.3 USINAGEM DOS DISPOSITIVOS 40
3.4 INSTRUMENTAÇÃO 40
3.5 CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS 42
3.5.1 Calibração da célula de carga 43
3.5.2 Calibração do torquímetro 49
3.6 PROCEDIMENTO DE ENSAIO 52
3.7 DIMENSÕES DAS PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS 54
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 57
4.1 ANÁLISE DOS ENSAIOS POR GRUPO 57
4.1.1 Grupo A – Torque pela porca com lubrificação 57
4.1.2 Grupo B – Torque pelo parafuso com lubrificação 59
4.1.3 Grupo C – Torque pela porca sem lubrificação 61
4.1.4 Grupo D – Torque pelo parafuso sem lubrificação 64
4.1.5 Grupo E – Torque pela porca com lubrificação seca (grafite) 66
4.1.6 Grupo F – Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite) 68
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DA PRÉ-CARGA ENTRE OS GRUPOS 71

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DO COEFICIENTE DE TORQUE ENTRE OS GRUPOS 74
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DO COEFICIENTE DE ATRITO TOTAL ENTRE OS GRUPOS 75
5 CONCLUSÃO 77
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 78
REFERÊNCIAS 79
APÊNDICE A – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo A 82
APÊNDICE B – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo B 87
APÊNDICE C – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo C 92
APÊNDICE D – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo D 97
APÊNDICE E – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo E 102
APÊNDICE F – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo F 107
ANEXO I – Informações técnicas do extensômetro KFG-3-120-C1-11 112

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A utilização de parafusos na indústria dá-se em diversos setores e com diferentes aplicações. Para Oliveira (2002) uma variedade enorme de dispositivos de uniões existe a disposição dos projetistas mecânicos, para serem aplicados nos mais diversos setores da indústria mecânica.

Os parafusos podem possuir diversos formatos para atender desde métodos de fixação, como também, características de cargas a serem aplicadas. Para Shigley, Mischke e Budynas (2005) podem-se classificar os parafusos em dois grandes grupos, os parafusos de potência, onde se pode transformar movimento rotativo em movimento linear, e os parafusos de fixação, onde o objetivo é unir peças.

Sabendo que as uniões parafusadas possuem uma grande aplicação na indústria pode-se ter uma impressão que é um elemento de simples dimensionamento e de fácil aplicação, no entanto, os estudos nesta área têm sido muito intensificados, como afirma Oliveira (2002), o projeto de juntas em fixações mecânicas ainda é um assunto em estudos e em desenvolvimento por parte de pesquisadores e projetistas de máquinas.

Portanto, o desenvolvimento de uniões por parafusos possui uma complexa sistemática de cálculo e sua montagem requer um cuidado para proporcionar o torque correto e consequentemente à pré-carga ideal. Em Oliveira (2002) os métodos de uniões de peças são extremamente importantes num projeto mecânico, sendo por isso necessário conhecer perfeitamete o desempenho e o comportamento das uniões. Para Norton (2004) em uniões parafusadas é uma prática comum aplicar um pré-carregamento no aperto dos parafusos por meio de um torque suficiente para criar cargas de tração que se aproximam da resistência de prova do parafuso. Shigley, Mischke e Budynas (2005) determinam que a resistência de prova seja o quociente da carga de prova e a área de tensão de tração, segundo Ciser Parafusos e Porcas (2018) a carga de prova é a maior força axial aplicável sem ocorrência de deformação permanente.

Neste trabalho o foco foi a análise da pré-carga de uniões parafusadas e como essa pode ser influenciada em diferentes tipos de condições de lubrificação e consequentemente diferentes forças de atrito entre a cabeça do parafuso e a superfície atritada durante o torque de aperto, portanto, quanto do torque de aperto foi dissipado entre essas partes e quanto foi disponibilizado para a torção na rosca.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é fazer a análise de uma junta parafusada durante o torque de aperto. Especificamente, objetiva-se verificar a influência:

- ✓ do torque de aperto sendo aplicado pela porca ou pelo parafuso na intensidade da pré-carga gerada;
- ✓ da lubrificação na intensidade da pré-carga gerada a partir do processo de torqueamento;
- ✓ de sucessivos processos de torqueamento na intensidade da pré-carga gerada.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A temática desta dissertação foi escolhida pelo fato de uniões parafusadas serem amplamente utilizadas em montagens de equipamentos industriais, no entanto, as condições de lubrificação do parafuso, porca e arruela durante a montagem de uma união parafusada e a condição de aplicação do torque pela porca ou pela cabeça do parafuso possuem particularidades que podem ser melhor analisadas. Por exemplo, no cotidiano a condição de aplicação do torque pela porca é preferencialmente utilizada se comparado com o torque aplicado pela cabeça do parafuso, no entanto, é um conceito que muitas vezes o profissional responsável pela montagem da união parafusada não sabe qual a justificativa. Um segundo exemplo é citado em Rakićević et al. (2016) onde uma condição de lubrificação ineficiente reflete de forma negativa na aplicação da pré-carga na junta parafusada.

Portanto, a análise do comportamento de uniões parafusadas pode trazer conclusões importantes sobre a aplicação do torque de aperto e da pré-carga em diferentes condições de lubrificação e aplicação do torque pela cabeça do parafuso ou pela porca.

1.4 ESTADO DA ARTE

Segundo Huo et al. (2017) as uniões parafusadas são amplamente empregadas nas áreas de engenharia mecânica e civil, podendo uma pré-carga deficiente causar falhas catastróficas. Assim em seus estudos foi feita a instrumentação usando um método de impedância eletromecânica ativada por uma arruela instrumentada, que possui um transdutor piezocerâmico. Ficou constatada que a diminuição da pré-carga reflete diretamente na frequência de ressonância da junta do parafuso a qual pode ser percebida pela impedância da

piezocerâmica na arruela instrumentada.

Para Murthy e Vadivuchezhian (2017) o coeficiente de atrito sofre uma influência temporal e espacial, ou seja, uma superfície atritada sofre modificações instantâneas e por isso uma superfície atritada não apresenta o mesmo coeficiente de atrito de momentos anteriores. Para esse estudo foi feita uma ferramenta de análise para verificação dessas condições onde o objetivo é comparar os valores de coeficientes de atritos fornecidos por método experimental com valores estimados dos valores de atrito. Com isso foi possível perceber que o resultado da comparação entre ambos foi concordante.

No artigo de Jiménez-Peña et al. (2017) é realizada uma reflexão sofre a influência da fadiga por atrito em uniões parafusadas, assim o trabalho realizado constituiu-se de uma variedade de testes de fadiga com chapas de aço S500MC de alta resistência. No trabalho é percebido que quanto maior a pré-carga, menor foi o efeito da fadiga por atrito. Além disso, uma modelagem em elementos finitos demonstrou com boa precisão o posicionamento no início da fissura gerada pela fadiga.

Nos estudos de Coria et al. (2017) é analisada a complexidade em realizar a distribuição uniforme da carga do parafuso em juntas com gaxetas do vaso de pressão usadas em tubulações offshore. Para tanto, o trabalho usou o Método dos Coeficientes de Interação Elástica já validado para realizar o aperto em flanges de junta tipo anel metálico com vedação metálica, desta maneira comparando com uma nova metodologia chamada Método de Montagem Tetraparamétrica (TAM) que foi desenvolvida para esse tipo específico de junta. O TAM calcula as cargas de aperto usando apenas duas etapas de carga e um pequeno número de medições de carga, apresentando um custo muito menor que o Método dos Coeficientes de Interação Elástica.

O artigo de Rakićević et al. (2016) trata de um estudo em uma união parafusada com parafusos de classe de resistência 12.9 utilizados para fixar a coluna de uma plataforma aérea. Neste trabalho foi feita a análise de vários possíveis fatores de falha nos parafusos utilizados para a união parafusada em questão, e um dos principais fatores para a falha por fadiga nos parafusos foi a incorreta aplicação da pré-carga em condições inadequadas de lubrificação. Portanto, o fator humano é considerado como principal fator para as falhas em uniões parafusadas uma vez que os procedimentos para aperto das uniões parafusadas não são muitas vezes seguidos no ato da montagem.

Para J. Liu et al. (2015) uniões parafusadas que sofrem esforços cíclicos axiais podem diminuir o risco de afrouxamento se o torque de aperto for aumentado e a amplitude de excitação dos esforços for diminuída, além disso, outro fator predominante para evitar o

afrouxamento da união parafusada é fazer a utilização de lubrificação para a montagem, neste caso foi utilizada lubrificação a seco a base de molibdênio (MoS2). Outra conclusão é que a pré-carga não é constante e que à medida que aumenta o número de voltas dadas para realização do aperto da união parafusada, ocorre à diminuição da pré-carga, ou seja, até a terceira volta de aperto ocorre uma queda e depois se estabiliza, esse fato está relacionado a deformação plásticas dos fios. No trabalho é citada a utilização de métodos experimentais e numéricos, além de análises com microscópio eletrônico de varredura e raio X nos parafusos utilizados nos experimentos.

No artigo de Yu e Zhou (2015) foi proposto um método em elementos finitos para simular as condições de pré-carga e o torque de aperto em uma união parafusada utilizada em vaso de pressão. A modelagem em elementos finitos proposta tomou como validação dois métodos matemáticos que foram de Motosh e Yamamoto e a partir destes percebeu-se que seu método de elementos finitos possui um resultado com apenas 5% de divergência quando comparado com os métodos. Com seus estudos foi percebido que o atrito entre a porca e o flange do vaso de pressão tem influência direta no torque de aperto e consequentemente na pré-carga gerada na união parafusada e que, se for utilizada lubrificação entre a porca e a flange, essa influência é minimizada.

O trabalho de Zhou et al. (2015) faz a aplicação de um modelo tridimensional em elementos finitos para uma junta parafusada onde as placas unidas são de material compósito. No modelo realizado é analisado um sistema com folgas variáveis e faz a simulação de falhas como trincas e rachaduras nas placas de compósitos. O modelo foi validado através de ensaios e foi capaz de prever efeitos tais como danos não uniformes de fibra através da espessura, efeitos de flexão secundária e redistribuição de carga quando há falha de deslizamento.

Em Esmaeili et al. (2015) é feita uma análise em juntas parafusadas ou coladas. Para essas duas condições são verificados e comparados os efeitos do torque de aperto na vida em fadiga. Para o estudo foi feito um experimento com as duas condições aplicando os efeitos de fadiga multi-axial. Além do experimento montado foi realizado um modelo matemático com um software. Os resultados apresentados mostraram que a junta parafusada apresentou menor vida útil em fadiga do que a junta colada, além disso, o estudo demonstrou um melhor resultado para os dois tipos de juntas quando há um aumento da pré-carga gerada pelo aumento do torque de aperto.

Para o trabalho de F. Liu et al. (2015) foi criado um modelo matemático para a análise de juntas parafusadas onde as placas são feitas de compósitos. Com o trabalho foi possível perceber que para as juntas utilizadas com uma variação da folga entre o furo e o parafuso existe

uma variação do atrito entre o parafuso e a placa de compósito durante a etapa de aperto das juntas parafusadas, outra conclusão é que no início do aperto ocorre um atraso para começar a compressão das juntas, uma vez que no início do torque é necessário vencer o atrito entre o parafuso e a placa, portanto, se for comparado o atraso para o início da compressão nas placas com a folga entre o furo e o parafuso é possível relacionar que quanto menor a folga mais rápida foi a resposta para o início da compressão.

1.5 CONTRIBUIÇÃO

Como já foi abordado no item 1.2 os objetivos desta tese estão relacionados a análise de uniões parafusadas. E ao final desta tese serão apresentadas as análises referentes ao torque, pré-carga, coeficiente de torque e de atrito para diferentes configurações de montagem e lubrificação. No entanto, para a realização dos ensaios foi necessária a construção de uma célula de carga para medição da pré-carga aplicada pelo parafuso na junta parafusada e um torquímetro para a medição do torque aplicado na junta parafusada. Esses dois dispositivos foram confeccionados, instrumentados e calibrados especificamente para a realização desta tese e ficaram à disposição de trabalhos futuros no Laboratório de Mecânica do Departamento de Mecânica da FEG – UNESP.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 Introdução: são apresentadas as considerações gerais, objetivos, justificativas, estado da arte e a estruturação da dissertação com a finalidade de fazer uma breve apresentação da dissertação ao leitor. Neste capítulo há uma abordagem sobre a importância de uniões parafusadas e os cuidados a serem tomados em sua montagem quanto a torque de aperto e pré-carga.

Capítulo 2 Fundamentação teórica: é apresentada ao leitor todos os conceitos teóricos relevantes que foram necessários para a elaboração desta dissertação, ou seja, conceitos teóricos e formulação matemática que foram complementares a base conceitual teórica adquirida durante a graduação de engenharia mecânica.

Capítulo 3 Material e método: relaciona os materiais e equipamentos e descreve as etapas para a execução dos ensaios realizados na elaboração desta dissertação de tal maneira a possibilitar a replicação destes ensaios por outros do meio acadêmico ou profissionais da área.

Capítulo 4 Apresentação e discussão dos resultados: inicia-se com a apresentação de todos os dados coletados durante os ensaios, em seguida é feito o tratamento desses dados e por fim é feita a discussão dos resultados baseada nos conceitos teóricos.

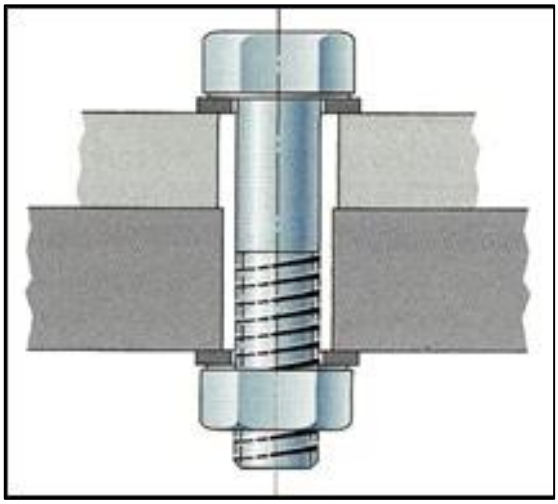
Capítulo 5 Conclusão: é realizada uma reflexão entre os objetivos geral e principal da dissertação com os resultados obtidos durante os ensaios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 JUNTA PARAFUSADA

As juntas ou uniões parafusadas são utilizadas como elementos de união e podem ser aplicadas dos mais variados modo, o exemplo mais simples é a utilização de parafusos com porcas e arruelas, como mostrado na Figura 1. Para essa configuração de montagem o comprimento de todos os elementos que estão entre a cabeça do parafuso e a porca é denominado comprimento de compressão dos elementos ou o comprimento de tração do parafuso.

Figura 1 – Junta parafusada



Fonte: Adaptada de Shigley, Mischke e Budynas (2005).

As juntas parafusadas são de grande importância para a indústria, e neste contexto, é necessário realizar uma correta montagem dos membros e dos parafusos, para garantir uma união rígida e segura (YUN, 2013). Para fazer essa montagem de forma eficiente, um fator imprescindível é a determinação de sua pré-carga e a aplicação da mesma.

A função da pré-carga é gerar uma força de compressão dos membros e, consequentemente, uma força de tração no parafuso. Esse tracionamento no parafuso tem como finalidade impedir que as partes da junta parafusada se afastem durante o carregamento externo de tração na junta. O ideal é que essa carga de tração seja próxima à resistência de prova do parafuso.

A carga de prova é a carga (força) máxima que o parafuso pode aguentar sem adquirir uma deformação permanente. A resistência de prova é o quociente da carga de prova e a área de tensão de tração (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005). Para a determinação da carga de prova é necessário realizar o produto da área resistiva A_t pela resistência de prova S_P do parafuso, Equação 1.

$$F_P = A_t S_p \tag{1}$$

Segundo Norton (2004), para montagens de forma elástica, uma pré-carga F_i que gera tensão no parafuso de até 90% da resistência de prova F_P é utilizada algumas vezes, conforme Equação 2. Para juntas carregadas dinamicamente (carga de fadiga), uma pré-carga de 75% ou mais é comumente utilizada conforme Equação 3.

$$F_i = 0{,}90\ F_P \tag{2}$$

$$F_i = 0{,}75\ F_P \tag{3}$$

No catálogo Ciser Parafusos e Porcas (2018) é fornecido o valor do torque de aperto a ser aplicado no parafuso e esse torque de aperto gera uma pré-carga correspondente a 80% da carga de prova do parafuso. Ainda segundo Ciser Parafusos e Porcas (2018):

> Os valores são orientativos e se baseiam em condições médias de atrito aço com aço. A utilização de revestimentos anticorrosivos poderá alterar substancialmente os resultados. Para aplicações críticas, os valores deverão ser aferidos com a utilização de aparelho Skidmore - Wilhelm ou similar, para determinação de esforço axial na haste do parafuso. (CISER PARAFUSOS E PORCAS, 2018)

O aparelho Skidmore - Wilhelm, Figura 2, é uma célula de carga hidráulica utilizada para medir o desempenho de fixadores em uma pré-instalação fazendo testes de tensão e capacidade de rotação, ou seja, teste geral de fixadores para determinar relações de torque / tensão.

Figura 2 – Aparelho Skidmore - Wilhelm



Fonte: Skidmore-Wilhelm (2018).

Como já foi abordada a determinação da pré-carga é apenas uma das dificuldades no dimensionamento de uma junta parafusada. Outro ponto a ser analisado é como foi feita a aplicação da pré-carga, e mais importante ainda é saber se a intensidade correta da pré-carga foi aplicada. Segundo Norton (2004), para controlar a pré-carga, um método mais preciso requer que ambas as extremidades do parafuso estejam descobertas, dessa forma, a quantidade de alongamento do parafuso pode ser medida com um micrômetro ou um medidor eletrônico.

Considerando que o parafuso e os membros sofrem um efeito como uma mola, através da deformação de alongamento do parafuso pode ser determinada qual a intensidade da pré-carga aplicada através do aperto do parafuso.

É possível realizar a análise da pré-carga por meio de torquímetros, no entanto, estes não possuem uma precisão em suas medidas. E podem ter um erro em torno de até ±30% (NORTON, 2004). Outro problema nessa consideração é o atrito que há entre a cabeça do parafuso e a superfície atritada, pois o torque aplicado pelo torquímetro na cabeça do parafuso deve ser um valor suficiente para gerar uma carga axial no parafuso próximo da carga de prova. Mas, como já foi discutido anteriormente, de acordo com o material do parafuso, tipo de cabeça do parafuso, tipo de arruela, se há ou não lubrificação, haverá uma variação do torque dissipado para vencer o atrito entre essas partes. E consequentemente, haverá uma variação da intensidade do torque restante para a torção no parafuso e por fim variação na intensidade da pré-carga.

Em J. Liu et al. (2015) foi demonstrado utilizando métodos teóricos e experimentais para estudar o atrito das juntas parafusadas que a rugosidade da superfície dos elementos e os materiais tinham um efeito importante no auto-afrouxamento da junta parafusada. E há uma

influência no processo de aplicação do torque de aperto, o qual pode ser determinado de maneira analítica, Norton (2004) sugere a Equação 4.

$$T = K\, F_i d \tag{4}$$

O fator *K* é denominado coeficiente de torque, o qual leva em consideração os valores de atrito entre a rosca do parafuso e da porca e as demais superfícies durante a aplicação do torque e *d* é o diâmetro do parafuso. Para Garcia (2008) o torque em uma junta parafusada tem três diferentes definições importantes:

- ✓ **Torque Dinâmico:** é definido como sendo o maior valor de torque aplicado no instante do torqueamento, ou seja, só é possível verificar este valor utilizando um apertadeira (elétrica-eletrônica) com controle de torque durante a operação de aperto ou por meio de outros sistemas de controle do torque que possibilite a aquisição do torque em tempo real.
- ✓ **Torque Estático:** pode ser definido como sendo o torque residual, ou seja, o valor de torque real aplicado na junta parafusada. Neste caso é o valor de torque necessário para iniciar a quebra de uma fixação já efetuada.
- ✓ **Torque Falso:** pode ser definido como sendo o torque aplicado em uma junta parafusada, mas que por algum motivo não chega a plicar a pré-carga necessária para a montagem. Os motivos podem ser defeitos/imperfeições nos filetes da porca e parafuso ou má lubrificação na montagem, desta forma haverá um atrito excessivo entre as partes roscadas fazendo com que uma maior parte do torque seja dissipado durante o torqueamento.

Ainda para Garcia (2008) o coeficiente de torque da Equação 4 é muito abrangente, pois este varia de acordo com as condições de atrito entre a cabeça do parafuso ou porca e a arruela e entre as partes roscas do parafuso e porca. Dessa forma é sugerida a Equação 5 na qual os fatores que influenciam o coeficiente de torque são apresentados de forma mais detalhada.

$$T = F_i \left(0{,}159.p + 0{,}578.d_2.\mu_G + \frac{D_{Km}}{2}.\mu_K\right) \tag{5}$$

Onde:

p – passo da rosca;

d_2 – diâmetro interno da rosca;

μ_G – Coeficiente de atrito na rosca;

D_{Km} – Diâmetro médio da superfície de contato da cabeça do parafuso ou porca;

μ_K – Coeficiente de atrito da cabeça do parafuso ou porca.

Em Garcia (2008) são apresentadas as equações para determinar os coeficientes de atrito μ_K, μ_G e μ_{GES}, sendo o último o coeficiente de atrito total.

$$\mu_G = \frac{T_G/F_i - 0{,}159.p}{0{,}578.d_2} \tag{6}$$

$$\mu_K = \frac{2.T_K}{D_{Km}.F_i} \tag{7}$$

$$\mu_{GES} = \frac{T/F_i - 0{,}159.p}{0{,}578.d_2 + D_{Km}/2} \tag{8}$$

No entanto, é necessária além da determinação por meio de métodos analíticos a aplicação experimental. Para isso se faz necessária a utilização de sistemas que possam fazer a aquisição de torque e pré-carga, dessa forma a extensômetria das juntas parafusadas e do torquímetro tornam possível uma análise mais precisa destes fenômenos. Esse sistema com a utilização de extensômetros faz a medição indireta das tensões geradas nas peças, no entanto, com eles é possível fazer a medição das deformações nessas peças e a partir dessas correlacionar as tensões geradas, conforme é sugerido por Pereira (2014).

2.2 EXTENSÔMETROS

Segundo Dally (1991) os extensômetros são dispositivos utilizados para fazer a medição de deformação. O extensômetro possui uma dimensão *L* denominada comprimento base e a finalidade do extensômetro é determinar qual a variação de comprimento ΔL submetida no material em função da deformação no extensômetro que está fixado ao material da peça. Com esta correlação é determinada a deformação específica ε sofrida pela peça, Equação 9.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{9}$$

Os extensômetros comumente utilizados hoje em dia são os extensômetros de resistência elétrica, também denominado de *strain gages*. Como extensômetro é um resistor, pode-se determinar a sua resistência elétrica *R* de acordo com a 2ª lei de Ohm, Equação 10, na qual estão

relacionados a resistividade elétrica ρ, a área da secção transversal do fio A_f e comprimento base L.

$$R = \rho \frac{L}{A_f} \tag{10}$$

Segundo Dally (1991), uma deformação específica ε corresponde a uma variação unitária de resistência $\Delta R/R$, e que dentro certos limites, é sensível a deformação do fio. Portanto, a razão entre a variação da resistência elétrica do extensômetro ΔR e a resistência elétrica do fio R pode-se igualar produto da deformação específica normal da peça ε e a sensibilidade do extensômetro k (fornecido pelo fabricante), Equação 11.

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \tag{11}$$

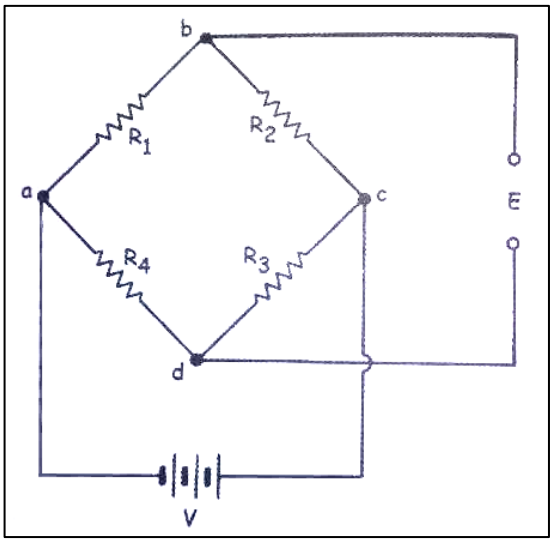
A Equação 12 representa a equação básica do extensômetro e assim pode-se medir a deformação específica de uma peça apenas pela medição da variação da resistência elétrica do extensômetro.

$$\varepsilon = \frac{1}{k}\frac{\Delta R}{R} \tag{12}$$

Não se consegue medir a variação da resistência elétrica com instrumentos comuns, portanto, é montado um circuito elétrico para fazer a medição desta variação, esse circuito elétrico é denominado ponte de Wheatstone, verificar

Figura 3. A ponte de Wheatstone está em equilíbrio quando o produto das resistências de ramos opostos for igual ao produto das outras duas resistências, Dally (1991). Para a ponte temos as resistências e a tensão de entrada V que acabam gerando a tensão de saída E.

Figura 3 – Circuito da Ponte de Wheatstone



Fonte: Pereira (2015).

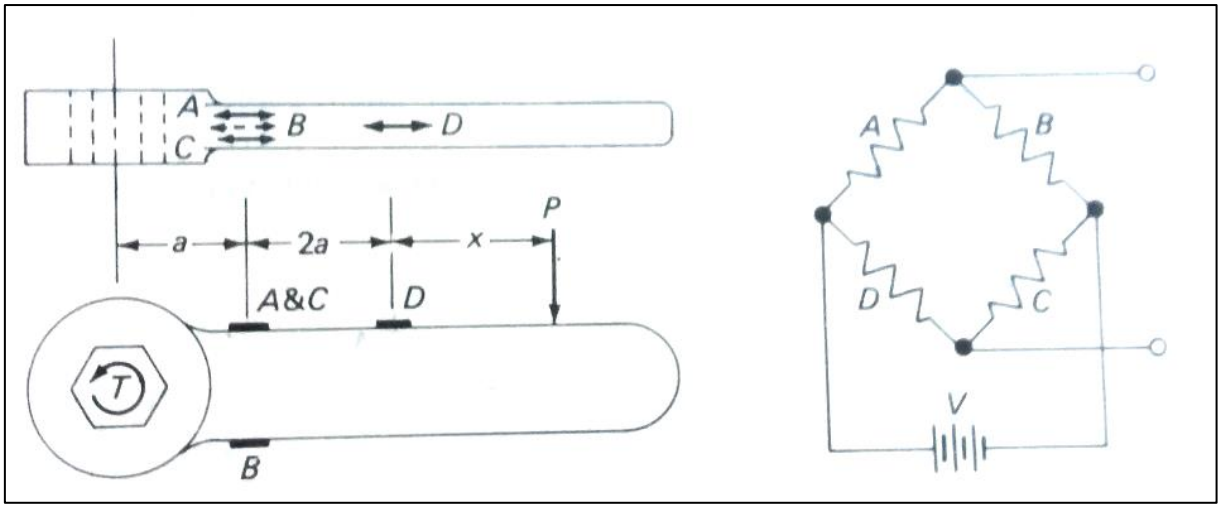
Logo, quando é analisada a aplicação da ponte de Wheatstone na sua forma completa com extensômetros, ou seja, cada resistência elétrica da ponte é substituída por um extensômetro e correlacionando com a Equação 11 e Equação 12, é obtida a Equação 13. Nessa é possível ver que quando houver uma solicitação mecânica na peça haverá uma variação de tensão na saída ΔE o que acaba por caracterizar o desbalanceamento da ponte.

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{1}{4}\left[k_1\varepsilon_1 - k_2\varepsilon_2 + k_3\varepsilon_3 - k_4\varepsilon_4\right] \tag{13}$$

2.2.1 Extensômetros – Aplicação prática em um torquímetro

Para uma aplicação prática ponte de Wheatstone completa e consequentemente da Equação 13 pode-se utilizar extensômetros em um torquímetro conforme Figura 4. Nesta estão quatro extensômetros unidirecionais montados nas posições A, B, C e D de maneira a estarem alinhados com o comprimento do torquímento. Os extensômetros A, B e C estão posicionados a uma distância *"a"* do centro de giro do torque aplicado e o extensômetro D está posicionado a uma distância três vezes maior. A carga P aplicada no torquímetro pode ser aplicada a uma distância qualquer *"x"* do extensômetro D.

Figura 4 – Extensômetria do torquímetro



Fonte: Dally (1991).

A lei de Hooke Equação 14 pode ser redefinida para a Equção15.

$$\sigma = E\,\varepsilon \tag{14}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M\,c}{E\,I} \tag{15}$$

Desta forma é possível reescrever a Equação 16 da seguinte forma.

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k\,c}{4\,E\,I}(M_A + M_B + M_C - M_D) \tag{16}$$

Sabe-se que os momentos fletores na seção que contém os pontos A, B e C são obtidos pela Equação 17, e que o momento fletor no ponto D é obtido pela Equação 18.

$$M_A = M_B = M_C = P(2a + x) \tag{17}$$

$$M_D = Px \tag{18}$$

Substituindo a Equação 17 e a Equação 18 na Equação 16, tem-se:

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k\,c}{4\,E\,I}(3P(2a + x) - Px) = \frac{k\,c}{4\,E\,I}(6Pa + 2Px) = \frac{2\,k\,c}{4\,E\,I}\,P\,(3a + x) \tag{19}$$

Se o torque *T* aplicado no parafuso com o torquímetro é dado pela Equação 20.

$$T = P\ (3a + x) \tag{20}$$

Conclui-se que para a extensometria do torquímetro apresentada na Figura 4 a equação que governa o comportamento da ponte de Wheatstone pode ser reescrita na seguinte forma Equação 21.

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k\,c}{2\,E\,I}\,T \tag{21}$$

Reescrevendo a Equação 22 para a determinação do torque temos.

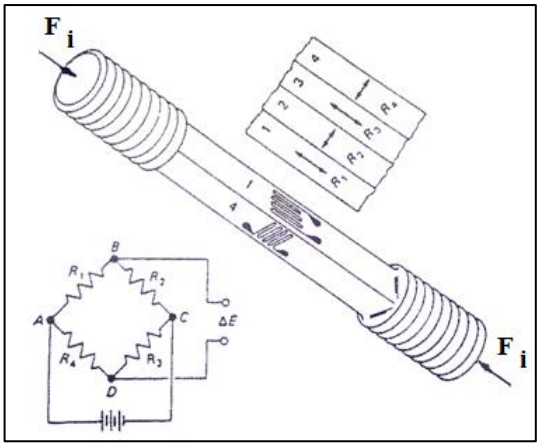
$$T = \frac{\Delta E}{V}\frac{2\,E\,I}{k\,c} \tag{22}$$

É importante frisar que o esquema proposto para a extensometria no torquímetro proporciona uma condição que o torque foi obtido independentemente da posição a qual a carga foi aplicada no torquímetro.

2.2.2 Extensômetros – Aplicação prática para compressão

Uma segunda aplicação prática para a ponte de Wheatstone e consequentemente a para a Equação 13, é transformar uma barra comprimida em uma célula de carga, para isso os quatro extensômetros devem ser colocados dois a dois, ou seja, dois devem ser montados na direção axial da barra e os outros dois na direção transversal da barra, de tal maneira que cada lado da barra fique com um extensômetro, conforme Figura 5.

Figura 5 – Barra carregada sobre compressão.



Fonte: Adaptada Pereira (2014).

Ao aplicar a carga de compressão sobre a barra, são geradas as deformações específicas na direção axial ε_a (Equação 23), nos extensômetros 1 e 3, e na direção transversal ε_t (Equação 24), nos extensômetros 2 e 4. Assim as deformações especificas nos extensômetros 1 e 3 foram iguais assim como nos extensômetros 2 e 4.

$$\varepsilon_a = -\frac{F_i}{E\,A} \tag{23}$$

$$\varepsilon_t = \nu\,\frac{F_i}{E\,A} \tag{24}$$

Portanto, substituindo a Equação 23 e a Equação 24 na Equação 13 tem-se:

$$\frac{\Delta E}{V} = -\frac{k\,F_i}{2\,E\,A}\,(1+\nu) \tag{25}$$

Reescrevendo a Equação 25 para a determinação da carga de compressão, denominada pré-carga para a aplicação em parafusos, durante a aplicação do torque de aperto. Portanto, a pré-carga pode ser definida pela Equação 26.

$$F_i = -\frac{\Delta E}{V}\frac{2\,E\,A}{k}\frac{1}{(1+\nu)} \tag{26}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho é analisar uma união parafusada. A metodologia adotada para obter os resultados que cumpram este objetivo é descrita conforme segue:

i. Dimensionamento preliminar;
ii. Elaboração dos desenhos;
iii. Usinagem dos dispositivos;
iv. Instrumentação;
v. Calibração dos instrumentos;
vi. Procedimento de ensaio.

3.1 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR

Para iniciar o trabalho foi necessário realizar cálculos referentes ao torque de aperto e a força de aperto em uniões parafusadas com o objetivo de determinar qual seriam as dimensões da chave de aperto ou torquímetro que seria utilizado. Para isso foi necessária a escolha da bitola de um parafuso para iniciar os cálculos. Foi escolhido um parafuso M10x1,5 mm de classe de resistência 8.8 de cabeça sextavado e comprimento de 80 mm e rosca parcial, com tratamento térmico de têmpera e revenimento da Belenus. A porca a ser utilizada foi de aço com grau de resistência 8. O parafuso e porca foram escolhidos por terem uma aplicação ampla dentro de processos industriais e por necessitarem de valores de torque de aperto de fácil aplicação.

As propriedades especificadas pelo catálogo de Parafusos e Porcas da Belenus para os parafusos da classe de resistência 8.8 podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades para a classe de resistência 8.8

Resistência a tração mínima	Tensão escoamento mínima	Alongamento após ruptura	Tensão sob carga de prova	Dureza
[N/mm²]	[N/mm²]	[% mínima]	[N/mm²]	[HRC]
800	640	12	580	22 - 32

Fonte: Belenus (2018).

As propriedades especificadas pelo catálogo de Parafusos e Porcas da Belenus para o parafuso M10 e classe de resistência 8.8 podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades para o parafuso M10

Passo [mm]	Secção resistente nominal [mm²]	Carga de prova [N]	Torque de aperto [Nm]
1,5	58	33700	55

Fonte: Belenus (2018).

As propriedades especificadas pelo catálogo de Parafusos e Porcas da Belenus para a porca M10 e classe de resistência 8 podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades para a porca M10

Tensão sob carga de prova [N/mm²]	Dureza
870	91,5 HRB Mín. - 30 HRC Máx.

Fonte: Belenus (2018).

Após a escolha da bitola do parafuso foi necessária a determinação das dimensões da chave de aperto (torquímetro), uma vez que esta foi fabricada por processo de usinagem e posteriormente instrumentado para a aquisição de dados durante a aplicação do torque de aperto.

Para realizar o dimensionamento do torquímetro foi necessário inicialmente adotar um comprimento, o valor adotado foi de 500mm do ponto de rotação até a distância máxima de força. Com este comprimento e o torque de aperto de 55Nm da Tabela 2 foi realizado o dimensionamento por flexão do torquímetro considerando que seria utilizada uma barra cilíndrica de 19mm de diâmetro para sua confecção, desta forma ao realizar os cálculos de flexão foi possível concluir que o material utilizado para a confecção da chave de aperto precisa de uma tensão de escoamento superior a 81,67 MPa, o material escolhido para confecção foi o aço SAE 4340 por apresentar essa propriedade e por estar disponível nas dependências da faculdade com as dimensões mínimas necessárias para a usinagem. As tensões de escoamento e limite de resistência mecânica são, respectivamente, 470 MPa e 745 MPa.

3.2 ELABORAÇÃO DOS DESENHOS

Ao finalizar os cálculos preliminares foi iniciada a etapa de elaboração dos desenhos do dispositivo que simula a união parafusada e o desenho da chave de aperto. Os desenhos de detalhamento e conjunto das peças foram realizados com o auxílio do software de modelagem Autodesk Inventor 2019. O dispositivo poderá trabalhar em diferentes condições de montagem, nas Figura 6 e Figura 7 é possível ver como é o dispositivo em suas diferentes condições de montagem.

Na Figura 6 foi realizada uma montagem com o parafuso sextavado, arruela lisa e porca sextavada, nesta condição foi aplicado o torque de aperto pelo parafuso enquanto a porca permanece travada pelo canal na placa inferior. Essa condição de montagem foi utilizada para 3 situações: a primeira foi uma montagem com lubrificação (conforme fornecido pelo fabricante); a segunda foi uma montagem sem lubrificação; e a terceira foi uma montagem utilizando lubrificação seca (grafite). Para o segundo e terceiro caso a lubrificação vinda de fábrica foi removida utilizando solvente (aguarrás).

Na Figura 7 foram repetidas as três condições com relação a lubrificação, no entanto, nesta condição foi aplicado o torque de aperto pela porca enquanto o parafuso permanece travado pelo canal na placa inferior.

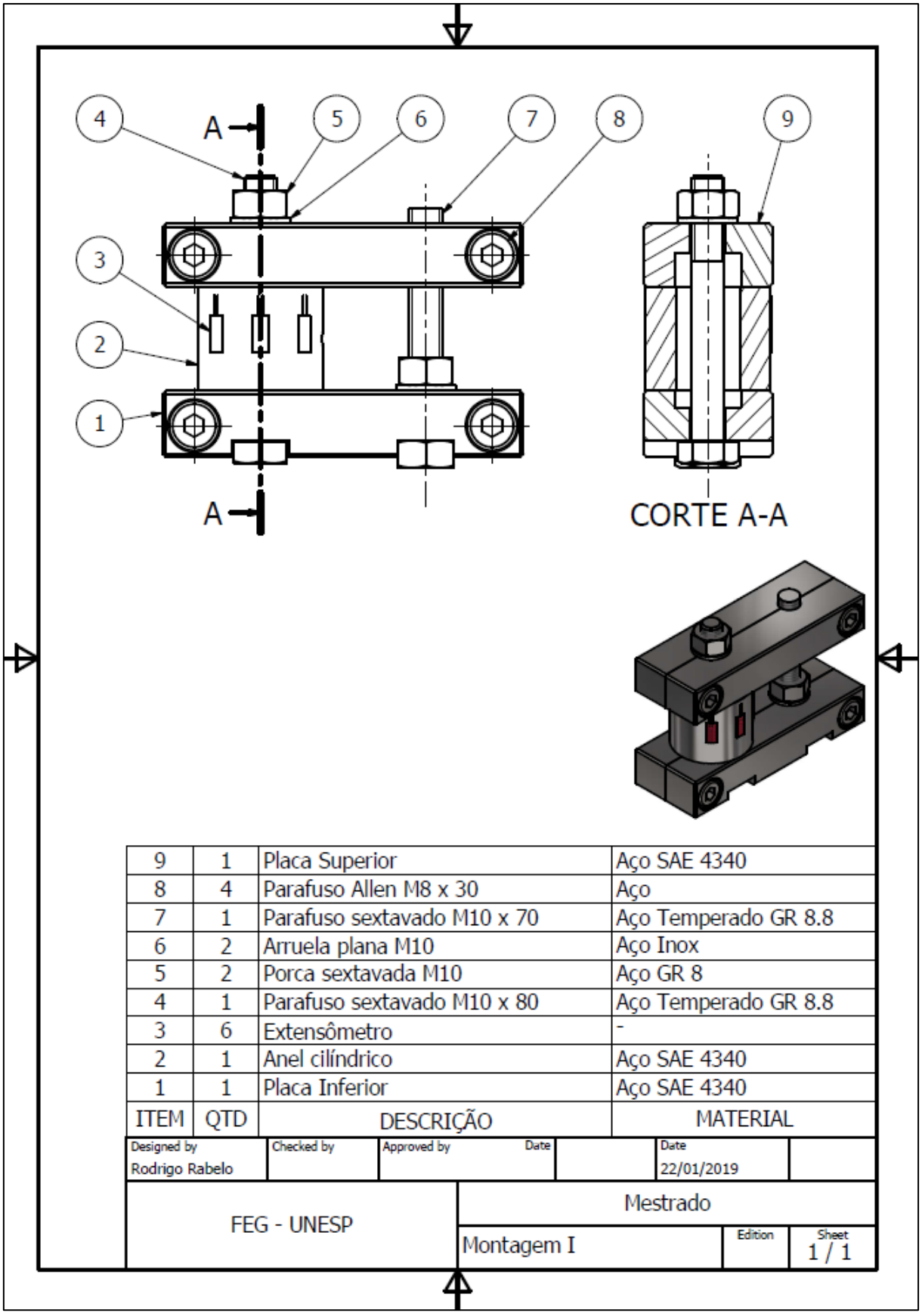
Foi realizada a instalação dos extensômetros na célula de carga, foram utilizados seis extensômetros unidirecional posicionados ao longo de sua superfície cilíndrica. Estes extensômetros tem por finalidade verificar qual a carga de compressão em função da deformação específica sofrida pela célula de carga. Uma melhor visualização dos extensômetros montados na célula de carga pode ser vista na Figura 8.

Em todas a condições e situações de montagem estarão sendo feitas duas análises: a primeira análise é se existe influência na aplicação do torque pela cabeça do parafuso enquanto a porca está travada no canal da placa inferior ou na aplicação do torque pela porca enquanto a cabeça do parafuso está travada no canal da placa inferior; a segunda análise é quanto do torque aplicado é dissipado por atrito durante o aperto da junta parafusada e acaba por não gerar força de aperto no conjunto.

Foi confeccionada uma chave de aperto que funcionará como um torquímetro para a aplicação do torque de aperto. O torquímetro também possui um sistema de medição eletrônico do torque gerado durante o ensaio, para que possa ser comparado na mesma escala de tempo a deformação sofrida pelo parafuso e o torque aplicado. E assim saber quanto do torque estará sendo recebido na rosca do parafuso e quanto estará sendo dissipado no atrito entre a cabeça do

parafuso e a superfície atritada. O torquímetro foi fabricado em aço SAE 4340 e como prolongador do cabo foi utilizado um tubo de aço. Para fazer o sistema de medição eletrônico no torquímetro foram utilizados quatro extensômetros unidirecionais posicionados conforme Figura 9.

Figura 6 – Montagem I



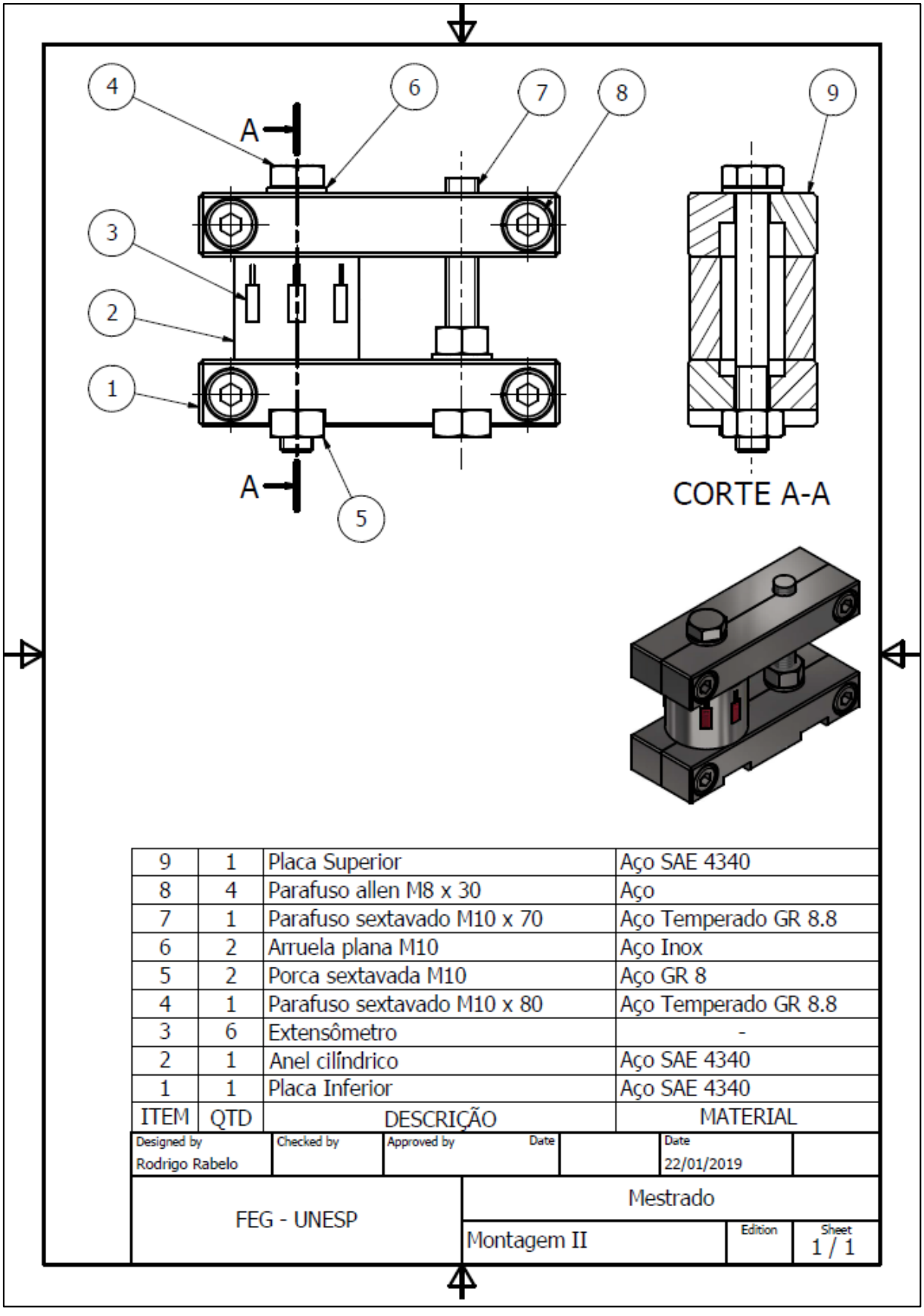
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO	MATERIAL
9	1	Placa Superior	Aço SAE 4340
8	4	Parafuso Allen M8 x 30	Aço
7	1	Parafuso sextavado M10 x 70	Aço Temperado GR 8.8
6	2	Arruela plana M10	Aço Inox
5	2	Porca sextavada M10	Aço GR 8
4	1	Parafuso sextavado M10 x 80	Aço Temperado GR 8.8
3	6	Extensômetro	-
2	1	Anel cilíndrico	Aço SAE 4340
1	1	Placa Inferior	Aço SAE 4340

Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date
Rodrigo Rabelo				22/01/2019

FEG - UNESP	Mestrado		
	Montagem I	Edition	Sheet 1 / 1

Fonte: Própria autoria

Figura 7 – Montagem II

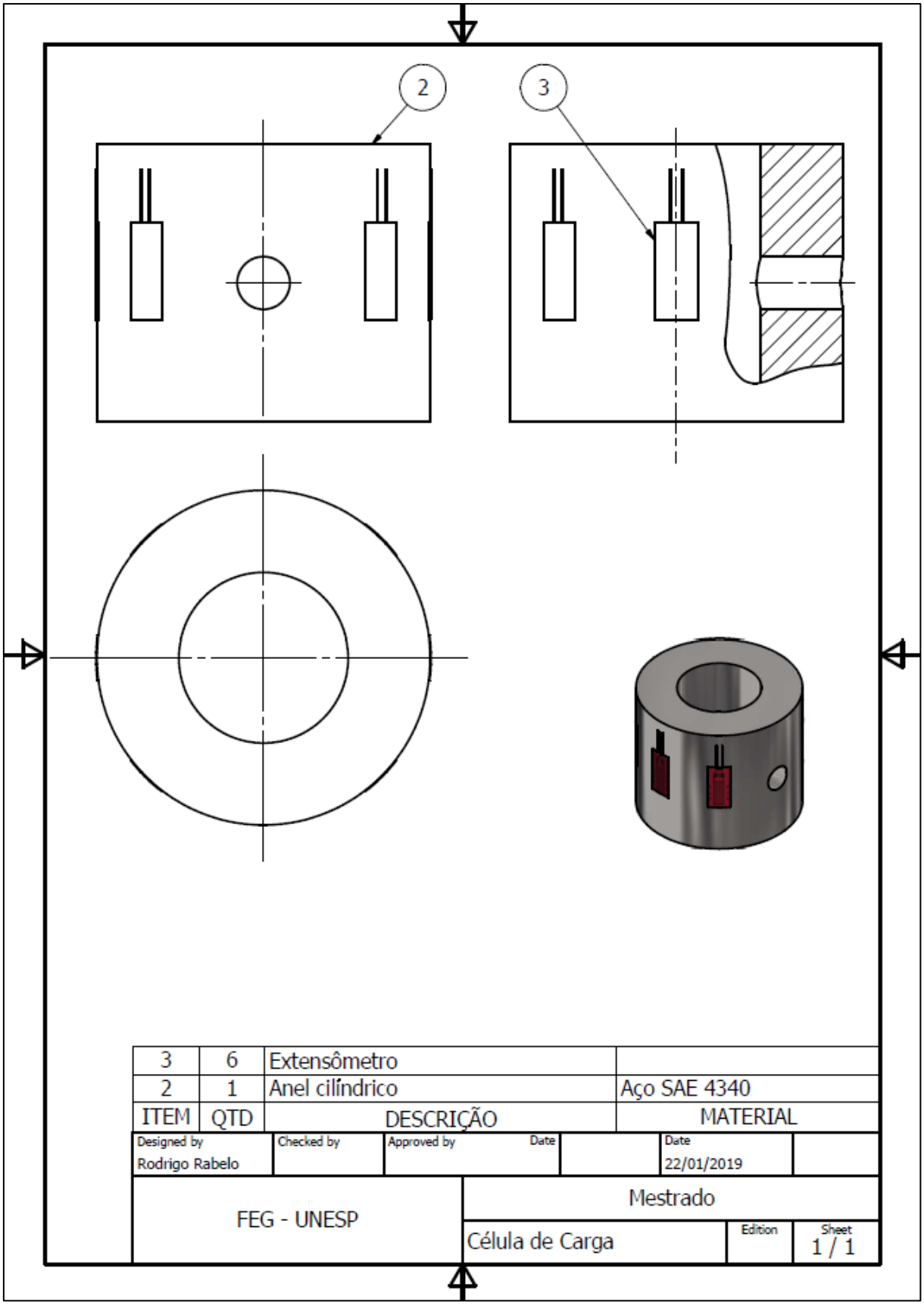


9	1	Placa Superior	Aço SAE 4340
8	4	Parafuso allen M8 x 30	Aço
7	1	Parafuso sextavado M10 x 70	Aço Temperado GR 8.8
6	2	Arruela plana M10	Aço Inox
5	2	Porca sextavada M10	Aço GR 8
4	1	Parafuso sextavado M10 x 80	Aço Temperado GR 8.8
3	6	Extensômetro	-
2	1	Anel cilíndrico	Aço SAE 4340
1	1	Placa Inferior	Aço SAE 4340
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO	MATERIAL

Designed by Rodrigo Rabelo	Checked by	Approved by	Date	Date 22/01/2019	
FEG - UNESP		Mestrado			
		Montagem II	Edition	Sheet 1 / 1	

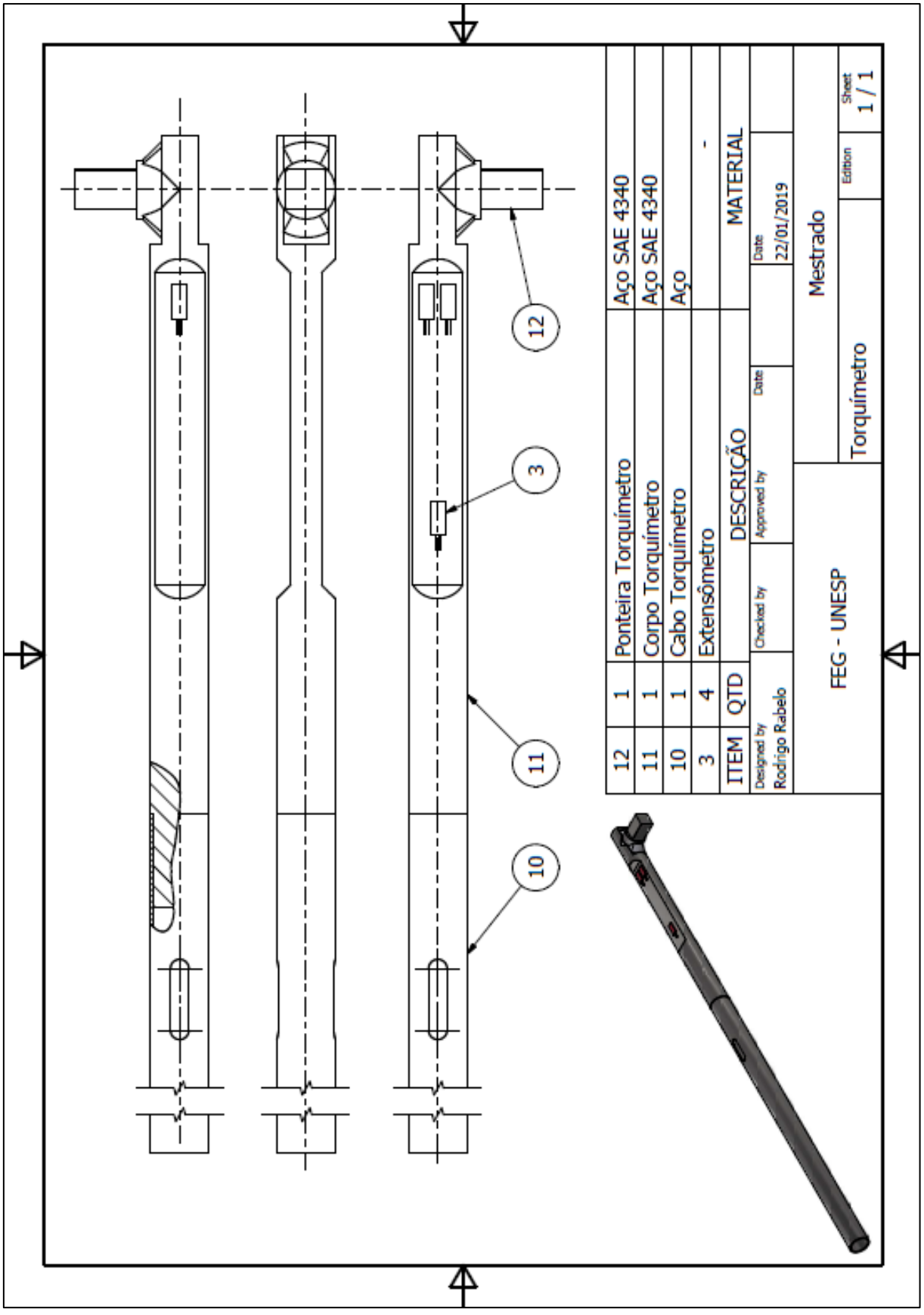
Fonte: Própria autoria

Figura 8 – Representação da célula de carga.



Fonte: Própria autoria

Figura 9 – Representação do Torquímetro



Fonte: Própria autoria

3.3 USINAGEM DOS DISPOSITIVOS

Após realizar a elaboração dos desenhos de detalhamento e conjunto das peças foi feita a etapa de usinagem das peças e compra dos itens padronizados, como exemplo, parafusos, porcas e arruelas.

A etapa de usinagem foi realizada com o auxílio de uma fresadora ferramenteira e torno universal. As etapas de torneamento, esquadrejamento, rebaixo, canais e furos foram realizadas nas dependências do Departamento de Mecânica da FEG, apenas as etapas de usinagem retificação das superfícies de contato entre as placas e a célula de carga foram realizadas por uma empresa externa.

A etapa de retificação das superfícies de contato entre a célula de carga e as placas superior e inferior foi necessária para garantir que a deformação específica na célula de carga fosse homogênea.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

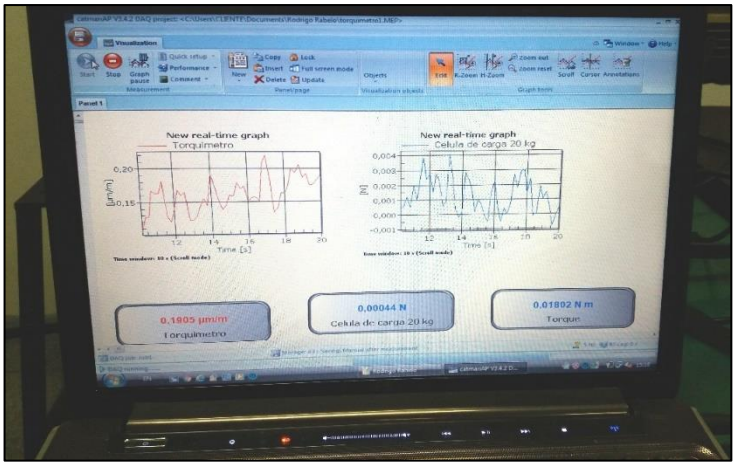
Os medidores eletrônicos são sensores de deformação (extensômetro) e foi realizada a coleta dos sinais, os quais são transmitidos para um sistema de aquisição de dados, modelo: Quantum MX1615, marca HBM (Figura 10). O sinal é enviado em seguida por meio de cabo de rede para um computador, onde foi realizado o processamento e análise dos resultados com o auxílio do software CATMAN AP, versão V3.3.58, conforme Figura 11.

Figura 10 – Sistema de aquisição de dados HBM – Quantum MX1615



Fonte: Própria autoria

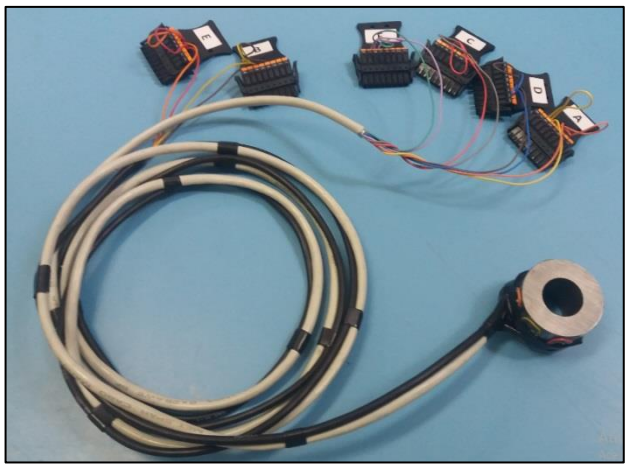
Figura 11 – Software CATMAN AP V3.3.58



Fonte: Própria autoria

Conforme demonstrado no item 3.2, onde foram apresentados os desenhos de conjunto dos dispositivos e do torquímetro, é possível perceber que foram utilizados seis extensômetros unidirecionais, modelo KFG – 3 – 120 – C1 – 11 do fabricante KYOWA (no ANEXO I é possível ver informações técnicas deste extensômetro), realizaram a coleta da deformação específica sofrida pela célula de carga com a finalidade de verificar qual a carga de compressão aplicada pelo parafuso nas chapas. Na Figura 12 é possível observar que cada extensômetro foi instrumentado com uma saída para um canal do sistema de aquisição, cada saída está configurada para ¼ de ponte e com uma nomenclatura de A até F.

Figura 12 – Célula de carga



Fonte: Própria autoria

Os extensômetros foram fixados todos da direção axial do anel e posicionados na metade de sua altura, esta configuração de montagem da célula de carga foi realizada com objetivo de

obter uma aquisição de dados que fornece uma média de deformação específica mais próxima do valor real aplicada pela compressão do parafuso. No entanto, por falta de espaço no anel não foi possível realizar a fixação de mais seis extensômetros na direção transversal para fazer uma configuração de ½ ponte em cada par de extensômetros, conforme item 2.2.2.

Conforme demonstrado no item 3.2, onde foram apresentados os desenhos de conjunto dos dispositivos e do torquímetro, é possível perceber que foram utilizados quatro extensômetros unidirecionais, modelo KFG – 3 – 120 – C1 – 11 do fabricante KYOWA, os quais foram utilizados para verificar a deformação específica sofrida na região onde os extensômetros estão fixados no torquímetro e a partir desta deformação determinar qual o torque foi aplicado no aperto da junta parafusada. Na Figura 13 é possível observar que o torquímetro foi instrumentado com uma saída para um canal do sistema de aquisição, essa saída está configurada para ponte completa.

Figura 13 – Torquímetro



Fonte: Própria autoria

3.5 CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

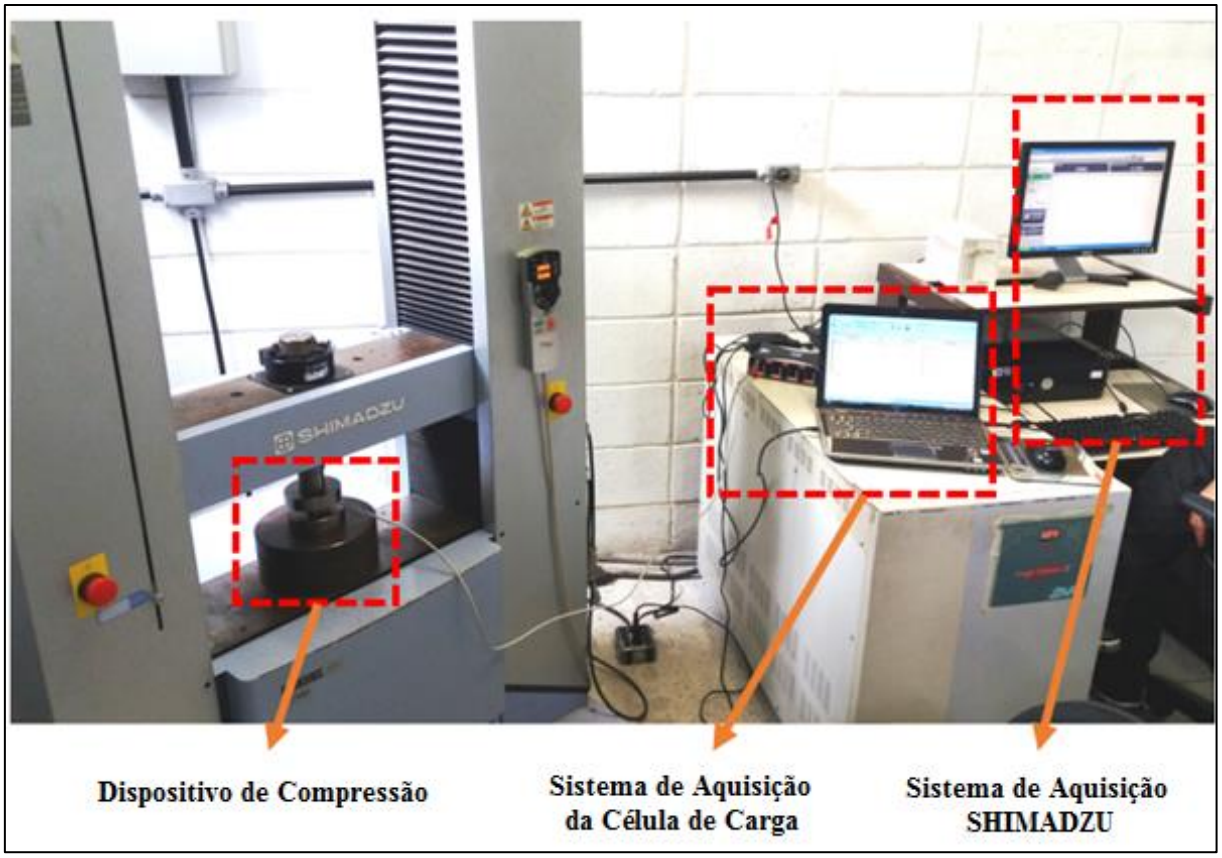
Como foram confeccionados dois instrumentos para aquisição de dados, sendo uma célula de carga para aquisição da pré-carga aplicada na junta parafusada e um torquímetro para a aquisição do torque de aperto, os quais foram utilizados na realização dos ensaios. Por serem instrumentados foi necessária a calibração de ambos, para que os resultados obtidos durante os ensaios pudessem ser validados.

3.5.1 Calibração da célula de carga

Para a calibração da célula de carga foi utilizada a máquina de ensaios SHIMADZU do Departamento de Materiais da FEG, a qual foi montada para a realização do ensaio de compressão, uma vez que seria este tipo de esforço solicitante o qual a célula de carga seria submetida durante os ensaios na junta parafusada, a máquina de ensaios possui capacidade de carga de 50kN e durante os ensaios de compressão para a calibração os esforções solicitantes foram de aproximadamente 27kN. Este valor de compressão foi determinado a partir dos cálculos para de torque e pré-carga para a junta parafusada.

A Figura 14 mostra todo o aparato montado para a execução do ensaio de compressão da célula de carga, sendo o software TRAPEZIUM X o sistema de aquisição utilizado na SHIMADZU e o Quantum MX1615 com o software CATMAN AP V3.3.58 o sistema de aquisição utilizado na célula de carga.

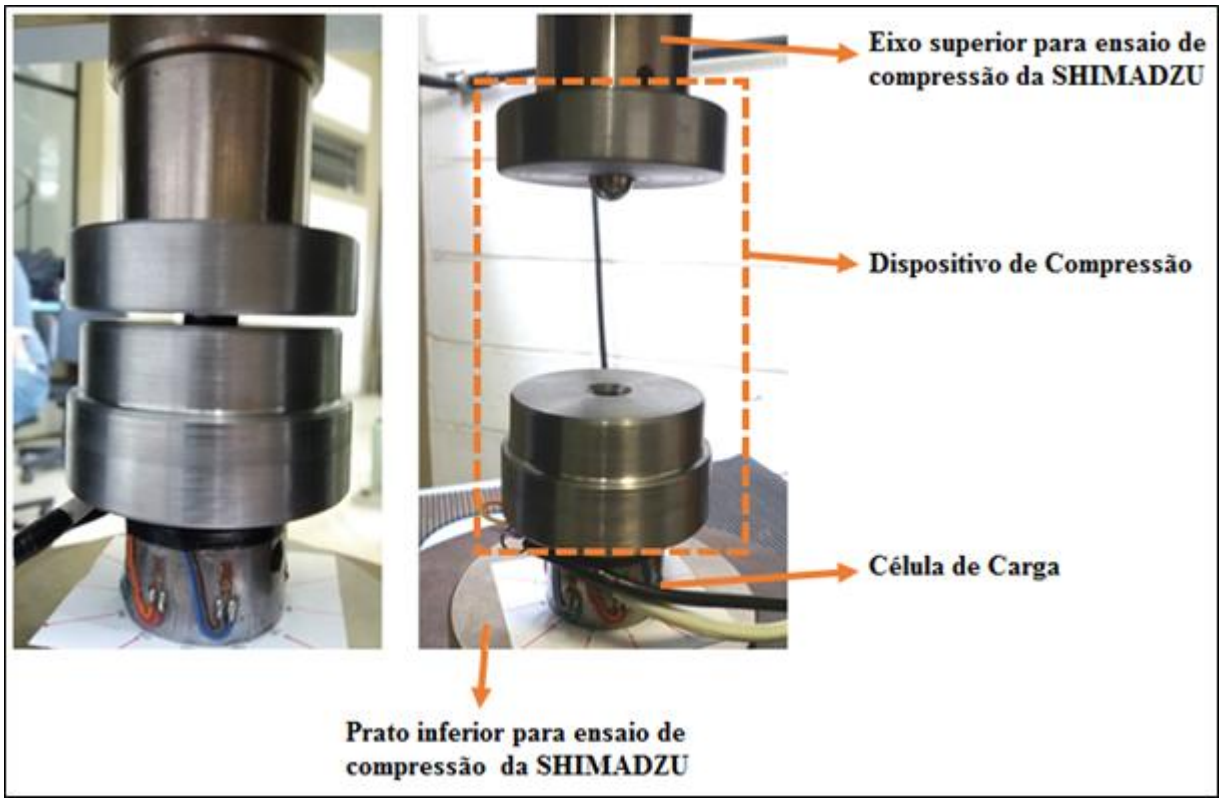
Figura 14 – Ensaio de compressão da célula de carga



Fonte: Própria autoria

A Figura 15 mostra, já montado na SHIMADZU, o dispositivo de compressão fabricado para realização do ensaio, pois a célula de carga possui 6 extensômetros fixados ao longo de sua superfície cilíndrica para medir a deformação específica média, dessa forma não poderia haver uma inclinação entre as superfícies de contato da célula de carga e os pratos superior e inferior de compressão da SHIMADZU, uma vez que isso possibilitaria o contato não uniforme na superfícies causando erros na leitura das deformações específicas em cada um dos 6 extensômetros. Por este motivo foi utilizado o dispositivo de compressão no qual há uma esfera de aço entre o disco de articulação e o prato superior do dispositivo de compressão, a função da esfera é permitir um melhor ajuste entre o prato superior do dispositivo e a superfície superior da célula de carga. Na Figura 16 é possível ver mais detalhadamente os componentes do dispositivo de compressão e o prato inferior de compressão da SHIMADZU com escala em graus, está escala está dividida de 30 em 30 graus para a realização dos ensaios de compressão.

Figura 15 – Dispositivo de Compressão

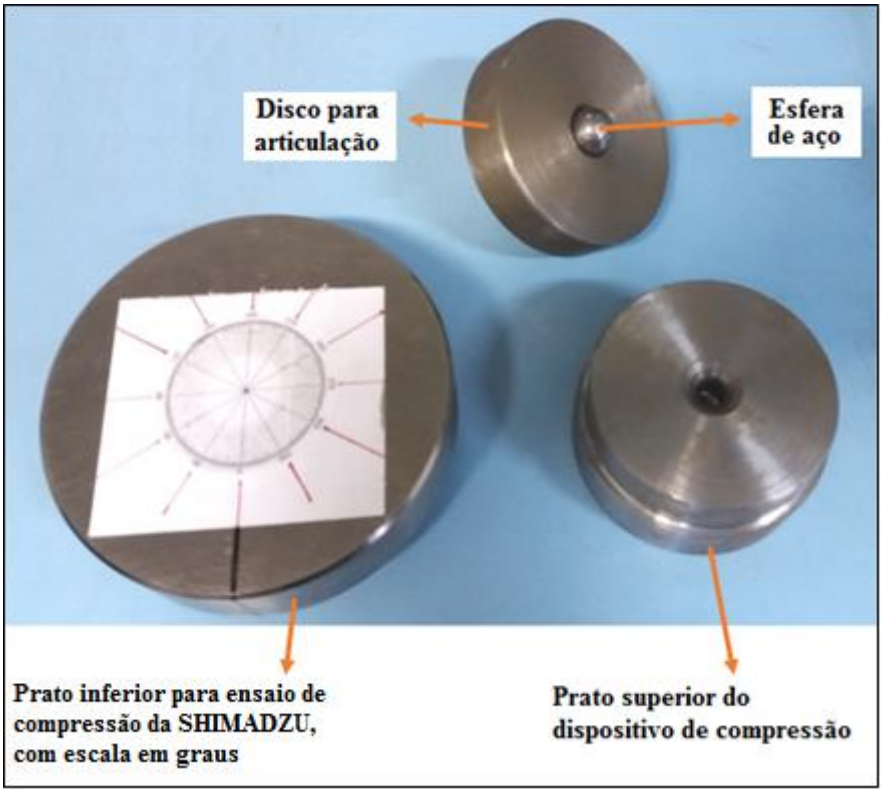


Fonte: Própria autoria

A superfície de contato entre os pratos e a célula de carga foram retificadas de maneira a garantir uma melhor distribuição da área de contato entre as partes e assim garantir que a

deformação específica em cada extensômetro seja o mais próximo e por fim chegar a uma deformação específica média com maior veracidade.

Figura 16 – Prato inferior de compressão da SHIMADZU com escala em graus e componentes do dispositivo de compressão



Fonte: Própria autoria

Para a calibração da célula de carga foram feitos dois métodos de aquisição de dados, no primeiro foi feita a aquisição da deformação especifica da célula de carga em função da força aplicada, no segundo foi feita a aquisição da variação de tensão da célula de carga em função da força aplicada.

Para ambos os métodos de calibração da célula de carga foram realizados 12 ensaios de compressão sendo que cada um foi com a célula de carga em uma angulação tomando como referência a escala graduada fixada no prato inferior de compressão da SHIMADZU, ou seja, a célula de carga foi posicionada inicialmente a 0° para o primeiro ensaio de compressão em seguida a 30° para o segundo ensaio de compressão e assim por diante até 330°, totalizando os 12 ensaios de compressão. Este procedimento foi realizado a fim de aferir que em qualquer posição de montagem da célula de carga os resultados são válidos.

3.5.1.1 Método de calibração da célula de carga através da deformação específica

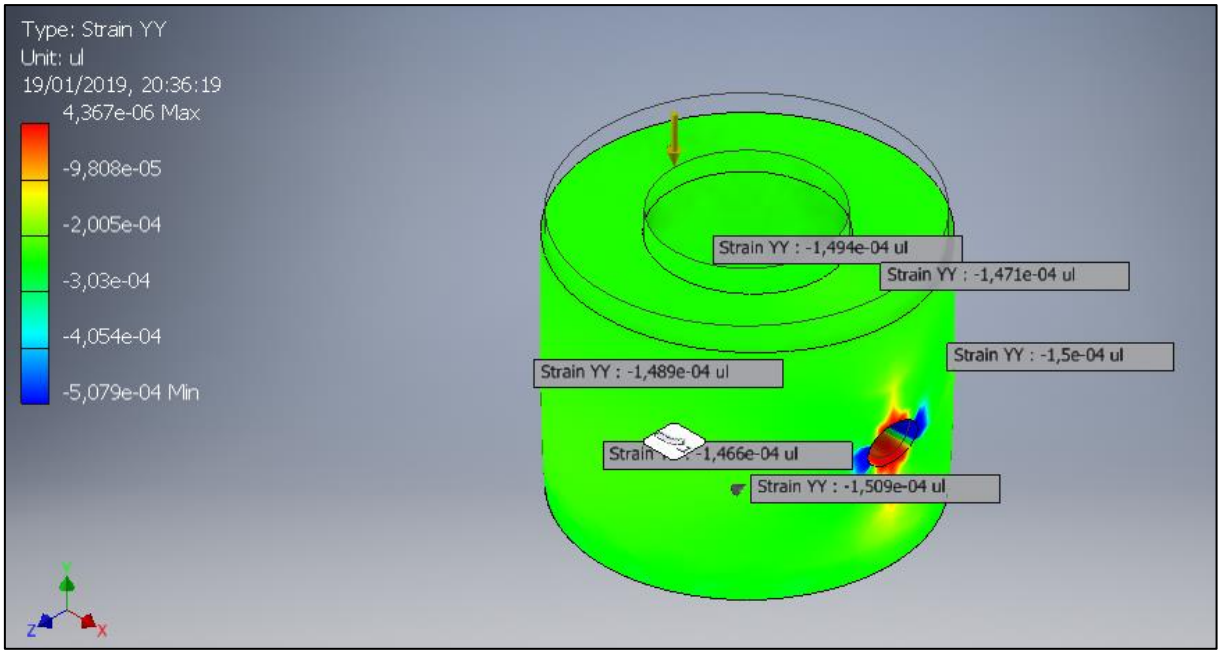
Na Tabela 4 estão os resultados de força aplicada pela SHIMADZU e as deformações específicas na célula de carga para cada um dos ângulos. Os valores de deformação específica são as médias dos resultados apresentados para os 6 extensômetros fixados na célula de carga.

Tabela 4 – Deformação específica da célula de carga em função da força de compressão

Ângulo [Graus]	Força [kN]	Deformação específica [μm/m]
0	26,790	150,024
30	27,026	149,240
60	26,940	150,760
90	26,890	150,584
120	27,150	152,760
150	27,045	149,840
180	26,980	151,088
210	26,932	147,930
240	26,908	150,400
270	26,980	151,088
300	26,860	153,290
330	27,010	151,300
Média	26,959	150,692

Fonte: Própria autoria

Figura 17 – Simulação da célula de carga no Autodesk – Inventor 2019



Fonte: Própria autoria

Para a conferência dos resultados do ensaio de calibração foi feita uma simulação utilizando o software Autodesk – Inventor 2019, na simulação foi utilizado uma carga de compressão de 26,959kN, valor médio de força obtido na Tabela 4. Na Figura 17 é possível verificar que há 6 diferentes pontos de coleta de deformação específica, estes pontos foram posicionados nas regiões onde os extensômetros estão fixados na célula de carga. Analisando os valores da simulação é possível validar os valores do ensaio de compressão da célula de carga.

3.5.1.2 Método de calibração da célula de carga através variação da tensão

Na Tabela 5 estão os resultados de força aplicada pela SHIMADZU e as variações de tensão em cada um dos 6 extensômetros aqui elencados de A até F, através destes valores foram obtidas as médias da variação de tensão na célula de carga para cada um dos ângulos.

Tabela 5 – Variação do sinal elétrico da célula de carga em função da força de compressão

Ângulo [Graus]	Força [kN]	ΔE/V [mV/V]						ΔE/V média [mV/V]
		A	B	C	D	E	F	
0	26,790	0,0972	0,0895	0,0737	0,0475	0,0845	0,0643	0,0761
30	27,050	0,0920	0,0741	0,0703	0,0420	0,0966	0,0783	0,0756
60	27,060	0,0734	0,0650	0,0682	0,0535	0,1027	0,0908	0,0756
90	26,890	0,0610	0,0639	0,0668	0,0621	0,0926	0,0979	0,0741
120	26,930	0,0629	0,0606	0,0693	0,0692	0,0887	0,0965	0,0745
150	26,900	0,0594	0,0664	0,0843	0,0727	0,0747	0,0863	0,0740
180	26,980	0,0601	0,0741	0,0956	0,0667	0,0664	0,0787	0,0736
210	26,900	0,0572	0,0810	0,1008	0,0586	0,0747	0,0711	0,0739
240	26,800	0,0651	0,0890	0,1044	0,0547	0,0695	0,0680	0,0751
270	26,980	0,0833	0,1033	0,1002	0,0420	0,0652	0,0630	0,0762
300	26,900	0,0887	0,1003	0,0921	0,0381	0,0750	0,0601	0,0757
330	26,960	0,0869	0,0931	0,0864	0,0356	0,0872	0,0632	0,0754
Média	26,928	0,0739	0,0800	0,0843	0,0536	0,0815	0,0765	0,0750

Fonte: Própria autoria

Com a aplicação dos métodos foi possível confrontar os resultados obtidos e sabendo que a deformação específica equivale ao produto da variação de tensão pelo fator de sensibilidade do extensômetro. O modelo de extensômetro utilizado possui um fator de sensibilidade de 2,09 segundo o fabricante.

Comparando o resultado da deformação específica média da Tabela 4 com variação de tensão média da Tabela 5 é possível determinar um valor médio para o fator de sensibilidade dos extensômetros. Logo tem-se:

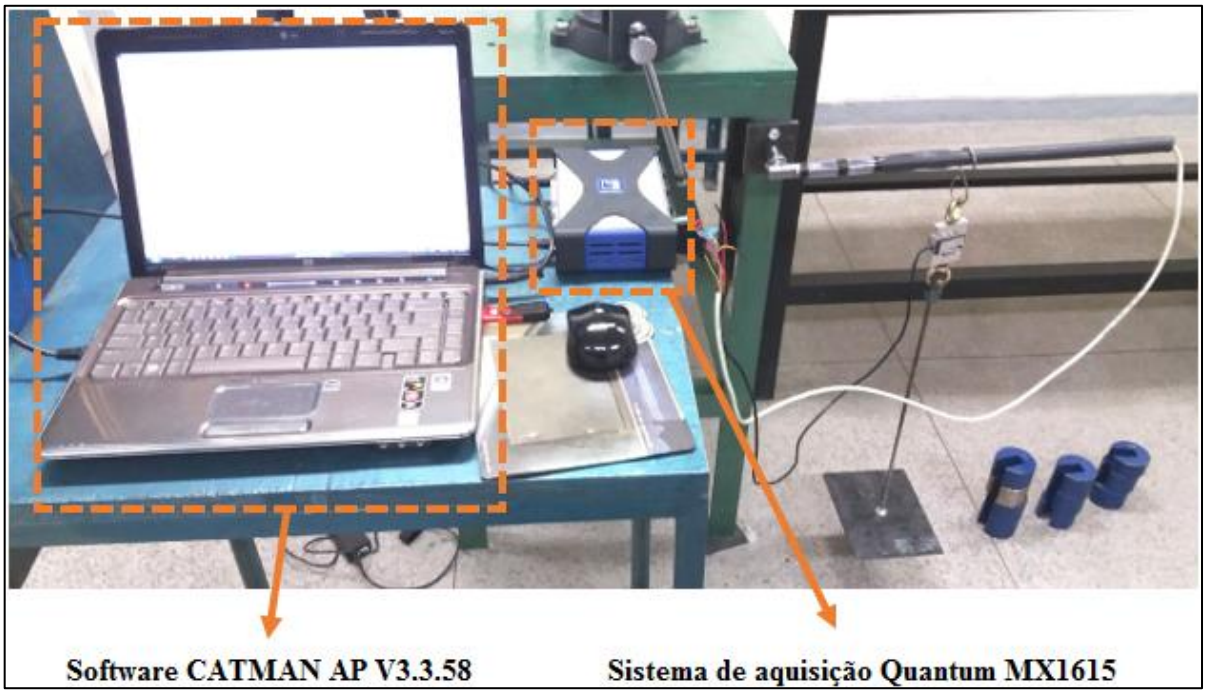
$$k = \frac{\varepsilon}{\Delta E/_V} = \frac{150{,}692 * 10^{-6}}{0{,}0750 * 10^{-3}} = 2{,}01$$

O resultado obtido possui um erro relativo E_r = 3,83%. Este valor pode ser considerado satisfatório se for analisado que o fabricante fornece como margem de variação do fator de sensibilidade de ±1,0% por extensômetro, além disso pode haver pequenos desalinhamentos dos extensômetros que poderiam gerar essa pequena variação.

3.5.2 Calibração do torquímetro

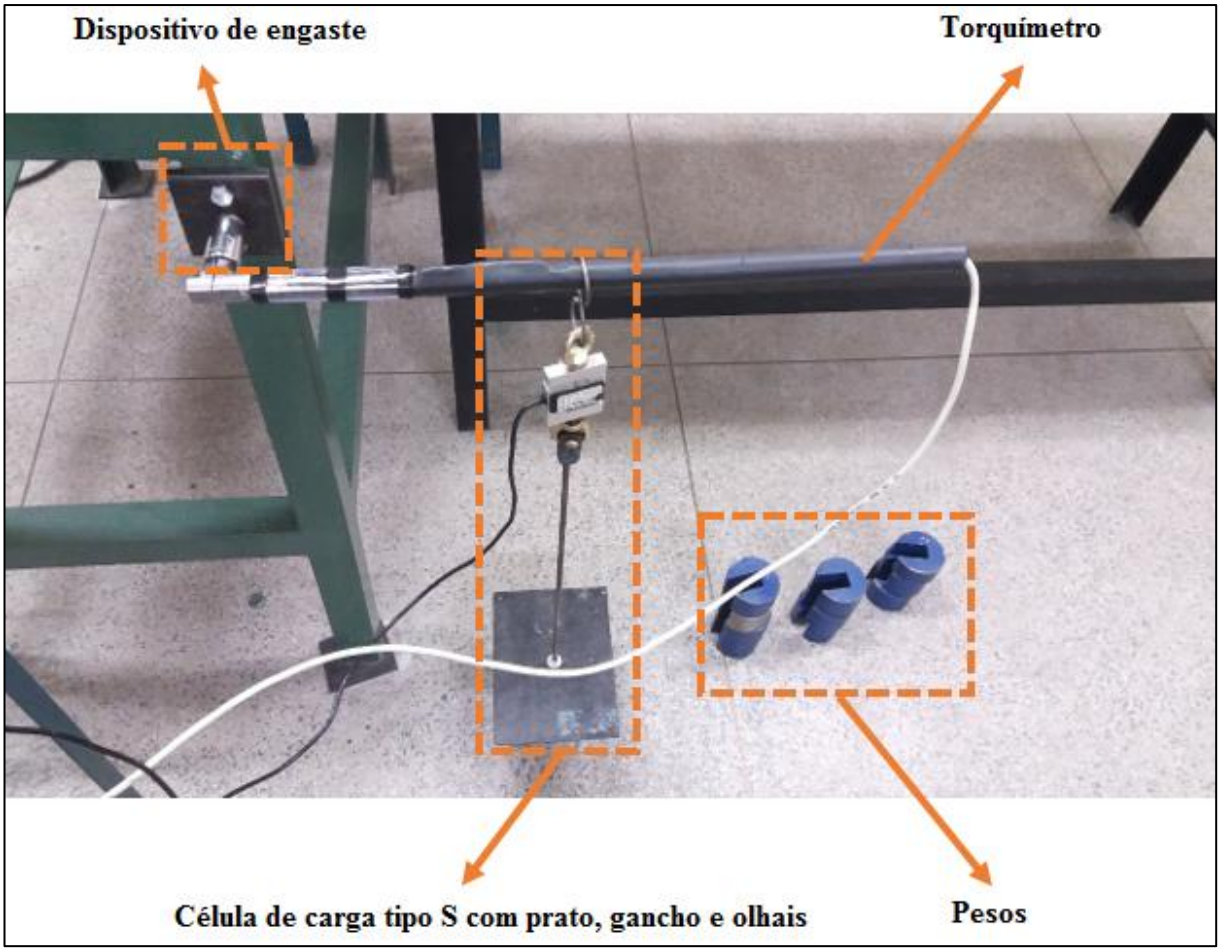
Para a calibração do torquímetro foi utilizado o sistema de aquisição Quantum MX1615 com o software CATMAN AP V3.3.58, conforme Figura 18, uma célula de carga tipo S com capacidade de carga de 20kg, pesos para aplicação da força sobre o torquímetro. Para fixação dos pesos na célula de carga tipo S foram utilizados um prato e um olhal e para a fixação da célula de carga tipo S no torquímetro foram utilizados um gancho e um olhal. A célula de carga tipo S foi utilizada para determinar qual a intensidade de carga estava sendo aplicada no instante de aplicação do torque. Um dispositivo de engaste foi fabricado para a realização da calibração, sua função é simular o parafuso ou porca da junta parafusada e permitir que o torquímetro permaneça na posição horizontal antes de iniciar a aplicação do carregamento, para melhor visualização do conjunto observar Figura 19.

Figura 18 – Sistema de aquisição de dados da calibração do torquímetro



Fonte: Própria autoria

Figura 19 – Ensaio de calibração do torquímetro



Fonte: Própria autoria

Para determinar o valor do torque aplicado é necessário utilizar a Equação 18, para isso são necessárias a seguintes informações sobre o torquímetro: fator de sensibilidade (k = 2,09), momento de inércia da secção transversal onde os extensômetros estão fixados (I = 1444,42mm^4), distância da linha neutra até a fibra mais afastada da secção transversal onde os extensômetros estão fixados (c = 5mm) e módulo de elasticidade longitudinal (E = 200GPa), portanto, o valor de torque em função da variação de tensão dos extensômetros é:

$$T = \frac{\Delta E}{V}\frac{2}{2{,}09}\frac{1444{,}42.200}{5} = 55{,}29\,.\,10^{-3}\frac{\Delta E}{V}$$

Com este valor foi possível iniciar o ensaio de calibração do torquímetro, no qual o procedimento foi aplicar 3 cargas diferentes em 5 diferentes distâncias, totalizando assim um total de 15 valores a serem aquisitados, as distâncias são referentes ao centro de rotação do torquímetro. Na Tabela 6 estão representados os valores aquisitados durante o ensaio de

calibração, sendo que o valor de torque aquisitado *TA* é determinado através do equacionamento apresentado na Equação 18 e o torque calculado *TC* é determinado através do produto da força total pela distância de aplicação até o centro de rotação, a força total é valor dos pesos mais o peso do conjunto (prato, olhais, célula de carga e gancho).

Tabela 6 – Calibração do torquímetro utilizando equacionamento

Distância ($3a + X$) [m]	Força total [N]	$\Delta E/V$ [mV/V]	Torque aquisitado [Nm]	Torque calculado [Nm]	Razão *TA/TC*
0,25	46,6196	0,2131	11,7820	11,6549	1,0109
	73,5196	0,3402	18,8092	18,3799	1,0234
	97,9796	0,4556	25,1896	24,4949	1,0284
0,32	46,6196	0,2723	15,0551	14,9183	1,0092
	73,5196	0,4351	24,0562	23,5263	1,0225
	97,9796	0,5829	32,2278	31,3535	1,0279
0,38	46,6196	0,3220	17,8030	17,7154	1,0049
	73,5196	0,5146	28,4516	27,9374	1,0184
	97,9796	0,6903	38,1659	37,2322	1,0251
0,44	46,6196	0,3737	20,6614	20,5126	1,0073
	73,5196	0,5975	33,0351	32,3486	1,0212
	97,9796	0,8012	44,2974	43,1110	1,0275
0,50	46,6196	0,4241	23,4480	23,3098	1,0059
	73,5196	0,6788	37,5300	36,7598	1,0210
	97,9796	0,9089	50,2520	48,9898	1,0258

Fonte: Própria autoria

Comparando os valores de torque de *TA* e *TC* apresentados na Tabela 6 é possível perceber os valores são bem próximos, mas para melhorar essa percepção foi calculada a razão entre os valores de *TA* e *TC*. A média da razão entre os valores de *TA* e *TC* é $\bar{x} = 1{,}0186$ e o erro relativo para essa média é de $Er = 1{,}86\%$. Este erro pode ser explicado por possíveis erros geométricos nas dimensões do torquímetro e nas posições dos extensômetros.

Para refinar ainda mais estes dados foi realizada uma segunda calibração do torquímetro, para esta segunda calibração foram utilizados como referência dois valores da Tabela 6 para criar um sensor dentro do software CATMAN AP V3.3.58, os valores utilizados foram $\Delta E/V =$

0,9089mV/V e *TA* = 50,2520Nm, ou seja, este valores definiram a curva de calibração do torquímetro. Os resultados obtidos estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Calibração do torquímetro utilizando uma curva de calibração

Distância ($3a + X$) [m]	Força total [N]	$\Delta E/V$ [mV/V]	Torque aquisitado [Nm]	Torque calculado [Nm]	Razão *TA/TC*
0,25	46,6196	0,2128	11,5300	11,6549	0,9893
	73,5196	0,3940	18,3900	18,3799	1,0005
	97,9796	0,4548	24,6400	24,4949	1,0059
0,32	46,6196	0,2722	14,7500	14,9183	0,9887
	73,5196	0,4347	23,5500	23,5263	1,0010
	97,9796	0,5823	31,5500	31,3535	1,0063
0,38	46,6196	0,3233	17,5200	17,7154	0,9890
	73,5196	0,5161	27,9700	27,9374	1,0012
	97,9796	0,6917	37,4700	37,2322	1,0064
0,44	46,6196	0,3746	20,2900	20,5126	0,9891
	73,5196	0,5990	32,4600	32,3486	1,0034
	97,9796	0,8025	43,4800	43,1110	1,0086
0,50	46,6196	0,4242	22,9900	23,3098	0,9863
	73,5196	0,6780	36,7400	36,7598	0,9995
	97,9796	0,9090	49,2400	48,9898	1,0051

Fonte: Própria autoria

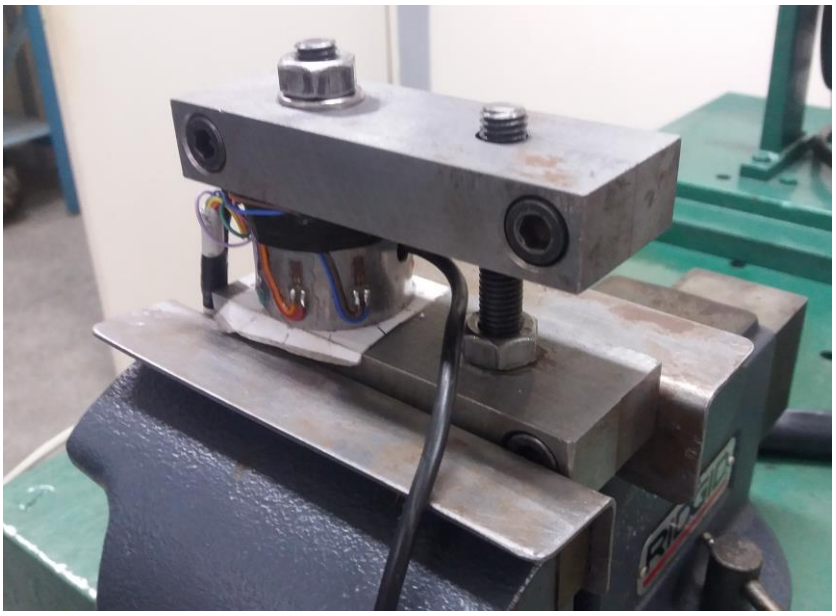
Comparando os valores de torque de *TA* e *TC* apresentados na Tabela 7 é possível perceber que os valores estão mais próximos do que os valores da Tabela 6, e analisando a razão entre os valores de *TA* e *TC* é possível determinar que a média é $\bar{x} = 0{,}9987$ e o erro relativo para essa média é de *Er* = 0,13%. Dessa forma pode-se afirmar que a curva de calibração do torquímetro está correta.

3.6 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios o dispositivo com as placas e a célula de carga foi fixado em uma morsa de bancada, e a morsa sobre uma mesa rígida de aço, conforme Figura 20. A montagem apresentada na Figura 20 é a mesma apresentada na Montagem I representada na

Figura 6, nesta condição o torqueamento realizado pelo torquímetro é aplicado pela porca, conforme explicado no item 3.2.

Figura 20 – Dispositivo para aplicação da pré-carga



Fonte: Própria autoria

Os ensaios tiveram três condições a serem analisadas. Na primeira foi feita uma análise se existe influência na aplicação do torque pela cabeça do parafuso enquanto a porca está travada no canal da placa inferior ou na aplicação do torque pela porca enquanto a cabeça do parafuso está travada no canal da placa inferior, essas duas condições simulam a aplicação do torque pela cabeça do parafuso e torque pela porca, respectivamente. Na segunda foi feita uma análise de quanto do torque aplicado é dissipado por atrito durante o aperto da junta parafusada e acaba por não gerar pré-carga na junta parafusada. E na terceira condição foi feita uma análise na influência da aplicação do torque de montagem sendo aplicado três vezes na mesma junta parafusada, ou seja, uma simulação de possíveis montagem e desmontagem de uma mesma junta parafusada fazendo o aproveitamento do mesmo conjunto de parafuso, porca e arruela.

Foram analisadas três diferentes condições de lubrificação para a montagem da junta parafusada:

- ✓ **Montagem com lubrificação** – parafuso e porca lubrificados conforme fornecido pelo fabricante Belenus;
- ✓ **Montagem sem lubrificação** – foi utilizado solvente (aguarrás) para remoção do lubrificante já presente nos parafusos e porcas conforme fornecido pelo fabricante Belenus;

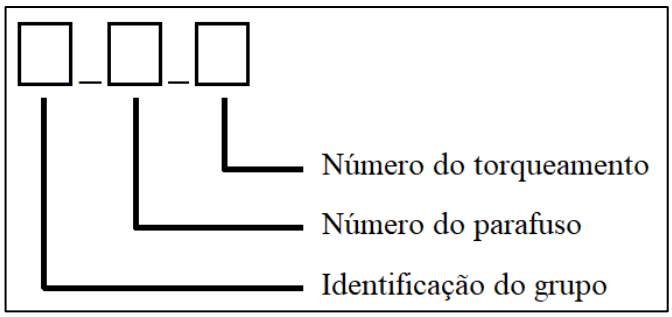
- ✓ **<u>Montagem com lubrificação seca (grafite)</u>** – foi utilizado solventes (aguarrás) para remoção do lubrificante já presente nos parafusos e porcas conforme fornecido pelo fabricante Belenus e em seguida foi utilizado grafite em pó como lubrificante nas regiões de atritadas durante o torqueamento da junta parafusada.

Para as três condições de lubrificação foram realizadas duas diferentes disposições de montagem, conforme explicado no item 3.2 pelas Figura 6 e Figura 7. Desta forma os ensaios foram divididos em seis grupos:

- ✓ Grupo A – Torque pela porca com lubrificação;
- ✓ Grupo B – Torque pelo parafuso com lubrificação;
- ✓ Grupo C – Torque pela porca sem lubrificação;
- ✓ Grupo D – Torque pelo parafuso sem lubrificação;
- ✓ Grupo E – Torque pela porca com lubrificação seca (grafite);
- ✓ Grupo F – Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite).

Para cada um dos seis grupos foram utilizados 5 conjuntos de parafuso, porca e arruela. Totalizando, portanto, 90 ensaios realizados sendo 6 grupos diferentes com 5 conjuntos de parafuso, porca e arruela e com 3 torqueamentos por conjunto. Para identificação dos parafusos foi feita uma nomenclatura para facilitar as representações nas tabelas e gráficos. Essa nomenclatura mostra qual o grupo, número no parafuso e número do torqueamento, Figura 21.

Figura 21 – Nomenclatura de identificação do parafuso



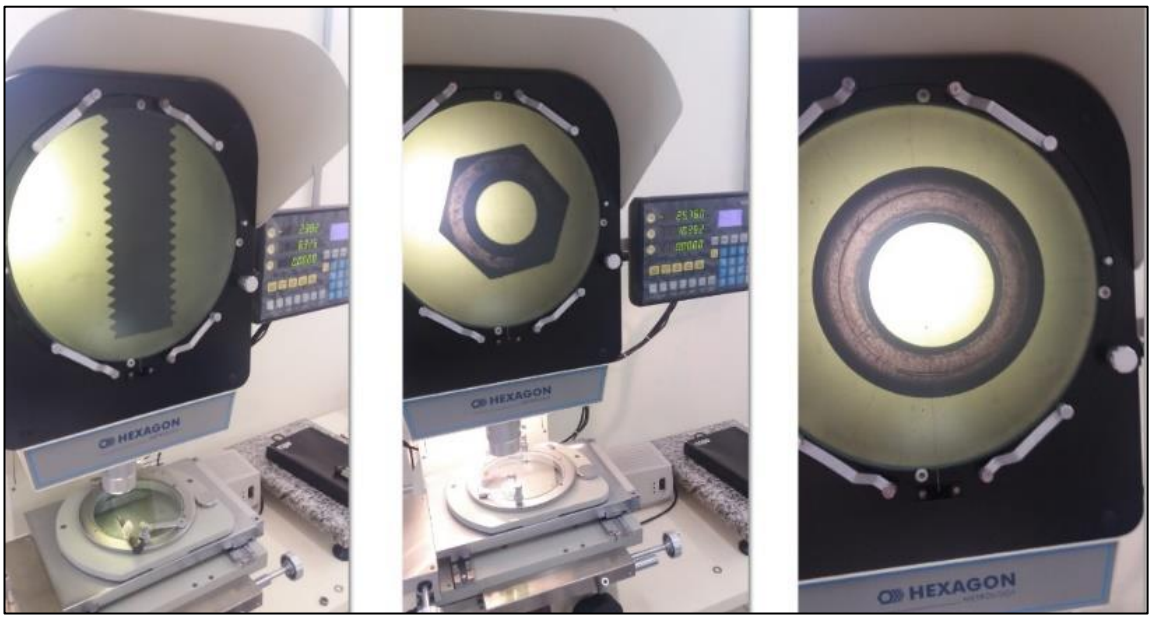
Fonte: Própria autoria

3.7 DIMENSÕES DAS PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS

Para determinar o valor do coeficiente de atrito total foi utilizada a Equação 8 do item 2.1. Nesta equação são necessárias informações dimensionais do parafuso, da porca e da

arruela, são elas: diâmetro interno da rosca, diâmetro médio da superfície de contato da cabeça do parafuso ou porca.

Figura 22 – Medição das dimensões com o projetor de perfil



Fonte: Própria autoria

Para a determinação dessas dimensões foi utilizado um projetor de perfil, Figura 22, sendo que para a medição do parafuso foi utilizada a projeção diascópica, pois, neste caso apenas o contorno dos filetes da rosca e da cabeça do parafuso eram necessários. Já no caso da porca e da arruela foi utilizada a projeção episcópica, pois, neste caso era necessária a verificação da superfície.

Foram feitas as medições de 5 porcas, arruelas e parafusos para determinar os valores médios do diâmetro interno da rosca (d_2) e do diâmetro médio da superfície de contato da cabeça do parafuso ou porca (D_{Km}). No entanto, o valor de D_{Km} é diferente se o torque é aplicado pela porca ou pelo parafuso, portanto, quando o torque é aplicado pela porca deve obter o valor médio entre o maior e menor diâmetro da superfície de contato da porca, respectivamente, D_P e d_P, e quando o torque é aplicado pelo parafuso deve obter o valor médio entre o maior diâmetro da superfície de contato abaixo da cabeça do parafuso e o menor diâmetro da superfície de contato da arruela, respectivamente, D_K e d_K, no caso d_K é o diâmetro do furo da arruela. Na Tabela 8 estão todos os valores obtidos a partir do projetor de perfil e os valores calculados de $d_{Km,}$ além destes estão presentes os valores das médias, desvio padrão, erro padrão e margem de erro para cada uma das medições.

Tabela 8 – Dimensões d_2 e D_{Km}

	Parafuso		Arruela	Torque pelo parafuso	Porca		Torque pela porca
Leitura	d2 [mm]	D_K [mm]	d_K [mm]	D_{Km} [mm]	D_P [mm]	d_P [mm]	D_{Km} [mm]
1	7,9680	14,9430	10,6200	12,7815	15,7260	11,9840	13,8550
2	7,9680	14,8440	10,5800	12,7120	15,9220	12,0560	13,9890
3	7,9410	14,7870	10,6100	12,6985	16,0740	12,0640	14,0690
4	7,9590	14,7930	10,6140	12,7035	15,6380	12,0600	13,8490
5	7,9470	14,8110	10,5878	12,6994	15,8860	12,0400	13,9630
Média	**7,9566**	14,8356	10,6024	**12,7190**	15,8492	12,0408	**13,9450**
Desvio padrão	0,0110	0,0572	0,0156	0,0316	0,1530	0,0295	0,0836
Erro padrão	0,0049	0,0256	0,0070	0,0141	0,0684	0,0132	0,0374
Margem de erro	±0,0096	±0,0502	±0,0137	±0,0277	±0,1341	±0,0259	±0,0733

Fonte: Própria autoria

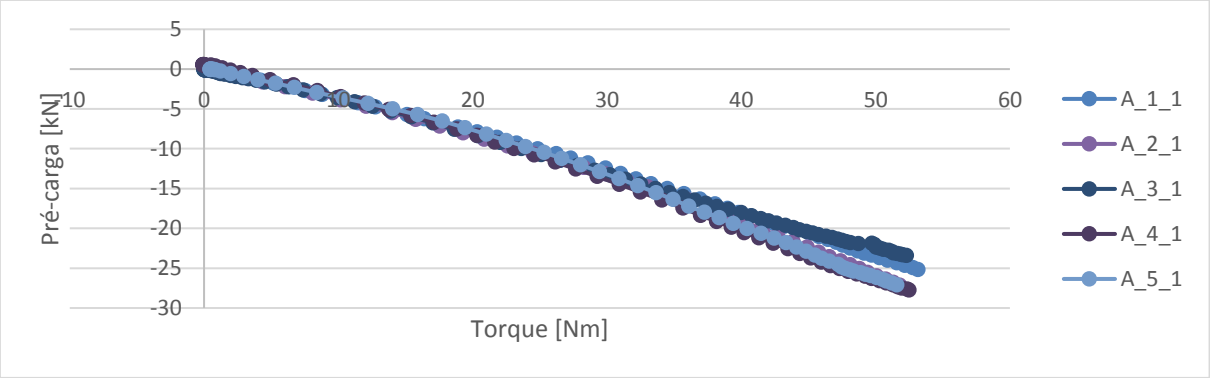
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DOS ENSAIOS POR GRUPO

4.1.1 Grupo A – Torque pela porca com lubrificação

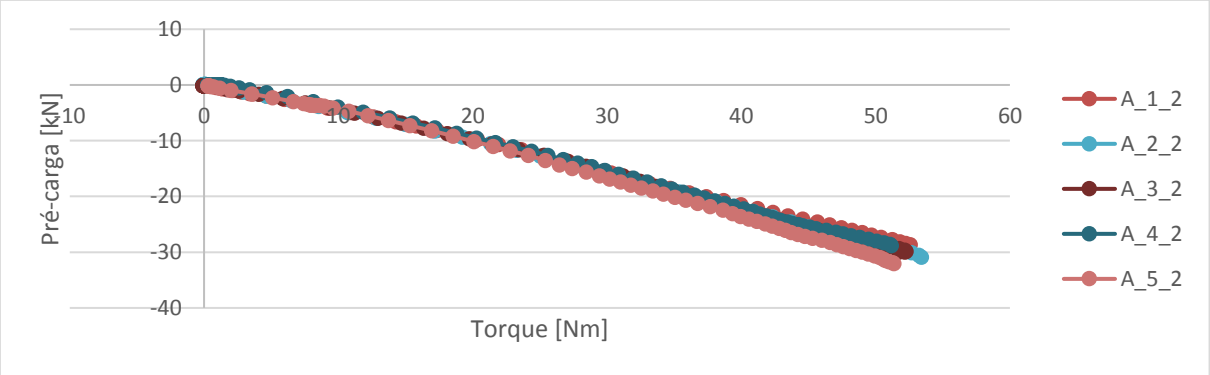
O Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3 mostram, respectivamente, o 1º, 2º e 3º torqueamento para os ensaios realizados de aplicação da pré-carga[1] na junta parafusada do Grupo A.

Gráfico 1 – Torque x Pré-carga – Grupo A – 1° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

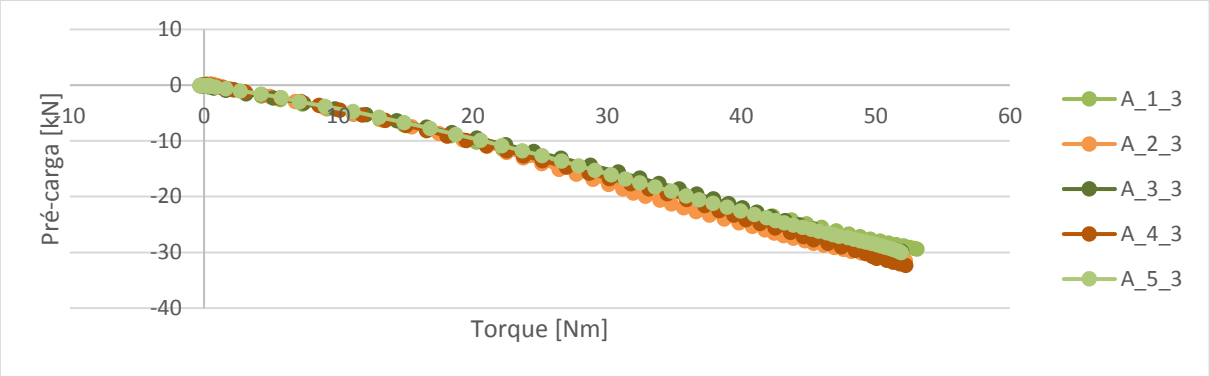
Gráfico 2 – Torque x Pré-carga – Grupo A – 2° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

[1] Os gráficos de 1 a 18 foram obtidos através da compressão na célula de carga, por este motivo os valores da pré-carga nestes gráficos são negativos.

Gráfico 3 – Torque x Pré-carga – Grupo A – 3° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

A partir dos três gráficos do Grupo A foi montada a Tabela 9, mas para isso foi gerada a equação da reta e o coeficiente de correlação de cada um dos ensaios, estes são apresentados no A e a partir desses foi determinado o valor da pré-carga para um torque de 55Nm (valor especificado pela Belenus), este procedimento foi realizado para cada um dos ensaios. Ainda na Tabela 9 é possível ver o valor o erro relativo à média para cada um dos ensaios. O valor da média, desvio padrão, erro padrão e margem de erro podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 9 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo A

1º Torqueamento			2º Torqueamento			3º Torqueamento		
Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]
A_1_1	-25,3822	-5,2581	A_1_2	-29,5833	-3,2559	A_1_3	-30,3938	-5,6002
A_2_1	-27,3019	1,9074	A_2_2	-30,7904	0,6916	A_2_3	-33,7490	4,8206
A_3_1	-24,6715	-7,9110	A_3_2	-30,8130	0,7656	A_3_3	-30,7122	-4,6113
A_4_1	-28,5985	6,7471	A_4_2	-30,6229	0,1438	A_4_3	-32,9514	2,3434
A_5_1	-28,0004	4,5145	A_5_2	-31,0850	1,6549	A_5_3	-33,1781	3,0475

Fonte: Própria autoria

Analisando os valores de erro relativo na Tabela 9 é possível perceber que no 1º torqueamento ocorreu uma maior variação do que no 2º e 3º torqueamento. No entanto, os valores obtidos nos três casos são pequenos, isso pode ser confirmado analisando a margem de erro, Tabela 10, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 10 – Análise estatística para o Grupo A

1º Torqueamento		2º Torqueamento		3º Torqueamento	
Média	-26,7909	Média	-30,5789	Média	-32,1969
Desvio padrão	1,6932	Desvio padrão	0,5807	Desvio padrão	1,5327
Erro padrão	0,7572	Erro padrão	0,2597	Erro padrão	0,6854
Intervalo de confiança	±1,4842	Intervalo de confiança	±0,5090	Intervalo de confiança	±1,3435

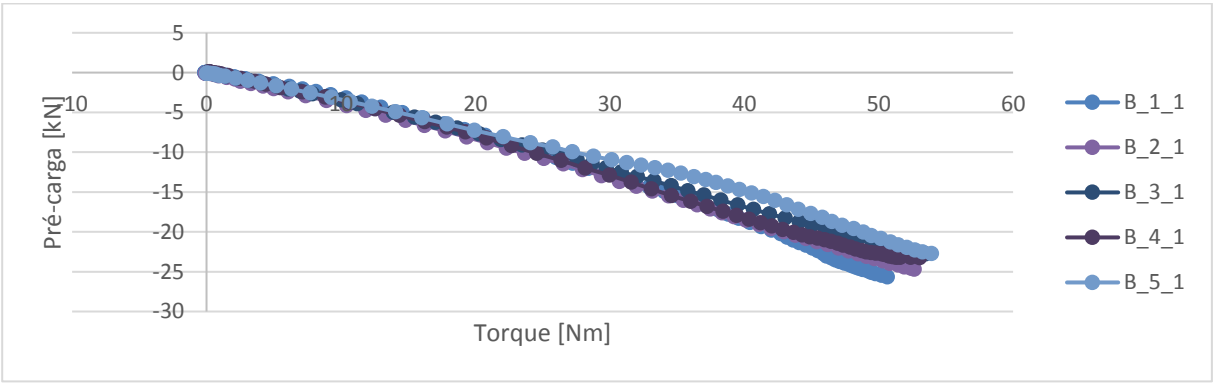
Fonte: Própria autoria

Analisando os valores da Tabela 10 é possível perceber que ocorre um pequeno aumento da pré-carga no 2º e 3º torqueamento se comparado com o 1º torqueamento. Este aumento da pré-carga pode ter acontecido devido à remoção das irregularidades nas superfícies atritadas no 1º torqueamento, assim proporcionando um menor atrito e por fim aumentando a pré-carga.

4.1.2 Grupo B – Torque pelo parafuso com lubrificação

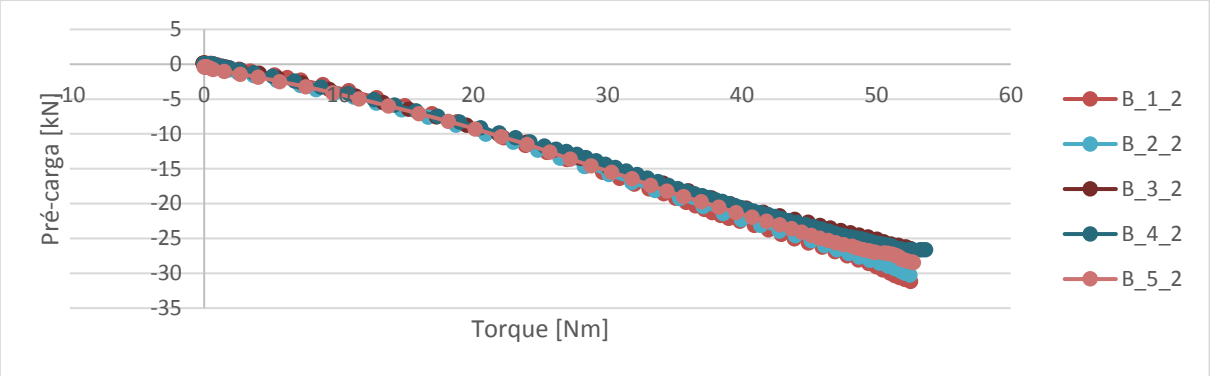
O Gráfico 4, Gráfico 5 e Gráfico 6 mostram, respectivamente, o 1º, 2º e 3º torqueamento para os ensaios realizados de aplicação da pré-carga na junta parafusada do Grupo B.

Gráfico 4 - Torque x Pré-carga – Grupo B – 1° Torqueamento



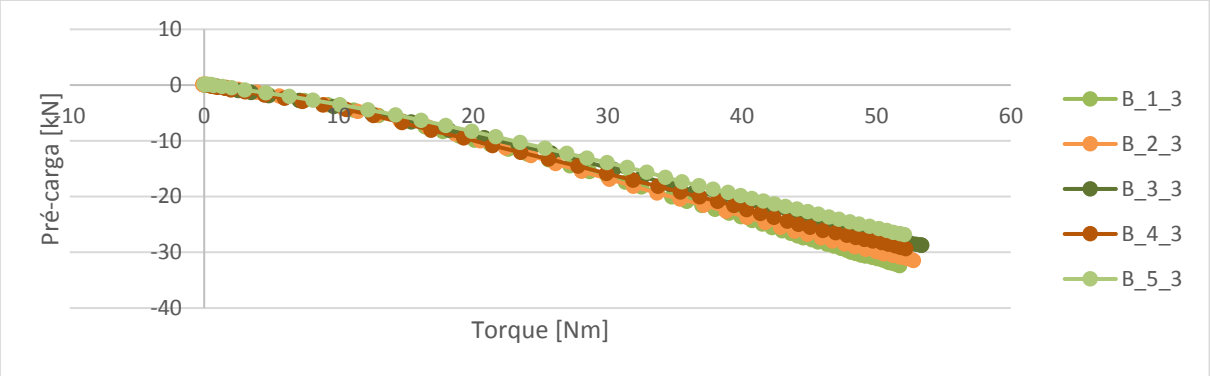
Fonte: Própria autoria

Gráfico 5 – Torque x Pré-carga – Grupo B – 2° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

Gráfico 6 – Torque x Pré-carga – Grupo B – 3° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

A partir dos três gráficos do Grupo B foi montada a Tabela 11, mas para isso foi gerada a equação da reta e o coeficiente de correlação de cada um dos ensaios, estes são apresentados no APÊNDICE F e a partir desses foi determinado o valor da pré-carga para um torque de 55Nm (valor especificado pela Belenus), este procedimento foi realizado para cada um dos ensaios. Ainda na Tabela 11 é possível ver o valor o erro relativo à média para cada um dos ensaios. O valor da média, desvio padrão, erro padrão e margem de erro podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 11 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo B

1º Torqueamento			2º Torqueamento			3º Torqueamento		
Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]
B_1_1	-26,5988	8,8514	B_1_2	-31,4483	6,6106	B_1_3	-33,6335	9,1742
B_2_1	-25,5338	4,4928	B_2_2	-30,8208	4,4834	B_2_3	-32,5462	5,6449
B_3_1	-23,1981	-5,0655	B_3_2	-27,7080	-6,0689	B_3_3	-29,4151	-4,5186
B_4_1	-24,9968	2,2953	B_4_2	-28,0472	-4,9191	B_4_3	-30,7164	-0,2948
B_5_1	-21,8521	-10,5740	B_5_2	-29,4670	-0,1061	B_5_3	-27,7247	-10,0057

Fonte: Própria autoria

Analisando os valores de erro relativo na Tabela 11 é possível perceber que no 1º e 3º torqueamento ocorreram uma maior variação do que no 2º torqueamento. Esta maior variação pode ser melhor verificada analisando a margem de erro, Tabela 12, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 12 – Análise estatística para o Grupo B

1º Torqueamento		2º Torqueamento		3º Torqueamento	
Média	-24,4359	Média	-29,4982	Média	-30,8072
Desvio padrão	1,8978	Desvio padrão	1,6479	Desvio padrão	2,3696
Erro padrão	0,8487	Erro padrão	0,7370	Erro padrão	1,0597
Intervalo de confiança	±1,6635	Intervalo de confiança	±1,4445	Intervalo de confiança	±2,0770

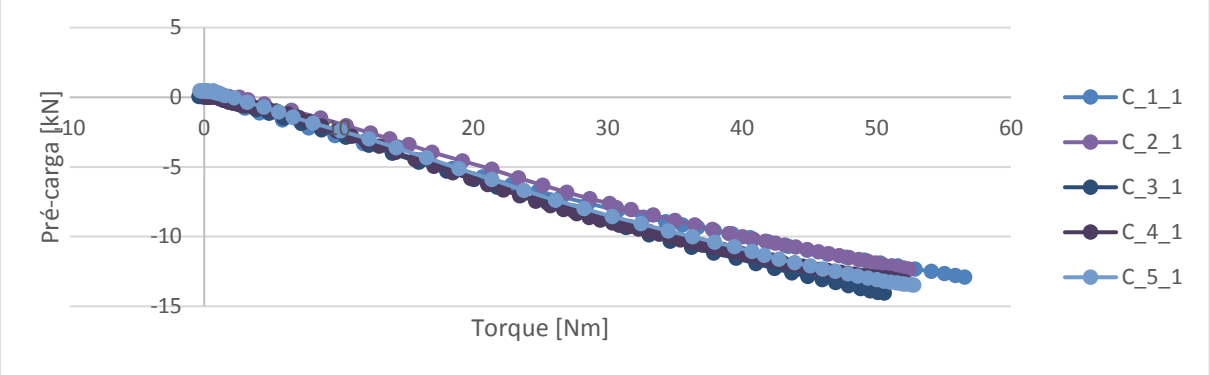
Fonte: Própria autoria

Analisando os valores da Tabela 12 é possível perceber que ocorre um pequeno aumento da pré-carga no 2º e 3º torqueamento se comparado com o 1º torqueamento. Este comportamento também aconteceu no Grupo A e como foi sugerido para o Grupo A o atrito entre as partes diminui com o número de torqueamentos fazendo com que ocorra o aumento da pré-carga.

4.1.3 Grupo C – Torque pela porca sem lubrificação

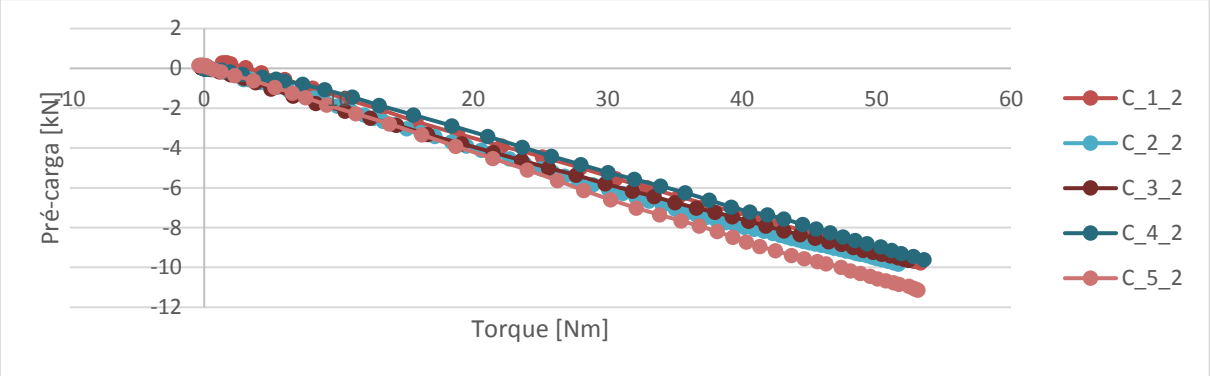
O Gráfico 7, Gráfico 8 e Gráfico 9 mostram, respectivamente, o 1º, 2º e 3º torqueamento para os ensaios realizados de aplicação da pré-carga na junta parafusada do Grupo C.

Gráfico 7 – Torque x Pré-carga – Grupo C – 1° Torqueamento



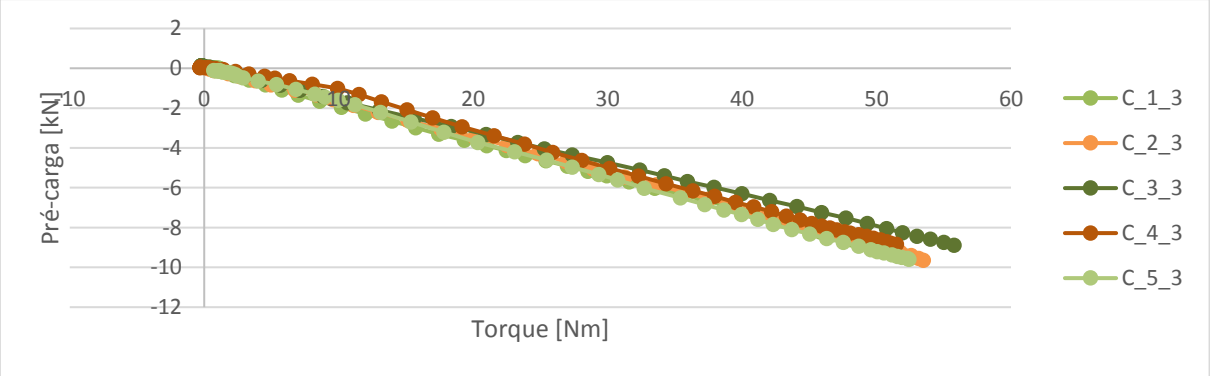
Fonte: Própria autoria

Gráfico 8 – Torque x Pré-carga – Grupo C – 2° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

Gráfico 9 – Torque x Pré-carga – Grupo C – 3° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

A partir dos três gráficos do Grupo C foi montada a Tabela 13, mas para isso foi gerada a equação da reta e o coeficiente de correlação de cada um dos ensaios, estes são apresentados no APÊNDICE K e a partir desses foi determinado o valor da pré-carga para um torque de

55Nm (valor especificado pela Belenus), este procedimento foi realizado para cada um dos ensaios. Ainda na Tabela 13 é possível ver o valor o erro relativo à média para cada um dos ensaios. O valor da média, desvio padrão, erro padrão e margem de erro podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 13 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo C

1º Torqueamento			2º Torqueamento			3º Torqueamento		
Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]
C_1_1	-13,3959	-7,4361	C_1_2	-10,1947	-3,0208	C_1_3	-9,9359	3,5317
C_2_1	-13,4468	-7,0850	C_2_2	-10,7410	2,1751	C_2_3	-9,7585	1,6830
C_3_1	-15,8426	9,4699	C_3_2	-10,1873	-3,0912	C_3_3	-8,7394	-8,9360
C_4_1	-14,9415	3,2435	C_4_2	-9,7369	-7,3760	C_4_3	-9,4309	-1,7306
C_5_1	-14,7337	1,8076	C_5_2	-11,7016	11,3130	C_5_3	-10,1202	5,4520

Fonte: Própria autoria

Analisando os valores de erro relativo na Tabela 13 é possível perceber que para cada torqueamento houve um valor mais divergente, e os para os demais valores o erro relativo foi pequeno. Esta menor variação pode ser melhor verificada analisando a margem de erro, Tabela 14, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 14 – Análise estatística para o Grupo C

1º Torqueamento		2º Torqueamento		3º Torqueamento	
Média	-14,4721	Média	-10,5123	Média	-9,5970
Desvio padrão	1,0460	Desvio padrão	0,7540	Desvio padrão	0,5426
Erro padrão	0,4678	Erro padrão	0,3372	Erro padrão	0,2427
Intervalo de confiança	±0,9169	Intervalo de confiança	±0,6609	Intervalo de confiança	±0,4756

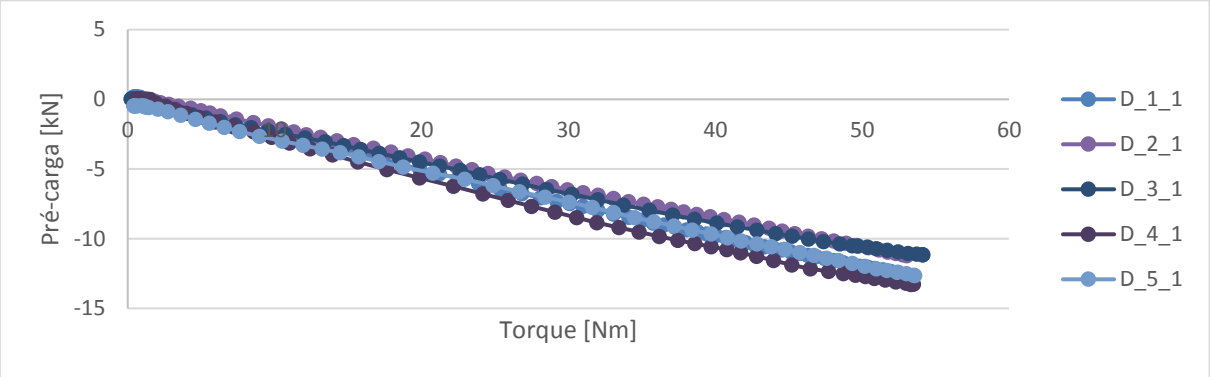
Fonte: Própria autoria

Analisando os valores da Tabela 14 é possível perceber que ocorre uma queda no valores de pré-carga no 2º e 3º torqueamento se comparado com o 1º torqueamento. Este comportamento pode ser justificado pela formação de limalhas entre os filetes da rosca, o que acabou por aumentar o atrito o que diminui a pré-carga.

4.1.4 Grupo D – Torque pelo parafuso sem lubrificação

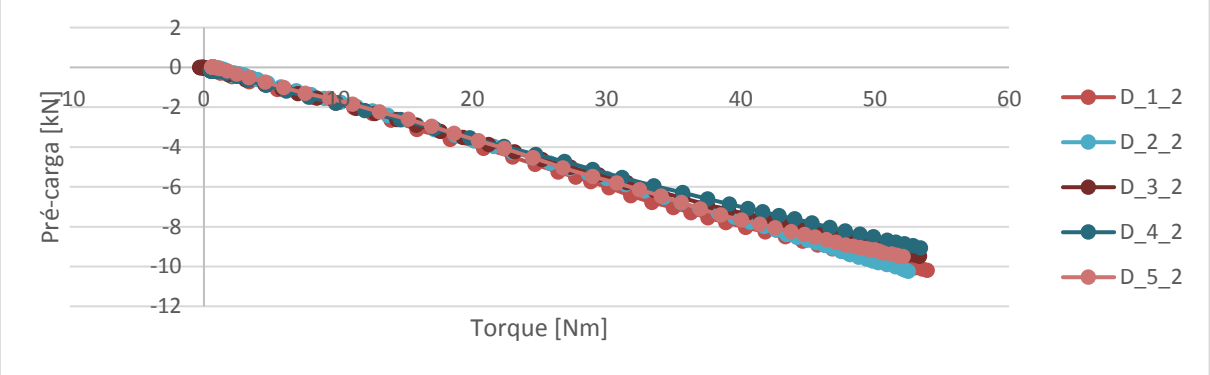
O Gráfico 10, Gráfico 11, Gráfico 12 mostram, respectivamente, o 1º, 2º e 3º torqueamento para os ensaios realizados de aplicação da pré-carga na junta parafusada do Grupo D.

Gráfico 10 – Torque x Pré-carga – Grupo D – 1° Torqueamento



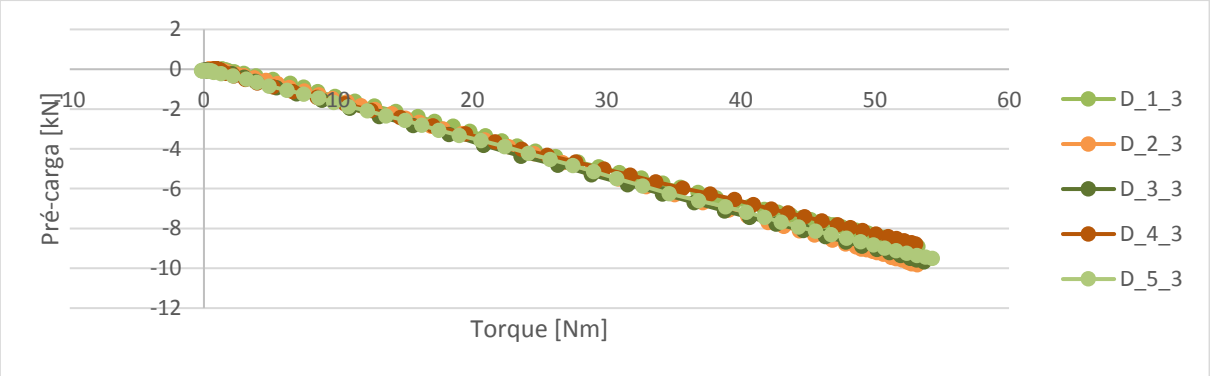
Fonte: Própria autoria

Gráfico 11 – Torque x Pré-carga – Grupo D – 2° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

Gráfico 12 – Torque x Pré-carga – Grupo D – 3° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

A partir dos três gráficos do Grupo D foi montada a Tabela 15, mas para isso foi gerada a equação da reta e o coeficiente de correlação de cada um dos ensaios, estes são apresentados no APÊNDICE P e a partir desses foi determinado o valor da pré-carga para um torque de 55Nm (valor especificado pela Belenus), este procedimento foi realizado para cada um dos ensaios. Ainda na Tabela 15 é possível ver o valor o erro relativo à média para cada um dos ensaios. O valor da média, desvio padrão, erro padrão e margem de erro podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 15 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo D

1º Torqueamento			2º Torqueamento			3º Torqueamento		
Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]
D_1_1	-13,4446	8,6171	D_1_2	-10,6776	4,7549	D_1_3	-9,2337	-4,1457
D_2_1	-11,7599	-4,9933	D_2_2	-10,6518	4,5014	D_2_3	-10,0714	4,5501
D_3_1	-11,8181	-4,5235	D_3_2	-9,9042	-2,8326	D_3_3	-9,9808	3,6095
D_4_1	-11,7318	-5,2208	D_4_2	-9,4707	-7,0856	D_4_3	-9,1533	-4,9799
D_5_1	-13,1356	6,1206	D_5_2	-10,2604	0,6618	D_5_3	-9,7261	0,9660

Fonte: Própria autoria

Analisando os valores de erro relativo na Tabela 15 é possível perceber que no 1º e 2º torqueamento há pelo menos um valor mais divergente e os demais são mais próximos de um valor ideal. Já no 3º torqueamento os valores são todos inferiores a 5%. Esta menor variação pode ser melhor verificada analisando a margem de erro, Tabela 16, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 16 – Análise estatística para o Grupo D

1º Torqueamento		2º Torqueamento		3º Torqueamento	
Média	-12,3780	Média	-10,1930	Média	-9,6330
Desvio padrão	0,8404	Desvio padrão	0,5136	Desvio padrão	0,4217
Erro padrão	0,3758	Erro padrão	0,2297	Erro padrão	0,1886
Intervalo de confiança	±0,7366	Intervalo de confiança	±0,4501	Intervalo de confiança	±0,3696

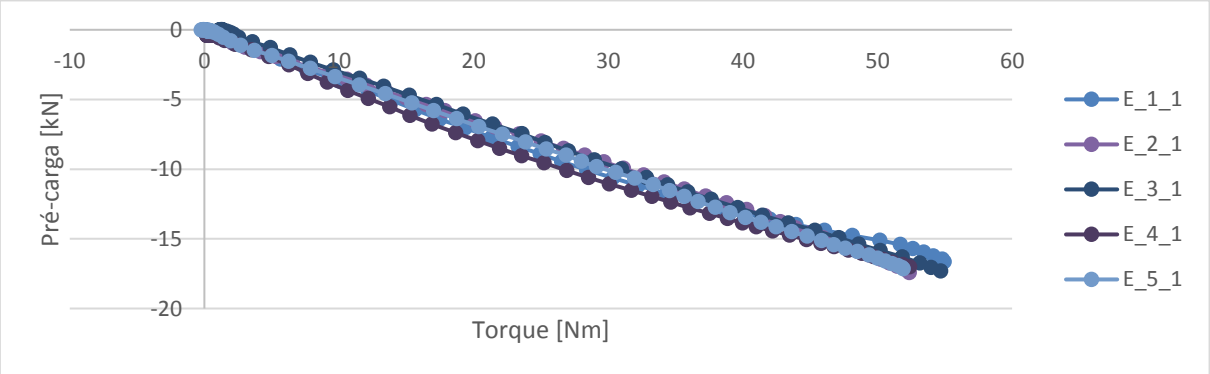
Fonte: Própria autoria

Analisando os valores da Tabela 16 é possível perceber que ocorre uma queda no valores de pré-carga no 2º e 3º torqueamento se comparado com o 1º torqueamento. Comportamento semelhante ao do Grupo C, como sugerido anteriormente ocorreu uma formação de limalhas entre os filetes da rosca, o que acabou por aumentar o atrito o que diminui a pré-carga.

4.1.5 Grupo E – Torque pela porca com lubrificação seca (grafite)

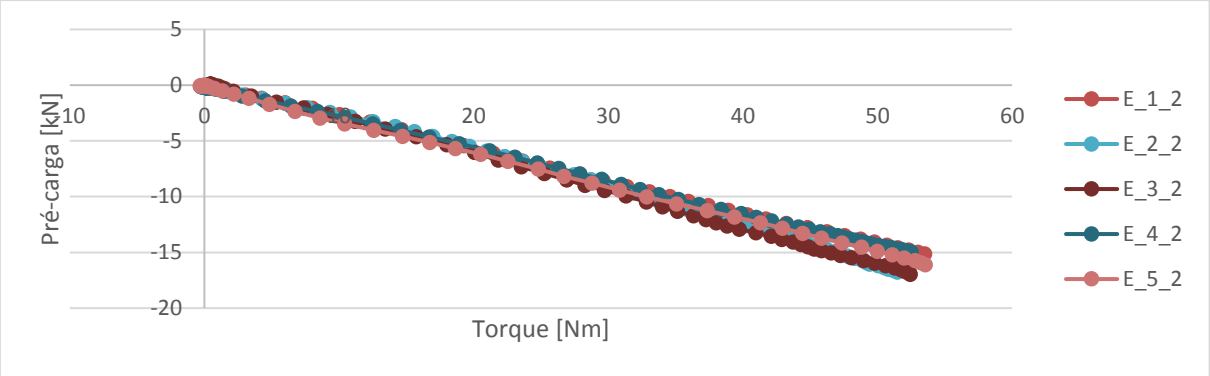
O Gráfico 13, Gráfico 14 e Gráfico 15 mostram, respectivamente, o 1º, 2º e 3º torqueamento para os ensaios realizados de aplicação da pré-carga na junta parafusada do Grupo E.

Gráfico 13 – Torque x Pré-carga – Grupo E – 1° Torqueamento



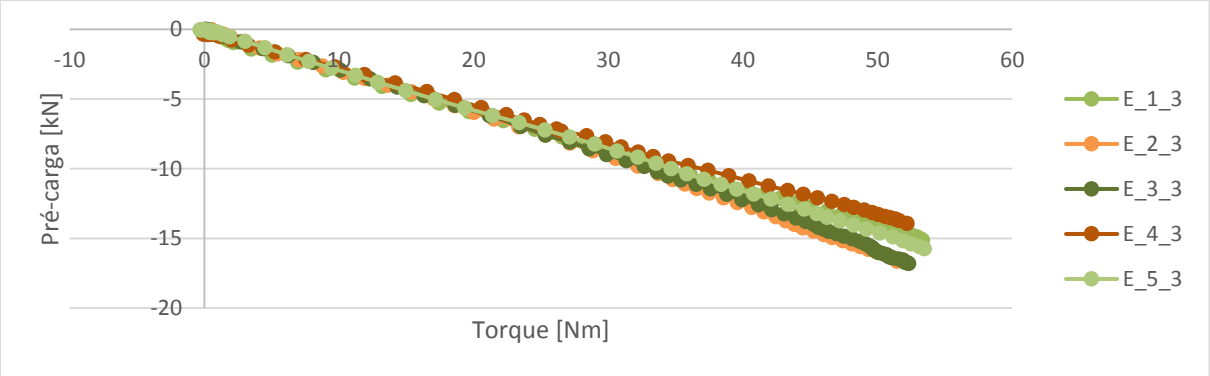
Fonte: Própria autoria

Gráfico 14 – Torque x Pré-carga – Grupo E – 2° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

Gráfico 15 – Torque x Pré-carga – Grupo E – 3° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

A partir dos três gráficos do Grupo E foi montada a Tabela 17, mas para isso foi gerada a equação da reta e o coeficiente de correlação de cada um dos ensaios, estes são apresentados no APÊNDICE U e a partir desses foi determinado o valor da pré-carga para um torque de 55Nm (valor especificado pela Belenus), este procedimento foi realizado para cada um dos ensaios. Ainda na Tabela 17 é possível ver o valor o erro relativo à média para cada um dos ensaios. O valor da média, desvio padrão, erro padrão e margem de erro podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 17 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo E

1º Torqueamento			2º Torqueamento			3º Torqueamento		
Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]
E_1_1	-17,3089	-3,4386	E_1_2	-15,6917	-5,4999	E_1_3	-15,5331	-3,8904
E_2_1	-17,8456	-0,4443	E_2_2	-17,3740	4,6315	E_2_3	-17,4371	7,8909
E_3_1	-17,6044	-1,7899	E_3_2	-17,7441	6,8603	E_3_3	-17,2490	6,7267
E_4_1	-18,6445	4,0124	E_4_2	-15,7398	-5,2101	E_4_3	-14,6161	-9,5638
E_5_1	-18,2229	1,6605	E_5_2	-16,4752	-0,7818	E_5_3	-15,9738	-1,1635

Fonte: Própria autoria

Analisando os valores de erro relativo na Tabela 17 é possível perceber que no 1º e 2º torqueamento ocorre uma maior convergência dos valores. Já no 3º torqueamento os valores possuem uma maior divergência. Estas variações podem ser verificadas analisando a margem de erro, Tabela 18, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 18 – Análise estatística para o Grupo E

1º Torqueamento		2º Torqueamento		3º Torqueamento	
Média	-17,9253	Média	-16,6050	Média	-16,1618
Desvio padrão	0,5232	Desvio padrão	0,9339	Desvio padrão	1,1862
Erro padrão	0,2340	Erro padrão	0,4176	Erro padrão	0,5305
Intervalo de confiança	±0,4586	Intervalo de confiança	±0,8186	Intervalo de confiança	±1,0397

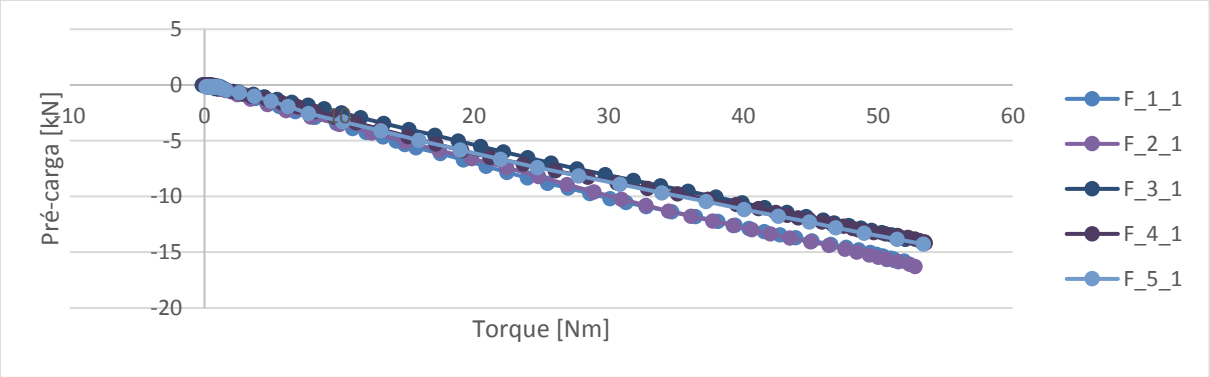
Fonte: Própria autoria

Analisando os valores da Tabela 18 é possível perceber que ocorre uma queda no valores de pré-carga no 2º e 3º torqueamento se comparado com o 1º torqueamento. Comportamento semelhante ao Grupo C e D, como sugerido anteriormente ocorreu uma formação de limalhas entre os filetes da rosca, o que acabou por aumentar o atrito o que diminui a pré-carga. No entanto, como o grafite diminui o atrito a formação de limalhas foi menor, assim reduzindo a variação de um torqueamento para o outro.

4.1.6 Grupo F – Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite)

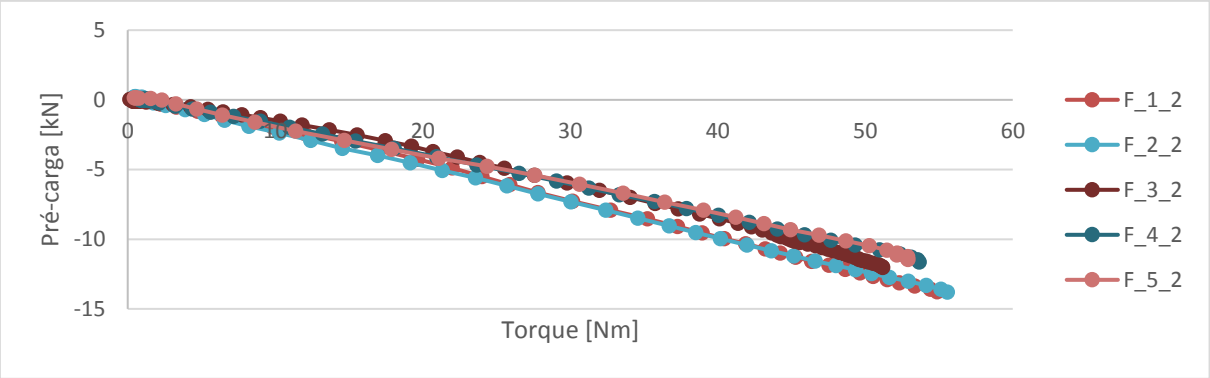
O Gráfico 16, Gráfico 17 e Gráfico 18 mostram, respectivamente, o 1º, 2º e 3º torqueamento para os ensaios realizados de aplicação da pré-carga na junta parafusada do Grupo F.

Gráfico 16 – Torque x Pré-carga – Grupo F – 1° Torqueamento



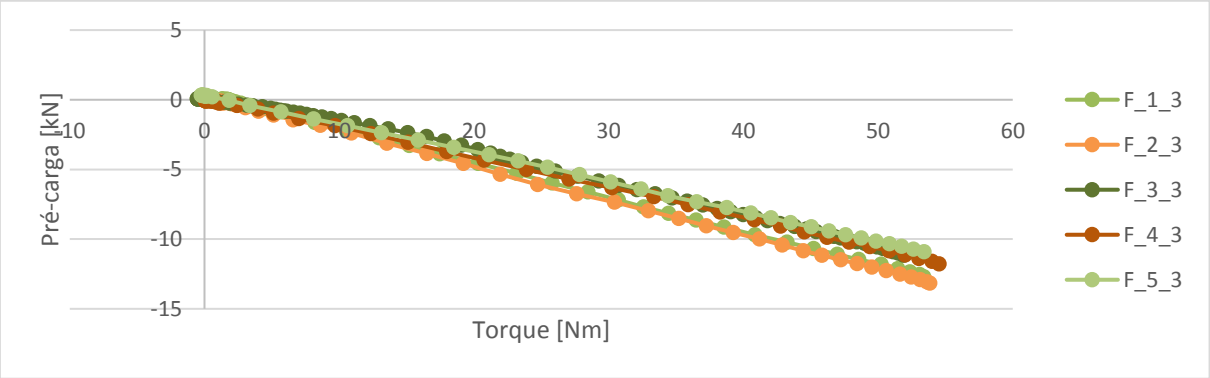
Fonte: Própria autoria

Gráfico 17 – Torque x Pré-carga – Grupo F – 2° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

Gráfico 18 – Torque x Pré-carga – Grupo F – 3° Torqueamento



Fonte: Própria autoria

A partir dos três gráficos do Grupo F foi montada a Tabela 19, mas para isso foi gerada a equação da reta e o coeficiente de correlação de cada um dos ensaios, estes são apresentados no APÊNDICE Z e a partir desses foi determinado o valor da pré-carga para um torque de 55Nm (valor especificado pela Belenus), este procedimento foi realizado para cada um dos ensaios. Ainda na Tabela 19 é possível ver o valor o erro relativo à média para cada um dos ensaios. O valor da média, desvio padrão, erro padrão e margem de erro podem ser vistos na Tabela 20.

Tabela 19 – Pré-carga e erro relativo à média para um torque de 55Nm para o Grupo F

1º Torqueamento			2º Torqueamento			3º Torqueamento		
Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]	Parafuso	Pré-carga [kN]	Erro relativo [%]
F_1_1	-17,2472	8,9104	F_1_2	-13,6596	8,7421	F_1_3	-13,0658	7,3877
F_2_1	-17,3167	9,3493	F_2_2	-13,6430	8,6100	F_2_3	-13,3982	10,1200
F_3_1	-14,5732	-7,9749	F_3_2	-12,3484	-1,6966	F_3_3	-11,4717	-5,7138
F_4_1	-14,8063	-6,5031	F_4_2	-11,6002	-7,6529	F_4_3	-11,7256	-3,6268
F_5_1	-15,2373	-3,7817	F_5_2	-11,5563	-8,0025	F_5_3	-11,1733	-8,1670

Fonte: Própria autoria

Analisando os valores de erro relativo na Tabela 19 é possível perceber que os maiores valores estão próximos de 10%. Estas variações podem ser verificadas analisando a margem de erro, Tabela 20, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 20 – Análise estatística para o Grupo F

1º Torqueamento		2º Torqueamento		3º Torqueamento	
Média	-15,8361	Média	-12,5615	Média	-12,1669
Desvio padrão	1,3414	Desvio padrão	1,0435	Desvio padrão	0,9987
Erro padrão	0,5999	Erro padrão	0,4667	Erro padrão	0,4466
Intervalo de confiança	±1,1758	Intervalo de confiança	±0,9147	Intervalo de confiança	±0,8754

Fonte: Própria autoria

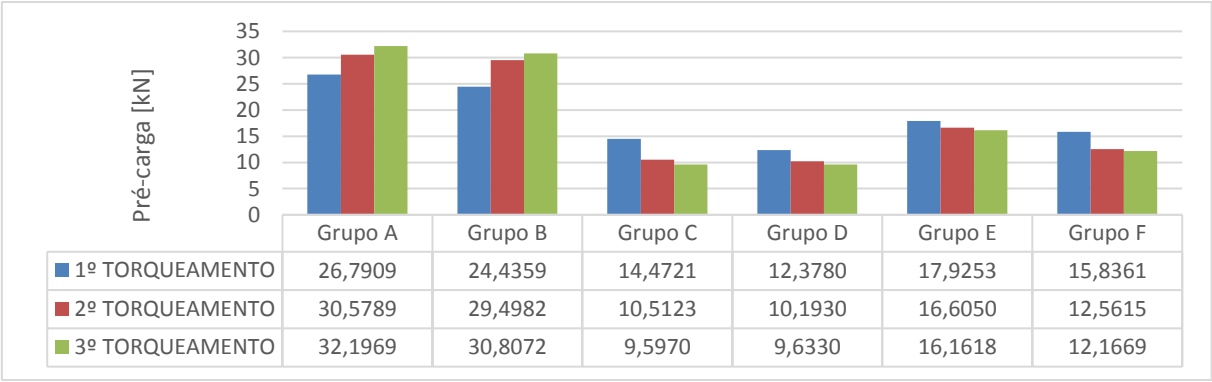
Analisando os valores da Tabela 20 é possível perceber que ocorre uma queda nos valores de pré-carga no 2º e 3º torqueamento se comparado com o 1º torqueamento. Comportamento semelhante ao Grupo C, D e E, como sugerido anteriormente ocorreu uma formação de limalhas entre os filetes da rosca, o que acabou por aumentar o atrito o que diminui a pré-carga. No

entanto, como o grafite diminui o atrito a formação de limalhas foi menor, assim reduzindo a variação de um torqueamento para o outro.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DA PRÉ-CARGA ENTRE OS GRUPOS

O Gráfico 19 foi elaborado a partir dos valores das médias das pré-cargas[2] encontradas no item 4.1. Analisando o gráfico fica evidente a diferença da pré-carga nos grupos com lubrificação, sem lubrificação e lubrificação seca (grafite), respectivamente, grupos A-B, C-D e E-F. A condição com lubrificação apresenta uma pré-carga quase duas vezes maior que a condição sem lubrificação. Esse fato deve-se à diminuição do coeficiente de atrito com a lubrificação, dessa forma o torque aplicado sofre uma menor dissipação por conta do atrito, o que acaba por aumentar o torque útil no parafuso e por fim aumentando a intensidade de pré-carga na junta parafusada. Durante os ensaios era evidente que o ângulo percorrido pelo torquímetro, durante a aplicação do torque, era maior no caso da condição com lubrificação, ficando próximo de 90º, para a condição com lubrificação seca (grafite) o ângulo de torção era próximo de 60º e para a condição sem lubrificação o ângulo de torção era próximo de 30º. Esses ângulos não foram medidos com precisão, mas foram observados durante os ensaios.

Gráfico 19 – Comparativo da pré-carga por grupo e por número de torqueamentos para um torque aplicado de 55Nm



	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F
1º TORQUEAMENTO	26,7909	24,4359	14,4721	12,3780	17,9253	15,8361
2º TORQUEAMENTO	30,5789	29,4982	10,5123	10,1930	16,6050	12,5615
3º TORQUEAMENTO	32,1969	30,8072	9,5970	9,6330	16,1618	12,1669

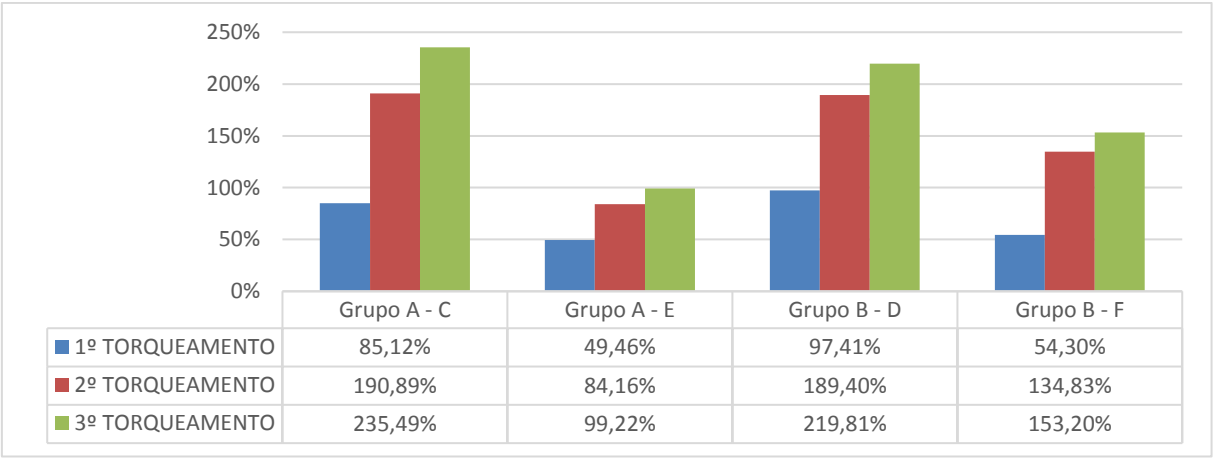
Fonte: Própria autoria

Para melhor ilustrar a diferença da pré-carga entre as diferentes condições de lubrificação o Gráfico 20 mostra a variação percentual da pré-carga com relação a condição de lubrificação. Foi tomado como referência a condição com lubrificação e esta foi comparada com as condições

[2] Para o Gráfico 19 foram utilizados os valores em módulo das pré-cargas, pois a intensidade da pré-carga no parafuso é igual na célula de carga, mas sendo no parafuso esforço de tração e na célula de carga de compressão.

sem lubrificação e com lubrificação seca (grafite), sendo que foram comparadas separadamente as situações de torque pela porca e torque pelo parafuso. Desta forma temos as seguintes combinações: torque pela porca: grupos A-C e A-E; torque pelo parafuso: grupos B-D e B-F.

Gráfico 20 – Variação percentual da pré-carga com relação a condição de lubrificação



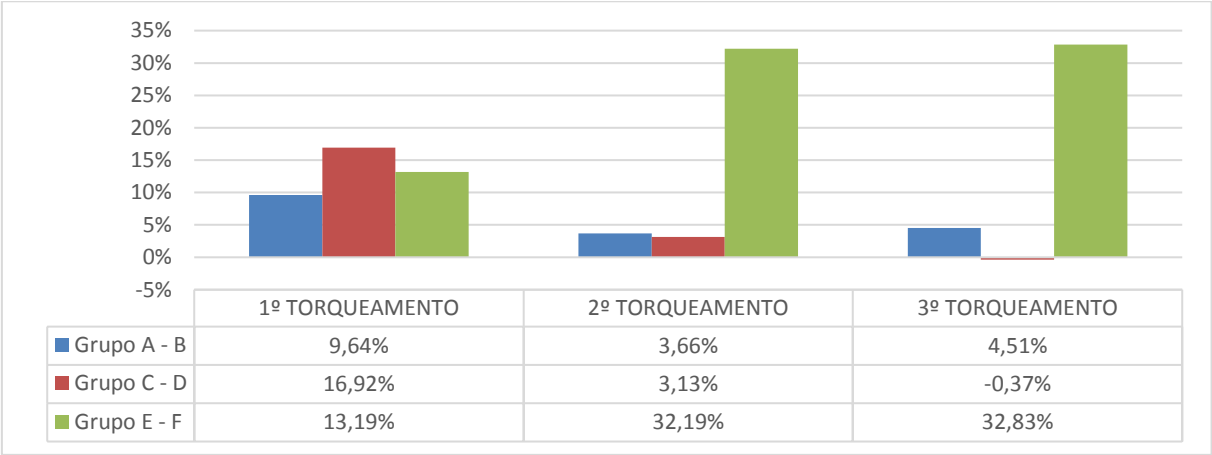
	Grupo A - C	Grupo A - E	Grupo B - D	Grupo B - F
1º TORQUEAMENTO	85,12%	49,46%	97,41%	54,30%
2º TORQUEAMENTO	190,89%	84,16%	189,40%	134,83%
3º TORQUEAMENTO	235,49%	99,22%	219,81%	153,20%

Fonte: Própria autoria

Outra observação possível de ser feita no Gráfico 19 é que no Grupo C-D no 3º torqueamento o valor da pré-carga não variou significativamente, no entanto, para todas as outras condições há uma maior intensidade de pré-carga quando ocorre a aplicação do torque pela porca ao invés da aplicação do torque pelo parafuso. Dessa forma é possível afirmar que na possibilidade e aplicação do torque pela porca ou pelo parafuso, deve-se optar pela aplicação do torque pela porca, pois desta forma será gerada uma maior pré-carga na junta parafusada, o que já foi abordado, no item 2.1, é mais vantajoso para a junta parafusada com relação ao risco de auto afrouxamento.

Para melhor ilustrar essa variação, o Gráfico 21 mostra a variação percentual da pré-carga quando o torque é aplicado pela porca em relação ao torque aplicado pelo parafuso.

Gráfico 21 – Variação percentual da pré-carga quando o torque é aplicado pela porca em relação ao torque aplicado pelo parafuso



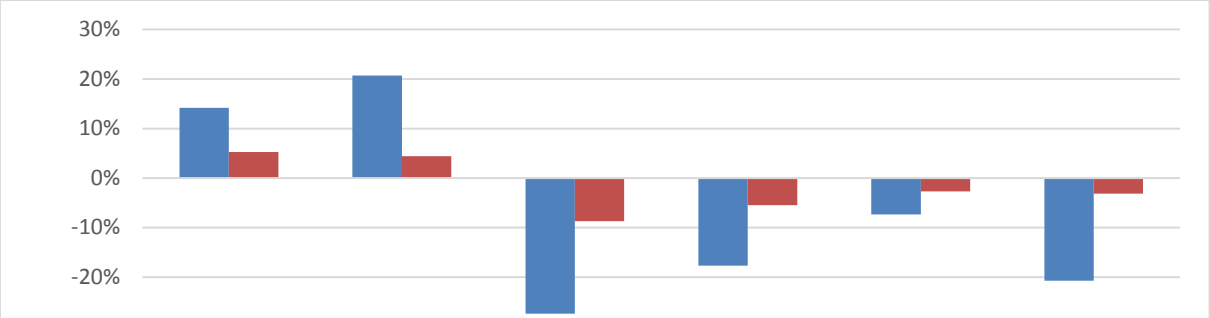
	1º TORQUEAMENTO	2º TORQUEAMENTO	3º TORQUEAMENTO
Grupo A - B	9,64%	3,66%	4,51%
Grupo C - D	16,92%	3,13%	-0,37%
Grupo E - F	13,19%	32,19%	32,83%

Fonte: Própria autoria

O fato de haver diferença na intensidade da pré-carga entre a aplicação do torque pela porca ou pelo parafuso, sugere que ocorre uma maior perda do torque por atrito quando o torque é aplicado pelo parafuso. Isso pode ser justificado se for observada a condição de acabamento das superfícies de contato da porca e do parafuso com relação a arruela, no caso a superfície da porca tem-se um acabamento tendendo ao polido e no parafuso o acabamento é proveniente dos processos de forjamento e posteriormente tratamento térmico para seu endurecimento, têmpera. Ou seja, o coeficiente de atrito na superfície da porca com arruela é menor do que na superfície do parafuso com a arruela.

É possível verificar que no caso dos grupos A-B (com lubrificação), ocorre um aumento da pré-carga quando é realizado o 2º e 3 torqueamento, isto não acontece com os grupos C-D e E-F. Essa abordagem já foi discutida no item 4.1, mas para uma melhor visualização dessa variação, o Gráfico 22 mostra a variação percentual da pré-carga comparando o 2º com o 1º torqueamento e o 3º com o 2º torqueamento para todos os grupos.

Gráfico 22 - Variação percentual do 2º com 1º e 3º com 2º torqueamentos



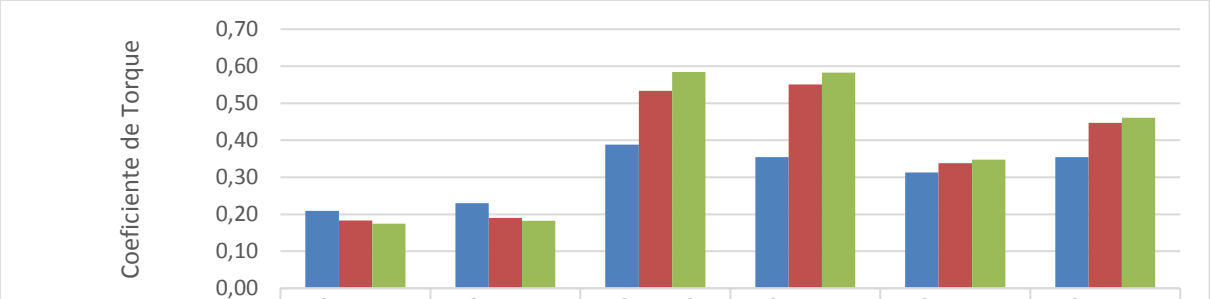
	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F
2º - 1º	14,14%	20,72%	-27,36%	-17,65%	-7,37%	-20,68%
3º - 2º	5,29%	4,44%	-8,71%	-5,49%	-2,67%	-3,14%

Fonte: Própria autoria

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DO COEFICIENTE DE TORQUE ENTRE OS GRUPOS

O Gráfico 23 foi elaborado a partir dos valores das médias das pré-cargas definidas no item 4.1, as quais foram determinadas para um torque de 55Nm e como foi utilizado o parafuso M10 o valor do diâmetro medido nos parafusos foi de 9,8mm, portanto, este valor foi utilizado para a determinação dos valores médios do coeficiente de torque. Para determinar o valor do coeficiente de torque foi utilizada a Equação 4 do item 2.1.

Gráfico 23 – Comparativo do coeficiente de torque por grupo e por número de torqueamentos para um torque aplicado de 55Nm



	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F
1º TORQUEAMENTO	0,2095	0,2297	0,3878	0,3544	0,3131	0,3544
2º TORQUEAMENTO	0,1835	0,1903	0,5339	0,5506	0,3380	0,4468
3º TORQUEAMENTO	0,1743	0,1822	0,5848	0,5826	0,3473	0,4613

Fonte: Própria autoria

Comparando os coeficientes de torque fica evidenciado que a condição de lubrificação tem influência significativa sobre o coeficiente. Analisando os grupos A-B, C-D e E-F esta

influência pode ser melhor visualizada, tendo menores valores de coeficiente de torque para condição com lubrificação, valores intermediários para a condição com lubrificação seca (grafite) e maiores valores para condição sem lubrificação.

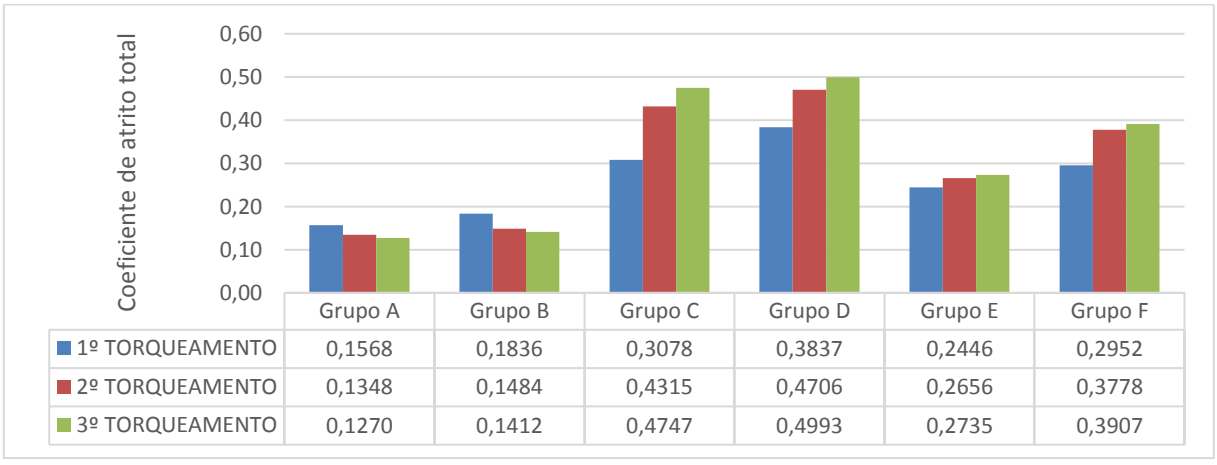
As considerações feitas no item 4.2 com relação as diferenças entre cada um dos torqueamentos podem ser replicadas para a análise do coeficiente de atrito, uma vez que este é inversamente proporcional a intensidade da pré-carga.

Analisando o valor do coeficiente de torque para o Grupo A no primeiro torqueamento o valor obtido foi de 0,2095, este valor pode ser validado se for comparado com o valor de 0,208 obtido em Shigley, Mischke e Budynas, (2005, p. 410 - 411) para um parafuso M12 x 1,25 com aplicação de valor médio de pré-carga de 34,18kN e desvio-padrão de 2,88 na condição com lubrificação, e também em Garcia (2008) é dado como referência o valor do coeficiente de torque variando de 0,10 até 0,20 em condições com lubrificação.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DO COEFICIENTE DE ATRITO TOTAL ENTRE OS GRUPOS

O Gráfico 24 foi elaborado a partir dos valores médios das pré-cargas definidas no Gráfico 19 no item 4.2 e os valores médios das dimensões dos parafusos, porcas e arruelas apresentadas na Tabela 8 definida no item 3.7.

Gráfico 24 – Comparativo do coeficiente de atrito total por grupo e por número de torqueamentos para um torque aplicado de 55Nm



	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F
1º TORQUEAMENTO	0,1568	0,1836	0,3078	0,3837	0,2446	0,2952
2º TORQUEAMENTO	0,1348	0,1484	0,4315	0,4706	0,2656	0,3778
3º TORQUEAMENTO	0,1270	0,1412	0,4747	0,4993	0,2735	0,3907

Fonte: Própria autoria

Analisando o Gráfico 24 é possível perceber uma semelhança com o Gráfico 23 com relação ao comportamento das variações de cada uma das colunas, isso acontece devido ao coeficiente de toque ser diretamente influenciado pelos coeficientes de atrito.

O coeficiente de atrito total obtido para o Grupo A para o 1º torqueamento é de 0,1568, este valor pode ser validado comparando-se com valor médio de 0,15 dado como referência em Shigley, Mischke e Budynas, (2005, p. 410) para condições com lubrificação, e também em Garcia (2008) é dado como referência o valor do coeficiente de atrito variando de 0,10 até 0,16 em condições com lubrificação.

O coeficiente de atrito total obtido para o Grupo C para o 1º torqueamento é de 0,3078, este valor pode ser validado comparando-se com valor médio de 0,35 dado como referência em ABNT (2008) para superfícies classe A, isto é, laminadas, limpas, isentas de óleos ou graxas, sem pintura, e para superfícies classe C, isto é, superfícies galvanizadas a quente com rugosidade aumentada manualmente por meio de escova de aço (não é permitido uso de máquinas).

5 CONCLUSÃO

Foram estipulados três objetivos para a realização deste trabalho, sendo que esses estão relacionado a análise de uma união parafusada quanto ao torque e a pré-carga. Neste capítulo serão demonstrados que todos os objetivos foram cumpridos e que também foram analisados os coeficientes de torque e de atrito para cada um dos grupos estudados.

A comparação entre o torque aplicado pela porca e o torque aplicado pelo parafuso comprova que o torque aplicado pela porca proporciona uma maior intensidade de pré-carga na junta parafusada do que o torque aplicado pelo parafuso. Analisando a síntese dos resultados apresentados no Gráfico 21 para o 1° torqueamento, percebe-se que a montagem:

- ✓ com lubrificação do Grupo A atingiu uma pré-carga 9,64% maior do que o Grupo B;
- ✓ sem lubrificação do Grupo C atingiu uma pré-carga 16,92% maior do que o Grupo D;
- ✓ com lubrificação seca (grafite) do Grupo E atingiu uma pré-carga 13,19% maior do que o Grupo F.

Portanto, aconselha-se que se aplique o torque pela porca sempre que for possível, desta forma será atingido um maior valor de pré-carga na junta parafusada o que aumentará a resistência ao afrouxamento e diminuirá o risco de falhas.

Com relação ao torque aplicado e ao torque dissipado durante a aplicação da pré-carga fica evidenciado que a condição de lubrificação tem influência direta na pré-carga e consequentemente no torque dissipado. Analisando a síntese dos resultados apresentados no Gráfico 20 para o 1° torqueamento, percebe-se que o torque:

- ✓ pela porca do Grupo A teve uma pré-carga 85,12% maior que o Grupo C e 49,46% maior que o Grupo E;
- ✓ pelo parafuso o Grupo B teve uma pré-carga 97,41% maior que o Grupo D e 54,30% maior que o Grupo F.

Portanto, quanto melhor for a condição de lubrificação maior será a intensidade da pré-carga gerada, pois menor parte do torque aplicado será dissipado pelo atrito. Desta forma aconselha-se verificar as condições de lubrificação do parafuso, porca e arruela antes de realizar a montagem da junta parafusada.

Analisando a síntese dos resultados apresentados no Gráfico 22, sobre a aplicação de sucessivos processos de torqueamento em um mesmo conjunto de parafuso, porca e arruela revelou uma situação interessante com relação a condição dos Grupos A e B (com lubrificação),

nestes dois grupos houve um aumento da intensidade da pré-carga no 2º e 3º torqueamento, sendo para o:

- ✓ Grupo A um aumento de 14,14% do 1º para o 2º torquemanto e um aumento de 5,29% do 2º para o 3º torqueamento;
- ✓ Grupo B um aumento de 20,72% do 1º para o 2º torquemanto e um aumento de 4,44% do 2º para o 3º torqueamento.

Essa situação é positiva uma vez que o aumento da pré-carga diminui o risco de falhas, como já foi citado anteriormente.

Para os demais grupos percebe-se na síntese dos resultados do Gráfico 22 que não houve uma situação favorável ao aumento da pré-carga, mas acabou por haver uma diminuição da mesma no 2° e 3° torqueamento.

Os valores de coeficiente de torque podem ser analisados na síntese dos resultados apresentados no Gráfico 23. É importante ressaltar que a condição de coeficiente de torque igual a 0,21 normalmente apresentada em literaturas sobre parafusos foi válida para a condição do Grupo A.

Os valores de coeficiente de atrito podem ser analisados na síntese dos resultados apresentados no Gráfico 24. E como o coeficiente de atrito é relacionado ao coeficiente de torque, tem-se que o valor de coeficiente de atrito igual a 0,16 normalmente apresentado em literaturas de parafuso também ocorreu na condição do Grupo A.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho seria viável um sistema de aquisição de torque dissipado no atrito entre a superfície de contato da porca e da arruela ou entre a superfície de contato da cabeça do parafuso e da arruela para que fosse possível determinar o coeficiente de atrito dissipado entre essas partes. Desta forma seria possível determinar além do coeficiente de atrito total, o coeficiente de atrito entre as superfícies de contato da porca ou parafuso e a arruela e por fim o coeficiente de atrito da rosca.

Outra possível continuidade é a verificação das condições de sucessivos torqueamentos na condição com lubrificação, uma vez que se verificou um aumento na intensidade da pré-carga na junta parafusada. No entanto, se faz necessário estudos futuros para análise da vida em fadiga e assim verificar se sucessivos torqueamentos terão influência positiva para o aumento da vida em fadiga da junta.

REFERÊNCIAS

ACELORMITTAL. **Guia do aço:** aços longos. Disponível em: http://brasil.arcelormittal.com.br/produtos/nossos-produtos. Acesso em: 15 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aços e de estruturas mista de aço e concreto de edificios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237p.

BEER, Fernand P.; JOHNSTON JÚNIOR, E. Russel; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BELENUS. **Parafusos e porcas.** Disponível em: http://www.belenus.com.br/old/catalogos/catalogo_fixadores.pdf. Acesso em: 15 set. 2017.

CISER PARAFUSOS E PORCAS. **Catálogo de produtos.** Disponível em: http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/destaques/br/catalogo-geral-de-produtos.pdf. Acesso em: 15 set. 2017.

CORIA, Ibai et al. A new methodology for the optimization of bolt tightening sequences for ring type joints. **Ocean Engineering,** Elmsford, v. 129, p. 441-450, nov. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801816304930. Acesso em: 23 jun 2017.

DALLY, James W.; RILEY, Willian F. **Experimental stress analysis.** 3 ed. New York: Mcgraw-hill, 1991.

ESMAEILI, F. et al. Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria. **Materials and Design,** Surrey, v.67, p. 583-595, nov. 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science /article/pii/S0261306914008826?via%3Dihub. Acesso em: 23 jun 2017.

GARCIA, Roberto. **Conceitos gerais sobre torque e processos de torque.** Disponível em: http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=204. Acesso em: 15 dez. 2018.

GEDORE. **Torquímetros e acessórios.** Disponível em: http://catalogo.gedore.com.br/produtos/torquimetros-e-acessorios. Acesso em: 15 set. 2017.

GRANTE - GRUPO DE ANÁLISE E PROJETO MECÂNICO (Santa Catarina). Universidade Federal de Santa Catarina. **Apostila de Extensometria.** 2004. Disponível em: <http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HENDRY, A.W. **Elements of experimental stress analysis.** Edinburgh: Pergamon, 1977.

HUO, Linsheng et al. Impedance based bolt pre-load monitoring using piezoceramic smart washer. **Smart Materials And Structures,** New York, v. 26, n.5, p. 1-7, mar. 2017. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aa6a8e. Acesso em: 23 jun 2017.

JIMÉNEZ-PEÑA, Carlos et al. Investigations on the fretting fatigue failure mechanism of bolted joints in high strength steel subjected to different levels of pre-tension. **Tribology International,** Surrey, v. 108, p. 128-140. 13 nov. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X16304303. Acesso em: 23 jun 2017.

LIU, Fengrui et al. An analytical joint stiffness model for load transfer analysis in highly torqued multi-bolt composite joints with clearances. **Composite Structures,** Oxford, v. 131, p. 625-636, jun. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315004663. Acesso em: 23 jun 2017.

LIU, Jianhua et al. Experimental and numerical studies of bolted joints subjected to axial excitation. **wear.** Laussanne, v. 346-347, p. 66-77, nov. 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164815004536. Acesso em Acesso em: 23 jun 2017.

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

MURTHY, H; VADIVUCHEZHIAN, K. Estimation of friction distribution in partial-slip contacts from reciprocating full-sliding tests. **Tribology International,** Surrey, v. 108, p. 164-173, abr. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X16303152. Acesso em: 23 jun 2017.

OLIVEIRA, João Alberto. **Modelagem e análise de estruturas com junta aparafusada:** análise teórica e experimental. 2002. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

PANAMBRA (Org.). **Extensometria:** strain gages marca Kyowa. Disponível em: http://www.panambra.com/produto/Strain-Gages---Uso-Geral---Serie-KFG. Acesso em: 13 jun. 2018.

PEREIRA, Celso Pinto Morais. **Mecânica dos materiais avançada.** Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 432 p.

RAKIćEVIć, Branislav et al. Failure analysis of bolted joint for the column of an aerial platform. **Tehnicki Vjesnik:** technical gazette, v. 23, n. 5, p. 1301-1306, maio 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309528556_Failure_analysis_of_bolted_joint_for_the_column_of_an_aerial_platform. Acesso em: 23 jun 2017.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica.** 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.

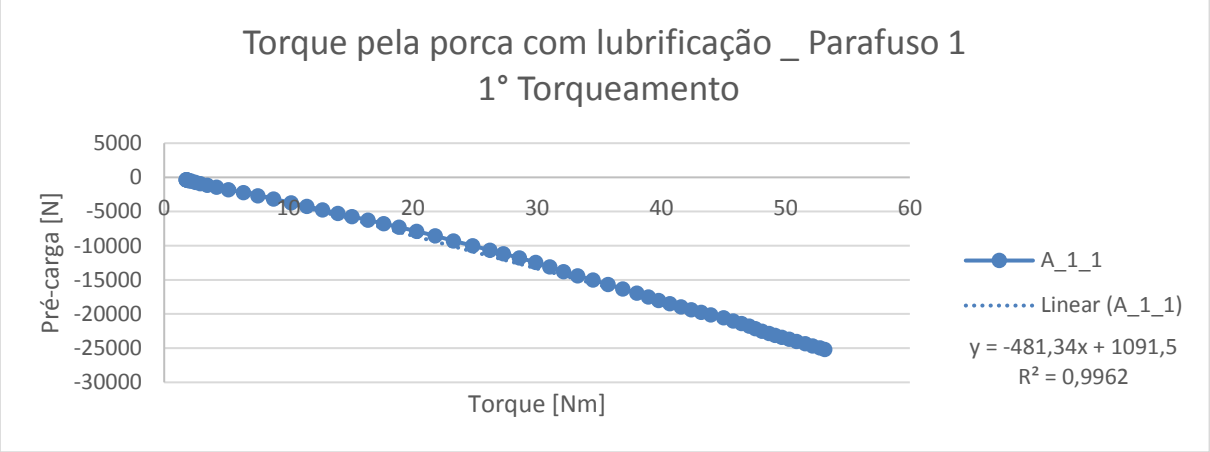
SKIDMORE-WILHELM. **Bolt testers.** Disponível em: https://www.skidmore-wilhelm.com/collections/bolt-testers. Acesso em: 18 nov. 2018.

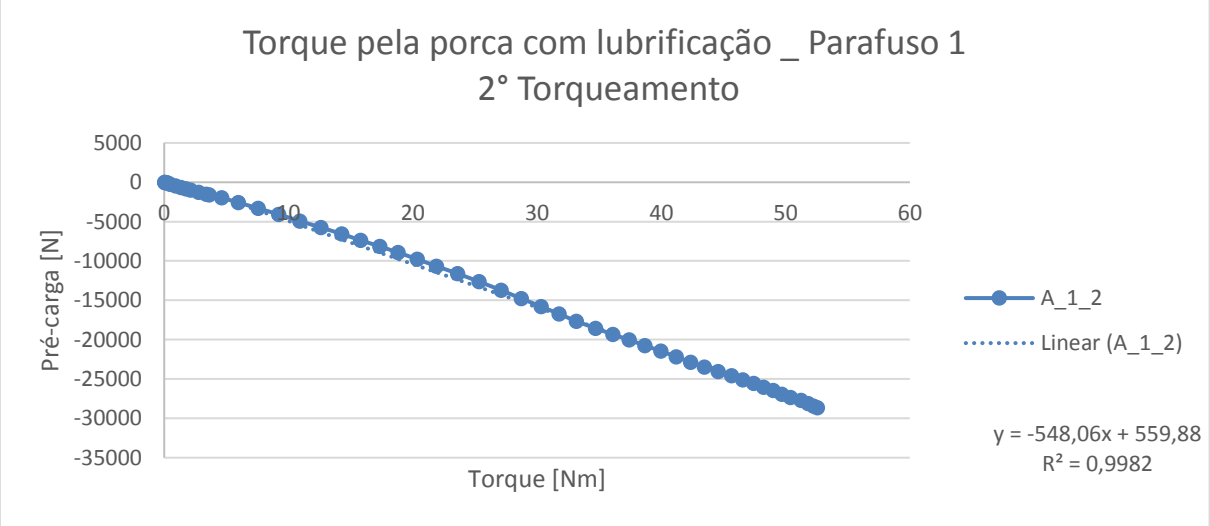
YUN, Q. M.; ZHOU, H. L. Finite element study on pre-tightening proces of threaded connection and failure analysis for pressure vessel. **Procedia Engineering,** v. 130, p. 1385-1396, dez. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815041910. Acesso em: 23 jun 2017.

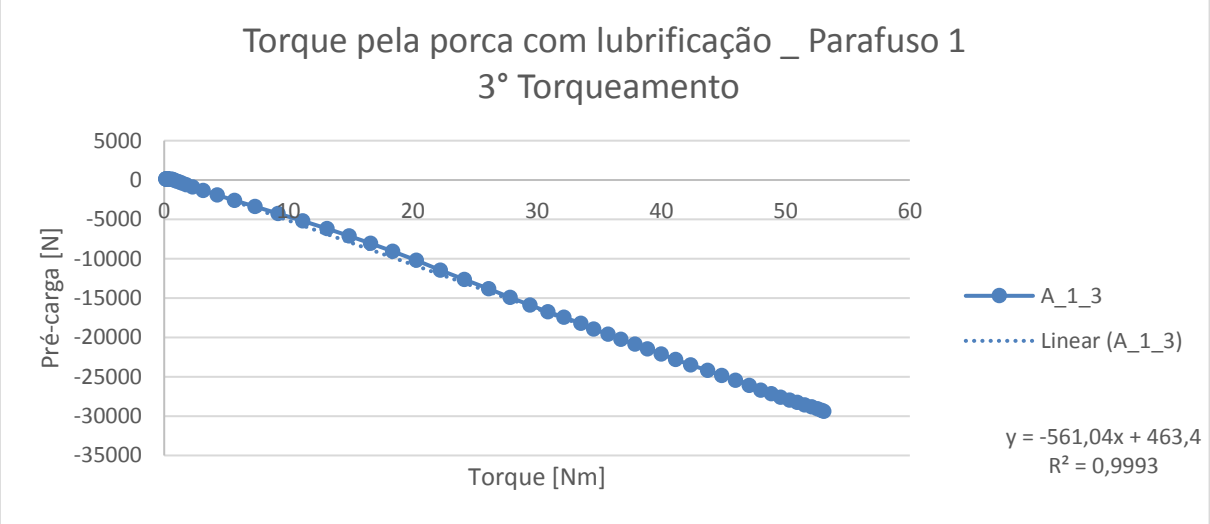
ZHOU, Yinhua et al. A three dimensional implicit finite element damage model and its application to single-lap multi-bolt composite joints with variable clearance. **Composite Structures**, Oxford, v. 131, p. 1060-1072, jul. 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315005371. Acesso em: 23 jun 2017.

APÊNDICE A – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo A (Torque pela porca com lubrificação)

(continua)

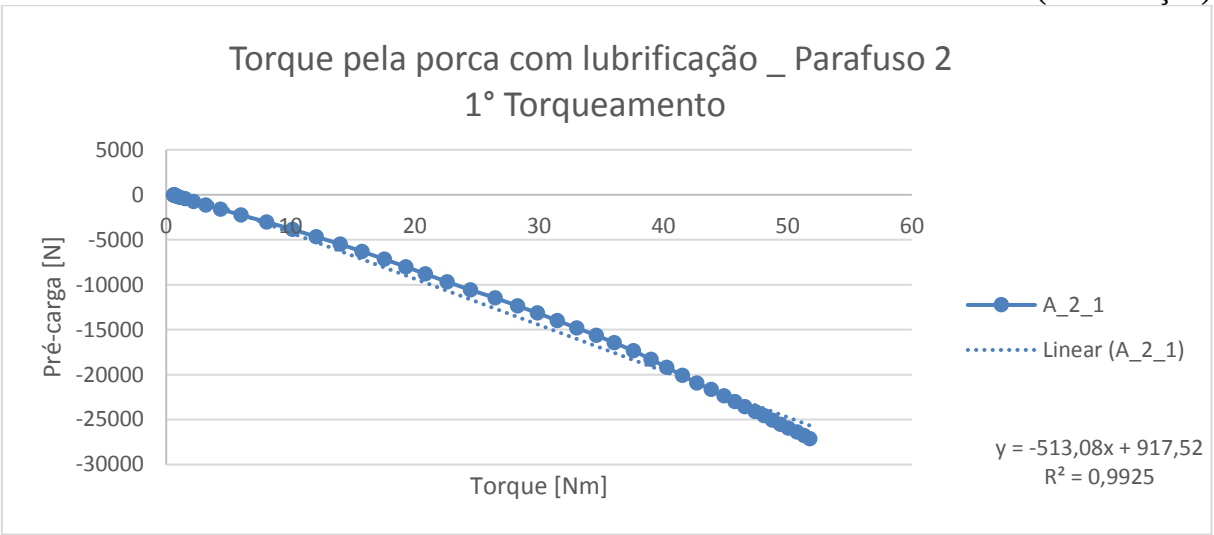


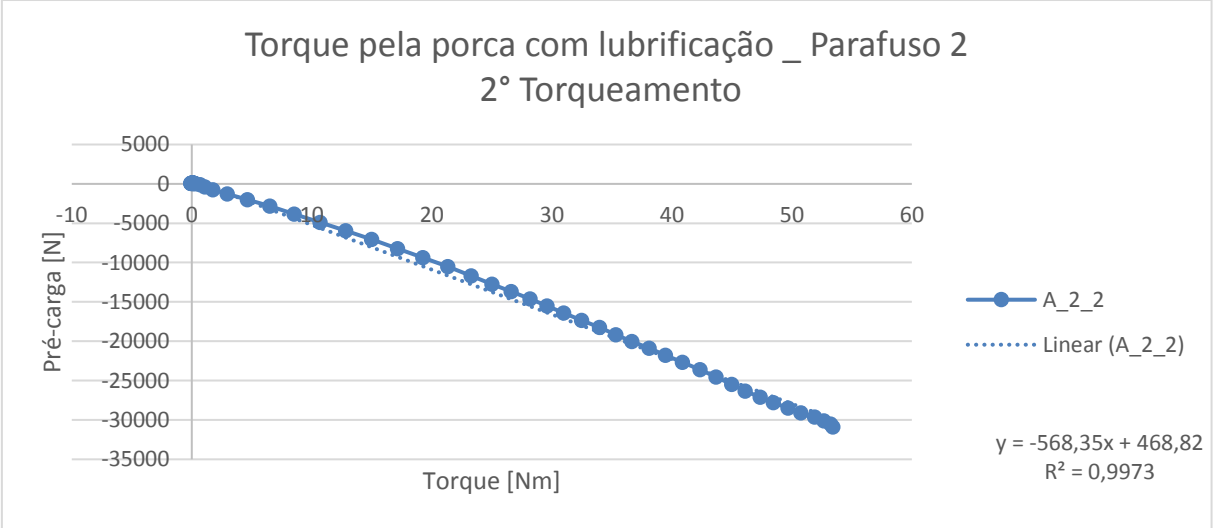


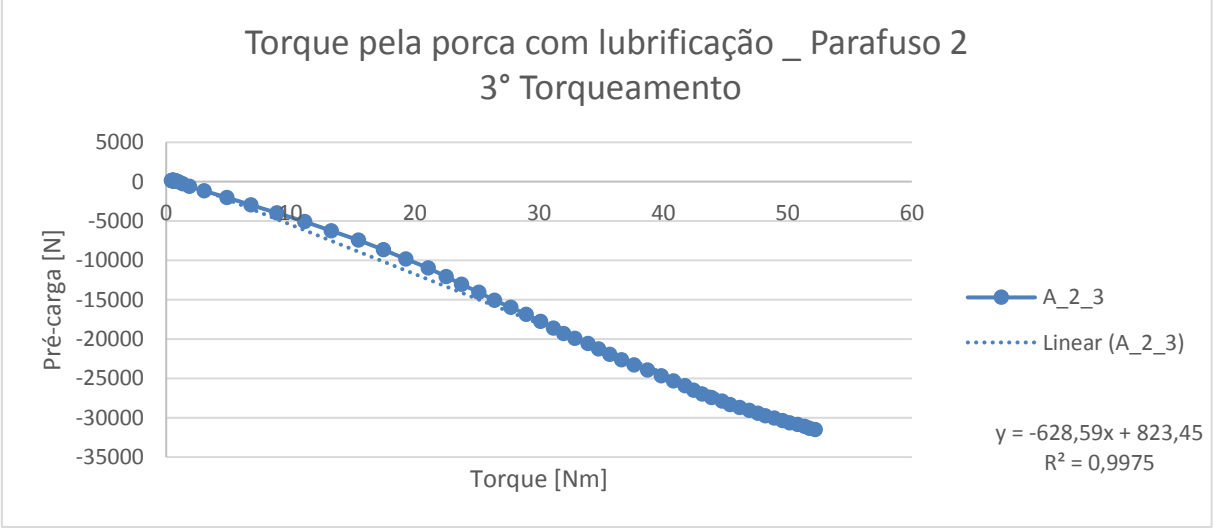


APÊNDICE B – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo A
(Torque pela porca com lubrificação)

(continuação)

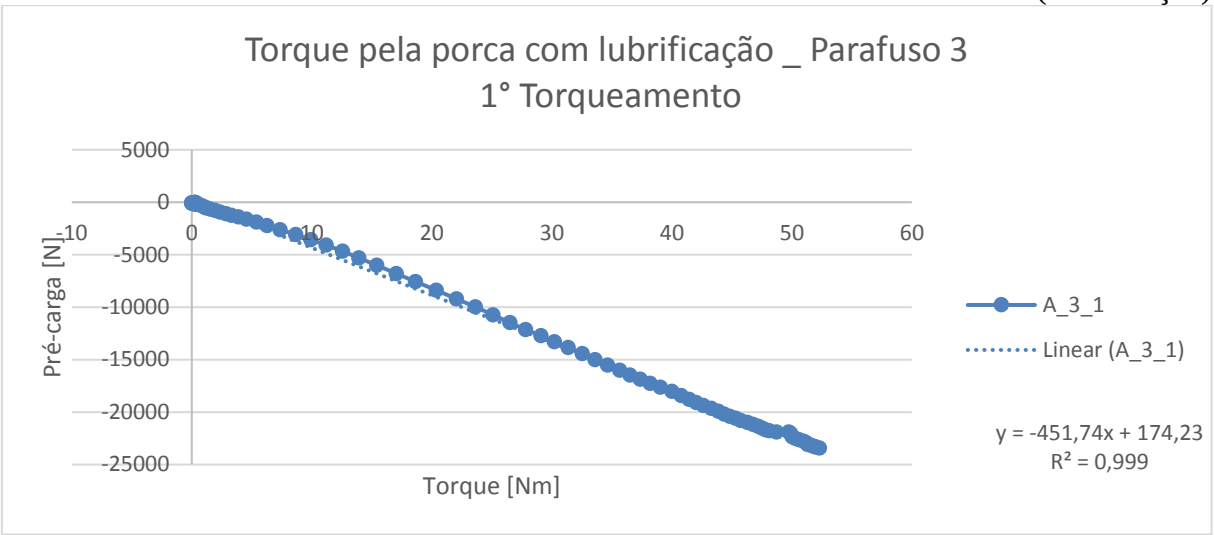


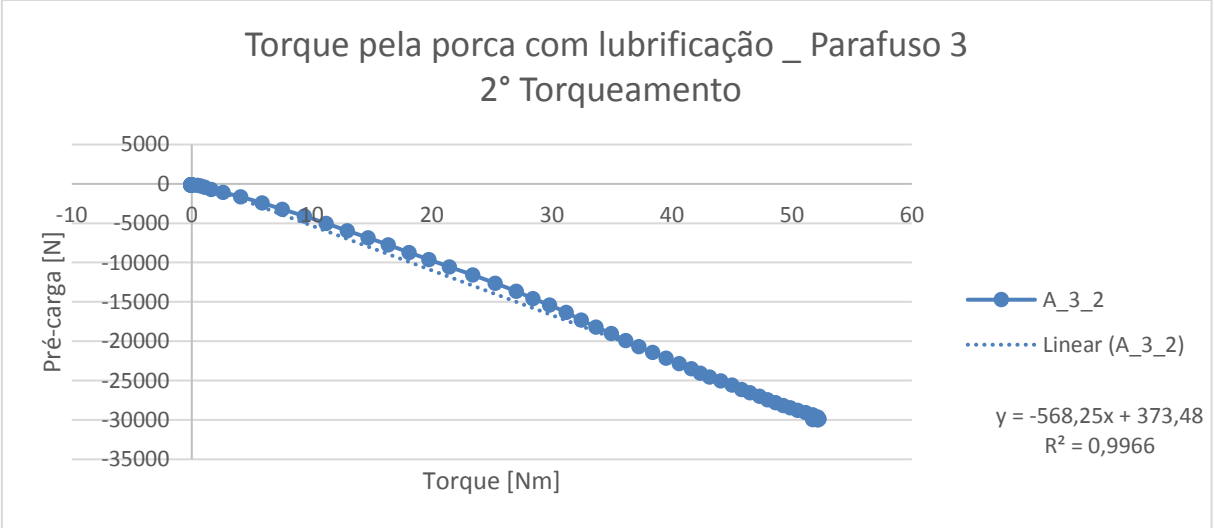


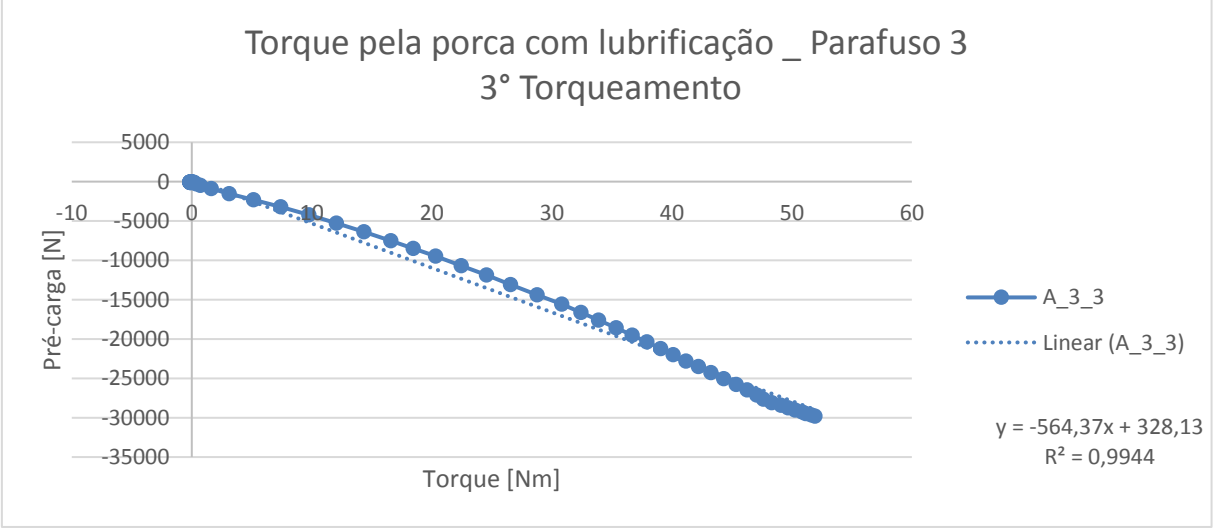


APÊNDICE C – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo A
(Torque pela porca com lubrificação)

(continuação)

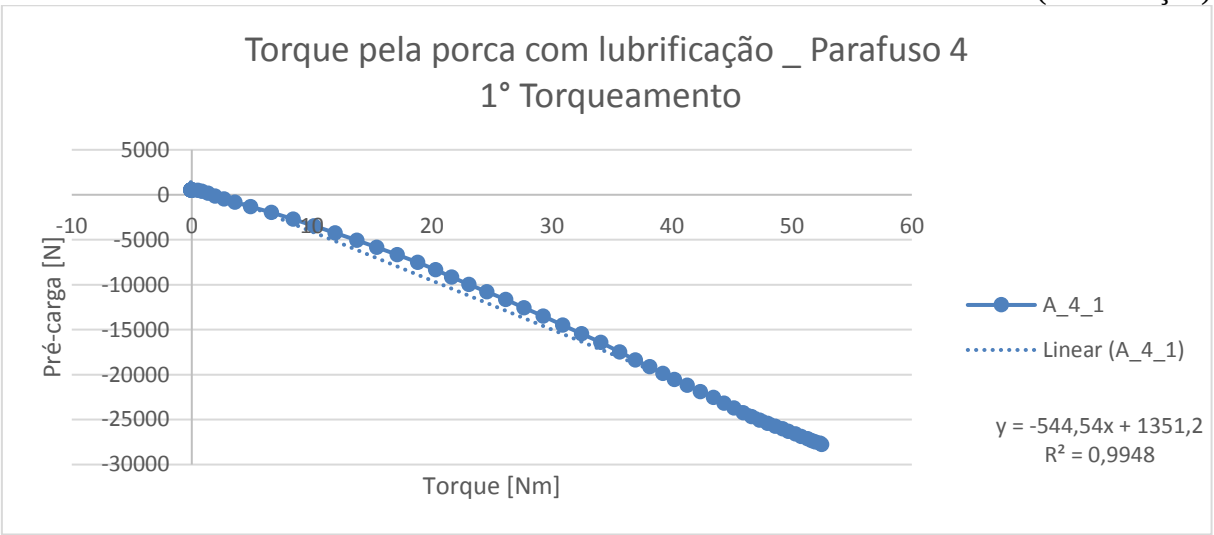


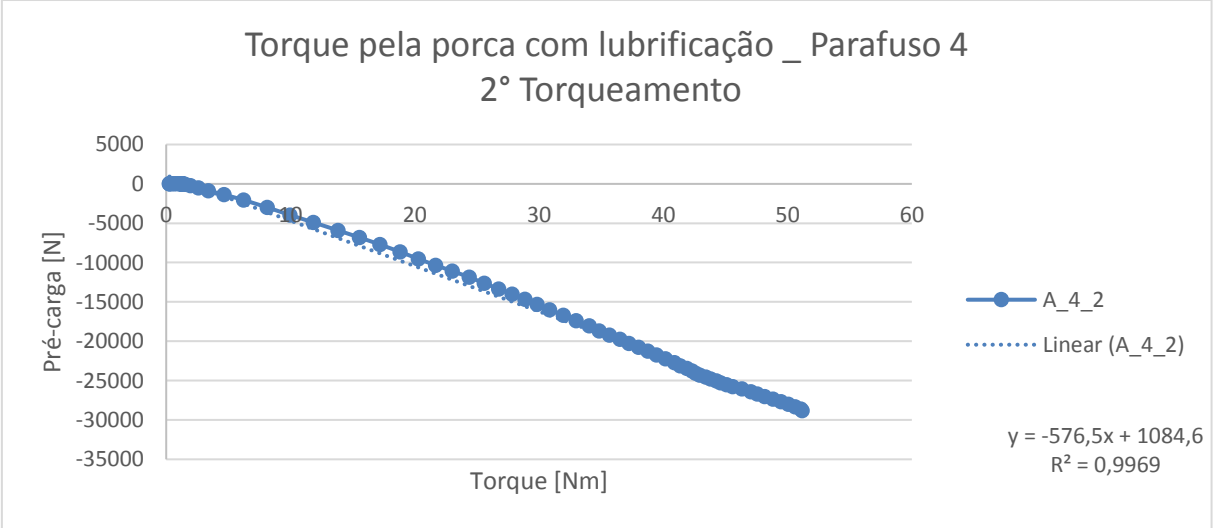


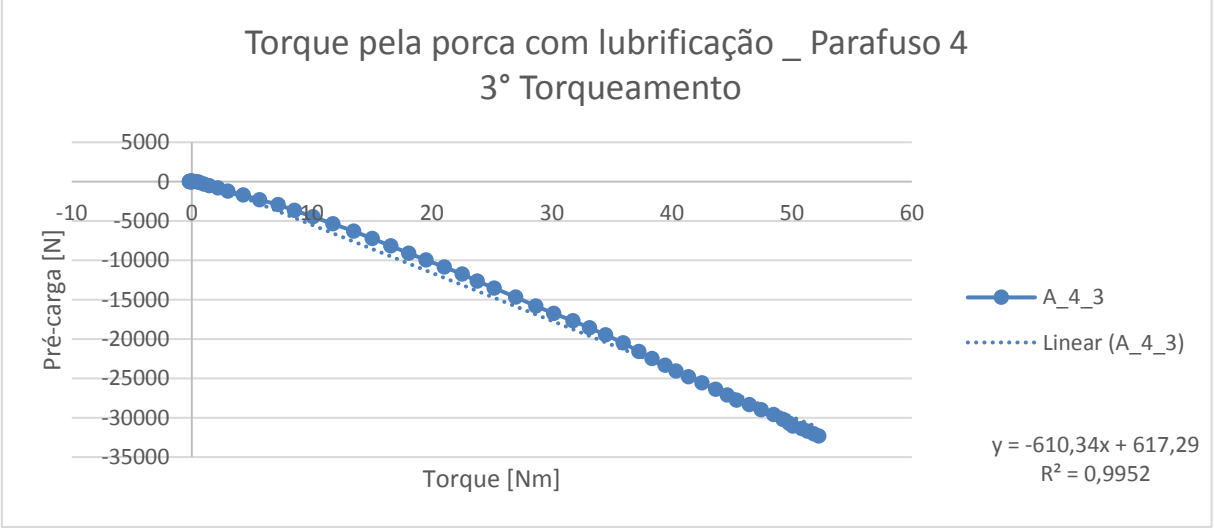


APÊNDICE D – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo A (Torque pela porca com lubrificação)

(continuação)

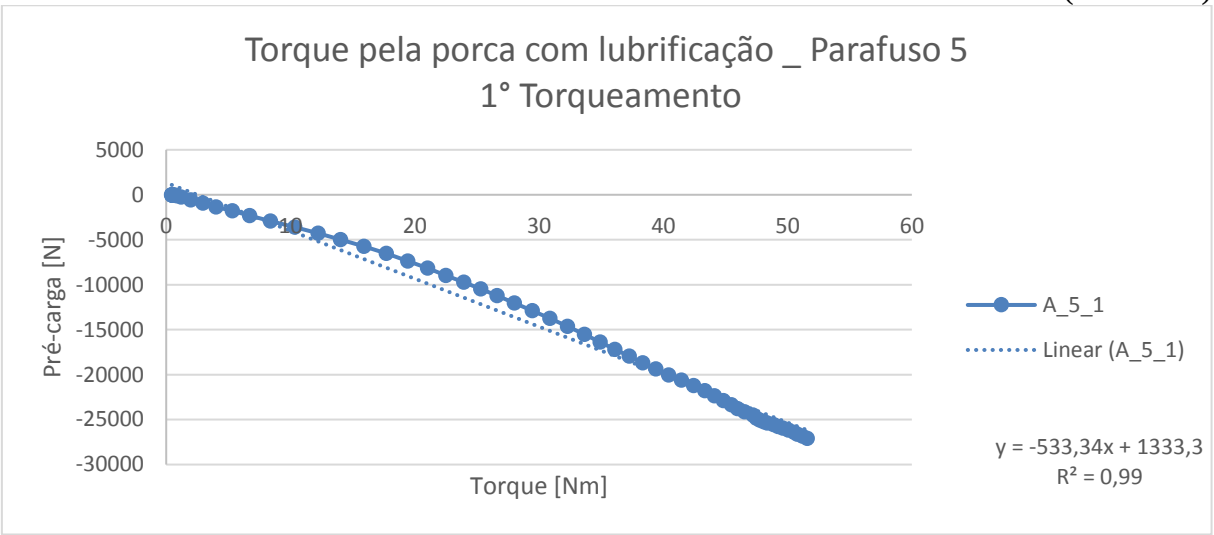


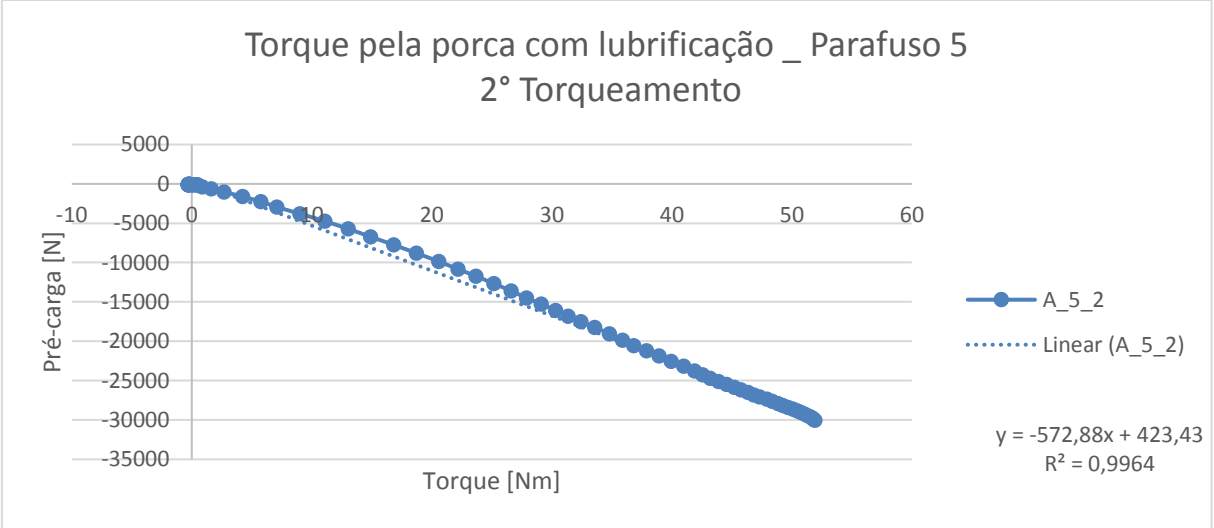


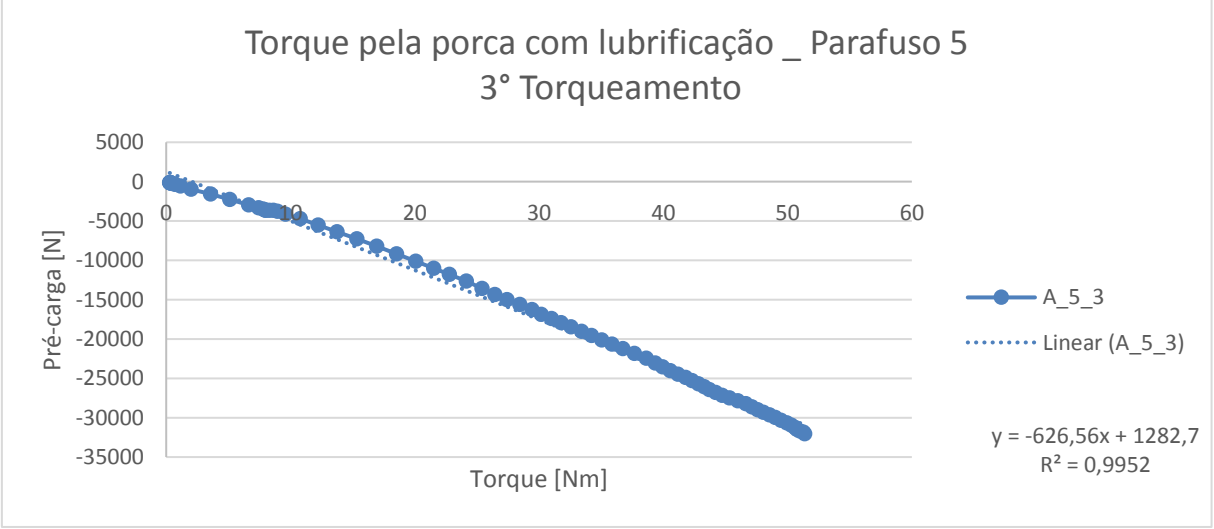


APÊNDICE E – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo A (Torque pela porca com lubrificação)

(conclusão)

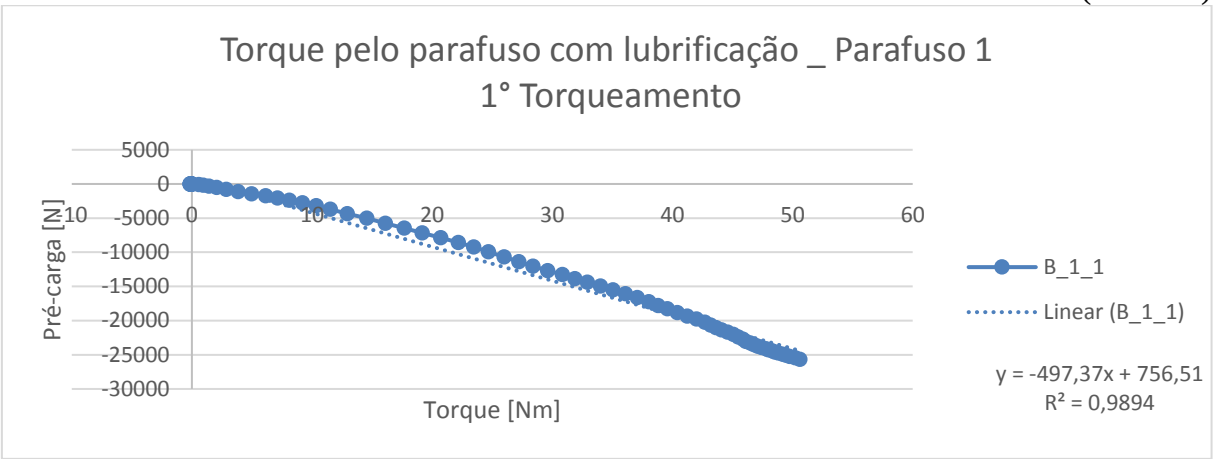


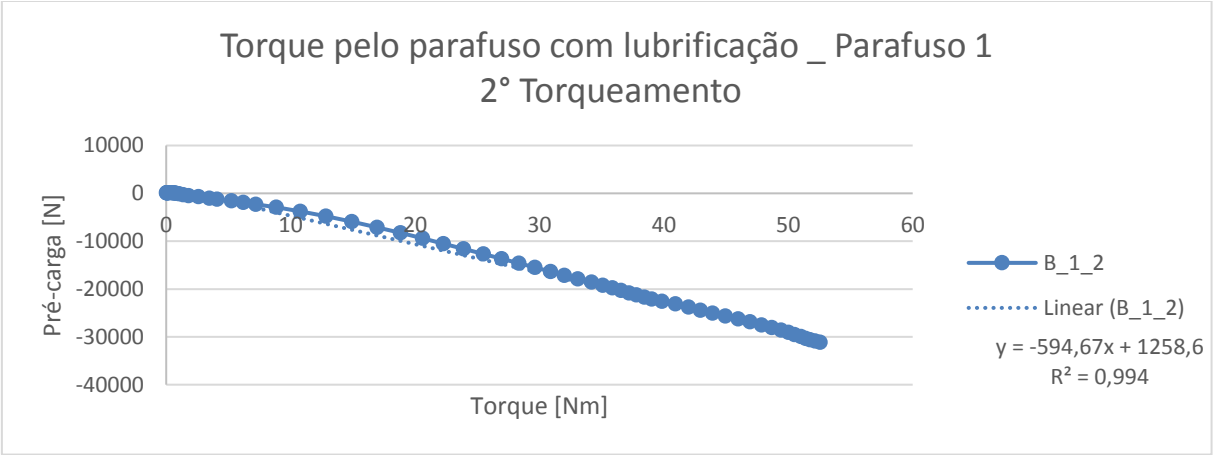


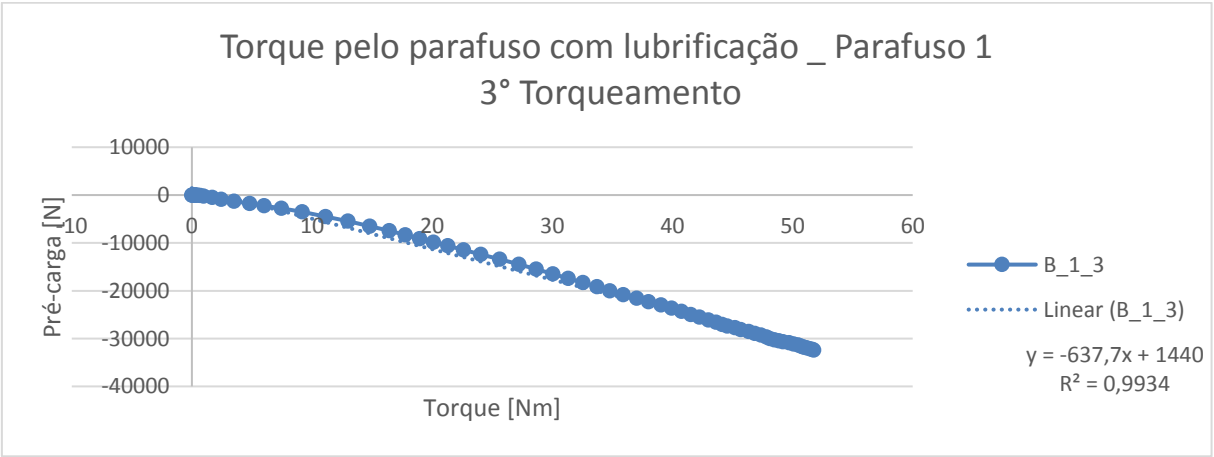


APÊNDICE F – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo B (Torque pelo parafuso com lubrificação)

(continua)

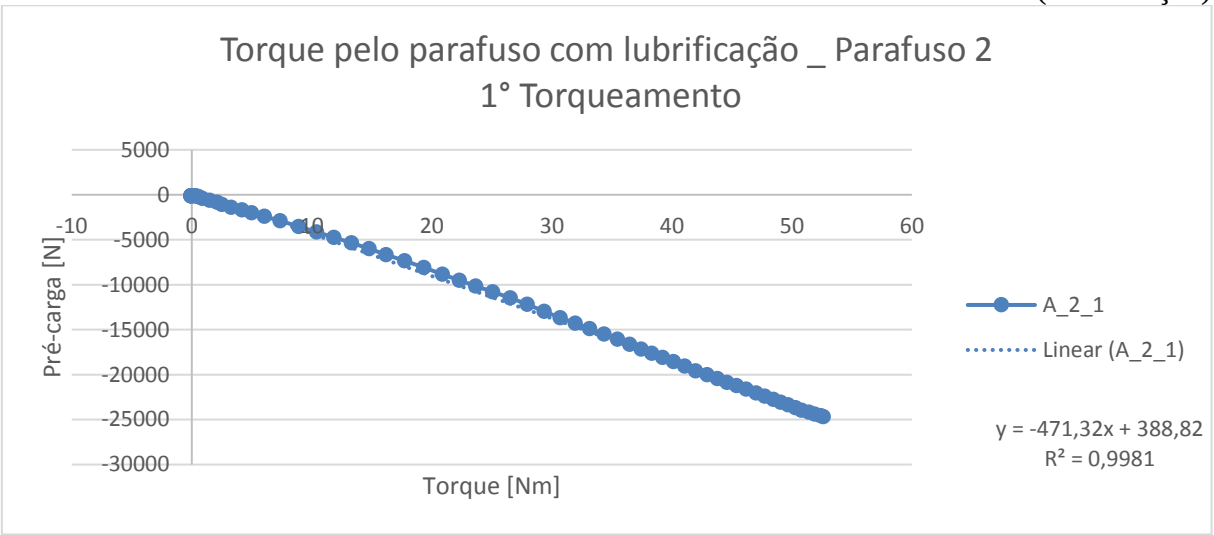


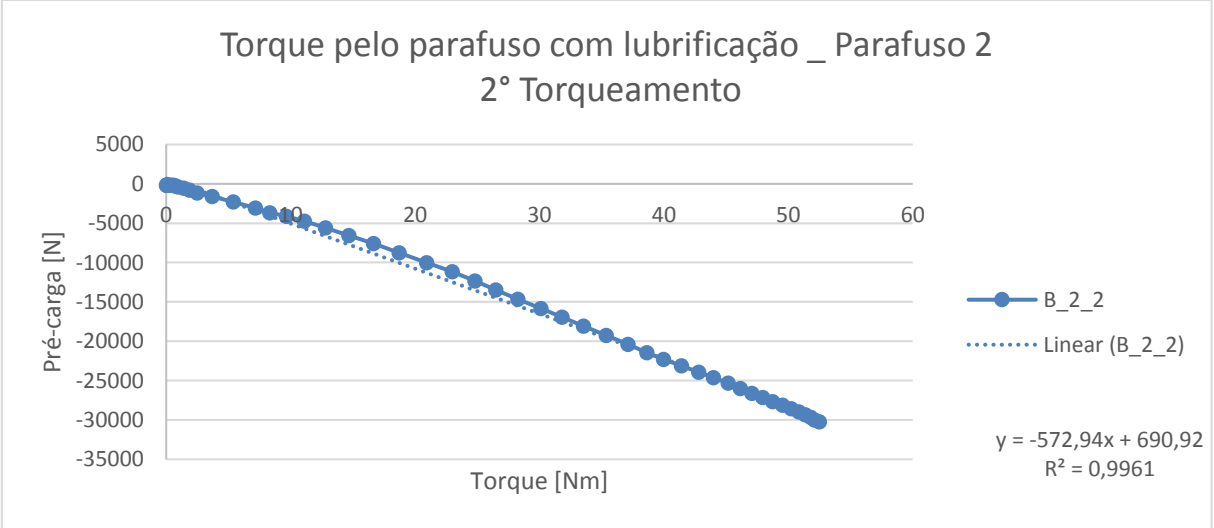


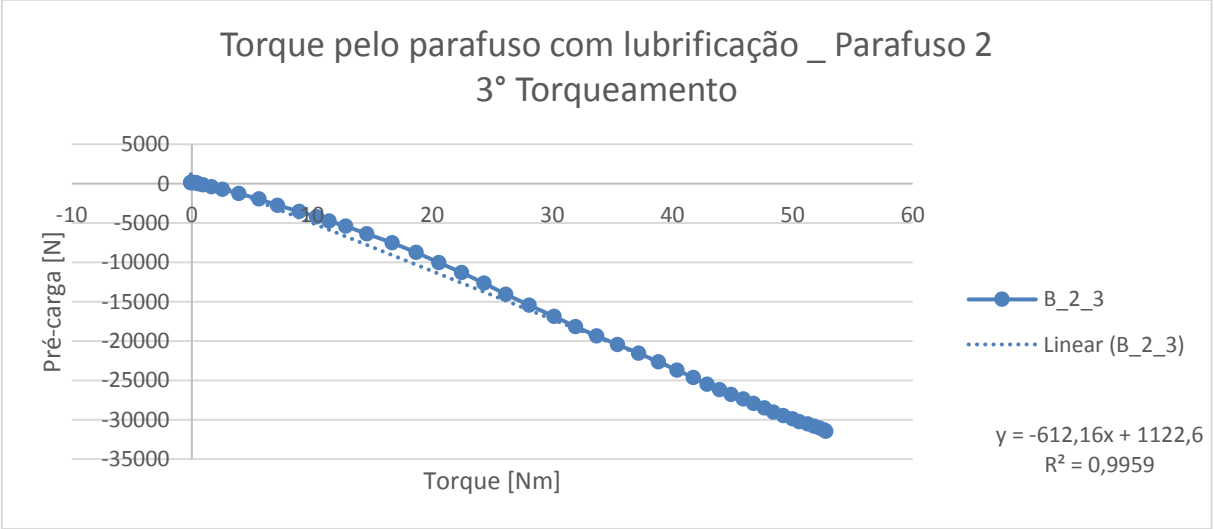


APÊNDICE G – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo B
(Torque pelo parafuso com lubrificação)

(continuação)

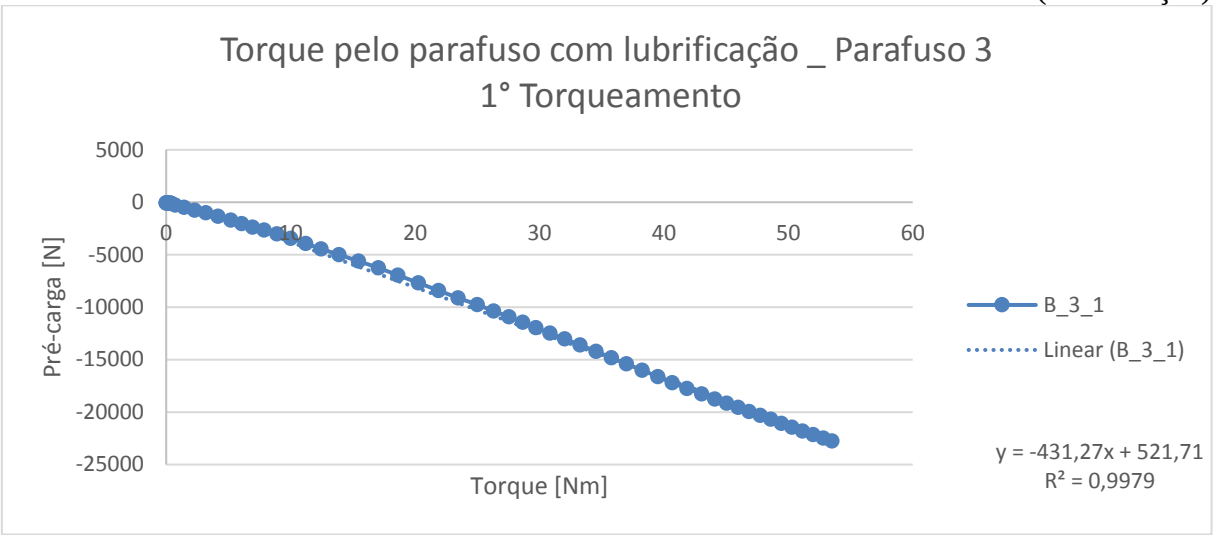


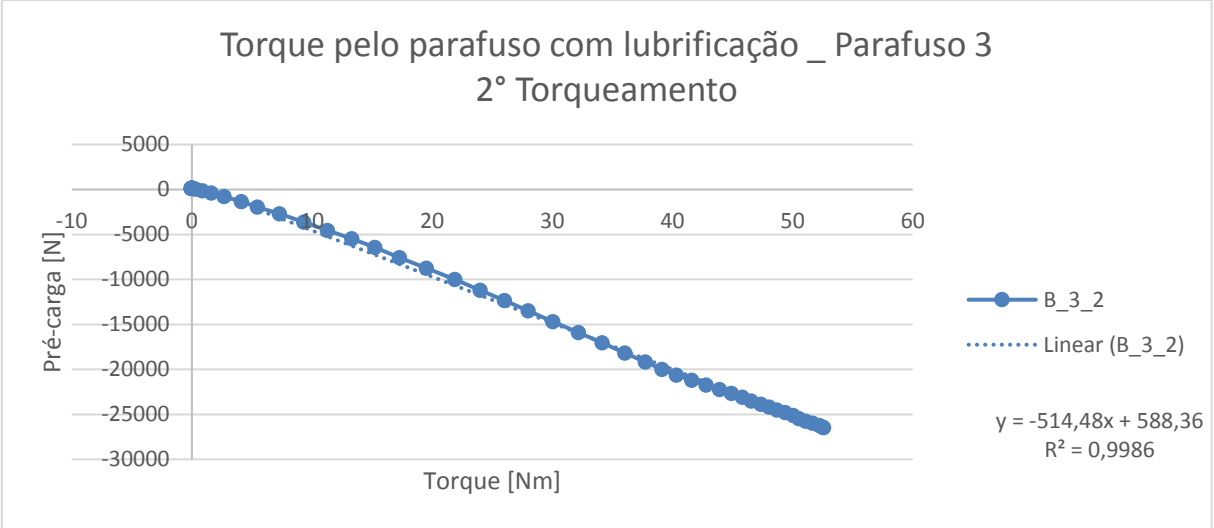


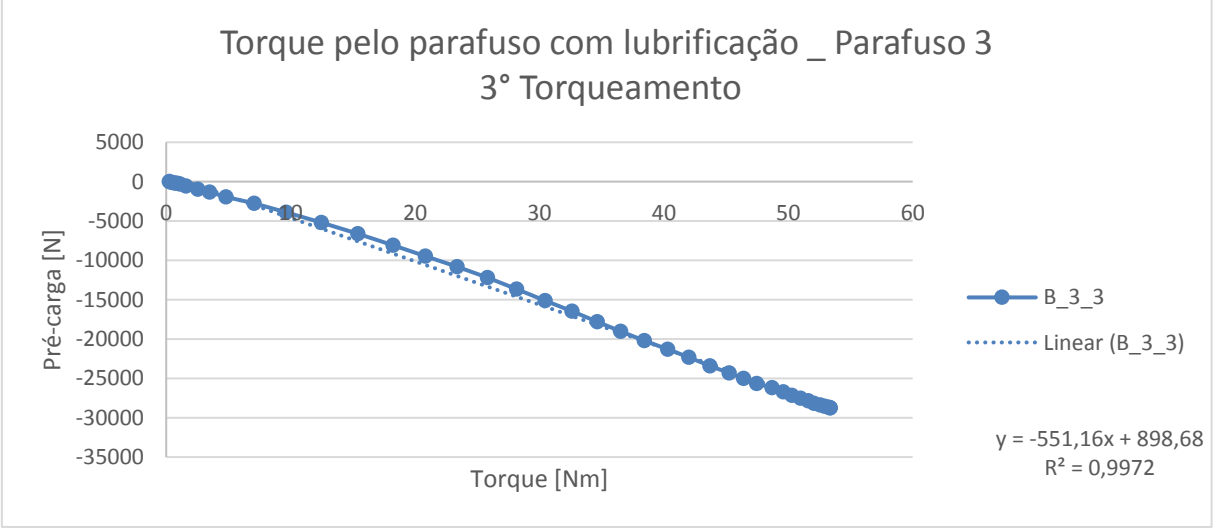


APÊNDICE H – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo B
(Torque pelo parafuso com lubrificação)

(continuação)

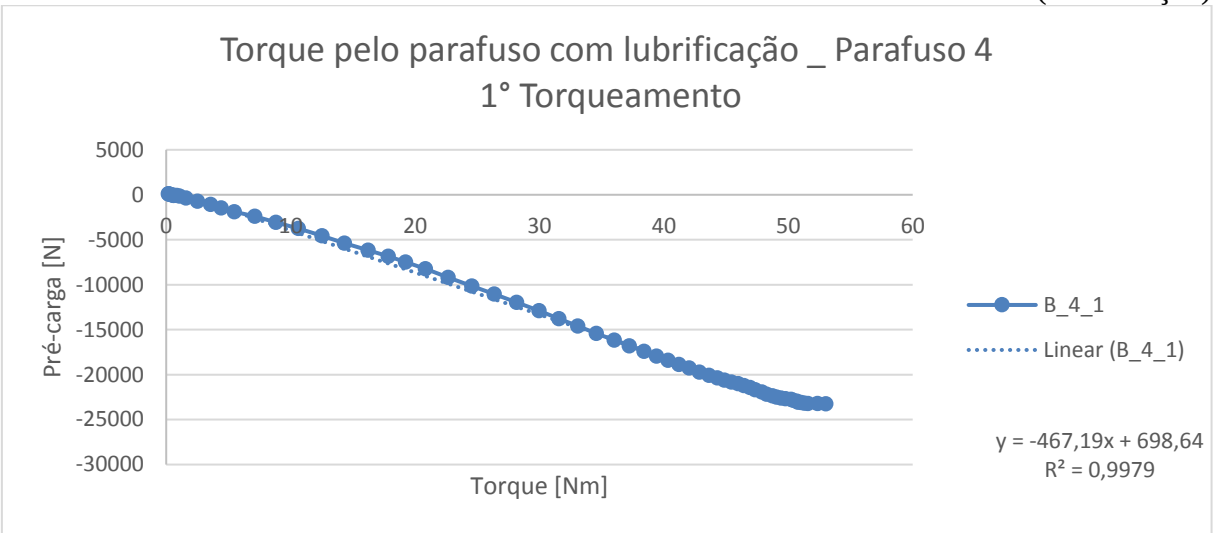


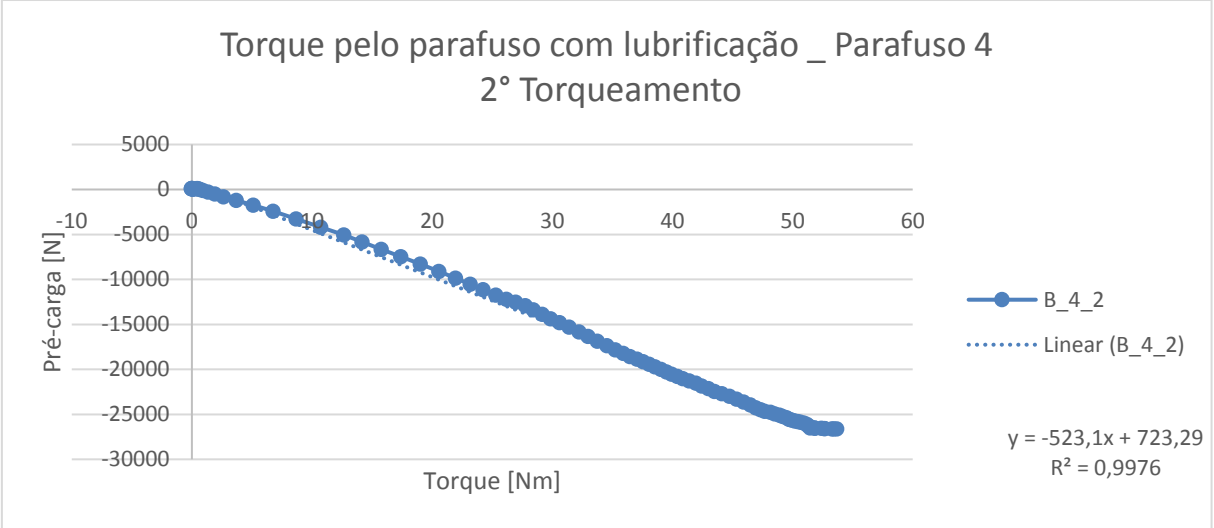


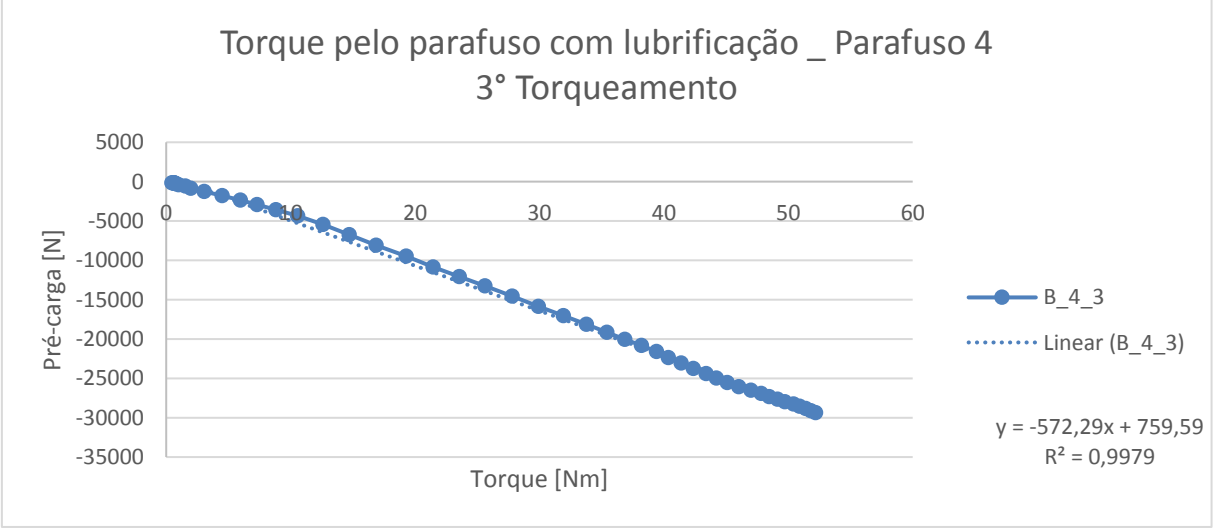


APÊNDICE I – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo B
(Torque pelo parafuso com lubrificação)

(continuação)

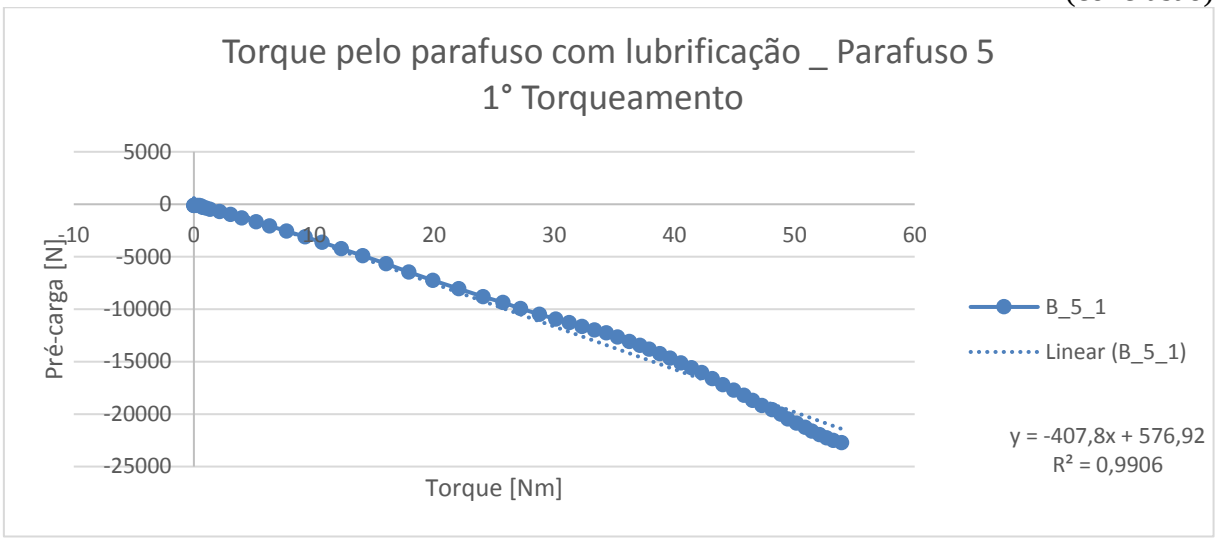


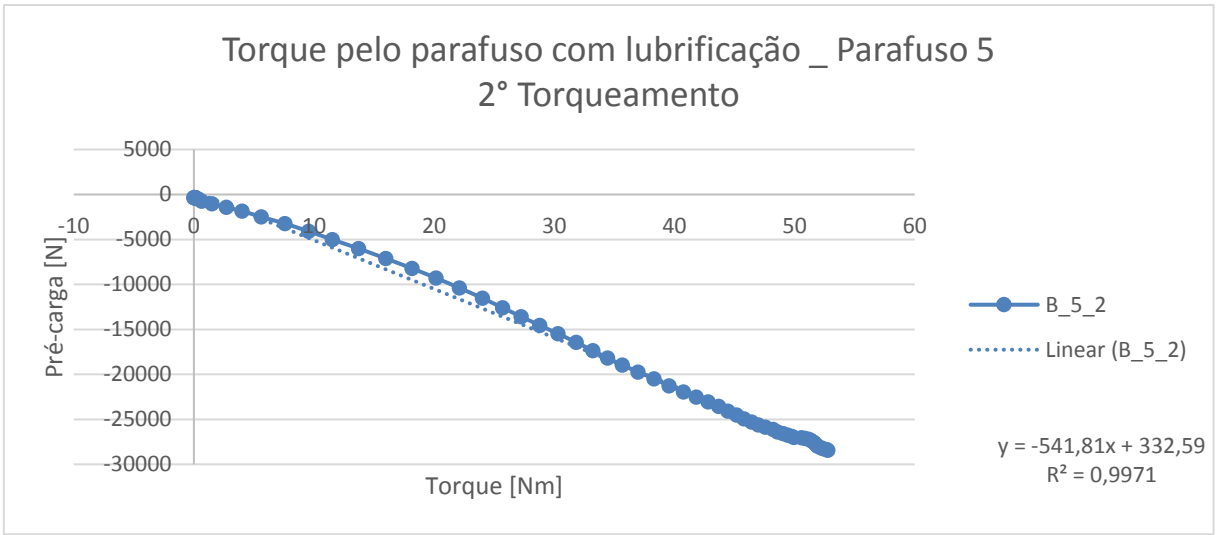


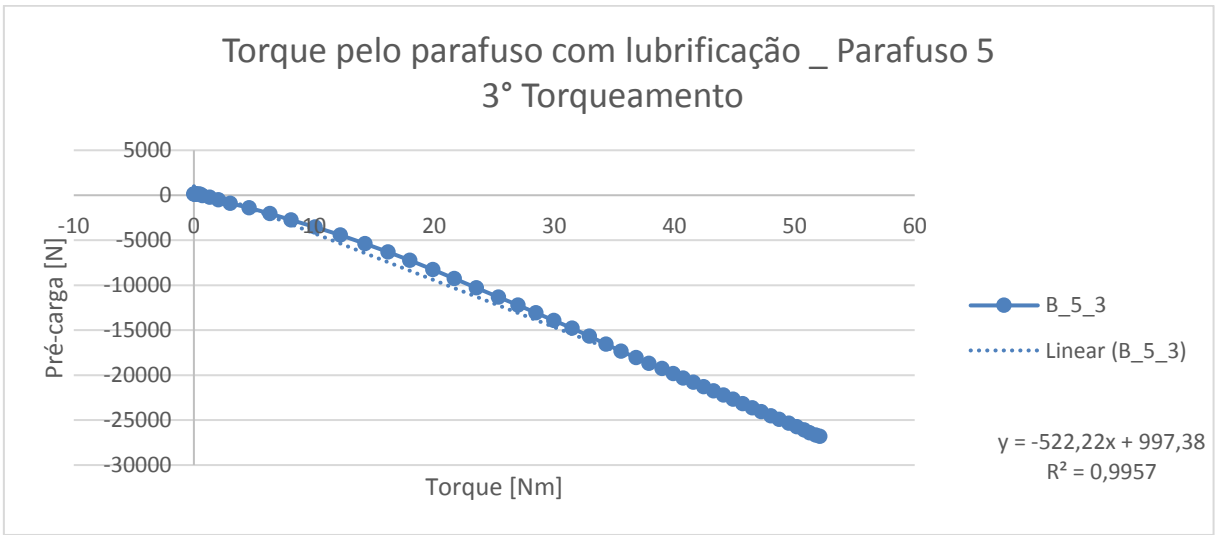


APÊNDICE J – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo B
(Torque pelo parafuso com lubrificação)

(conclusão)

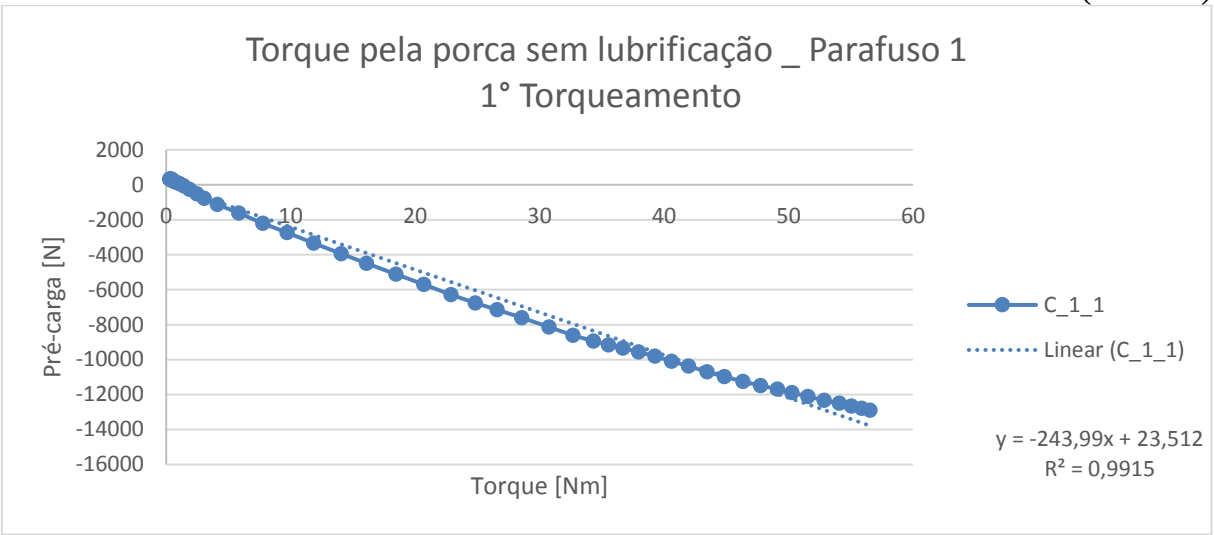


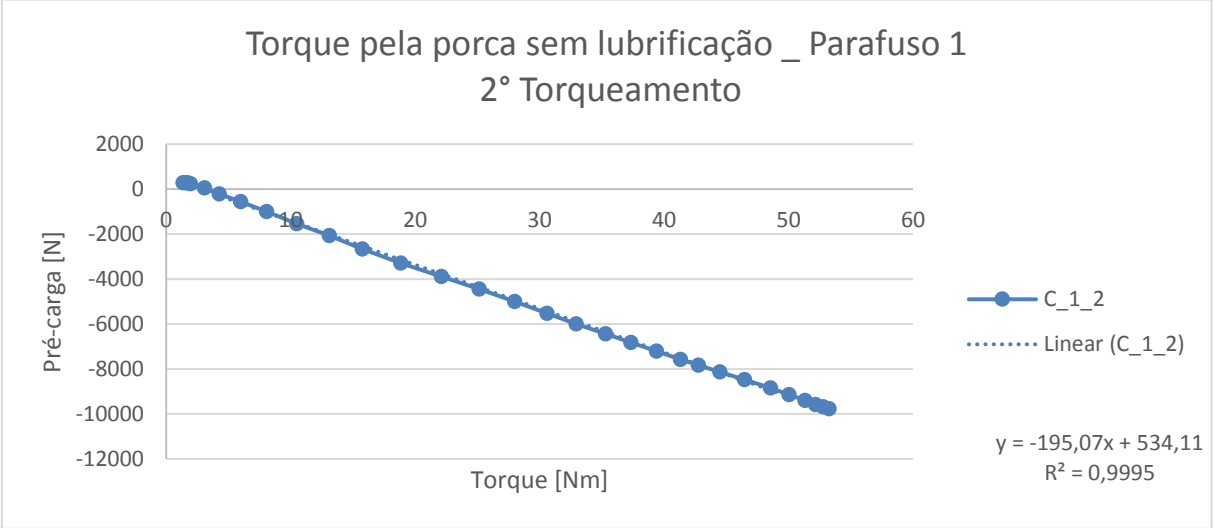


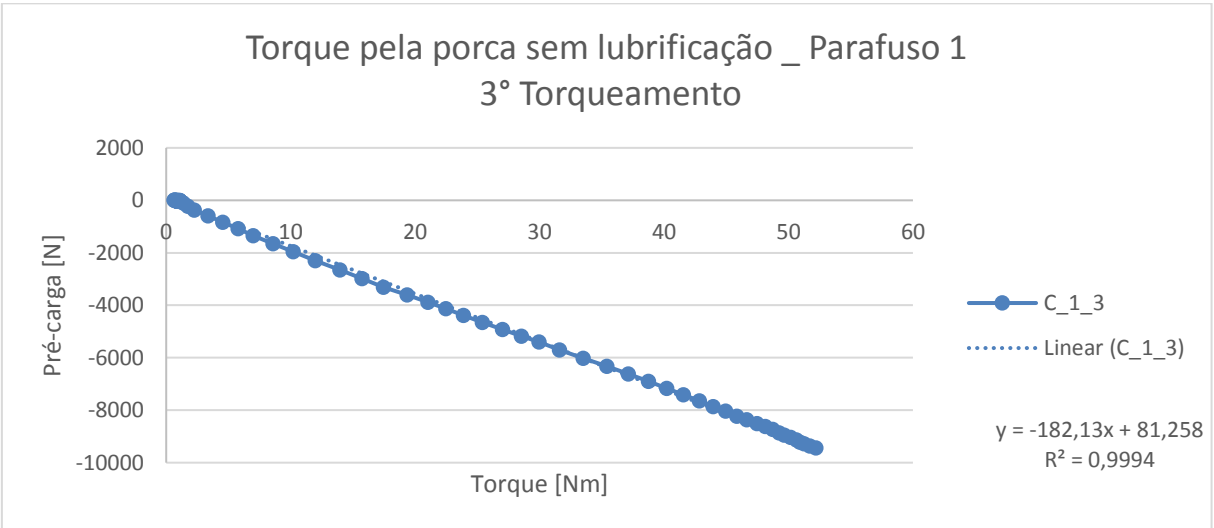


APÊNDICE K – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo C (Torque pela porca sem lubrificação)

(continua)

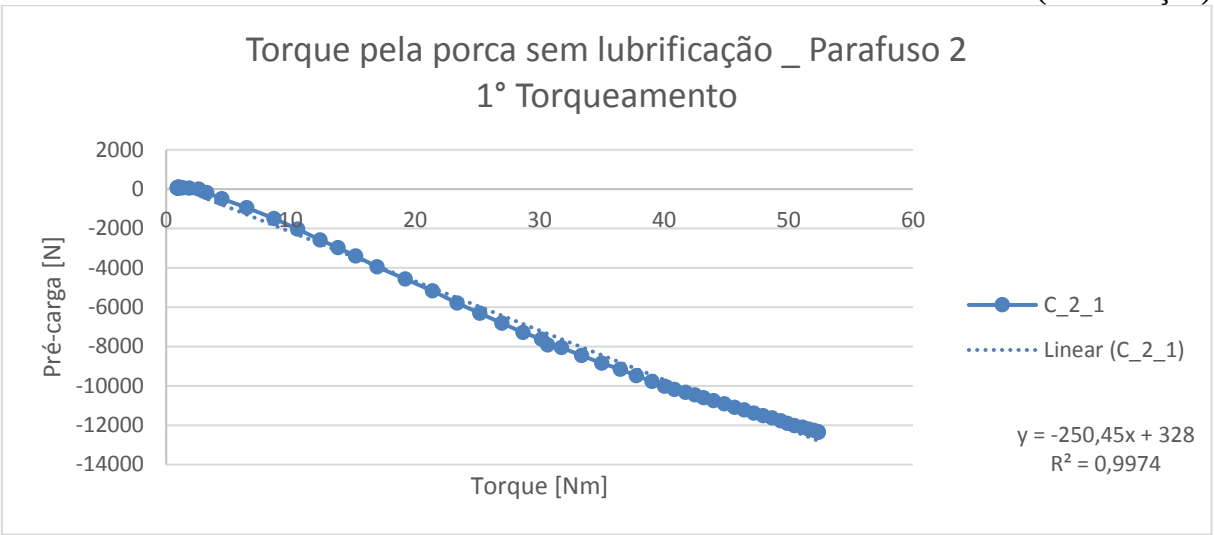


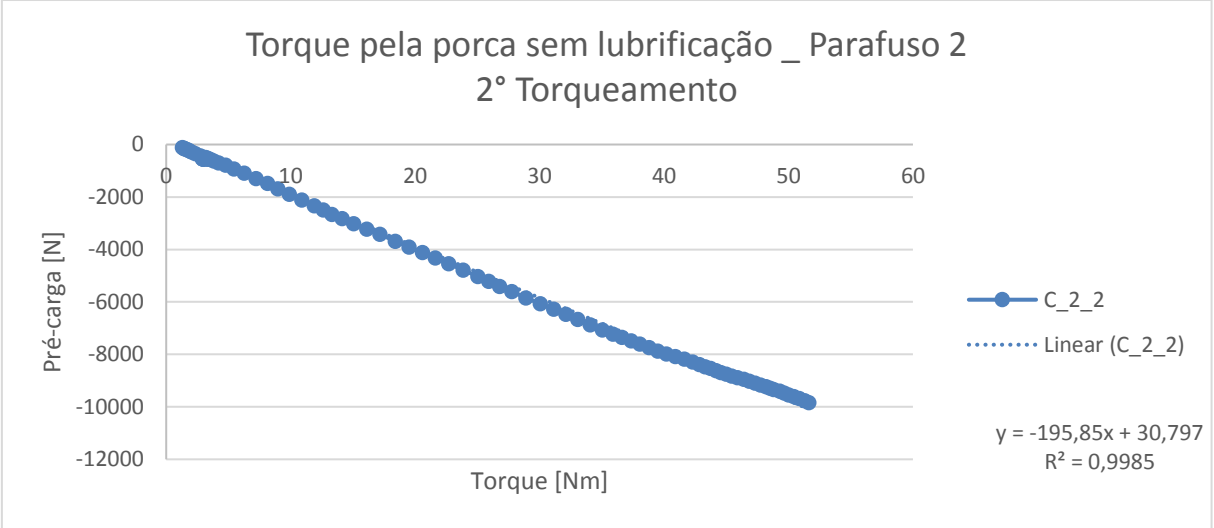


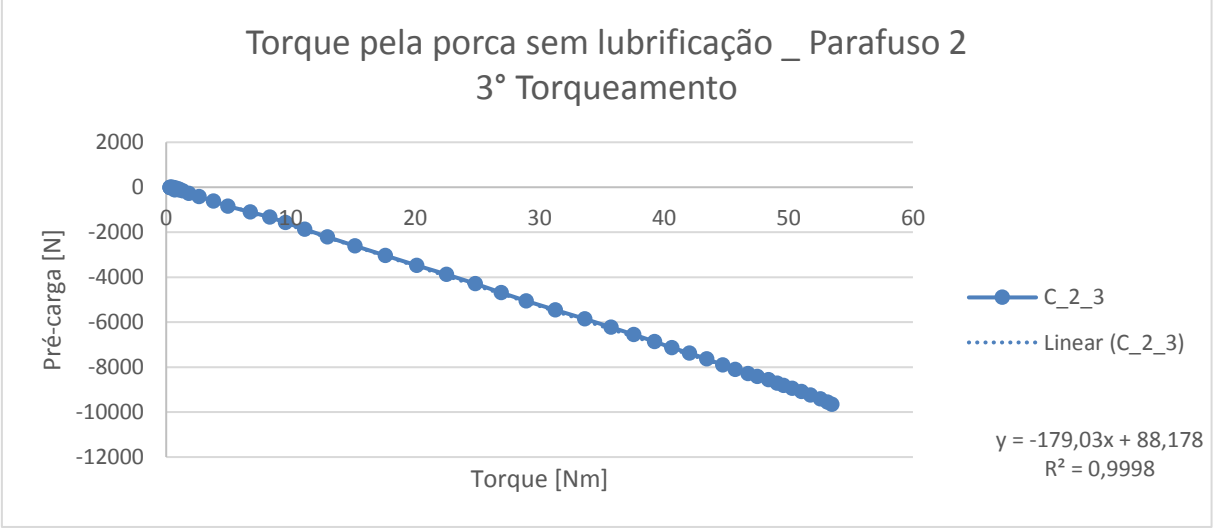


APÊNDICE L – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo C (Torque pela porca sem lubrificação)

(continuação)

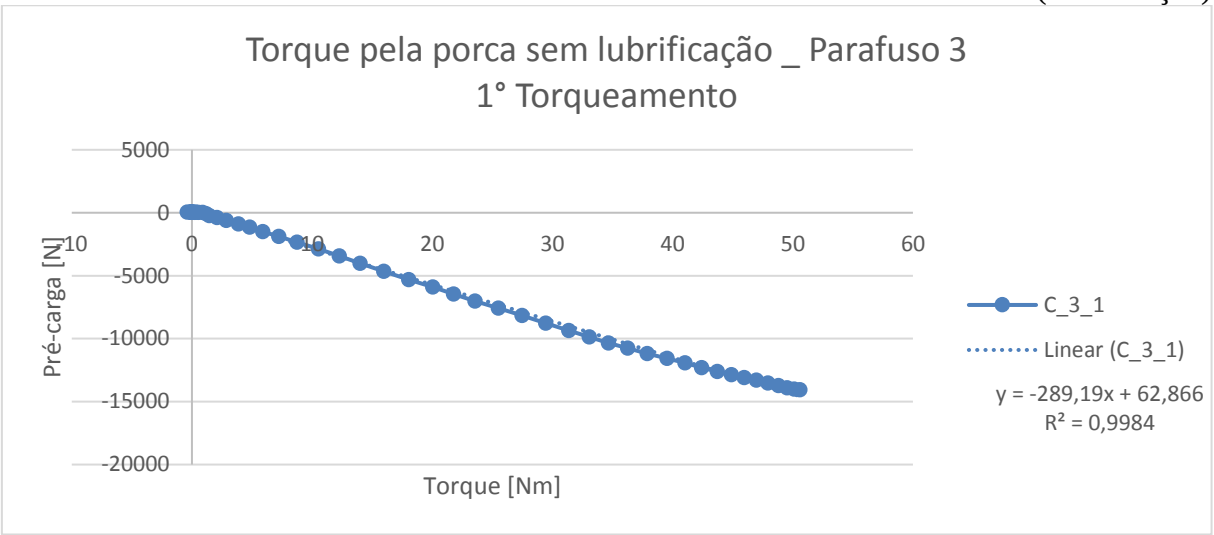


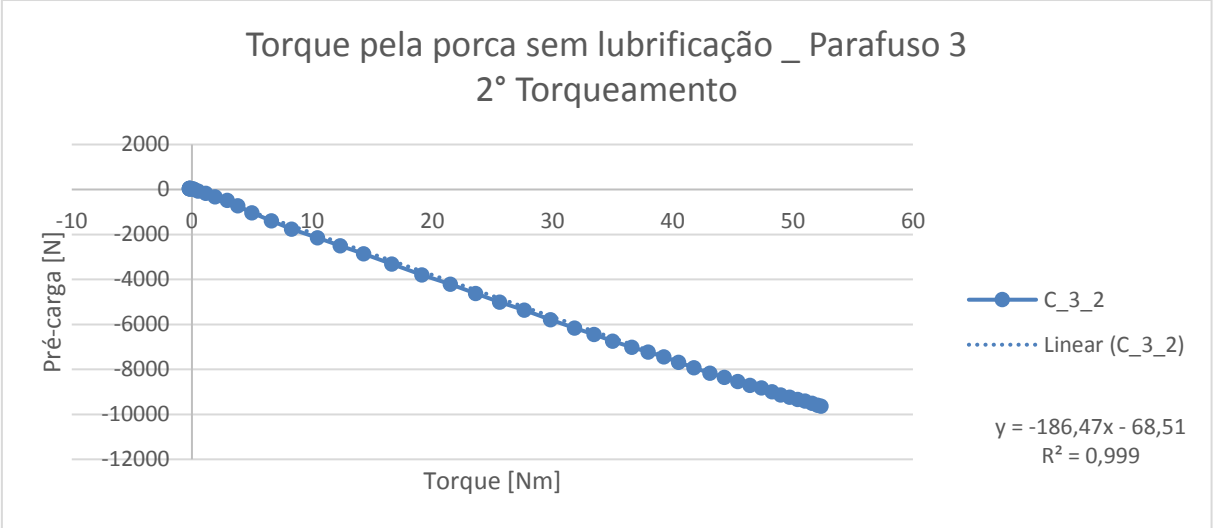


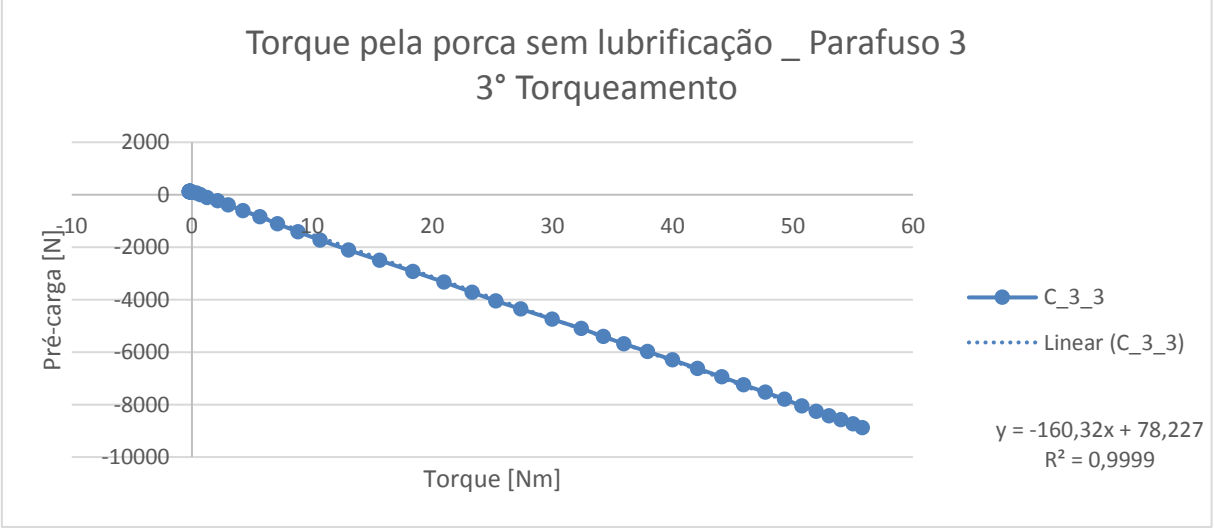


APÊNDICE M – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo C (Torque pela porca sem lubrificação)

(continuação)

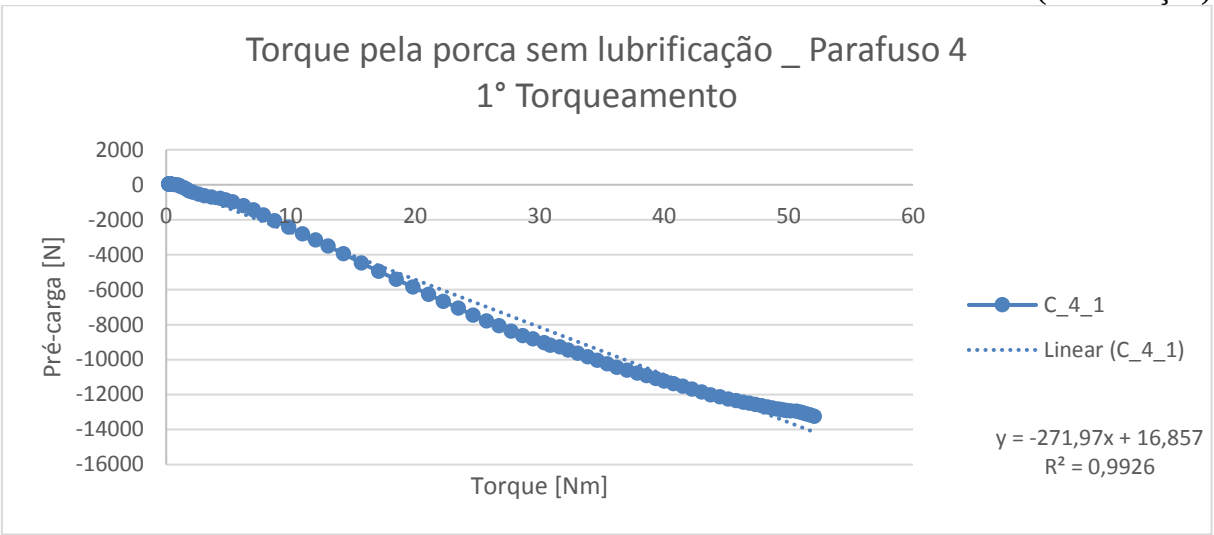


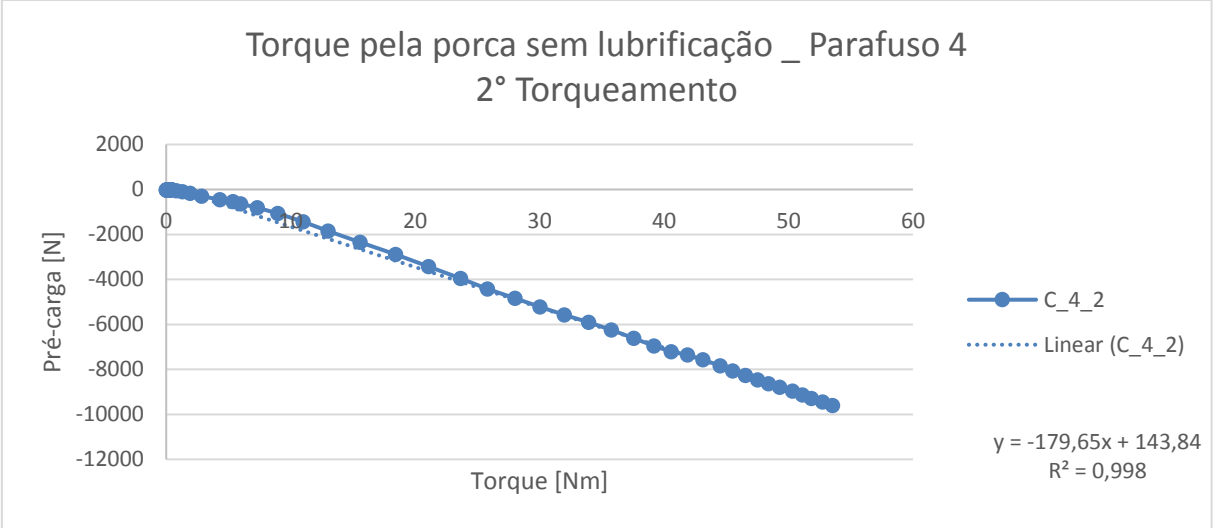


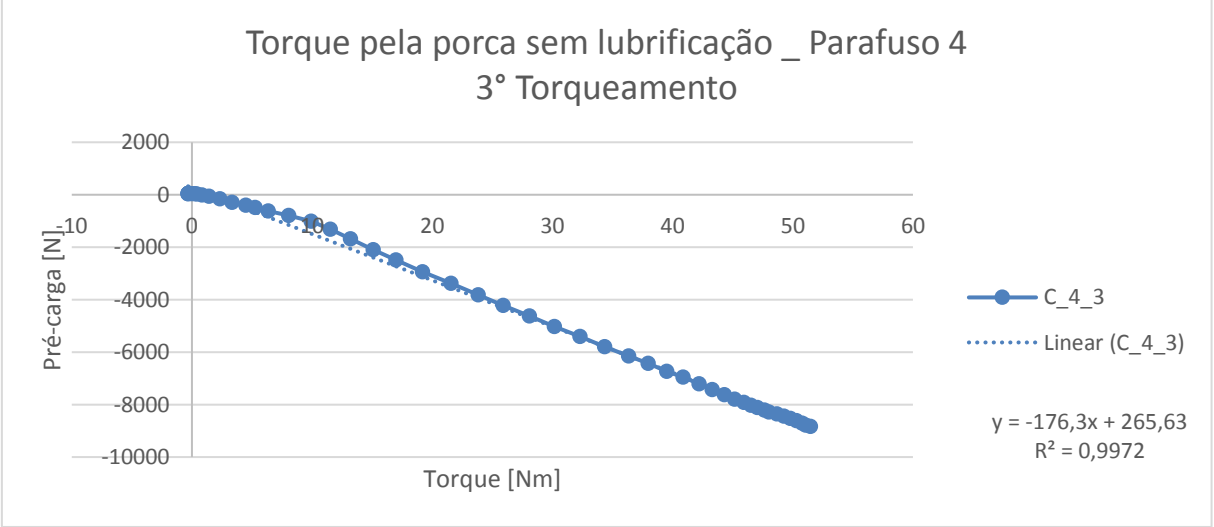


APÊNDICE N – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo C
(Torque pela porca sem lubrificação)

(continuação)

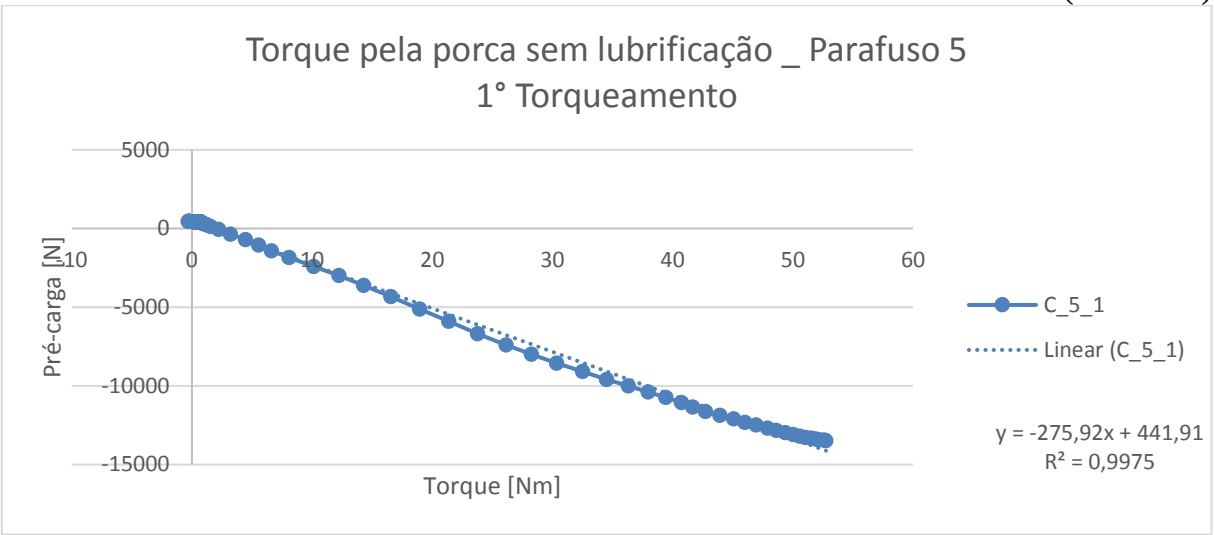


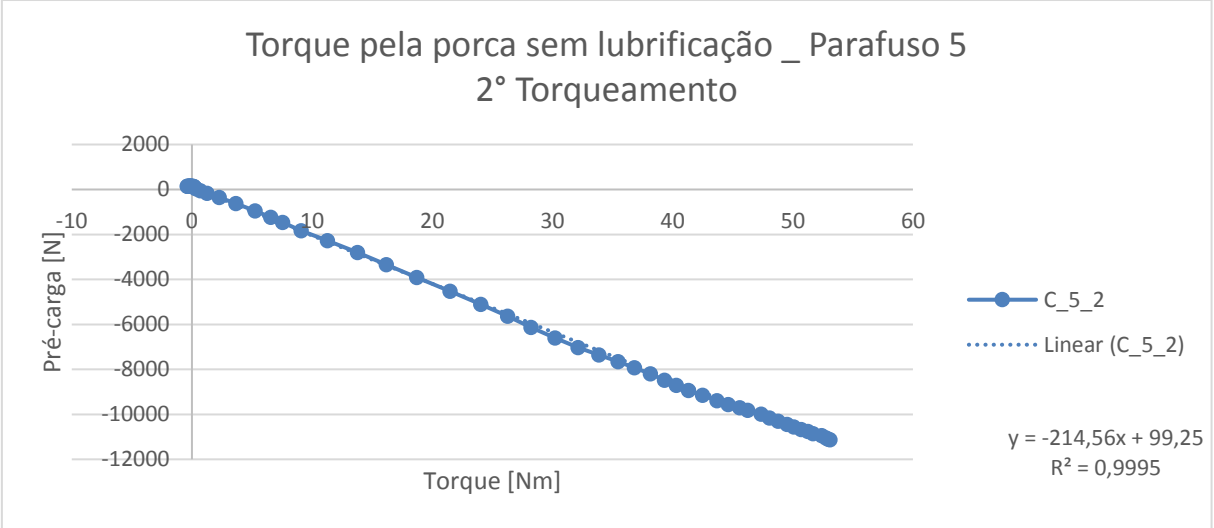


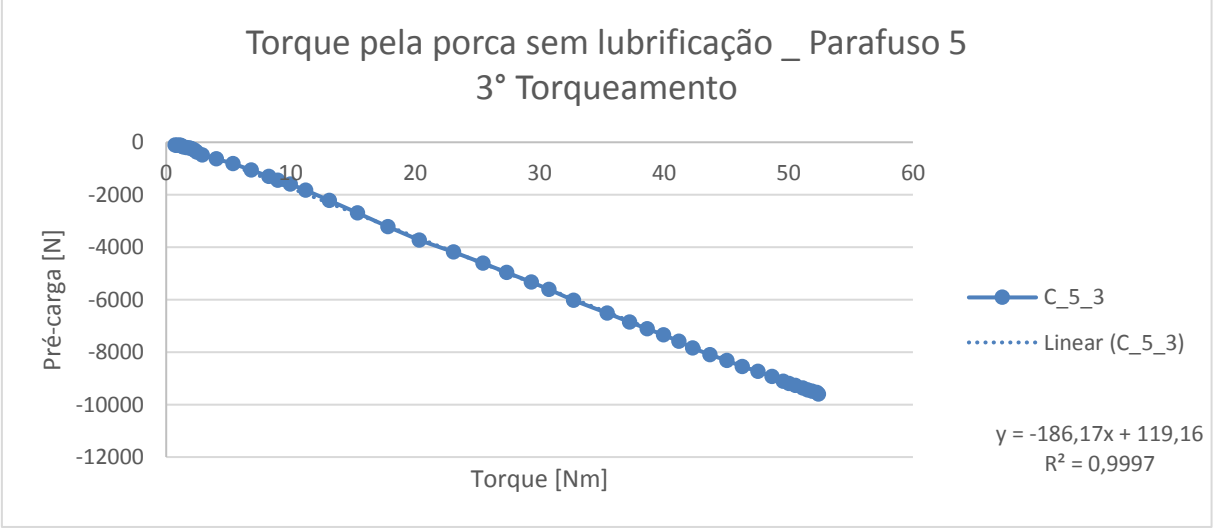


APÊNDICE O – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo C (Torque pela porca sem lubrificação)

(conclusão)

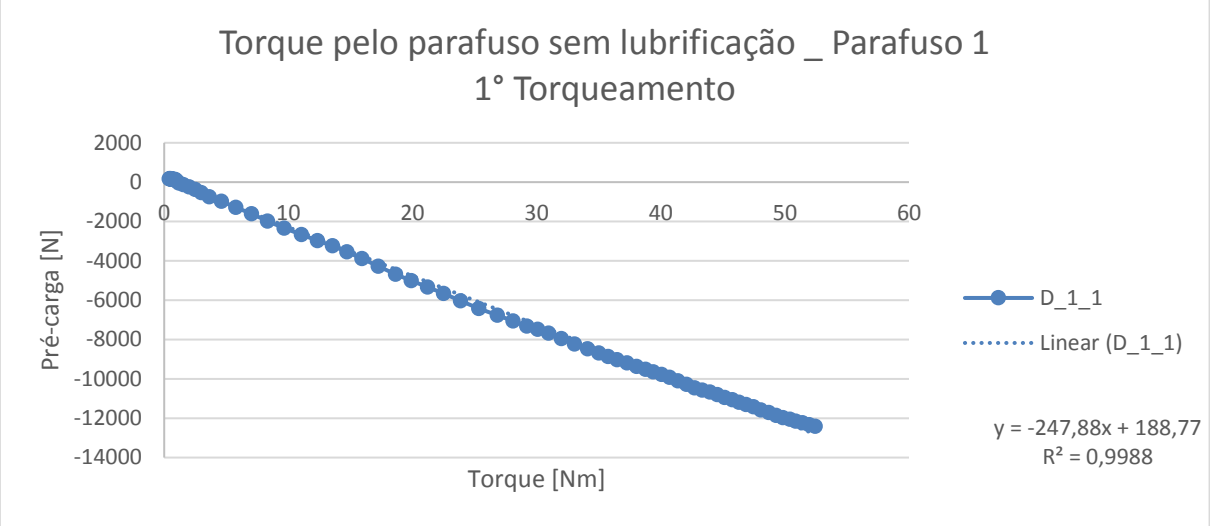


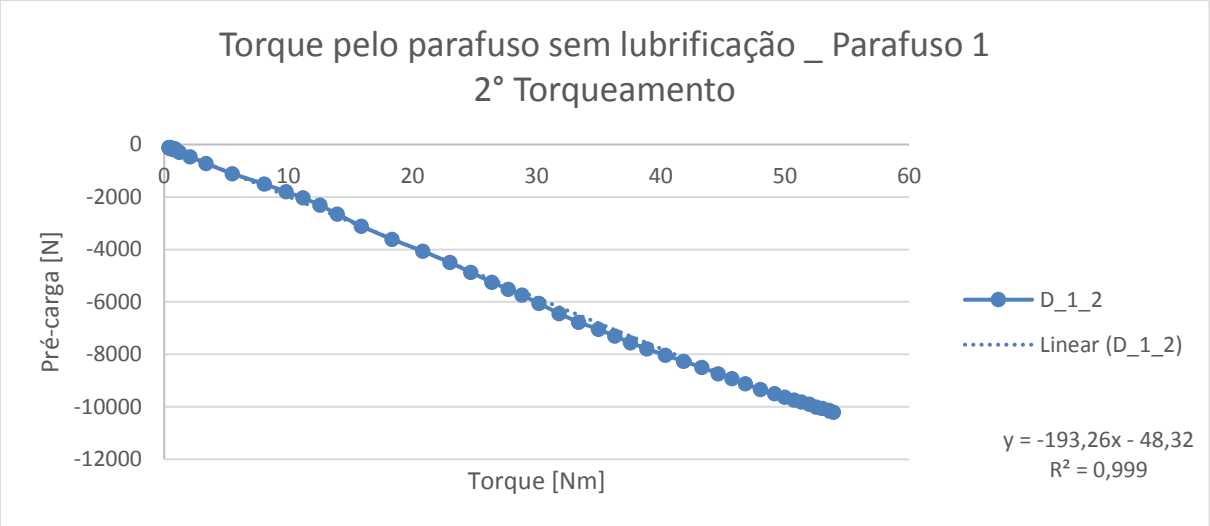


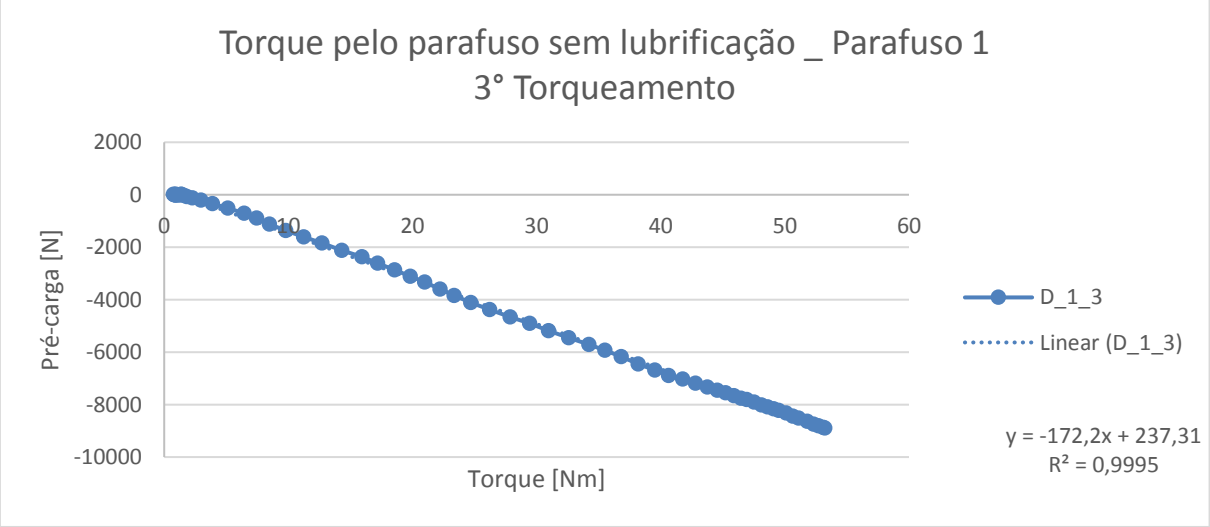


APÊNDICE P – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo D (Torque pelo parafuso sem lubrificação)

(continua)

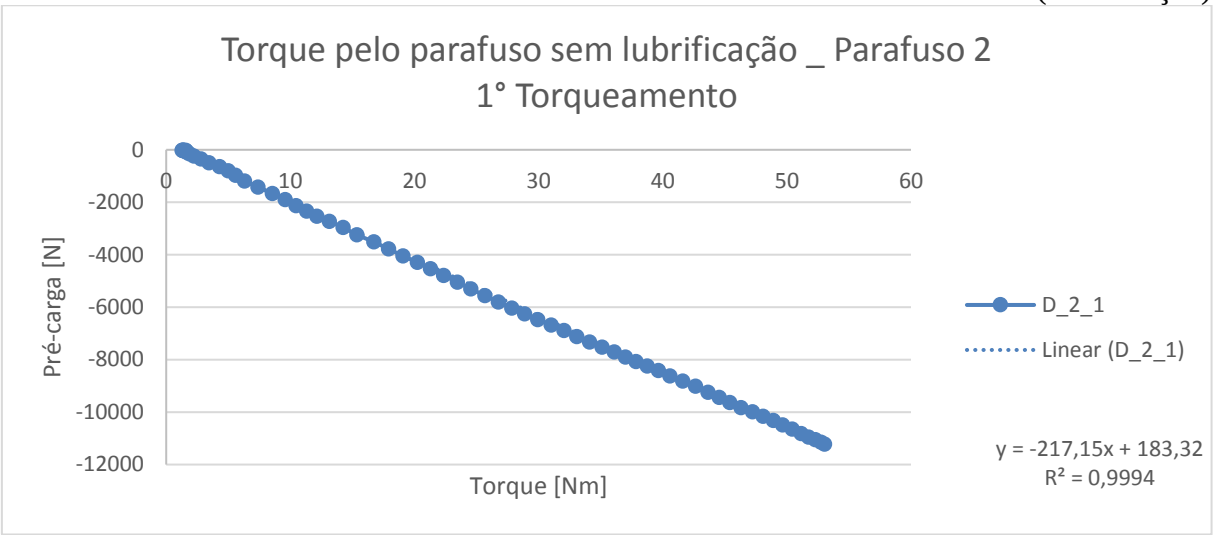


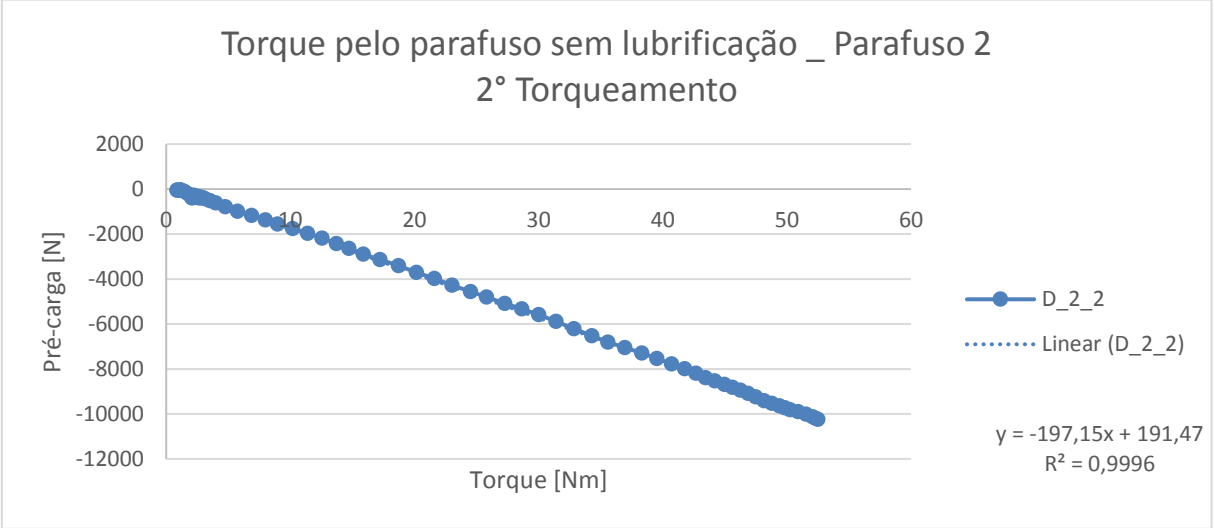


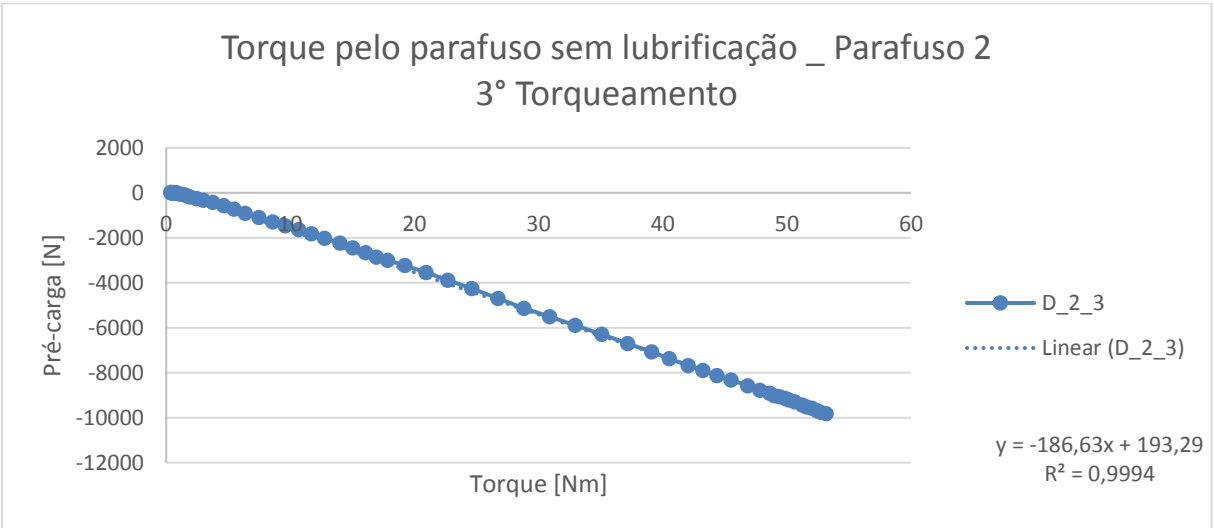


APÊNDICE Q – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo D
(Torque pelo parafuso sem lubrificação)

(continuação)

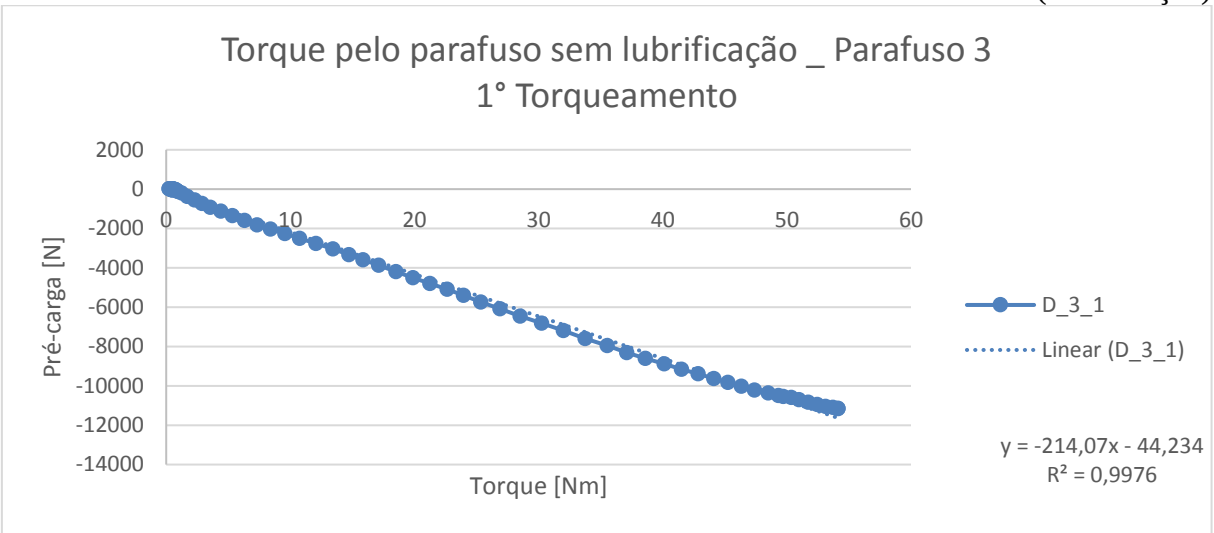


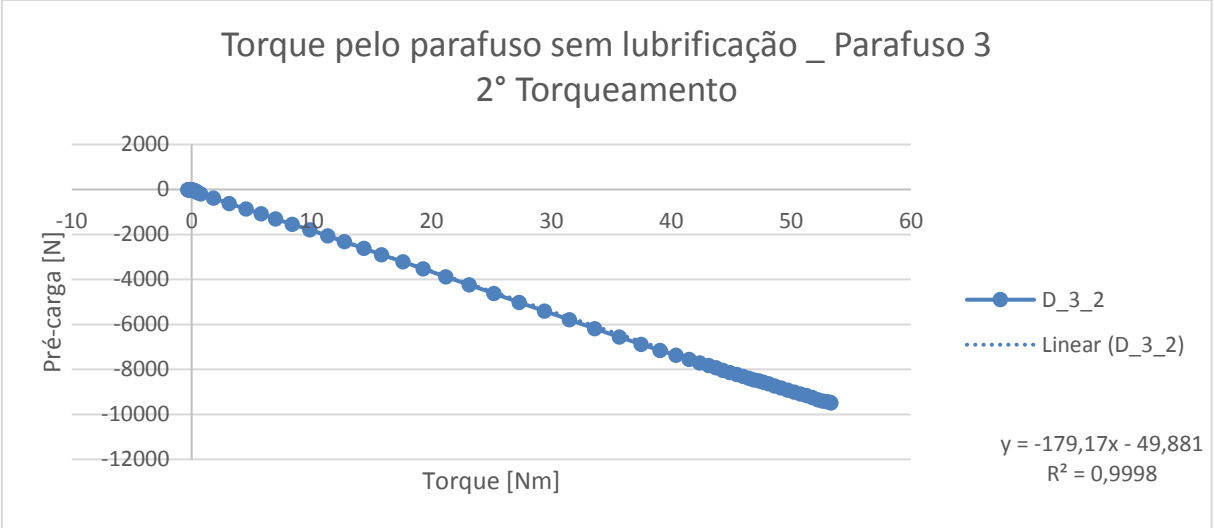


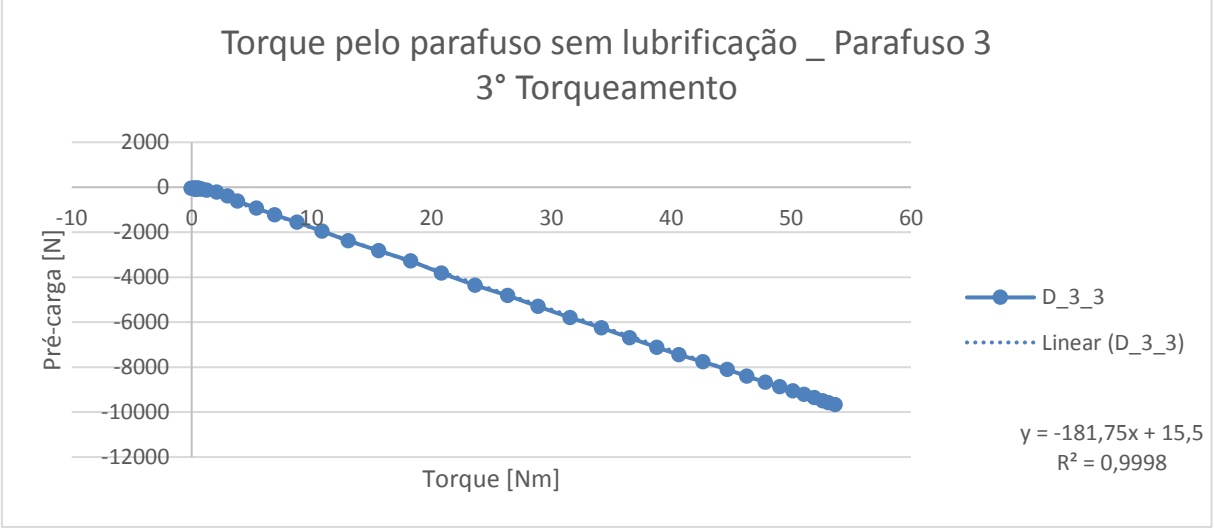


APÊNDICE R – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo D
(Torque pelo parafuso sem lubrificação)

(continuação)

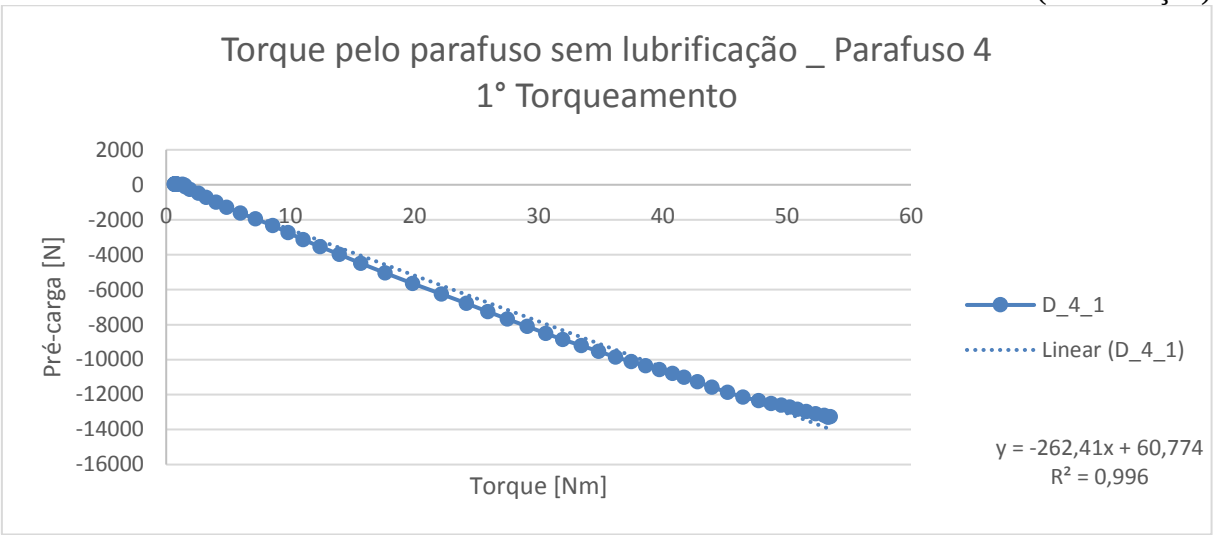


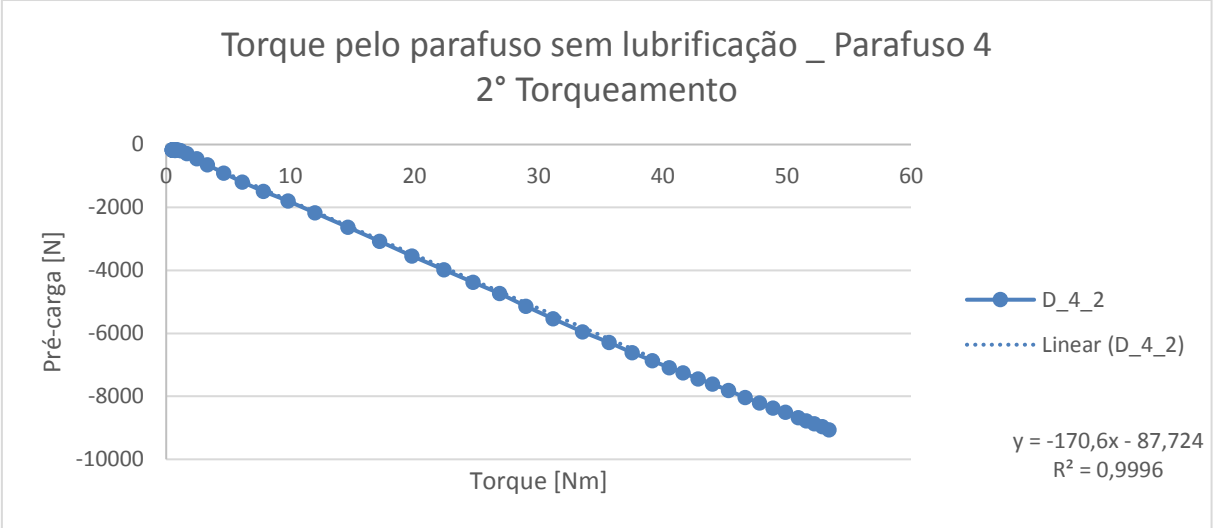


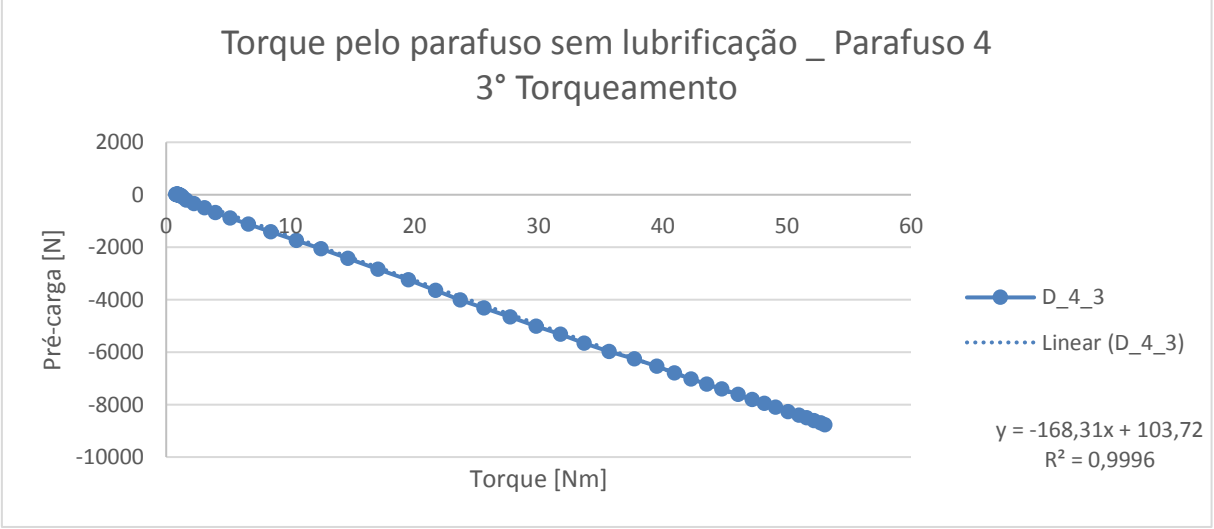


APÊNDICE S – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo D
(Torque pelo parafuso sem lubrificação)

(continuação)

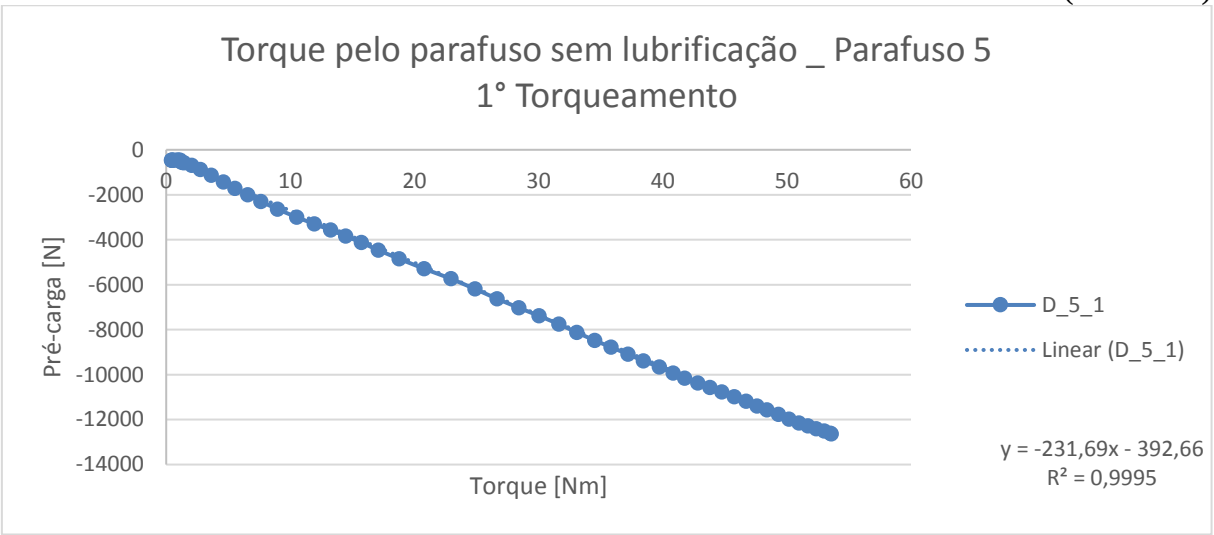


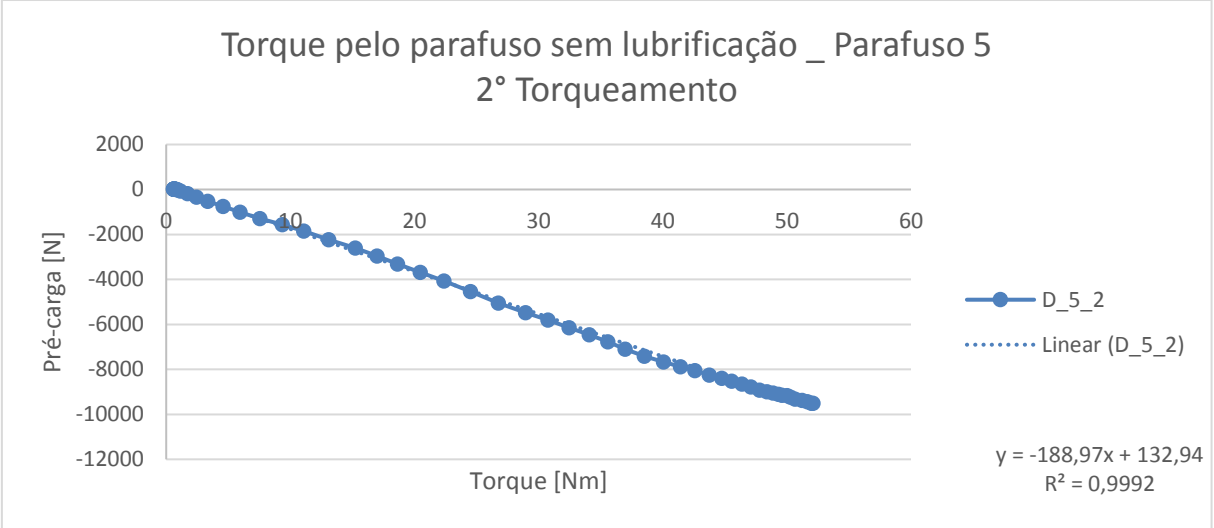


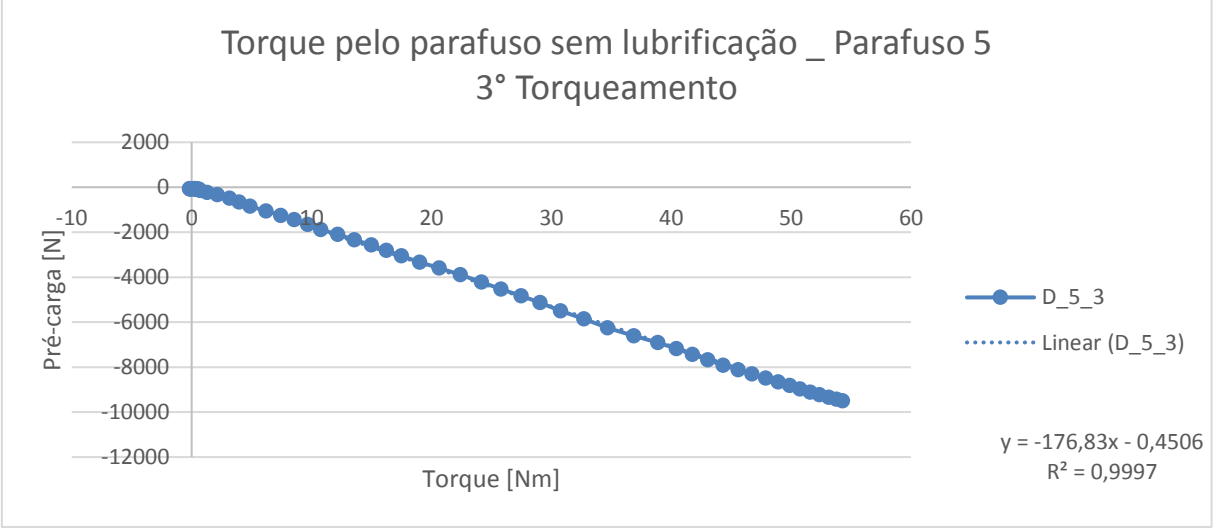


APÊNDICE T – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo D (Torque pelo parafuso sem lubrificação)

(conclusão)

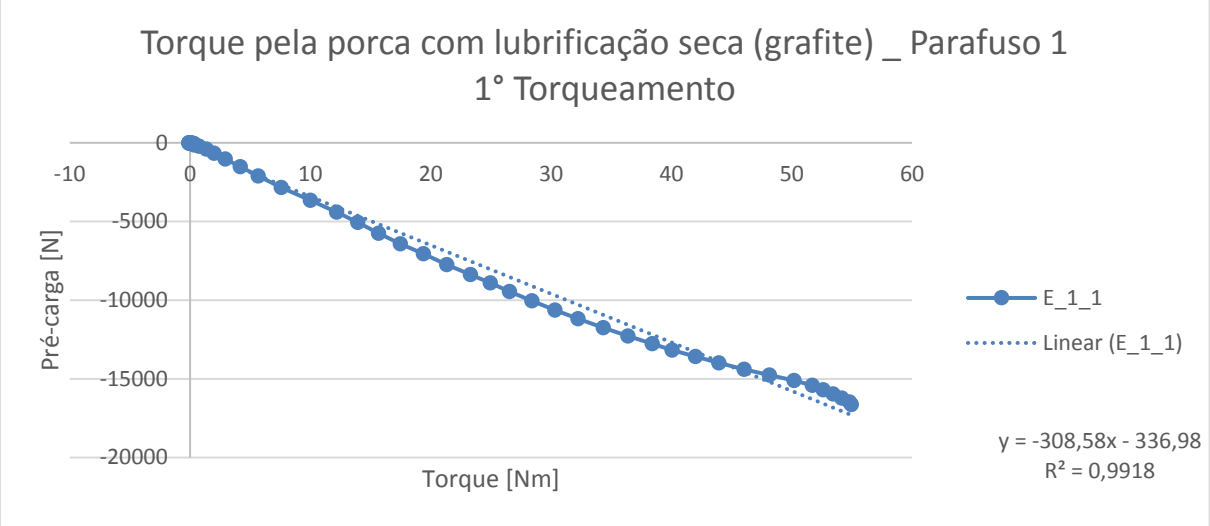


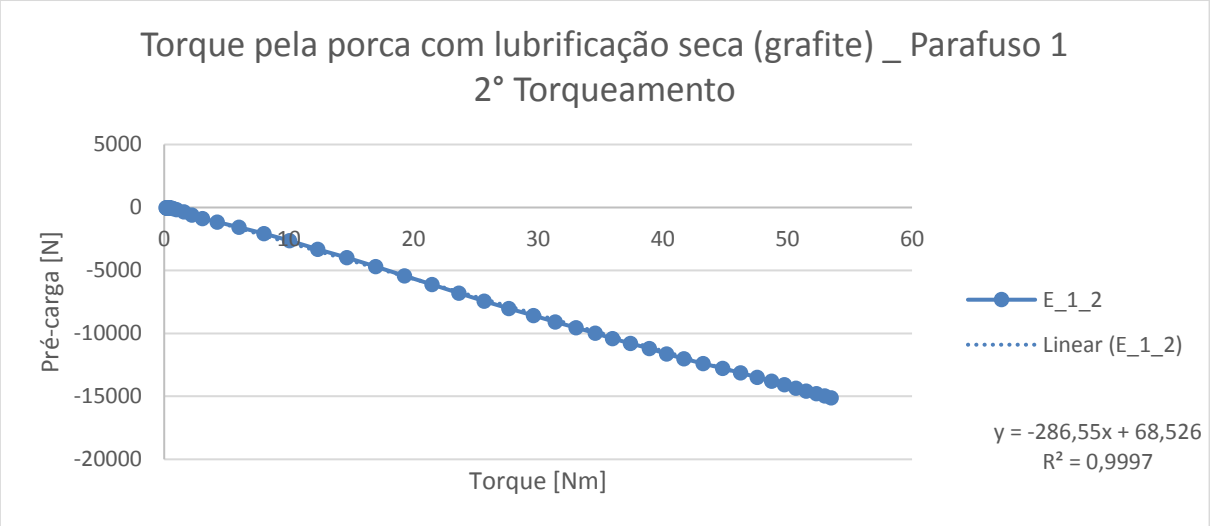


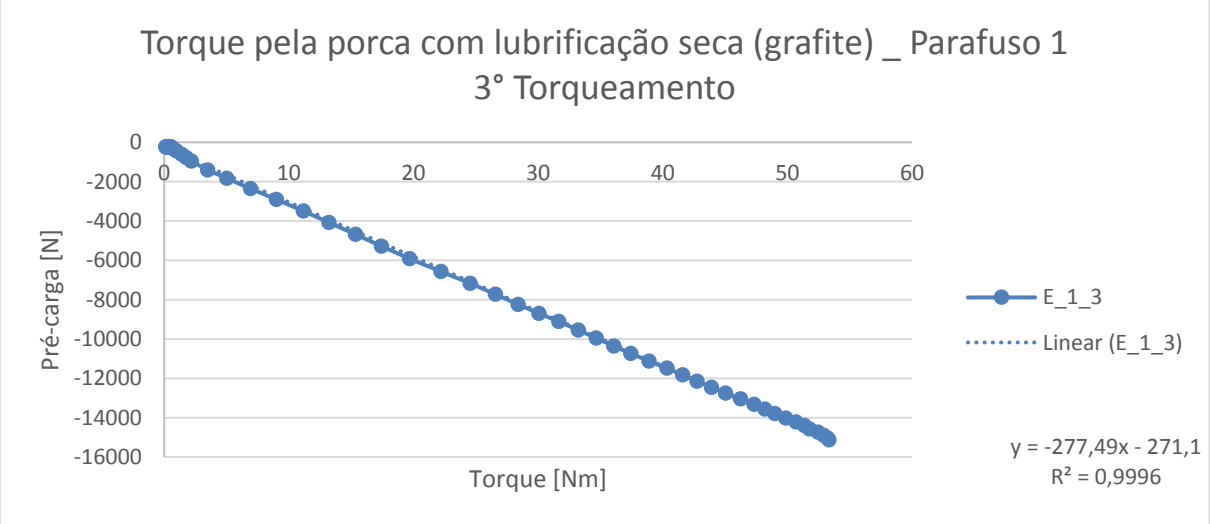


APÊNDICE U – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo E (Torque pela porca com lubrificação seca (grafite)

(continua)

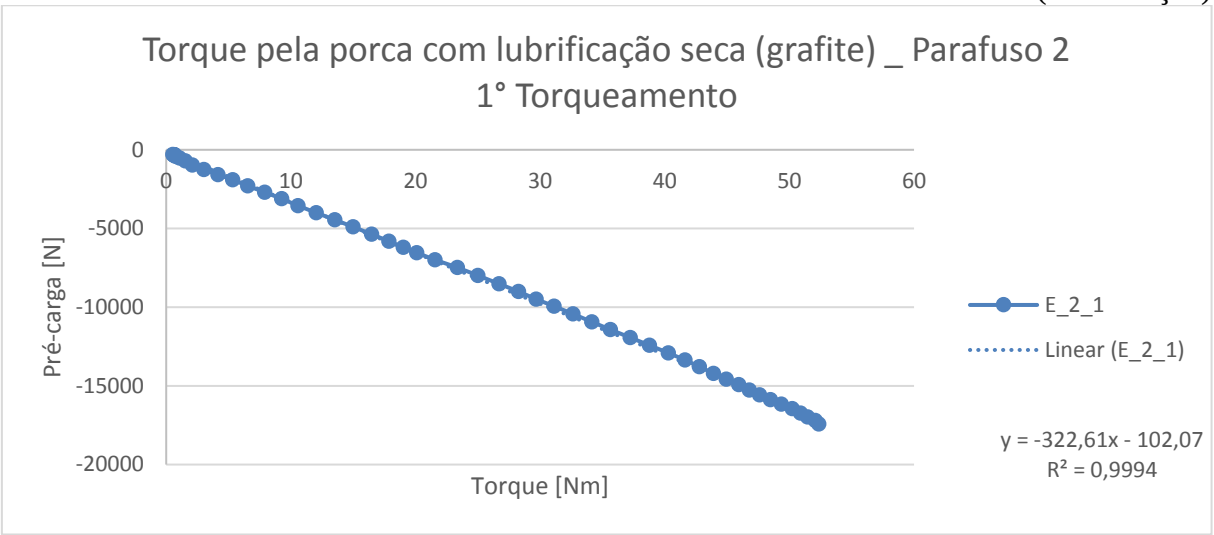


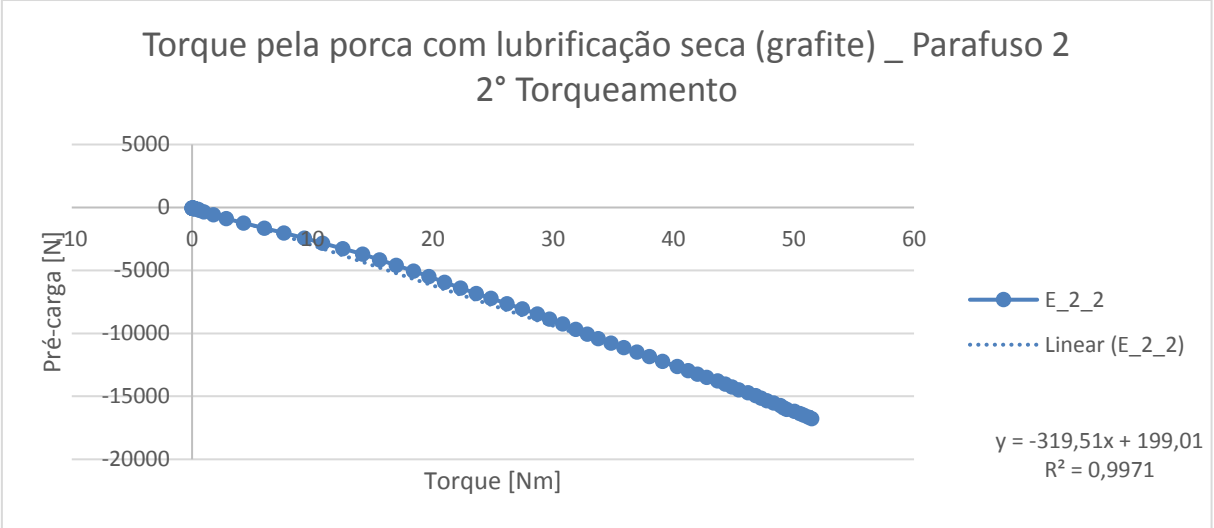


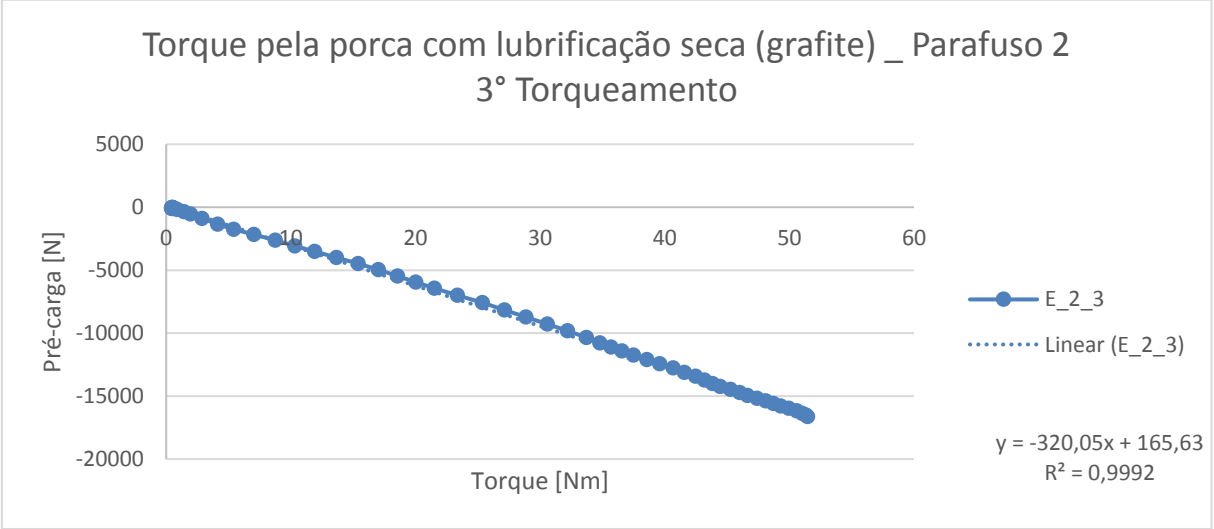


APÊNDICE V – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo E
(Torque pela porca com lubrificação seca (grafite)

(continuação)

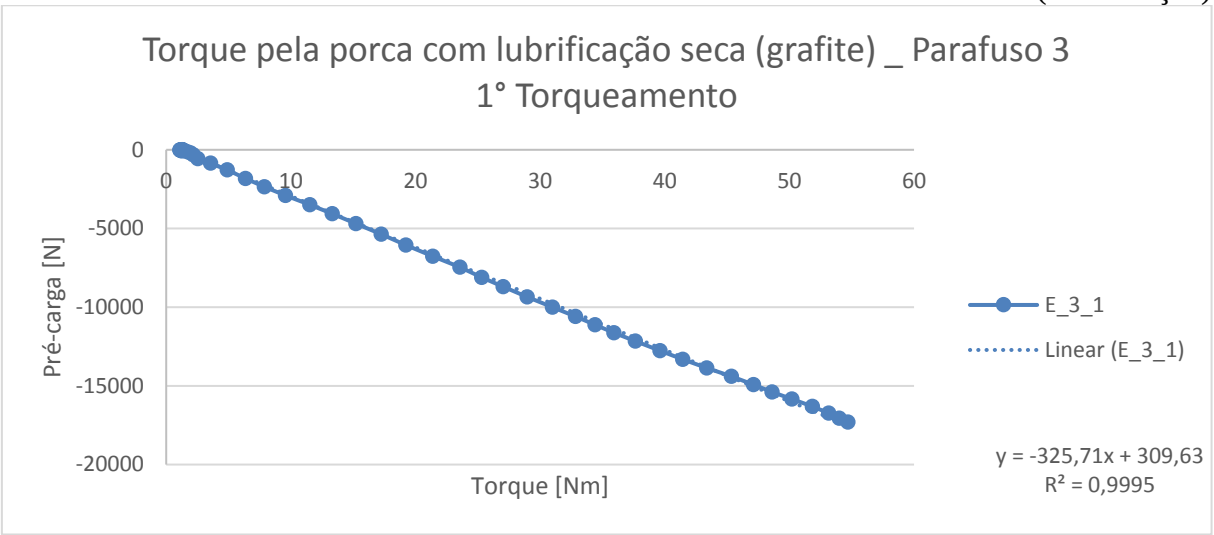


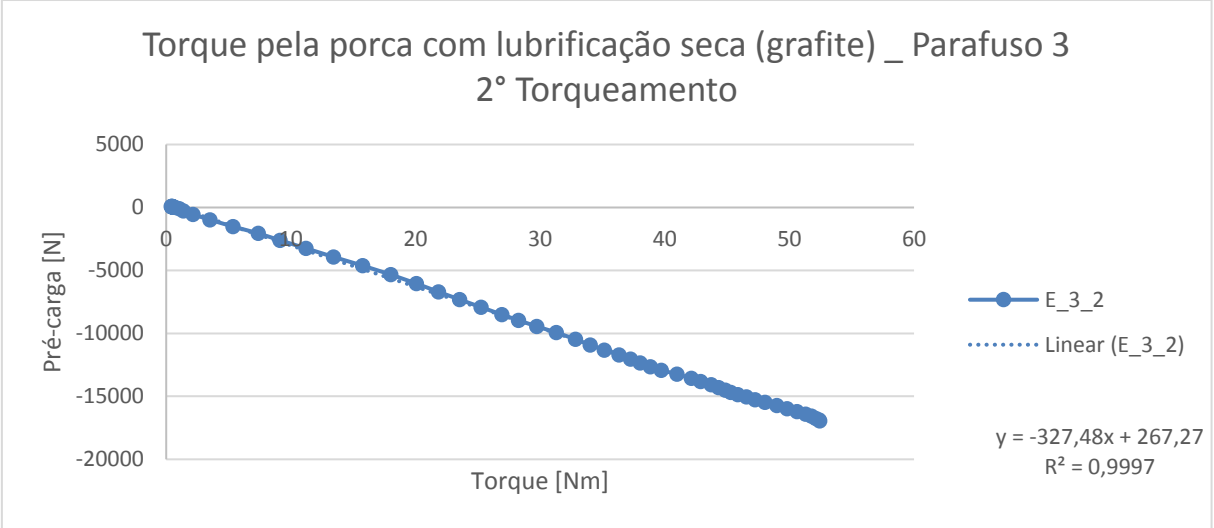


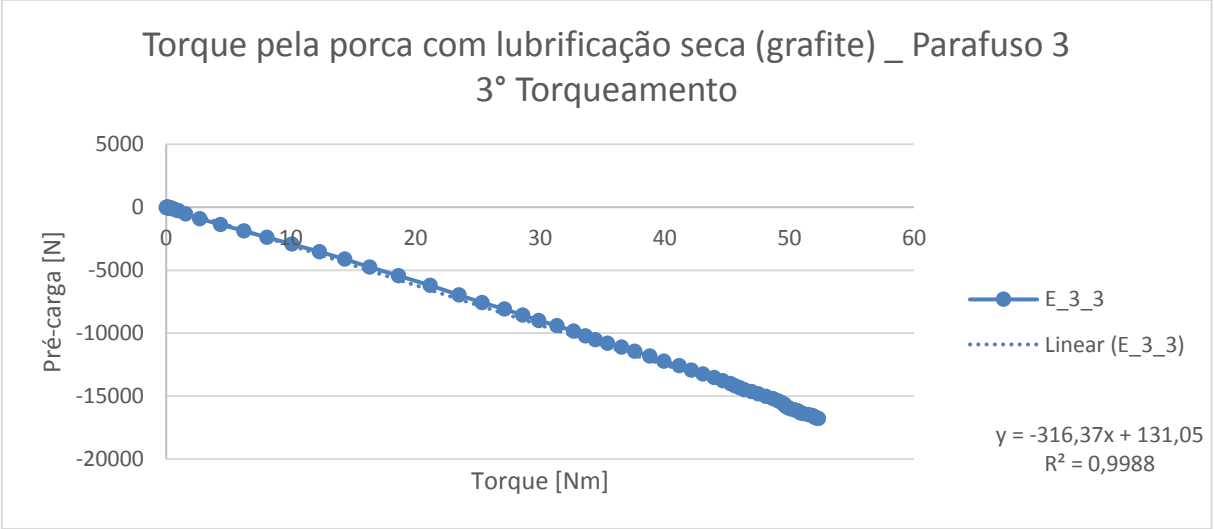


APÊNDICE W – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo E
(Torque pela porca com lubrificação seca (grafite)

(continuação)

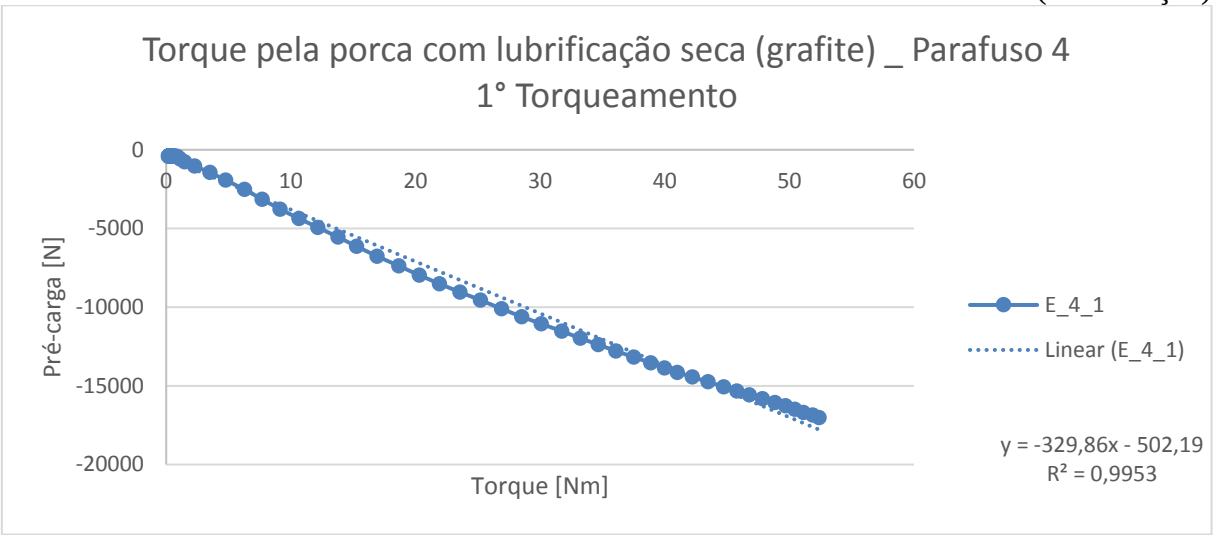


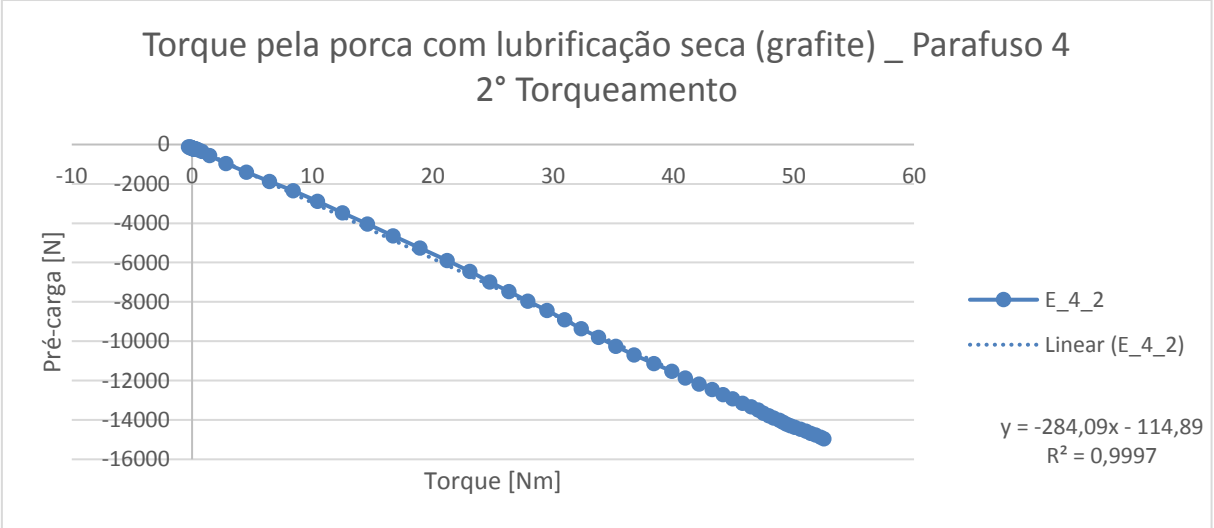


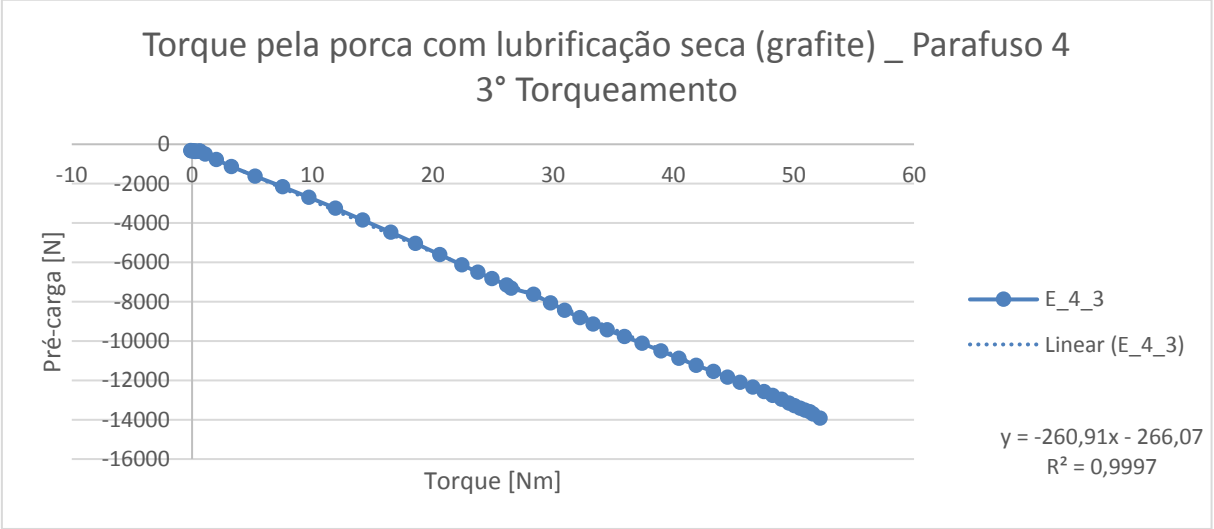


APÊNDICE X – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo E
(Torque pela porca com lubrificação seca (grafite)

(continuação)

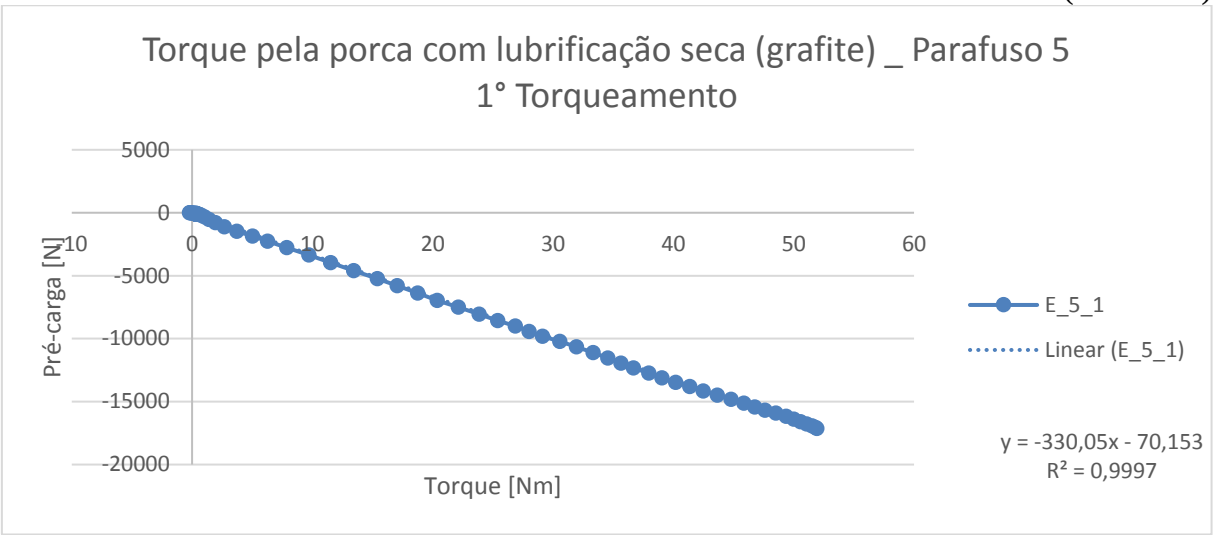


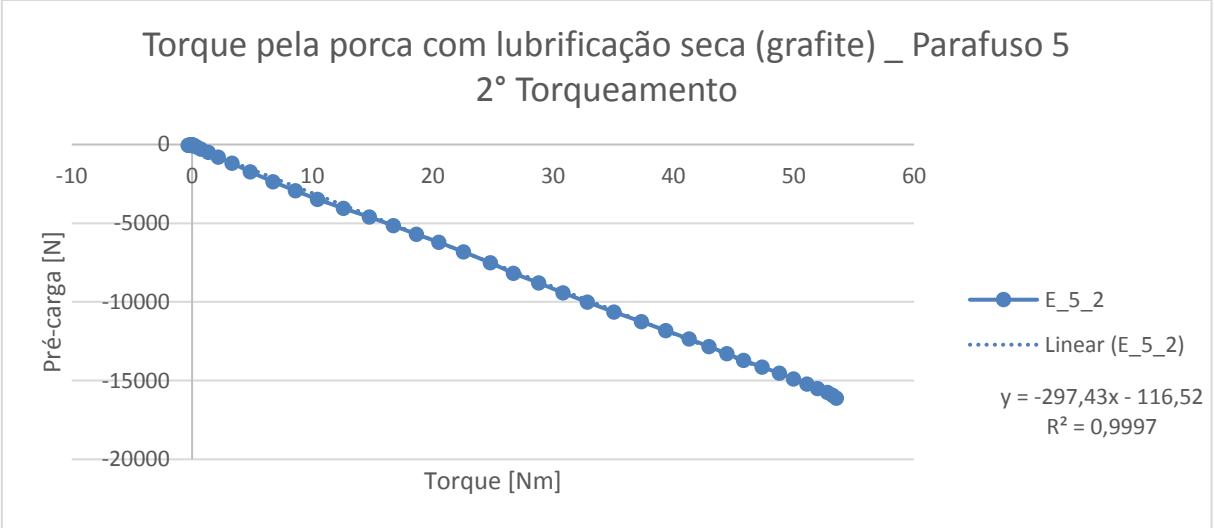


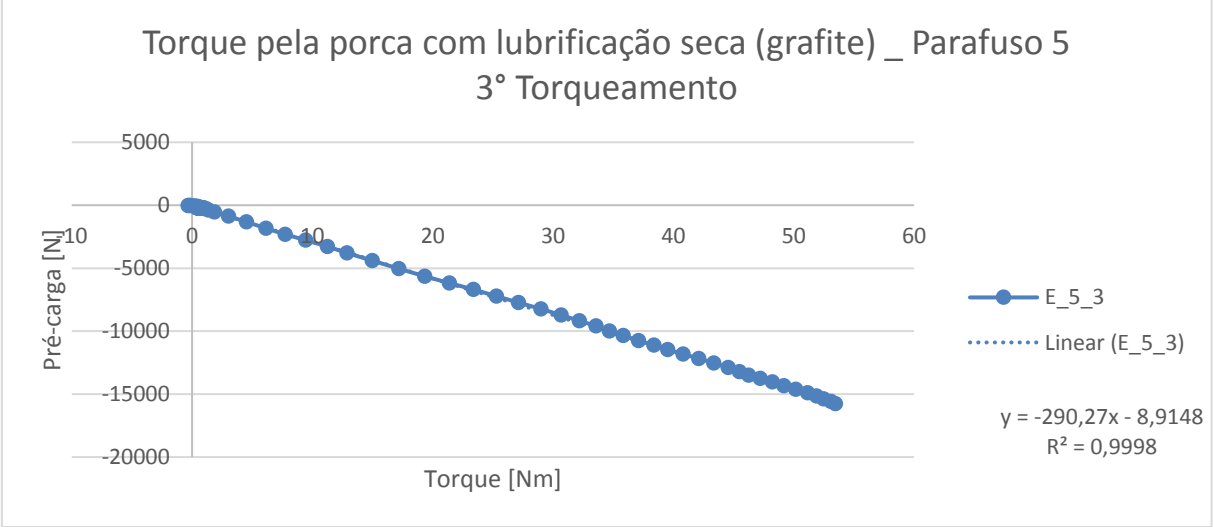


APÊNDICE Y – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo E
(Torque pela porca com lubrificação seca (grafite)

(conclusão)

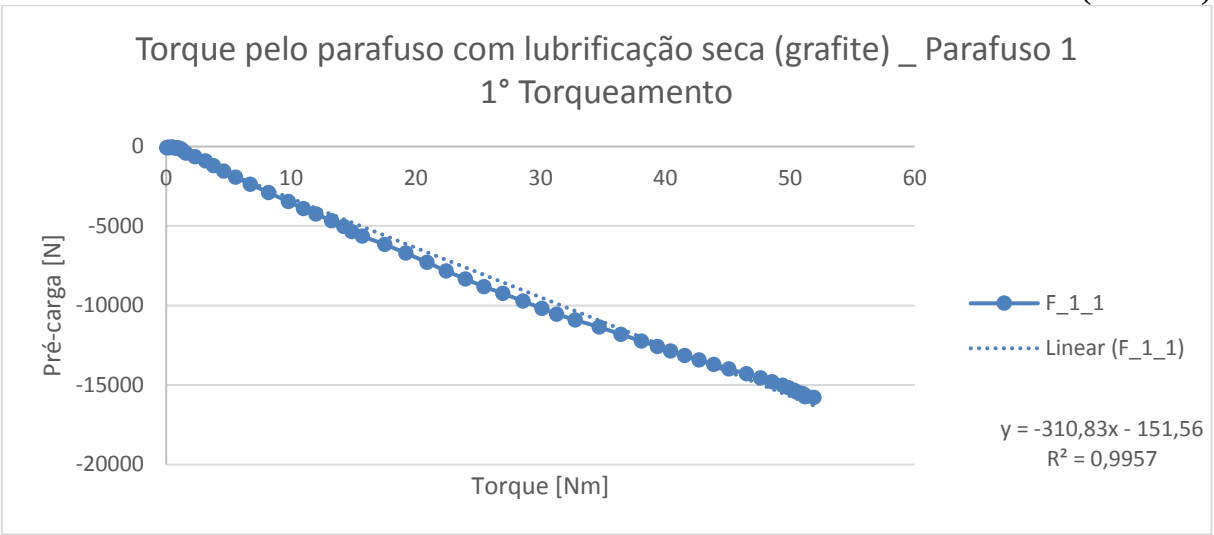


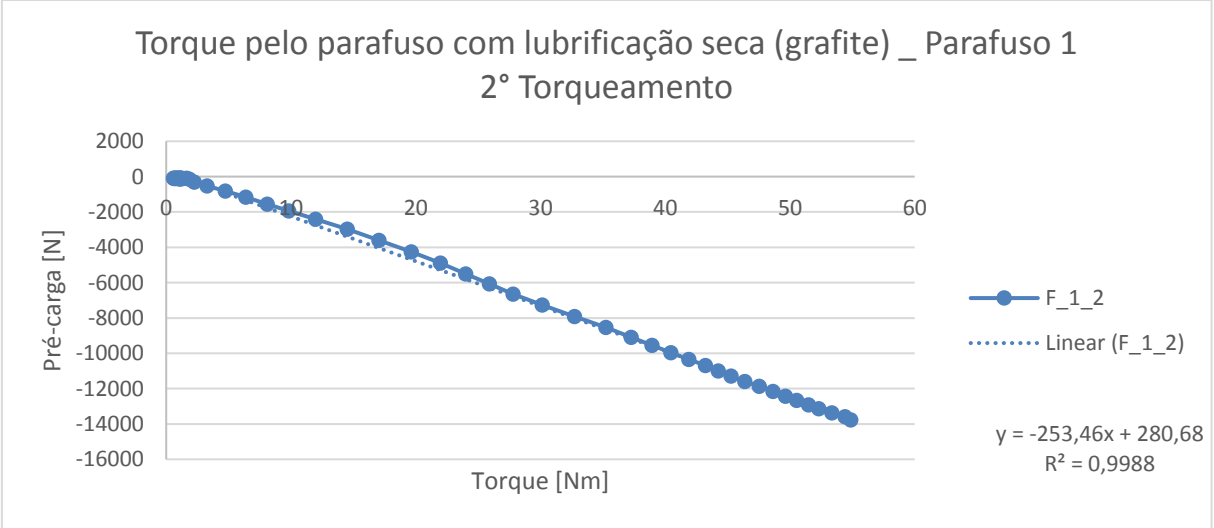


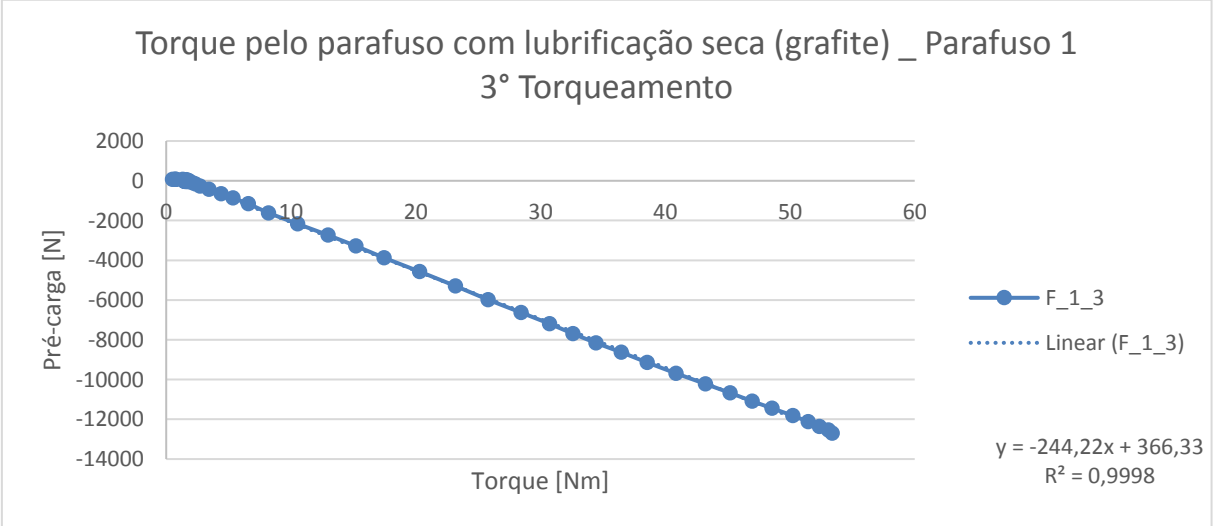


APÊNDICE Z – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo F (Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite)

(continua)

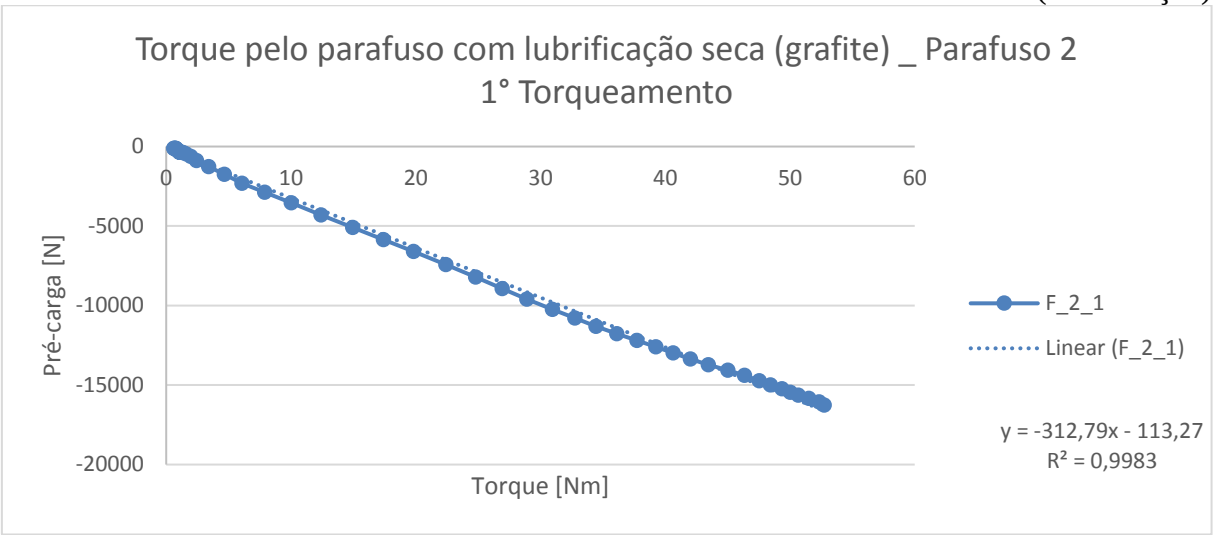


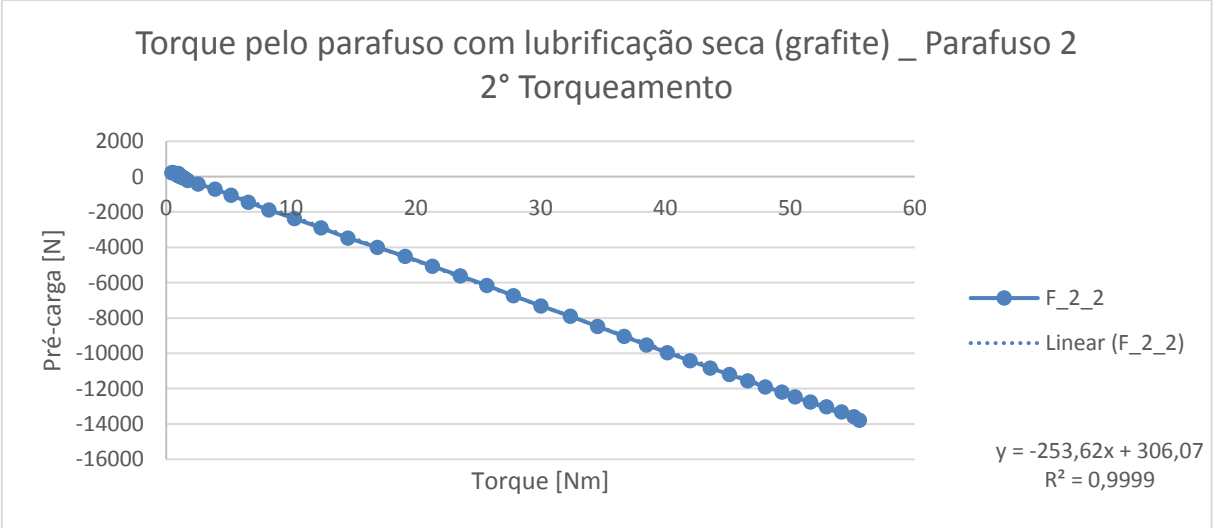


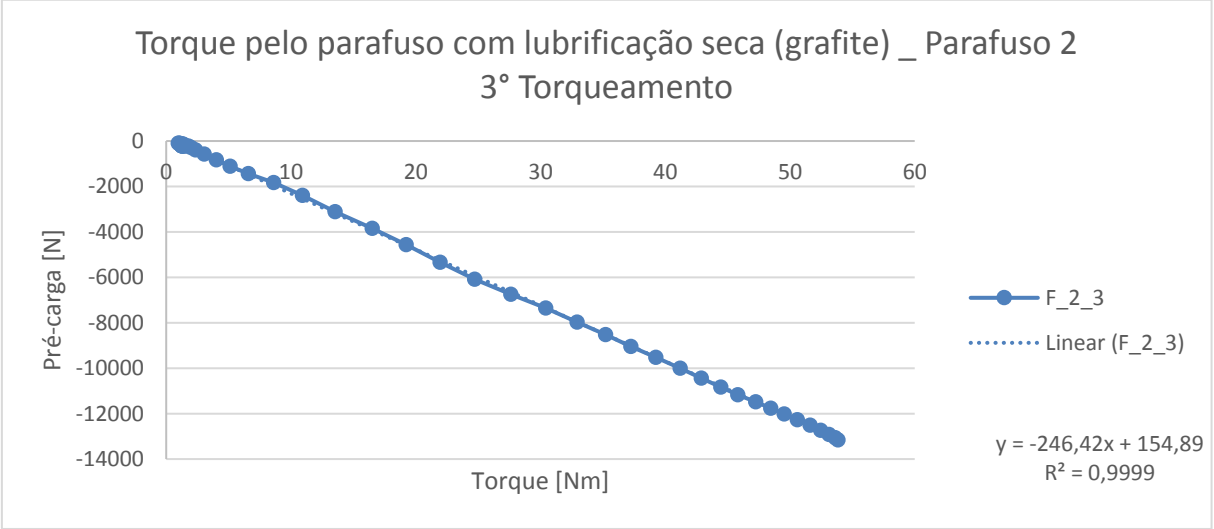


APÊNDICE AA – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo F (Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite)

(continuação)

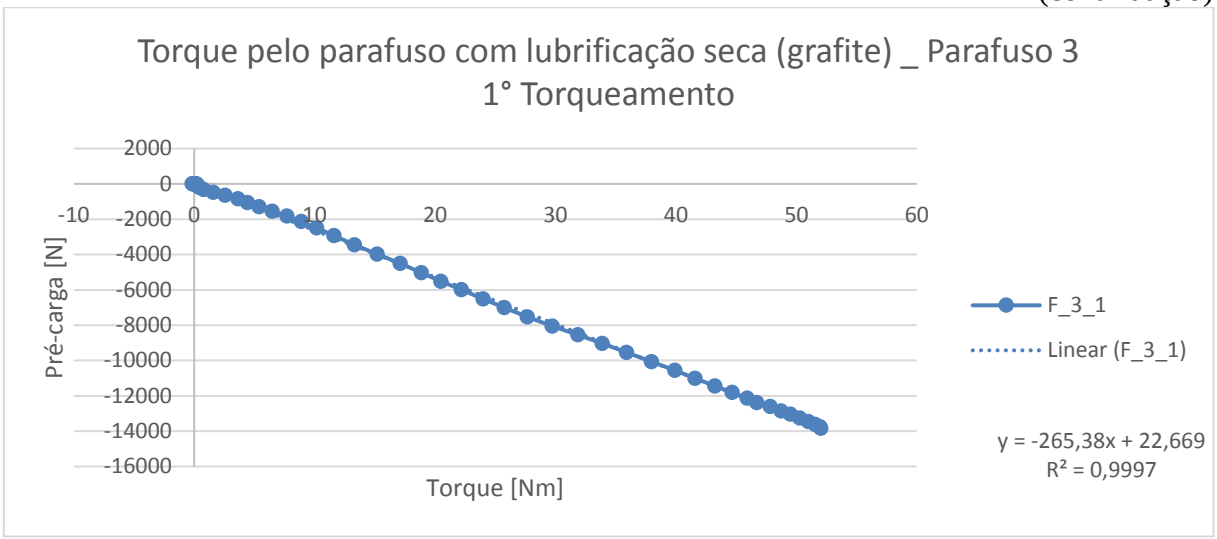


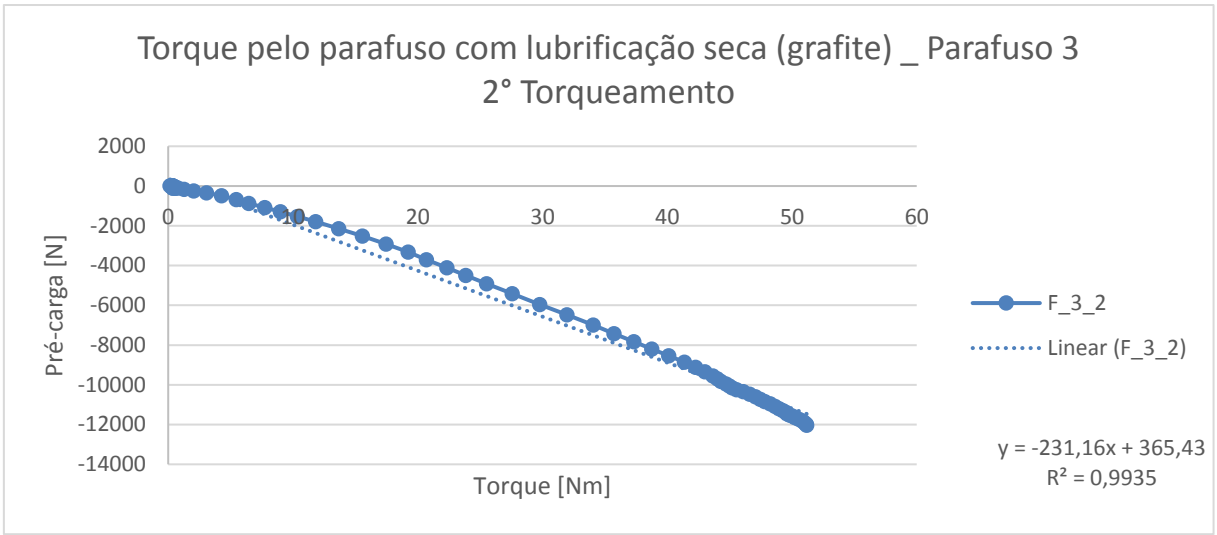


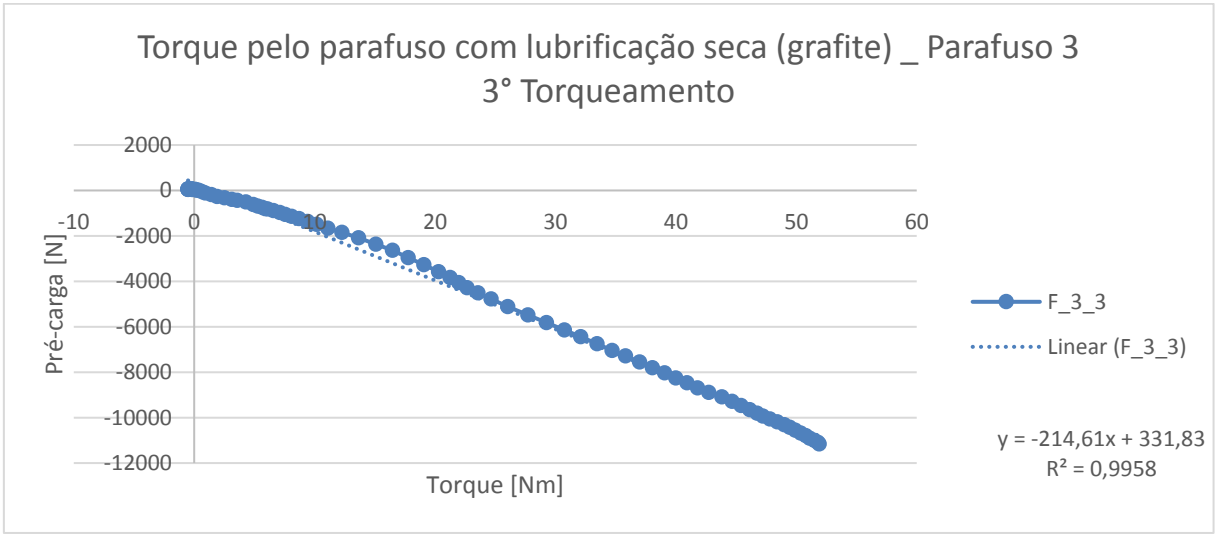


APÊNDICE BB – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo F (Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite)

(continuação)

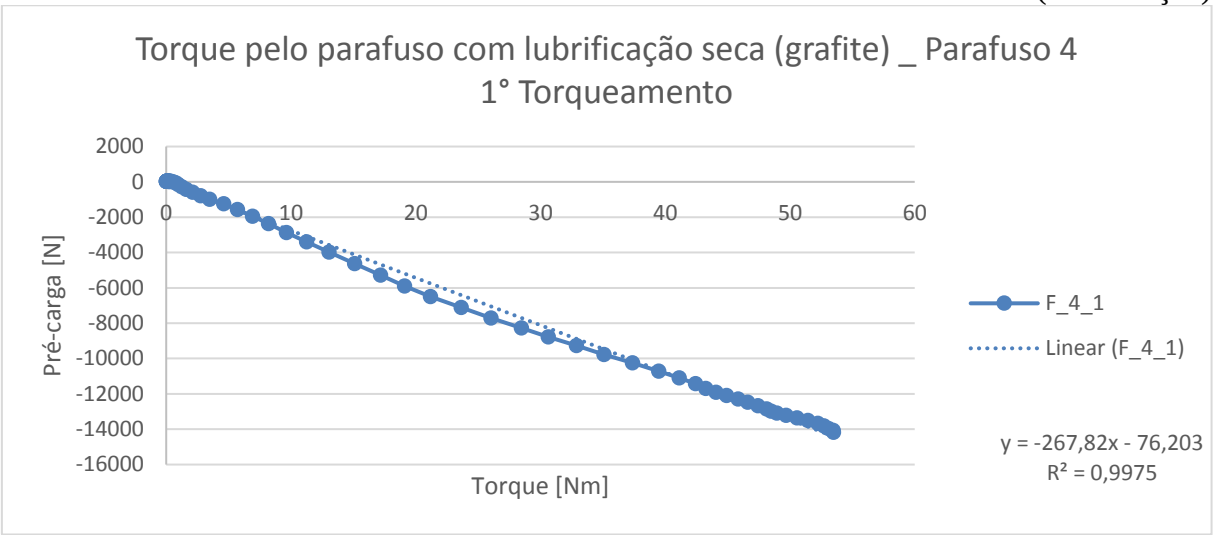


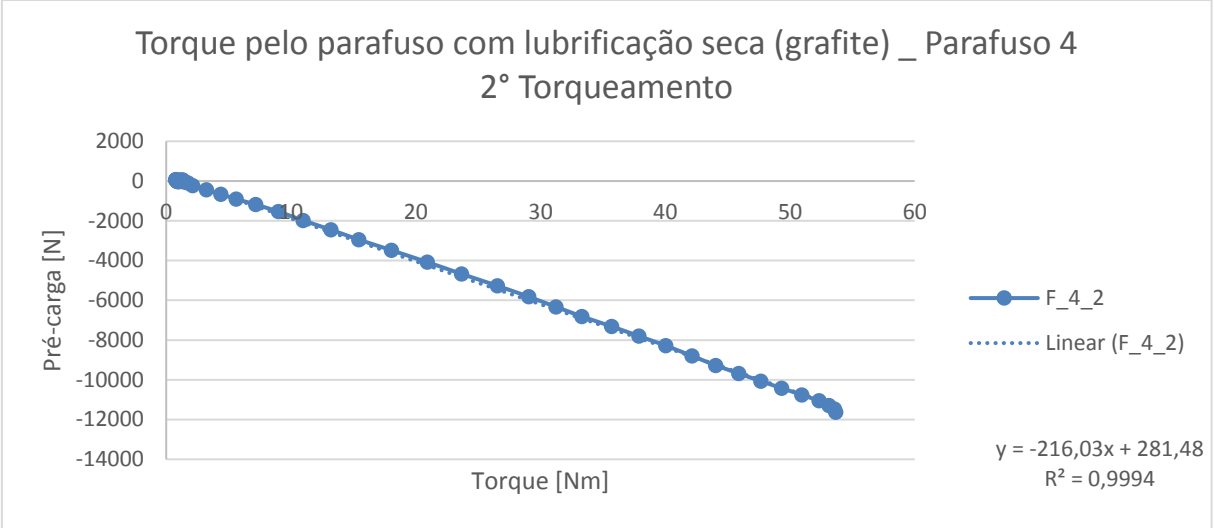


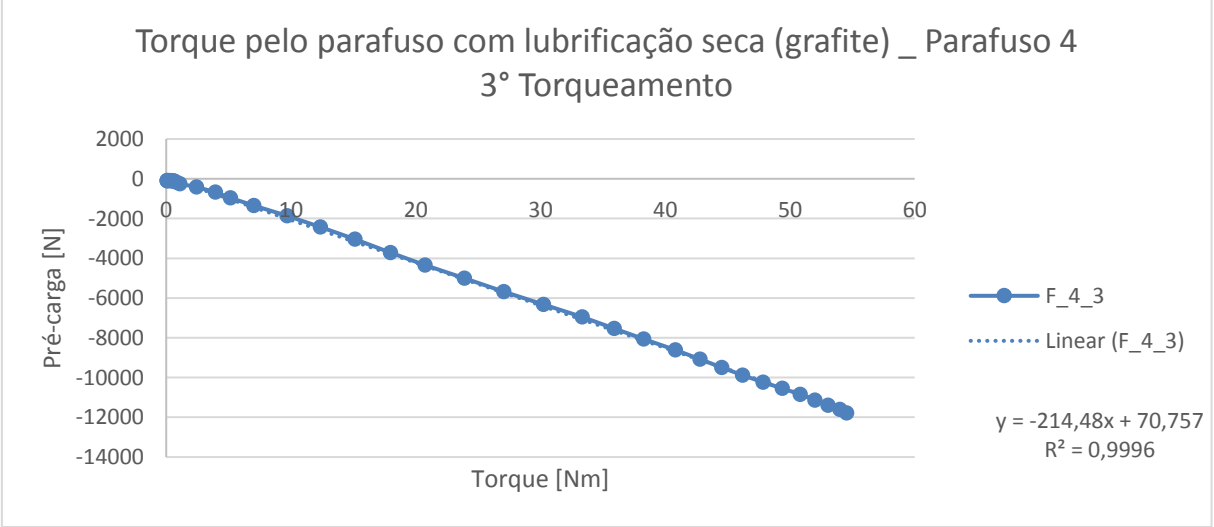


APÊNDICE CC – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo F
(Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite)

(continuação)

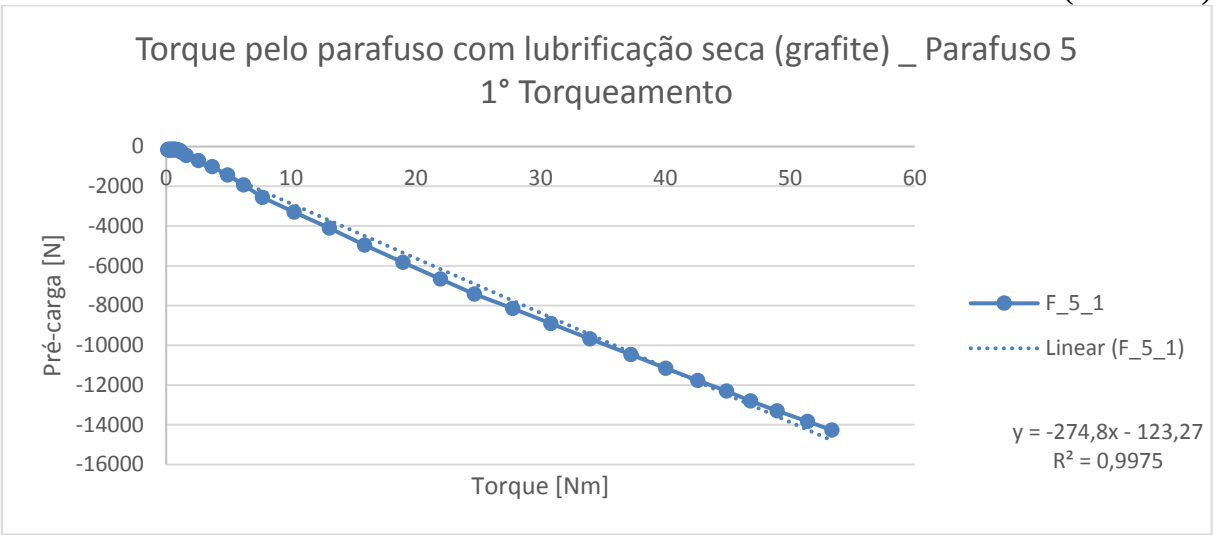


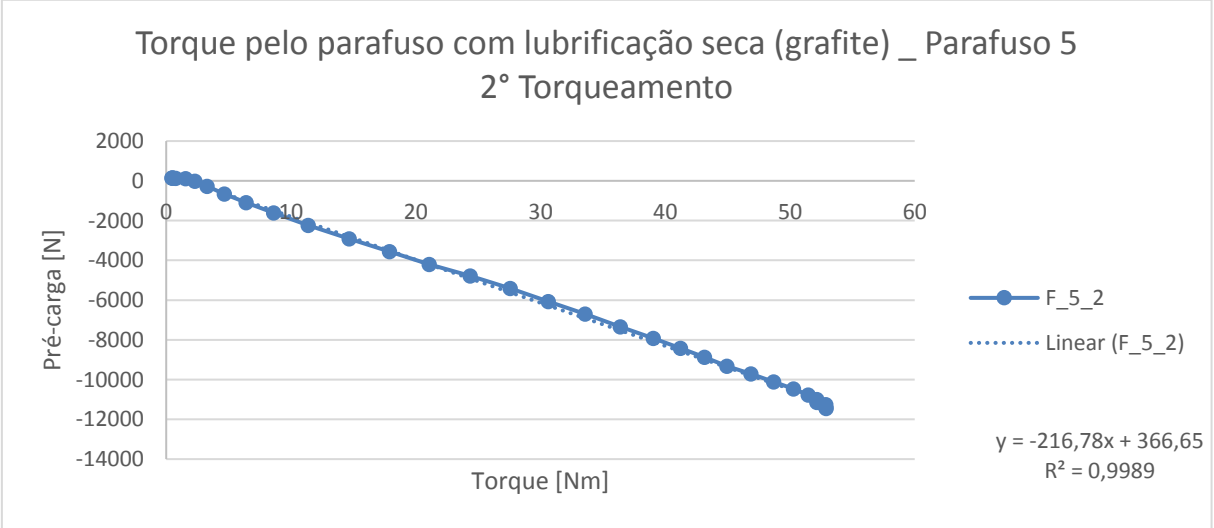


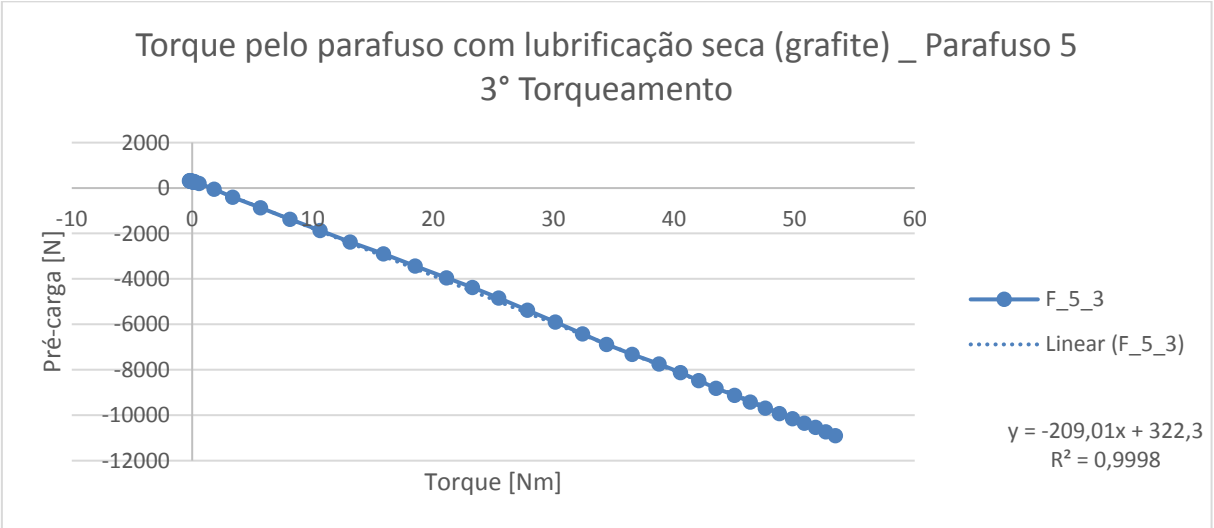


APÊNDICE DD – Gráficos dos ensaios realizados para o grupo F
(Torque pelo parafuso com lubrificação seca (grafite)

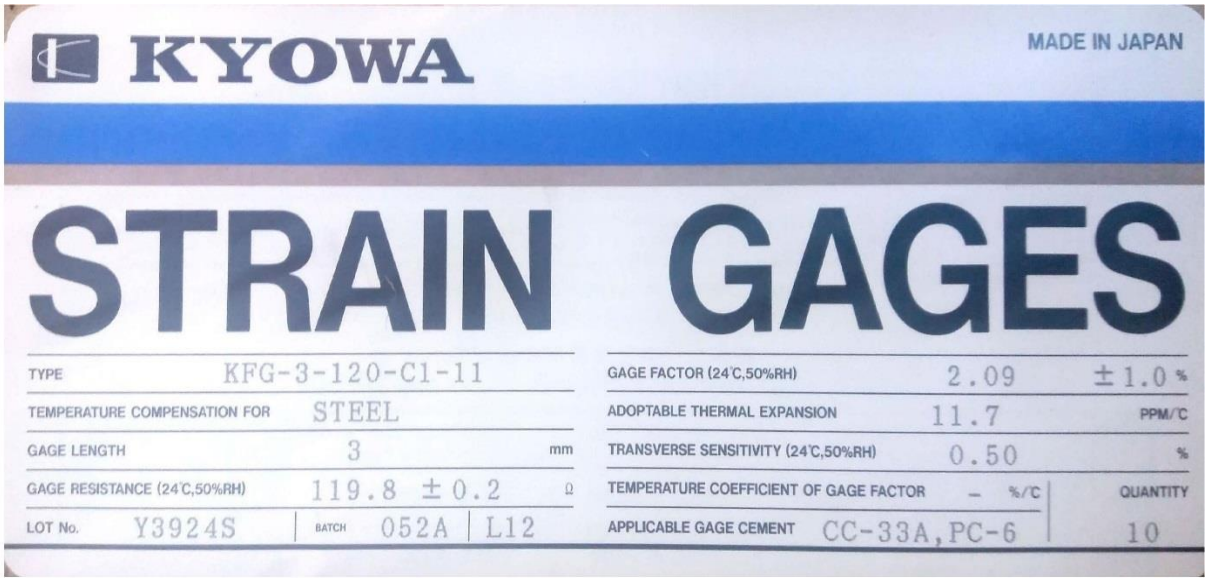
(conclusão)







ANEXO A – Informações técnicas do extensômetro KFG-3-120-C1-11



Fonte: KYOWA (2018).