

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JURACI VIEIRA NOVAES JUNIOR

RICARDO LUIZ LUCKOW

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA REGIÃO DOS
FILETES DE ROSCA EM UNIÕES APARAFUSADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 - Nº de Inscrição - 10)

CURITIBA

2015

JURACI VIEIRA NOVAES JUNIOR

RICARDO LUIZ LUCKOW

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA REGIÃO DOS
FILETES DE ROSCA EM UNIÕES APARAFUSADAS**

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Luersen

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA REGIÃO DOS FILETES DE ROSCA EM UNIÕES APARAFUSADAS", realizado pelos alunos Juraci Vieira Novaes Junior e Ricardo Luiz Luckow, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dra. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Me. João Luiz do Vale
COEME-LD, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 03 de Março de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho a todos que direta ou indiretamente contribuíram para seu desenvolvimento.

Agradecimentos

Apesar de todo o esforço e comprometimento da equipe em realizar esse trabalho, o resultado alcançado não teria se tornado possível sem o apoio que recebemos ao longo deste período. Infelizmente o grande número de envolvidos direta ou indiretamente faz com que não seja possível citar todos de maneira específica, mas sempre seremos gratos a todo o apoio que recebemos.

Como crentes, agradecemos primeiramente a Deus, por ter guiado nosso caminho e ter nos dado inspiração, força e principalmente persistência para que seguissemos determinados em alcançar nossos objetivos.

Queremos agradecer também de modo muito especial ao nosso orientador Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva e ao co-orientador Prof. Dr. Marco Antônio Luersen, por nos guiarem e aconselharem sempre com muita dedicação e entusiasmo.

Agradamos também a CISER Parafusos e Porcas, a maior fabricante de fixadores da América Latina, por nos doar o material necessário para que pudéssemos realizar nosso estudo.

Somos gratos aos professores que compuseram a banca avaliadora, Prof. Dra. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira e Prof. Me. João Luiz do Vale, que dispuseram de seu tempo para avaliar nosso trabalho e sugerir alterações importantes.

Reconhecemos a importância da UTFPR, ao disponibilizar salas, laboratórios e equipamentos que foram essenciais na condução deste trabalho.

E por último, mas não menos importantes, gostaríamos de agradecer aos nossos pais, amigos, familiares e namoradas por nos darem forças através de palavras encorajadoras e por entenderem nossa ausência em tantos momentos ao longo deste ano.

“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções que não davam certo”.

Thomas Alva Edison

RESUMO

NOVAES Jr, J.V.; LUCKOW, R.L. Análise numérica e experimental da região dos filetes de rosca em uniões aparafusadas. 2015. 122f. Monografia (Curso Superior em Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Muitas estruturas e máquinas são montadas por juntas compostas por parafusos e porcas em muitos campos de aplicação com a indústria automotiva, equipamentos industriais, construção e outras. Juntas parafuso e porca as mais fáceis de montar e desmontar do que outros tipos de juntas, tornando-se o fixador mais usado no mundo. Entretanto, a montagem da junta parafuso e porca requer alguns cuidados, principalmente quando é usada em componentes de responsabilidade como vasos de pressão, oleodutos e gasodutos. O presente trabalho mostra algumas considerações a respeito deste tipo de junta e analisa o coeficiente de atrito, propriedade de maior importância em superfícies em contato, na região de contato dos filetes de rosca na união porca e parafuso quando um torque controlado é aplicado. O coeficiente de atrito de diferentes materiais foi encontrado e um programa comercial de elementos finitos foi usado para simular o estado de tensões durante a aplicação de uma força na região de contato. Nos resultados pôde ser observada uma relação entre o coeficiente de torque e o coeficiente de atrito e que muitas variáveis podem interferir no momento do teste. O coeficiente de atrito foi usado como parâmetro de entrada para a simulação por elementos finitos e mostrou uma tendência com o estado de tensões obtido. Também foi projetada uma adaptação para a máquina de testes para que ela possa ser usada em parafusos e porcas de outros tamanhos além dos estudados.

Palavras-chave: Uniões parafuso e porca, coeficiente de atrito, método dos elementos finitos, análise experimental nos filetes de rosca.

ABSTRACT

Many structures and machines are built using bolt and nut joints in different fields like automotive industry, industrial equipment, construction and others. Bolt and nut joints are easier to assemble and disassemble than other types of joints, turning itself the most used fixer in the world. However, the usage of the bolt and nut joint requires some caution, mainly when it is used in responsibility joints like pressure vessels or oil and gas pipelines. The present study shows some considerations about this kind of joint and analyses the friction coefficient, the most important property on surfaces in contact, on the thread contact region between bolt and nuts assemblage when a controlled torque is applied. The friction coefficient of different materials was founded and a commercial finite element code was used to obtain the stress state during the force application on thread contact region. In the results, could be verified that the relation between torque coefficient and friction coefficient are linear and a great number of variables can interfere at the moment of test. The friction coefficient was used as a set parameter to finite element simulation and shows some tendency with stress state obtained. Also an adaptation to the torque test machine has been projected to test another sizes of bolts and nuts.

Key words: Bolted joints, friction coefficient, finite element analysis, experimental analysis in screw thread.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forma de rosca externa padrão e dimensões, conforme as normas ISO e UNS.....	20
Figura 2- Pentes de laminação de roscas.	21
Figura 3 – Demonstração do efeito da velocidade de aplicação do torque sobre o coeficiente de atrito.	23
Figura 4 - Sistema usado para a medição da força aplicada na junta.....	27
Figura 5-Análise de rosca pelo método dos elementos finitos	30
Figura 6 – Dimensões do perfil de rosca externa e interna conforme DIN 13.	33
Figura 7 – Região dos cortes para preparação das amostras.....	34
Figura 8 – Amostra preparada para ensaio de perfilometria	37
Figura 9 - Desenho esquemático do equipamento.....	38
Figura 10 – Resultados dos ensaios de tração para aferição do equipamento com o novo extensômetro.....	40
Figura 11– Modelo geométrico sem simplificação.....	42
Figura 12– Modelo geométrico simplificado.	42
Figura 13 – A região A indica a superfície com restrição de deslocamento.	43
Figura 14 – A região B indica a superfície onde foi aplicada a carga.....	43
Figura 15– Malha gerada com maior refino nas regiões dos filetes de rosca.....	44
Figura 16 – Detalhe da malha nos filetes de rosca do parafuso.....	44
Figura 17– Regiões de contato entre o parafuso e a porca, detectadas automaticamente pelo <i>software</i> Ansys Workbench.....	45
Figura 18– Equipamento de ensaio de torque após a modificação.....	47
Figura 19– Modificação criada para possibilitar o ensaio de parafusos M6 a M14. ..	48
Figura 20 – Perfis de rosca da amostra inox. 20a) porca usinada e 20b) parafuso laminado.....	49
Figura 21–Microestrutura da borda do filete da porca da amostra aço.	50

Figura 22 – Microestrutura deformada na ponta do filete. Amostra zinco.	50
Figura 23 – a) perfil da borda usinada da rosca da porca da amostra aço,	51
Figura 24–Perfil do filete de rosca da amostra latão.	51
Figura 25 – Microestrutura do aço inoxidável 304.....	52
Figura 26–Borda do filete de rosca do parafuso da amostra latão.....	53
Figura 27 – Detalhe da deformação causada na laminação. Amostra aço.	53
Figura 28 – Revestimento das amostras zinco e cromo.....	54
Figura 29–Amostra cromo em corte demonstrando as características dos filetes de rosca da porca.	55
Figura 30 – Desenho esquemático das regiões em que foram avaliadas a dureza. .	56
Figura 31– Durezas das médias e desvios padrões dos parafusos	57
Figura 32 – Durezas médias e desvios padrões das porcas.	58
Figura 33 – Imagem 3D da superfície da amostra inox.....	60
Figura 34 – Coeficientes de torque obtidos.....	63
Figura 35 – Coeficientes de atrito e dispersões obtidos para as amostras inox latão e aço.	66
Figura 36 – Coeficientes de atrito e dispersões obtidos para as amostras aço, zinco e cromo.	67
Figura 37– Ponto de máxima tensão de Von Mises: região de transição entre a cabeça e o corpo do parafuso.....	69
Figura 38– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço inox.	71
Figura 39– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de latão.....	71
Figura 40– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020.	72
Figura 41– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 zincado.....	72

Figura 42– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 bicromatizado.....	73
Figura 43– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço inox.....	74
Figura 44– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de latão.....	74
Figura 45– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço 1020....	75
Figura 46– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço 1020 zincado.....	75
Figura 47– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço 1020 bicromatizado.....	76
Figura 48– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço inox.....	78
Figura 49– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço inox.....	79
Figura 50– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de latão.	80
Figura 51– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de latão.	81
Figura 52– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020.....	82
Figura 53– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020.....	83
Figura 54 – Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 zincado.....	84
Figura 55 – Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 zincado.....	85
Figura 56 – Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 bicromatizado.....	86
Figura 57– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 bicromatizado.....	87

Figura 58– Comparativo entre as tensões médias de vonMises com o coeficiente de atrito.....	89
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de torque K.	26
Tabela 2 - Codificação dos materiais para os ensaios.	33
Tabela 3 – Resultados de microdureza nos parafusos em HV.....	56
Tabela 4 –Microdureza nas porcas em HV.	57
Tabela 5 – Valores de Sa e Sq.....	59
Tabela 6 – Valores de Sds.	59
Tabela 7 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Inox.....	61
Tabela 8 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Latão.....	61
Tabela 9 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Aço.....	62
Tabela 10 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Zinco.	62
Tabela 11 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Cromo.	63
Tabela 12 – Comparação entre os resultados das amostras Inox, Latão e Aço.	65
Tabela 13 – Comparação entre os resultados das amostras Inox, Latão e Aço.	66
Tabela 14–Parâmetros de cada material utilizados na simulação.....	68
Tabela 15–Comparativo entre as tensões máximas de cisalhamento nos filetes de rosca dos parafusos obtidas pelos diferentes métodos de resolução – [MPa]...73	
Tabela 16–Comparativo entre as tensões máximas de cisalhamento nos filetes de rosca das porcas obtidas pelos diferentes métodos de resolução – [MPa].....76	
Tabela 17–Comparativo entre as tensões máximas de cisalhamento no conjunto de latão obtidas de maneiras diferentes.....77	
Tabela 18–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço inox.78	
Tabela 19–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço inox.79	
Tabela 20- Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de latão.....80	
Tabela 21–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de latão.....81	
Tabela 22– Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020...82	
Tabela 23– Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020.....83	

Tabela 24 – Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 zincado.....	84
Tabela 25 –Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 zincado.....	85
Tabela 26–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 bicromatizado.....	86
Tabela 27– Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 bicromatizado.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Uniões aparafusadas	16
1.2	Caracterização do Problema	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo principal	18
1.3.2	Objetivos secundários	18
1.4	Justificativa	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Terminologia e Processos de Fabricação de Roscas	20
2.2	Tensões na região roscada	22
2.3	Atrito nos filetes de rosca de uniões aparafusadas	22
2.4	Coefficiente de torque em parafusos	25
2.5	Obtenção do coeficiente de torque	27
2.6	Pré-carga de junções em tração	28
2.7	Método dos elementos finitos	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Seleção dos Materiais dos Parafusos e Porcas	32
3.2	Caracterização dos Parafusos e Porcas	34
3.2.1	Ensaio metalográfico	34
3.2.2	Ensaio de dureza	36
3.2.3	Caracterização topográfica da superfície do filete de rosca	36
3.3	Ensaio de Torque de Aperto	37
3.4	Análise por Elementos Finitos	41
3.5	Justificativa da Metodologia	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Modificação do Equipamento	47
4.2	Caracterização das amostras	48
4.2.1	Ensaio metalográfico	48

4.2.2	Ensaio de dureza.	55
4.2.3	Caracterização geométrica do filete de rosca.	59
4.3	Ensaio de Torque de Aperto.	60
4.4	Análise por Elementos Finitos	67
4.4.1	Parâmetros da simulação	68
4.4.2	Algumas considerações sobre as simulações	69
4.4.3	Validação do modelo numérico	70
4.4.4	Simulação do conjunto de aço inox	77
4.4.5	Simulação do conjunto de latão	80
4.4.6	Simulação do conjunto de aço 1020	82
4.4.7	Simulação do conjunto de aço 1020 zincado	84
4.4.8	Simulação do conjunto de aço 1020 bicromatizado amarelo	86
4.4.9	Discussões envolvendo a simulação numérica	88
4.5	Discussão sobre os resultados do aço inox	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
5.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	92
6	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A – TUTORIAL ANSYS	99
	APÊNDICE B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO	108
	ANEXO A – PROCEDIMENTO PARA EXECUÇÃO DO ENSAIO	111

1 INTRODUÇÃO

Desde o período pré-histórico, época na qual são datadas as primeiras invenções realizadas pelo homem, existiu-se a necessidade de unir componentes a fim de conferir-lhes determinada função. Um dos utensílios que foi de grande importância para a realização de atividades diárias e para a defesa dos pré-históricos foi o machado, criado fixando-se fragmentos de rocha a pedaços de madeira através de fios vegetais. Estudos apontam que rochas encontradas foram utilizadas como lâminas de corte de machados há aproximadamente 1,76 milhões de anos (NATURE, 2011).

Desde então, a necessidade de fixar um elemento a outro cresceu com o aumento da tecnologia. Esta necessidade fez com que muito se estudasse a respeito dos elementos de fixação, resultando em uma enorme variedade para as mais diversas aplicações, sejam eles de ação mecânica ou química, móveis ou permanentes.

Atualmente, os elementos de fixação estão presentes em praticamente todos os produtos dos mais variados segmentos. Este trabalho se propõe a estudar mais detalhadamente um desses elementos, com grande aplicação comercial e industrial, o par porca-parafuso.

1.1 Uniões aparafusadas

União aparafusada é o nome dado ao par porca-parafuso, algumas vezes com arruela, que tem como objetivo mais comum manter partes unidas. Usados há muito tempo, a data correta para a invenção do parafuso ainda não é confirmada. Porém alguns autores consideram que o parafuso foi inventado por volta de 400 a.C. por Arquitas de Tarento. O que se sabe é que o primeiro documento impresso sobre parafusos é proveniente do século XV. Todavia, só foi patenteado em 1797, quando seu uso já era muito comum em armas de fogo (REVISTA DO PARAFUSO, 2006).

A grande presença de uniões aparafusadas nos mais diversos segmentos se deve ao baixo custo unitário e a facilidade de montagem e desmontagem das partes, ou seja, uniões aparafusadas permitem que os componentes do conjunto possam ser separados sem danos às peças que foram unidas. Outros elementos de

fixação, como rebites e soldas, não permitem a desmontagem com a mesma comodidade. Além disso, parafusos podem ser usados como elementos de fixação para unir peças de qualquer natureza.

Por outro lado, parafusos causam distribuição de tensão não uniforme nas peças ligadas, ou seja, atuam como concentradores de tensão. Este fato deve ser considerado durante o projeto (SHIGLEY, 2005).

Além disso, caso a montagem não seja feita de maneira correta, o parafuso pode se desprender durante o funcionamento do equipamento. Esta situação pode causar sérios danos nos casos em que o torque de aperto for inferior ao necessário. Outra situação da montagem incorreta é que pode promover deformação plástica e perder a sua função, caso o torque de aperto seja superior ao indicado.

Comparando-se as vantagens e desvantagens do parafuso em relação a outros meios de fixação, observa-se que, se tomadas algumas precauções, o parafuso pode ser a melhor solução como elemento de fixação. Por isso que é atualmente utilizado em larga escala na indústria automotiva, indústria aeronáutica, indústria petrolífera, produtos da linha branca, móveis, eletrônicos, máquinas e equipamentos, entre outros segmentos.

1.2 Caracterização do Problema

Conforme visto na seção anterior, uniões aparafusadas podem ser uma boa solução quando se deseja unir componentes para formar um conjunto. Entretanto, para que o resultado final seja satisfatório, é preciso que vários parâmetros sejam bem dimensionados. Por questões de praticidade e custo, o parâmetro industrial que está mais relacionado com a aplicação é o torque de aperto. Como a utilização de torque maior ou menor do que o ideal pode acarretar uma série de problemas ao produto, podendo levar a perda parcial ou total de sua função, este deve ser muito bem dimensionado. No entanto, existe uma grande dificuldade em determinar qual é o torque ideal, sendo necessário conhecer o atrito desenvolvido na região dos filetes de roscas e também no contato da cabeça do parafuso com a peça ou com a arruela.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

- Estudar o valor do coeficiente de atrito nas regiões de filete de rosca para diversos materiais e sua influência direta no coeficiente de torque e indireta no torque de aperto, com base nas informações obtidas por meio de ensaio experimental e simulação numérica.

1.3.2 Objetivos secundários

- Pesquisar conceitos teóricos sobre processos de fabricação de parafusos e porcas, tensões em roscas, atrito na rosca, coeficiente de torque em parafusos, pré-carga e método dos elementos finitos;
- Comprovar a eficiência do equipamento utilizado, desenvolvido por alunos da UTFPR no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC/UTFPR);
- Projetar adaptação do equipamento de teste para que ele possa ser utilizado com outros tipos de parafusos;
- Desenvolver modelo numérico para compreensão do estado de tensões nos filetes de roscas padronizadas para materiais comerciais de parafusos e porcas.

1.4 Justificativa

Conforme visto nas seções anteriores, uniões aparafusadas estão presentes em uma gama muito grande de produtos, nos mais diversos segmentos, sendo assim um item de grande importância comercial. De acordo com o sindicato da categoria, o setor parafuseiro movimenta cerca de 1,2 bilhões de dólares por ano no Brasil (PINHEIRO, 2012), valor baixo se comparado aos 450 milhões de euros que a Böllhoff (um dos mais importantes fornecedores de elementos de fixação) faturou em 2011 (REVISTA DO PARAFUSO, 2014).

Como há uma grande dificuldade em determinar o torque de aperto, que é o parâmetro industrial comumente utilizado nas linhas de montagem, o presente estudo se justifica já que pretende analisar os parâmetros envolvidos, entre eles o

torque de aperto, o coeficiente de atrito e a força axial necessária para manter as partes unidas. Isto fará com que esse conhecimento aprimore o processo e garanta sucesso na montagem.

Haja visto a necessidade crescente da indústria por resultados rápidos e confiáveis, a ferramenta de simulação numérica através de *softwares* especializados tem ocupado um espaço cada vez maior, tornando-se indispensável no desenvolvimentos de novos projetos e no estudo da resistência de materiais e montagens de interesse.

Para tal, considerando a complexidade de assuntos relacionados aos fenômenos de contato, decidiu-se fazer uso de análises numéricas e experimentais, visto que a utilização de dois métodos possibilitará melhores resultados e conclusões mais significativas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Terminologia e Processos de Fabricação de Roscas

Devido a grande utilização de uniões aparafusadas em muitos setores da indústria e a necessidade de substituição e manutenção de peças avariadas ou uniões rompidas, houve a necessidade de padronizar as dimensões das roscas em parafusos e porcas. Isto ocorreu com o intuito de se encontrar o parafuso com as mesmas dimensões em qualquer fabricante, reduzindo tempo de manutenção e o preço dos materiais empregados.

Após a segunda guerra mundial, a normatização das dimensões a serem aplicadas na fabricação das roscas foi feita pela UNS – *Unified National Standards* – para a Inglaterra, Canadá e Estados Unidos. Já o padrão europeu de fabricação foi feita pela ISO – *International Organization for Standardization* – sendo aplicado na maior parte do mundo (NORTON, 2013).

Basicamente, o perfil essencial da rosca não muda de uma norma para outra, ficando a mudança a cargo das dimensões. Enquanto a UNS faz uso da polegada, a ISO utiliza as medidas métricas. Desta forma, a intercambialidade entre parafusos fabricados sobre normas distintas não acontece (NORTON, 2013).

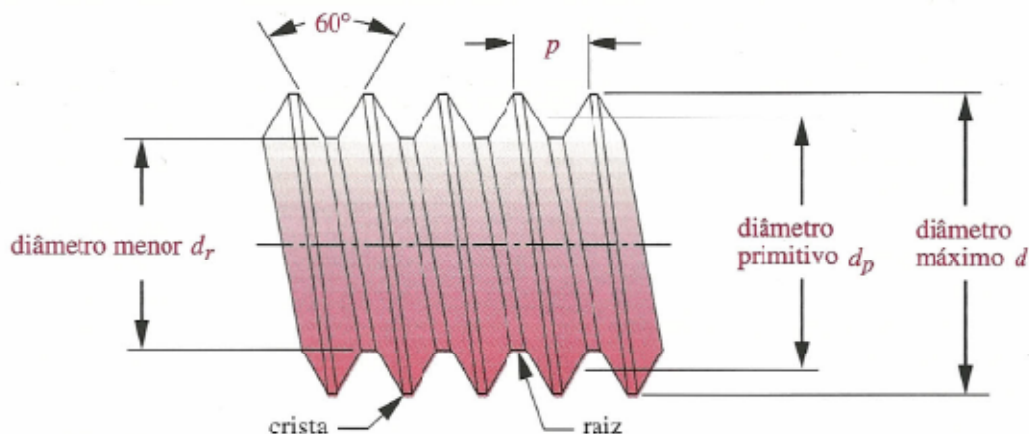


Figura 1 – Forma de rosca externa padrão e dimensões, conforme as normas ISO e UNS.

Fonte: Norton (2013) p. 760.

Na Figura 1 pode-se ver o formato e as dimensões da rosca padronizada tanto para a norma ISO quanto para a UNS, sendo a letra “p” utilizada para indicar o passo.

Quanto ao processo de fabricação de elementos roscados metálicos, pode-se destacar duas formas de fazer roscas: através da laminação, uma operação de conformação onde o material não é removido, mas, deformado para o formato desejado e a usinagem, onde haverá a remoção do material para a confecção da rosca, ocorrendo pouca deformação da região roscada.

A laminação consiste em passar o material entre dois rolos ou pentes, e estes deformarão o metal, dando-lhe a forma desejada. Esta deformação pode ocorrer a quente ou a frio, dependendo das características do processo e do tipo de deformação desejada.

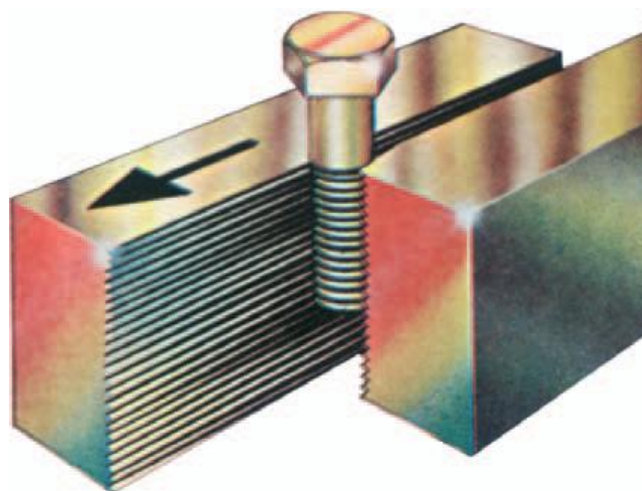


Figura 2- Pentas de laminação de rosca.

Fonte: Revista do Parafuso nº5, 2007.

Essa deformação causará o encruamento do metal e conseqüentemente o aumento da resistência mecânica da região conformada. Esse aumento da resistência se dá devido ao aumento do número de discordâncias na malha cristalina do metal, dificultando a movimentação de outras discordâncias, aumentando assim sua resistência (CALLISTER JR, 2008).

Já nas roscas usinadas, devido à remoção de material, este aumento não é relevante, apesar das forças aplicadas durante o processo de corte e remoção do

material causarem alguma deformação na superfície usinada, gerando um aumento pequeno na dureza (STEMMER, 2007).

2.2 Tensões na região roscada

Em uniões aparafusadas, a região roscada terá que suportar as tensões aplicadas à junção, sendo uma região solicitada durante sua vida útil.

As tensões aplicadas sobre o parafuso são causadas pela pré-carga do parafuso e por tensões externas aplicadas nas peças unidas por aparafusamento. Para suportar todo este carregamento, a escolha do parafuso com dimensões apropriadas é de suma importância para evitar a falha indevida ou precoce da união (CROCOLLO *et al.*, 2012).

Os valores de tensões sobre a região roscada são de difícil obtenção, principalmente devido aos esforços que são aplicados na rosca. Durante o aperto, são geradas tensões de cisalhamento, torcionais e axiais sobre o parafuso, e neste processo é muito difícil determinar a tensão. Depois de apertado, o parafuso irá trabalhar como uma mola de tração, mantendo as peças unidas (ASM HANDBOOK vol. 8, 2000). Essa força de mola atuará diretamente nos filetes de rosca que deverão resistir para manter a união estável.

Esta força capaz de manter as partes unidas pode ser determinada através de uma relação indireta entre os coeficientes de atrito das partes em contato durante o aperto e o torque aplicado inicialmente, também chamado de pré-carga. Estas regiões de contato podem ser planas, como a base da porca em contato com a peça ou a arruela e a cabeça do parafuso, ou em ângulo, como a região dos filetes de rosca. A força de união pode ser obtida também através do ângulo de aperto, desde que conhecidas as especificações de dimensão dos parafusos (ISO 16047, 2005).

2.3 Atrito nos filetes de rosca de uniões aparafusadas

O atrito é o fator que mais afeta o coeficiente de torque e sua relação com o torque e a força de aperto que é aplicada nas peças unidas pelo conjunto porca-parafuso. O atrito no parafuso tem relação direta com a velocidade com que o torque é aplicado, sendo esta a primeira contribuição no processo de aparafusamento. A

segunda contribuição para o coeficiente de atrito é dada pela qualidade do acabamento das superfícies que estão em contato e na interação entre essas superfícies (CORNWELL, 1981).

Como se pode observar na Figura 3, a velocidade de aplicação do torque influencia de forma descontínua, aumentando o coeficiente de atrito para valores maiores que 0,4 com o aumento da velocidade e com efeito inverso para coeficientes de atrito menores que 0,4.

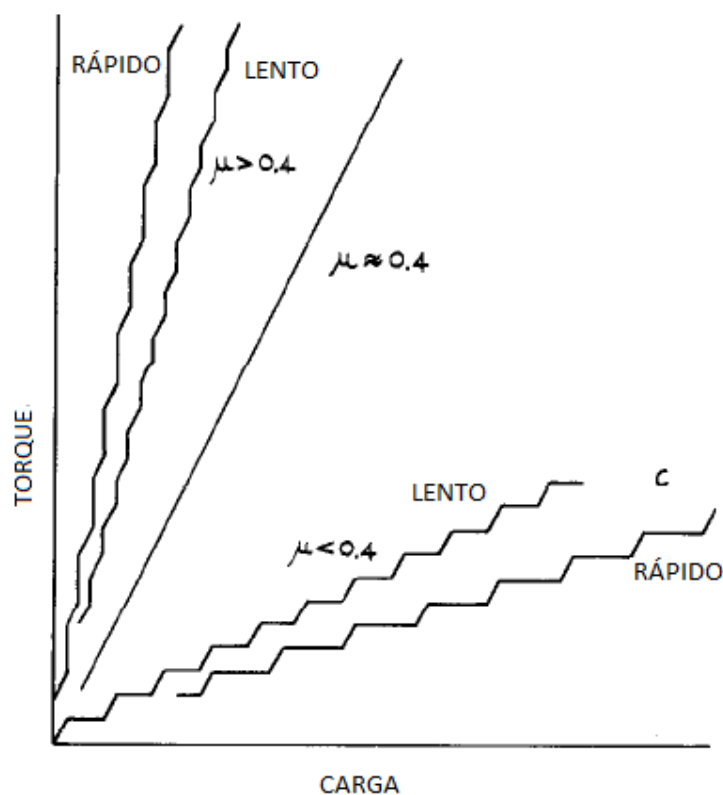


Figura 3 – Demonstração do efeito da velocidade de aplicação do torque sobre o coeficiente de atrito.

Fonte: CORNWELL, 1981, p. 336.

A norma ISO 16047 (2005) trata da metodologia para obtenção dos coeficientes de atrito que atuam durante o aparafusamento. Segundo a norma, o coeficiente de atrito total é:

$$\mu_{tot} = \frac{\frac{T}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0,577d_2 + 0,5D_b}$$

Equação 1

Onde F é a força de união gerada no aparafusamento, P é o passo da rosca, T é o torque aplicado, d_2 é o diâmetro primitivo da região roscada, D_b é o diâmetro da superfície de contato sob a porca ou arruela e μ_{tot} é o coeficiente de atrito total.

Mas também pode-se obter o coeficiente de atrito separadamente para as regiões de contato entre as superfícies planas e para as regiões das roscas, conforme mostram as Equações 2 e 3 respectivamente:

$$\mu_b = \frac{T_b}{0,5D_b F}$$

Equação 2

$$\mu_{th} = \frac{\frac{T_{th}}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0,577d_2}$$

Equação 3

Onde tem-se:

$$D_b = \frac{D_o + d_h}{2}$$

Equação 4

Onde D_o é o diâmetro da superfície sob a porca ou cabeça do parafuso, d_h é o diâmetro do furo da peça ou da arruela, T_b é o torque de atrito da superfície plana em contato, T_{th} é o torque de atrito nos filetes de rosca em contato, μ_{th} é o coeficiente de atrito da região roscada e μ_b é o coeficiente de atrito da região plana de contato.

Através destas análises, verifica-se que o torque aplicado tem uma relação indireta com o coeficiente de atrito global na união aparafusada. A norma ainda apresenta uma equação para o cálculo do torque aplicado, conforme segue:

$$T = F \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{P + 1,154 \times \pi \times \mu_{th} \times d_2}{\pi - 1,154 \times \mu_{th} \times \frac{P}{d_2}} + \mu_b \times \frac{D_o + d_h}{4} \right]$$

Equação 5

Para a redução do atrito nestas uniões costuma-se aplicar algum tipo de lubrificante, aumentando assim a transferência total de torque para a força de união da junta. O uso do lubrificante correto pode reduzir o atrito na rosca aumentando o valor da força na pré-carga aplicada ao parafuso para um mesmo torque (CROCCOLO *et al.*, 2011).

Outras equações também foram desenvolvidas para analisar o coeficiente de atrito nas regiões dos filetes de rosca em materiais específicos. Crococolo *et al.* (2012) desenvolveram sua equação partindo das equações dadas pela ISO 16047 (2005) para parafusos de titânio aplicados na indústria (equação 6).

$$\mu_{tot} = \frac{T/F - 0,16P}{0,58d_2 + 0,5D_b} \quad \text{Equação 6}$$

2.4 Coeficiente de torque em parafusos

O coeficiente de torque é um parâmetro comum em parafusos que sofrem pré-carga com o objetivo de resistir às tensões durante a operação. A pré-carga é um fator importante para o projeto de uniões aparafusadas e na seleção do parafuso (NORTON, 2013). Existem muitos meios de se medir essa pré-carga aplicada, desde que se tenha acesso ao parafuso.

Um dos métodos é através do controle do torque aplicado ao parafuso e que este, através da rosca, transforma em força axial de tração no parafuso que comprime a junta. Essa transformação pode ser medida uma vez que se conheçam as dimensões do parafuso e, segundo Norton (2013), pode ser calculada da seguinte forma:

$$T_i \cong F_i \frac{d (\mu_{th} + \tan \lambda \cos \alpha)}{2 (\cos \alpha - \mu_{th} \tan \lambda)} + F_i \frac{(1 + 1,5)d}{4} \mu_b \quad \text{Equação 7}$$

Onde T_i é o torque aplicado e F_i é a força axial que atua no parafuso. Partindo desta equação tem-se que, ao isolar a força F_i presente nos dois termos, encontra-se um fator conhecido como coeficiente de torque K , dado por:

$$K_i \cong \left[0,50 \frac{(\mu_{th} + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu_{th} \tan \lambda)} + 0,625 \mu_b \right] \quad \text{Equação 8}$$

Onde α é o ângulo do filete de rosca e λ é o ângulo de hélice do parafuso.

Através destas equações nota-se que o conhecimento dos coeficientes de atrito envolvidos é de suma importância para o projeto e seleção de uma união aparafusada (HAGIWARA *et al.*, 2009).

Este equacionamento normalmente aparece de forma simplificada em muitos trabalhos e livros, com o seguinte formato:

$$T_i \cong K_i F_i d$$

Equação 9

Onde d é o diâmetro primitivo da região da rosca.

Alguns autores e normas estipulam um valor próximo a 0,20 para o coeficiente de torque, todavia este valor não deve ser tomado como uma regra, principalmente para juntas de alta responsabilidade, onde um método mais criterioso de controle da força de união é recomendado (CROCCOLO *et al.*, 2011).

Tabela 1 – Coeficientes de torque K.

		COEFICIENTE DE ATRITO NA CABEÇA							
		Passo	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,16
COEFICIENTE DE ATRITO NA ROSCA	0,08	Normal	0,117	0,123	0,130	0,143	0,155	0,162	0,168
	0,08	Fino	0,114	0,121	0,127	0,140	0,153	0,159	0,166
	0,09	Normal	0,122	0,128	0,135	0,148	0,161	0,167	0,174
	0,09	Fino	0,119	0,126	0,132	0,145	0,158	0,164	0,171
	0,10	Normal	0,127	0,134	0,140	0,153	0,166	0,172	0,179
	0,10	Fino	0,125	0,131	0,138	0,150	0,163	0,170	0,176

Fonte: Metalac – Catálogo de fixadores (2008) p 48.

Na Tabela 1 podem-se verificar os coeficientes de torque e como eles variam de acordo com o atrito na região de rosca e da base do parafuso. Percebe-se que quanto maior o atrito nestas regiões, maior é o coeficiente de torque.

Existem várias pesquisas direcionadas a fim de obter os coeficientes de atrito das regiões de contato em uma junta aparafusada, e desta forma o coeficiente de torque. É um consenso entre os pesquisadores que o coeficiente de atrito é o principal fator de influência no coeficiente de torque. Eccles *et al.* (2010) perceberam em seu trabalho que o valor da pré-carga aumenta a cada vez que você solta e novamente aplica o mesmo torque para um mesmo conjunto porca-parafuso, chegando a um limite onde não há mais interferência após a quinta ou sexta

repetição. O mecanismo pelo qual isso acontece está associado ao desgaste durante o atrito entre as superfícies, mas não está totalmente compreendido (ECCLES *et al.*, 2010).

2.5 Obtenção do coeficiente de torque

Conforme descrito, existem equacionamentos para a obtenção do coeficiente de torque, porém o método para a medição das variáveis necessárias pode variar de acordo com os equipamentos e tecnologias disponíveis.

A maioria dos trabalhos realizados com o intuito de se estudar os coeficientes de atrito e sua interferência na pré-carga aplicada se baseiam em equipamentos simples equipados com extensômetros, conforme mostra a Figura 4.

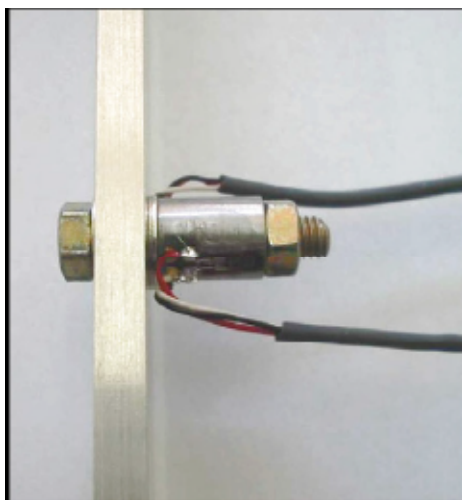


Figura 4 - Sistema usado para a medição da força aplicada na junta.

Fonte: Oskoueietal (2009) p. 326

Na Figura 4 podem-se observar fios conectados aos extensômetros que são dois, um em cada lado, com o intuito de garantir uma medida precisa da deformação durante o teste.

Com o intuito de desenvolver um novo equipamento que efetuasse estas medições conforme a norma ISO 16047 (2005), Hagiwara *et al.*(2009) desenvolveram um equipamento com sensores piezoelétricos. Estes sensores foram escolhidos principalmente devido a sua rigidez e por sua grande resolução na medição de esforços aplicados sobre ele. O equipamento desenvolvido mostrou-se

eficaz e que pode ser promissor nas medições das tensões aplicadas durante o aperto das juntas aparafusadas.

Neste mesmo caminho, Lucachewski *et al.* (2013) desenvolveram um equipamento baseado em um extensômetro capaz de medir com boa precisão a força aplicada sobre um parafuso durante a aplicação da pré-carga.

2.6 Pré-carga de junções em tração

O objetivo principal do par porca-parafuso é manter partes unidas. Para que essa função seja desempenhada de maneira correta é preciso que não haja afrouxamento do parafuso quando este estiver em uso, ou seja, sob carga. A fim de evitar que o parafuso afrouxe, é preciso submetê-lo a um carregamento inicial, mais conhecido como pré-carga. Desta forma a união aparafusada irá suportar as cargas que serão solicitadas nas uniões aparafusadas sob tração (NORTON, 2013).

Para que o par porca-parafuso desempenhe corretamente sua função, é preciso que o valor de pré-carga seja determinado de maneira correta, já que um valor abaixo ou acima do ideal pode permitir o afrouxamento do parafuso ou deformação plástica e possível perda de função, respectivamente.

Para que a junta se mantenha estável quando solicitada, é aplicada uma força inicial, também conhecida por pré-carga, aplicada em uniões aparafusadas sob tração. Devido principalmente ao comportamento elástico da junta, são aplicadas altas pré-cargas, ficando aproximadamente entre 75% e 90% da carga de prova do parafuso (NORTON, 2013).

O atrito pode sofrer influência de muito outros fatores como o acabamento superficial destas regiões, o uso de lubrificantes, a condição de limpeza e outras. Segundo Garcia (2011), quanto menor o atrito na região da rosca, maior é o rendimento e maior é a transferência de energia do torque aplicado para a força axial de tração, que vai unir as peças de interesse.

Tendo noção da importância da correta aplicação da pré-carga no sucesso da montagem, necessita-se de um método para controlar esse carregamento. Existem maneiras precisas de assegurar esse valor, através de um micrômetro ou medidor eletrônico de comprimento. Porém esses métodos requerem que ambas as extremidades sejam acessíveis, fato que restringe sua utilização em alguns casos.

Outro método menos preciso, porém, mais fácil de ser aplicado, consiste em controlar o torque aplicado na união através de um torquímetro. Apesar de mais prático, esse método apresenta um erro de até $\pm 30\%$, podendo cair pela metade se as roscas forem lubrificadas. Isto pode ser atribuído as irregularidades nas superfícies em contato durante o aparafusamento e a presença de resíduos na rosca (NORTON, 2013).

A equação que relaciona os parâmetros que serão utilizados é a Equação 7. Portanto, através dessa equação, conhecendo-se os valores relacionados à geometria do parafuso estudado, pode-se relacionar pré-carga, torque e coeficientes de atrito.

2.7 Método dos elementos finitos

Atualmente o método dos elementos finitos tem grande participação em várias áreas das engenharias, sendo muito aplicado na mecânica estrutural, mecânica dos fluídos, eletromagnetismo, entre outros. No âmbito de estudo da mecânica estrutural, é muito utilizado na determinação do estado de tensões e deformações de sólidos com geometrias arbitrárias e sob a ação de influências externas.

Porém, antes do surgimento do método dos elementos finitos, a análise dos meios contínuos era feita através da resolução direta de sistemas de equações de derivadas parciais, que representam o fenômeno levando em consideração as condições de contorno. Como esse tipo de sistema é de alta complexidade só era possível a aplicação a corpos com geometrias simples, mesmo assim sendo muitas vezes necessário substituir derivadas exatas por aproximadas, calculadas através de malhas de pontos. Do uso dessa técnica surgiu o método dos elementos finitos, que havia como grande inconveniente a dificuldade na resolução de grandes sistemas de equações lineares (AZEVEDO, 2003).

Não se conhece ao certo quando ocorreu o surgimento do método dos elementos finitos, o que se sabe é que uma das primeiras publicações onde o método foi citado é de 1956 em um artigo de Turner *et al.* (1956). A partir daí a evolução e frequência em que o método passou a ser utilizado tem relação direta com o avanço da informática. Foi no final da década de 1980 e década de 1990,

com a difusão do computador, que projetistas passaram a utilizá-lo mais corriqueiramente.

Atualmente, *softwares* comerciais para aplicação do método dos elementos finitos são amplamente utilizados. Todavia deve-se ressaltar que apesar da comodidade trazida com o avanço da tecnologia, é preciso ficar atento com falhas frequentes na utilização desses *softwares*, tais como erros na introdução de dados, erros durante as considerações e simplificações e erros na análise do resultado (NORTON, 2013).

Na aplicação do método dos elementos finitos em uniões aparafusadas é importante avaliar quais influências serão consideradas e quais simplificações são possíveis. É preciso modelar de maneira correta e considerar que nas regiões mais críticas, como nos filetes de rosca, é preciso que a malha seja refinada para melhorar a precisão dos resultados (MACEDO, 2009).



Figura 5-Análise de rosca pelo método dos elementos finitos

Fonte: DINGER *et al.*(2011) p. 2197.

Na Figura 5 pode-se observar a malha refinada na região de rosca, e os pontos de contato da rosca variando do azul ao vermelho, indicando onde há maiores esforços, neste caso representado pela cor vermelha.

Em seus estudos, Zhao (1994) utilizou um modelo numérico para o estudo das tensões e deformações na região de contato da rosca. Ele concluiu que o ângulo da rosca tem pouca influência sobre o coeficiente de atrito nesta região e que para

parafusos e porcas com ângulos de hélice pequenos é razoável assumir que a tensão em toda a região da rosca no contato porca-parafuso é uniforme.

A pré-carga também foi objeto de estudo pelo método dos elementos finitos. Izumi *et al.* (2005) fizeram análises com um modelo tridimensional do métodos de elementos finitos de uniões roscadas. As conclusões do trabalho foram de que o os resultados do modelo se assemelharam aos equacionamentos da mecânica dos materiais, equiparando os resultados experimental e numérico.

Modelos tridimensionais de elementos finitos também foram utilizados para medir o enfraquecimento ou afrouxamento das uniões aparafusadas com resultados bastante satisfatórios. Dinger *et al* (2011) constataram que as perdas de força da união obtidas por simulação numérica corresponderam àquelas obtidas experimentalmente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram realizadas quatro etapas para estudo e obtenção de resultados para que fossem atingidos os objetivos propostos.

Na etapa inicial foi efetuado um levantamento quanto aos materiais mais aplicados na fabricação de parafusos, bem como a aplicação do mesmo na indústria. Desta forma foram selecionados os parafusos para o trabalho. Quanto às dimensões, estas foram restringidas pelo equipamento em que foi realizado o ensaio. O equipamento permite que parafusos de cabeça sextavada e de rosca M8 sejam ensaiados, exigindo ainda um comprimento mínimo de 60 mm do parafuso para que encaixe na máquina.

Na segunda etapa, ocorreu a caracterização dos parafusos, que buscou obter dados sobre o processo de fabricação e dados complementares importantes para o desenvolvimento do trabalho, como a medição da rugosidade dos filetes de rosca da porca e do parafuso.

Em uma terceira etapa, foram realizados os ensaios de torque de aperto nos parafusos e porcas, com o objetivo de obter resultados sobre o atrito nos filetes de rosca e seus efeitos na relação entre o torque aplicado e a força axial no parafuso.

Na quarta etapa, os dados obtidos nas demais etapas, como a força axial aplicada e o coeficiente de atrito obtido, serviram como entrada de dados para a análise numérica das tensões na região roscada. Esta análise permitiu uma avaliação de como reage esta região frente às forças aplicadas e a variação de materiais e de tipos de recobrimentos usualmente aplicados em parafusos e porcas.

3.1 Seleção dos Materiais dos Parafusos e Porcas

Após uma intensiva busca junto aos sites de fabricantes de parafusos, foi verificado que existem inúmeros tipos de parafusos e de tratamentos de superfície, para as mais variadas aplicações.

Alguns parafusos são fabricados para usos especiais, tendo as dimensões exclusivas para a aplicação desejada, não sendo possível sua seleção para o trabalho.

A dimensão dos parafusos foi um fator limitante na escolha dos conjuntos porca-parafuso para o trabalho. A máquina de ensaio tem sua capacidade limitada em função das dimensões de fabricação da mesma. Desta forma foram selecionados parafusos e porcas com especificação de rosca conforme DIN 13 M-08, com exceção dos parafusos e porcas de latão, que tem especificação de rosca conforme 5/16 UNC – 2A (FISCHER *et al.*, 2008). Na Figura 6, pode-se observar o padrão de dimensões usado na confecção de roscas internas e externas conforme a norma DIN 13.

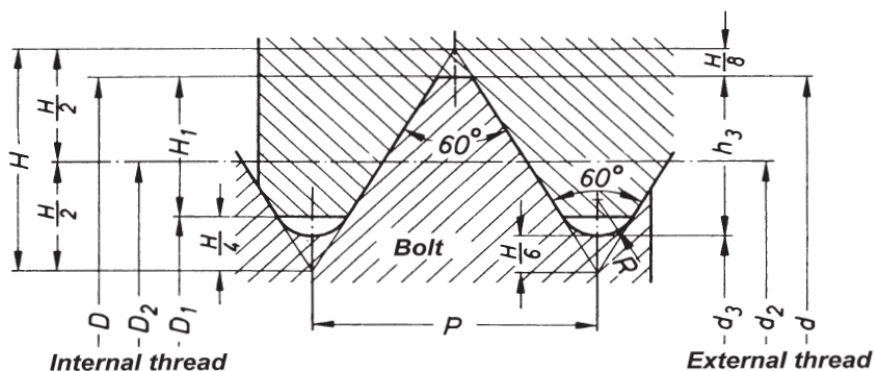


Figura 6 – Dimensões do perfil de rosca externa e interna conforme DIN 13.

Fonte: Scholz Mechanik – Catálogo geral de peças, p. 9.

Com o intuito de facilitar e organizar as amostras, estas foram marcadas com códigos conforme a Tabela 2 e demonstrado na Figura 6.

Tabela 2 - Codificação dos materiais para os ensaios.

MATERIAL DO CONJUNTO PARAFUSO – PORCA	CÓDIGO
Aço Inoxidável 304	Inox
Latão	Latão
Aço Baixo Carbono	Aço
Aço Baixo Carbono Zincado Branco	Zinco
Aço Baixo Carbono Bicromatizado	Cromo

Fonte: Autoria própria.

3.2 Caracterização dos Parafusos e Porcas

A caracterização dos parafusos e porcas teve o objetivo de verificar o processo de fabricação e também as condições do filete de rosca. Para isto, foram realizados ensaios metalográficos e de dureza e análise da condição da superfície do filete de rosca mediante o uso de perfilômetro óptico 3D sem contato.

3.2.1 Ensaio metalográfico

As amostras de parafusos foram cortadas no sentido longitudinal, conforme mostrado na Figura 7, de forma a expor o perfil da rosca e propiciar a análise desta região. Igualmente foi feito com as porcas, para que pudesse ser analisada a região da rosca. Para este ensaio foi utilizado um conjunto porca-parafuso de cada material.



Figura 7 – Região dos cortes para preparação das amostras.

Fonte: Autoria própria.

Com a finalidade de reduzir as variáveis neste ensaio, os parafusos e porcas de cada material foram tratados como homogêneos, sem desvios de forma ou composição. Sendo assim uma amostra de cada conjunto foi representativa.

Após o corte das amostras, elas foram embutidas em baquelite, lixadas e polidas e atacadas quimicamente para revelar as microestruturas e os contornos de grão. Após o ataque as amostras foram observadas em microscópio óptico para avaliação dos contornos de grão principalmente na região dos filetes de rosca, onde

deverá ser evidenciado o processo de fabricação e poderá se ter uma noção da resistência desta região.

Os equipamentos utilizados neste processo foram Lixadeira Struers modelo Knuth Rotor, embutidora metalográfica Teclago modelo Auto EM30D, politriz Struers modelo Dap – V, máquina de corte Arotec modelo Arocor 60, microscópio óptico Olympus modelo BX 51M e *software* integrado de aquisição de imagens Image-Pro Plus versão 4.5.

As soluções utilizadas para o ataque químico foram Nital2% para as amostras aço, zinco e cromo, todas fabricadas em aço baixo carbono, Solução de cloreto férrico 5% para a amostra latão fabricada em latão e Solução de Marble para a amostra inox, fabricada em aço inox 304.

Após a avaliação da microestrutura, foi identificada na porca uma deformação diferenciada devido ao processo de usinagem. Essa deformação poderia influenciar diretamente nos resultados de coeficiente de torque obtidos.

Com o intuito de padronizar o lado da porca que entrou em contato durante o ensaio de torque de aperto, foi verificado um método para identificar o lado da porca mais adequado para o ensaio de torque. Para este procedimento foram utilizadas 3(três) porcas de cada conjunto, onde foi verificado e marcado o lado da porca em que acreditou ser o mais adequado.

Após marcadas, duas das três porcas foram cortadas e avaliadas quanto ao lado do filete de rosca com maior deformação e o lado mais plano para a realização do ensaio de torque. Partindo deste resultado, as demais porcas de todas as amostras foram marcadas para padronizar o lado da porca que ficou em contato durante o ensaio de torque de aperto, buscando o lado do filete de rosca com a menor deformação.

Para esta análise foi utilizada a cortadora metalográfica já citada, uma lupa para a identificação do lado da porca e o microscópio Olympus SZX10 com *software* integrado para captura de imagens.

3.2.2 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado em Microdurômetro Vickers Shimadzu modelo HMV-2, com carga de 0,2 kg, aproveitando a amostra previamente embutida em baquelite. Foram feitas impressões na região central da amostra, buscando parametrizar a dureza do material e também na região do filete de rosca, verificando como o processo de fabricação pode interferir na resistência desta região, quando ela for submetida ao teste de torque de aperto.

3.2.3 Caracterização topográfica da superfície do filete de rosca

Para este ensaio foi necessária a utilização de outro conjunto porca-parafuso para que seja cortado conforme a necessidade para a leitura do equipamento.

Este ensaio foi realizado em perfilômetro óptico 3D sem contato, da marca Taylor Hobson modelo CCI Lite, onde foi obtido o perfil de rugosidade da região do filete de rosca através da técnica de interferometria de luz branca.

Os ensaios de avaliação da superfície dos filetes de rosca foram realizados apenas nos parafusos, devido à dificuldade em preparar a amostra e suportá-la para o ensaio, o que tornou inviável a preparação das porcas para a realização de ensaios com resultados confiáveis.

Vale salientar que a análise dos parafusos demandou grande tempo de preparação das amostras e a realização de vários testes de diferentes formas para suportar as amostras de forma a expor a região de interesse. Por este motivo foram conseguidas apenas duas medidas por parafuso.

Os ensaios dos parafusos foram realizados por interferometria, cobrindo uma área com dimensões de 325 x 325 μm , em uma amostra de cada material.

A preparação das amostras envolveu o corte e lixamento de forma a expor o filete de rosca para a realização do ensaio, conforme seta indicativa na Figura 8.



Figura 8 – Amostra preparada para ensaio de perfilometria

Fonte: A autoria própria.

Os ensaios de perfilometria e rugosidade em três dimensões apresentam muitos parâmetros, mas apenas uma parte é aplicável ao estudo de superfícies em contato, que relacionam a rugosidade da superfície e seus desvios.

3.3 Ensaio de Torque de Aperto

Este ensaio foi realizado em equipamento construído por alunos do curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial que o desenvolveram como trabalho de conclusão de curso sob o título de “Projeto de um protótipo para medir força em uniões aparafusadas” de Lucacheuski *et al.* (2013).

De forma sucinta, o equipamento faz a leitura da força axial aplicada no parafuso durante o torque de aperto do mesmo. Essa força é medida através de um extensômetro elétrico que transforma a deformação mecânica em resistência elétrica. O extensômetro foi instalado em uma chapa delgada de aço AISI 1020, com módulo de elasticidade e outras propriedades conhecidas. Através da variação da resistência elétrica, um circuito faz a conversão desta resistência elétrica em tensão na chapa delgada que tem área conhecida. Desta forma pode-se chegar à força que está sendo aplicada sobre o extensômetro e assim, no parafuso. A Figura 9 mostra como o equipamento é montado.

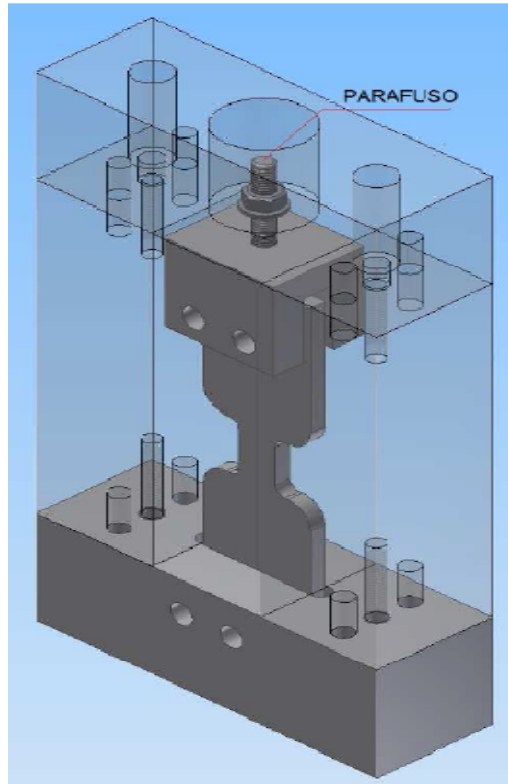


Figura 9 - Desenho esquemático do equipamento.

Fonte: LUCACHEUSKI *et al.* (2013).

Durante a montagem, com intuito de reduzir as variáveis do processo, a arruela na parte superior será substituída por um rolamento axial da NSK rolamentos, código 51200. Essa substituição visa manter constante o atrito na interface porca arruela, fazendo com que este atrito seja pré-determinado, reduzindo sua interferência no estudo. Segundo o catálogo do fabricante, o coeficiente de atrito deste rolamento é de 0,0011, um valor pequeno se comparado com o atrito arruela-porca. Assim reduz-se a perda de torque na região de contato arruela-porca, e por tornar esse valor conhecido, resta avaliar apenas a região de atrito entre os filetes de rosca da porca e do parafuso.

O equipamento mostra os resultados de força axial aplicada no parafuso, que será relacionado com o torque aplicado através da Equação 9, onde pode ser obtido então o coeficiente de torque.

O coeficiente de atrito nesta região está diretamente ligado com o coeficiente de torque K, sendo o elemento de maior influência nas perdas do torque aplicado na pré-carga de uniões aparafusadas, como pode ser visto na Equação 8.

Segundo a norma ISO IEC 16047 (2005), para a realização de ensaios para a obtenção do coeficiente de torque K, “*as superfícies de teste devem estar desengraxadas e limpas, isentas de qualquer tipo de substância que possa causar danos a superfície e interferir nos resultados*”. Isto posto, as amostras foram limpas com álcool etílico antes do ensaio e secas através da sopragem de ar levemente aquecido, garantindo assim a limpeza das regiões de interesse.

Para a obtenção do coeficiente de torque é necessário obter primeiro os coeficientes de atrito das regiões em contato durante a aplicação do torque. Como a região de contato plana entre a porca e a arruela será reduzida através da colocação de um rolamento com coeficiente de atrito conhecido, resta apenas o atrito nos filetes de rosca, podendo-se usar a Equação 3 proposta pela norma ISO 16047 (2005) ou a Equação 7 proposta por Norton (2013) e descobrir seu valor numérico.

Conforme observado na fundamentação teórica, a velocidade de aplicação do torque influencia o coeficiente de torque e, desta forma, o coeficiente de atrito. Para padronização dos ensaios foi definida a velocidade de 3 rotações por minuto, tendo assim aproximadamente 1 volta a cada 20 segundos.

O torque a ser aplicado nos parafusos durante os ensaios de torque de aperto foi determinado de acordo com a resistência dos parafusos. O parafuso de latão apresenta, dentre os parafusos ensaiados, o menor valor do limite de resistência elástico, próximo dos 13 KN segundo o fabricante, e perto de 12 KN segundo a bibliografia (FISCHER *et al.*, 2008).

Para os ensaios de torque, foi determinado o valor de 75% do limite elástico (NORTON, 2013), sendo fixado o valor de referência de 9 KN como a carga a ser atingida durante os ensaios.

Durante os ensaios preliminares, foi percebida a falta de repetibilidade do equipamento, e o mesmo apresentava alguns resultados que não condiziam com a situação real da força aplicada. Desta forma foi providenciado um novo extensômetro para substituição na célula de carga.

Esta substituição exigiu que fosse realizado um procedimento de verificação e calibração da célula de carga juntamente com a parte eletrônica do equipamento, para garantir a veracidade dos resultados.

A substituição do extensômetro foi realizada conforme Lucacheuski *et al.* (2013), usando como adesivo a cola de éster de cianoacrilato e efetuando a ligação elétrica no extensômetro no cabo de conexão com o equipamento através de soldagem com estanho. Isto garantiu a conexão elétrica e evitou erros por mau contato.

Após o tempo de cura da cola, foram realizados testes de tração na célula de carga. Concomitantemente foram feitos ajustes no equipamento eletrônico de acordo com a força mostrada no equipamento de tração. Estes ajustes foram feitos aumentando ou reduzindo o ganho no equipamento, conforme citado por Lucacheuski *et al.* (2013).

Para definir a carga aplicada no ensaio de tração, foi utilizado o valor da carga obtido dos ensaios de torque de aperto como parâmetro. Foi estabelecida então a carga de 10 KN como padrão para o procedimento de ajuste do equipamento.

A Figura 10 mostra as curvas obtidas na máquina de tração durante o procedimento.

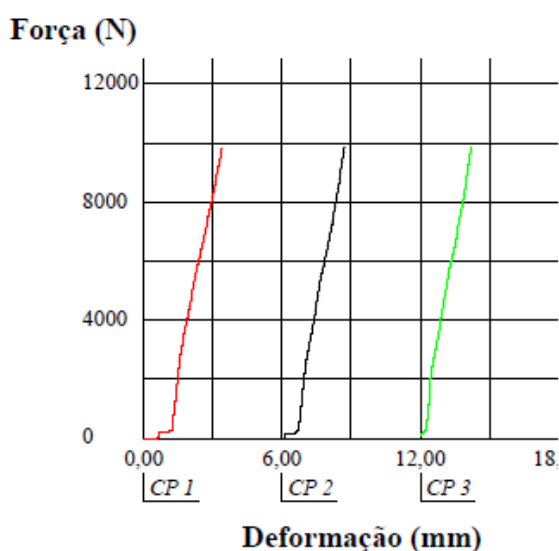


Figura 10 – Resultados dos ensaios de tração para aferição do equipamento com o novo extensômetro.

Fonte: A autoria própria.

Uma vez realizados os ajustes no equipamento, foram reiniciados os testes preliminares para verificar a repetibilidade do equipamento.

Verificada a repetibilidade do equipamento com o novo extensômetro, foram procedidos os ensaios de torque de aperto dos parafusos e porcas. Foram selecionados sete conjuntos de cada material para a realização dos ensaios, onde serão descartados os dois resultados mais discrepantes. Este procedimento busca obter os melhores resultados e reduzir interferências externas no ensaio, como velocidade de aplicação do torque entre outros.

3.4 Análise por Elementos Finitos

Nesta etapa, alguns dos dados obtidos até aqui serviram como entrada para a análise por elementos finitos da região roscada. Esta análise foi realizada utilizando o *software* ANSYS, e teve como objetivo visualizar os campos de tensão na região dos filetes de rosca.

Considerando que a literatura informa que somente alguns filetes de rosca suportam toda a carga aplicada aos parafusos, o modelo numérico poderá corroborar esta informação.

Antes de realizar as simulações foi preciso avaliar quais condições deveriam ser controladas, quais simplificações seriam possíveis e quais parâmetros deveriam ser inseridos.

Em um primeiro momento buscou-se utilizar o modelo de parafuso e porca contido na biblioteca do SolidWorks, porém a biblioteca possui apenas uma simplificação dos componentes, que apresenta os filetes de rosca como sendo vários rebaxos lineares. A fim de obter um modelo mais realista, os componentes foram modelados com rosca helicoidal, seguindo as medidas de filete de rosca fornecidas por norma. Além disso, para reduzir o número de elementos finitos e melhorar o desempenho computacional, o parafuso foi simplificado para apresentar rosca apenas onde haveria de fato contato com a porca e teve a altura de sua cabeça reduzida, por não se tratar da região de interesse. O modelo geométrico sem simplificação pode ser visto na Figura 11, enquanto que o modelo simplificado pode ser visto na Figura 12.

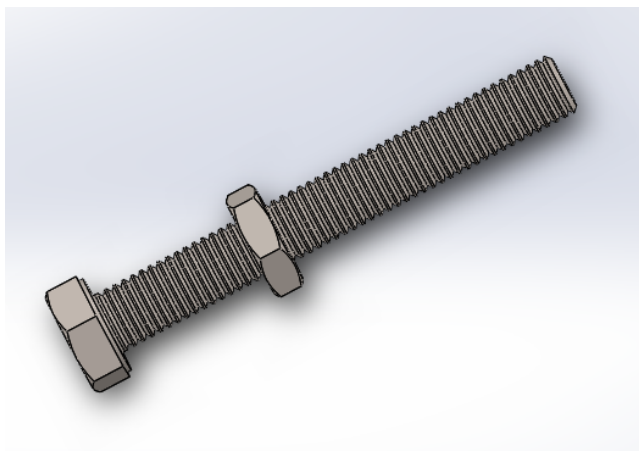


Figura 11– Modelo geométrico sem simplificação.

Fonte: Autoria própria.

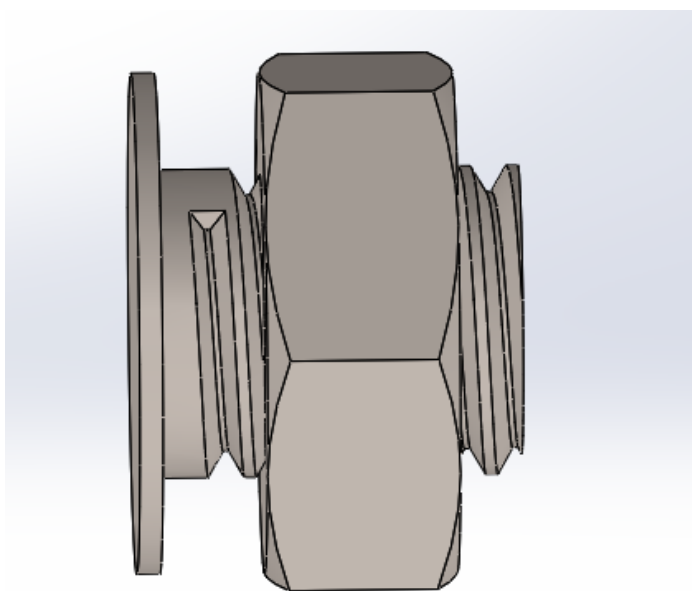


Figura 12– Modelo geométrico simplificado.

Fonte: Autoria própria.

As condições de restrição de deslocamento e forças impostas no modelo de elementos finitos foram definidas de maneira a representar o que ocorreu durante o ensaio experimental, conforme pode ser visto na Figura 13 e 14, respectivamente. Sendo que a magnitude da força utilizada foi o valor médio das 5 forças consideradas no ensaio experimental de cada material.

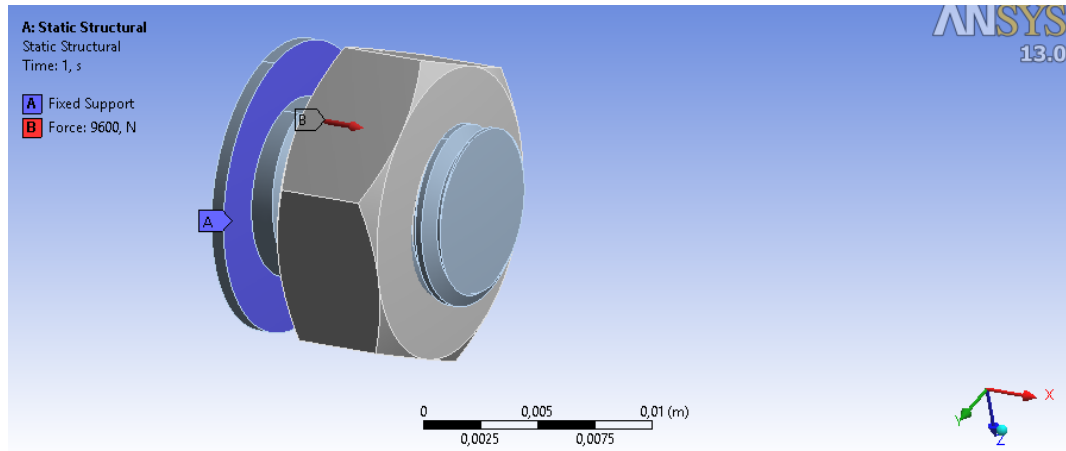


Figura 13 – A região A indica a superfície com restrição de deslocamento.

Fonte: Autoria própria.

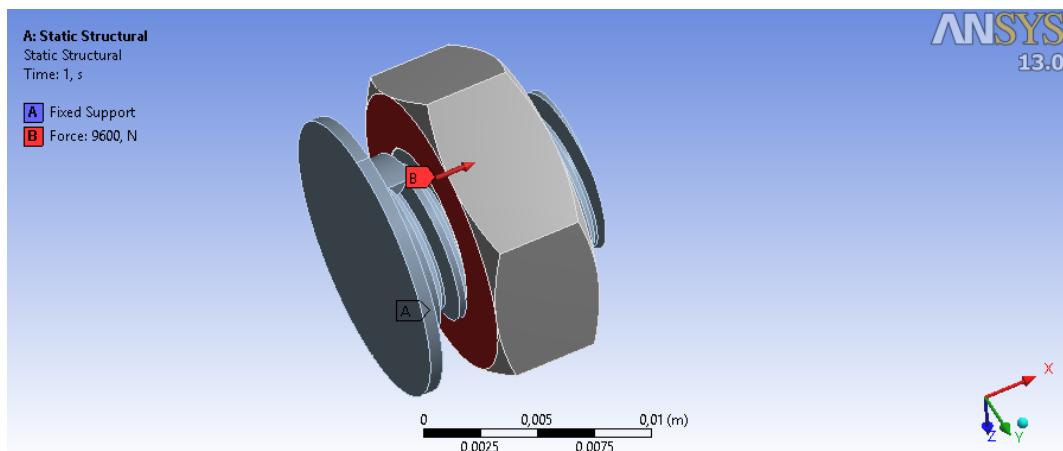


Figura 14 – A região B indica a superfície onde foi aplicada a carga.

Fonte: Autoria própria.

Com relação à malha, buscou-se obter um maior refino na região de interesse (filetes de rosca). Não foi possível maior refinamento em função da limitação computacional. A malha gerada pode ser visualizada na Figura 15 e um detalhamento da região dos filetes de rosca no parafuso pode ser visto na Figura 16.

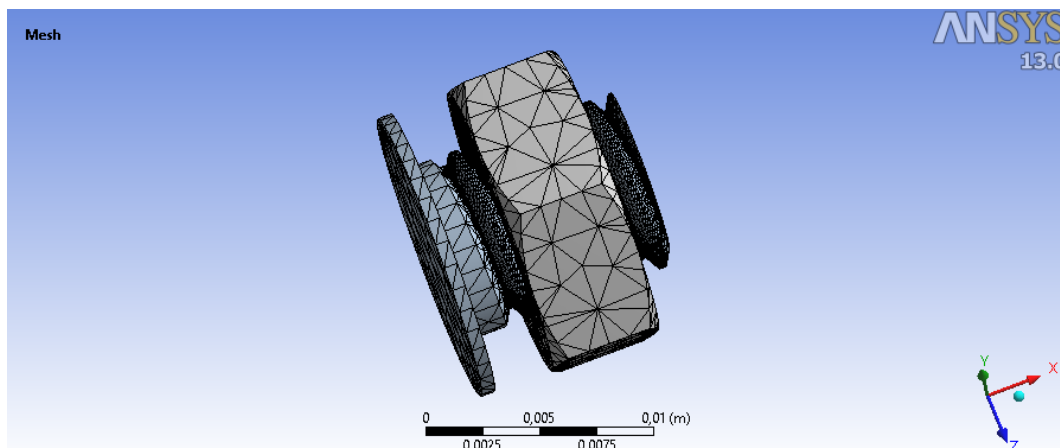


Figura 15– Malha gerada com maior refino nas regiões dos filetes de rosca.

Fonte: Autoria própria.

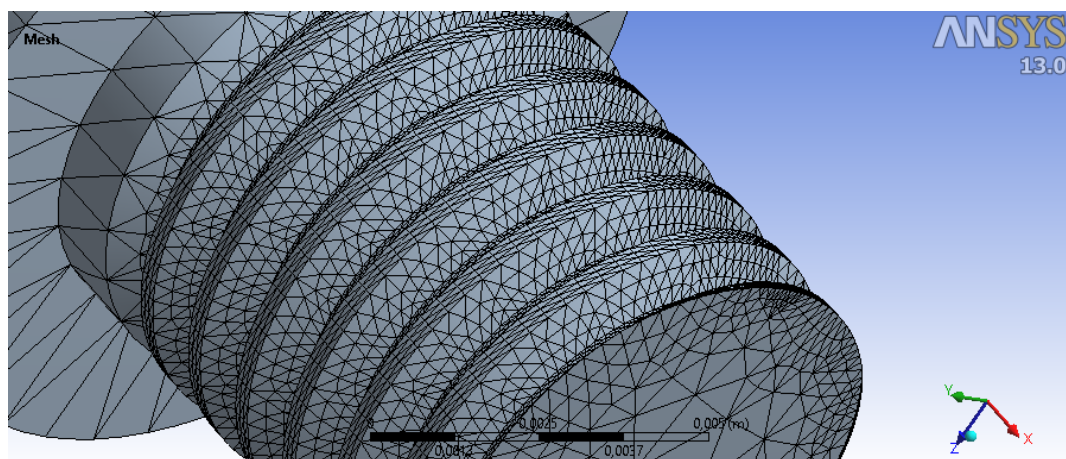


Figura 16 – Detalhe da malha nos filetes de rosca do parafuso.

Fonte: Autoria própria.

Para melhorar a precisão dos resultados, apesar de aumentar o tempo computacional, optou-se por utilizar elementos quadráticos ao invés de lineares. Com isso a malha gerada resultou em 180583 elementos e 269482 nós.

Como as roscas foram modeladas de maneira realista, a região de contato foi automaticamente entendida pelo Ansys Workbench como sendo a interferência entre os planos helicoidais, conforme é apresentado na Figura 17.

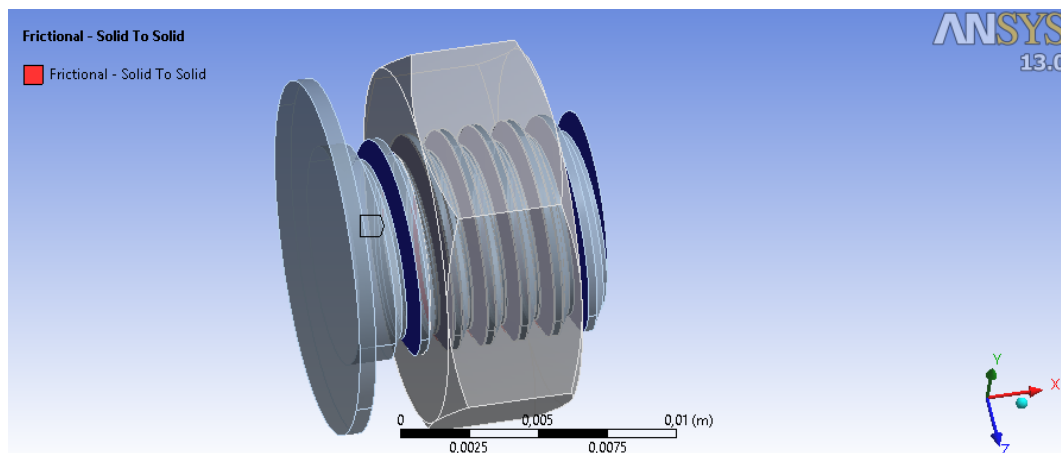


Figura 17– Regiões de contato entre o parafuso e a porca, detectadas automaticamente pelo software Ansys Workbench.

Fonte: Autoria própria.

3.5 Justificativa da Metodologia

A análise da região dos filetes de rosca do parafuso e da porca sofre uma influência direta da forma em que a rosca foi fabricada. Em roscas fabricadas por usinagem, as mesmas tendem a uma resistência inferior do que as roscas conformadas. Neste caso, principalmente porque durante a conformação existe a deformação dos grãos nas bordas da região do filete, aumentando a resistência desta região. O encruamento da região superficial que ocorre na conformação da rosca aumenta o número de discordâncias nesta região a tal ponto que inibe a movimentação das mesmas, gerando assim maior resistência a deformação (CALLISTER JR, 2008).

Desta maneira foram definidos os ensaios de caracterização da região roscada dos parafusos e porcas, de forma a obter dados que descreveriam qual o comportamento esperado das amostras durante o ensaio de torque de aperto.

No ensaio de torque de aperto, para que o objetivo do trabalho seja atingido, a seleção de um sistema que reduza ou elimine o atrito na interface porca- arruela foi necessária. Dentre as opções disponíveis, a seleção de um rolamento axial surgiu como uma ideia que facilitará o ensaio e trará confiabilidade ao transformar o atrito na interface citada acima para um valor constante, ou até mesmo desprezível.

Quanto ao ensaio de torque de aperto, obteve-se acesso ao equipamento citado acima e disponível no LASC, o qual demonstrou ser muito eficaz e de simples operação para a realização dos ensaios. Este equipamento conta com um extensômetro elétrico e um circuito eletrônico que vai transformar o sinal de saída em força axial de tração aplicada no parafuso (LUCACHEUSKI *et al.*, 2013).

Com os dados de força e torque aplicados, o atrito do rolamento que substituirá o atrito da região plana de contato e os dados da geometria do parafuso definida em norma, através da Equação 5, pode-se obter o coeficiente de atrito nos filetes de rosca (ISO 16047, 2005, ASM HANDBOOK vol. 8, 2000).

A análise numérica pelo método dos elementos finitos vem para complementar o trabalho, fornecendo dados sobre o comportamento teórico dos filetes de rosca quando solicitados durante o ensaio, permitindo a comparação com os ensaios dos filetes de rosca após o aperto de torque. Dinger e Friedrich (2011) conseguiram boa aproximação na comparação de resultados experimentais e por análise numéricas, demonstrando assim a credibilidade e a confiabilidade dos métodos de simulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modificação do Equipamento

Foi proposto nos objetivos secundários do trabalho projetar uma adaptação para o equipamento utilizado nos ensaios de torque a fim de possibilitar o ensaio de parafusos M6 a M14, já que atualmente o único tamanho de parafuso que se adapta ao equipamento é o M8.

Para isso, buscou-se uma adaptação simples, alterando o mínimo possível no produto atual e sem acarretar em grandes custos.

A geometria do produto final modificado pode ser visualizada na Figura 18 e a nova peça necessária para possibilitar a montagem de parafusos maiores pode ser vista na Figura 19.

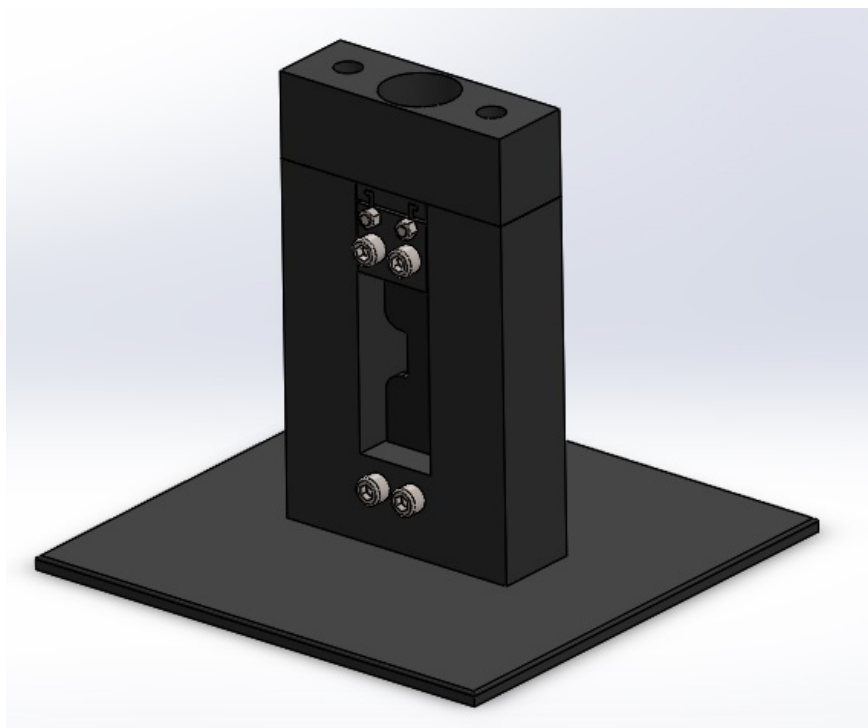


Figura 18– Equipamento de ensaio de torque após a modificação.

Fonte: Autoria própria.

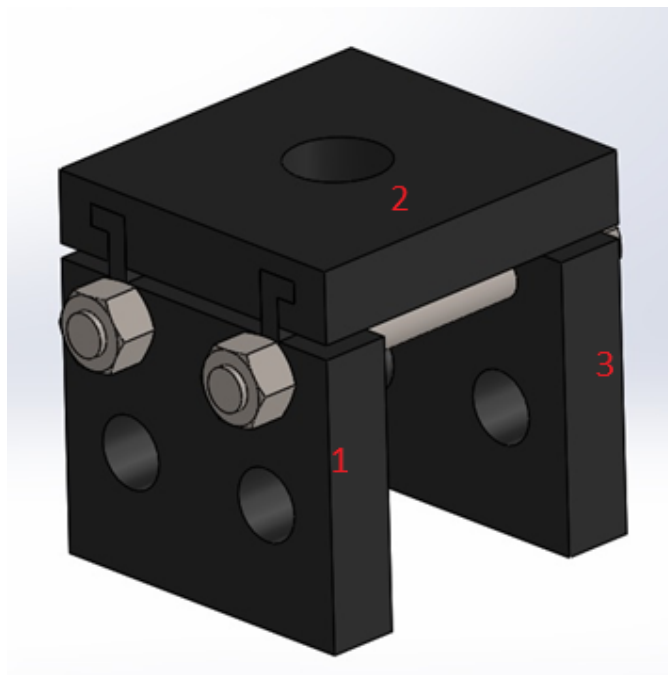


Figura 19– Modificação criada para possibilitar o ensaio de parafusos M6 a M14.

Fonte: Autoria própria.

Através desse componente é possível ajustar a distância entre os componentes 1 e 3 de modo prender a cabeça do parafuso a ser ensaiado.

É possível perceber que existe um pequeno espaçamento entre os componentes 1 e 2 e entre 2 e 3. A razão disso é para possibilitar a colocação de uma arruela, caso a cabeça do parafuso seja muito pequena, e ainda sim permitir a montagem.

Os desenhos de fabricação para a execução dessa adaptação podem ser vistos no Apêndice B.

4.2 Caracterização das amostras

4.2.1 Ensaio metalográfico

Segundo o fabricante, as amostras enviadas para análise têm dois processos distintos de fabricação. Os parafusos têm a rosca laminada, enquanto as porcas têm a rosca usinada.

Isto pode ser notado através de uma visualização inicial das amostras, após a preparação, observando-se através de microscópio o perfil da rosca.

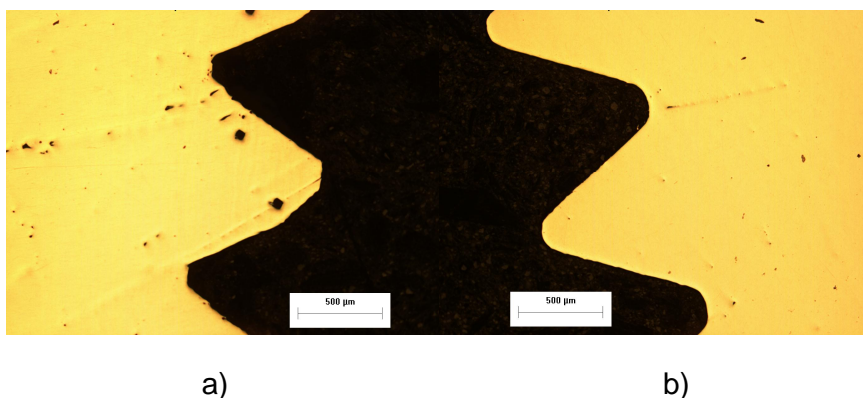


Figura 20 – Perfis de rosca da amostra inox. 20a) porca usinada e 20b) parafuso laminado.

Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber nitidamente a diferença entre os dois perfis de rosca. O perfil de rosca da Figura 20a, oriunda da porca, mostra um perfil regular em um lado e irregular do outro. Isso pode ser atribuído a usinagem do perfil.

Já na rosca do parafuso, pode ser observado um perfil bem regular em ambos os lados do filete. Isto se deve principalmente ao processo de laminação da rosca, no qual ela é conformada sem a necessidade de remoção de material.

Esta diferença nos perfis de rosca usinada e laminada pode ser visto em todas as amostras avaliadas.

Pode ser observado também, após realizado o ataque químico para a visualização da microestrutura, as deformações causadas por cada processo de fabricação.

Na Figura 21, observou-se a deformação causada pela ferramenta de corte e a microestrutura gerada por este processo. Notou-se que existe uma pequena faixa deformada próxima a superfície do filete, inferior a 10 µm. O ataque químico realizado nas amostras aço, zinco e cromo foram efetuados com Nital 2%.

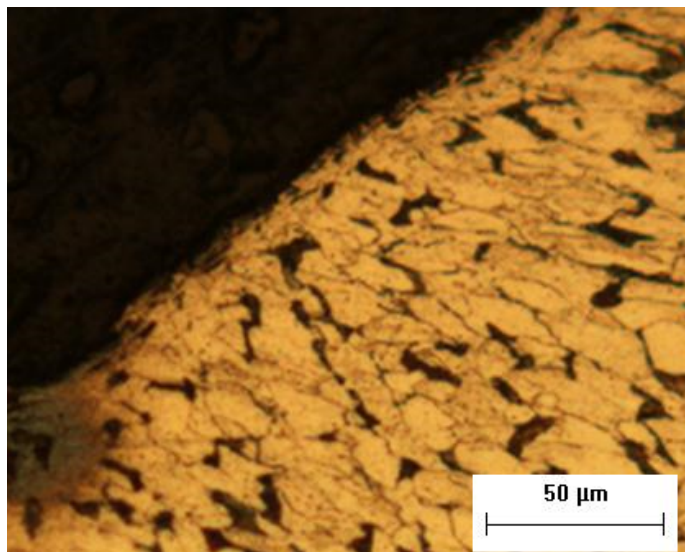


Figura 21–Microestrutura da borda do filete da porca da amostra aço.

Fonte: Aatoria própria.

Na ponta do filete de rosca, no entanto, foi observada uma deformação maior da microestrutura, conforme mostrado na Figura 22.

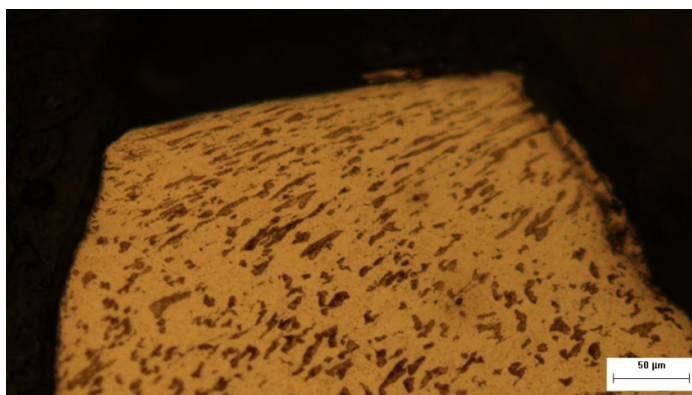


Figura 22 – Microestrutura deformada na ponta do filete. Amostra zinco.

Fonte: Aatoria própria.

As amostras aço, zinco e cromo, todas constituídas de aço baixo carbono, apresentaram microestruturas semelhantes, comuns ao aço baixo carbono. Da mesma forma, as roscas das porcas destas três amostras, fabricadas por usinagem, demonstraram os mesmos padrões de deformação da microestrutura na borda do filete, o que pode ser observado na Figura 23.

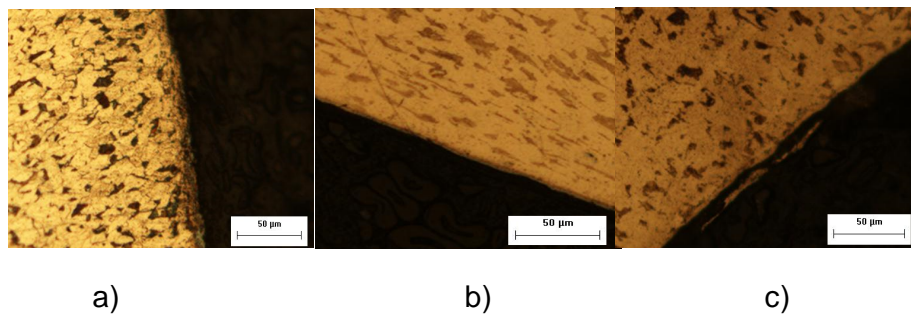


Figura 23 – a) perfil da borda usinada da rosca da porca da amostra aço, b) perfil da borda usinada da rosca da porca da amostra zinco, c) perfil da borda usinada da rosca da porca da amostra cromo.

Fonte: Autoria própria.

O perfil da porca da amostra latão é igualmente deformado em um lado e mais regular no outro, conforme mostra a Figura 24.

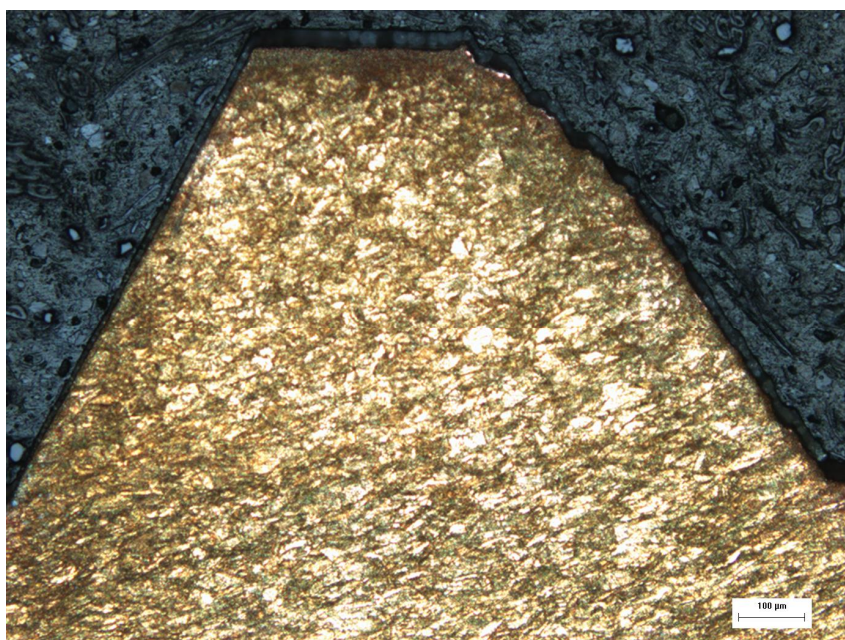


Figura 24–Perfil do filete de rosca da amostra latão.

Fonte: Autoria própria.

Já nos parafusos, foi verificado um perfil de rosca mais comportado, sem grandes desvios. Isso mostra que o processo de laminação é mais preciso e tem melhor acabamento que a usinagem na fabricação de roscas. Na Figura 20b, pode ser observado este perfil de melhor qualidade em relação ao perfil usinado.

Outra característica observada é a deformação causada pela conformação da rosca. Na Figura 25 pode ser observada esta deformação na amostra de aço inoxidável e a comparação de sua microestrutura no núcleo da amostra com a borda do filete de rosca laminado.

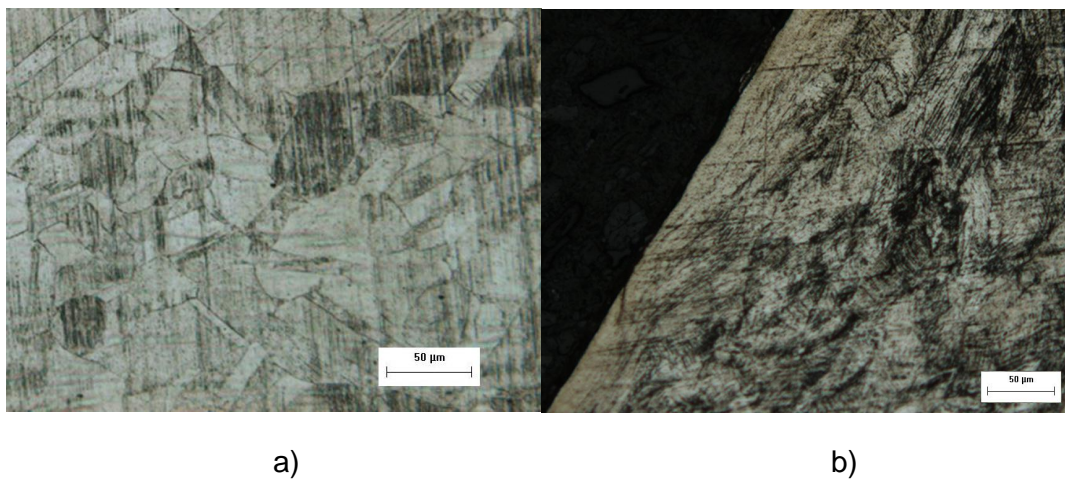


Figura 25 – Microestrutura do aço inoxidável 304.
25a) Região central do parafuso. 25b) Borda laminada do parafuso.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 25b pode-se observar a deformação causada pela laminação na borda do parafuso. Esta camada deformada tem pouco mais de 50 μm. O reagente usado para atacar as amostras inox foi a solução Marble.

A amostra latão apresentou microestrutura igualmente deformada nos filetes de rosca do parafuso. Foi observada uma camada de deformação de aproximadamente 40 μm, como pode ser visto na Figura 26.

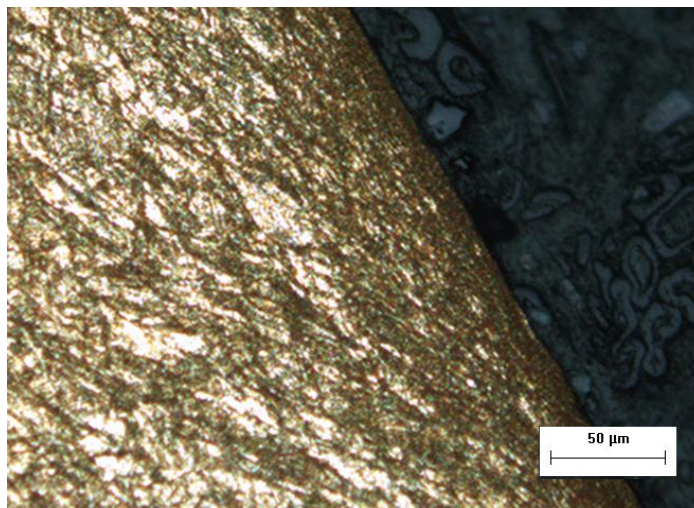


Figura 26–Borda do filete de rosca do parafuso da amostra latão.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 tem-se a deformação causada pela laminação no parafuso de aço baixo carbono.

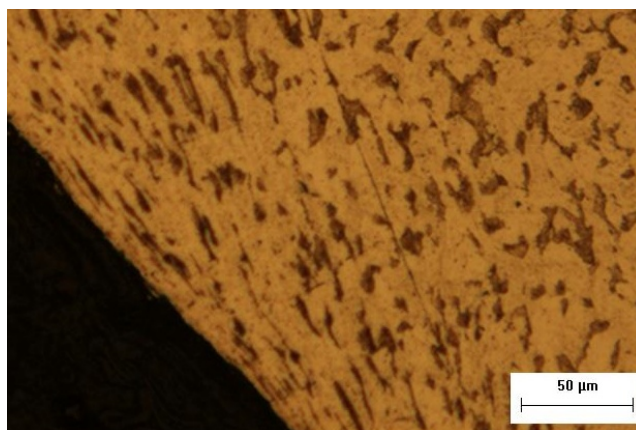


Figura 27 – Detalhe da deformação causada na laminação. Amostra aço.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27, pode ser observada a camada deformada próxima a borda do filete de rosca, com aproximadamente 30 μm . Nesta região têm-se os grãos alongados paralelamente a borda, diferente da região mais central mostrada.

As amostras de aço, zinco e cromo, apresentaram essa mesma característica devido a sua composição. Também mostraram em comum a espessura da camada deformada, todas variando entre 20 μm e 30 μm .

As amostras zinco e cromo têm também uma camada de revestimento aplicado tanto ao parafuso quanto a porca. Este revestimento pode ser observado na Figura 28.

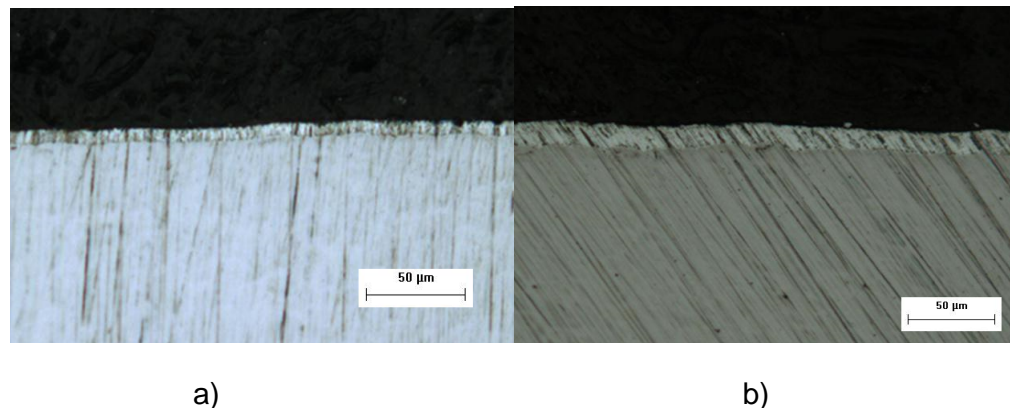


Figura 28 – Revestimento das amostras zinco e cromo.

28a) revestimento zincobranco.

28b) revestimento bicromatizado.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 28a pode ser observada a camada de zinco depositado sobre o aço baixo carbono, com espessura aproximada de 10 μm . Na Figura 28b, foi observada a camada de bicromatizado com espessura aproximada de 15 μm . Ambas as amostras estão sem ataque químico e sem o polimento, pois poderia prejudicar a visualização do revestimento.

Conforme demonstrado nas Figuras 20a, 22 e 24, as porcas apresentam diferença no perfil do filete de rosca. Esta diferença que existe entre os dois lados do filete de rosca na porca pode influenciar fortemente na área e na forma do contato do filete de rosca da porca em contato com o filete do parafuso, durante a execução dos ensaios de torque de aperto.

Visto isso, optou-se por buscar o contato entre o lado do filete da porca com menor deformação, ou seja, o mais plano, durante o ensaio de torque de aperto.

Durante uma inspeção visual nas porcas, foi verificado que o processo de usinagem fez com que a porca apresentasse diferentes características de cada lado, tornando possível a identificação.

Na Figura 29 pode ser observado o corte da porca da amostra cromo.

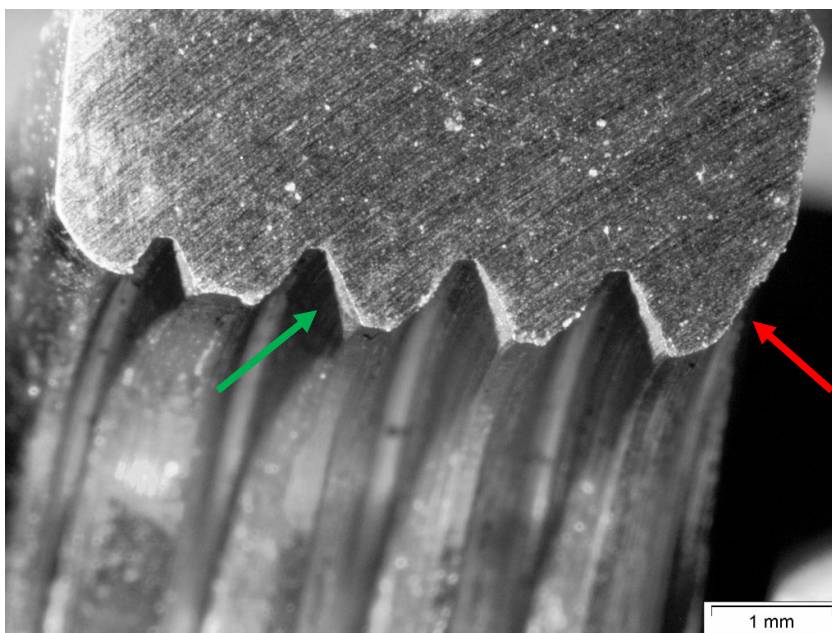


Figura 29–Amostra cromo em corte demonstrando as características dos filetes de rosca da porca.

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de melhorar a visualização, a seta em vermelho indica a borda mais arredondada e larga, da Figura 21. Indica também o lado em que a superfície do filete de rosca é mais irregular. A seta verde indica o lado em que a superfície do filete de rosca é menos irregular. Este é o lado desejado para o contato durante o ensaio de torque.

A Figura 29 demonstra o padrão geral encontrado em todas as porcas. Desta forma elas foram identificadas e marcadas quanto ao lado correto para a realização dos ensaios de torque.

4.2.2 Ensaio de dureza.

Os ensaios de dureza foram realizados em duas regiões, borda e centro, tanto para o parafuso quanto para a porca. A Figura 30 mostra um diagrama esquemático dos pontos analisados no ensaio de dureza. A região circulada em verde foi tomada como a borda e a em vermelho o centro.

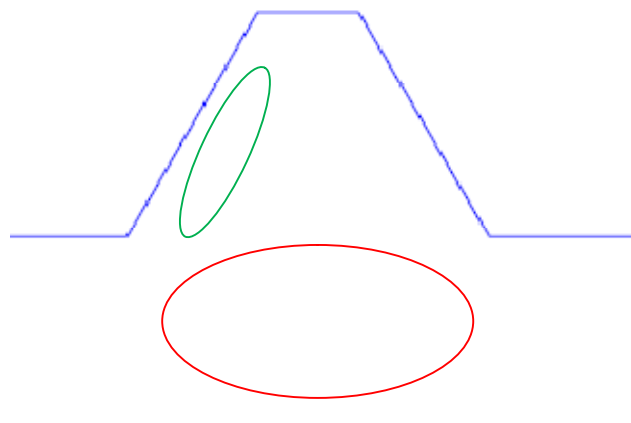


Figura 30 – Desenho esquemático das regiões em que foram avaliadas a dureza.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados são mostrados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Resultados de microdureza nos parafusos em HV.

AMOSTRA	inox	Latão	aço	Zinco	romo
CENTRO (HV)	331	194	238	246	246
	356	192	237	244	230
	308	186	222	238	252
	337	192	230	232	232
	347	184	224	235	234
MÉDIA	335 ± 18	189 ± 4	230 ± 7	239 ± 6	238 ± 10
BORDA (HV)	383	227	228	233	243
	393	215	236	231	243
	363	211	237	235	255
	390	211	226	236	232
	365	214	241	232	231
MÉDIA	378 ± 14	215 ± 7	233 ± 6	233 ± 2	240 ± 10

Fonte: Autoria própria.

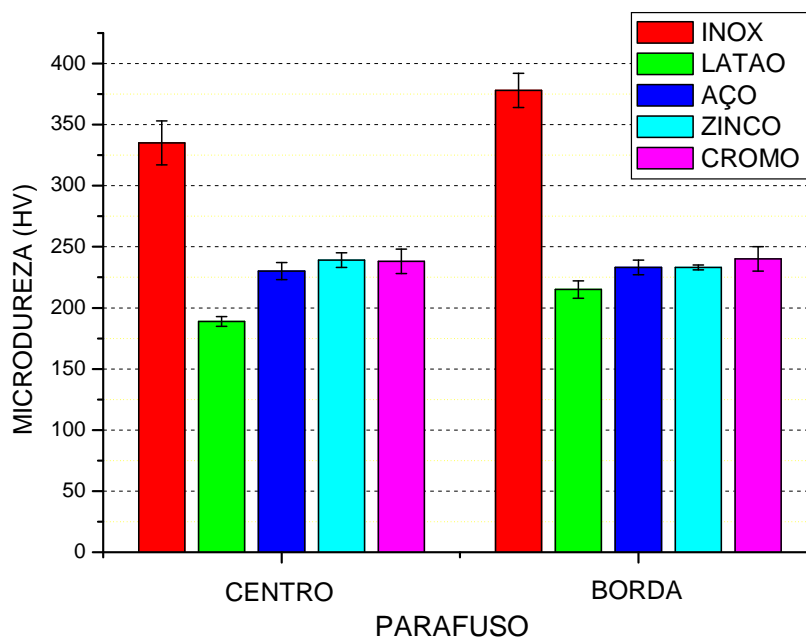


Figura 31– Durezas das médias e desvios padrões dos parafusos

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 –Microdureza nas porcas em HV.

AMOSTRA	Inox	latão	Aço	Zinco	cromo
CENTRO (HV)	331	215	246	224	246
	315	217	232	224	230
	314	209	238	215	232
	337	220	243	231	234
	325	207	243	232	252
MÉDIA	324 ± 10	213 ± 5	240 ± 6	225 ± 7	238 ± 10
BORDA (HV)	328	209	252	227	247
	336	215	258	228	258
	317	206	246	220	255
	317	203	242	224	255
	331	201	248	227	254
MÉDIA	325 ± 8	206 ± 5	249 ± 6	225 ± 3	253 ± 4

Fonte: Autoria própria.

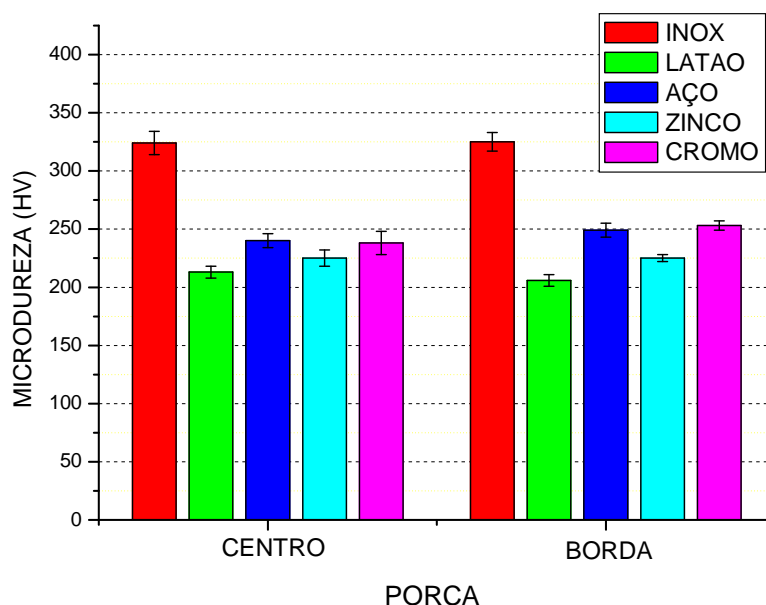


Figura 32 – Durezas médias e desvios padrões das porcas.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados esperados para o centro da porca e do parafuso para cada material foram confirmados, mostrando com valores próximos. Como exemplo, pode-se citar a amostra inox, onde o centro da porca figurou a média de 324,4 HV enquanto o centro do parafuso teve o resultado de 335,8 HV, uma variação menor que 5%, caracterizando o mesmo material.

Este resultado também era esperado se comparado o centro da porca com a sua borda. A amostra latão pode servir com exemplo, onde a borda teve 206,8 HV e o centro 216,6 HV uma diferença pequena, mostrando que não deve existir mudança na resistência desta região, como pode ser visto na Figura 32.

Já para a comparação entre a borda e o centro do parafuso, eram esperadas diferenças maiores. Todavia esta diferença só foi notada na amostra inox, com 335,8 HV no centro e 378,8 HV na borda, e na amostra latão, com 189,6 HV no centro e 215,6 HV na borda. Nas demais amostras a diferença foi de menos de 5%, como pode ser visto na Figura 31.

Pode-se explicar o resultado das amostras aço, zinco e cromo a partir da metalografia. Nela foi observado que a camada deformada por laminação nos parafusos é pequena, da ordem de 25 μm . Para ensaios de dureza, é recomendado

que a impressão não ocorra próxima a borda, pois a mesma pode interferir no resultado. Como a diagonal média para a impressão em dureza Vickers ficou na faixa de 20 μm , não foi possível coletar os dados de dureza da borda destas amostras.

4.2.3 Caracterização geométrica do filete de rosca.

O parâmetro S_a apresenta a média aritmética da rugosidade superficial sendo de grande importância para o estudo da superfície.

O valor numérico de S_q apresenta o desvio padrão da curva de distribuição das alturas relacionadas nos ensaios.

O valor de S_{ds} mostra a densidade dos máximos encontrados na superfície, ou seja, a quantidade de picos em uma determinada região.

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados dos parâmetros citados, encontrados nos ensaios de perfilometria.

Tabela 5 – Valores de S_a e S_q .

	S_q (μm)			S_a (μm)		
	1	2	média \pm dp	1	2	média \pm dp
INOX	0,889	0,951	0,92 \pm 0,04	0,7074	0,7355	0,72 \pm 0,02
LATÃO	0,8468	1,368	1,11 \pm 0,37	0,6700	0,9381	0,80 \pm 0,19
AÇO	1,099	1,622	1,36 \pm 0,37	0,8762	1,1950	1,04 \pm 0,23
ZINCO	1,172	1,121	1,15 \pm 0,04	0,9100	0,8848	0,90 \pm 0,02
CROMO	1,132	1,235	1,18 \pm 0,07	0,9078	0,9526	0,93 \pm 0,03

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Valores de S_{ds} .

	S_{ds} ($1/\mu\text{m}^2$)		
	1	2	média \pm dp
INOX	0,0524	0,0962	0,07 \pm 0,03
LATÃO	0,0963	0,1093	0,10 \pm 0,01
AÇO	0,0617	0,1216	0,091 \pm 0,04
ZINCO	0,0728	0,0734	0,073 \pm 0,00
CROMO	0,0538	0,0581	0,056 \pm 0,003

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, os valores encontrados mostram que as superfícies produzidas nos filetes dos parafusos durante a fabricação são bastante regulares e muito próximas em relevo para todas as amostras.

Pode ser observado também que, nas amostras zinco e cromo onde a camada superficial é eletrodepositada, a superfície não é drasticamente alterada, mantendo suas propriedades de rugosidade e sua distribuição superficial.

A Figura 33 mostra o perfil da área analisada pelo equipamento e o relevo percebido, com a barra de alturas referenciando o ponto mais baixo do relevo com zero.

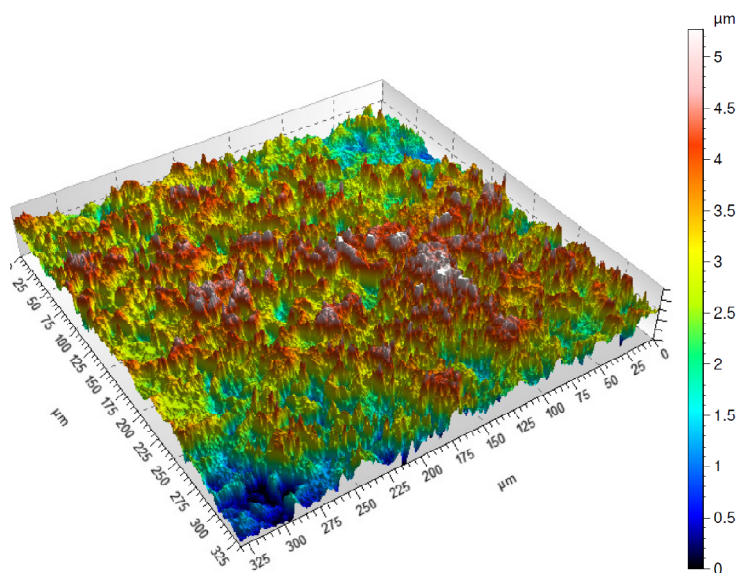


Figura 33 – Imagem 3D da superfície da amostra inox.

Fonte: Autoria própria.

4.3 Ensaio de Torque de Aperto.

Após a realização dos ensaios de torque de aperto, conforme item (metodologia), os resultados obtidos para cada material são mostrados nas Tabelas 7, 8, 9, 10 e 11.

Tabela 7 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Inox.

Material	Número	Torque (kgf.m)	Força (kN)	K ($T=F*K*dp$)	Coeficiente de atrito NORTON	Coeficiente de atrito ISO
Inox	1	1,8	10,7	0,229	0,328	0,337
Inox	2	1,8	9,1	0,270	0,394	0,407
Inox	3	2,7	6,8	0,541	0,820	0,878
Inox	4	2,2	9,25	0,324	0,482	0,502
Inox	5	1,3	9,1	0,195	0,272	0,278
Inox	6	2,5	8,0	0,426	0,643	0,678
Inox	7	1,3	9,7	0,183	0,252	0,257
Média 5			9,2	0,289	0,424	0,440
Desvio padrão				0,091	0,145	0,157

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Latão.

Material	Número	Torque (kgf.m)	Força (kN)	K ($T=F*K*dp$)	Coeficiente de atrito NORTON	Coeficiente de atrito ISO
Latão	1	1,4	10,07	0,196	0,275	0,281
Latão	2	2	8,9	0,317	0,472	0,491
Latão	3	2,1	9,4	0,315	0,469	0,488
Latão	4	1,8	8,9	0,285	0,421	0,436
Latão	5	1,9	8,75	0,306	0,455	0,472
Latão	6	2	8,4	0,336	0,503	0,523
Latão	7	1,6	8,7	0,259	0,379	0,391
Média 5			8,9	0,297	0,439	0,455
Desvio padrão				0,024	0,039	0,042

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Aço.

Material	Número	Torque (kgf.m)	Força (kN)	K ($T=F*K*dp$)	Coeficiente de atrito NORTON	Coeficiente de atrito ISO
Aço	1	1,2	8,7	0,188	0,260	0,266
Aço	2	1,6	8,75	0,249	0,361	0,372
Aço	3	0,7	9,6	0,099	0,112	0,112
Aço	4	1,7	9,1	0,255	0,370	0,381
Aço	5	1,4	11,0	0,173	0,236	0,241
Aço	6	1,4	8,75	0,218	0,310	0,318
Aço	7	1,2	9,4	0,174	0,237	0,242
Média 5			9,3	0,201	0,281	0,288
Desvio padrão				0,033	0,054	0,057

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Zinco.

Material	Número	Torque (kgf.m)	Força (kN)	K ($T=F*K*dp$)	Coeficiente de atrito NORTON	Coeficiente de atrito ISO
Zinco	1	1,2	8,9	0,184	0,253	0,259
Zinco	2	1,4	9,3	0,205	0,289	0,296
Zinco	3	0,9	9,1	0,135	0,172	0,174
Zinco	4	1,1	9,5	0,158	0,210	0,214
Zinco	5	1,1	8,7	0,172	0,234	0,239
Zinco	6	0,9	9,2	0,133	0,169	0,171
Zinco	7	0,9	8,8	0,139	0,179	0,182
Média 5			9,0	0,158	0,210	0,213
Desvio padrão				0,021	0,035	0,036

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Resultados de coeficientes de atrito para a amostra Cromo.

Material	Número	Torque (kgf.m)	Força (kN)	K (T=F*K*dp)	Coeficiente de atrito NORTON	Coeficiente de atrito ISO
Cromo	1	1,3	10,2	0,174	0,237	0,241
Cromo	2	1,4	9,0	0,212	0,300	0,308
Cromo	3	2	7,5	0,363	0,545	0,570
Cromo	4	1,8	10,2	0,241	0,347	0,357
Cromo	5	1,4	9,7	0,197	0,275	0,281
Cromo	6	0,9	9,7	0,126	0,158	0,159
Cromo	7	1	8,9	0,153	0,202	0,205
Média 5			9,6	0,195	0,272	0,278
Desvio padrão				0,034	0,056	0,059

Fonte: Autoria própria

As tabelas apresentam os resultados mensurados através do equipamento, como a força e o torque, e os resultados calculados a partir dos dados fornecidos pela máquina. O Coeficiente de torque K foi calculado com base na equação 9, e pode ser melhor observado na Figura 34.

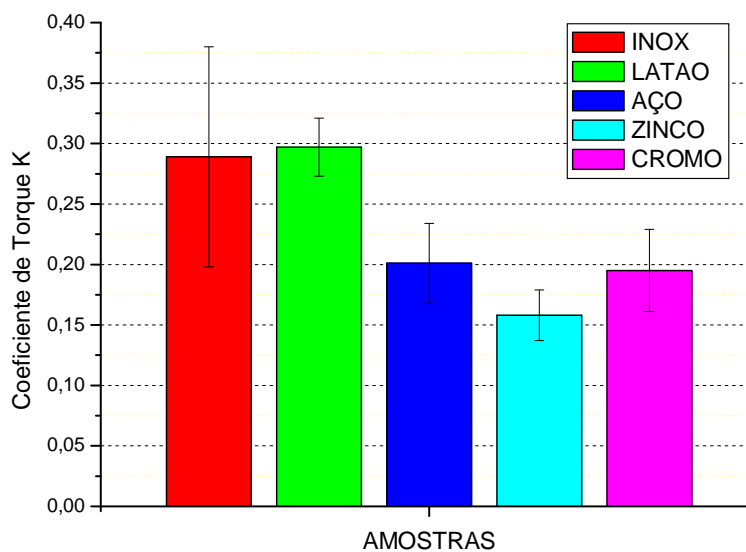


Figura 34 – Coeficientes de torque obtidos.

Fonte: autoria própria.

Com base nos coeficientes de torque mostrados, pode-se observar uma grande similaridade, dentro das margens de erro, das amostras aço, zinco e cromo. A amostra inox apresentou a maior dispersão dentre as analisadas.

Já os valores encontrados para os coeficientes de atrito foram calculados através de dois equacionamentos diferentes. O coeficiente de atrito NORTON foi calculado utilizando a equação 7, enquanto o coeficiente de atrito ISO foi calculado através das equações 2 e 3, com um rearranjo para obter o coeficiente de atrito da região da rosca.

Pode ser observada uma pequena diferença entre os coeficientes de atrito obtidos pelo equacionamento sugerido por Norton (2013) e pela norma ISO 16047 (2005). Conforme pode ser visto através da comparação entre as equações 7 (NORTON, 2013) e 5 (ISO 16047, 2005), onde ambas equacionam o torque em função dos parâmetros geométricos do parafuso e da porca e dos coeficientes de atrito, que os parâmetros geométricos são aplicados de forma ligeiramente diferente.

Enquanto a equação 7 equaciona através dos ângulos de hélice e do filete, de forma simplificada, a equação 5 busca trabalhar com os parâmetros e dimensões do parafuso, como o passo e os diâmetros interno, externo e primitivo.

Além disto, as constantes simplificadoras da equação 5 são diferentes das utilizadas por Norton (2013) na equação 7. Isso resulta em uma pequena diferença entre os resultados, mas ambas válidas para o cálculo exposto no trabalho.

As médias observadas foram obtidas conforme o item 3.3 onde foram descartados o maior e o menor resultado das sete amostras para então ser calculada a média e o desvio padrão de cada material.

Dentre os materiais analisados, o inox apresentou a maior dispersão de resultados.

Uma característica marcante observada nos conjuntos de inox durante os ensaios foi a grande interferência percebida durante a desmontagem do conjunto na máquina de teste após o ensaio, ocorrendo inclusive a quebra de dois parafusos.

Todos os conjuntos de inox apresentaram a necessidade de uma força razoável para desrosquear a porca do parafuso durante a retirada. Ao se tentar montá-los novamente, todos os parafusos apresentaram interferência maior do que apresentaram antes de serem ensaiados, em geral, não sendo possível a montagem manual. Isto pode ser atribuído as deformações plásticas sofridas tanto pela porca como pelo parafuso, gerando regiões de contato forçado nos filetes de rosca.

O latão apresentou os maiores coeficientes de atrito entre os materiais testados. Podem-se atribuir estes resultados aos mecanismos de desgaste e uma possível transformação de fase na superfície durante a aplicação do torque (PANAGOPOULOS *et al.*, 2012).

O latão apresentou também alguma dificuldade durante a remoção dos conjuntos da máquina de teste. Para desrosquear a porca do parafuso foi exigida uma pequena força, menor que a vista nas amostras inox, mas ainda assim perceptível ao desrosquear manualmente o parafuso. Após o removido da máquina, ao tentar montar novamente a porca no parafuso, pode ser novamente percebida esta interferência. Assim como o aço inox, o latão pode ter sofrido deformação plástica na região dos filetes de rosca em contato, mas com magnitude menor.

Dentre os resultados, a amostra zinco apresentou os mais baixos coeficientes de atrito. Os conjuntos da amostra zinco ensaiados apresentaram as menores dificuldades de desmontagem e montagem após o ensaio. Isso significa que mesmo que tenha sofrido uma deformação plástica na região roscada, esta deformação não é significativa para que exista uma interferência nesta região.

As amostras aço e cromo apresentaram resultados similares, com coeficientes de atrito médio muito próximos. Isto pode ser relacionado com o mecanismo de desgaste, que deve ser similar nas duas amostras. Estas amostras também apresentaram pequena interferência na região da rosca durante desmontagem e montagem após o ensaio, mas sem exigir esforços grandes, possibilitando sua desmontagem e montagem manual com facilidade.

Efetuada a comparação entre os grupos de materiais, têm-se as Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Comparação entre os resultados das amostras Inox, Latão e Aço.

Material	Coefficiente de atrito NORTON	Coefficiente de atrito ISO
Inox	0,42 ± 0,14	0,44 ± 0,16
Latão	0,46 ± 0,03	0,482 ± 0,03
Aço	0,28 ± 0,05	0,29 ± 0,06

Fonte: Autoria própria

Comparando os resultados entre os materiais sem revestimento aplicado, pode ser observado que o latão e o inox apresentam maiores coeficientes de atrito. Isso pode ser explicado através dos mecanismos de desgaste envolvidos. Possivelmente a adesão é mais recorrente nestas duas amostras e esta ligação de adesão é mais forte que a que ocorre no aço. Essa diferença também pode ser atribuída ao filme de óxido formado sobre a superfície de cada amostra, a resistência deste filme as tensões aplicadas durante o ensaio e seu comportamento durante o ensaio.

Podem ser observados os coeficientes de atrito e as dispersões na Figura 35.

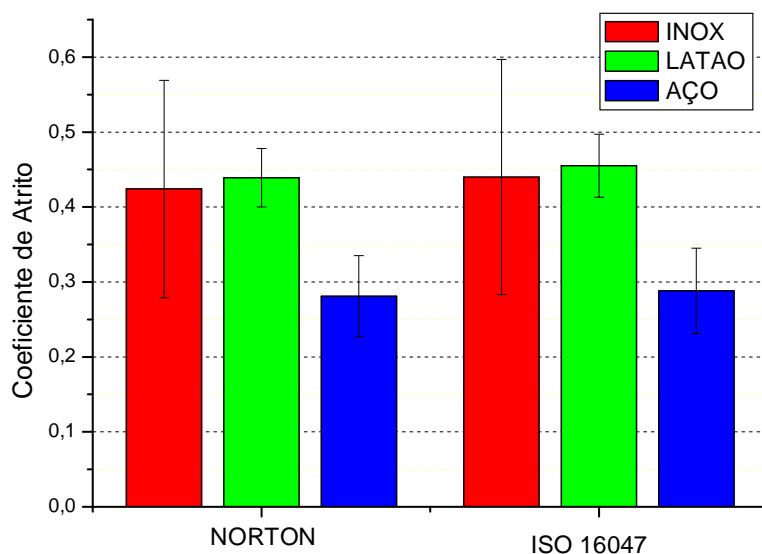


Figura 35 – Coeficientes de atrito e dispersões obtidos para as amostras inox latão e aço.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Comparação entre os resultados das amostras Inox, Latão e Aço.

Material	Coeficiente de atrito NORTON	Coeficiente de atrito ISO
Aço	0,28 ± 0,05	0,29 ± 0,06
Zinco	0,21 ± 0,04	0,21 ± 0,04
Cromo	0,27 ± 0,06	0,28 ± 0,06

Fonte: Autoria própria

Nos resultados vistos na tabela 13, pode ser observado que o zinco apresenta o menor coeficiente de atrito com a menor dispersão dos resultados.

A amostra cromo apresentou resultados próximos ao aço. Todavia, as três amostras, aço, zinco e cromo, ficaram dentro de um mesmo valor quando consideradas as dispersões obtidas, como pode ser visto na Figura 36.

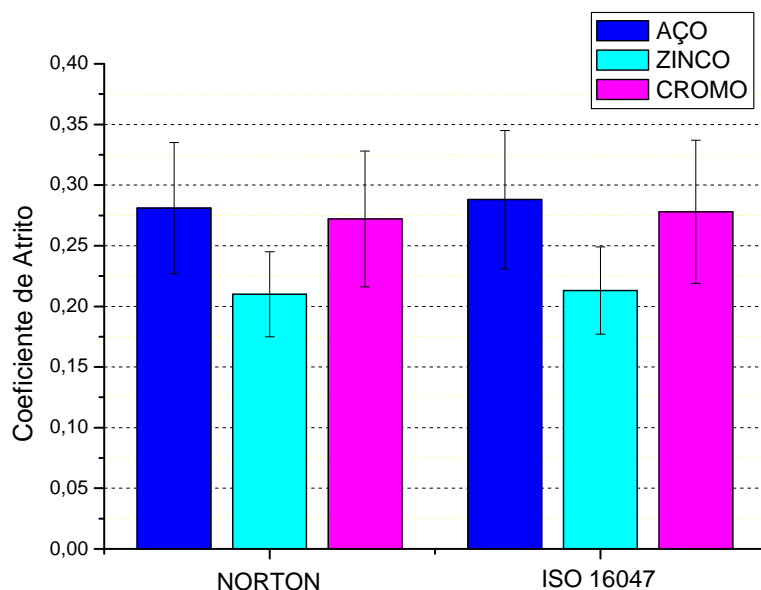


Figura 36 – Coeficientes de atrito e dispersões obtidos para as amostras aço, zinco e cromo.

Fonte: Autoria própria.

4.4 Análise por Elementos Finitos

Através de modelos de elementos finitos elaborados no *software* Ansys Workbench 13, foram realizadas simulações numéricas para análise dos campos de tensões nos parafusos e nas porcas, utilizando os dados experimentais. A validação

do método e os resultados para os diferentes materiais são apresentados na sequência.

4.4.1 Parâmetros da simulação

Para cada um dos cinco grupos simulados foi alterado o coeficiente de atrito, utilizando sempre o valor médio encontrado nos ensaios experimentais e já apresentado no item 4.2.

Outro parâmetro que variou foi o material. Foram utilizados aço inoxidável, latão e aço 1020, este último como metal de base para três grupos (sem revestimento, zincado branco e bicromatizado amarelo). As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na simulação são apresentadas na Tabela 14 juntamente com a média do coeficiente de atrito e força. Por efeito de simplificação, foi considerado que os materiais possuem comportamento linear durante a deformação. Caso contrário, seria necessário fornecer parâmetros referentes à plastificação, tais como coeficiente de encruamento e pontos da curva tensão-deformação, além de acarretar um aumento da demanda computacional. Por outro lado, feita essa simplificação não é possível garantir a precisão dos valores de tensão que excederem a tensão de escoamento, sendo possível apenas afirmar se houve pouca ou muita plastificação.

Tabela 14–Parâmetros de cada material utilizados na simulação.

MATERIAL	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)	Coeficiente de Atrito	Força Aplicada (kN)
Inox 304 ⁽¹⁾	205	515	0,424	9,23
Latão C27000 ⁽²⁾	310	430	0,439	8,93
Aço 1020 ⁽¹⁾	345	440	0,281	9,32
Aço Zincado	345	440	0,210	9,00
Aço Bicromatizado	345	440	0,272	9,60

Fonte: Autoria própria.

(1) Retirado de CALLISTER (2008).

(2) Retirado de MICRO METAIS - Catálogo de produtos (2014).

4.4.2 Algumas considerações sobre as simulações

Apesar de em um primeiro momento o ponto de máxima tensão de Von Mises parecer o resultado mais importante em uma simulação, deve-se ficar atento quanto ao real significado desse ponto, já que por vezes não representa de maneira correta a situação apresentada. Isso pode ocorrer por várias razões, entre elas as mais comuns são a falta de refinamento da malha naquele local ou pela interpretação errônea do *software* com relação a montagem naquele ponto, como por exemplo considerar o contato naquela região como sendo pontual, o que faz com que eleve em muitas vezes a tensão real, já que a área considerada tende a zero. No caso da Figura 37, por exemplo, o ponto máximo é identificado em uma região de transição entre o corpo e a cabeça do parafuso, porém sabe-se que não é essa a região de maior esforço. Conforme já citado anteriormente, a região dos filetes de rosca é a mais crítica quando se aplica uma carga.

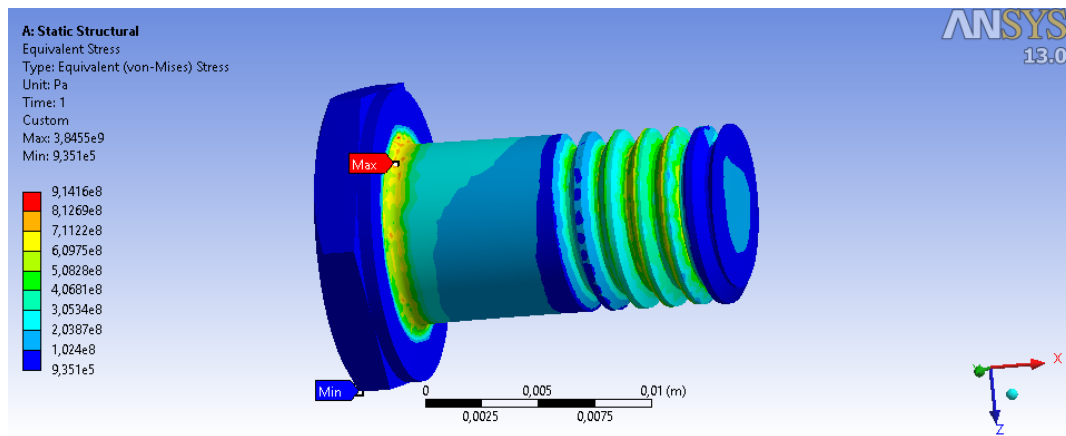


Figura 37– Ponto de máxima tensão de Von Mises: região de transição entre a cabeça e o corpo do parafuso.

Fonte: Autoria própria.

Como a região de interesse do presente estudo são os filetes de rosca, os valores de tensão serão apresentados apenas nesta região. Sendo que serão avaliados os quatro filetes do contato entre a porca e o parafuso.

Como por vezes é difícil avaliar o valor de tensão em uma região apenas através da representação gráfica, optou-se aqui por utilizar a ferramenta “*probe*”, que indica a tensão no ponto, para facilitar a identificação. Decidiu-se apresentar cinco

valores por filete, já que dessa forma é possível tanto encontrar um valor médio por filete, como também comparar a tensão nos diferentes filetes de rosca.

Optou-se por avaliar a tensão apenas na região de contato, onde ocorre o deslizamento, sendo essa a região de interesse e onde ocorrem os fenômenos tribológicos.

4.4.3 Validação do modelo numérico

Com o objetivo de garantir que a simulação através do método dos elementos finitos corresponde a uma boa aproximação dos valores reais, optou-se por comparar a solução numérica com uma solução analítica. Para encontrar a solução analítica, foram utilizadas as equações 10, 11 e 12 (NORTON, 2013). Sendo que o termo A_s na equação 10 corresponde a área sob cisalhamento para o parafuso e na equação 11 corresponde a área de sob cisalhamento para a porca. O termo d_r representa o diâmetro menor do parafuso, p o passo, w_i e w_o são fatores de área tabelados (NORTON, 2013, pg 875), F a força axial aplicada sobre o parafuso e τ_s a tensão de cisalhamento.

$$A_s = \pi d_r w_i p \quad \text{Equação 10}$$

$$A_s = \pi d_r w_o p \quad \text{Equação 11}$$

$$\tau_s = \frac{F}{A_s} \quad \text{Equação 12}$$

Com relação ao modelo numérico, os valores de tensão máxima foram obtidos utilizando a função “probe” no mesmo ponto onde a tensão cisalhante é calculada através da formulação apresentada.

A tensão cisalhante máxima nos cinco parafusos pode ser visualizada nas Figuras 38 a 42.

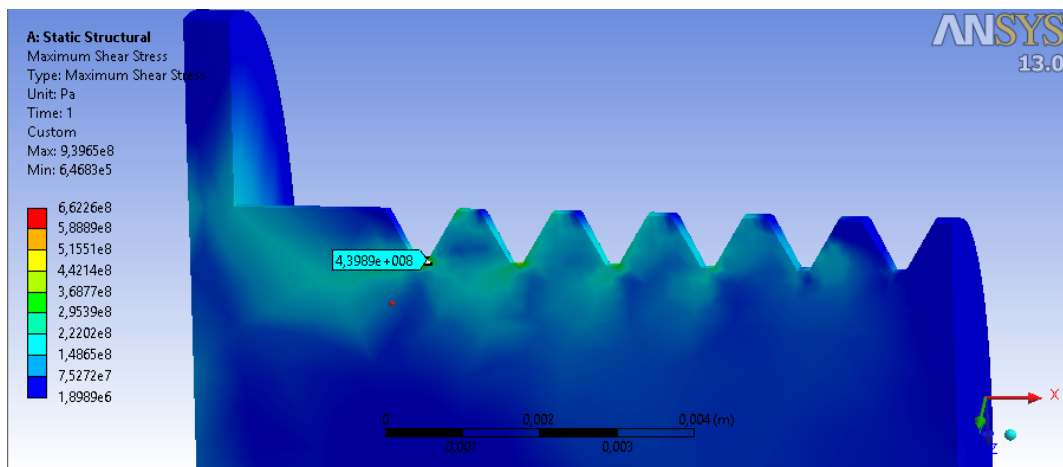


Figura 38– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço inox.

Fonte: Autoria própria.

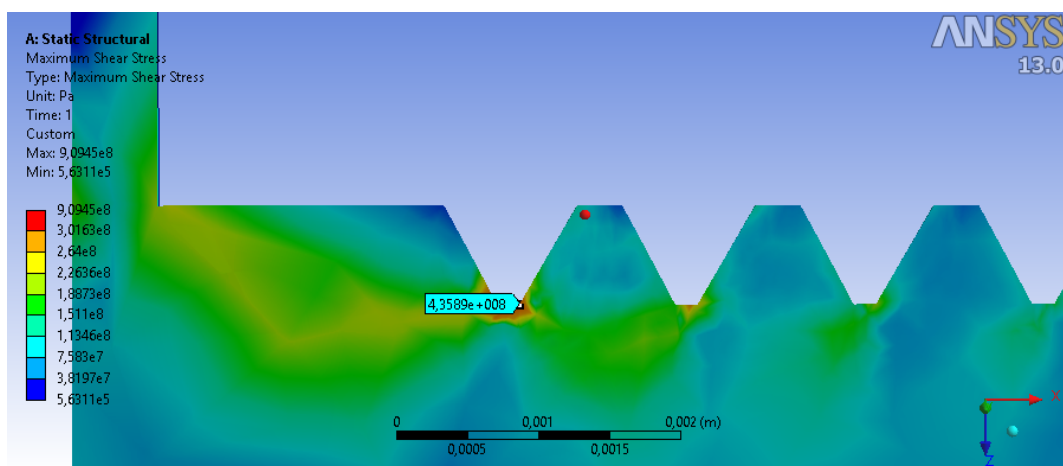


Figura 39– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de latão.

Fonte: Autoria própria.

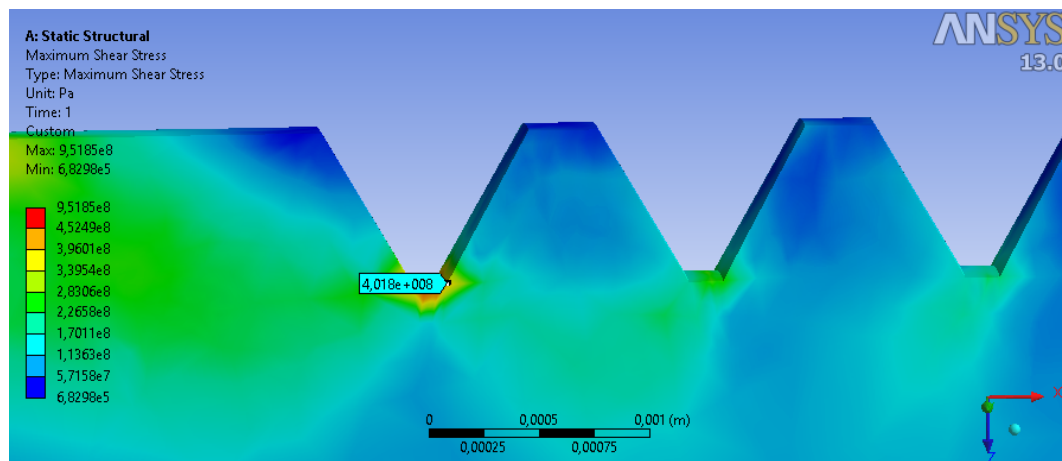


Figura 40– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020.

Fonte: Autoria própria.

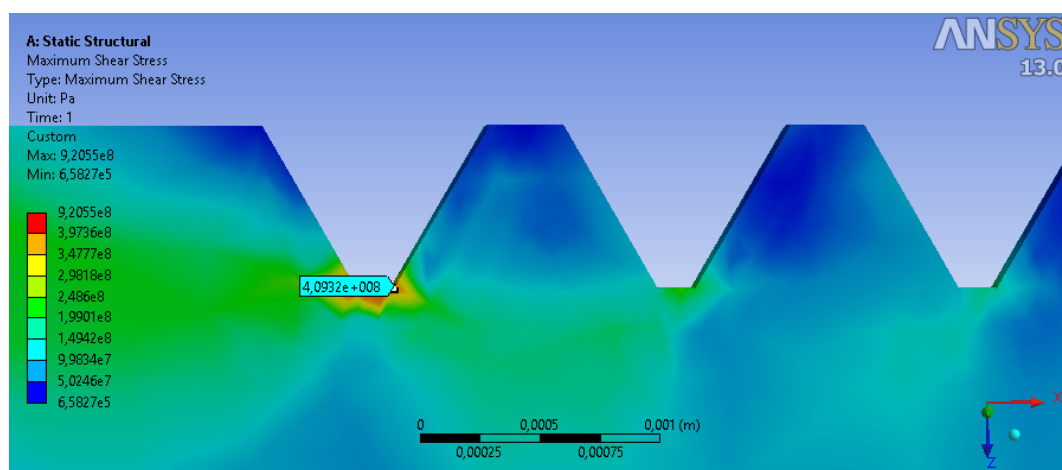


Figura 41– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 zincado.

Fonte: Autoria própria.

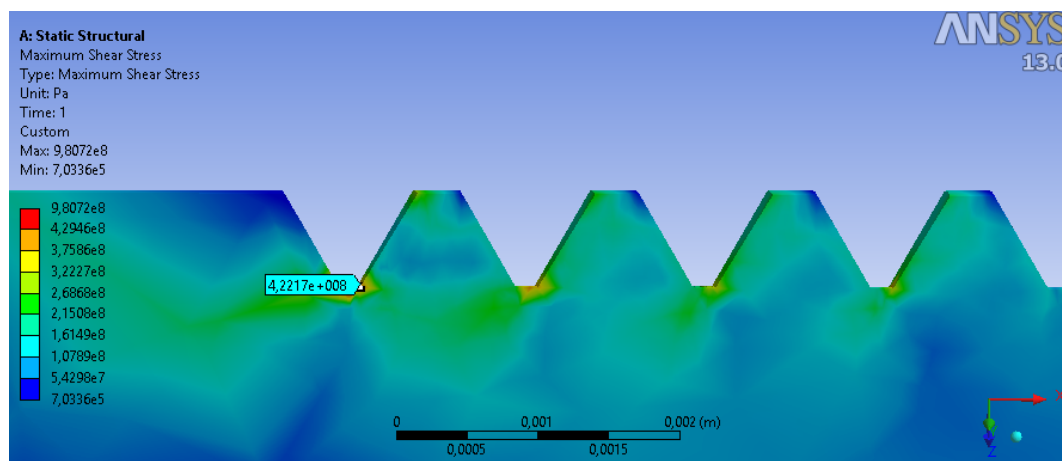


Figura 42– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 bicromatizado.

Fonte: Autoria própria.

As tensões máximas de cisalhamento para os parafusos foram calculadas analiticamente utilizando as equações 10 e 12, sendo que para parafusos M8 o valor de $d_r=6,47\text{mm}$ e $p=1,25\text{mm}$ e para roscas do tipo ISO $w_i=0,8$. Esses valores e os valores obtidos através do método dos elementos finitos são encontrados na Tabela 15.

Tabela 15–Comparativo entre as tensões máximas de cisalhamento nos filetes de rosca dos parafusos obtidas pelos diferentes métodos de resolução – [MPa].

Material	Método analítico	Método numérico
Aço Inox	454	440
Latão	439	436
Aço 1020	458	402
Aço 1020 zincado	443	409
Aço 1020 bicromatizado	472	422

Fonte: Autoria própria.

Com relação aos filetes de rosca das porcas, os valores de máxima tensão cisalhante foram calculados analiticamente através das equações 11 e 12, sendo que para roscas M8 o valor de $d=8\text{mm}$ e para roscas ISO $w_0=0,88$. Numericamente os valores de máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca foram encontrados utilizando a função “probe” e são apresentados nas Figuras 43 a 47. Além disso, os valores encontrados pelos diferentes métodos são apresentados na Tabela 16.

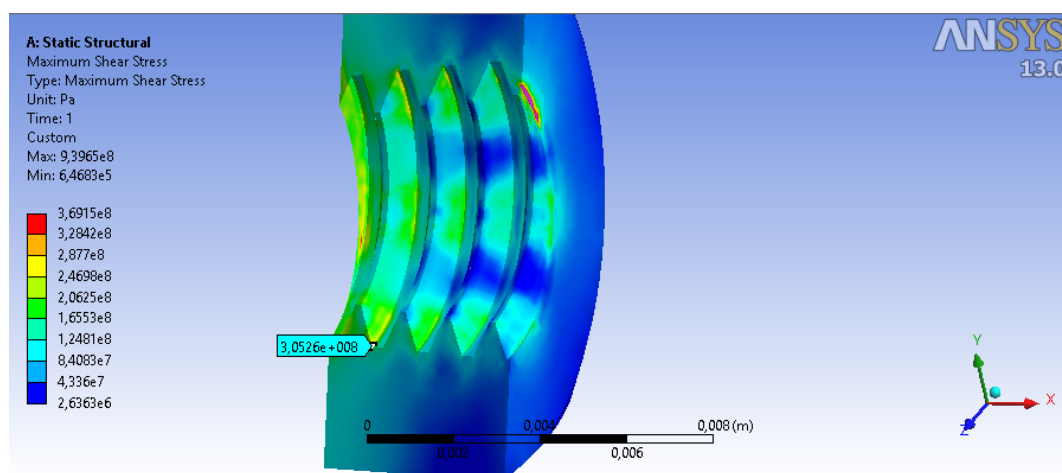


Figura 43– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço inox.

Fonte: Autoria própria.

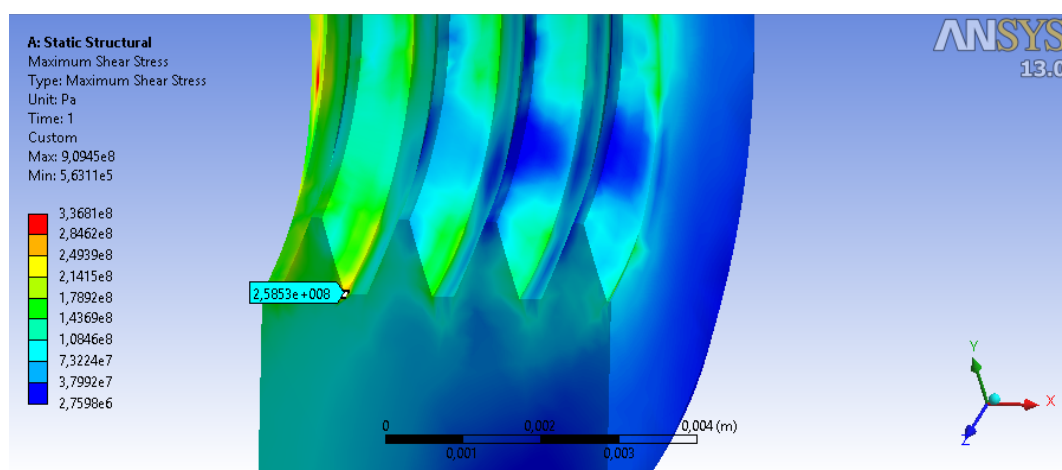


Figura 44– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de latão.

Fonte: Autoria própria.

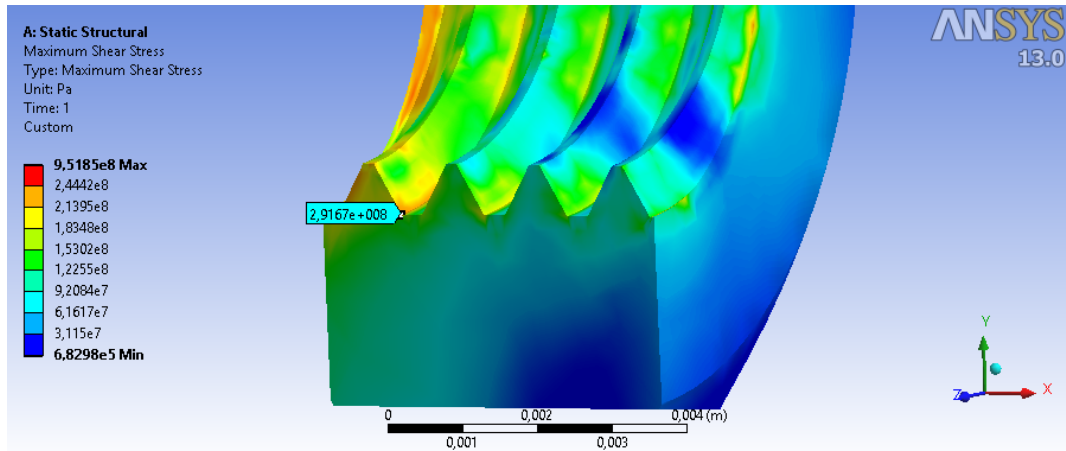


Figura 45– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço 1020.

Fonte: Autoria própria.

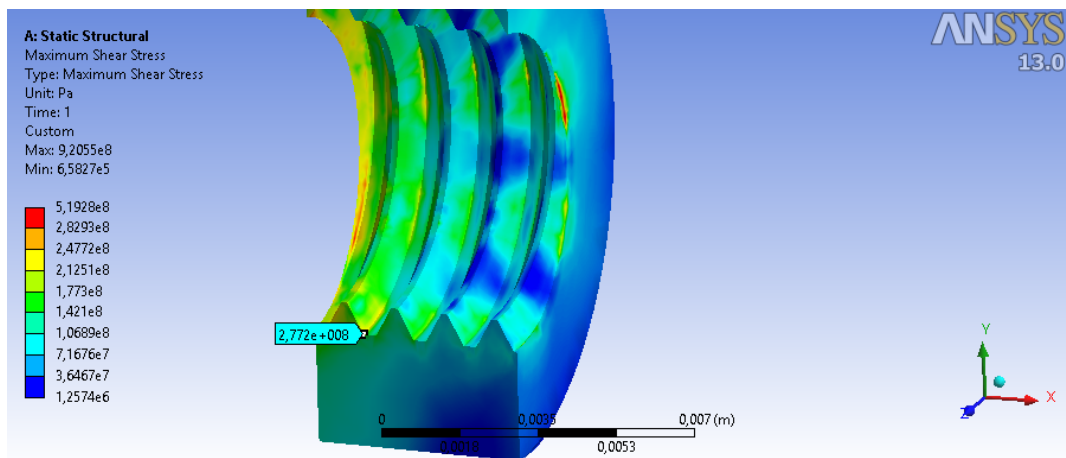


Figura 46– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço 1020 zincado.

Fonte: Autoria própria.

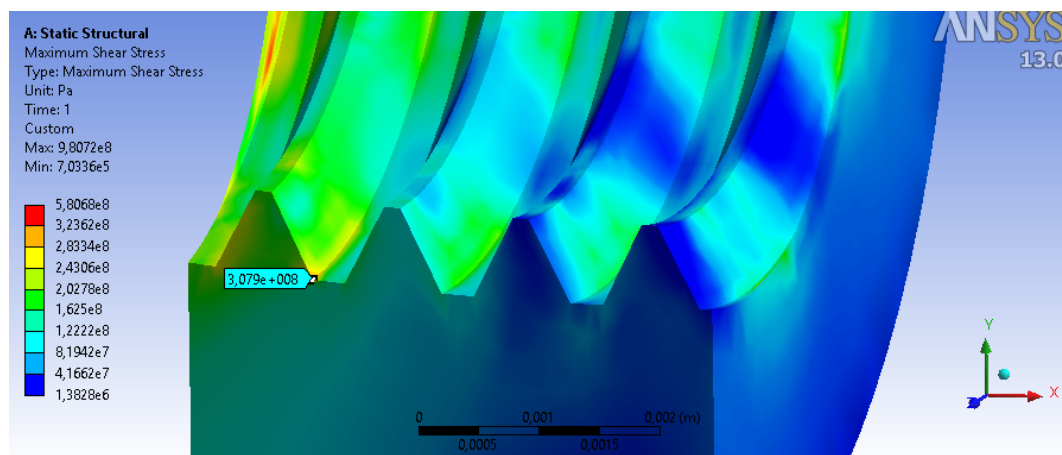


Figura 47– Máxima tensão cisalhante nos filetes de rosca da porca de aço 1020 bicromatizado.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16–Comparativo entre as tensões máximas de cisalhamento nos filetes de rosca das porcas obtidas pelos diferentes métodos de resolução – [MPa].

Material	Método analítico	Método numérico
Aço Inox	334	305
Latão	322	258
Aço 1020	337	292
Aço 1020 zincado	325	277
Aço 1020 bicromatizado	347	308

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 15 e a Tabela 16 é possível perceber que os valores encontrados numericamente são razoavelmente próximos aos valores de referência obtidos de maneira analítica para os parafusos e porcas. Isso indica que a simulação reproduziu com boa aproximação os valores reais e, portanto que seus dados são confiáveis.

Com relação à simplificação geométrica que se cogitou fazer para o parafuso e porca de latão, que possui algumas diferenças por pertencer a outra norma, ela

pode ser validada através da comparação entre a tensão máxima de cisalhamento que deveria ser encontrada caso fosse considerada a geometria real, os valores encontrados analiticamente considerando a simplificação e os valores encontrados através do método dos elementos finitos.

Para o cálculo analítico da tensão máxima de cisalhamento considerando a geometria real do parafuso, utilizaram-se novamente as equações 10 e 12, porém considerando o valor de $d_r=6,1\text{mm}$ e $p=1,41\text{mm}$. No cálculo da tensão máxima de cisalhamento para a porca, foram utilizadas as equações 11 e 12 novamente, porém agora considerando $d=5/16\text{ in}$ e $p=1,41$. Os valores de w_i e w_o tabelados são os mesmos para as normas ISO e UNC. A comparação entre os três valores de tensões máximas cisalhantes citadas podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17–Comparativo entre as tensões máximas de cisalhamento no conjunto de latão obtidas de maneiras diferentes.

Componente	Tensão cisalhante [MPa] - Método analítico considerando geometria igual a norma ISO	Tensão cisalhante [MPa] - Método numérico	Tensão cisalhante [MPa] - Método analítico considerando geometria real (norma UNC)
Porca	322	258	289
Parafuso	439	436	413

Fonte: Autoria própria.

Avaliando os valores contidos na tabela é possível perceber que a aproximação é razoável já que os valores de tensão máxima cisalhante são razoavelmente próximos para os três cálculos considerados.

4.4.4 Simulação do conjunto de aço inox

A Figura 48 apresenta a distribuição das tensões de Von Mises, em Pascal, para o parafuso.

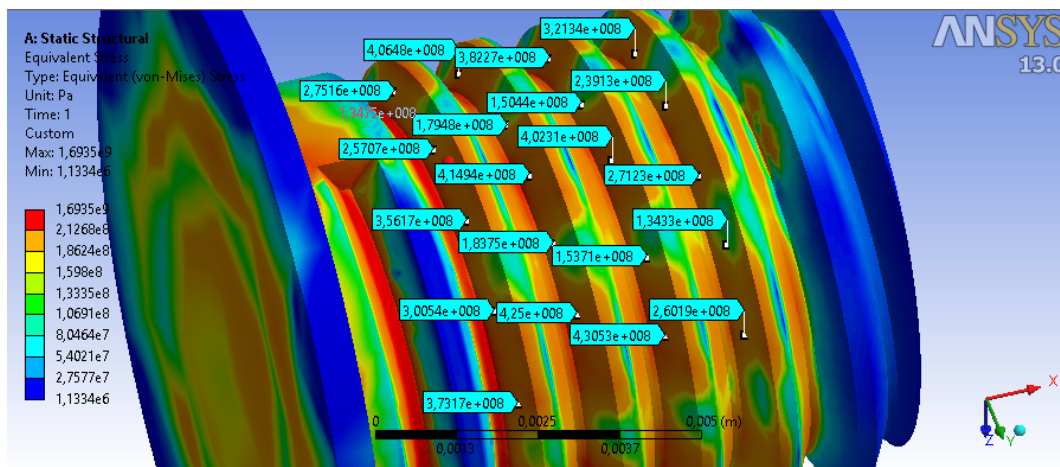


Figura 48– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço inox.

Fonte: Autoria própria.

Os valores indicados na Figura 48 são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço inox.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	275	406	382	320
Medição 2	257	180	150	239
Medição 3	356	414	402	271
Medição 4	300	183	153	134
Medição 5	373	425	430	260
Média	312± 50	322 ± 128	303 ± 140	245 ± 69

Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados da Tabela 18 observa-se que os esforços não são igualmente distribuídos entre os filetes de rosca. Nota-se também que a média de tensões de Von Mises apresentada para cada um dos quatro filetes de rosca é superior a tensão de escoamento do material.

O resultado da simulação nos filetes de rosca da porca é apresentado na Figura 49.

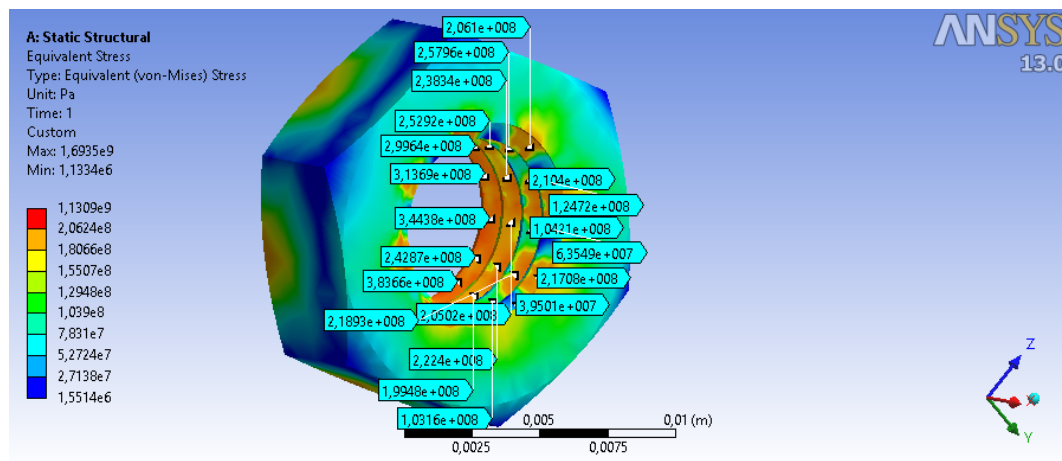


Figura 49– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço inox.

Fonte: Autoria própria.

Os valores indicados na Figura 39 são apresentados na Tabela19.

Tabela 19–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço inox.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	299	252	257	206
Medição 2	313	238	210	124
Medição 3	343	205	104	63
Medição 4	242	225	218	217
Medição 5	383	199	103	39
Média	316 ± 52	224 ± 22	178 ± 71	130 ± 81

Fonte: Autoria própria.

Avaliando a Tabela19 é possível verificar que dos quatro filetes em apenas dois deles a tensão de Von Mises superou a tensão de escoamento do material. Além disso, assim como ocorreu com o parafuso, observa-se que o esforço não é igualmente distribuído entre os filetes de rosca.

Portanto, avaliando-se os resultados obtidos tanto para o parafuso como para a porca de aço inox é possível garantir que houve deformação plástica no momento do ensaio. Tal situação justifica a grande interferência apresentada pelo conjunto de inox após o ensaio.

4.4.5 Simulação do conjunto de latão

Apesar da geometria do parafuso de latão pertencer a outra norma, optou-se por utilizar o mesmo modelo em função da dificuldade em fazer a montagem dos componentes helicoidais e pelo processo de validação ter mostrado que a simplificação não teria grande influência no resultado final.

A Figura 50 apresenta o campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso. Os valores são transcritos para a Tabela 20.

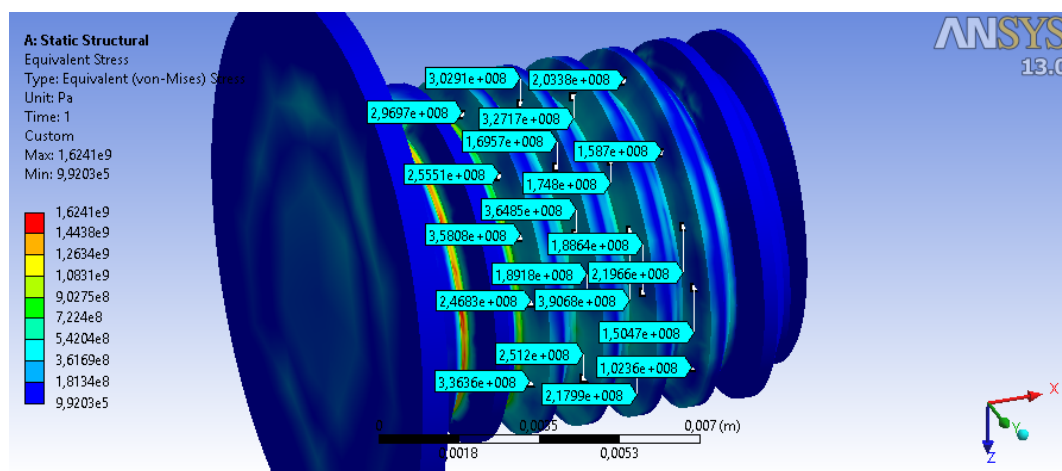


Figura 50– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de latão.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20- Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de latão.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	297	302	327	203
Medição 2	255	170	175	159
Medição 3	358	365	390	220
Medição 4	246	189	189	150
Medição 5	336	250	218	102
Média	298 ± 49	255 ± 80	260 ± 94	167 ± 47

Fonte: Autoria própria.

Com base na tabela é possível perceber que apesar de algumas tensões de Von Mises terem superado a tensão de escoamento do material (310 MPa), a média das tensões para todos os filetes foi inferior.

Já o campo de tensões de Von Mises para os filetes de rosca da porca de latão é apresentado na Figura 51 e transcrito para a Tabela 21.

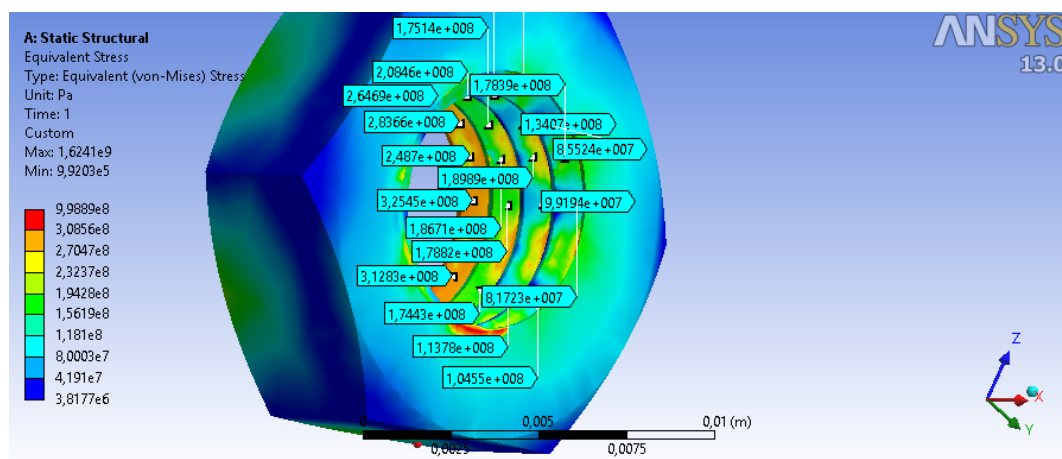


Figura 51– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de latão.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de latão.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	265	208	201	169
Medição 2	284	175	134	85
Medição 3	249	186	189	178
Medição 4	325	179	99	81
Medição 5	312	174	113	104
Média	287 ± 32	184 ± 14	147 ± 46	123 ± 47

Fonte: Autoria própria.

Os dados da tabela apresentam algumas medições cuja tensão de Von Mises supera a tensão de escoamento do material (310 MPa), apesar disso, o valor das médias se encontra inferior ao limite.

Avaliando de maneira individual todas as medições da tensão de Von Mises para o parafuso e porca de latão, pode-se afirmar que algumas pequenas regiões sofreram escoamento. Porém, como as tensões apresentadas são ligeiramente superiores a tensão de escoamento e como a média das tensões ao longo dos filetes é inferior a tensão de escoamento, é possível afirmar que não houve deformação plástica generalizada. Isso pode ser confirmado avaliando as amostras

ensaiadas desse grupo, que não apresentaram interferência significativamente maior do que a que já possuíam antes do ensaio.

4.4.6 Simulação do conjunto de aço 1020

Para a simulação do par porca-parafuso de aço carbono 1020, foram utilizados os mesmo parâmetros já apresentados, exceto a força aplicada que foi de 9,32kN que é a força média apresentada na tabela. Além disso, também foi alterado o material, para considerar as propriedades mecânicas do aço 1020 e o coeficiente de atrito para 0,281, também já apresentado. O campo de tensões de Von Mises para os filetes de rosca do parafuso é apresentado na Figura 52.

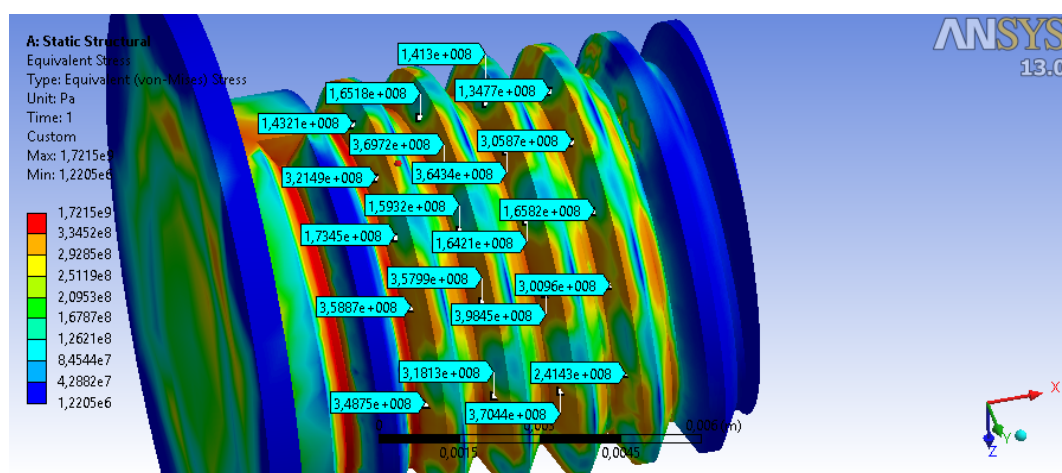


Figura 52– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020.

Fonte: Autoria própria.

Os valores indicados na Figura 52 são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22– Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	143	165	143	135
Medição 2	321	369	364	306
Medição 3	173	159	164	165
Medição 4	358	358	398	301
Medição 5	348	318	370	241
Média	269 ± 102	274 ± 104	288 ± 123	230 ± 78

Fonte: Autoria própria.

Os dados da tabela indicam que apesar de algumas medições da tensão de Von Mises ter superado a tensão de escoamento do material (345 MPa), as médias das tensões foi inferior a esse valor para todos os filetes.

Já o campo de tensões de Von Mises para a porca de aço 1020 pode ser visualizado na Figura 53 e Tabela 23.

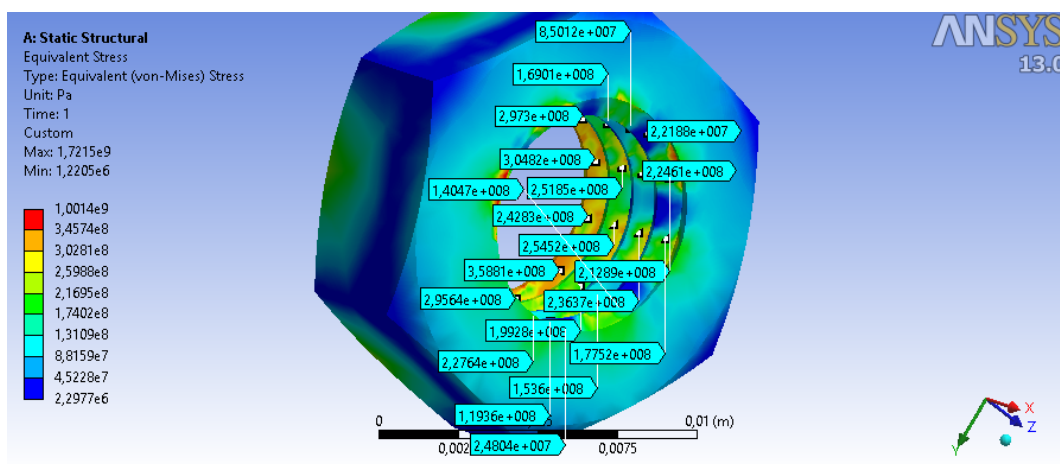


Figura 53– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23– Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	297	169	85	22
Medição 2	305	252	225	213
Medição 3	242	254	236	178
Medição 4	358	199	154	140
Medição 5	296	228	119	25
Média	300 ± 41	220 ± 36	164± 66	116 ± 88

Fonte: Autoria própria.

Conforme a Tabela 23, das 20 medições realizadas ao longo dos filetes de rosca da porca, apenas uma delas apresentou tensão de Von Mises superior a tensão de escoamento do material (345 MPa), já as outras medições e as médias apresentaram valores bem inferiores.

A partir dos campos de tensões apresentados para o par de aço 1020, pode-se afirmar que ocorreu escoamento em regiões pontuais, não havendo escoamento generalizado. Fato esse que justifica o fato de não haver interferência entre o parafuso e a porca após o ensaio de torque.

4.4.7 Simulação do conjunto de aço 1020 zincado

Para o conjunto zincado, foi mantido o material base (aço 1020), e foi alterado o coeficiente de atrito para 0,21 e a força média aplicada de 9kN, ambos já apresentados anteriormente.

O campo de tensões de Von Mises para o parafuso de é apresentado na Figura 54 e na Tabela 24.

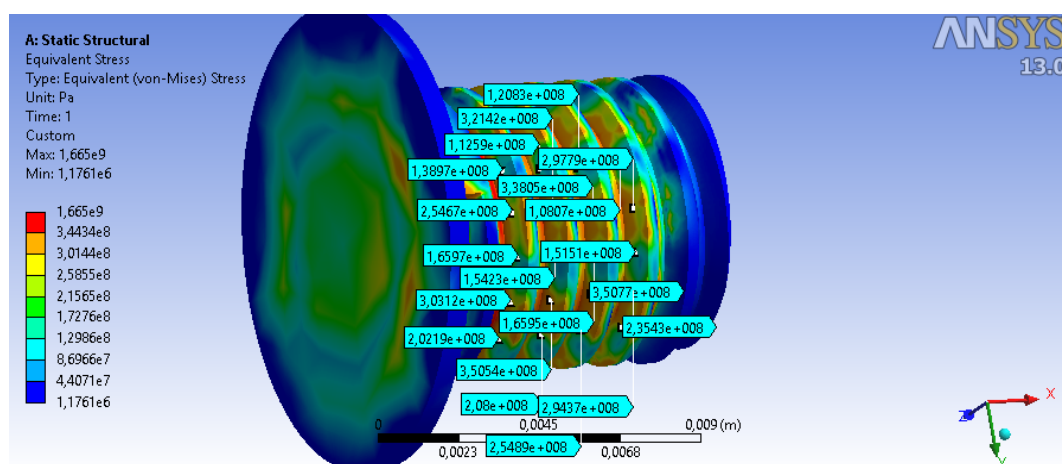


Figura 54 – Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 zincado.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 – Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 zincado.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	139	112	120	108
Medição 2	255	321	338	298
Medição 3	166	155	166	151
Medição 4	303	350	351	294
Medição 5	202	208	255	235
Média	213 ± 66	229 ± 103	246 ± 102	217 ± 85

Fonte: Autoria própria.

Nota-se, assim como nos casos anteriores, que em algumas medições a tensão de Von Mises superou a tensão de escoamento do material (345 MPa), mas apesar disso as médias das medições ficaram abaixo da tensão de escoamento para todos os filetes.

O campo de tensões de Von Mises para a porca de aço 1020 zincado é apresentada na Figura 55 e transcrito para a Tabela 25.

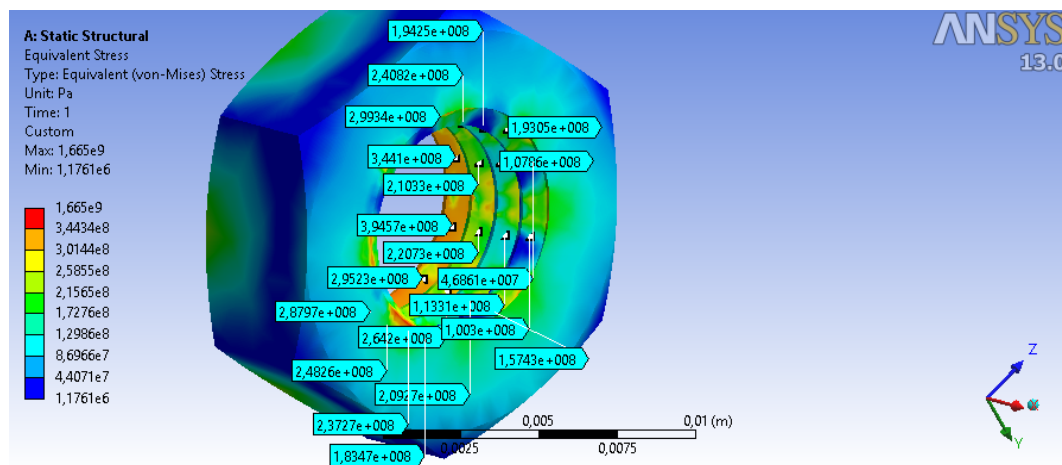


Figura 55 – Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 zincado.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 –Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 zincado.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	299	240	194	193
Medição 2	344	210	108	47
Medição 3	395	221	113	100
Medição 4	295	264	209	157
Medição 5	288	248	237	183
Média	324 ± 45	237 ± 21	172 ± 58	136 ± 61

Fonte: Autoria própria.

Assim como ocorreu no parafuso, na porca de aço 1020 zincado algumas tensões superaram a tensão de escoamento do material, mas a média das tensões de Von Mises foi inferior a tensão de escoamento para todos os filetes.

Avaliando em conjunto o campo de tensões de Von Mises do parafuso e da porca de aço 1020 é possível afirmar que durante o ensaio de torque ocorreram deformações plásticas pontuais. Pode-se afirmar que não houve escoamento generalizado já que a média das tensões ficou bem abaixo da tensão de escoamento do material, fato esse que explica o porquê as amostras desse material não apresentaram interferência após o ensaio de torque.

4.4.8 Simulação do conjunto de aço 1020 bicromatizado amarelo

Para essa simulação foi utilizado o mesmo material de base (aço 1020) com um carregamento de 9,6kN e coeficiente de atrito de 0,272.

O campo de tensões de Von Mises para o parafuso é apresentado na Figura 56 e na Tabela 26.

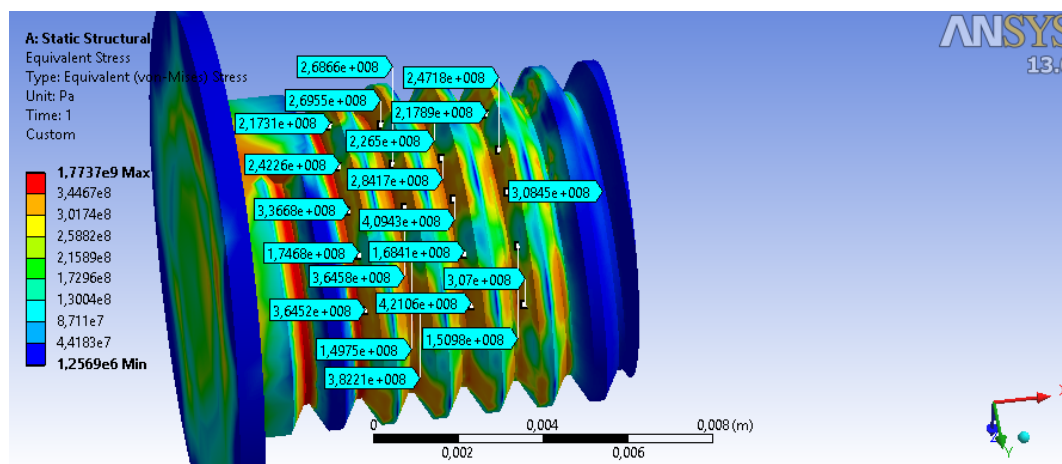


Figura 56 – Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 bicromatizado.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26–Tensões de Von Mises nos filetes de rosca do parafuso de aço 1020 bicromatizado.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	217	270	223	218
Medição 2	242	269	284	247
Medição 3	337	365	409	308
Medição 4	175	150	168	151
Medição 5	364	382	420	307
Média	267 ± 80	287 ± 93	301 ± 112	246 ± 66

Fonte: Autoria própria.

A partir da tabela observa-se que algumas medições da tensão de Von Mises superou a tensão de escoamento do material (345MPa), mas apesar disso as médias das medições ficaram abaixo da tensão de escoamento para todos os filetes.

O campo de tensões de Von Mises para a porca pode ser visualizado na Figura 57 e na Tabela 27.

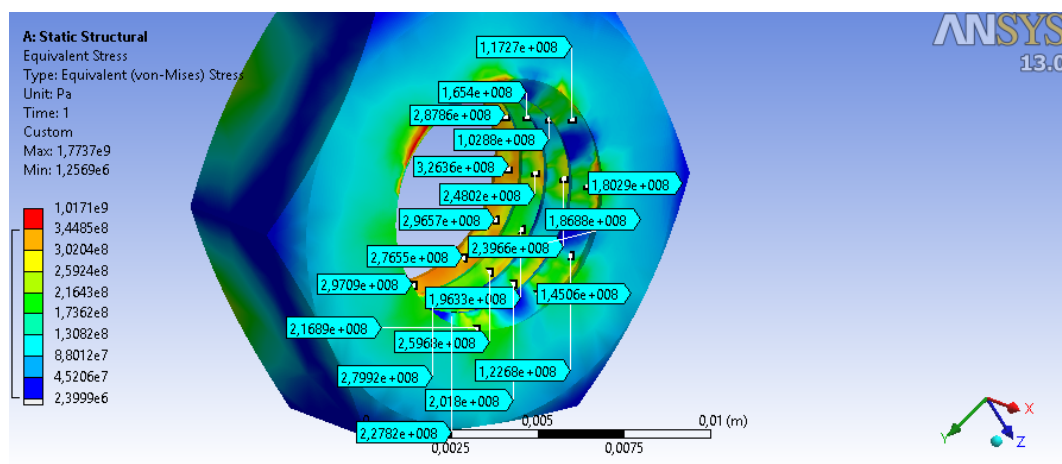


Figura 57– Campo de tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 bicromatizado.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27– Tensões de Von Mises nos filetes de rosca da porca de aço 1020 bicromatizado.

[MPa]	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
Medição 1	288	165	103	117
Medição 2	326	248	239	180
Medição 3	267	196	187	123
Medição 4	277	260	202	145
Medição 5	297	280	228	217
Média	291 ± 23	230 ± 48	192 ± 54	156 ± 42

Fonte: Autoria própria.

Enquanto que no parafuso algumas medições da tensão de Von Mises foi superior a tensão de escoamento do material (345 MPa), na porca é possível observar que todos os valores encontrados são inferiores.

Analisando os campos de tensões de Von Mises para o par porca-parafuso de aço 1020 bicromatizado é possível afirmar que não houve deformação plástica

generalizada, já que a maior parte das medições do parafuso e todas as medições da porca apresentarem tensões inferiores a tensão de escoamento do material.

4.4.9 Discussões envolvendo a simulação numérica

Durante a realização do ensaio de torque, ficou bem evidente que as amostras do par porca-parafuso de aço inox apresentaram grande interferência na montagem e desmontagem, não sendo possível, na maioria das vezes, a montagem manual após o ensaio. Já os parafusos e porcas dos outros materiais não apresentaram interferência significativa após o ensaio, sendo possível rosqueá-los com facilidade mesmo com a mão. Nesse contexto, a simulação numérica possibilitou compreender o que ocorreu. Foi visto nos resultados apresentados que o par porca-parafuso de inox foi o único conjunto de materiais estudados a apresentar a média das tensões de Von Mises bem superior a tensão de escoamento, ou seja, foi o único caso em que ocorreu significativa plastificação. Portanto, pode-se supor que a plastificação foi responsável pela alta interferência no conjunto de aço inox a ponto de impossibilitar a desmontagem em duas amostras, levando o parafuso à falha.

Além disso, o campo de tensões gerados possibilita a comparação entre a média das tensões de Von Mises nos parafusos e porcas com o coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torque para cada material, conforme apresentado na Figura 58.

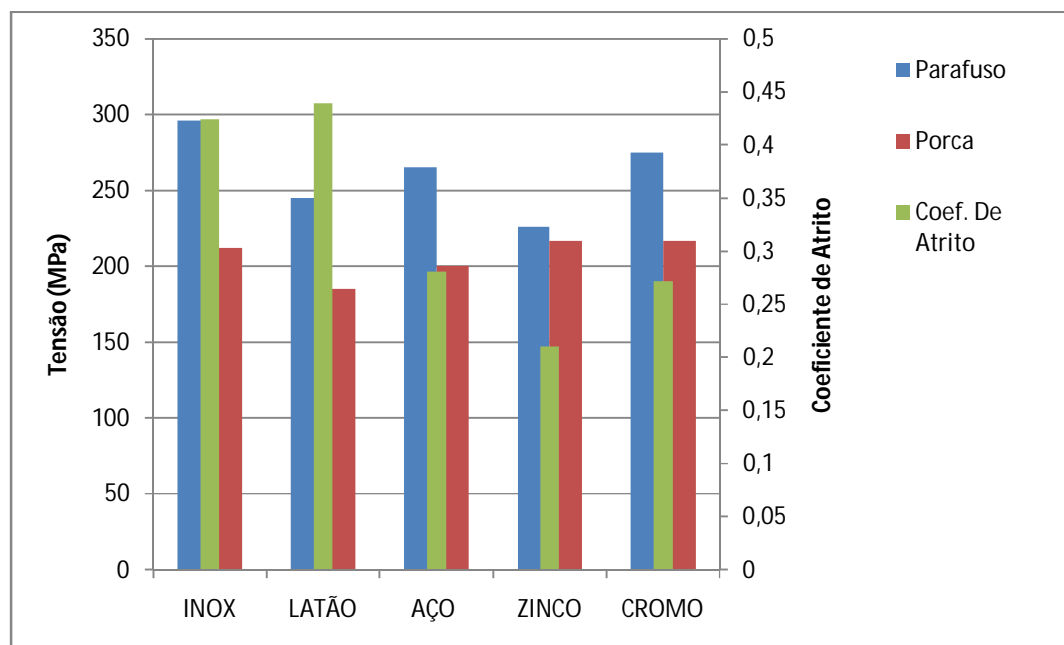


Figura 58– Comparativo entre as tensões médias de vonMises com o coeficiente de atrito.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber uma relação entre o coeficiente de atrito e as tensões de Von Mises encontradas nas simulações, com exceção do par de latão, que apesar de apresentar o mais alto coeficiente de atrito não apresentou as maiores tensões. Nas demais amostras esta relação é válida para as tensões de Von Mises no parafusos, não sendo observada para as porcas.

Observa-se também que as tensões médias de Von Mises para as porcas dos cinco conjuntos ficaram muito próximas, enquanto que para os parafusos houve maior desvio. Isso se deve, provavelmente, à forma como cada material transmite esforços através da região de contato. Ou seja, as porcas foram submetidas à forças muito semelhantes e possuem materiais com propriedades mecânicas razoavelmente parecidas, por isso resultaram em tensões bem próximas.

Já as tensões nos parafusos dependem da maneira como a força é transmitida ao longo da região de contato, que depende dos parâmetros tribológicos envolvidos, tais como o coeficiente de atrito e o tipo de desgaste envolvido no sistema.

4.5 Discussão sobre os resultados do aço inox

Inicialmente, de forma intuitiva, foi selecionado o latão como o material de menor tensão de escoamento, sendo ele o escolhido como limitação para a aplicação do torque de aperto.

Durante a etapa preliminar de seleção de materiais, imaginava-se que os parafusos e porcas de aço inox 304 seriam os mais resistentes mecanicamente, excluindo sua participação nos cálculos das forças limite a serem aplicadas durante os testes.

Já na etapa de ensaios de aplicação de torque na máquina de testes, foi percebido que os parafusos e porcas de inox deformavam plasticamente, como já citado, dificultando a retirada do conjunto da máquina de testes, levando inclusive a fratura de dois parafusos durante esse procedimento.

Esta situação já suscitou dúvidas com relação à tensão de escoamento do aço inox, uma vez que não foram observadas as mesmas dificuldades para os outros materiais selecionados. Todavia foram obtidos resultados que foram levados para a simulação numérica.

Durante as simulações, foi percebido que o conjunto de aço inox estava deformando plasticamente com a força aplicada. A necessidade de entrar com os dados do material para a realização das simulações levou a constatação de que a força aplicada nos ensaios de torque para o aço inox excedia a tensão limite de escoamento do material, o que explicava a dificuldade em desmontar a porca do parafuso no equipamento de testes e sua dificuldade em fazer a montagem posterior aos ensaios.

É importante ressaltar que nenhum caso de rasgamento dos filetes foi observado durante os ensaios de torque de aperto.

Nas simulações dos parafusos e porcas de aço inox, foi percebida uma grande plastificação do material, diferente dos outros materiais, que apresentaram pouca ou nenhuma plastificação.

Acredita-se então que os resultados obtidos para o aço inox na etapa de ensaio de torque e obtenção do coeficiente de atrito não são os mais precisos, e devem ser analisados com cuidado, já que houve deformação plástica.

Certamente um novo estudo com o material seria necessário para dirimir as dúvidas a respeito de seu comportamento durante a aplicação do torque de aperto em montagens aparafusadas. Porém, neste trabalho, não houve tempo hábil e nem material disponível para realizar novamente todos os ensaios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

São muitas as propostas para trabalhos futuros que podem surgir deste trabalho. Principalmente devido ao grande número de variáveis envolvidas.

Inicialmente podem-se desenvolver trabalhos com apenas um tipo de material, repetindo o ensaio um número de vezes predefinido, observando o comportamento do par porca-parafuso quanto a condição de desgaste, atrito e deformação, procurando manter fixos a condição ambiental (temperatura, umidade relativa, etc.) e a velocidade de aperto, trabalhando dentro do regime elástico do material.

Outro trabalho que pode ser desenvolvido nesta mesma linha de pesquisa é buscar, para um mesmo material e condições controladas, variar a velocidade de aplicação de torque e registrar o que ocorre com o atrito e o desgaste da peça.

Mais uma sugestão é também o desenvolvimento de um equipamento que consiga controlar a velocidade de aplicação do torque e o torque aplicado, e que possa se adaptar as condições de ensaio da máquina de testes, tornando possível o controle rígido destes dois parâmetros em trabalhos posteriores.

Em outro trabalho, poderia ser variado o torque de aperto para um mesmo material, mantendo a velocidade de aplicação constante, definindo assim a influência dos diferentes torques no atrito e no desgaste das superfícies.

Há ainda a questão da dificuldade de se verificar qual o lado da porca está sendo montado, portanto seria muito útil avaliar qual a influência do lado da porca no coeficiente de atrito.

Muitos trabalhos podem ser desenvolvidos com esta mesma linha de trabalho, ao se adicionar lubrificantes. Mais uma sugestão seria repetir este trabalho em ambiente controlado e adicionar lubrificantes à região roscada, avaliando assim o coeficiente de atrito e coeficiente de torque. Também podem ser aplicados lubrificantes às outras sugestões propostas aqui, variando o tipo e a qualidade, gerando uma grande quantidade de novos trabalhos.

6 CONCLUSÃO

Inicialmente pensou-se que a determinação do coeficiente de atrito das amostras ensaiadas poderia ser um parâmetro prático utilizado em futuras montagens envolvendo parafusos dos mesmos materiais ensaiados. Ou seja, acreditava-se que depois de encontrado o coeficiente de atrito, e sabendo-se a força que a junta aparafusada deveria suportar após a montagem, o projetista poderia determinar com alto grau de confiabilidade o torque que o operador deveria utilizar para realizar a montagem.

Porém, a variação encontrada nos valores de coeficiente de atrito calculados durante o ensaio de torque e também a revisão bibliográfica deixaram claro que isso não pode ser feito desta maneira. O maior problema encontrado é a grande quantidade de variáveis que influenciam o aparafusamento, que não foram contempladas durante o estudo, e que dificilmente podem ser controladas em uma linha de montagem. Parâmetros como temperatura do ambiente, umidade do ambiente, geometria da porca e parafuso, tipo de desengraxante utilizado, velocidade de aplicação do torque, entre outros, são fatores que interferem significativamente no coeficiente de atrito. Portanto, não é coerente que um estudo feito em laboratório possa reproduzir de maneira realista o que ocorre nas linhas de montagem.

Apesar disso, acredita-se na importância do ensaio de torque realizado, principalmente para efeito de comparação entre as diferentes amostras, já que todas foram ensaiadas sob condições semelhantes.

O que se propõe aqui é que se deve ter cuidado ao encontrar o coeficiente de atrito de um determinado sistema e usá-lo sem distinção.

É possível sim que seja utilizado o coeficiente de atrito na determinação do torque de aperto em linhas de montagem, mas para isso, deve-se realizar o ensaio de torque na própria linha de montagem, e assegurar que esses parâmetros que influenciam a montagem se mantenham constantes. Caso contrário, o valor encontrado para o coeficiente de atrito não será confiável e, portanto, sem propósito.

Acredita-se que o trabalho cumpriu seu objetivo principal, demonstrando a influência do atrito nos filetes de rosca da união aparafusada no coeficiente de torque e na aplicação da pré-carga durante a montagem.

Muito foi estudado sobre os conceitos teóricos que envolvem parafusos e porcas e sua montagem. Muitos efeitos foram encontrados, pesquisados e explicados, bem como suas influências durante a realização das diversas etapas do trabalho.

O equipamento de ensaio, desenvolvido na própria universidade, mostrou-se apto a realizar os ensaios, mas sua operação demanda alguns cuidados e ajustes que se não tomados, podem levar a resultados estranhos e pouco confiáveis. Todavia sua operação é bastante simples e com sua portabilidade, pode ser levado para o ambiente industrial para a realização de ensaios *in loco*, o melhor dos cenários.

Outra etapa cumprida do trabalho foi o desenvolvimento e projeto de adaptações e novas peças para o equipamento, permitindo a aplicação do ensaio para uma gama maior de parafusos, podendo ensaiar amostras de tamanho ISO M6 até M14, tornando o ensaio mais versátil, desde que observados os limites da célula de carga.

Outro objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento do estudo de um campo de tensões através da simulação numérica, que auxiliou a compreender os fenômenos tribológicos e os resultados encontrados durante os ensaios de torque de aperto.

O conhecimento deste campo de tensões simulado numericamente também auxiliou na visualização de possíveis regiões de plastificação que podem ter ocorrido nas amostras nos ensaios de torque, mostrando as regiões de possível deformação junto aos filetes de rosca tanto da porca quanto do parafuso.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **ASM Handbook volume 8: Mechanical testing and evaluation**. USA, 2000.
- AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **ASM Handbook volume 18: Friction, lubrication and wear technology**. USA, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS. **ASME PCC-1 – 2000: Guidelines for pressure boundary bolted flange joint assembly**. USA, 2001.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1ªed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2003.
- BATENI, M. R. SZPUNAR, J. A. WANG. X. LI, D. Y. **Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel**. *Wear* nº 260, p. 116-122, 2006.
- BREGKIOZZI, G. DI SCHINO, A. KENNY, J. M. HAEFKE, H. **the influence of atmospheric humidity and grain size on the friction and wear of AISI 304 austenitic stainless steel**. *Materials Letters* nº 57, p. 4505-4508, 2003.
- CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CISER. **Catálogo de fixadores**. Disponível em <http://www.ciser.com.br/produtos/tipo/fixadores>. Último acesso em 28 de Dezembro de 2014.
- CORNWELL, J. F. **Some observations on friction in screw threads**. *Wear* nº 67. p. 319-329, 1981.
- CROCCOLO, D. DE AGOSTINIS, M. VINCENZI, N. **A contribution to the selection of screws in high duty bolted joints**. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Nº 96-97, p. 38-48. Fevereiro, 2012.
- CROCCOLO, D. DE AGOSTINIS, M. VINCENZI, N. **Failure analysis of bolted joints: effect of friction coefficients in torque-preloading relationship**. *Engineering Failure Analysis* nº 18. p. 364-373. 2011.
- CROCCOLO, D. DE AGOSTINIS, M. VINCENZI, N. **Influence of tightening procedures and lubrication conditions on titanium screw joints for lightweight applications**. *Tribology International* nº 55, p. 68-76. 2012.
- DINGER, G. FRIEDRICH, C. **Avoiding self-loosening failure of bolted joints with numerical assessment of local contact state**. *Engineering Failure Analysis*. Nº 18, p. 2188-2200. Julho, 2011.

- ECCLES, W. SHERRINGTON, I. ARNELL, R.D. **Frictional changes during repeated tightening of zinc plated threaded fasteners.** TribologyInternational nº 43, p. 700-707. 2010.
- FARIAS, M. C. M. SOUZA, R. M. SINATORA, A. TANAKA, D. K. **The influence of applied load, slinding velocity and martensitic transformation on the unlubricated sliding wear of austenitic stainless steels.**Wear nº 263, p. 773-781, 2007.
- FISCHER, U. GOMERINGER, R. HEINZLER, M. KILGUS, R, NAHER, F. OESTERLE, S. PAETZOLD, H. STEPHAN, A. **Manual de tecnologia metal mecânica.** Tradução da 43ª edição alemã. São Paulo, Editora Blucher, 2008.
- GARCIA. R. **Conceitos gerais sobre o torque e processos de torque.** Boletim técnico MetalWork, 2011.
- HAGIWARA, M. MANO, Y. HAMADA, M, NUNOGAMI, K. OZEKI, H. ITO, S. **Development of a new testing machine for torque/clamp force testing for threaded fasteners in accordance with ISO16047.** Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing. Nº 4, vol 3, p. 324-332. 2009.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION **.ISO 16047: Fasteners - Torque/clamp force testing.** Genebra, Suíça, 2005.
- IZUMI.S. YOKOHAMA, T. IWASAKI, A. SAKAI, S. **Three-dimensional finite element analysis of tightening and loosening mechanism of threaded fastener.**Engineering Failure Analysis nº 12, p. 604-615, 2005.
- KAPLAN, M.**Stone tools shed light on early human migrations.** Natureinternational weekly journal of science, 31 ago. 2011. Disponível em: <www.nature.com/news/2011/110831/full/news.2011.511.html>. ACESSO EM: 27 MAIO. 2014.
- LEBEDEV, A. A. KOSARCHUK, V. V. **Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steel.** International Journal of Plasticity nº 16, p. 749-767, 2000.
- LUCACHEUSKI, G. WANDREY, L. M. SANTOS, R. J. **Projeto de um protótipo para medir força em uniões aparafusadas.** 2013. 116 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2013.
- MACEDO, A. P. **Uso do método de elementos finitos na análise biomecânica de parafusos do sistema de fixação vertebral.** 2009. 110p. Dissertação (Mestrado) –

Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009.

MAIR, L. H. STOLARSKI, T. A. VOWLES, R. W. LLOYD, C. H. **Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop.** Journal of Dentistry, vol. 24, p. 141-148, 1996.

METALAC SPS. **Catálogo de fixadores.** São Paulo: METALAC, 2008. 52p.

Modern tribology handbook. Edited by Bharat Bhushan. CRC press, 2001.

MIKRO METAIS. **Catálogo de produtos.** São Paulo, MIKRO METAIS, 2014, 21p

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada.** 4º edição. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013.

NSK ROLAMENTOS. **Catálogo Geral de Rolamentos.** São Paulo: NSK, 2013. 557p.

OSKOU EI, R. H. CHAKHERLOU, T. N. **Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates.** Aerospace Science and Technology, nº 13, p. 325-330. 2009.

PANAGOPOULOS, C. N. GEORGIU, E. P. SIMEONIDIS, K. **Lubricated wear behavior of leaded $\alpha + \beta$ brass.** Tribology International nº 50, p. 1-5, 2012.

PANAGOPOULOS, C. N. GEORGIU, E. P. MARKOPOULOS, C. **Corrosion and wear of zinc in various aqueous based environments.** Corrosion Science nº 70, p. 62-67, 2013.

PINHEIRO, D. **Parafuso é coisa séria.** Revista Piauí, 65ª ed, Fev. 2012. Disponível em: <<http://revistapiaui.estadao.com.br/edicao-65/esquina/parafuso-e-coisa-seria>>. ACESSO EM: 07 JUL. 2014.

RIGNEY, D. A. CHEN, L. H. NAYLOR, M. G. S. ROSENFELD, A. R. **Wear processes in sliding systems.** Wear nº 100, p. 195-219, 1984.

SHIGLEY, J. E. MISCHKE C. R. BUDYANS, R. G. **Projeto de elementos de máquinas.** 7ª edição, Porto Alegre, RS. Bookman editora. 2005.

SCHOLZ MECHANIK – **Catálogo geral de peças.**

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I.** 7ª Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

TURNER, M.J., CLOUGH, R. W., MARTIN, H.C. TOPP, J. L. **Stiffness and deflection analysis of complex structures.** Journal of the Aeronautical Sciences, 1956.

WIMMER, M. A. LOOS, J. NASSUTT, R. HEITKEMPER, M. FISCHER, A. **The acting wear mechanisms on metal-on-metal hip joint bearings: in vitro results.**

Wear, nº 250, p. 129-139, 2001.

ZHAO, H. **Analysis of the load distribution in a bolt-nut conector.** Computer and Structures vol 53 nº 6.p.1465-1472, 1994.

ZANDRAHIMI, M. BATENI, M. R. POLADI, A. SZPUNAR, A. **The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel.**Wear nº 263, p. 674-678, 2007.

Como surgiu o parafuso. Revista do Parafuso, 1ª ed, 30 Dez. 2006.Disponível em:<www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=298>. Acesso em: 27 MAI. 2014.

Case. Revista do Parafuso, 44ª ed, 20 Mar. 2014.Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=706>>. Acesso em: 07 JUL. 2014.

APÊNDICE A – TUTORIAL ANSYS

Tutorial de utilização do Ansys Workbench 2.0 FrameWork Versão 13.0.0

Aqui são apresentadas as etapas mais importantes para realizar a simulação numérica em uniões aparafusadas. Antes de ler o tutorial deve-se ter em mente que cada análise tem suas particularidades e, portanto algumas alterações podem ser necessárias.

1 – Sugere-se a criação do modelo em 3D usando algum *software* específico para isso, visto que essa não é a especialidade do Ansys e suas ferramentas são um tanto limitadas nesse sentido. Portanto, após modelar o parafuso e porca em *software* CAD, salvar em formato “.igs” pois é o formato melhor reconhecido pelo Ansys.

2 – Após abrir o Ansys Workbench o ambiente de trabalho que aparecerá será como o mostrado na Figura 1.

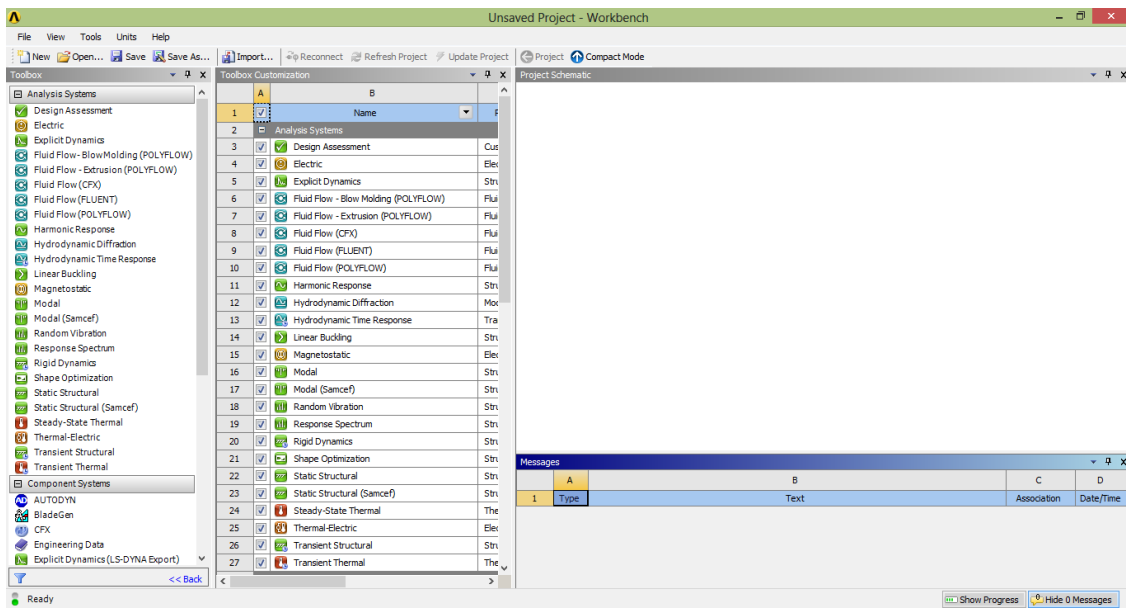


Figura A1 – Ambiente de trabalho do Ansys Workbench.
Fonte: Autoria própria.

3 – No ambiente mais da esquerda pressione o mouse sobre a ferramenta “Static Structural” e arraste para a janela “Project Schematic”. O resultado é mostrado na Figura 2.

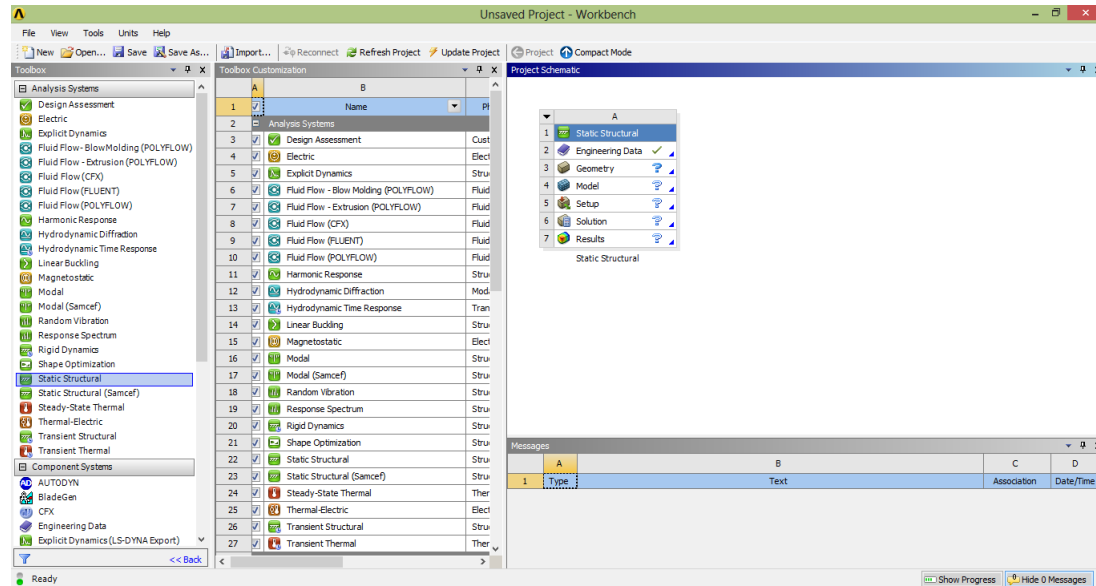


Figura A2 – Inclusão do parâmetro a ser estudado pelo Ansys Workbench.
Fonte: Autoria própria.

3 – É importante selecionar quais materiais serão utilizados nas simulações, para isso clique duas vezes sobre o item 2 “Engineering Data”.

4 – Então aperte em 1 para acessar a biblioteca, em 2 para selecionar a classe de materiais desejados, no símbolo “+” em 3 para adicionar os materiais desejados e em 4 para retornar a tela anterior, conforme indicado na Figura 3.

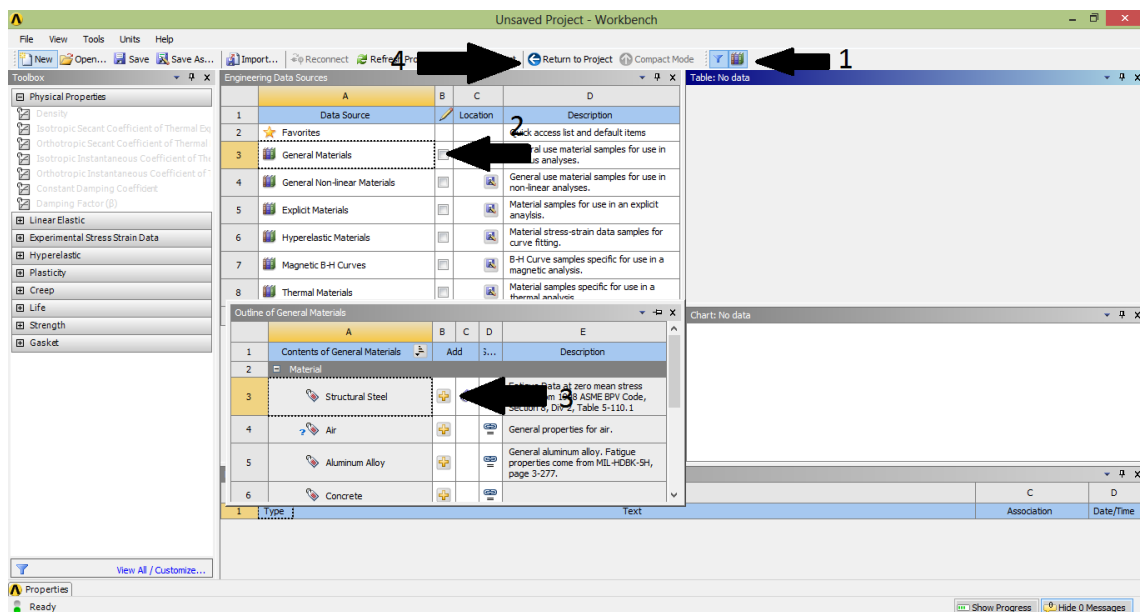


Figura A3 – Método para seleção de materiais a serem utilizados durante simulação no Ansys Workbench.
Fonte: Autoria própria.

5 – Depois de selecionado os materiais que serão utilizados, deve-se determinar qual geometria será simulada. Então dê dois cliques em “Geometry”.

6 – Para importar a geometria do *software* CAD deve-se primeiro selecionar a unidade dimensional na janela que irá aparecer e então conforme a Figura 4 clique em 1 “file”, depois em 2 “Import external geometry file”, depois em 3 selecione o formato “.igs” e depois clique em 4 para abrir.

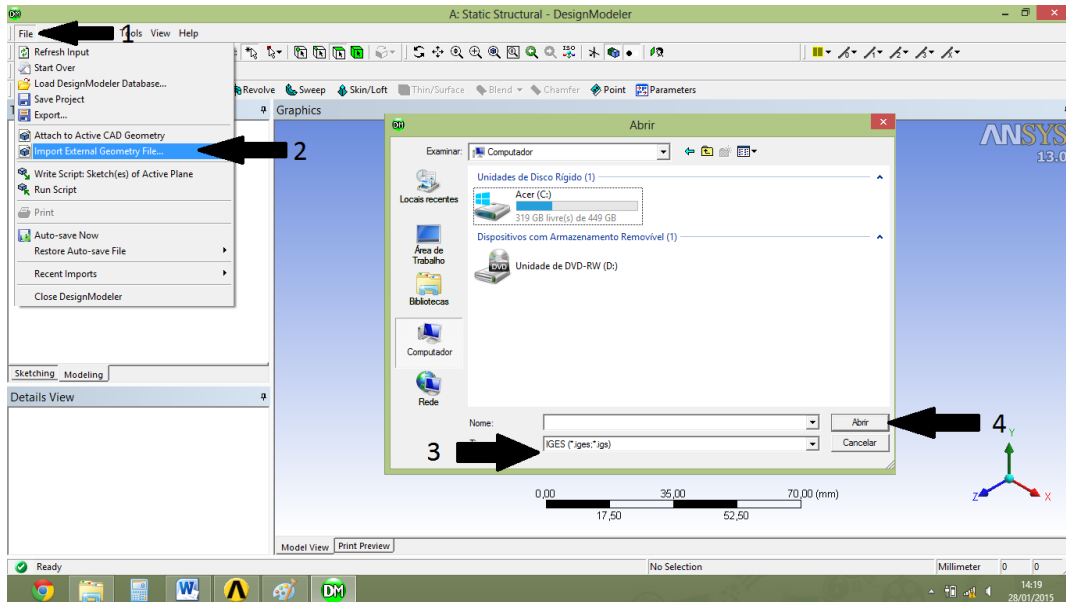


Figura A4 – Método para importar geometria para o Ansys Workbench.
 Fonte: Autoria própria.

7 – Para concluir a escolha da geometria, clique em 1 “Generate” e pode-se apertar em 2 para fechar a janela, conforme indicado na Figura 5.

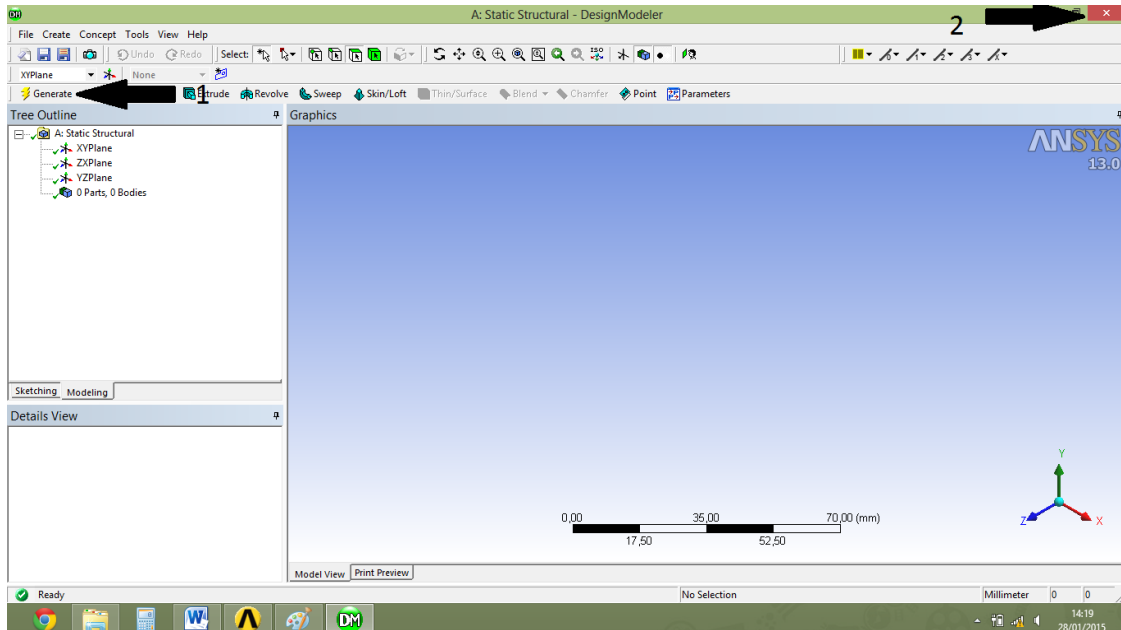


Figura A5 – Método para concluir importação de geometria para o Ansys Workbench.
Fonte: Autoria própria.

8 – Já definidos o material de trabalho e a geometria que será simulada, é preciso definir as condições da simulação, para isso clique duas em 4 “Model”.

9 – Para definir o material de cada componente, no menu esquerdo clique sobre Solid e selecione o material, conforme a Figura 6. Aqui é preciso avaliar se é importante considerar os efeitos não lineares e térmicos.

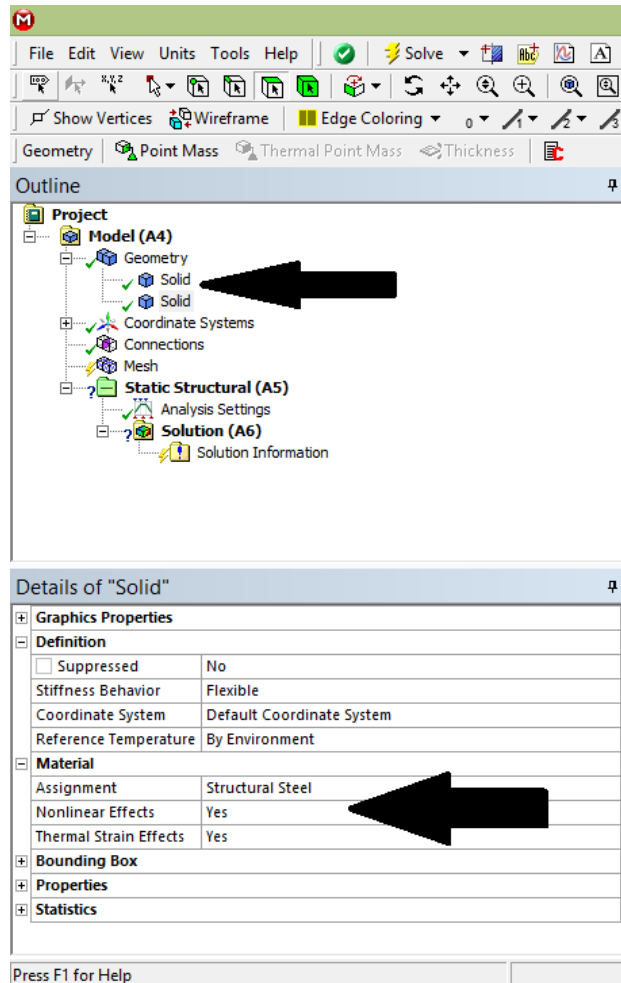


Figura A6 – Método para selecionar os materiais dos componentes que serão simulados.
Fonte: Autoria própria.

10 – Caso o *software* não reconheça automaticamente as superfícies em contato, será preciso clicar em “Connections”, “Contact” e “Frictional”, para adicionar o contato, conforme mostrado na Figura 7.

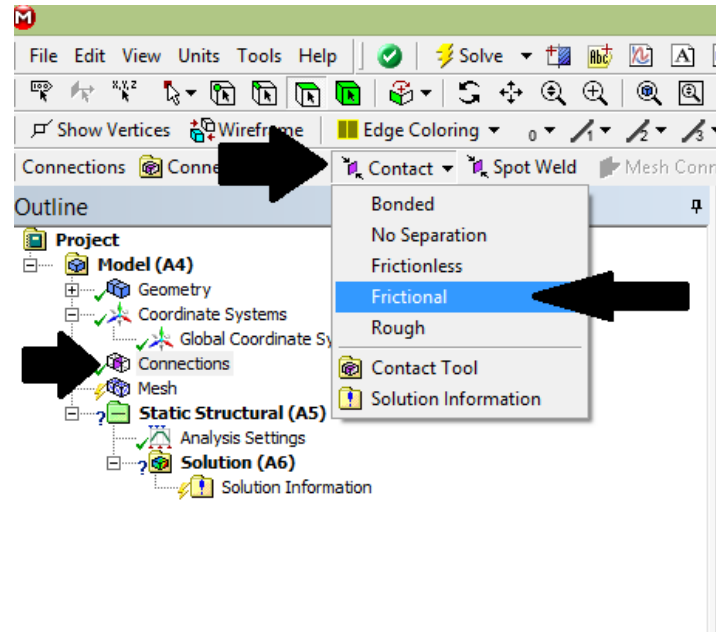


Figura A7 – Método para adicionar manualmente a região de contato entre os componentes.
Fonte: Autoria própria.

11 – Para definir os parâmetros do contato é preciso clicar sobre a linha de contato que surgiu no passo 10 e seguir as instruções da Figura 8. Conforme passo 1, incluir em “Contact” e “Target” as superfícies que devem estar em contato. Para o presente estudo é coerente selecionar as laterais dos filetes de rosca tanto para a porca como para o parafuso. No passo 2 deve-se inserir o coeficiente de atrito entre as superfícies e no passo 3 deve-se selecionar a configuração “Adjust to Touch” para que o *software* considere as superfícies em contato mesmo que haja uma pequena folga entre elas.




Details of "Frictional - No Selection To No Selection" 4	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	No Selection 
Target	No Selection
Contact Bodies	No Selection
Target Bodies	No Selection
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0, 
Scope Mode	Manual
Behavior	Symmetric
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Pure Penalty
Interface Treatment	Adjust to Touch 
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Never
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None

Figura A8 – Método para definir os parâmetros da região de contato entre os componentes.

Fonte: Autoria própria.

12 – Para ajustar os parâmetros da malha é preciso clicar em “Mesh” no menu esquerdo e configurar os parâmetros da malha, como por exemplo o grau de refinamento e o tipo de função de aproximação, conforme a necessidade do estudo. Após definir os parâmetros deve-se clicar com o botão direito sobre “Mesh” e em seguida em “Generate mesh”.

13 – Caso seja necessário pode-se ainda fazer um refinamento em alguns pontos da malha, clicando novamente com o botão direito sobre “Mesh”, “Insert” e então em “Refinement”. Após selecionar em qual região deseja-se refinar a malha, e qual o grau de refinamento, deve-se novamente clicar em “Generatemesh”.

14 – Para definir quais são os esforços a que os componentes estão submetidos, como forças, pressões e engastes, deve-se no passo 1 clicar com o botão direito do mouse sobre “Stactic Structural”, no passo 2 em “Insert” e então selecionar o esforço desejado, conforme Figura 9. Deve-se escolher também a superfície onde ele será aplicado e sua amplitude, conforme Figura 10.

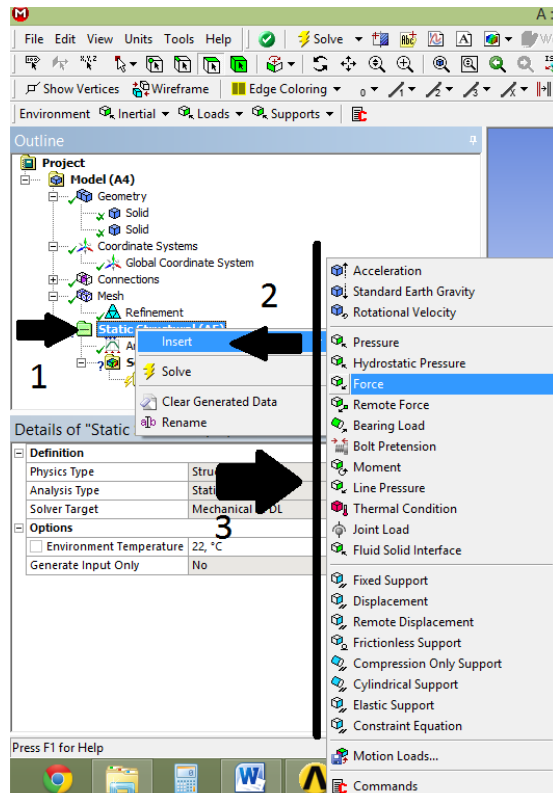


Figura A9 – Método para incluir restrições de movimento e esforços aos componentes da montagem.
 Fonte: Autoria própria.

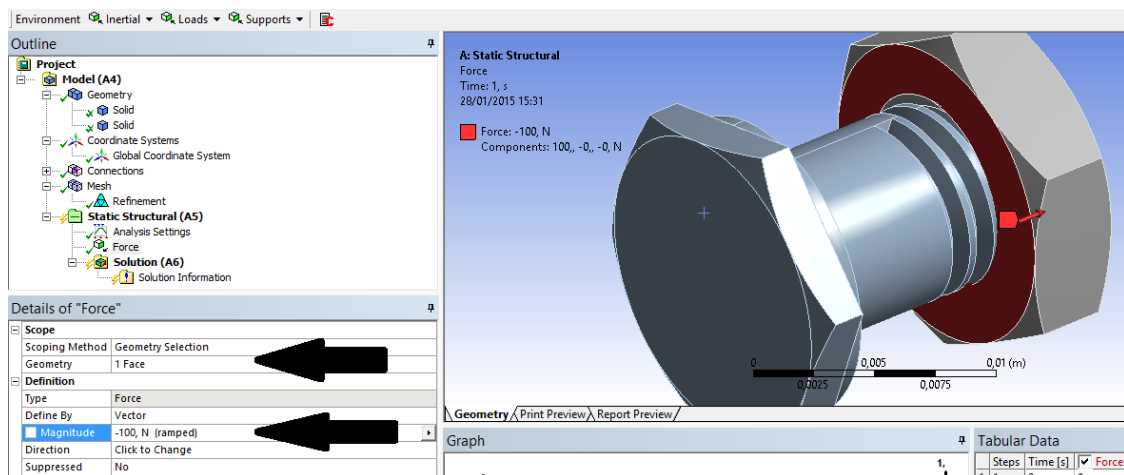


Figura 10 – Método para selecionar a superfície que estará submetida a determinado esforço ou restrição de movimento.
 Fonte: Autoria própria.

15 – Definidos todos esses parâmetros é preciso definir o que se deseja obter com a simulação, para isso no passo 1 deve-se clicar com o ponto direito do mouse sobre “Solution”, no passo 2 sobre “Insert” e então no passo 3 escolher entre as

diversas opções disponíveis, conforme a necessidade do estudo. Os passos descritos podem ser identificados são evidenciados na Figura 11.

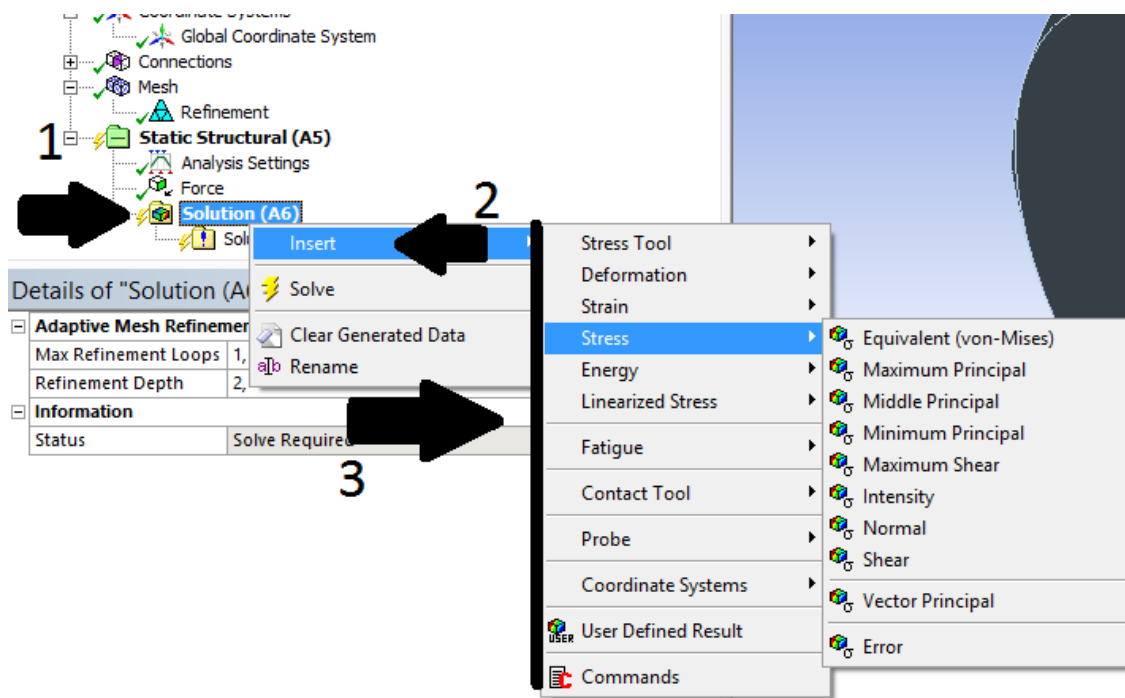


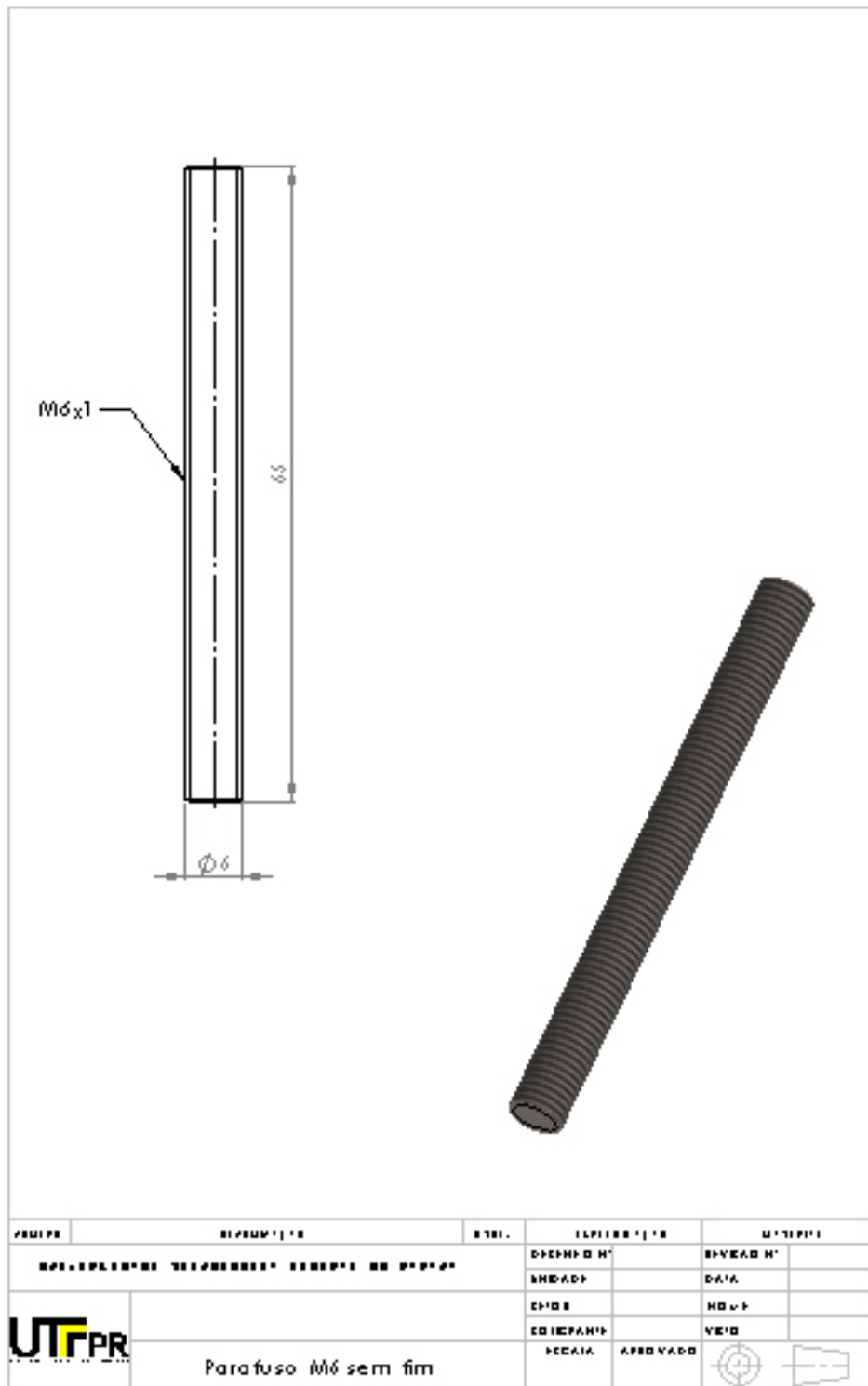
Figura 11 – Método para adicionar quais resultados se deseja obter com a simulação.

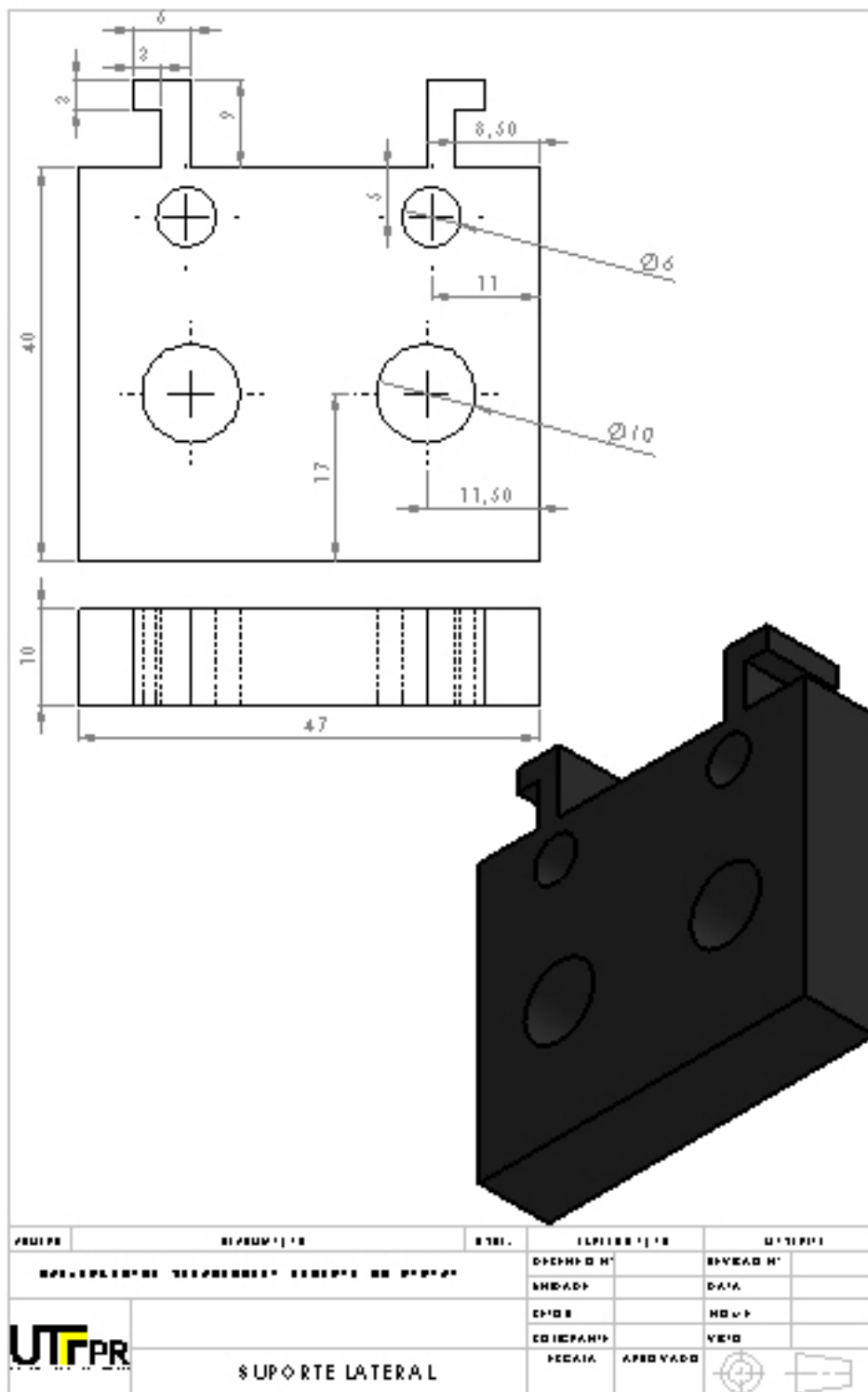
Fonte: Autoria própria.

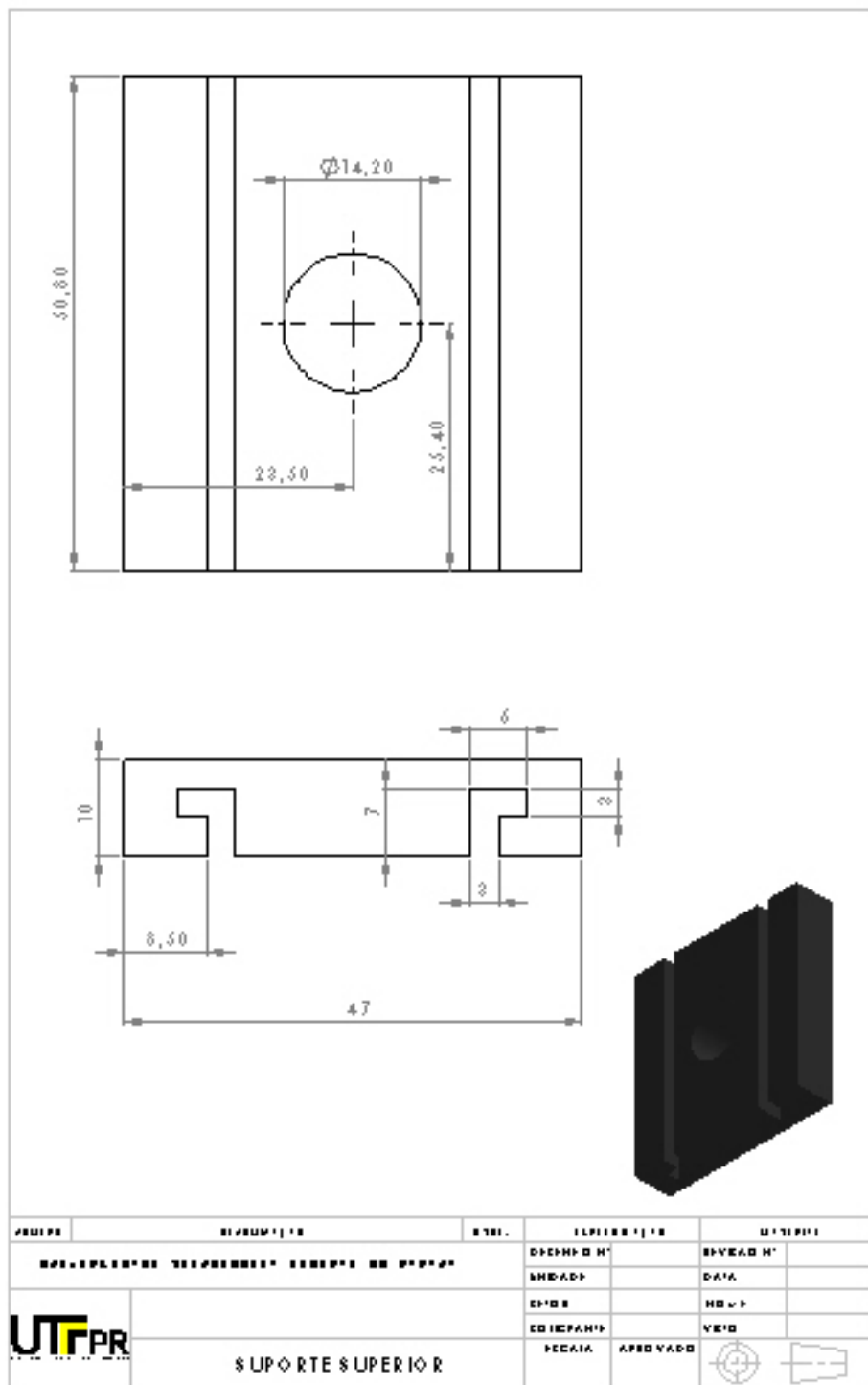
16 – Para iniciar a simulação basta clicar em “Solve” na barra superior.

17 – Uma ferramenta pós-simulação que pode ser útil é a função “Probe” que indica, por exemplo, a tensão em um ponto de interesse.

APENDICE B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO







PRIMEIRA	SEGUNDA	TERCEIRA	QUARTA	QUINTA
REPRESENTAÇÃO DIMENSIONAL			DIMENSÃO	REVISÃO
REPRESENTAÇÃO DIMENSIONAL			REVISÃO	DATA
REPRESENTAÇÃO DIMENSIONAL			REVISÃO	NOVA
REPRESENTAÇÃO DIMENSIONAL			REVISÃO	VEIO
REPRESENTAÇÃO DIMENSIONAL			REVISÃO	APROVADO

UTPR

SUPORTE SUPERIOR



ANEXO A – PROCEDIMENTO PARA EXECUÇÃO DO ENSAIO

1)OBJETIVO:

- Executar ensaio em dispositivo de ensaio de tração em parafusos.

2)DOCUMENTO REFERÊNCIA:

Trabalho de conclusão de curso: **Projeto de um protótipo para medir força de união em montagens aparafusadas.**

3)CONDIÇÕES NECESSÁRIAS:

- Parafusos de ensaio;
- Dispositivo para execução de ensaio de tração em parafusos;
- Torquímetro.

4)PRÉ-REQUISITOS:

- Conhecimento básico em Mecânica;
- Habilidade no manuseio de ferramentas manuais.

5)SEQUENCIA EXECUTIVA:

- Conforme ações a seguir:

1° Passo: Selecionar os parafusos que farão parte do ensaio.

O parafuso deve seguir alguns requisitos:

- Diâmetro de 8 mm ou 5/16”;
- Cabeça com formato sextavado de 13 mm ou 1/2”;
- Comprimento mínimo de 38 mm;
- Comprimento máximo de 60 mm;
- Resistência máxima à tração de 35 KN;
- Devem ser mantidas as condições de quando foram entregues pelo fornecedor.

2° Passo: Montar o dispositivo de ensaio como parafuso selecionado.

Antes de iniciar o processo de montagem do dispositivo é preciso conferir se todas as peças necessárias estão preparadas. Na Figura 1 podem ser vistas todas as partes necessárias para montagem do dispositivo. Essas peças têm sua nomenclatura conforme segue abaixo:

1–BASE PRINCIPAL

Compostopor: 1base de apoio;
1suporte inferior;
2suportes laterais.

2–BASE SUPERIOR

3–PARAFUSOS FIXAÇÃO BASE SUPERIOR

Composto por: 2 Parafusos M8 x 20 mm cabeça cilíndrica.

4–SUPORTE SUPERIOR

Composta por: 1suporte de célula de carga.

5-CELULA DE CARGA

Composta por: 1 Chapa de aço com *Strain Gage*;
 1 Cabo duas vias com malha;
 1 Conector.

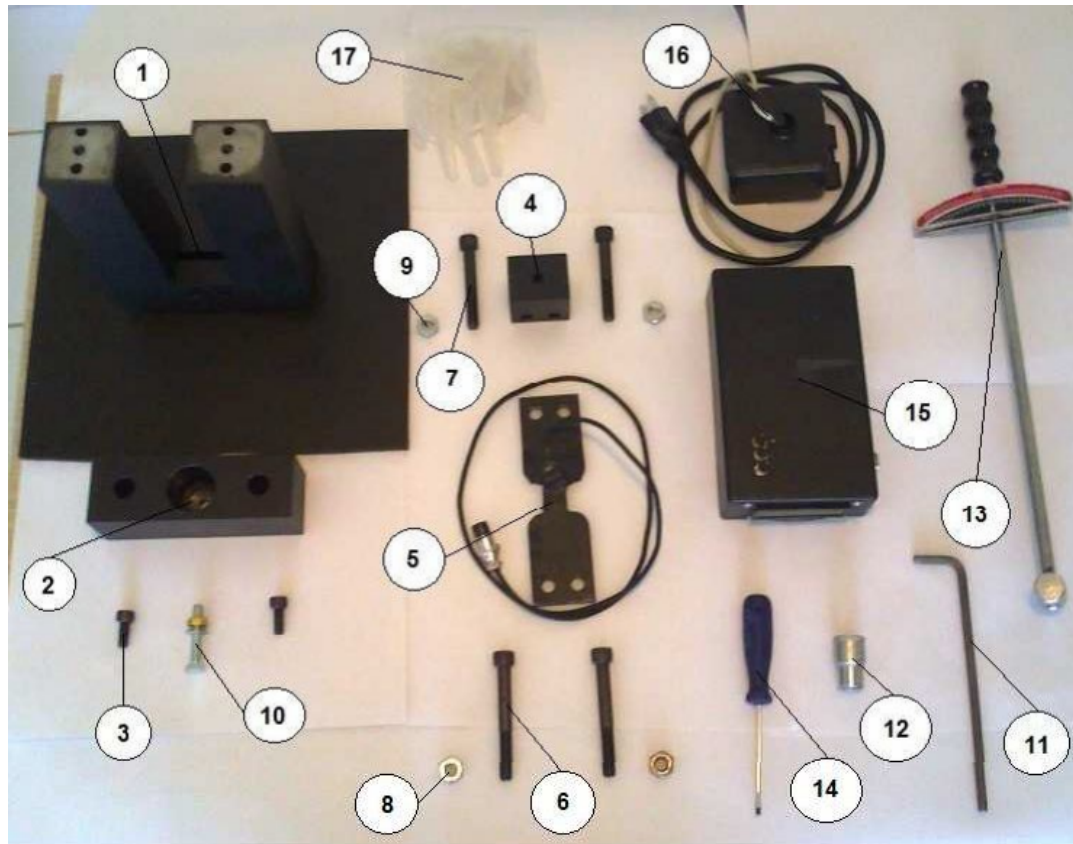


Figura1–Conjunto de peças para montagem do dispositivo de medição
 Fonte: AutoriaPrópria

6-PARAFUSOS FIXAÇÃO CÉLULA DE CARGA LADO INFERIOR

Composto por: 2 parafusos M10x80 mm.

7-PARAFUSOS FIXAÇÃO CÉLULA DE CARGA LADO SUPERIOR

Composto por: 2 parafusos M10x70 mm.

8-PORCAS DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA LADO INFERIOR

Composto por: 2 porcas M10.

9-PORCA DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA LADO SUPERIOR

Composto por: 2 porcas M10.

10-CONJUNTO DE ENSAIO

Composto por: 1 parafuso (segundo os requisitos de ensaio);
 1 Arruela (proporcional ao parafuso);
 1 porca (proporciona la o parafuso).

11-CHAVE DE MONTAGEM DO DISPOSITIVO

Composto por: 1 chave Allen 6 mm.

12–SOQUETE DE ENSAIO

Composto por: 1 soquete 13 mm.

13–TORQUIMETRO

Composto por: 1 torquimetro com range de 20 a 50 Nm.

14–CHAVE DE AJUSTE INICIAL

Composto por: 1 chave de fenda com ponta de 3 mm(chave borne).

15–CENTRAL ELETRÔNICA

Composta por: 1 circuito ponte de Wheatstone;
1 circuito amplificador de sinal;
1 circuito controlador;
1 display de interface;
1 caixa de proteção.

16–FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Composta por: 1 fonte de 12 V e 500 mA;
1 cabo de alimentação;
1 caixa de proteção.

17–LUVAS

Composta por: 1 par de luvas cirúrgicas.

Uma vez que todos os componentes do dispositivo estejam conferidos, o mesmo pode ser montado para que se de início ao ensaio. A seqüência de montagem se faz da seguinte maneira:

1. Posicionar a célula de carga na base principal;
2. Montar os dois parafusos M10 x 80 mm;
3. Posicionar o parafuso de ensaio no suporte superior;
4. Posicionar o suporte superior no topo da célula de carga;
5. Montar os dois parafusos M10 x 70 mm;
6. Posicionar a base superior sobre o suporte superior;
7. Aparafusar a base superior com os parafusos M8 x 20 mm cabeça cilíndrica;
8. Conectar o cabo da célula de carga à central de controle;
9. Montar com arruela e porca o conjunto de ensaio;
10. Efetuar o ajuste eletrônico de ensaio.

3º Passo: Ajuste eletrônico de início de ensaio

Com todo sistema mecânico montado, deve-se rosquear a porca no parafuso de ensaio de modo a garantir que o sistema esteja firme, mas sem haver torque significativo sobre o conjunto.

Na parte superior do emulador, há um pequeno orifício onde se pode visualizar o ponto de ajuste de um trimpot (Figura2).



Figura2–Trimpot de ajuste de início de ensaio
Fonte:Autoria Própria

- Girando o trimpot em sentido horário, se leva o sinal de entrada ao sentido crescente;
- Girando o trimpot em sentido anti-horário, se leva o sinal de entrada ao sentido decrescente.

Ao se fazer o ajuste de início de ensaio, é necessário estar visualizando o display conforme Figura 3, de modo a facilitar a visualização e garantir que não haverá tensão negativa na entrada. O campo para esse sinal exibe 5 casas decimais. Para quando o sinal for maior que “0” e menor “0,01”, no canto superior direito estará piscando o símbolo “+”. Assim pode-se iniciar o ensaio garantindo um desvio será menor que 2% para o range máximo de ensaio (sinal de 0 a 5V). Quanto mais próximo de 0, menor serão desvio.



Figura3–Display para visualização dos resultados de ensaio
Fonte:Autoria Própria

4º Passo: Aplicação do torque

Estando o dispositivo mecânico montado e o display com ajuste inicial dentro da faixa de tolerância, chega o momento de aplicar o torque no conjunto de ensaio (Figura 4).



Figura4–Aplicando o torque ao conjunto de ensaio
Fonte: Autoria Própria

5° Passo: Coleta de dados.

A organização dos dados coletados é ponto crucial para garantir a confiabilidade dos resultados. As amostras deverão ser separadas e identificadas (Figura5) antes da execução dos testes e mantidas desta forma até que os resultados sejam arquivados.

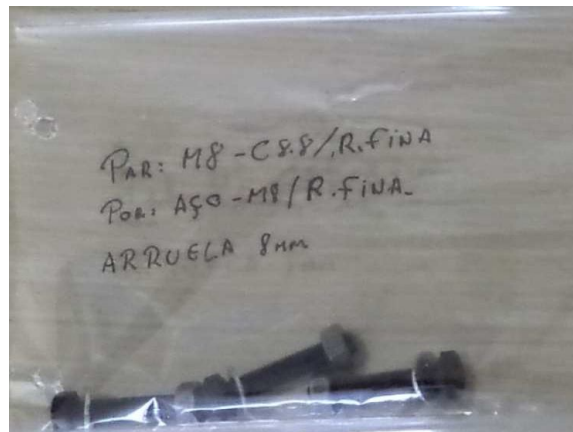


Figura5– Identificação e separação das amostras
Fonte: Autoria Própria

Com o objetivo de estabelecer um padrão para coleta dos dados, foi elaborada uma ficha de coleta de dados (Tabela 1). Esta ficha servirá para o preenchimento manual dos valores dados pelas amostras. Posteriormente o usuário poderá proceder da forma que melhor lhe atender.