

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

YASMIN DA MATA GEORGETTI SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BASE DE UM
TRANSFORMADOR DE CORRENTE ÓPTICO APLICADO EM SUBESTAÇÃO DE
ENERGIA**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

YASMIN DA MATA GEORGETTI SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BASE DE UM
TRANSFORMADOR DE CORRENTE ÓPTICO APLICADO EM SUBESTAÇÃO DE
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientadora:
Prof^ª. Daniela Águia Bento Dallacosta,
Dr^ª Eng

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Silva, Yasmin da Mata Georgetti
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BASE DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE ÓPTICO APLICADO EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA
/ Yasmin da Mata Georgetti Silva; orientação
de Daniela Aguida Bento Dallacosta. - Florianópolis,
SC, 2026.
127 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Análise estrutural. 2. Transformador de Corrente
Óptico. 3. Base de sustentação para transformadores.
4. Método dos Elementos Finitos. I. Aguida Bento Dallacosta,
Daniela . II. Instituto Federal de Santa
Catarina. III. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BASE
DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE ÓPTICO APLICADO EM SUBESTAÇÃO**

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BASE DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE ÓPTICO APLICADO EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA

YASMIN DA MATA GEORGETTI SILVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira em Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 09 de Julho, 2026.

Banca Examinadora:

Daniela Águida Bento Dallacosta, Dr^a Eng

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO YUJI SAKURADA**
Data: 17/07/2026 19:13:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng

Documento assinado digitalmente
 **RAIMUNDO RICARDO MATOS DA CUNHA**
Data: 17/07/2026 19:21:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raimundo Ricardo Matos da Cunha, Dr. Eng

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento e a análise estrutural de uma base destinada à sustentação de isoladores aplicados em subestações de energia, sendo conduzido em colaboração com a empresa PowerOpticks, motivada pela aplicação em transformadores de corrente ópticos. O estudo surgiu devido a necessidade de uma estrutura que atenda as exigências mecânicas e operacionais associadas à sua utilização. Nesse contexto, buscou-se desenvolver e avaliar estruturalmente uma base que garantisse confiabilidade, segurança e resistência estrutural sob diferentes solicitações mecânicas. A modelagem computacional da montagem foi desenvolvida por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), empregando o pacote computacional SolidWorks®. As análises estruturais foram realizadas considerando uma abordagem linear estática, na qual foram investigados os diferentes cenários de carregamento incidentes sobre o conjunto. Para tanto, foram considerados os efeitos do peso próprio da estrutura, as ações do vento e os esforços eletromecânicos decorrentes da associação da condição de curto-circuito de linha e de outros esforços (SCL). Os resultados obtidos permitiram avaliar a distribuição de tensões por toda a base, o fator de segurança da mesma, além de identificar possíveis regiões críticas da peça. Dessa forma, o estudo demonstrou que a estrutura desenvolvida atende aos critérios exigidos para as condições operacionais do equipamento, contribuindo para a validação do projeto.

Palavras-chave: Análise estrutural. Transformador de Corrente Óptico. Base de sustentação para transformadores. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

This work addresses the development and structural analysis of a base intended for the support of insulators applied in power substations, being conducted in collaboration with the company PowerOpticks, motivated by its application in optical current transformers. The study arose due to the need for a structure that meets the mechanical and operational requirements associated with its use. In this context, the aim was to develop and structurally evaluate a base that ensures reliability, safety, and structural resistance under different mechanical loadings. The computational modeling of the assembly was developed using the Finite Element Method (FEM), employing the SolidWorks® software package. The structural analyses were performed considering a linear static approach, in which different loading scenarios acting on the assembly were investigated. For this purpose, the effects of the structure's self-weight, wind loads, and electromechanical forces resulting from the association of the line short-circuit condition and other forces (SCL) were considered. The obtained results allowed the evaluation of the stress distribution throughout the base, its safety factor, as well as the identification of possible critical regions of the component. Thus, the study demonstrated that the developed structure meets the required criteria for the operational conditions of the equipment, contributing to the validation of the design.

Keywords: Structural analysis. Optical Current Transformer. Transformer support base. Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de magnetização do núcleo do TC	14
Figura 2 – Construção dos TCs convencionais	14
Figura 3 – Efeito magneto-óptico de Faraday	15
Figura 4 – Efeito Faraday em medição de corrente	16
Figura 5 – Construção simplificada de um TC óptico	17
Figura 6 – Análise SWOT	18
Figura 7 – Comparativo entre massa de TCs convencionais e ópticos	19
Figura 8 – Funcionalidade de uma subestação automatizada	20
Figura 9 – Protocolos de comunicação utilizados antes da norma IEC 61850	20
Figura 10 – Plataforma com padrão IEC 61850	21
Figura 11 – Diagrama de monitoração na SE YTÁ	22
Figura 12 – Lote piloto do TECO na SE YTÁ	23
Figura 13 – Esforços presentes na estrutura da SE	25
Figura 14 – Tipos de elementos tetraédricos	26
Figura 15 – Base anterior	29
Figura 16 – Base - Vista isométrica	29
Figura 17 – Recurso Geometria Fixa	33
Figura 18 – Diagrama de corpo livre da carga peso	35
Figura 19 – Mapa de velocidades básicas	36
Figura 20 – Desenho do isolador	38
Figura 21 – Diagrama de corpo livre da carga de vento	40
Figura 22 – Desenho técnico do isolador	41
Figura 23 – Diagrama de corpo livre da carga SCL	43
Figura 24 – Região crítica de tensão de Von Mises - Cenário 1	50
Figura 25 – Região crítica de tensão de Von Mises - Cenário 2	51
Figura 26 – Região crítica de tensão de Von Mises - Cenário 3	53
Figura 27 – Comparação das tensões de Von Mises	55
Figura 28 – Comparação dos deslocamentos	56
Figura 29 – Comparação das deformações	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Químicas	31
Tabela 2 – Propriedades Físicas	31
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas	32
Tabela 4 – Estudo de independência de malha	44
Tabela 5 – Propriedades da malha adotada	45
Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IED	Intelligent Eletronic Device
MEF	Método de Elementos Finitos
MU	Merging Units
SCL	Specified Cantilever Load
SE	Subestação de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STL	Specified Tensile Load
STol	Specified Torsional Load
SWOT	Strengths (Forças), Weaknesses (Fraquezas), Opportunities (Oportunidades) e Threats (Ameaças)
TC	Transformador de Corrente
TECO	Transformador Eletrônico de Corrente Óptico
TI	Transformador para Instrumentação
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivo Geral	11
1.3	Objetivos Específicos	11
1.4	Estrutura do Trabalho	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Transformadores de Corrente Convencionais	13
2.2	Transformadores de Corrente Ópticos	15
2.3	Subestações de energia elétrica	19
2.4	Esforços mecânicos em subestações de energia	24
2.5	Método dos elementos finitos	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Objeto de estudo	28
3.2	Propriedades dos materiais	31
3.3	Condições de contorno	32
3.3.1	Apoios e Conectores	32
3.3.2	Carga de peso	34
3.3.3	Carga de vento	36
3.3.4	Parâmetros mecânicos do isolador	40
3.4	Configuração do Solver	43
3.5	Malha	44
3.6	Cenários	44
3.6.1	Cenário 1 - Peso	45
3.6.2	Cenário 2 - Peso + Vento	46
3.6.3	Cenário 3 - Peso + SCL	46
3.7	CrITÉrios de avaliação dos resultados	47
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.1	Avaliação da Qualidade da Malha	48
4.2	Resultados das simulações	49
4.2.1	Resultados da Simulação do Cenário 1	49
4.2.2	Resultados da Simulação do Cenário 2	50
4.2.3	Resultados da Simulação do Cenário 3	52
4.3	Avaliação do Fator de Segurança	54
4.4	Síntese dos Resultados	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	61
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DIMENSIONAL DA ESTRUTURA PROPOSTA	62
	APÊNDICE B – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO - CENÁRIO 1	65
	APÊNDICE C – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO - CENÁRIO 2	87
	APÊNDICE D – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO - CENÁRIO 3	108

1 INTRODUÇÃO

A crescente modernização dos sistemas elétricos de potência tem sido impulsionada pela incorporação de novas tecnologias digitais, especialmente no contexto da automação e proteção de subestações. Nesse cenário, destaca-se a aplicação dos conceitos estabelecidos pela norma IEC 61850, que promove a digitalização da comunicação entre dispositivos por meio de redes baseadas em fibra óptica. Nas subestações, os transformadores de instrumentação (TI) desempenham papel fundamental, sendo responsáveis pela adequação da corrente ou da tensão, a níveis compatíveis com equipamentos de medição, controle e proteção (KOKOTTE; MEYER, 2016).

Os TIs podem ser divididos em dois tipos: Transformadores de Potencial (TP) e os Transformadores de Corrente (TC). De acordo com Oliveira (2001), em um TP, o enrolamento primário é ligado em paralelo com o circuito e o secundário alimenta as bobinas de potencial, já o TC o primário é ligado em série com o circuito e o secundário alimenta as bobinas de corrente.

De acordo com Oliveira (2001), a partir dos anos 2000 houve a inserção de um novo modelo de TI, o Transformador de Instrumentação Óptico. Esse dispositivo passou a ser objeto de estudo quanto à sua viabilidade e às suas vantagens para o setor elétrico. Essa evolução tecnológica está diretamente relacionada à adoção de métodos de medição de baixa potência, com destaque para o uso de sensores ópticos.

Apesar das vantagens associadas à tecnologia óptica, sua aplicação em ambientes reais, como subestações de alta tensão, impõe desafios relevantes do ponto de vista mecânico e estrutural. Os conjuntos que compõem esses equipamentos, incluindo estruturas de suporte e bases de fixação, devem ser dimensionados para resistir de forma adequada a diferentes condições de carregamento, tais como o peso próprio, ações do vento e esforços decorrentes de solicitações transitórias. Nesse contexto, a análise estrutural assume papel essencial na verificação da integridade e da confiabilidade do sistema ao longo de sua vida útil.

Para a avaliação do comportamento estrutural, adotou-se uma abordagem baseada em modelagem tridimensional e simulação numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software SolidWorks* como ferramenta de apoio. A análise considerou diferentes cenários de carregamento representativos das condições operacionais, possibilitando a obtenção de resultados relacionados à distribuição de tensões, deslocamentos e fatores de segurança da estrutura analisada.

Adicionalmente, buscou-se garantir a consistência metodológica das simulações por meio da padronização das condições de contorno e da definição criteriosa dos parâmetros de malha, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes cenários avaliados e assegurando maior confiabilidade aos resultados obtidos.

1.1 Justificativa

Com a crescente mudança no setor elétrico e o aumento de pesquisas em torno de TCs ópticos, as empresas da área possuem grande interesse em aprimorar o desenvolvimento dos produtos, a fim de garantir a qualidade, segurança e confiabilidade desses dispositivos. A adoção de TCs ópticos representa um avanço significativo para o setor elétrico e para a infraestrutura de subestações.

O desenvolvimento deste trabalho em parceria com a empresa PowerOpticks Tecnologia deve-se à relevância da empresa que é pioneira no desenvolvimento de Transformadores de Corrente Ópticos no Brasil e à oportunidade de aplicar conhecimentos teóricos em um ambiente prático e real. A empresa necessitava melhorar as peças do transformador, dentre elas a base, responsável por suportar os esforços atuantes no conjunto.

Dessa forma, este estudo busca contribuir diretamente para o processo de validação do projeto da base, por meio da análise estrutural computacional do modelo da base, fornecendo subsídios técnicos para tomada de decisão dentro da empresa. Do ponto de vista acadêmico, o estudo também é relevante por permitir a integração entre teoria e prática, promovendo o desenvolvimento de competências profissionais e fortalecendo a relação entre universidade e setor produtivo.

1.2 Objetivo Geral

Realizar uma análise mecânica da base do transformador de corrente óptico, visando fornecer subsídio técnico para a validação do projeto.

1.3 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar as tecnologias de funcionamento de transformadores de corrente ópticos;
- b) Estudar e especificar os diferentes carregamentos mecânicos que atuam na base do transformador;
- c) Construir o modelo computacional (MEF) que represente as condições de carregamento mecânico suportadas pelo componente;
- d) Avaliar o comportamento mecânico do componente em relação aos resultados obtidos pela simulação computacional.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, conduzindo o leitor desde a contextualização do tema até a análise dos resultados e as conclusões obtidas.

Inicialmente, apresenta-se a introdução ao tema, contemplando a contextualização do problema, a justificativa para o desenvolvimento do estudo, bem como os objetivos geral e específicos que orientam a pesquisa. Ao final dessa seção, é descrita a organização do trabalho.

Na sequência, são abordados os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do estudo, incluindo conceitos relacionados aos transformadores de corrente convencionais e ópticos, além de aspectos gerais das subestações de energia elétrica. Também são discutidos os principais esforços mecânicos atuantes nesses ambientes, estabelecendo a base conceitual para as análises realizadas posteriormente.

Em seguida, descreve-se a metodologia adotada, abrangendo a caracterização do objeto de estudo, as propriedades do material e a definição dos carregamentos considerados, como peso próprio, ação do vento e carga de curto-circuito.

São ainda detalhados os procedimentos de modelagem numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), com o auxílio de *software* CAD, bem como a definição dos cenários de simulação e os critérios utilizados para a avaliação dos resultados.

Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações, organizados conforme os diferentes cenários de carregamento analisados. Complementarmente, realiza-se a avaliação da qualidade da malha e a análise dos fatores de segurança, culminando em uma síntese dos principais resultados do estudo.

Por fim, são expostas as considerações finais, reunindo as conclusões alcançadas ao longo do trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras e possíveis melhorias da solução proposta.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diante dos aspectos apresentados na introdução, torna-se necessário aprofundar a compreensão teórica sobre os elementos que compõem o estudo. Assim, esta seção reúne as principais definições, estudos e pesquisas relacionadas com TCs.

Os TCs são fundamentais para o funcionamento do sistema elétrico de potência. Atualmente, os TCs são divididos em duas categorias, os convencionais e os ópticos. A compreensão dessas categorias é fundamental para diferenciar suas aplicações e limitações.

Dessa forma, nas subseções a seguir, são apresentadas e detalhadas as duas categorias de transformadores de corrente, destacando suas características construtivas, vantagens e desafios operacionais.

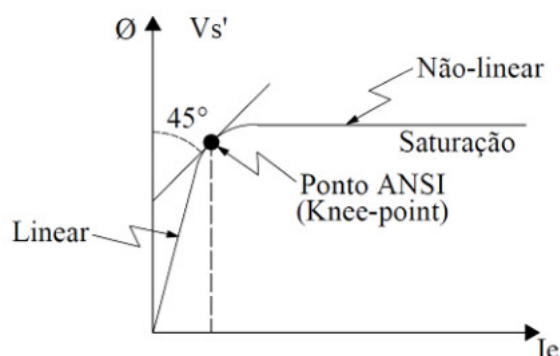
2.1 Transformadores de Corrente Convencionais

Segundo Delgado (2018), o equipamento tem como principal função apresentar no secundário a corrente nominal do circuito de potência que é imposta no seu primário, todavia, com valores menores, geralmente valores nominais de 5 A.

Para que a corrente do sistema seja imposta pelo sistema elétrico de potência (SEP), de acordo com Gonçalves (2012) a impedância presente no primário deve ser desprezível se comparada à impedância do sistema. No secundário, os valores nominais são padronizados, seguindo a NBR 6856/1992 que estabelece no Brasil o valor em 5A, embora em outros países sigam outros padrões, como por exemplo a IEC 60044-1.

Os TCs convencionais são projetados para que suportem correntes maiores que as nominais, para que tolerem condições anormais do SEP, sendo assim, deve suportar por poucos segundos altas correntes de curto circuito.

Na Figura 1, é mostrado a curva de excitação do núcleo do TC, onde a tensão do terminal do secundário é proporcional ao fluxo magnético (Φ), e a corrente de excitação (I_e) é proporcional à intensidade do campo magnético.

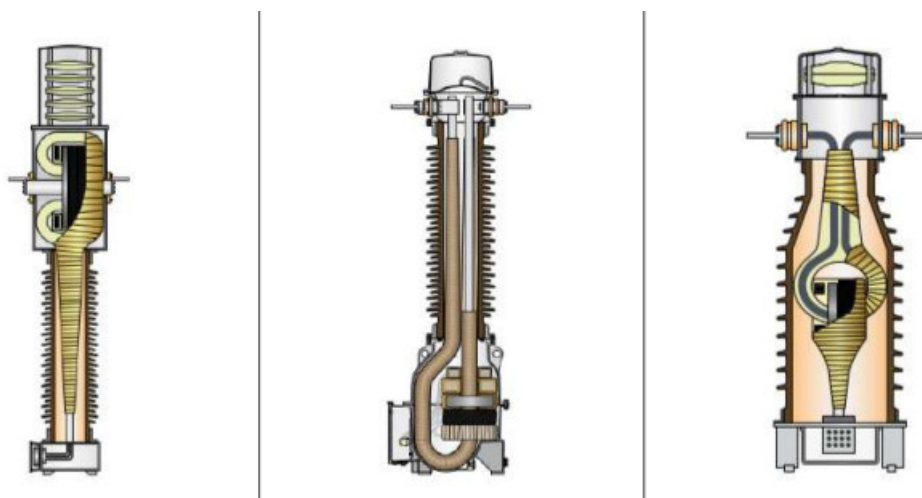
Figura 1 – Curva de magnetização do núcleo do TC

Fonte: Kindermann (2005).

De acordo com Kindermann (2005), quando houver algum defeito no SEP, a corrente de curto circuito é elevada e conseqüentemente eleva o fluxo magnético do núcleo. Se o fluxo atinge o ponto ANSI, exposto na Figura 1, o TC atinge sua região de saturação, alimentando os equipamentos que se conectam com o secundário com uma corrente distorcida por harmônicas provenientes da não linearidade da curva.

Conforme exposto por Rodrigues (2013), a saturação pode ocasionar problemas de segurança do SEP e dos trabalhadores do local, visto que se o TC fornecer um valor distorcido devido à saturação, o valor eficaz da corrente detectada será menor do que o valor real da corrente de falta, atrasando ou evitando a operação do relé de proteção.

Os TCs convencionais, que são comercializados para aplicações em altas tensões, utilizam óleo para garantir seu isolamento interno. Os aspectos construtivos estão expostos na Figura 2.

Figura 2 – Construção dos TCs convencionais

Fonte: Adaptado de Delgado (2018).

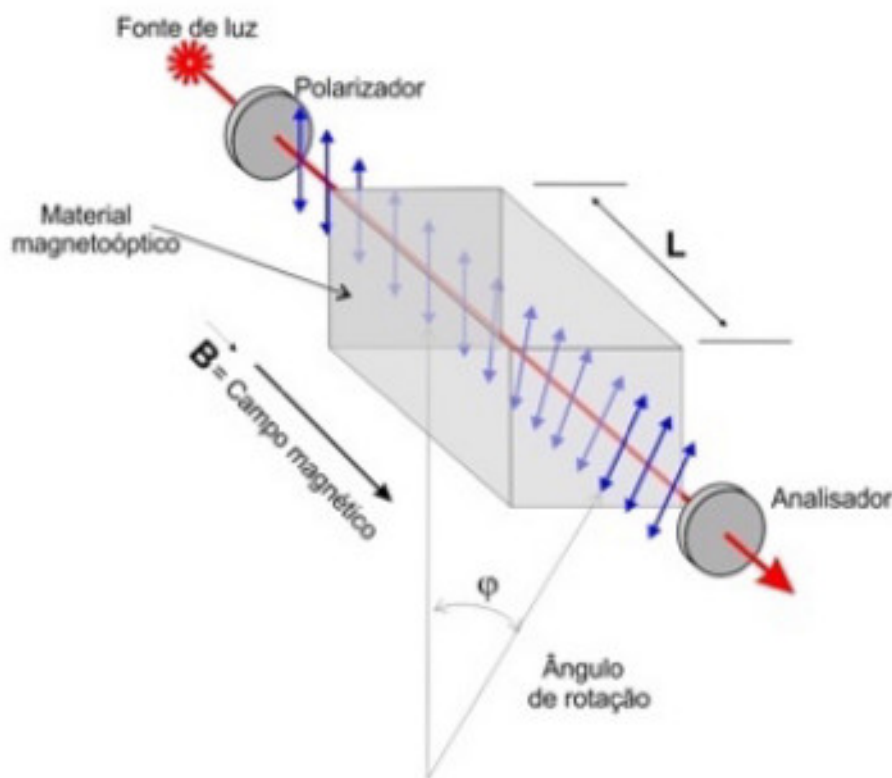
Outra falha significativa diz respeito a erro da Análise de Gases Dissolvidos, como o fabricante estipula um tempo para a realização desses ensaios, caso o período seja considerado elevado, propicia um defeito que pode evoluir para uma falha do equipamento. Não se pode especificar a causa exata da falha, visto que o TC sofre um dano muito grande quando esse tipo de defeito ocorre (DELGADO, 2018).

2.2 Transformadores de Corrente Ópticos

Em 1845, Michael Faraday constatou que um campo magnético externo é capaz de modificar o índice de refração do vidro para a luz polarizada. O efeito magneto-óptico de Faraday estabelece que um campo magnético longitudinal altera a interação entre a luz e o meio material, produzindo a rotação do plano de polarização da luz polarizada (KUMARI, 2022).

Através desse princípio, diversos estudos tiveram como foco desenvolver um sensor de corrente de baixa tensão óptico, abordando as variações desse efeito e o comportamento transitório dos TCs ópticos (KUCUKSARI, 2010). O efeito pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Efeito magneto-óptico de Faraday

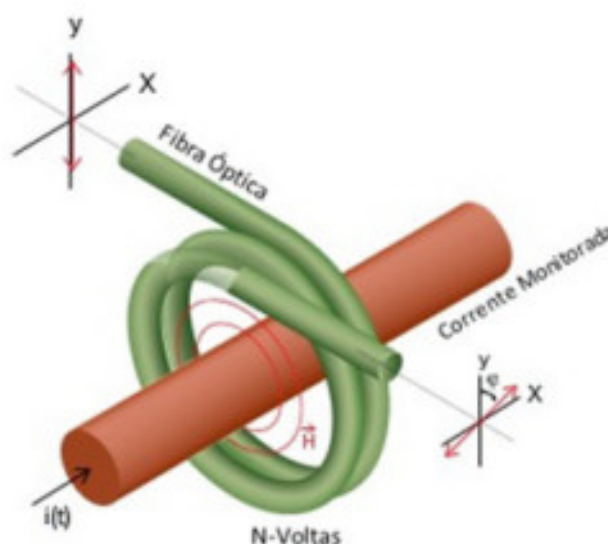


Fonte: Dutra *et al.* (2023).

Em sensores baseados no efeito Faraday, conforme exposto na Figura 4

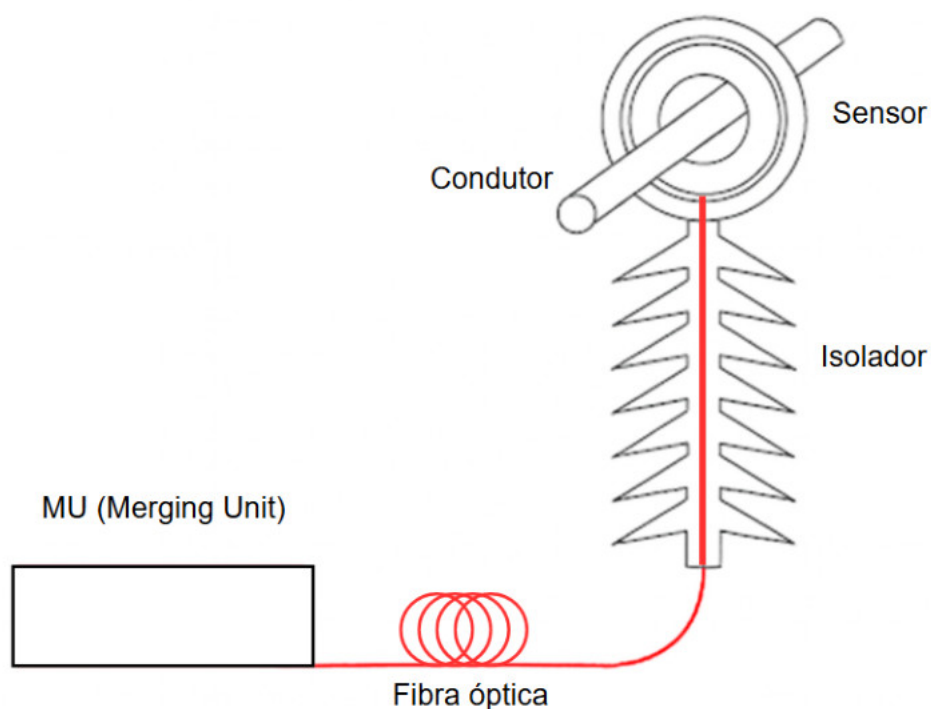
a medição do fluxo magnético, que é gerado a partir da corrente, permite calcular a corrente elétrica que passa por um condutor. A sensibilidade da bobina de fibra óptica é diretamente proporcional ao número de voltas e às características físicas que a fibra possui (DUTRA *et al.*, 2023).

Figura 4 – Efeito Faraday em medição de corrente



Fonte: Dutra *et al.* (2023).

O aspecto construtivo de um TC óptico é apresentado na Figura 5. Nela, observa-se a integração do sistema de medição baseado no efeito Faraday, descrito anteriormente, junto aos demais elementos que compõem o equipamento.

Figura 5 – Construção simplificada de um TC óptico

Fonte: Adaptado de KoKotte e Meyer (2016).

Embora TIs puramente ópticos apresentem características superiores principalmente em questão de segurança, ainda possuem algumas barreiras para a ampla inserção no mercado brasileiro. Devido a esse cenário, foi feito um estudo de viabilidade por (LIMA, 2009), realizando uma análise SWOT, exposta na Figura 6.

Figura 6 – Análise SWOT

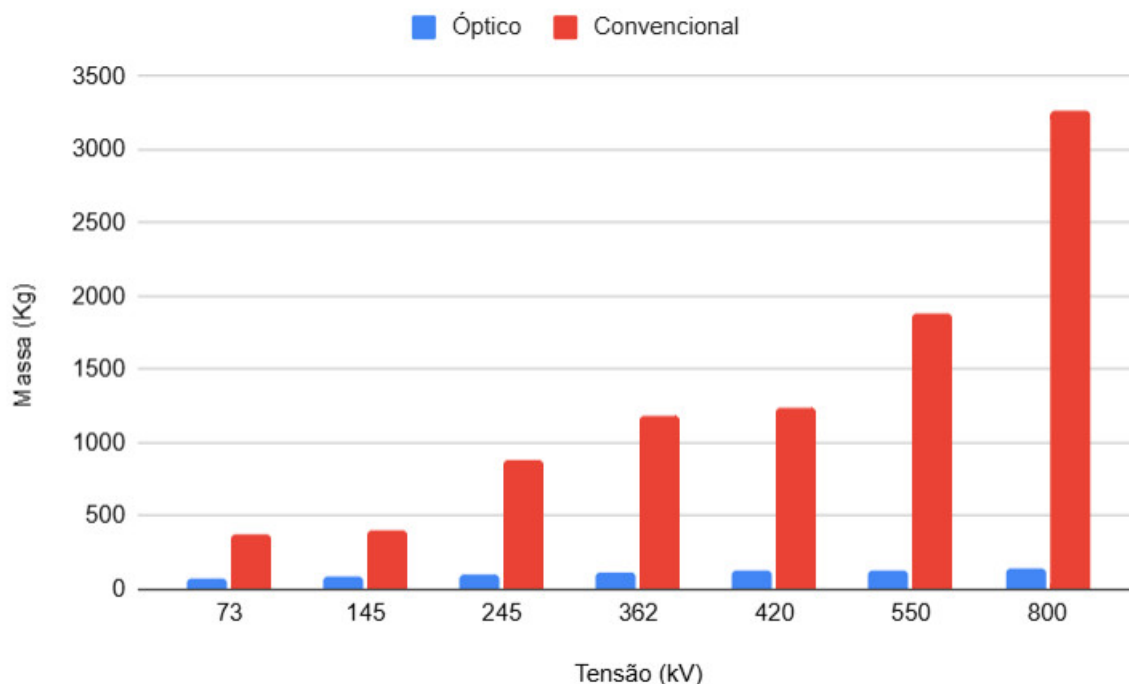
Oportunidades	Ameaças
Norma IEC61850; Legislação do setor elétrico; Mercado em expansão; Parque antigo.	Setor Conservador; TIs convencionais com poucas falhas; Parque com sistemas de medição antigo.
Forças	Fraquezas
Redução na quantidade de falhas; Instalação simplificada; Manutenção reduzida; Segurança; Sem saturação; Ótima precisão; Susceptibilidade eletromagnética baixa.	Preço maior em relação aos convencionais.

Fonte: Adaptado de Lima (2009).

A instalação dos TCs ópticos são expressamente mais simples, visto que o peso dos TCs convencionais são consideravelmente maiores, conforme estudado por Lima (2009). Os TIs também são mais leves e por esse motivo podem ser instalados mais facilmente nas subestações, sem a necessidade de construção de bases de concreto.

A análise SWOT apresentada na Figura 6 demonstra que, apesar das dificuldades relacionadas à inserção dos transformadores de corrente ópticos no mercado, suas vantagens técnicas e as oportunidades identificadas evidenciam o potencial dessa tecnologia para aplicações futuras no setor elétrico. Nesse contexto, estudos voltados ao desenvolvimento de componentes auxiliares, como estruturas de sustentação adequadas às exigências mecânicas e operacionais desses equipamentos, tornam-se relevantes para apoiar sua implementação e contribuir para a consolidação dessa tecnologia.

Na Figura 7 apresentada a seguir, é exposta a relação de massa entre TCs convencionais e ópticos.

Figura 7 – Comparativo entre massa de TCs convencionais e ópticos

Fonte: Adaptado de Lima (2009).

Do ponto de vista da manutenção e segurança, os TCs convencionais dependem de inspeções no óleo presente no isolador de maneira periódica, tendo que desligar o equipamento para as coletas e trocas de óleo. Já nos ópticos podem ser realizados com termovisores para identificar pontos quentes ou então o próprio sistema envia alertas de anomalias no funcionamento do equipamento (DUTRA *et al.*, 2023).

Diferentemente dos TIs convencionais, os TIs puramente ópticos não utilizam núcleo ferro magnético, logo não saturam. Enquanto a falha de isolamento dos modelos convencionais pode transferir grande potencial para os equipamentos ligados a ele, nos ópticos esse potencial não é propagado mesmo com falha na sua isolamento (KOKOTTE; MEYER, 2016).

Equipamentos com a tecnologia óptica demonstram uma baixa suscetibilidade eletromagnética, devido a sua forma de construção e por ter sua transmissão baseada em fibras ópticas, dessa forma a grande interferência eletromagnética presente nas subestações não afetam o dispositivo (LIMA, 2009).

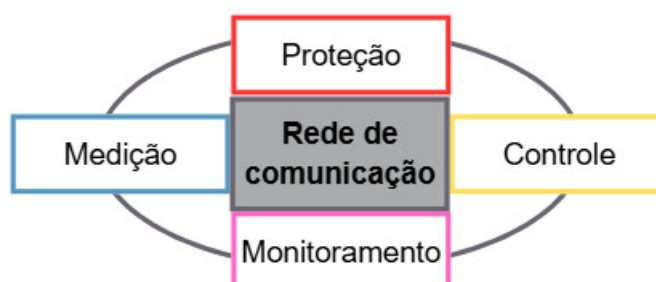
2.3 Subestações de energia elétrica

Uma subestação de energia (SE) é um conjunto de equipamento de manobra, que são utilizados com a finalidade de direcionar, controlar e monitorar o sistema elétrico. Em subestações de distribuição encontram-se linhas de transmissão ou sub-

transmissão em alta tensão, que passam por transformadores para acesso a níveis de tensões apropriados (DUAILIBE, 1999).

Uma SE automatizada permite que todos os equipamentos sejam ligados na mesma rede, sejam eles para controle, proteção, monitoramento ou medição, conforme a Figura 8. Devido a essa demanda de comunicação em rede, foi desenvolvida a norma IEC 61850, que permite a interoperabilidade dos sistemas de proteção e controle na SE.

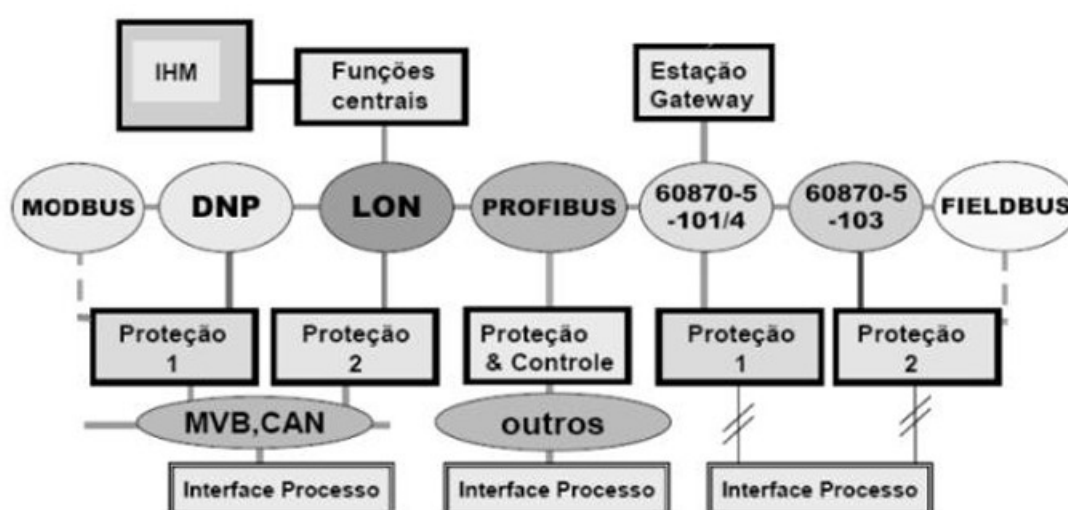
Figura 8 – Funcionalidade de uma subestação automatizada



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2010).

Antes da norma IEC 61850 ser feita, haviam diversos problemas de incompatibilidade de protocolos, visto que cada fabricante desenvolvia seu próprio padrão de comunicação. Geralmente usava-se vários protocolos, conforme exposto na Figura 9.

Figura 9 – Protocolos de comunicação utilizados antes da norma IEC 61850

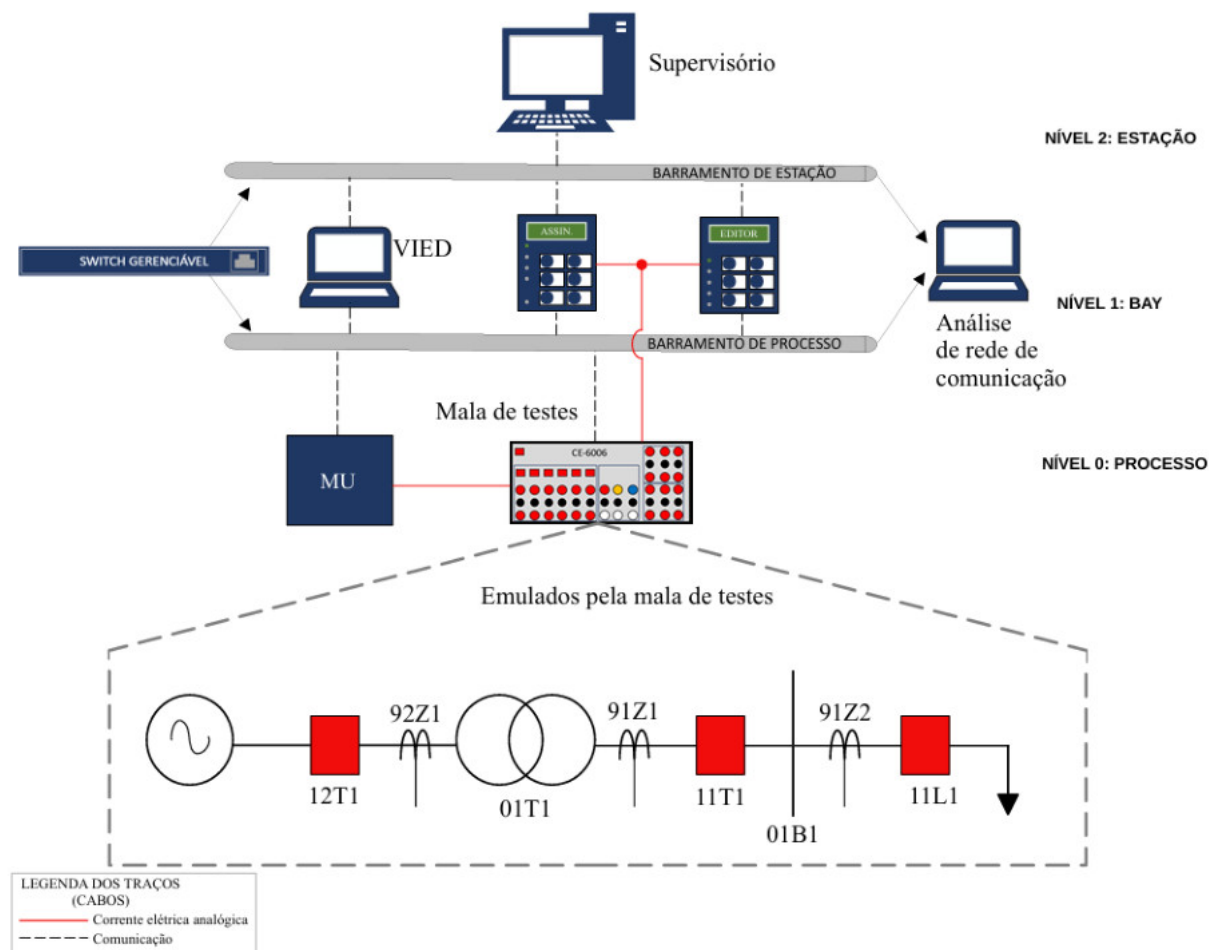


Fonte: Almeida (2011).

A automação das subestações pode ser parcial, que é quando apenas o barramento de estação é implementado, já a automação total é feita quando além do

barramento de estação há também o de processos. As *Merging Units* (MU) recebem sinais de tensão ou corrente e é responsável por converter esse sinal e o disponibilizar para os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs). O esquema da plataforma padrão da IEC pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Plataforma com padrão IEC 61850



Fonte: Freitas (2022).

As mensagens que são trafegadas pelo barramento de estação estão relacionadas à intertravamentos de dispositivos, acessos administrativos e configurações dos IEDs, já no de processos as mensagens são relacionadas aos equipamentos que fazem a interface com os elementos de campo (DUTRA *et al.*, 2023).

No caso dos TIs, apenas a saída da MU é padronizada pela IEC 61850, assim, independente da forma que o transformador é fabricado, a mensagem que é enviada para os relés do barramento de processos é padronizada.

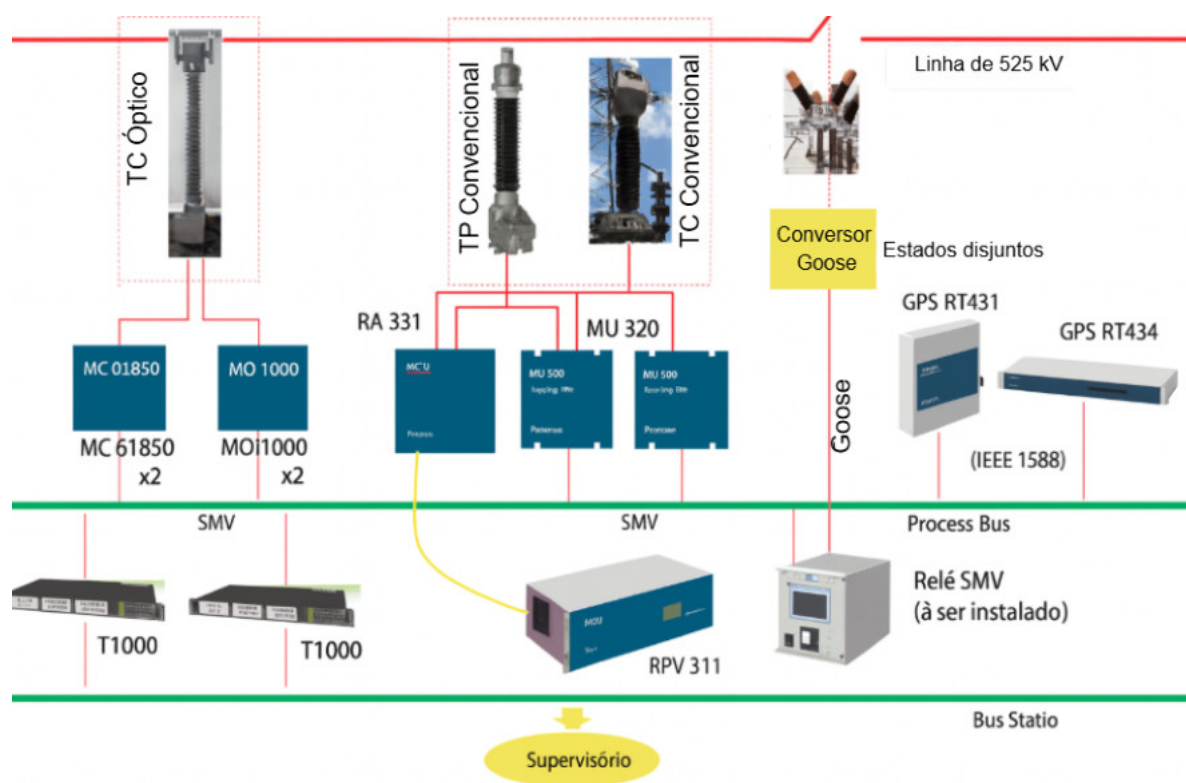
A seção 9-2 da norma especifica a transmissão de amostras de grandezas provenientes de TCs e TPs através da rede Ethernet. É assumido que uma unidade concentradora (merging unit) concentra

os valores adquiridos de vários transformadores de instrumentação associados a um bay e transmite de forma padronizada os dados através da Ethernet. (Lima, 2009 *apud* Hoga; Rodrigues, 2007, p. 60).

Juntamente das MUs, são instaladas as fontes de luz necessárias para o funcionamento da medição óptica, bem como os receptores de sinais dos sensores e o processamento é feito em um processador específico que gera o *Sampled Values* para o barramento de processo. O processador também possui funções para controle do sincronismo e do monitoramento do equipamento (DUTRA *et al.*, 2023).

Ao decorrer do desenvolvimento do TC óptico da Power Opticks Tecnologia, denominado de TECO (Transformador Eletrônico de Corrente Óptico), foi instalado um lote piloto na SE YTÁ para demonstrar a viabilidade de aplicação do TECO. A Figura 11 representa o sistema de monitoramento que existe em Ytá.

Figura 11 – Diagrama de monitoração na SE YTÁ



Fonte: Dutra *et al.* (2023).

Após essa instalação, exposta na Figura 12, melhorias no produto vieram sendo implementadas, dentre elas, modificações na base do produto, responsável por fixar o isolador e cabeçote nos postes de concreto da SE.

Figura 12 – Lote piloto do TECO na SE YTÁ



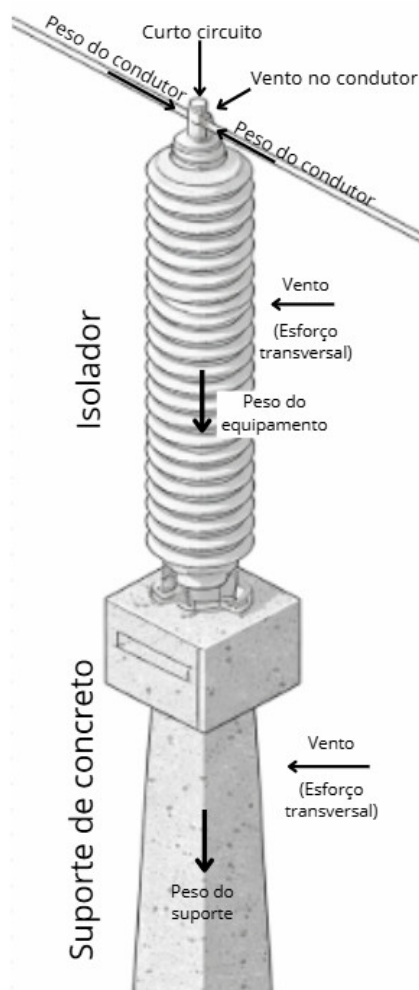
Fonte: Adaptado de PowerOpticks (2025)

2.4 Esforços mecânicos em subestações de energia

Os equipamentos instalados em subestações de energia, incluindo transformadores de corrente ópticos e seus respectivos isoladores, estão sujeitos a diversos esforços mecânicos ao longo de sua vida útil. Esses esforços decorrem das condições de instalação e das ações ambientais às quais os equipamentos ficam expostos, sendo essencial compreendê-los para garantir a segurança estrutural, a confiabilidade operacional e a durabilidade dos sistemas elétricos.

De acordo com Santana (2023), os esforços mecânicos mais relevantes em equipamentos de subestação são de cargas permanentes e cargas variáveis, sendo as principais associadas ao peso próprio, à ação do vento e às condições de fixação do equipamento à estrutura de suporte.

Dessa forma, os equipamentos que ficam no pátio da SE estão sujeitos a condições operacionais severas, incluindo exposição contínua ao ambiente externo, variações de temperatura, ação do vento, poluição atmosférica e esforços provenientes do peso próprio dos equipamentos acoplados, conforme exposto na Figura 13.

Figura 13 – Esforços presentes na estrutura da SE

Fonte: Adaptado de Santana (2023).

O peso próprio constitui um esforço permanente, atuando predominantemente no sentido vertical, sendo responsável por tensões de compressão ao longo do corpo do isolador e por esforços de flexão em regiões de fixação. Esse carregamento é particularmente relevante em equipamentos montados de forma vertical, onde o isolador exerce simultaneamente funções elétricas e estruturais, conforme a IEC 60168 (COMMISSION, 2006).

A ação do vento é considerada um dos esforços mais críticos para equipamentos instalados ao ar livre. A incidência do vento sobre o corpo do transformador, isoladores e condutores gera forças transversais resultando em momentos fletores significativos, especialmente na base dos isoladores, sendo amplamente utilizada na avaliação de equipamentos de subestações.

Dessa forma, observa-se que os isoladores e sua respectiva base aplicados a transformadores de corrente ópticos estão submetidos a um conjunto de esforços mecânicos que inclui cargas permanentes, ações ambientais e esforços excepcionais.

A compreensão desses carregamentos é essencial para o desenvolvimento de análises mecânicas consistentes, servindo de base para a definição dos casos de carga e para as simulações estruturais apresentadas nos capítulos subsequentes deste trabalho.

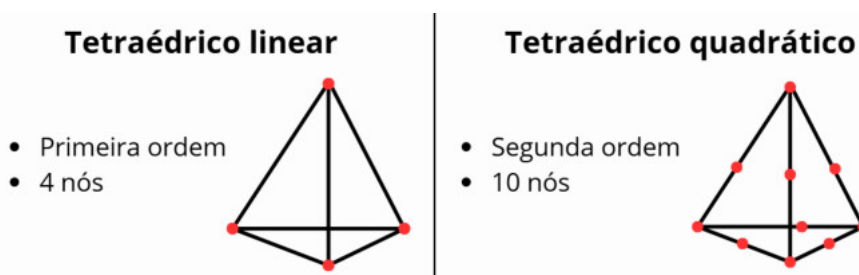
2.5 Método dos elementos finitos

De acordo com SolidWorks (2022), o MEF divide o modelo em diversas partes pequenas, denominadas de elementos, que se conectam através de nós. A partir dessa discretização, as equações diferenciais que regem o comportamento físico do sistema são transformadas em um sistema de equações algébricas, cuja solução fornece uma aproximação dos campos de deslocamentos, deformações e tensões ao longo da estrutura (LOTTI *et al.*, 2006).

O método possibilita estimar campos de deslocamentos, deformações e tensões em geometrias complexas, permitindo a realização de prototipagem virtual e reduzindo a necessidade de ensaios físicos durante as etapas iniciais do desenvolvimento de produtos, conforme exposto por. A qualidade da malha exerce influência direta sobre a precisão dos resultados obtidos, tornando necessária a definição de um refinamento adequado que represente satisfatoriamente o comportamento estrutural da base analisada.

Os elementos tetraédricos utilizados na discretização do modelo podem ser classificados em elementos de primeira (linear) ou de segunda (quadrático) ordem. Os elementos de primeira ordem possuem apenas nós nos vértices, enquanto os elementos de segunda ordem apresentam nós adicionais ao longo das arestas, permitindo uma representação mais precisa da geometria e dos gradientes de tensão e deformação, conforme exposto na Figura 14. Ambos são capazes de representar adequadamente o domínio analisado; entretanto, elementos de segunda ordem tendem a fornecer resultados mais precisos, especialmente em regiões sujeitas a elevadas concentrações de tensões ou variações geométricas mais complexas.

Figura 14 – Tipos de elementos tetraédricos



Fonte: Elaboração própria (2026).

Em análises estruturais, cada elemento possui propriedades geométricas e

mecânicas definidas pelo material, enquanto os nós representam os pontos onde são calculados os deslocamentos. A partir desses deslocamentos são obtidas as deformações e, posteriormente, as tensões no interior da estrutura, permitindo identificar regiões críticas e verificar a integridade mecânica do componente analisado.

A confiabilidade dos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos depende diretamente da adequada representação do problema físico. Dessa forma, a definição correta da geometria, das propriedades dos materiais, das condições de contorno, dos carregamentos e da discretização do domínio constitui etapa essencial para que os resultados numéricos representem de maneira satisfatória o comportamento esperado da estrutura real.

3 DESENVOLVIMENTO

A partir dos conceitos apresentados na fundamentação teórica, estabelece-se a base necessária para a compreensão dos fenômenos físicos e critérios normativos que regem o comportamento estrutural do sistema em estudo. Esses fundamentos não apenas sustentam as escolhas metodológicas adotadas, como também orientam o desenvolvimento do projeto, especialmente no que se refere à definição das cargas atuantes.

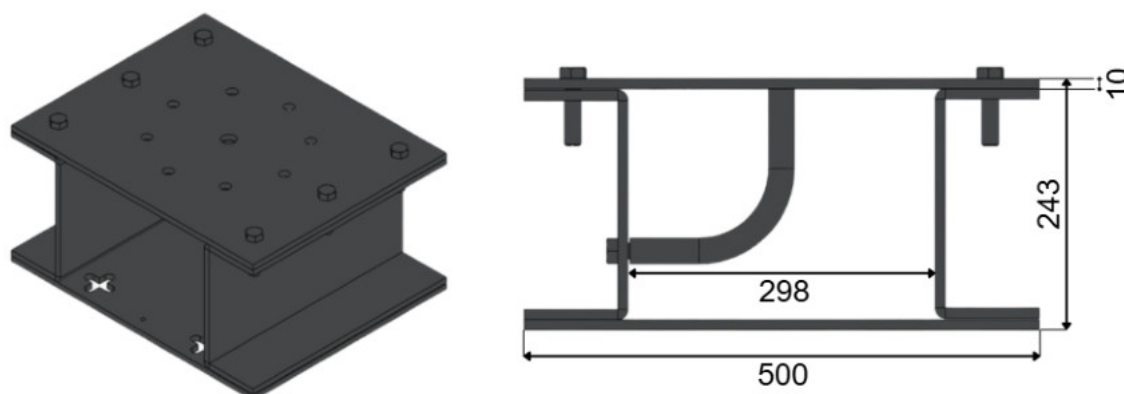
Dessa forma, o capítulo de desenvolvimento busca aplicar, de maneira prática e sistematizada, com base nas informações anteriormente apresentadas para a realização dos cálculos para a estimativa da magnitude das cargas atuantes que serão utilizadas nos modelos de simulação computacional da resistência mecânica do componente.

3.1 Objeto de estudo

O presente trabalho tem como objeto de estudo a base estrutural utilizada no suporte de um transformador de corrente óptico, que desempenha um papel fundamental na sustentação do isolador e dos demais elementos associados, sendo responsável por suportar esforços mecânicos provenientes de cargas estáticas, dinâmicas e ambientais.

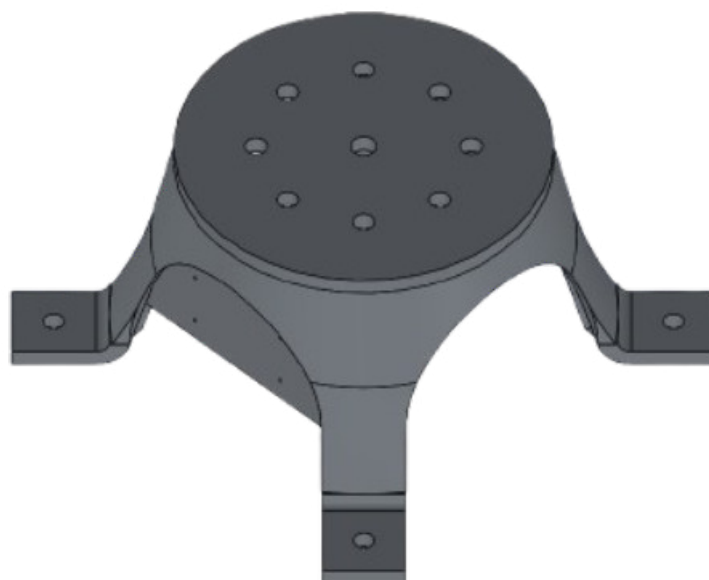
Do ponto de vista construtivo, sua concepção foi orientada por critérios de desempenho estrutural e viabilidade de fabricação, buscando a redução de massa em relação ao modelo anterior e a eliminação de descontinuidades geométricas, como cantos vivos, que podem atuar como concentradores de tensão. Além disso, a geometria foi desenvolvida de modo a ser compatível com o processo de fundição, respeitando limitações inerentes à fabricação por moldes, como a adoção de espessuras mínimas adequadas. Nesse contexto, foi estabelecida uma espessura mínima de 5 mm para garantir o correto preenchimento do molde e a integridade da peça fundida.

A geometria anteriormente utilizada apresentava uma estrutura mais pesada, cerca de 58 kg, feita em AISI 1020 e cantos vivos, conforme a Figura 15. Além disso, a presença de cantos vivos não é recomendada em aplicações para ambientes de subestação, tanto por critérios estruturais quanto por boas práticas construtivas associadas à distribuição de campo elétrico.

Figura 15 – Base anterior

Fonte: Elaboração própria (2026)

Sob a perspectiva geométrica, a base proposta neste trabalho apresenta geometria tridimensional simétrica, sendo composta por um corpo central de transição e quatro apoios inferiores distribuídos radialmente, conforme as Figura 16. O detalhamento dimensional completo da base desenvolvida é apresentado no Apêndice A.

Figura 16 – Base - Vista isométrica

Fonte: Elaboração própria (2026)

A região superior da base consiste em uma interface circular plana, projetada para a fixação do equipamento. A escolha da geometria circular está associada à sua capacidade de promover uma distribuição homogênea das tensões, especial-

mente sob carregamentos axiais e momentos fletores. A disposição simétrica dos furos de fixação contribui para evitar excentricidades e garantir uma transferência equilibrada das cargas para a estrutura, conforme exposto por Young e Budynas (2002).

A transição entre a região superior e os apoios inferiores é realizada por meio de superfícies curvas contínuas, evitando descontinuidades abruptas. De acordo com Budynas e Nisbett (2015), soluções geométricas com essas características reduzem significativamente a concentração de tensões, especialmente nas regiões sujeitas à flexão. Além disso, a presença de aberturas laterais em formato de arco proporciona redução do peso e, conseqüentemente, os esforços transmitidos à fundação. Essas aberturas também diminuem a área exposta à ação do vento, o que é relevante em aplicações externas.

Os quatro apoios formam uma configuração que proporciona a estabilidade da base e melhora a resistência ao tombamento. Essa disposição permite uma melhor distribuição das reações de apoio, especialmente quando a estrutura está sujeita a carregamentos combinados, como forças horizontais e momentos. Dessa forma, a configuração geométrica adotada não apenas atende aos requisitos de fixação e suporte, mas também incorpora princípios de otimização estrutural.

Em relação ao material, a base é constituída de liga de alumínio SAE-323, selecionada em conjunto com o fabricante responsável pela produção do componente. A escolha desse material foi motivada por sua baixa densidade, contribuindo para a redução do peso total da estrutura, cerca de 86%, resultando em uma base de 8 quilogramas, aliada a propriedades mecânicas adequadas para a aplicação, como resistência e boa capacidade de conformação no processo de fundição. Adicionalmente, a liga apresenta características favoráveis quanto à durabilidade e desempenho em condições ambientais típicas de operação.

O processo de fundição foi escolhido por sua capacidade de produzir geometrias complexas de forma eficiente e com bom aproveitamento de material. Após a obtenção da peça bruta fundida, foram realizadas operações de usinagem em regiões específicas, com o objetivo de garantir tolerâncias dimensionais, qualidade superficial e adequação às interfaces de montagem. Essas etapas complementares são essenciais para assegurar o correto acoplamento da base aos demais componentes do sistema e o atendimento aos requisitos funcionais do projeto.

Dessa forma, o objeto de estudo deste trabalho concentra-se na análise do comportamento mecânico, abrangendo desde sua concepção geométrica e seleção de materiais até os aspectos relacionados à sua fabricação e aplicação prática no contexto de subestações de alta tensão.

3.2 Propriedades dos materiais

Para a adequada caracterização do comportamento estrutural da base, torna-se necessário o levantamento das propriedades do material utilizado, as quais servem como base para análises, simulações e validação do projeto. Nesse contexto, são apresentadas as principais propriedades da liga de alumínio SAE-323, organizadas em termos de composição química, propriedades físicas e propriedades mecânicas.

A composição química da liga SAE-323 é apresentada na Tabela 1, na qual são listados os elementos constituintes e suas respectivas faixas de concentração. A presença de elementos de liga influencia diretamente as características do material, como fluidez no estado líquido, resistência mecânica e comportamento durante a solidificação. A variação controlada desses elementos é fundamental para garantir a repetibilidade do processo produtivo e a obtenção das propriedades desejadas na peça final.

Tabela 1 – Propriedades Químicas

Elemento	Porcentagem
Mg	0.2 - 0.45%
Fe	0.6%
Cu	0.25%
Mn	0.35%
Zn	0.35%
Ti	0.25%
Al	90.15 - 99.0%
Outros	0.05 - 0.15%

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa Fundição Arte por e-mail (2026).

As propriedades físicas da liga são apresentadas na Tabela 2, incluindo parâmetros relevantes como densidade, condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica. Esses parâmetros são particularmente importantes na avaliação do comportamento do material em diferentes condições ambientais, especialmente em aplicações externas, onde variações térmicas podem influenciar o desempenho dimensional e estrutural do componente.

Tabela 2 – Propriedades Físicas

Propriedade	Valor
Densidade	2,68 g/cm ³
Condutibilidade elétrica	35% I.A.C.S
Condutibilidade térmica	0,37 cal/cms ^o C
Expansão térmica	23,2 x 10 ⁻⁶ x 1/ ^o C
Ponto de fusão	575 ^o C

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa Fundição Arte por e-mail (2026).

As propriedades mecânicas da liga SAE-323 são apresentadas na Tabela 3, contemplando grandezas como limite de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento, dureza e coeficiente de Poisson. Esses dados são essenciais para o dimensionamento da base e para a verificação de sua integridade estrutural sob os carregamentos previstos. Em especial, o limite de escoamento é utilizado como critério para evitar deformações permanentes e não a ruptura.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas

Propriedade	Valor
Limite de resistência	197 MPa
Limite de escoamento	137 MPa
Alongamento	3% em 50mm
Dureza	70 Brinell
Módulo de elasticidade	71 GPa
Coeficiente de Poisson	0,33
Densidade	2740 Kg/m ³
Têmpera	F

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa Fundição Arte por e-mail (2026).

Destaca-se que as propriedades apresentadas podem sofrer variações em função de fatores como parâmetros de fundição, taxa de resfriamento e eventuais etapas de processamento subsequentes. Dessa forma, os valores adotados neste trabalho correspondem a referências típicas da liga, sendo utilizados como dados de entrada para as análises desenvolvidas.

3.3 Condições de contorno

Para a realização das análises estruturais, é necessário a definição das condições de contorno, que representam o comportamento da estrutura na aplicação. As condições de apoio descrevem a forma como a fixação da base foi representada no modelo numérico, reproduzindo as restrições de movimento impostas pela sua instalação real. As condições de carga contemplam o peso dos componentes suportados pela base, a ação do vento e os esforços eletrodinâmicos decorrentes da corrente de curto-circuito de curta duração (SCL), os quais constituem as principais solicitações mecânicas atuantes sobre a estrutura analisada.

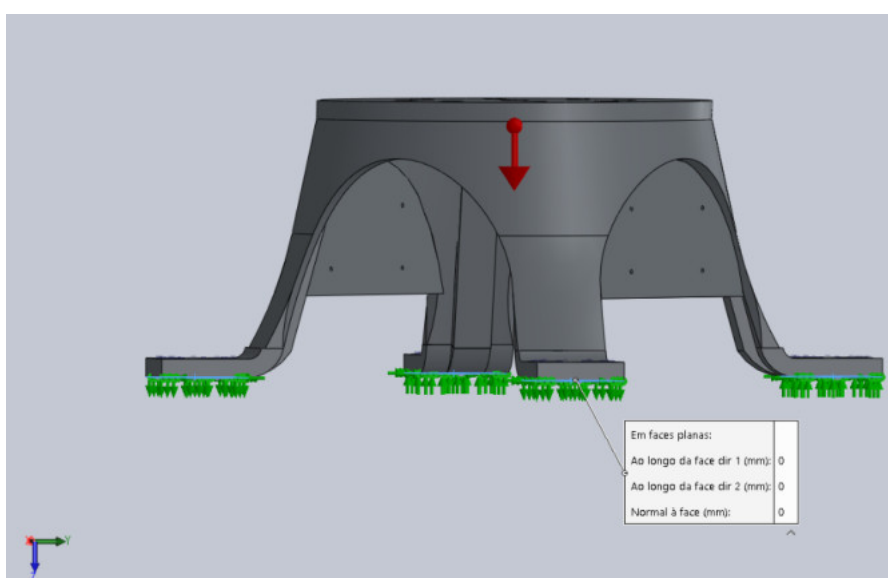
3.3.1 Apoios e Conectores

A definição adequada das condições de apoio e dos conectores utilizados na simulação é fundamental para que o modelo numérico represente de forma realista a transferência de esforços entre a base de sustentação e os elementos aos quais ela está conectada. Dessa forma, foram empregados recursos específicos do *SolidWorks*

Simulation para representar tanto a interface entre a base e a estrutura de suporte quanto a fixação por parafusos utilizada na montagem do conjunto.

Para representar o contato da base com a estrutura de concreto na qual será instalada, foi aplicada a condição de contorno geometria fixa nas faces inferiores dos pés da base, conforme ilustrado na Figura 17. Essa condição restringe os graus de liberdade das superfícies selecionadas, impedindo deslocamentos e rotações, reproduzindo a condição real de instalação. Embora o poste de concreto não tenha sido modelado neste trabalho, essa simplificação permite representar adequadamente a região de apoio da estrutura.

Figura 17 – Recurso Geometria Fixa



Fonte: Elaboração própria (2026)

Além das condições de apoio, a fixação mecânica da base foi representada por meio do recurso conexão de parafuso aplicado aos quatro furos de fixação da base. A adoção desse recurso foi escolhida em substituição à aplicação direta de restrições geométricas nos furos, uma vez que os conectores de parafuso reproduzem de forma mais realista a transferência de cargas entre os componentes conectados.

Outro aspecto relevante é a redução dos efeitos de singularidade numérica frequentemente observados quando condições de contorno são aplicadas diretamente nas bordas dos furos. Nesses casos, podem surgir concentrações artificiais de tensão em regiões extremamente localizadas, resultando em valores que não representam adequadamente o comportamento físico da estrutura. O uso da conexão de parafuso distribui os esforços ao longo da área de fixação do parafuso, proporcionando uma representação mais próxima das condições reais de montagem e reduz a influência das concentrações numéricas artificiais nos resultados.

Os conectores foram definidos considerando parafusos com diâmetro nominal de 18 mm e diâmetro de cabeça e porca de 30 mm, utilizando as propriedades mecânicas padrão de liga de aço disponibilizadas pelo *software*. Não foi considerada a aplicação de pré-carga nos parafusos, sendo adotado torque nulo na definição do conector. Essa simplificação foi considerada adequada para os objetivos deste estudo, uma vez que a análise está concentrada na avaliação do comportamento global da base frente aos carregamentos externos aplicados.

3.3.2 Carga de peso

A carga considerada nesta análise corresponde ao peso dos componentes suportados pela base, os quais transmitem esforços verticais à estrutura. No presente estudo, foram considerados o peso do isolador e o peso do cabeçote do transformador de corrente óptico, sendo estes os principais responsáveis pela solicitação axial atuante sobre a base.

O peso de um corpo é definido como a força resultante da ação do campo gravitacional sobre sua massa, sendo expresso na Equação 1.

$$W = m \cdot g \quad (1)$$

onde:

- a) W = peso (N);
- b) m = massa do componente (kg);
- c) g = aceleração da gravidade, adotada como $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$;

O peso total aplicado foi determinado a partir da soma das contribuições individuais dos elementos, conforme a Equação 2

$$W_t = W_i + W_c \quad (2)$$

onde:

- a) W_i = peso do isolador (N);
- b) W_c = peso do cabeçote (N);

Cada uma dessas parcelas foi obtida a partir da relação entre massa e aceleração da gravidade, conforme apresentado anteriormente, conforme os dados fornecidos pelos fabricantes, expostas nas equações 3 e 4.

$$W_i = 177 \cdot 9,81 \quad (3)$$

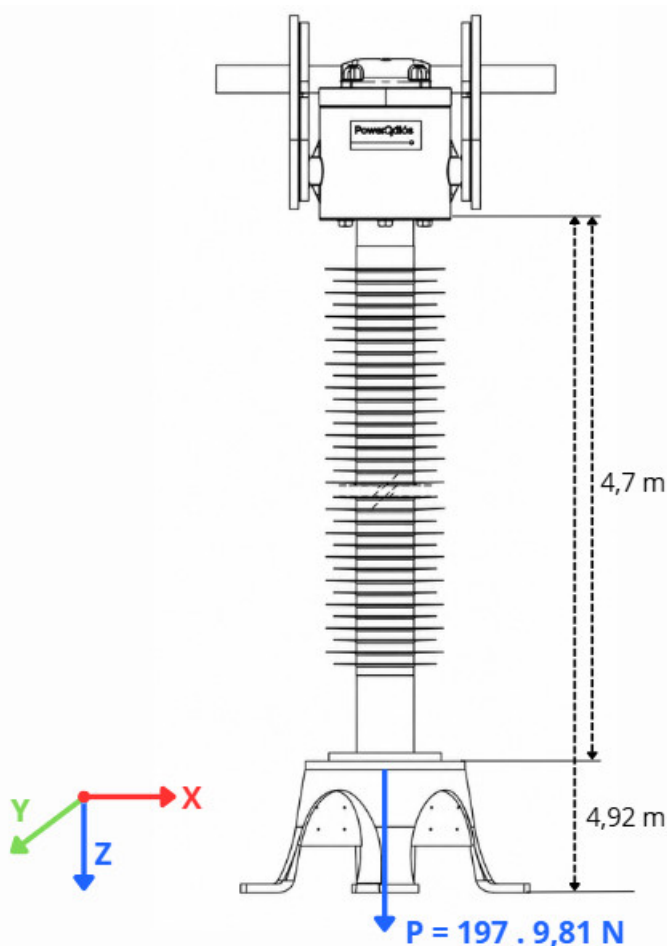
$$W_c = 20 \cdot 9,81 \quad (4)$$

Realizando a substituição dos valores adotados, resulta no peso do isolador igual a 1736,37 N e o peso do cabeçote de 196,2 N. Substituindo esses valores na Equação 2, obteve-se um peso total de:

$$W_t = 1932,57 \text{ N} \quad (5)$$

A representação esquemática da carga vertical considerada para a análise é apresentada na Figura 18, por meio do diagrama de corpo livre do conjunto. Nesse diagrama o peso atua verticalmente para baixo sobre a região da base representando a condição de carregamento estático utilizada nas simulações.

Figura 18 – Diagrama de corpo livre da carga peso



Fonte: Elaboração própria (2026)

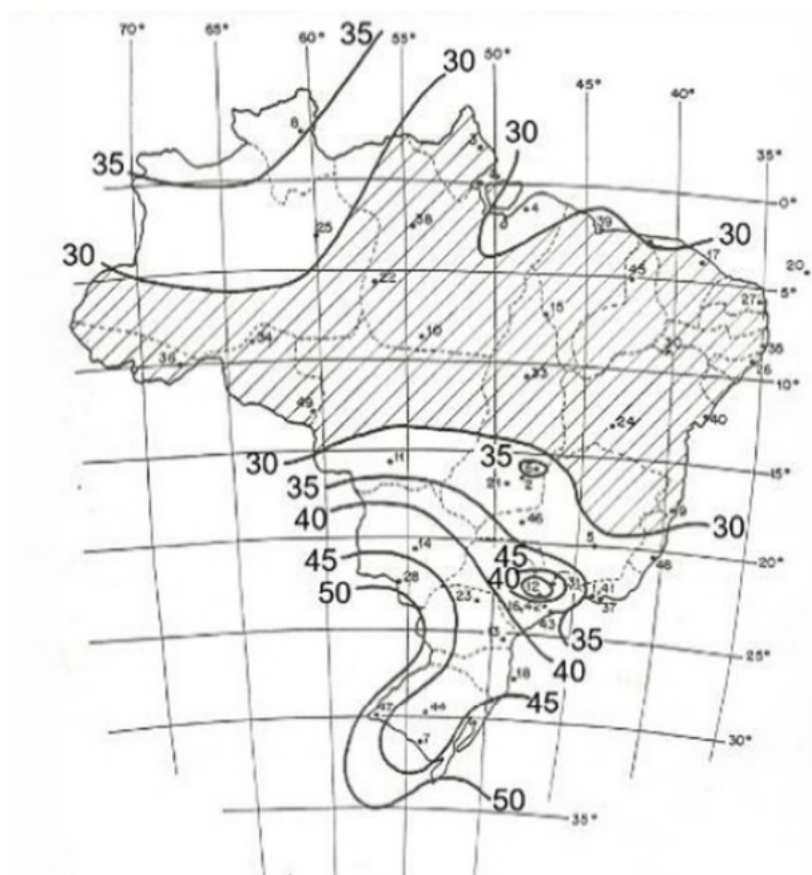
Destaca-se que, por se tratar de uma carga permanente, o peso próprio atua de forma contínua durante toda a vida útil da estrutura, sendo essencial para a avaliação das tensões de compressão e da estabilidade global do sistema. Além disso, sua combinação com outras ações, como a carga de vento, é fundamental para a determinação dos casos críticos de carregamento considerados nas análises estruturais.

3.3.3 Carga de vento

A ação do vento constitui uma das principais solicitações externas atuantes sobre estruturas instaladas em subestações, especialmente em componentes expostos, como a base e o conjunto do transformador de corrente óptico. Dessa forma, a determinação da carga de vento foi realizada com base nos critérios estabelecidos pela Norma Técnica NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações, (ABNT, 2023), considerando as características geométricas do sistema e as condições ambientais do local de instalação.

A velocidade característica do vento foi definida a partir do pior caso de velocidade básica da região, V_0 , adotando um valor de 50 m/s, obtida conforme o zoneamento da norma, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Mapa de velocidades básicas



Fonte: ABNT (2023)

A partir desse valor, foram aplicados fatores de correção que consideram aspectos topográficos, rugosidade do terreno e altura da estrutura, bem como fatores estatísticos, resultando na velocidade característica, V , conforme a Equação 6.

$$V = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (6)$$

onde:

- a) V_0 = velocidade do vento (m/s);
- b) S_1 = fator topográfico;
- c) S_2 = fator de rugosidade e altura;
- d) S_3 = fator estatístico;

Para a determinação desses fatores, foi realizada consulta direta à ABNT NBR 6123. Adotou-se $S_1=1$, considerando que a estrutura está localizada em terreno plano, sem efeitos topográficos significativos. O fator S_2 foi definido como 0,95, valor típico para terrenos classificados na categoria II (terreno aberto), para uma altura aproximada de 5 metros. Já o fator $S_3=1$, correspondente a estruturas usuais, conforme classificação da norma.

Substituindo os valores adotados na Equação 6, obtém-se:

$$V = 50 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 1 \quad (7)$$

Resultando em uma velocidade característica do vento igual a:

$$V = 47,5 \text{ m/s} \quad (8)$$

A partir da velocidade do vento, a pressão dinâmica do vento foi determinada conforme a formulação recomendada pela norma, apresentada na Equação 9.

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (9)$$

onde:

- a) ρ = densidade do ar: $1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$;
- b) V = velocidade do vento: $47,5 \text{ (m/s)}$;

Substituindo os valores adotados, resulta em uma pressão dinâmica do vento de:

$$q = 1381,95 \text{ N/m}^2 \quad (10)$$

A força devida à ação do vento sobre a estrutura foi então calculada considerando a área projetada normal à direção do escoamento e um coeficiente de arrasto apropriado à geometria do conjunto. A força total F pode ser expressa pela Equação 11.

$$F = q \cdot Cd \cdot A \quad (11)$$

onde:

- a) q = pressão dinâmica do vento (N/m^2);
- b) Cd = coeficiente de arrasto;
- c) A = área projetada perpendicular ao vento (m^2);

Para a determinação do coeficiente de arrasto (Cd), de acordo com a norma varia de acordo com a forma geométrica da estrutura. Tendo em vista a geometria predominante do conjunto analisado, adotou-se o coeficiente correspondente a corpos de seção aproximadamente cilíndrica, cujo valor típico varia entre 0,7 e 1,2. Neste trabalho, foi adotado $Cd=1,2$, correspondente ao limite superior da faixa, de modo a representar uma condição conservadora para o dimensionamento estrutural.

Afim de caracterizar a área projetada, foi considerada a projeção da coluna isolante do equipamento, já a contribuição da base e do cabeçote foram desconsiderados devido às dimensões pequenas quando comparadas a altura do isolador. A área projetada pode ser definida por meio da Equação 12.

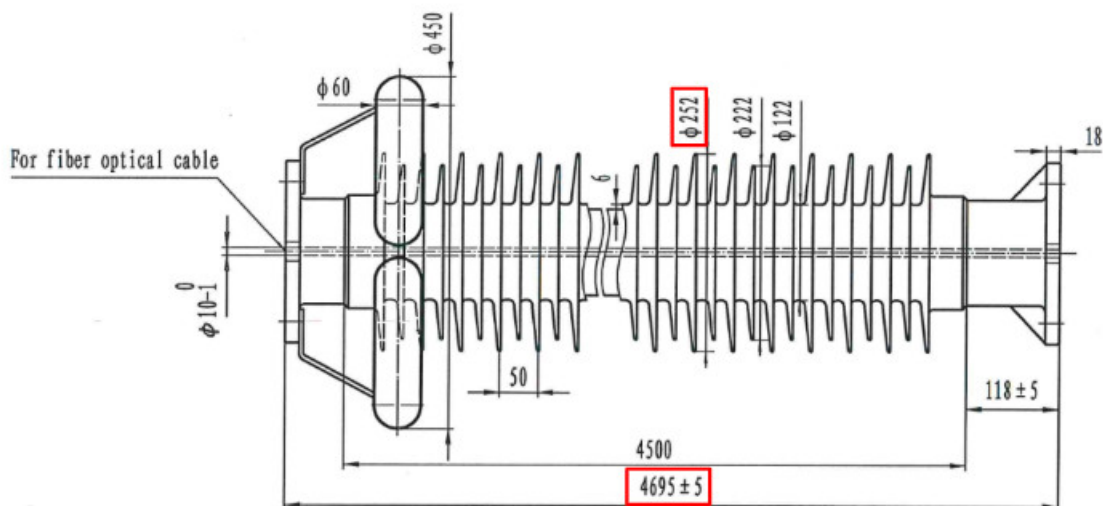
$$A = D \cdot H \quad (12)$$

onde:

- a) D = diâmetro externo do isolador (m);
- b) H = altura exposta ao vento (m);

Os valores de altura e diâmetro do isolador foram entregues pelo fornecedor Electric (2025), exposto na Figura 20

Figura 20 – Desenho do isolador



Fonte: Adaptado dos dados fornecidos pela Empresa TRONCO Electric (2026).

A partir dos valores, obteve-se a área projetada:

$$A = 1,1844 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Substituindo os valores obtidos na Equação 11:

$$F = 1381,95 \cdot 1,2 \cdot 1,1844 \quad (14)$$

Resulta em uma força do vento igual a:

$$F = 1964,14 \text{ N} \quad (15)$$

A partir dessa força, foi também determinado o momento fletor na base da estrutura, considerando o centro de pressão de aplicação da força em relação ao isolador. O momento M pode ser expresso de forma simplificada de acordo com a Equação 16.

$$M = F \cdot \frac{H}{2} \quad (16)$$

Substituindo os valores na Equação 16:

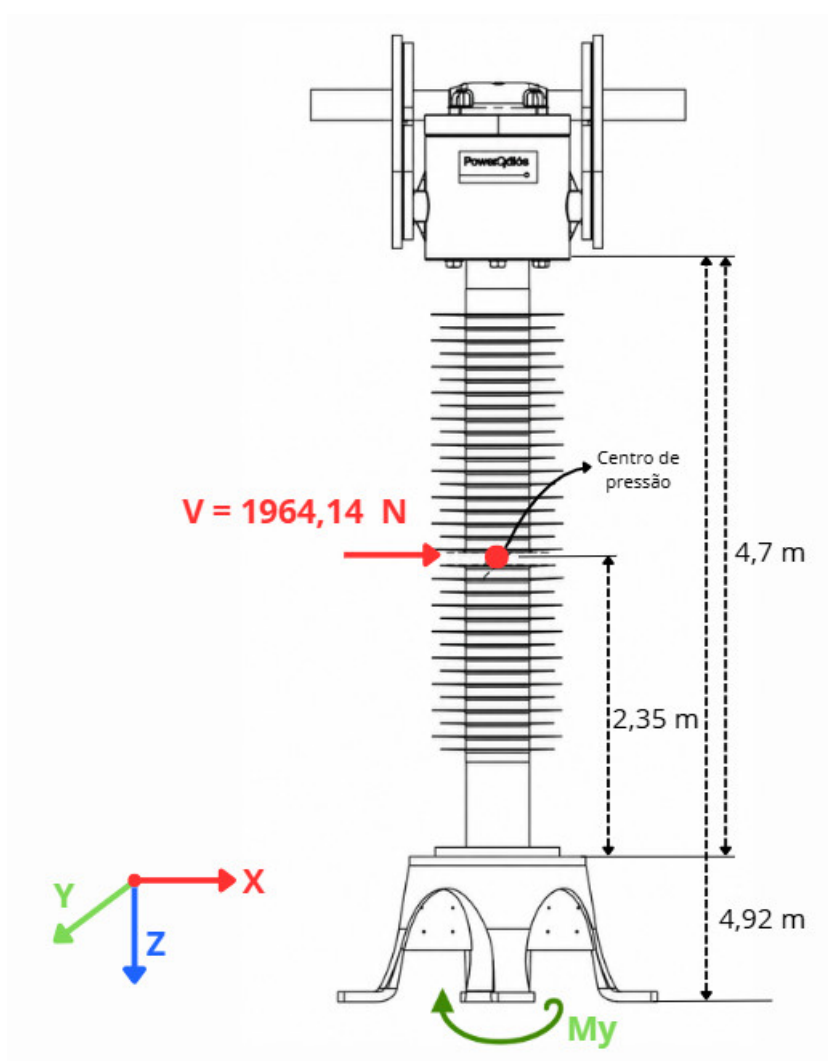
$$M = 1964,14 \cdot \frac{4,7}{2} \quad (17)$$

Dessa forma, o momento resultante é de:

$$M = 4,6 \text{ kN.m} \quad (18)$$

A carga de vento tem sua representação esquemática exposta na Figura 21, por meio do diagrama de corpo livre. A carga de vento foi modelada como uma força horizontal concentrada no centro de pressão do conjunto, representando de forma simplificada a resultante da distribuição de pressões exercidas pelo vento sobre a superfície exposta do isolador e dos demais componentes.

Figura 21 – Diagrama de corpo livre da carga de vento



Fonte: Elaboração própria (2026).

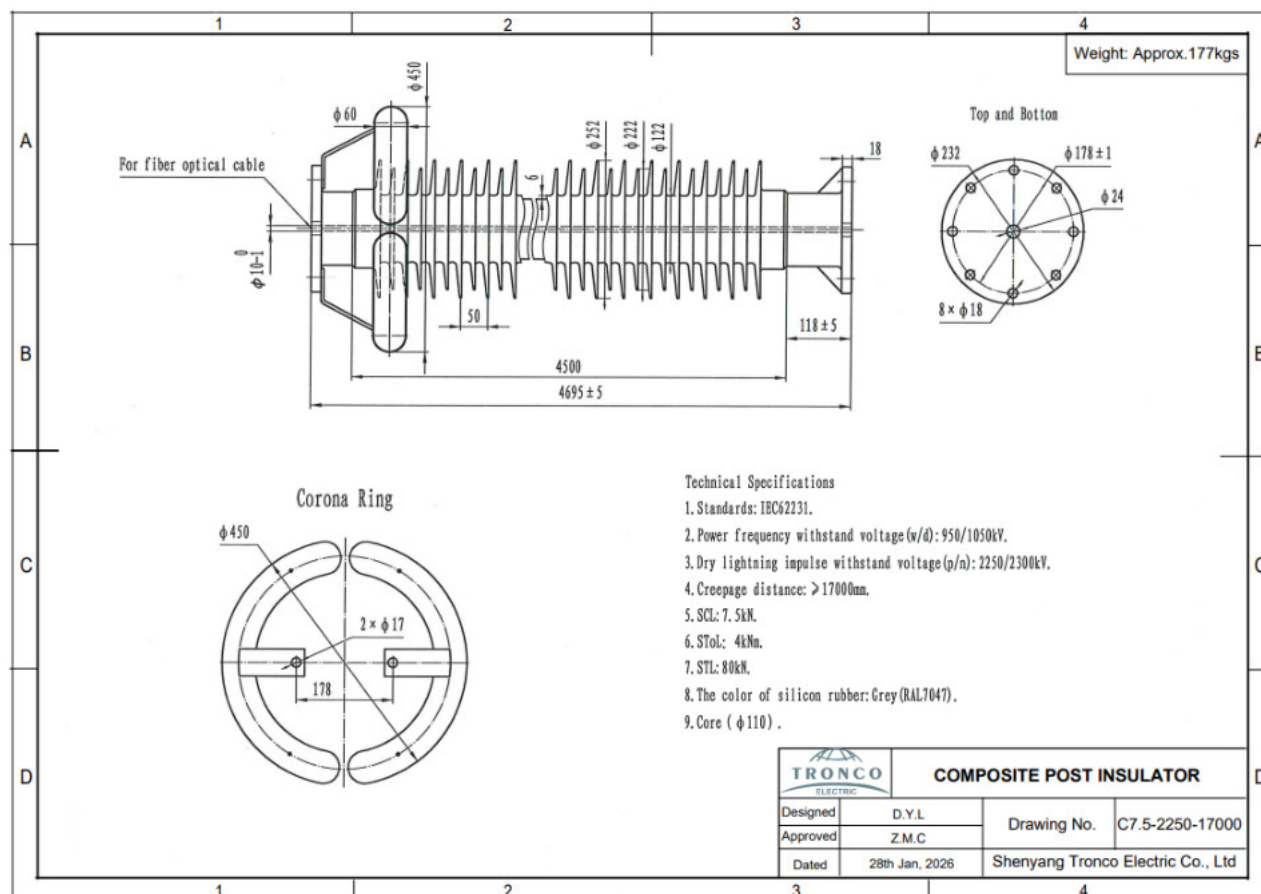
3.3.4 Parâmetros mecânicos do isolador

A integridade estrutural da base de fixação do transformador de corrente óptico está diretamente relacionada às cargas mecânicas transmitidas pelo isolador. O fabricante fornece três parâmetros principais: *Specified Cantilever Load* (SCL), a *Specified Torsional Load* (SToL) e a *Specified Tensile Load* (STL). Esses valores representam as capacidades mecânicas máximas admissíveis do isolador sob diferentes modos de carregamento e são utilizados para garantir a integridade estrutural do equipamento durante sua vida útil, conforme exposto por EPRI (2021).

A Figura 22 apresenta o desenho técnico do isolador, pode-se extrair os parâmetros mecânicos fornecidos pelo fabricante para o isolador utilizado neste trabalho, os quais serviram como base para a definição dos carregamentos avaliados nas simulações numéricas. Embora os esforços decorrentes do curto-circuito que são considerados nesses limites admissíveis apresentem natureza transitória, adotou-se

uma abordagem linear estática equivalente, assumindo-se que a resposta inercial da estrutura é desprezível.

Figura 22 – Desenho técnico do isolador



Fonte: Dados fornecidos pela TRONCO Electric (2026).

O SToL representa a capacidade máxima do isolador em resistir a esforços de torção, sendo especificado pelo fabricante em 4 kN·m. Esse carregamento está relacionado à aplicação de momentos torcionais em torno do eixo longitudinal do isolador, situação que pode ocorrer devido a desalinhamentos de montagem, esforços transmitidos por conexões ou condições específicas de instalação. Como a base analisada neste trabalho está submetida predominantemente a esforços de flexão, a solicitação torsional não constitui a condição crítica para o estudo estrutural desenvolvido.

O STL corresponde à carga máxima de tração axial suportada pelo isolador, sendo especificado em 80 kN. Esse parâmetro está associado a esforços aplicados ao longo do eixo do equipamento, produzindo solicitações predominantemente de tração. Em aplicações típicas de isoladores tipo poste, esse carregamento está relacionado a situações específicas de instalação ou esforços transmitidos por elementos estruturais

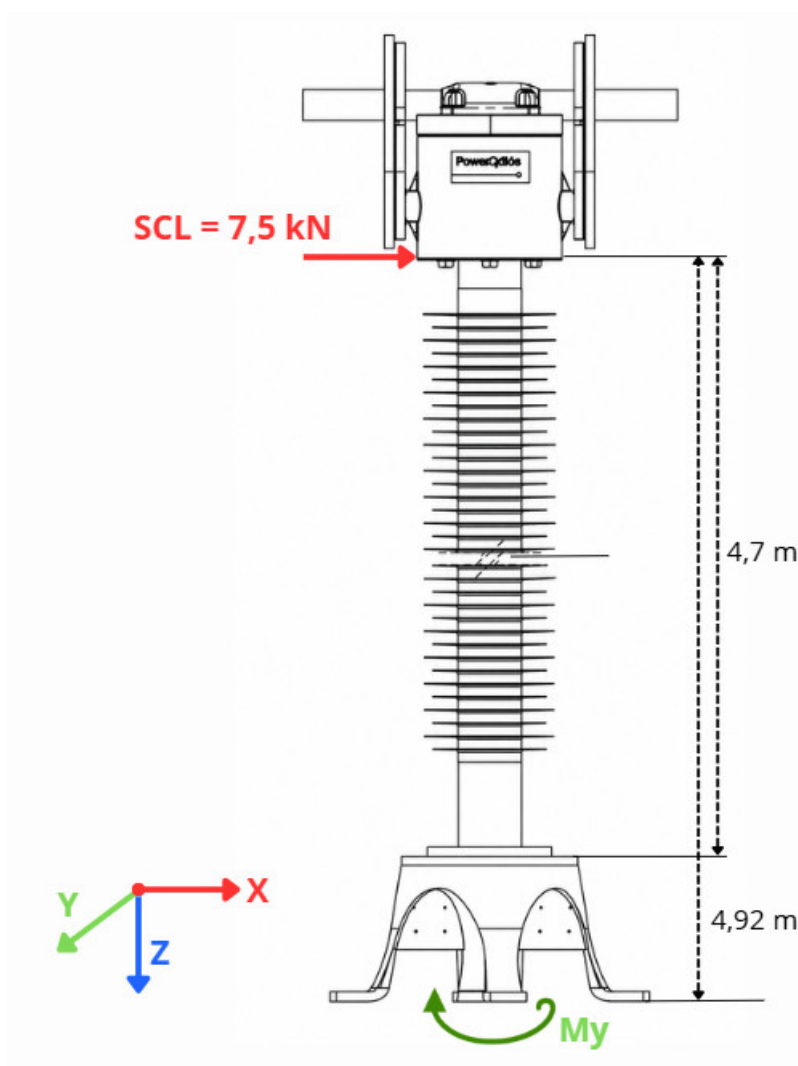
e condutores. Entretanto, não representa a condição de carregamento predominante para a base de sustentação analisada.

Por sua vez, o SCL corresponde à carga transversal máxima admissível aplicada na extremidade do isolador, produzindo esforços de flexão ao longo de sua estrutura. Para o isolador analisado, o fabricante especifica um valor de 7,5 kN. Esse carregamento está associado à resultante de esforços mecânicos laterais que podem atuar durante a operação do equipamento, tais como ação do vento, esforços provenientes dos condutores, cargas provenientes de curto-circuito e outras solicitações transversais. Dessa forma, o SCL representa a capacidade limite do isolador para resistir a carregamentos laterais sem comprometer sua integridade estrutural.

Dentre os parâmetros fornecidos pelo fabricante, o SCL foi adotado como carregamento principal para as simulações estruturais da base, uma vez que a solicitação mais crítica para esse componente está associada aos esforços laterais transmitidos pelo isolador. A aplicação de uma força transversal gera simultaneamente uma força cortante e um momento fletor na região de fixação entre o isolador e a base, produzindo as maiores tensões estruturais no conjunto. Além disso, o valor de SCL é fornecido diretamente pelo fabricante como limite mecânico admissível do isolador, constituindo um dado confiável e tecnicamente justificável para utilização nas análises numéricas.

A Figura 23 apresenta o diagrama de corpo livre correspondente à condição de carregamento do SCL considerada neste trabalho. A força resultante foi aplicada na posição definida pelo modelo estrutural, representando os esforços transmitidos pelo equipamento durante o cenário limite de carregamento.

Figura 23 – Diagrama de corpo livre da carga SCL



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4 Configuração do Solver

Para a realização das simulações estruturais propostas neste trabalho, foi utilizado o *software SolidWorks*, amplamente empregado em aplicações de engenharia devido à sua integração entre modelagem geométrica e análise computacional. O módulo de simulação do *software* baseia-se no Método de Elementos Finitos (MEF), uma técnica numérica amplamente utilizada em engenharia para a prototipagem virtual e a avaliação do comportamento mecânico de componentes e estruturas, através do *Solver* SIMULIA Abaqus.

No contexto deste estudo, foi realizado uma análise estática, que é adequada para a avaliação do comportamento estrutural sob condições de carregamento permanente ou quase-estático, como aquelas associadas ao peso próprio e às ações externas de natureza.

Adicionalmente, no que se refere à definição das propriedades dos materiais, foi realizada a parametrização do material no ambiente do *SolidWorks*, com base nos dados técnicos fornecidos pelo fabricante do componente analisado, conforme exposto no item 3.2. Após a definição dos parâmetros do material foi aplicado em todas as simulações realizadas, assegurando coerência entre os diferentes cenários analisados e maior fidelidade na representação do comportamento estrutural da base.

3.5 Malha

Com o objetivo de avaliar a influência do refinamento da malha nos resultados obtidos e garantir a confiabilidade das simulações numéricas, foi realizado um estudo de independência de malha. Para isso, foram geradas quatro discretizações distintas, as quais foram comparadas a partir dos resultados obtidos para o parâmetro de interesse adotado na análise. Esse procedimento permite verificar a convergência da solução numérica e identificar o nível de refinamento a partir do qual novas reduções no tamanho dos elementos produzem alterações pouco significativas nos resultados.

Tabela 4 – Estudo de independência de malha

Malha	Nº de elementos	Nº de nós	Von Mises máximo	Variação de elementos%
Grossa	10310	20306	13,7 MPa	-
Média	14429	27412	14,4 MPa	39,95
Fina	14784	28042	14,7 MPa	2,46
Muito fina	15005	28778	15,8 MPa	1,49

Fonte: Elaboração própria (2026).

Com os resultados obtidos na Tabela 4, observa-se uma tendência de estabilização dos valores de tensão equivalente de Von Mises à medida que a malha é refinada, indicando a convergência da solução numérica. A malha mais fina foi adotada para as análises subsequentes por fornecer a maior precisão entre as configurações avaliadas, o que permite obter resultados mais representativos do comportamento estrutural da base, garantindo maior confiabilidade às análises realizadas neste trabalho.

A malha adotada foi realizada utilizando o método de discretização baseado na curvatura disponível no *SolidWorks Simulation*, onde o *software* percebe regiões com maior curvatura geométrica, permitindo maior fidelidade a geometria do modelo. A Tabela 5 apresenta as características da malha utilizada no presente trabalho.

3.6 Cenários

Com as condições de apoio e de carregamento devidamente definidas, foram estabelecidos diferentes cenários de análise para avaliar o comportamento estru-

Tabela 5 – Propriedades da malha adotada

Parâmetro	Valor
Tipo de elemento	Tetraédrico quadrático
Ordem do elemento	Segunda ordem
Nº de nós	28778
Nº de elementos	15005

Fonte: Elaboração própria (2026).

tural da base sob distintas combinações de esforços.

Cada cenário representa uma condição específica de operação, considerando a atuação isolada ou combinada das cargas previamente apresentadas. A definição desses cenários permite identificar as situações mais críticas para a estrutura, possibilitando a comparação dos resultados obtidos e a verificação de sua integridade mecânica frente às solicitações previstas para sua aplicação.

Destaca-se que não foi considerado um cenário contendo simultaneamente as cargas de peso, vento e SCL. Essa decisão baseia-se no fato de que o SCL representa a carga transversal máxima admissível do isolador, correspondendo à resultante dos esforços laterais que podem atuar sobre o equipamento durante sua operação, incluindo a ação do vento, esforços provenientes dos condutores, curto-circuito e outras solicitações mecânicas transversais. Dessa forma, a combinação direta entre a carga de vento calculada e o valor de SCL resultaria na superposição de uma solicitação específica com uma capacidade limite de carregamento, conduzindo a uma condição que não representa adequadamente o comportamento físico esperado do sistema.

3.6.1 Cenário 1 - Peso

O primeiro cenário de análise foi definido com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural da base submetida exclusivamente à ação do peso próprio do conjunto. Este cenário representa a condição básica de operação, com a estrutura estando sujeita apenas às cargas estáticas, conforme exposto no item 3.3.2. O diagrama de corpo livre, exposto na Figura 18, corresponde à carga peso utilizada neste cenário.

Para a implementação no *SolidWorks Simulation*, o carregamento foi representado por meio da aplicação da aceleração da gravidade ao modelo juntamente com uma carga distribuída na superfície de fixação do isolador à base, representando a transferência do peso do conjunto suportado pela estrutura. Dessa forma, buscou-se reproduzir de maneira mais fiel as condições reais de carregamento às quais a base está submetida durante a operação.

A análise deste cenário possibilita verificar o comportamento inicial da estrutura e identificar regiões sujeitas à concentração de tensões mesmo na ausência de carregamentos laterais. Além disso, os resultados obtidos servem como referên-

cia para comparação com os demais cenários analisados, nos quais são adicionadas solicitações mecânicas mais severas.

3.6.2 Cenário 2 - Peso + Vento

Após a avaliação da estrutura submetida exclusivamente ao peso do conjunto, procedeu-se à análise da base considerando também a atuação de esforços horizontais provenientes da ação do vento. Tal combinação permite a verificação da influência das solicitações laterais leves os níveis de tensão e deslocamento da estrutura.

Na simulação realizada no *SolidWorks*, foram mantidas as condições de carregamento do Cenário 1, exposto no item 3.6.1. Adicionalmente, foi aplicada a força equivalente à ação do vento, conforme os valores apresentados no Item 3.3.3.

Seguindo o diagrama de corpo livre exibido na Figura 21, a carga de vento foi aplicada na região do centro de pressão, através do recurso de carga remota disponível no *software*, reproduzindo o efeito da força horizontal resultante da pressão do vento incidente sobre o conjunto.

A análise desse cenário permite avaliar a influência do vento sobre os níveis de tensão e deslocamento da base, tornando possível verificar o impacto do carregamento lateral do vento no desempenho estrutural da solução proposta.

3.6.3 Cenário 3 - Peso + SCL

A condição mais severa avaliada neste trabalho corresponde à combinação entre a carga de peso e a carga transversal máxima admissível do isolador. Este cenário foi definido para que fosse possível verificar a capacidade da base de suportar os esforços máximos transmitidos pelo equipamento, representando uma situação limite para a análise estrutural.

Além das cargas gravitacionais considerada no Item 3.6.1, também aplicou-se a força correspondente ao SCL fornecido pelo fabricante do isolador. As condições adotadas para sua determinação, bem como o ponto de aplicação utilizado na modelagem, foram apresentados no Item 3.3.4. Conforme discutido anteriormente, o SCL engloba diferentes solicitações mecânicas que podem atuar durante a operação. Por esse motivo, o valor de SCL é maior do que apenas a carga de vento, sendo inadequado combinar ambas as solicitações em um mesmo cenário.

No *SolidWorks*, a solicitação foi implementada através do recurso de carga remota, aplicando a força em um ponto correspondente ao topo do isolador, conforme a Figura 23. Essa abordagem possibilita reproduzir de maneira mais realista a transmissão dos esforços para a base do equipamento, considerando o braço de alavanca existente entre o ponto de aplicação da carga e a região de fixação da estrutura.

Os resultados obtidos nesse cenário são particularmente relevantes para a validação estrutural da base, uma vez que permitem verificar se os níveis de tensão, deformação e deslocamento permanecem dentro de limites aceitáveis mesmo sob a condição de carregamento transversal máximo especificada para o isolador.

3.7 Critérios de avaliação dos resultados

A avaliação dos resultados obtidos por meio das simulações numéricas será conduzida com base em critérios técnicos fundamentados na resistência dos materiais e nas boas práticas de análise estrutural via Método dos Elementos Finitos, sendo analisadas as distribuições de tensões equivalentes, com ênfase na tensão de Von Mises.

Os valores máximos de tensão obtidos nas simulações serão comparados com os limites admissíveis do material. Valores adequados indicam que a estrutura é capaz de suportar as solicitações impostas sem falha, enquanto valores reduzidos podem indicar a necessidade de revisão do projeto.

Além das tensões, serão avaliados os deslocamentos e deformações resultantes, de modo a verificar se estes permanecem dentro de limites aceitáveis para a aplicação em questão. Deslocamentos excessivos, mesmo na ausência de falha estrutural, podem comprometer a funcionalidade do sistema, especialmente por esse componente exigir alinhamento e estabilidade geométrica.

Por fim, os resultados obtidos serão interpretados de forma integrada, correlacionando tensões, deformações e deslocamentos, a fim de embasar conclusões quanto à integridade estrutural e ao desempenho do modelo analisado e também estabelecer o fator de segurança. Essa abordagem permite uma análise mais robusta e confiável, contribuindo para a validação do projeto proposto no contexto do trabalho.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Concluídas as etapas de modelagem geométrica, conforme cenários descritos anteriormente, procede-se à análise dos resultados obtidos por meio das simulações numéricas. Esta etapa tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural da base frente aos diferentes cenários considerados, permitindo a identificação de regiões críticas, a verificação dos níveis de tensão e deslocamento, bem como a validação do desempenho mecânico do conjunto. Nesse contexto, os resultados são apresentados e discutidos a seguir, de forma estruturada, de modo a subsidiar as conclusões acerca da integridade estrutural da solução proposta.

4.1 Avaliação da Qualidade da Malha

Antes da análise dos resultados estruturais, realizou-se a avaliação da qualidade da malha empregada nas simulações, com o objetivo de verificar a adequação da discretização adotada e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos por meio do Método dos Elementos Finitos.

Dentre os indicadores avaliados, destaca-se a predominância de elementos com razão de aspecto inferior a 3, correspondendo a 93,8% da malha. A razão de aspecto é um parâmetro utilizado para avaliar a qualidade geométrica dos elementos finitos, representando a relação entre suas dimensões características. Elementos com valores próximos da unidade apresentam geometria mais regular, o que favorece a correta interpolação dos deslocamentos e das tensões no interior do elemento. Dessa forma, a elevada proporção de elementos com razão inferior a 3 indica uma malha bem condicionada e numericamente estável.

Em complemento à análise da razão de aspecto, verificou-se que apenas 1,13% dos elementos da malha apresentaram valores superiores a 10. Elementos com elevada razão de aspecto caracterizam-se por geometrias mais alongadas, podendo reduzir a precisão local da solução devido ao aumento dos erros de interpolação e à maior sensibilidade numérica. Entretanto, considerando que esse percentual representa uma parcela reduzida do total de elementos gerados, conclui-se que a ocorrência de elementos potencialmente desfavoráveis é limitada e não compromete a qualidade global da discretização. Dessa forma, os resultados indicam que a malha apresenta predominância de elementos com geometria adequada, mantendo a confiabilidade das análises estruturais realizadas.

Outro indicador relevante de qualidade é a porcentagem de elementos distorcidos. A análise realizada indicou ausência de elementos distorcidos na malha gerada, correspondendo a 0% do total de elementos. Esse resultado evidencia que não foram identificadas deformações geométricas capazes de comprometer a precisão nu-

mérica da solução, reforçando a adequação da discretização adotada para as simulações realizadas.

4.2 Resultados das simulações

No presente estudo, a avaliação estrutural foi conduzida com base no critério da tensão equivalente de Von Mises, amplamente adotado em análises de materiais dúcteis por permitir a comparação direta entre o estado de tensões e o limite de escoamento do material. Para o material considerado, adotou-se um limite de escoamento de $1,370 \times 10^8$ N/m², o qual serve como referência para a verificação da integridade estrutural nos diferentes cenários analisados.

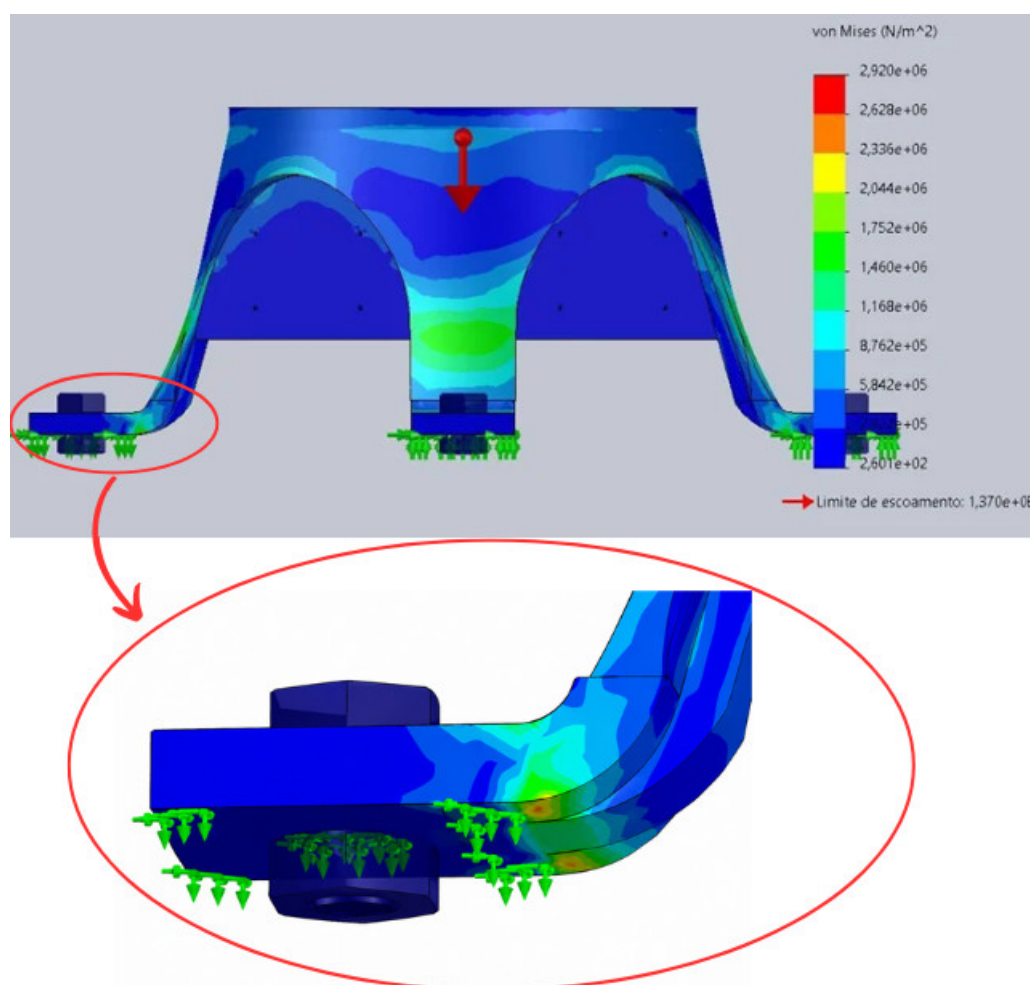
Ressalta-se que esse critério foi aplicado de forma consistente em todos os cenários analisados, garantindo uniformidade metodológica na interpretação dos resultados e possibilitando uma análise comparativa entre as diferentes condições de carregamento.

Afim de expor mais detalhes da simulação, foram disponibilizados os Apêndices B, C e D.

4.2.1 Resultados da Simulação do Cenário 1

Os resultados da análise estática indicaram uma tensão equivalente máxima de Von Mises de 2,92 MPa. Considerando o limite de escoamento do material SAE 323 igual a 137 MPa, observa-se que a tensão desenvolvida corresponde a aproximadamente 2,1% da resistência ao escoamento, evidenciando ampla margem de segurança para esta condição de operação.

A Figura 24 apresenta a região crítica identificada na análise de tensões para o Cenário 1. Verifica-se que a tensão máxima ocorreu na região de ligação entre os elementos estruturais da base, local responsável pela transferência dos esforços provenientes da massa suportada para os pontos de fixação. Apesar da concentração observada, os níveis de tensão permanecem significativamente inferiores à capacidade resistente do material.

Figura 24 – Região crítica de tensão de Von Mises - Cenário 1

Fonte: Elaboração própria (2026).

Em relação à rigidez estrutural, o deslocamento máximo obtido foi de 0,0158 mm, valor reduzido quando comparado às dimensões características da estrutura. Esse resultado demonstra que a base apresenta elevada rigidez frente às solicitações decorrentes do carregamento gravitacional.

A deformação equivalente máxima calculada foi de $2,64 \times 10^{-5}$, indicando que o comportamento estrutural permanece integralmente no regime elástico e sem indícios de deformações permanentes.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a base atende aos requisitos estruturais para a condição de carregamento do peso, apresentando baixos níveis de tensão, deslocamento e deformação.

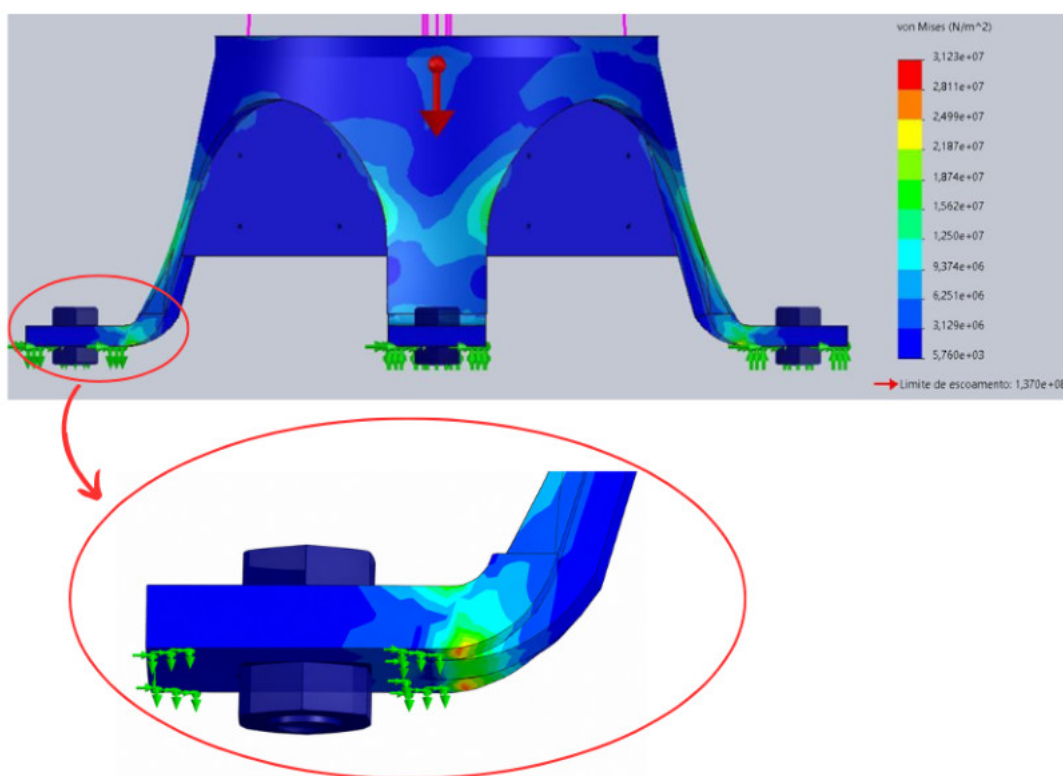
4.2.2 Resultados da Simulação do Cenário 2

Para essa combinação de carregamentos, a maior tensão equivalente de Von Mises registrada foi de 31,23 MPa, que equivale a aproximadamente 22,8% do

limite de escoamento do material. Esse critério indica que a estrutura permanece operando com margem de segurança significativa.

A Figura 25 apresenta a distribuição das tensões equivalentes de Von Mises para este cenário, evidenciando a região de maior solicitação estrutural. Verifica-se que a ação do vento introduz esforços adicionais de flexão na base, elevando os níveis de tensão em comparação ao cenário submetido apenas ao peso próprio, embora os valores obtidos permaneçam muito inferiores ao limite de escoamento do material.

Figura 25 – Região crítica de tensão de Von Mises - Cenário 2



Fonte: Elaboração própria (2026).

A influência da carga de vento também pode ser observada na resposta de deslocamento da base. O deslocamento resultante máximo atingiu 0,0645 mm, valor superior ao obtido no cenário submetido exclusivamente ao peso. Ainda assim, a magnitude encontrada é reduzida e demonstra que a estrutura mantém rigidez suficiente para limitar deslocamentos excessivos durante a operação.

De maneira análoga, a deformação equivalente máxima alcançou $2,783 \times 10^{-4}$, permanecendo compatível com o comportamento elástico do material. Esse resultado confirma que, mesmo sob a ação simultânea do peso e do vento, não são observadas deformações permanentes ou indícios de comprometimento estrutural. Dessa forma, verifica-se que a base apresenta desempenho satisfatório para a condição de carregamento analisada, suportando adequadamente os esforços atuantes

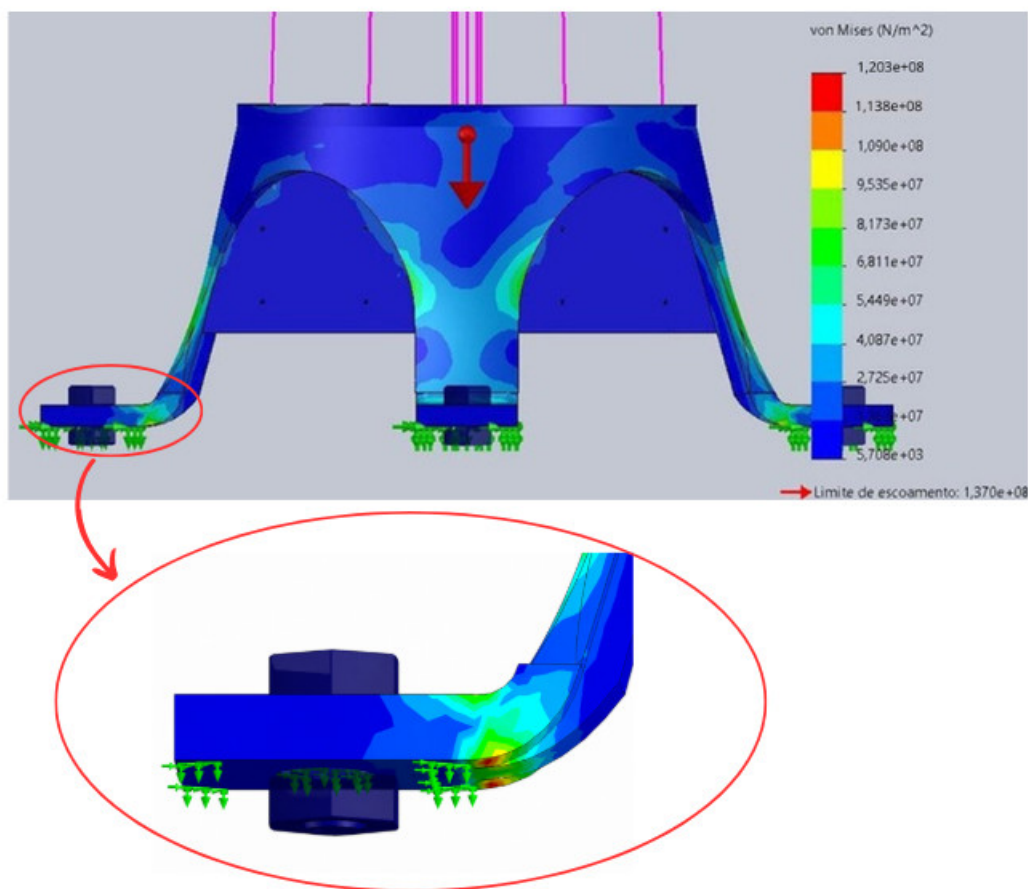
sem ultrapassar os limites admissíveis do material.

Dessa forma, verifica-se que a base apresenta desempenho satisfatório para a condição de carregamento analisada, suportando adequadamente os esforços atuantes sem ultrapassar os limites admissíveis do material.

4.2.3 Resultados da Simulação do Cenário 3

Entre os cenários avaliados, esta condição apresentou os maiores níveis de solicitação estrutural. A tensão equivalente máxima de Von Mises atingiu 120,3 MPa, valor muito próximo ao limite de escoamento do material SAE 323, igual a 137 MPa. Dessa forma, a tensão desenvolvida corresponde a aproximadamente 87,6% da resistência ao escoamento, indicando que a estrutura chega próximo da sua capacidade resistente para esta condição de carregamento.

A distribuição das tensões equivalentes de Von Mises para o Cenário 3 está exposta na Figura 26. Observa-se uma intensificação significativa dos níveis de tensão em relação aos cenários anteriores, concentrando-se na região crítica da estrutura responsável pela transferência dos esforços para os pontos de fixação. Esse comportamento evidencia a elevada severidade desse carregamento, que se mostrou determinante para o dimensionamento da base.

Figura 26 – Região crítica de tensão de Von Mises - Cenário 3

Fonte: Elaboração própria (2026).

Como consequência do aumento significativo dos esforços aplicados, também foi observado um acréscimo expressivo na resposta da base. O deslocamento máximo alcançou 0,3125 mm, representando um aumento considerável em relação aos cenários anteriormente analisados. Apesar disso, o valor obtido permanece reduzido quando comparado às dimensões globais da estrutura, não indicando limitações relacionadas à rigidez do conjunto.

A deformação equivalente máxima foi de $1,247 \times 10^{-3}$, refletindo o elevado nível de carregamento imposto pela associação de esforços do SCL. Esse comportamento está diretamente associado ao aumento das tensões e deslocamentos observados para esta condição de operação.

Os resultados obtidos evidenciam que o carregamento SCL constitui a condição mais crítica dentre os cenários avaliados, sendo responsável pelos maiores níveis de tensão, deslocamento e deformação registrados nas simulações.

4.3 Avaliação do Fator de Segurança

A avaliação do fator de segurança foi realizada com o objetivo de verificar a margem existente entre as tensões obtidas nas simulações e o limite de escoamento do material utilizado na fabricação da base. Para essa análise, adotou-se como critério o fator de segurança em relação ao escoamento, calculado pela razão entre o limite de escoamento do material e a tensão equivalente máxima de Von Mises obtida em cada cenário analisado.

Considerando o limite de escoamento do alumínio SAE 323 igual a 137 MPa, os fatores de segurança calculados para os três cenários são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos

Cenário	Tensão de Von Mises (MPa)	Fator de segurança
Cenário 1	2,92	46,92
Cenário 2	31,23	4,39
Cenário 3	120,3	1,14

Fonte: Elaboração própria (2026).

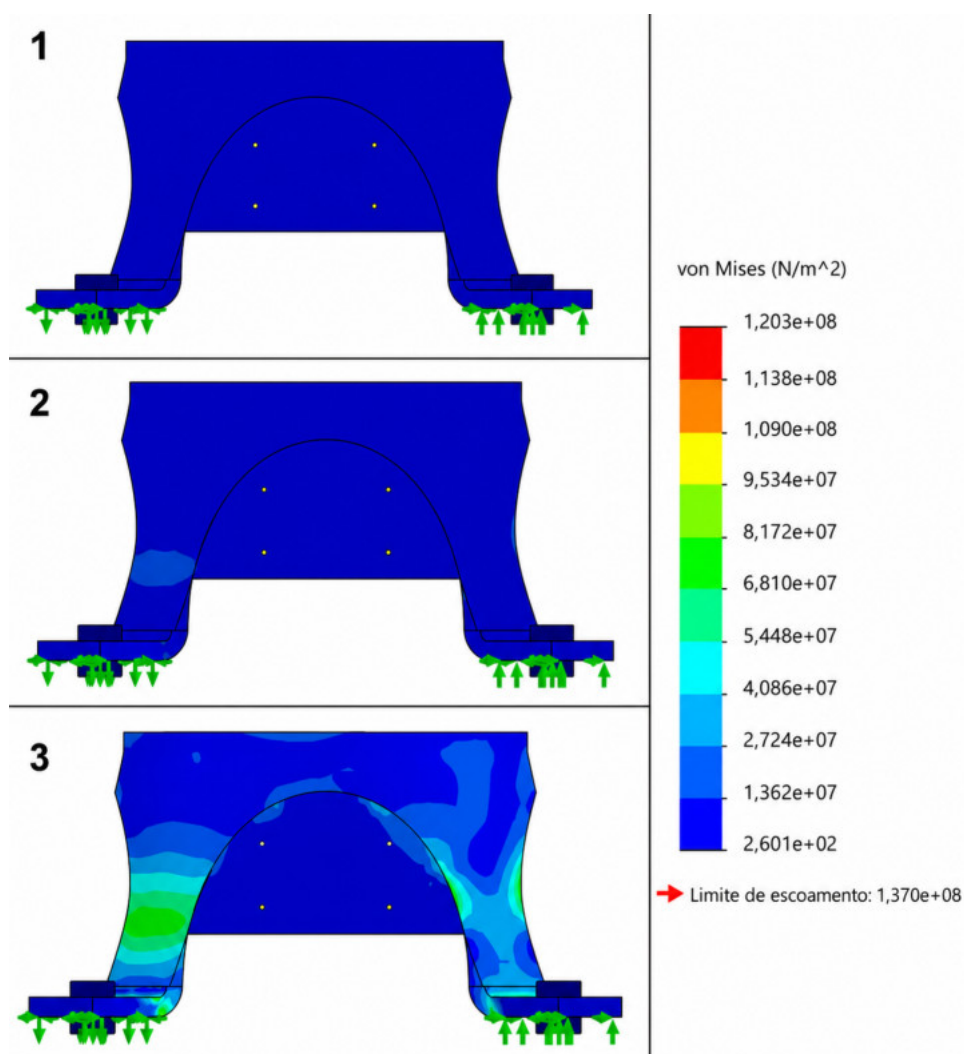
Apesar de o fator de segurança obtido no terceiro cenário ser relativamente baixo quando comparado aos demais cenários, é importante destacar que o valor de SCL adotado nas simulações foi fornecido pelo fabricante e já incorpora uma margem de conservadorismo em relação às condições reais de operação. Dessa forma, a solicitação considerada representa uma condição mais severa que aquela normalmente esperada em serviço, o que contribui para aumentar a confiabilidade da avaliação estrutural realizada. Assim, mesmo operando com menor reserva resistente nessa condição, a estrutura permanece abaixo do limite de escoamento do material e atende aos requisitos de resistência estabelecidos para o projeto.

4.4 Síntese dos Resultados

Após a análise individual dos cenários de carregamento, apresenta-se nesta seção uma comparação consolidada dos resultados obtidos nas simulações, permitindo avaliar de forma integrada a influência das diferentes condições de carregamento sobre o comportamento estrutural da base. Para essa finalidade, são comparados os campos de tensão equivalente de Von Mises, deslocamento resultante e deformação equivalente obtidos nos três cenários analisados.

A Figura 27 apresenta a comparação dos resultados em relação a tensão máxima de Von Mises. Observa-se que o aumento progressivo das solicitações aplicadas resultou em elevação significativa dos níveis de tensão na estrutura, reforçando que o Cenário 3 apresentou a condição mais crítica, com 120,3 MPa.

Figura 27 – Comparação das tensões de Von Mises

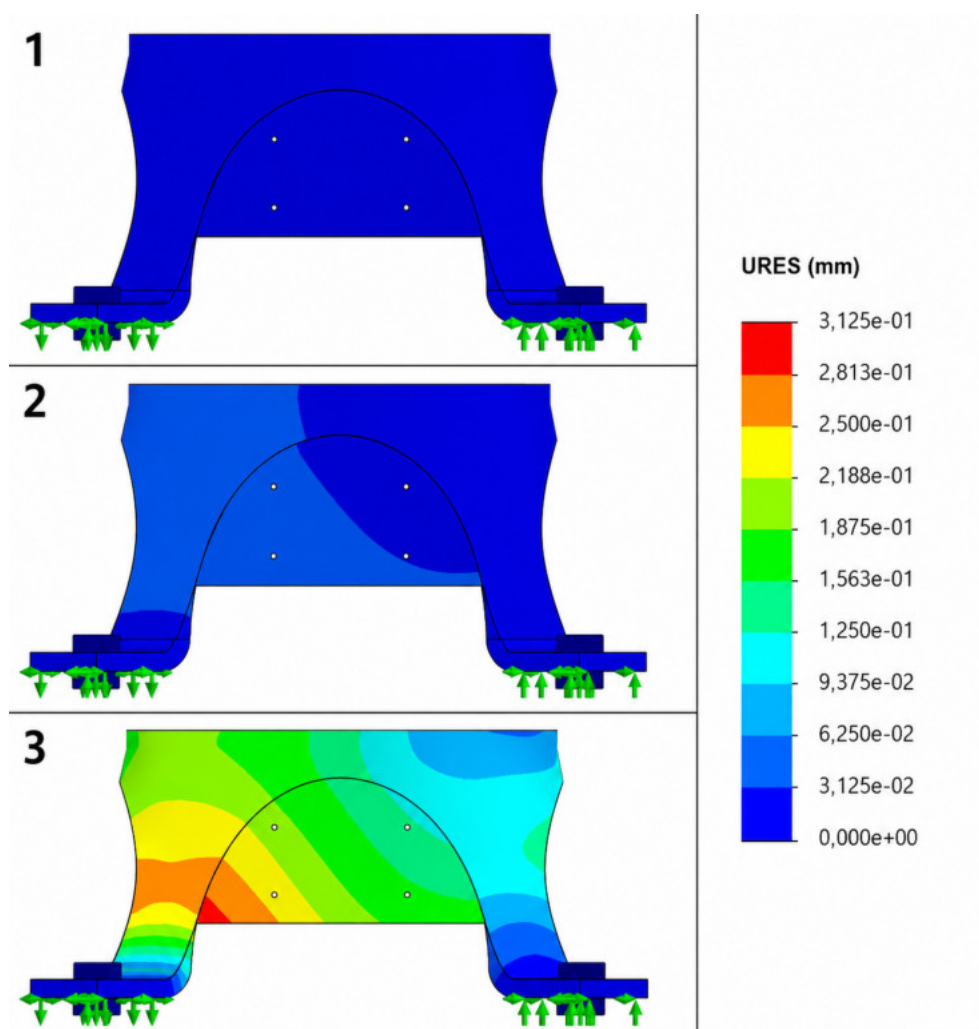


Fonte: Elaboração própria (2026).

A distribuição das tensões evidencia que os esforços de SCL exerce influência significativamente superior às demais solicitações consideradas, sendo responsáveis pelo carregamento crítico para o dimensionamento da estrutura. Ainda assim, em todos os cenários analisados as tensões permaneceram inferiores ao limite de escoamento do material, indicando comportamento estrutural adequado sob as condições avaliadas.

A comparação dos deslocamentos resultante está exposto na Figura 28. Os resultados mostram comportamento compatível com o aumento das cargas aplicadas, sendo o seu maior valor observado de 0,3125 mm.

Figura 28 – Comparação dos deslocamentos

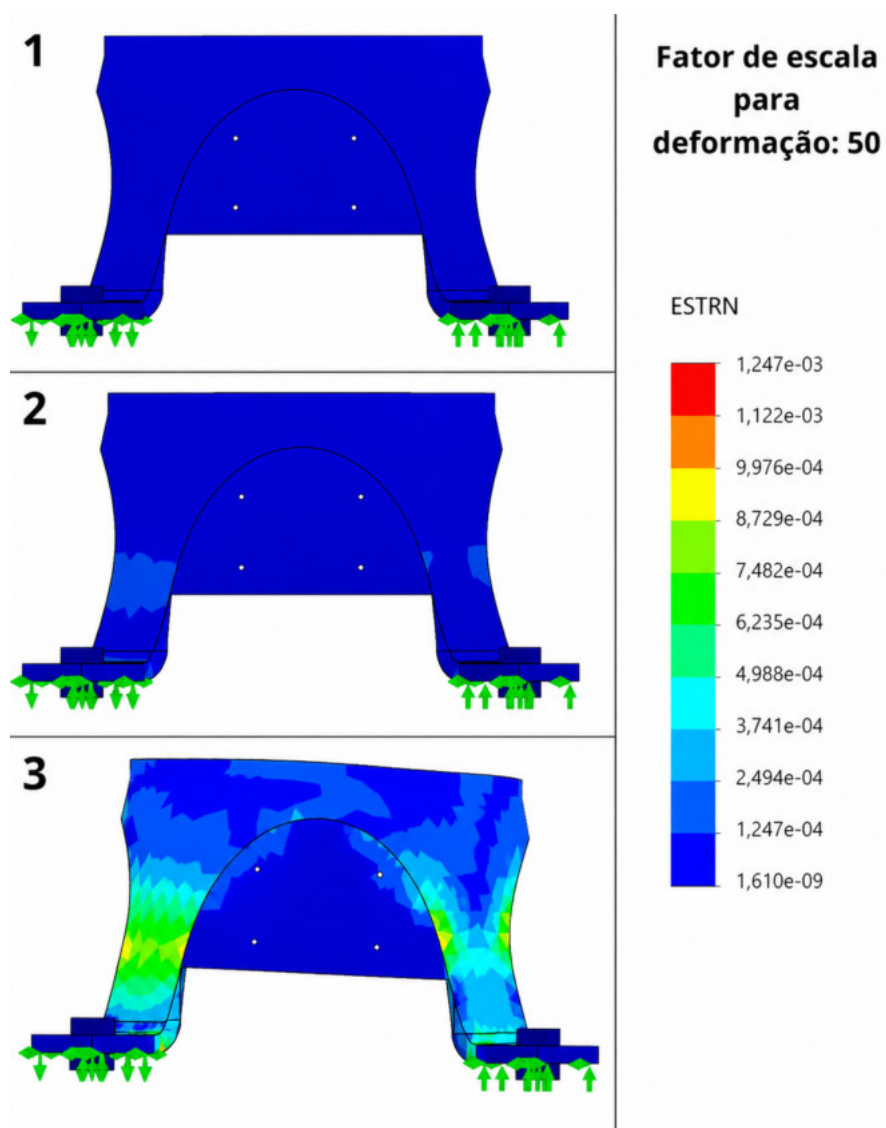


Fonte: Elaboração própria (2026).

Embora o deslocamento máximo obtido no Cenário 3 seja aproximadamente vinte vezes superior ao observado no Cenário 1, os valores absolutos permanecem reduzidos quando comparados às dimensões da estrutura, evidenciando elevada rigidez do conjunto mesmo sob condições severas de carregamento.

Por fim, a Figura 29 apresenta a comparação das deformações equivalentes obtidas nas simulações, que também aumentam com base no aumento das cargas aplicadas.

Figura 29 – Comparação das deformações



Fonte: Elaboração própria (2026).

Assim como observado para as tensões e deslocamentos, as maiores deformações ocorreram no Cenário 3, em decorrência da aplicação dos esforços de SCL. Entretanto, os níveis de deformação obtidos permanecem compatíveis com o regime elástico do material, corroborando os resultados da análise de tensões e dos fatores de segurança.

De maneira geral, a comparação entre os cenários demonstra que a estrutura proposta apresenta comportamento satisfatório frente às diferentes condições de carregamento consideradas. Os resultados indicam que os esforços de SCL representam a condição mais severa de operação. Consequentemente, o Cenário 3 configura o caso crítico para o dimensionamento da base, sendo responsável pelos maiores valores de tensão, deslocamento e deformação observados ao longo das análises realizadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou o desenvolvimento e a análise estrutural de uma base de suporte destinada à aplicação em transformadores de corrente ópticos em subestações de alta tensão, considerando o contexto de modernização do setor elétrico e a crescente adoção de tecnologias baseadas em comunicação digital e sensores ópticos.

A partir da modelagem tridimensional do conjunto e da aplicação do MEF, com o auxílio do *software SolidWorks*, foi possível avaliar o comportamento estrutural da solução proposta frente a diferentes cenários de carregamento representativos das condições reais de operação. Foram analisadas as solicitações decorrentes do peso próprio, da ação do vento e das cargas associadas a esforços SCL, permitindo uma visão abrangente do desempenho mecânico da estrutura.

Os resultados obtidos demonstraram que a estrutura proposta apresentou comportamento mecânico satisfatório em todos os cenários analisados. As tensões equivalentes de Von Mises permaneceram inferiores ao limite de escoamento do material adotado, indicando que a base opera integralmente no regime elástico sob as condições de carregamento avaliadas. Da mesma forma, os deslocamentos e deformações observados mantiveram-se dentro de níveis compatíveis com a aplicação pretendida, evidenciando adequada rigidez estrutural do conjunto.

Entre os casos estudados, verificou-se que os esforços de SCL constituem a condição mais crítica para o dimensionamento da estrutura, sendo responsáveis pelos maiores níveis de tensão, deslocamento e deformação. Ainda assim, a análise do fator de segurança indicou que a base mantém capacidade resistente suficiente para suportar essa condição. Ressalta-se ainda que o valor de SCL adotado foi fornecido pelo fabricante e incorpora uma margem conservadora em relação às condições reais de operação, conferindo maior robustez aos resultados obtidos e aumentando a confiabilidade da solução proposta.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se a realização de análises complementares, tais como estudos dinâmicos mais aprofundados, avaliação de fadiga estrutural e investigação de diferentes configurações geométricas ou materiais, visando à otimização do desempenho da estrutura.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. **NORMA IEC 61850 – NOVO PADRÃO EM AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES**. 2011. 20

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123:2023: Forças devidas ao vento em edificações*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2023. 36

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 10. ed. [S.I.]: McGraw-Hill Education - New York, 2015. 60-65 e 106-114 p. 30

COMMISSION, I. E. **IEC 60168: Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1 000 V**. [S.I.], 2006. 25

DELGADO, R. dos S. **Interação entre transformadores de corrente de alta tensão e manobras do sistema**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2018. 13, 15

DUALIBE, P. **Subestações: tipos, equipamentos e proteção**. 1999. 20

DUTRA, C. A. *et al.* **Transformadores de corrente ópticos e sua implementação em subestações de energia elétrica baseadas na norma IEC 61850**. SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2023. Disponível em: <https://sendi.org.br/sendi2023/search-technical-jobs/trabalhosfull/1749%20%20Transformadores%20de%20corrente%20%C3%B3pticos%20e%20sua%20implementa%C3%A7%C3%A3o%20em%20subesta%C3%A7%C3%B5es%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20baseadas%20na%20norma%20IEC%2061850.pdf>. 15, 16, 19, 21, 22

ELECTRIC, T. *Electrical insulators*. 2025. Disponível em: <https://www.sytroncoelectric.com/product-list/electrical-insulators>. Acesso em: 2 jan. 2026. 38

EPRI, E. P. R. I. **EPRI – Insulator Reference Book The Violet Book**. [S.I.]: EPRI - Palo Alto, 2021. 40

FREITAS, C. D. de. **PLATAFORMA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM IEDS FÍSICOS E VIRTUAIS PADRÃO IEC 61850 ORIENTADA À APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2022. 21

GONCALVES, R. M. **Guia de projeto para subestações de alta tensão**. Universidade de São Paulo, 2012. 13

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. [S.I.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 14

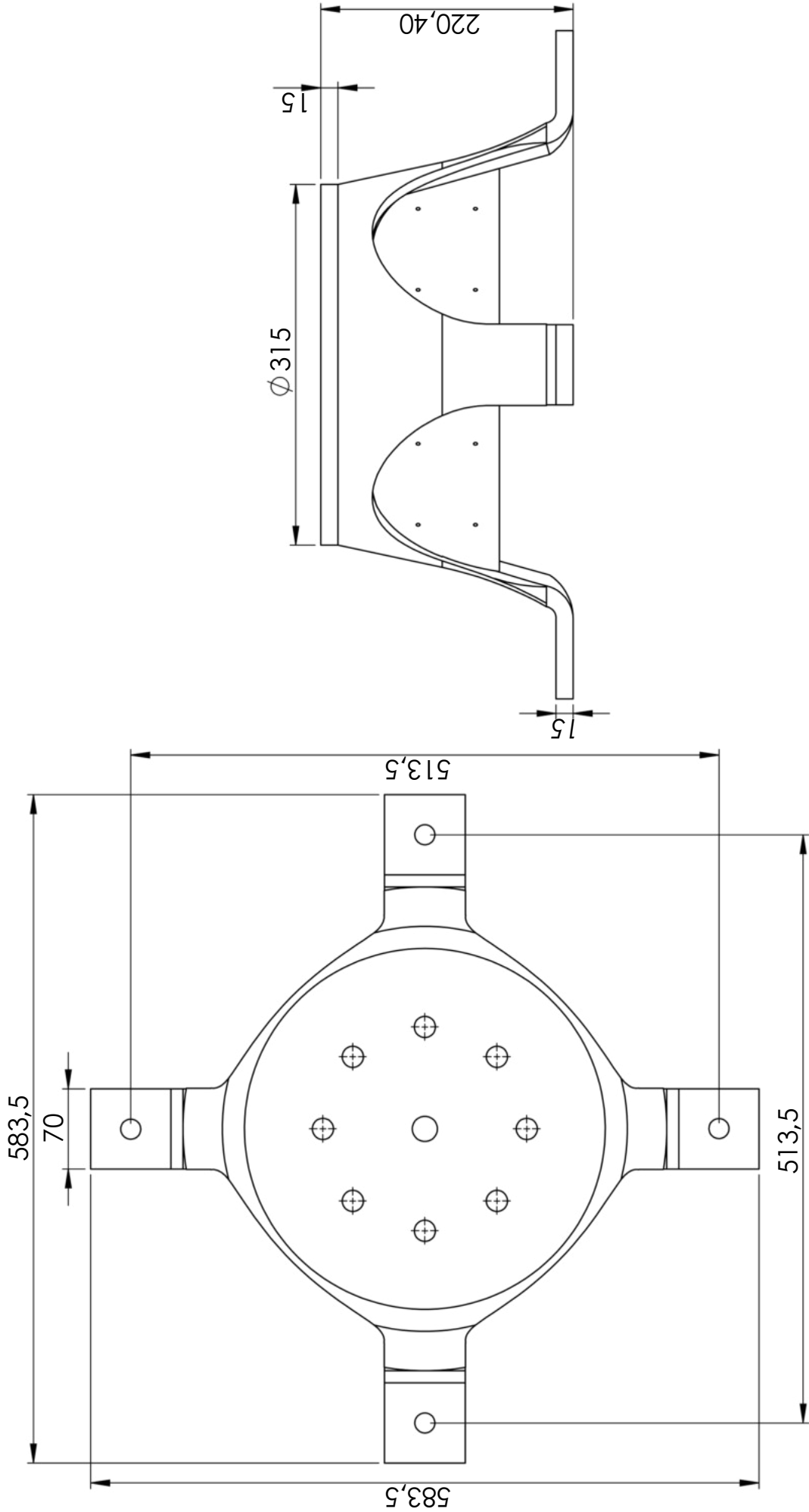
KOKOTTE, G. H.; MEYER, J. F. **ESTUDO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE ÓPTICOS E SEU PANORAMA NO PARANÁ**. 2016. 10, 17, 19

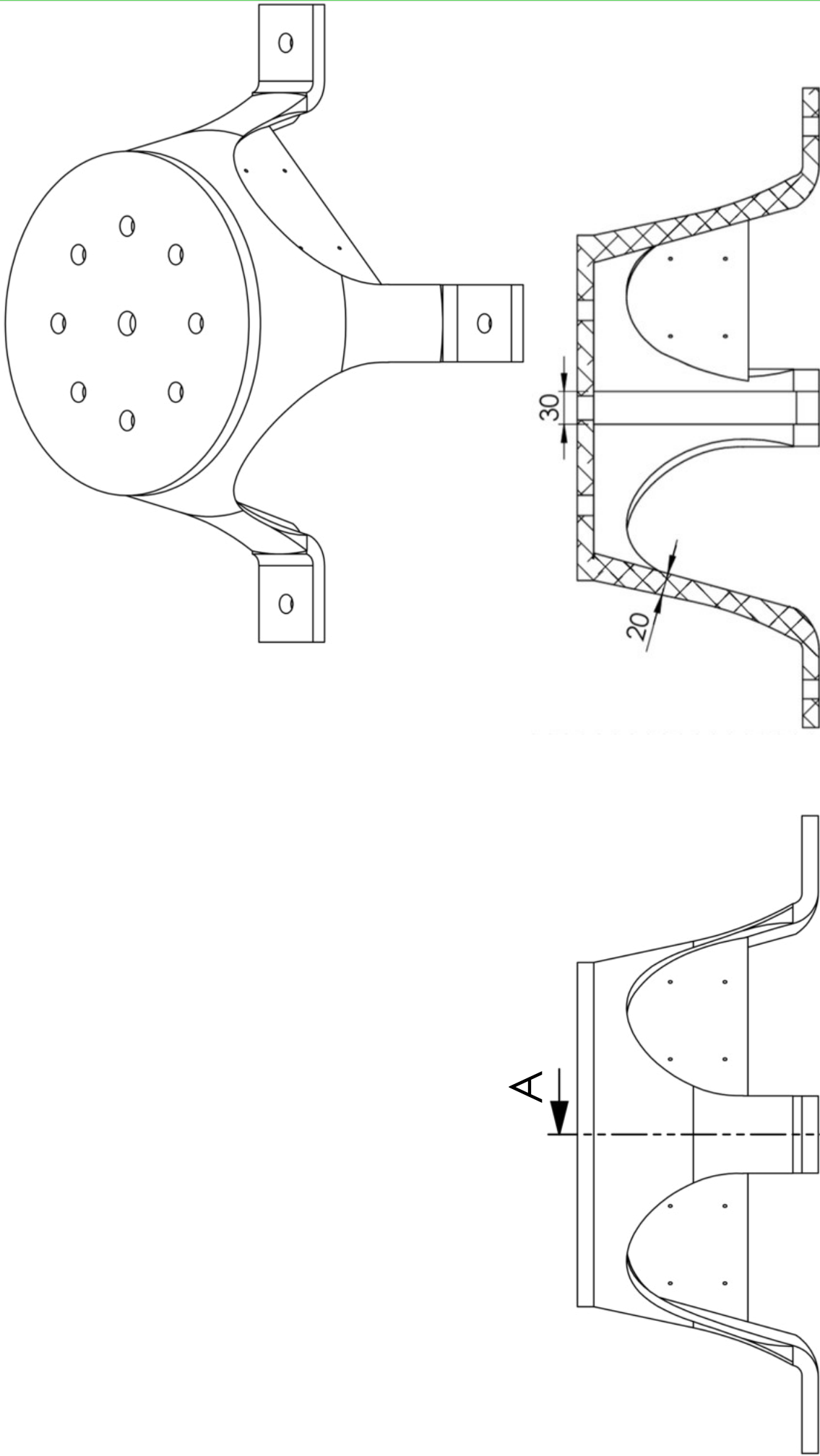
KUCUKSARI, S. **DEVELOPMENT OF MODELS FOR OPTICAL INSTRUMENT TRANSFORMERS**. Dissertação (Mestrado) — Arizona State University, 2010. 15

- KUMARI, S. **A comprehensive study of magneto-optic materials and its applications**. Materialstoday Proceedings, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321080615>. 15
- LIMA, D. K. **Transformadores para instrumentação ópticos: aspectos de viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001756666>. 17, 18, 19
- LOTTI, R. S. *et al.* Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/dpress/a/6WCw3yW7WhXWnRYJRGtYzPq/?format=pdf&lang=pt>. 26
- OLIVEIRA, P. C. de. **Análise dos Perfis de Transformadores de corrente para Medição**. Dissertação (Mestrado) — PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2001. 10
- POWEROPTICKS. *Inovação em Medição Óptica para o Setor Elétrico*. 2025. Disponível em: <https://poweropticks.com>. Acesso em: 4 dez. 2025. 23
- RIBEIRO, R. R. R. **Estudo da Norma IEC 61850**. 2010. 20
- RODRIGUES, J. M. **ESTUDO TUTORIAL DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**. 2013. 14
- SANTANA, G. C. S. de. **ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO DE FUNDAÇÕES PARA EQUIPAMENTOS DE PÁTIO: SUBESTAÇÃO ELÉTRICA 500kV**. CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS -DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, 2023. 24, 25
- SOLIDWORKS. *Fundamentos do SOLIDWORKS Simulation*. 2022. Disponível em: https://help.solidworks.com/2022/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_SOLIDWORKS_Simulation_Fundamentals.htm?id=31.4. Acesso em: 17 abr. 2026. 26
- YOUNG, W. C.; BUDYNAS, R. G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. 7. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education - New York, 2002. 104-110 p. 30

APÊNDICES

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DIMENSIONAL DA ESTRUTURA PROPOSTA





SEÇÃO A-A
ESCALA 1 : 5

APÊNDICE B – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO - CENÁRIO 1



Descrição

Simulação com base no cenário 1, que corresponde ao carregamento do peso dos equipamentos sobre a base.

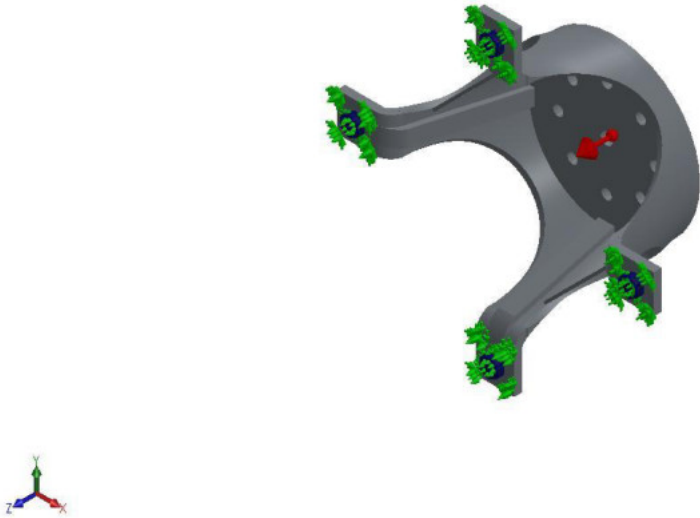
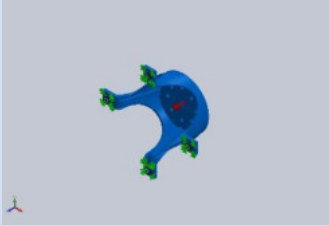
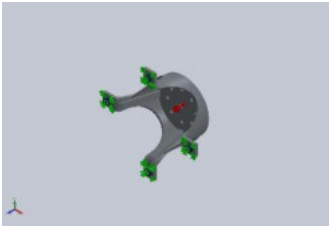
Simulação de Base

Projetista: Yasmin da Mata Georgetti Silva
Nome do estudo: Cenário 1
Tipo de análise: Análise estática

Sumário

Descrição	1
Informações do modelo	2
Propriedades do estudo	3
Unidades	3
Propriedades do material	4
Acessórios de fixação e Cargas	5
Definições de conector	7
Informações de malha	9
Detalhes do sensor	9
Forças resultantes	10
Resultados do estudo	11

Informações do modelo

 Nome do modelo: Base Configuração atual: Valor predeterminado		
Corpos sólidos		
Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas
Corte-extrusão11 	Corpo sólido	Massa:7,78533 kg Volume:0,00290442 m ³ Densidade:2.680,51 kg/m ³ Peso:76,2963 N
Ressalto-extrusão23[2] 	Corpo sólido	Massa:0,154035 kg Volume:5,74757e-05 m ³ Densidade:2.680 kg/m ³ Peso:1,50954 N

Propriedades do estudo

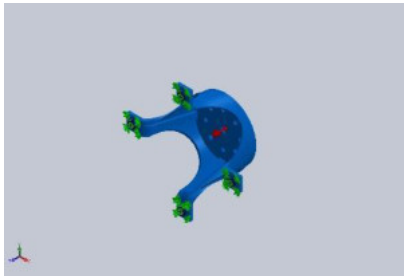
Nome do estudo	Cenario1
Tipo de análise	Análise estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeito térmico:	Ativada
Opção térmica	Incluir cargas de temperatura
Temperatura de deformação zero	298 Kelvin
Inclui efeitos da pressão de fluidos do SOLIDWORKS Flow Simulation	Desativada
Tipo de Solver	Automático
Efeito no plano:	Desativada
Mola suave:	Desativada
Atenuação inercial:	Desativada
Opções de união incompatíveis	Automático
Grande deslocamento	Desativada
Calcular forças de corpo livre	Ativada
Atrito	Desativada
Usar método adaptável:	Desativada

Unidades

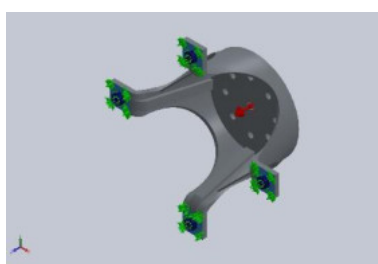
Sistema de unidades:	SI (MKS)
Comprimento/Deslocamento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/s
Pressão/Tensão	N/m ²



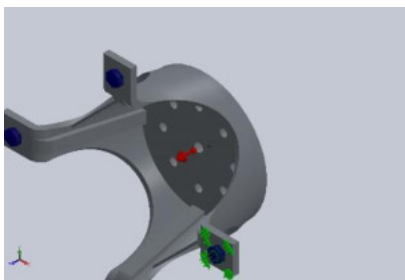
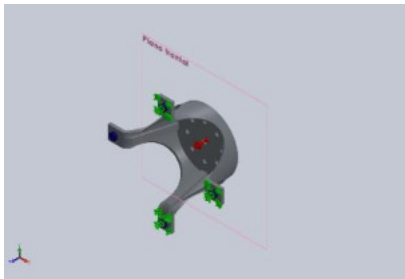
Propriedades do material

Referência do modelo	Propriedades
	Nome: SAE323 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Desconhecido Limite de escoamento: $1,37 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Resistência à tração: $1,96 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coefficiente de Poisson: 0,33 Massa específica: 2.680 kg/m^3 Módulo de cisalhamento: $2,7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coefficiente de expansão térmica: $2,3 \times 10^{-5} / \text{Kelvin}$
	Dados da curva:N/A

Acessórios de fixação e Cargas

Nome do acessório de fixação	Imagem de acessório de fixação	Detalhes de acessório de fixação		
Em faces planas-1		Entidades: 4 face(s) Tipo: Em faces planas Translação: 0; 0; 0 Unidades: mm		
Forças resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Força de reação(N)	0,224556	0,110867	-2.010,45	2.010,45
Momento de reação(N.m)	0	0	0	0



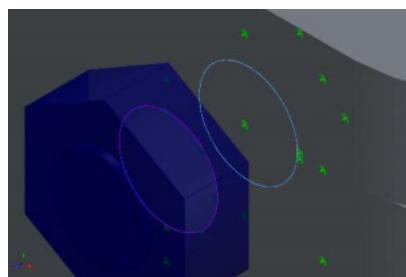
Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Massa distribuída-1		Entidades: 1 face(s) Tipo: Deslocamento (transferência direta) Sistema de coordenadas: Coordenadas cartesianas globais Translação: ---; ---; --- Valores: mm Rotação: ---; ---; --- Valores: deg Coordenadas de referência: 0 0 0 mm Massa remota: 197 kg Momento de inércia: kg.m² Componentes transferidos: NA
Gravidade-1		Referência: Plano frontal Valores: 0 0 9,81 Unidades: m/s²

Definições de conector

Conector de pino/parafuso/rolamento

Referência do modelo	Detalhes de conector	Detalhes de resistência
----------------------	----------------------	-------------------------





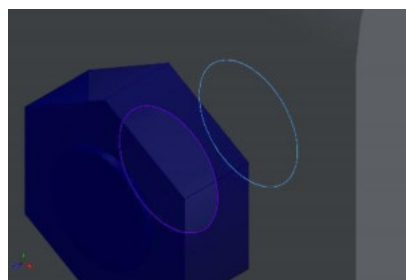
Com rebaixo com porca-1

Entidades: 2 borda(s)
Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
Tipo de conexão: Distribuído
Diâmetro da cabeça: 30 mm
Diâmetro da porca: 30 mm
Diâmetro de haste nominal: 18 mm
Nome do material: Liga de aço
Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson: 0,28
Pré-carregamento (Torque): 0 N.m
Fator de atrito (K): 0,2
Ajuste apertado: Não

Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	19,425	0,097435	0	19,425
Momento de curvatura (N.m)	-0,00062271	0,1295	0	0,1295



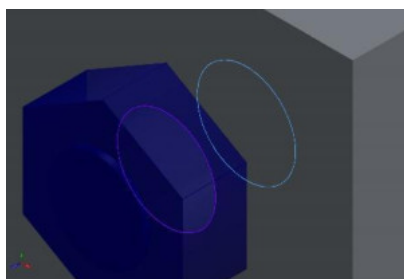
Com rebaixo com porca-2

Entidades: 2 borda(s)
Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
Tipo de conexão: Distribuído
Diâmetro da cabeça: 30 mm
Diâmetro da porca: 30 mm
Diâmetro de haste nominal: 18 mm
Nome do material: Liga de aço
Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson: 0,28
Pré-carregamento (Torque): 0 N.m
Fator de atrito (K): 0,2
Ajuste apertado: Não

Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	0,059611	19,402	0	19,402
Momento de curvatura (N.m)	-0,12923	0,00063368	0	0,12923



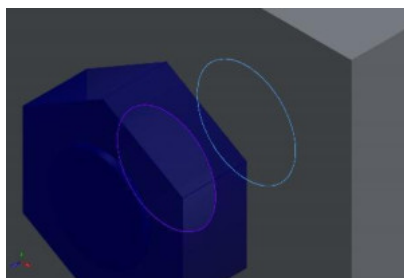
Com rebaixo com porca-3

Entidades: 2 borda(s)
Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
Tipo de conexão: Distribuído
Diâmetro da cabeça: 30 mm
Diâmetro da porca: 30 mm
Diâmetro de haste nominal: 18 mm
Nome do material: Liga de aço
Módulo de Young: 2,1e+11 N/m²
Coefficiente de Poisson: 0,28
Pré-carregamento (Torque): 0 N.m
Fator de atrito (K): 0,2
Ajuste apertado: Não

Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-18,977	-0,034307	0	18,977
Momento de curvatura (N.m)	0,00022572	-0,12657	0	0,12657



Com rebaixo com porca-4

Entidades: 2 borda(s)
Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
Tipo de conexão: Distribuído
Diâmetro da cabeça: 30 mm
Diâmetro da porca: 30 mm
Diâmetro de haste nominal: 18 mm

Sem dados

Nome do material:	Liga de aço
Módulo de Young:	2,1e+11 N/m ²
Coeficiente de Poisson:	0,28
Pré-carregamento (Torque):	0 N.m
Fator de atrito (K):	0,2
Ajuste apertado:	Não

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-0,28315	-19,354	0	19,356
Momento de curvatura (N.m)	0,12868	-0,0018205	0	0,1287

Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	14,8018 mm
Tamanho de elemento mínimo	2,96035 mm
Qualidade da malha	Alta

Informações de malha - Detalhes

Total de nós	28778
Total de elementos	15005
Proporção máxima	159,79
% de elementos com Proporção < 3	93,8
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	1,13
Porcentagem de elementos distorcidos	0



Forças resultantes

Forças de reação

Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	0,224556	0,110867	-2.010,45	2.010,45

Momentos de reação

Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	0

Forças de corpo livre

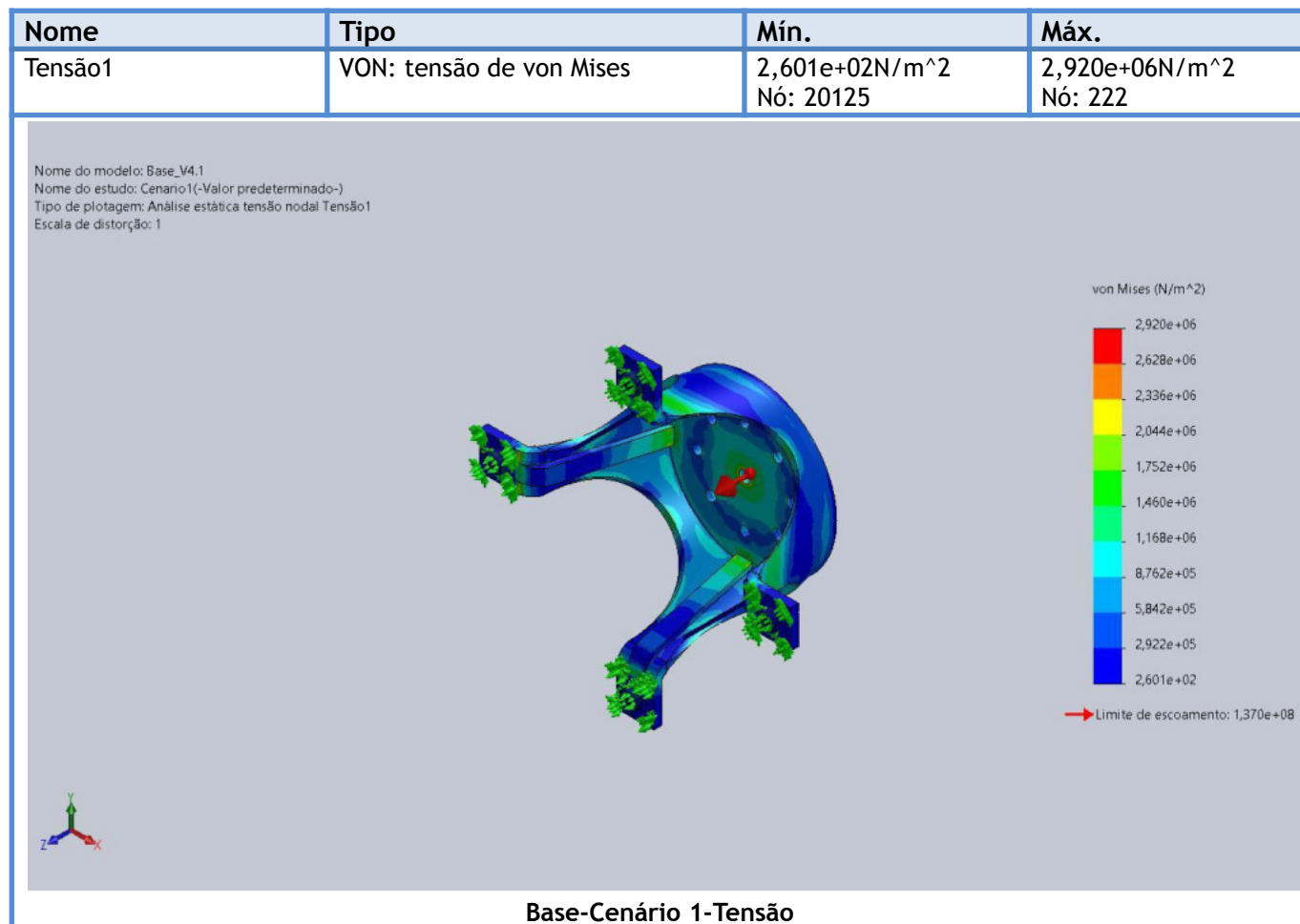
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	-4,54187e-05	0,000121117	-55,5511	55,5511

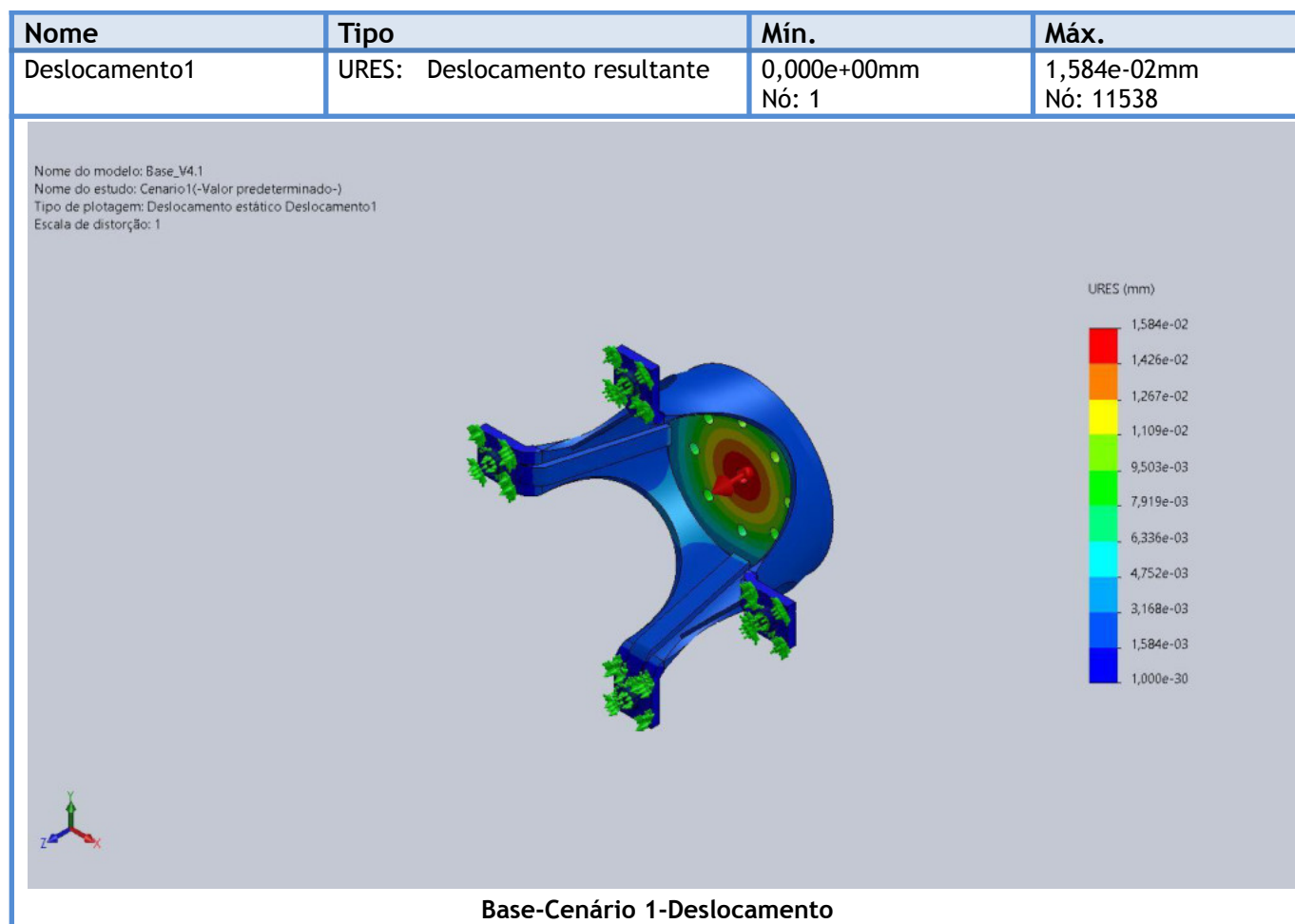
Momentos de corpo livre

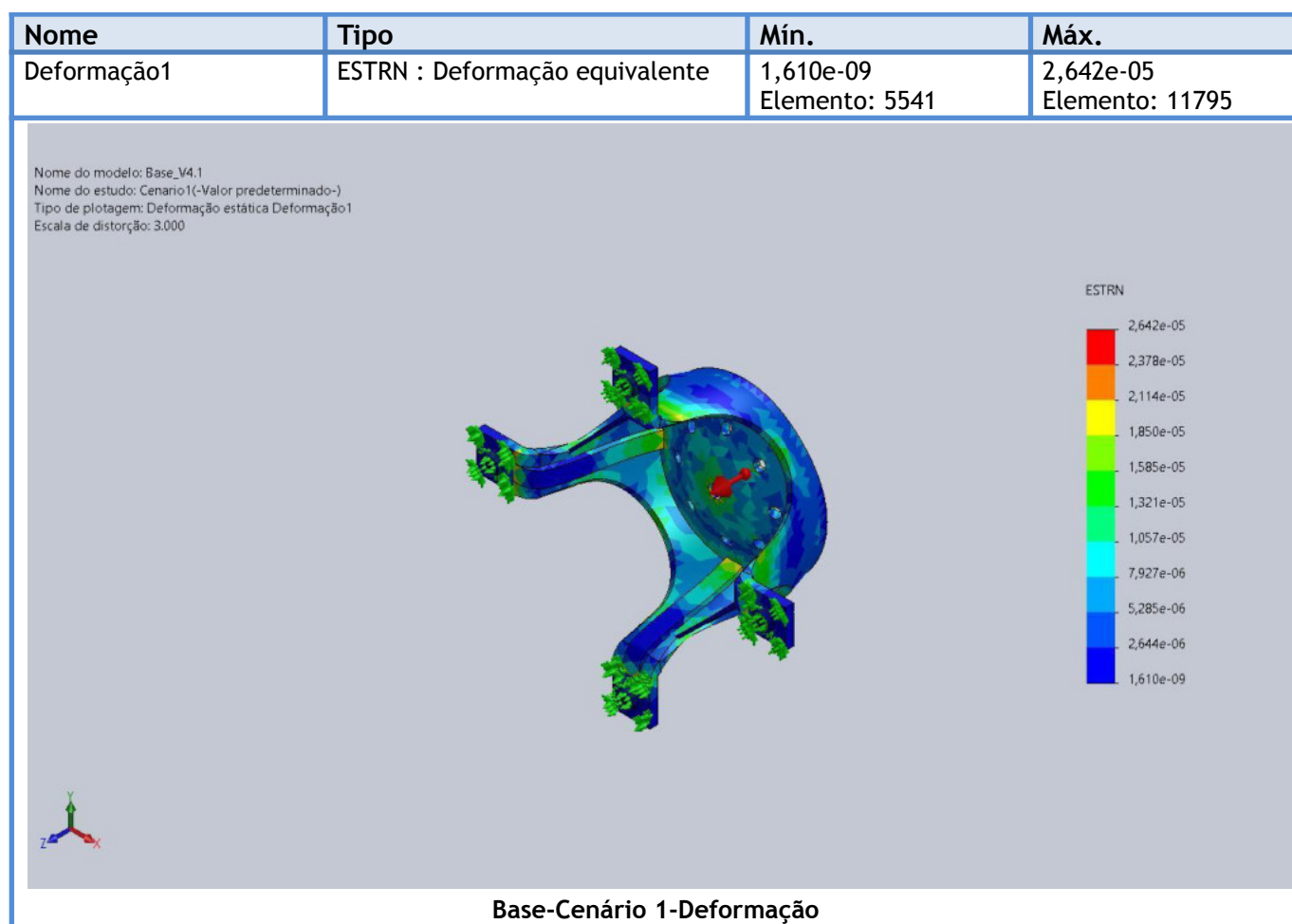
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	1e-33

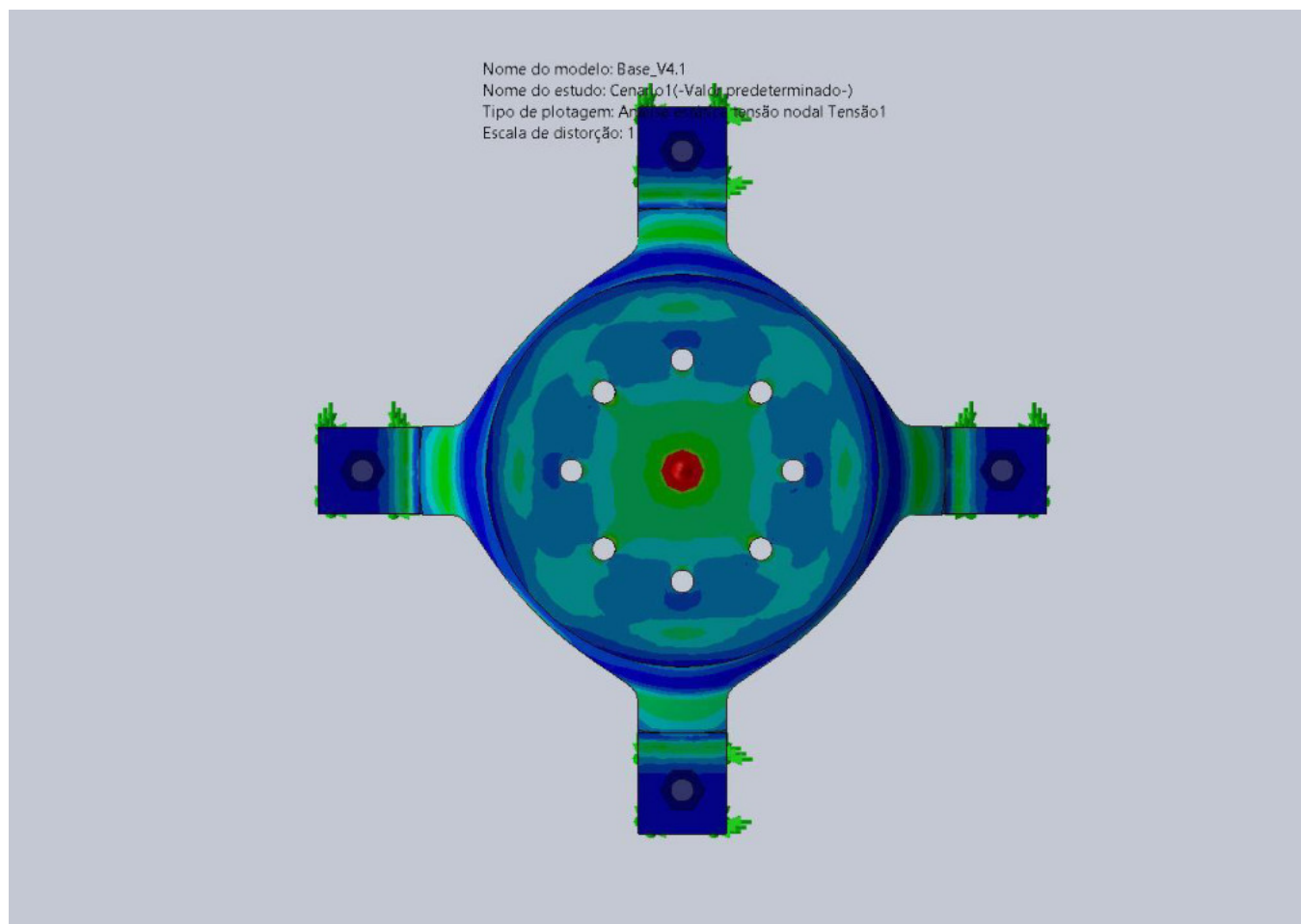


Resultados do estudo



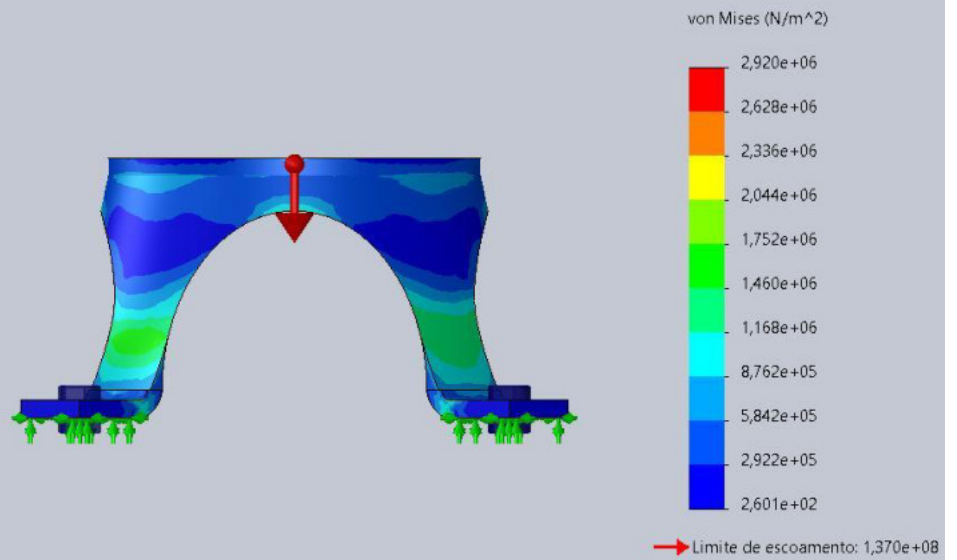






Vista superior_Von Mises

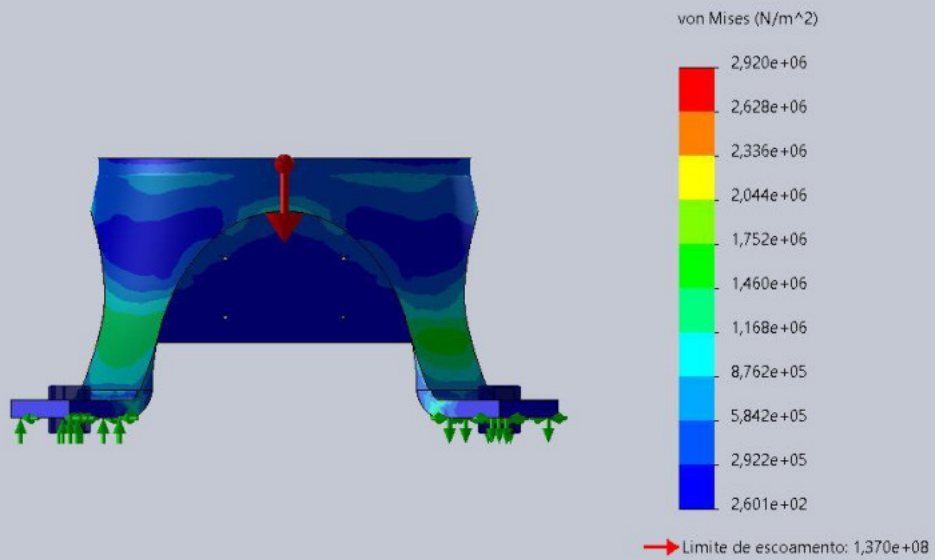
Nome do modelo: Base_V4.1
Nome do estudo: Cenário1(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 1



Vista frontal_Von Mises



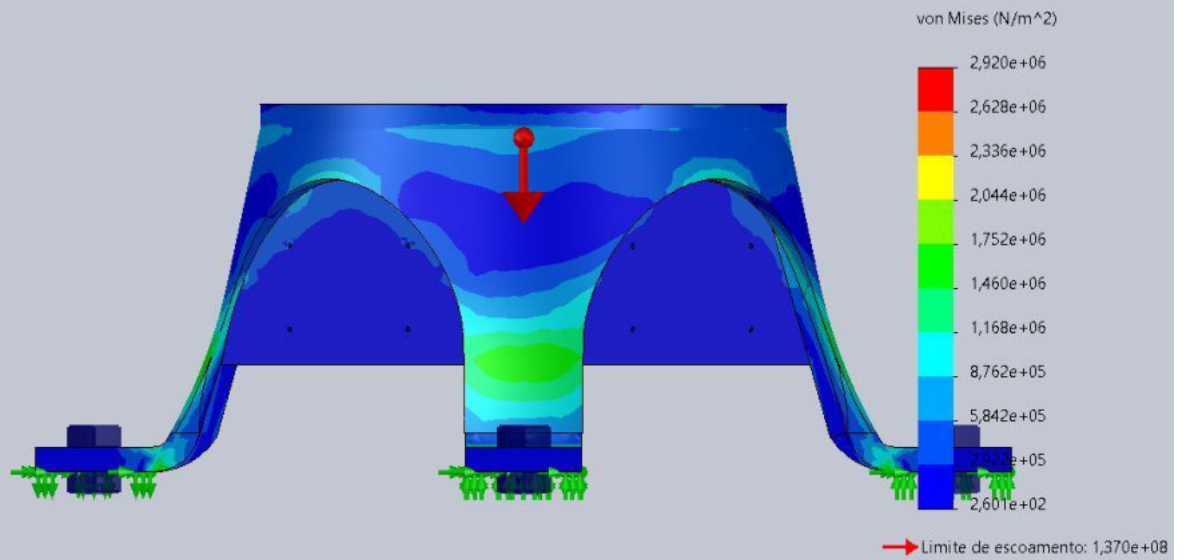
Nome do modelo: Base_V4.1
Nome do estudo: Cenário1(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 1



Vista direita_Von Mises

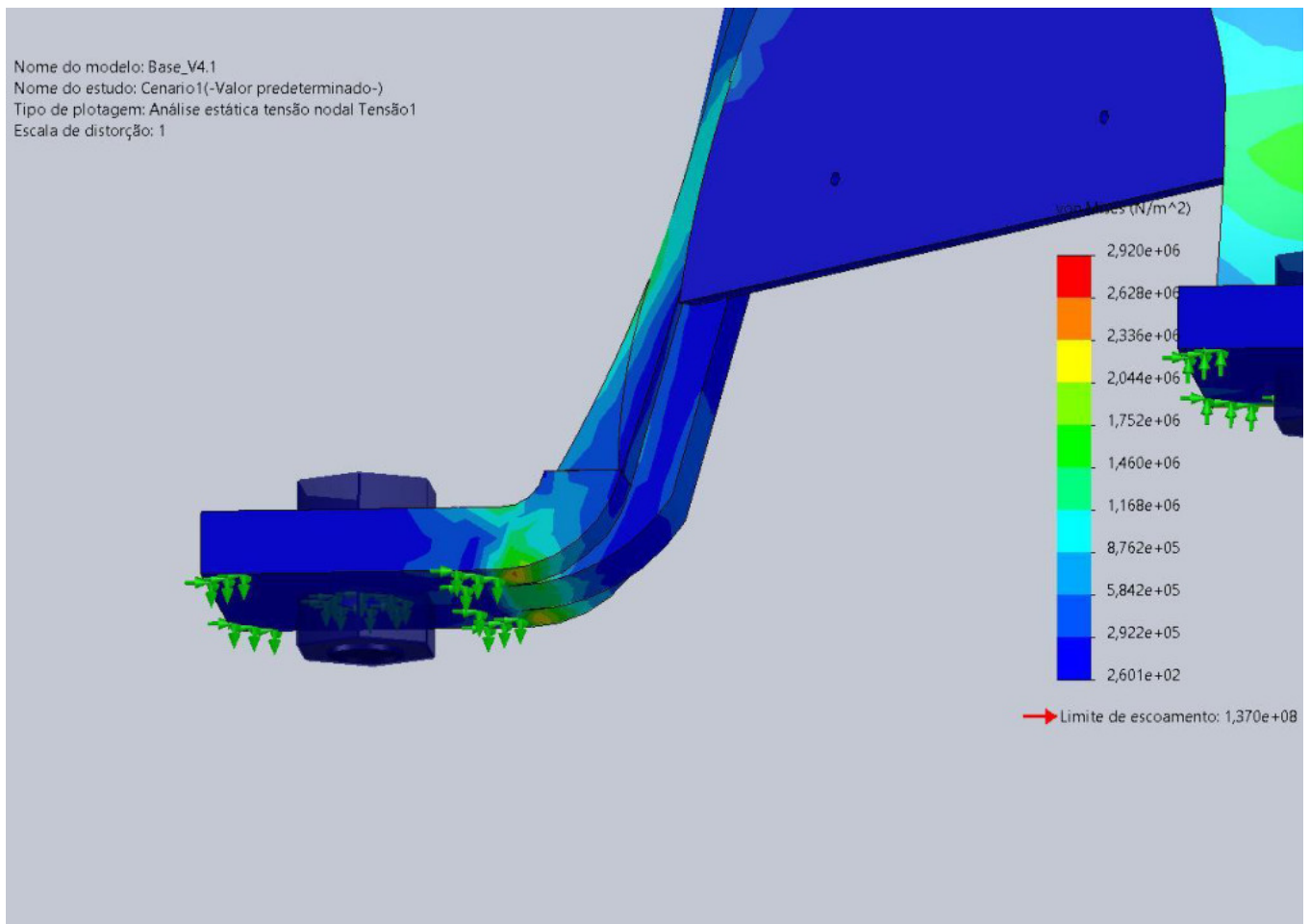


Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenário1(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 1



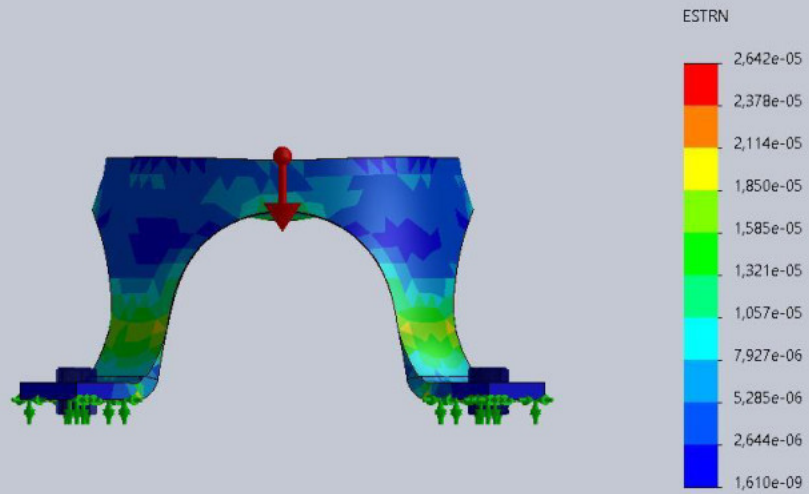
Vista lateral_Von Mises





Vista lateral_Von Mises_Zoom

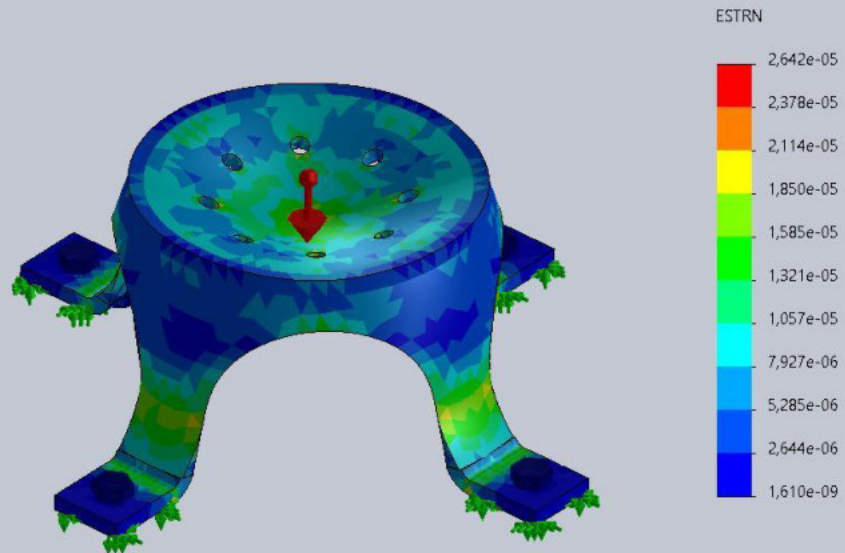
Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenário1(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 3.000



Vista frontal_Deformação



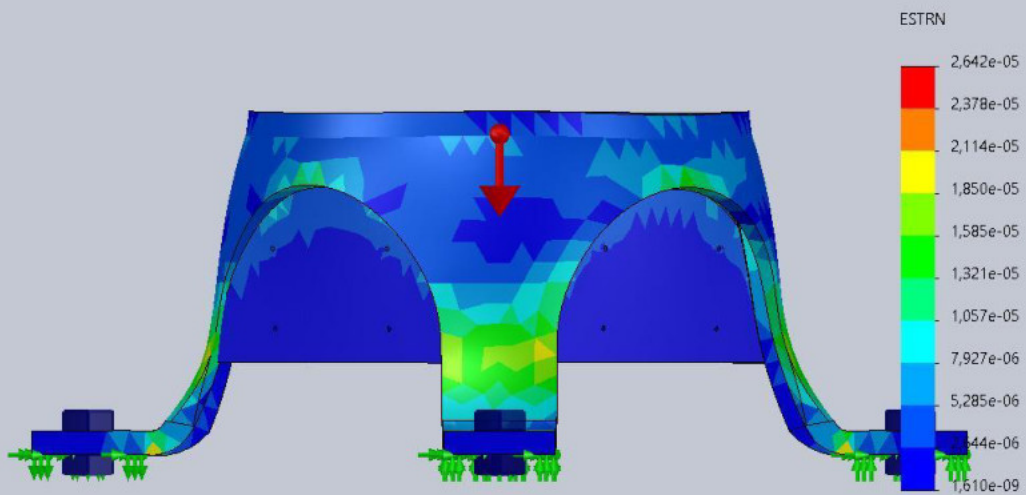
Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenário1(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 3.000



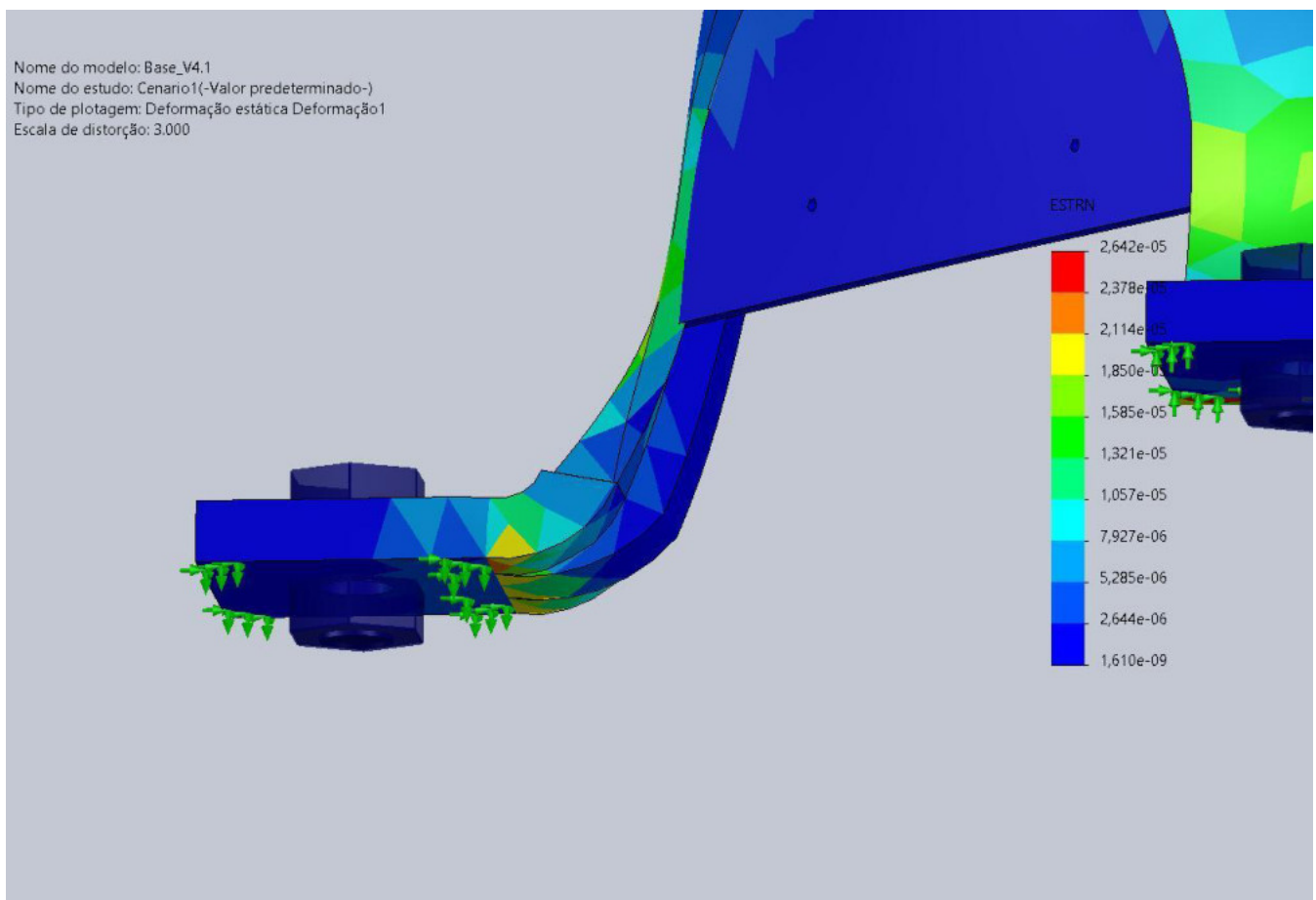
Vista isometrica_Deformação



Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenario1(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 3.000



Vista lateral_Deformação



Vista lateral_Deformação_Zoom

APÊNDICE C – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO - CENÁRIO 2



Descrição

Simulação com base no cenário 2, que corresponde ao carregamento do peso dos equipamentos sobre a base e o carregamento do vento.

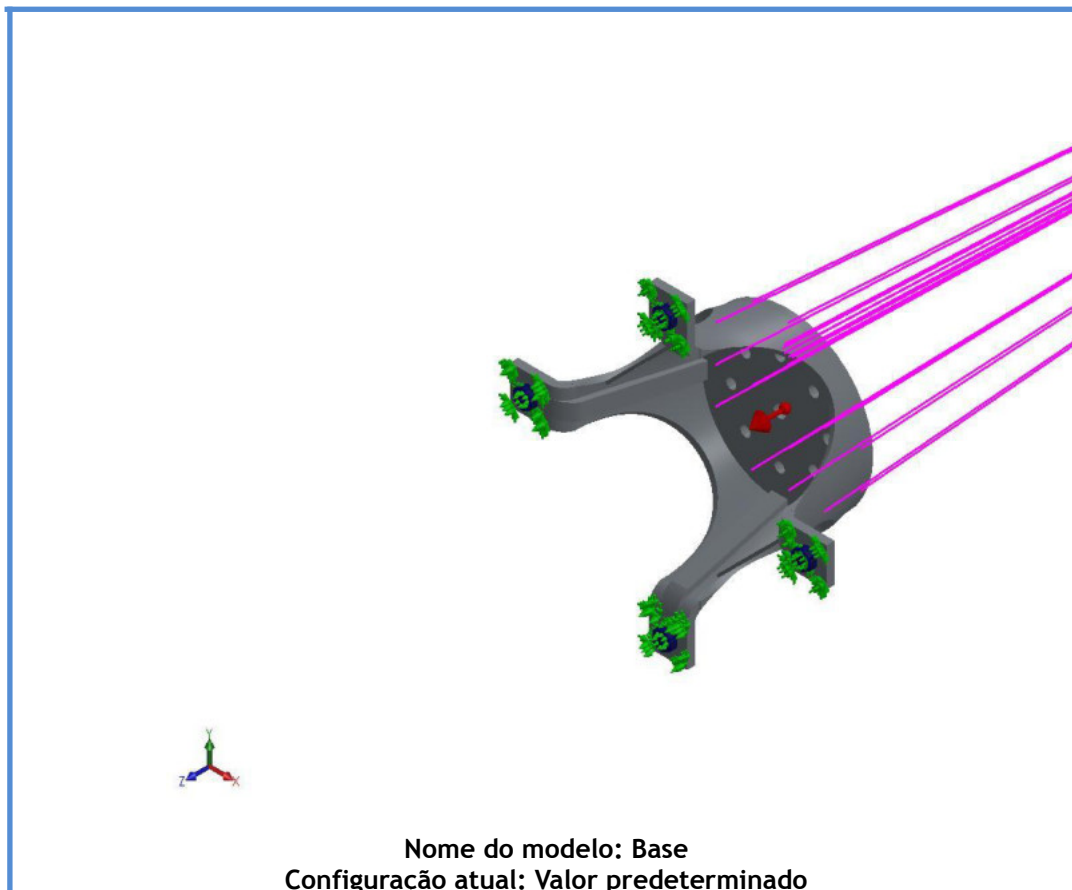
Simulação de Base

Projetista: Yasmin da Mata Georgetti Silva
Nome do estudo: Cenário 2
Tipo de análise: Análise estática

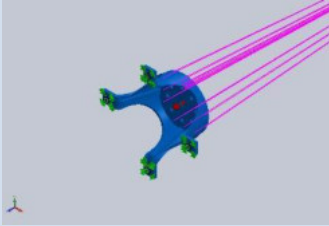
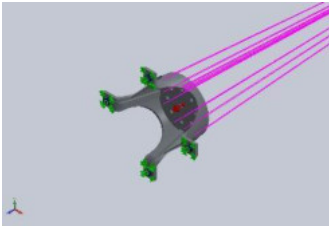
Sumário

Descrição	1
Informações do modelo	2
Propriedades do estudo	3
Unidades	3
Propriedades do material	4
Acessórios de fixação e Cargas	5
Definições de conector	7
Informações de malha	9
Detalhes do sensor	9
Forças resultantes	10
Resultados do estudo	11

Informações do modelo



Corpos sólidos

Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas
Corte-extrusão11 	Corpo sólido	Massa:7,78533 kg Volume:0,00290442 m ³ Densidade:2.680,51 kg/m ³ Peso:76,2963 N
Ressalto-extrusão23[2] 	Corpo sólido	Massa:0,154035 kg Volume:5,74757e-05 m ³ Densidade:2.680 kg/m ³ Peso:1,50954 N

Propriedades do estudo

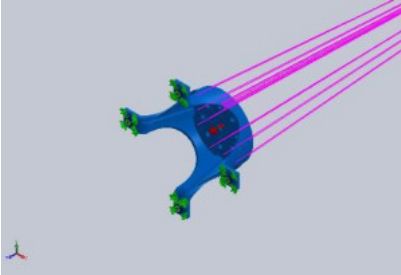
Nome do estudo	Cenario2_Menor
Tipo de análise	Análise estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeito térmico:	Ativada
Opção térmica	Incluir cargas de temperatura
Temperatura de deformação zero	298 Kelvin
Inclui efeitos da pressão de fluidos do SOLIDWORKS Flow Simulation	Desativada
Tipo de Solver	Automático
Efeito no plano:	Desativada
Mola suave:	Desativada
Atenuação inercial:	Desativada
Opções de união incompatíveis	Automático
Grande deslocamento	Desativada
Calcular forças de corpo livre	Ativada
Atrito	Desativada
Usar método adaptável:	Desativada

Unidades

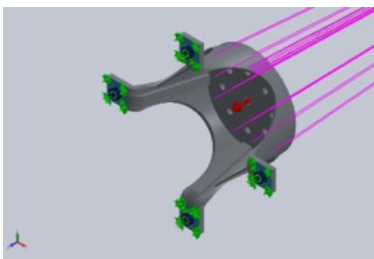
Sistema de unidades:	SI (MKS)
Comprimento/Deslocamento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/s
Pressão/Tensão	N/m ²



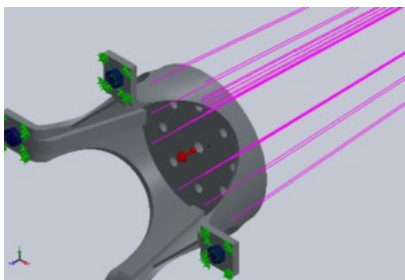
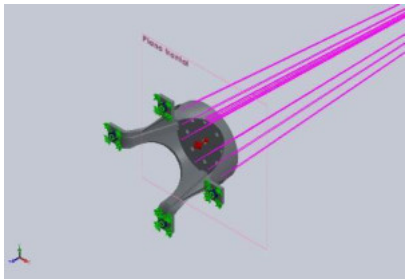
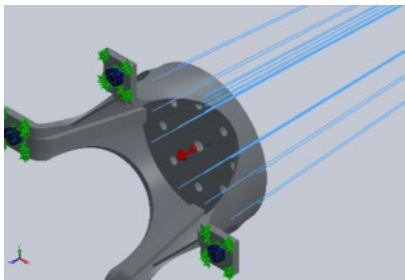
Propriedades do material

Referência do modelo	Propriedades
	Nome: SAE323 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Desconhecido Limite de escoamento: $1,37 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Resistência à tração: $1,96 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0,33 Massa específica: 2.680 kg/m^3 Módulo de cisalhamento: $2,7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de expansão térmica: $2,3 \times 10^{-5} / \text{Kelvin}$
	Dados da curva: N/A

Acessórios de fixação e Cargas

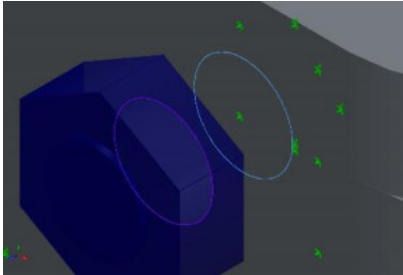
Nome do acessório de fixação	Imagem de acessório de fixação	Detalhes de acessório de fixação		
Em faces planas-1		Entidades: 4 face(s) Tipo: Em faces planas Translação: 0; 0; 0 Unidades: mm		
Forças resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Força de reação(N)	-1.397,41	2,88482	-2.022,45	2.458,27
Momento de reação(N.m)	0	0	0	0



Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Massa distribuída-1		Entidades: 1 face(s) Tipo: Deslocamento (transferência direta) Sistema de coordenadas: Coordenadas cartesianas globais Translação: ---; ---; --- Valores: mm Rotação: ---; ---; --- Valores: deg Coordenadas de referência: 0 0 0 mm Massa remota: 197 kg Momento de inércia: kg.m² Componentes transferidos: NA
Gravidade-1		Referência: Plano frontal Valores: 0 0 9,81 Unidades: m/s²
Carga remota (conexão distribuída)-1		Entidades: 1 face(s) Tipo de conexão: Distribuído Fator de pesagem: Padrão (Constante) Sistema de coordenadas: Coordenadas cartesianas globais Componentes de translação: 1.964,14 N;---;--- Componentes de rotação: ---;---;--- Coordenadas de referência: 0 0 -2.350 mm

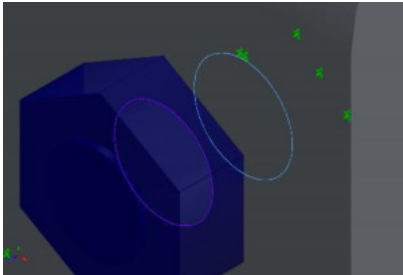
Definições de conector

Conector de pino/parafuso/rolamento

Referência do modelo	Detalhes de conector	Detalhes de resistência
 Com rebaixo com porca-1	Entidades: 2 borda(s) Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo) Tipo de conexão: Distribuído Diâmetro da cabeça: 30 mm Diâmetro da porca: 30 mm Diâmetro de haste nominal: 18 mm Nome do material: Liga de aço Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0,28 Pré-carregamento (Torque): 0 N.m Fator de atrito (K): 0,2 Ajuste apertado: Não	Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-11,998	11,998
Força de cisalhamento (N)	-232,47	0,077206	0	232,47
Momento de curvatura (N.m)	-0,0006884	-1,5412	0	1,5412

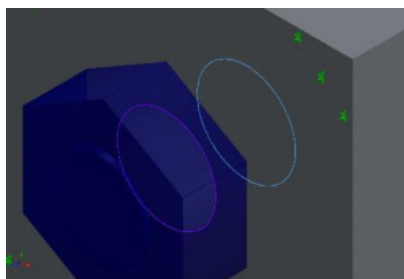
	Entidades: 2 borda(s) Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo) Tipo de conexão: Distribuído	Sem dados
---	---	-----------



Com rebaixo com porca-2	Diâmetro da cabeça: 30 mm Diâmetro da porca: 30 mm Diâmetro de haste nominal: 18 mm Nome do material: Liga de aço Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0,28 Pré-carregamento (Torque): 0 N.m Fator de atrito (K): 0,2 Ajuste apertado: Não	
-------------------------	---	--

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-21,816	20,966	0	30,258
Momento de curvatura (N.m)	-0,13913	-0,15378	0	0,20738



Com rebaixo com porca-3

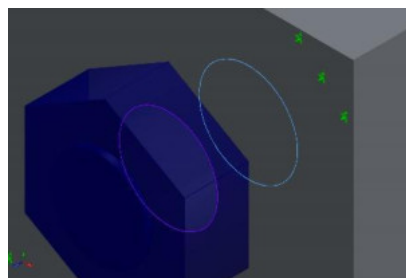
Entidades: 2 borda(s)
Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
Tipo de conexão: Distribuído
Diâmetro da cabeça: 30 mm
Diâmetro da porca: 30 mm
Diâmetro de haste nominal: 18 mm
Nome do material: Liga de aço
Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coeficiente de Poisson: 0,28
Pré-carregamento (Torque): 0 N.m
Fator de atrito (K): 0,2
Ajuste apertado: Não

Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-271,33	0,66759	0	271,33
Momento de curvatura (N.m)	-0,004443	-1,8003	0	1,8004





Com rebaixo com porca-4

Entidades: 2 borda(s)
Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
Tipo de conexão: Distribuído
Diâmetro da cabeça: 30 mm
Diâmetro da porca: 30 mm
Diâmetro de haste nominal: 18 mm
Nome do material: Liga de aço
Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coeficiente de Poisson: 0,28
Pré-carregamento (Torque): 0 N.m
Fator de atrito (K): 0,2
Ajuste apertado: Não

Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-21,8	-18,826	0	28,804
Momento de curvatura (N.m)	0,12574	-0,15373	0	0,1986

Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	14,8018 mm
Tamanho de elemento mínimo	2,96035 mm
Qualidade da malha	Alta



Informações de malha - Detalhes

Total de nós	28778
Total de elementos	15005
Proporção máxima	159,79
% de elementos com Proporção < 3	93,8
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	1,13
Porcentagem de elementos distorcidos	0



Forças resultantes

Forças de reação

Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	-3.229,14	6,52054	-2.039,29	3.819,17

Momentos de reação

Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	0

Forças de corpo livre

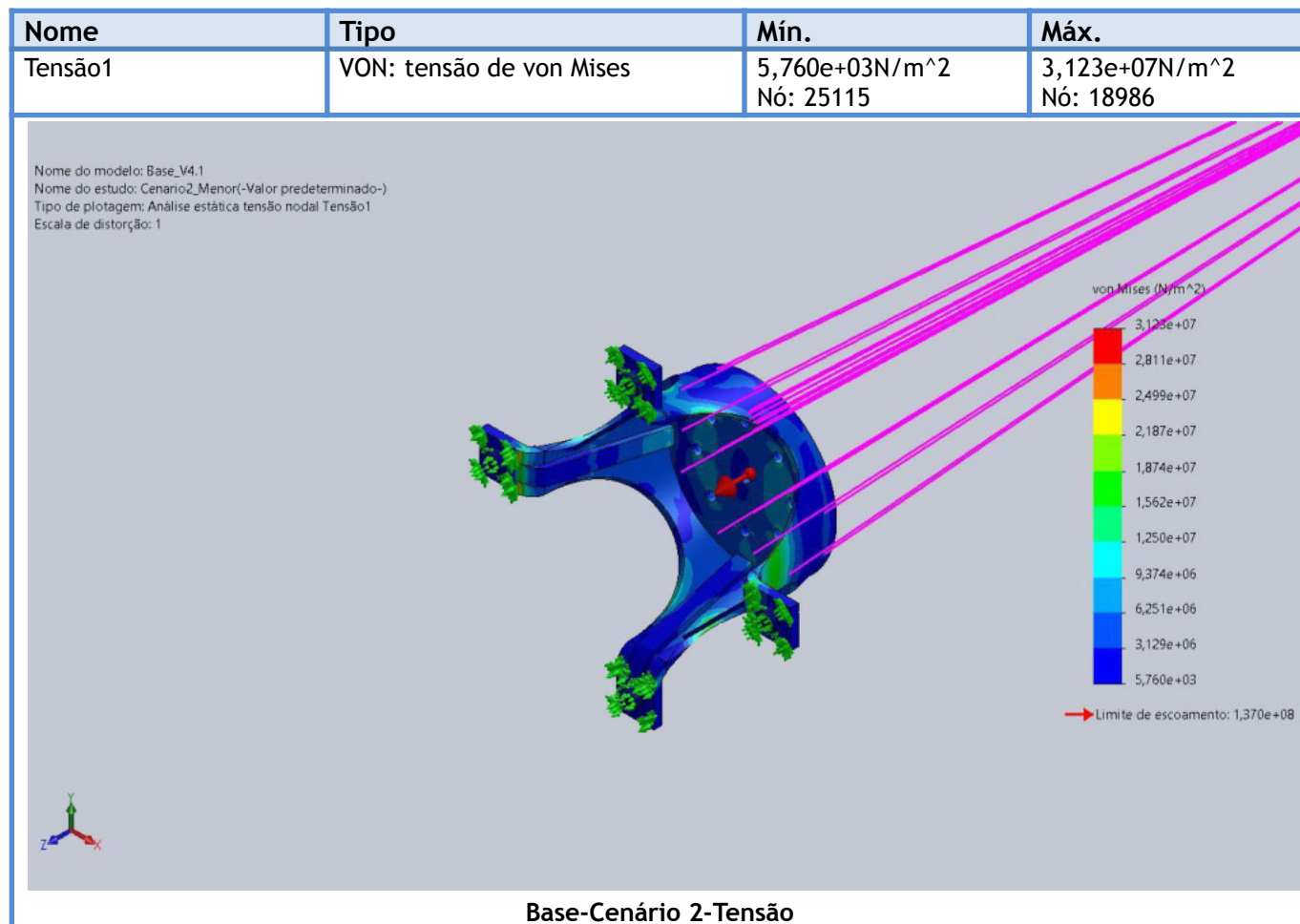
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	-0,000102997	0,000297546	-55,5507	55,5507

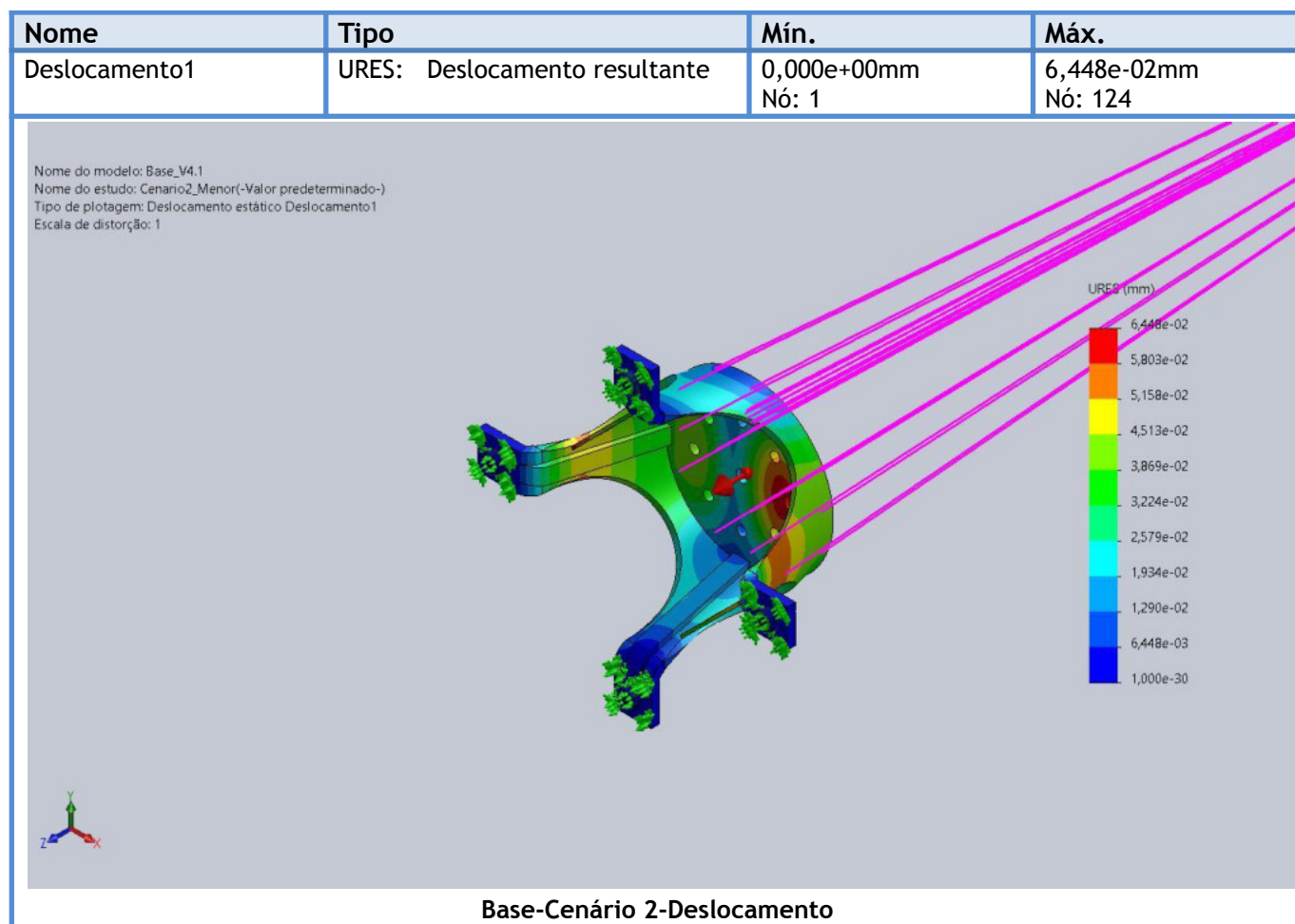
Momentos de corpo livre

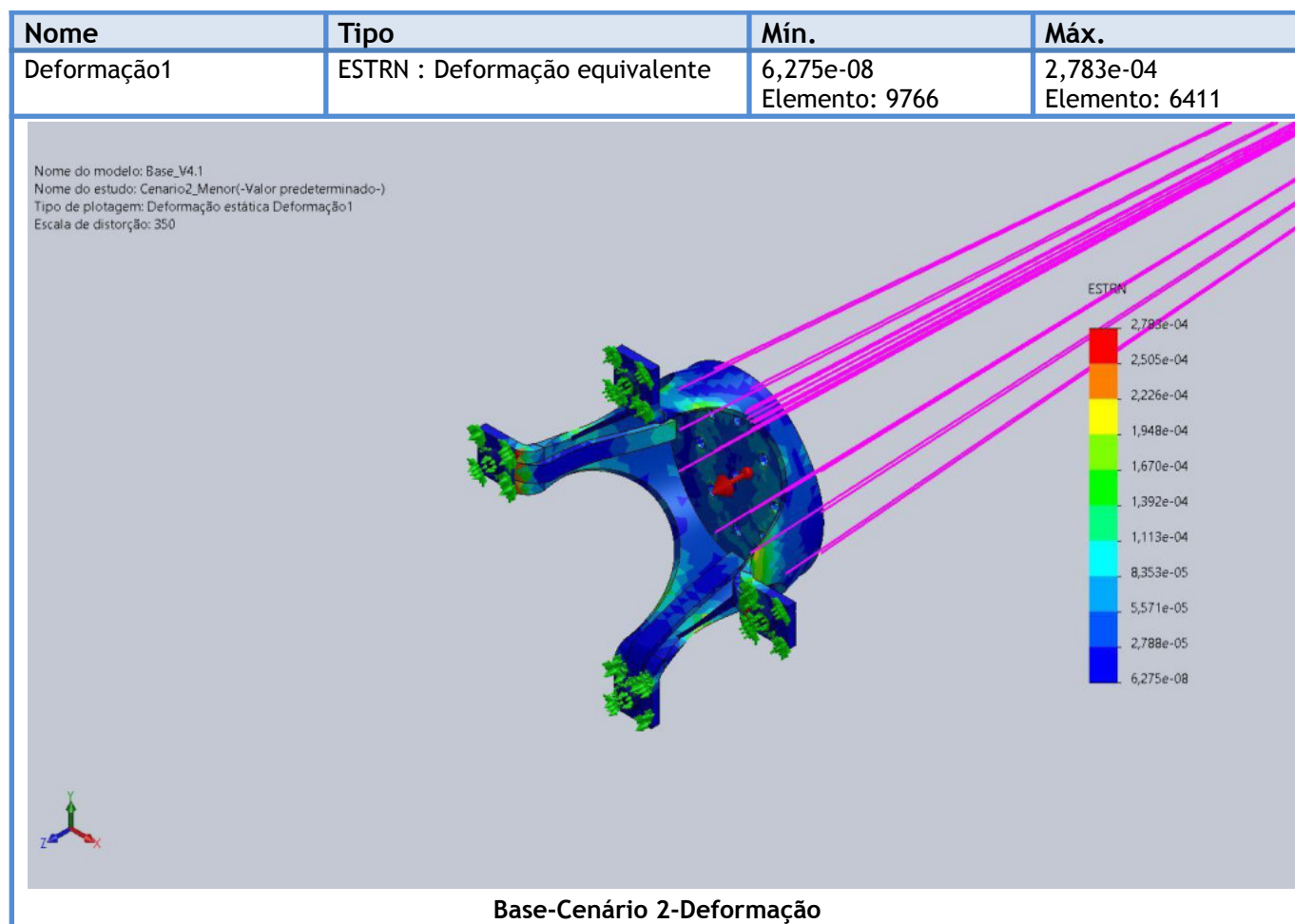
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	1e-33



Resultados do estudo





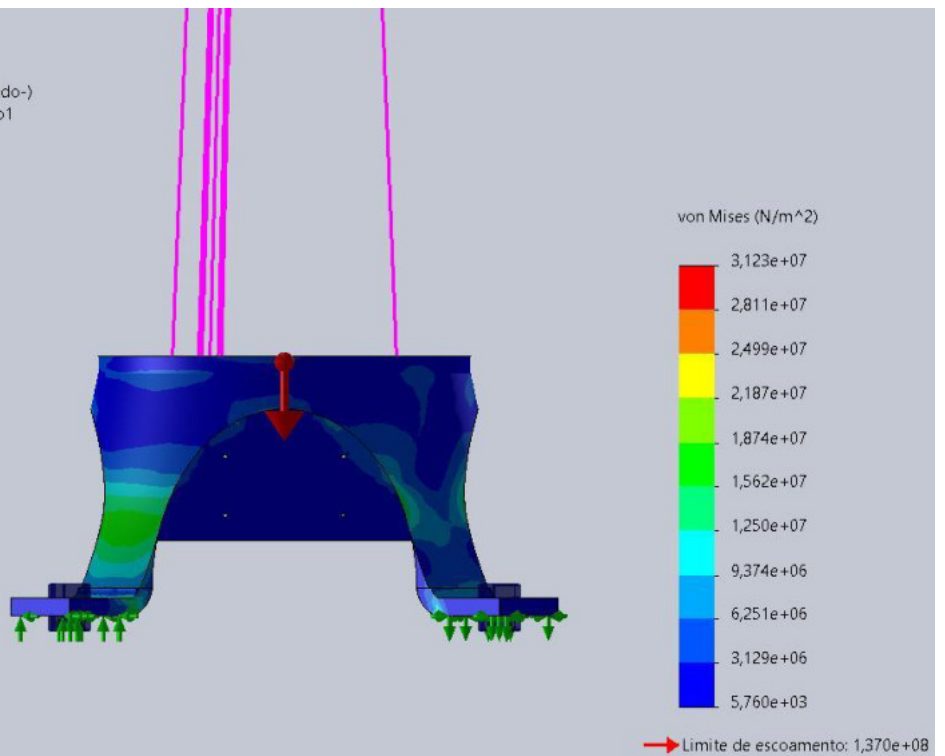


Nome do modelo: Base_V4.1

Nome do estudo: Cenário2_Menor(-Valor predeterminado-)

Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1

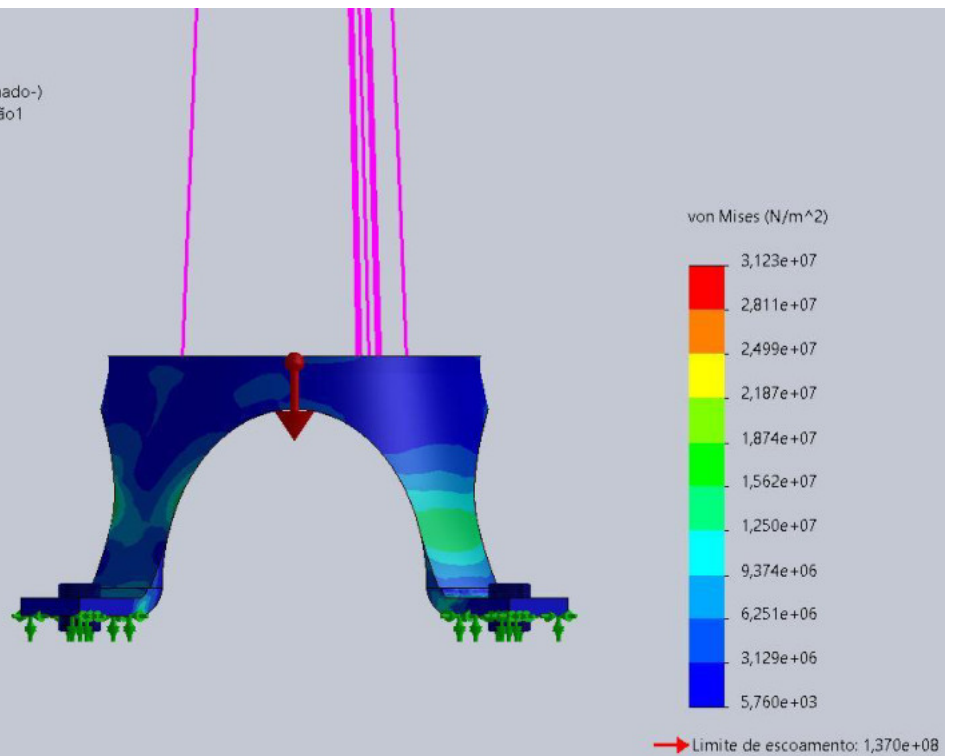
Escala de distorção: 1



Vista direita_Von Mises

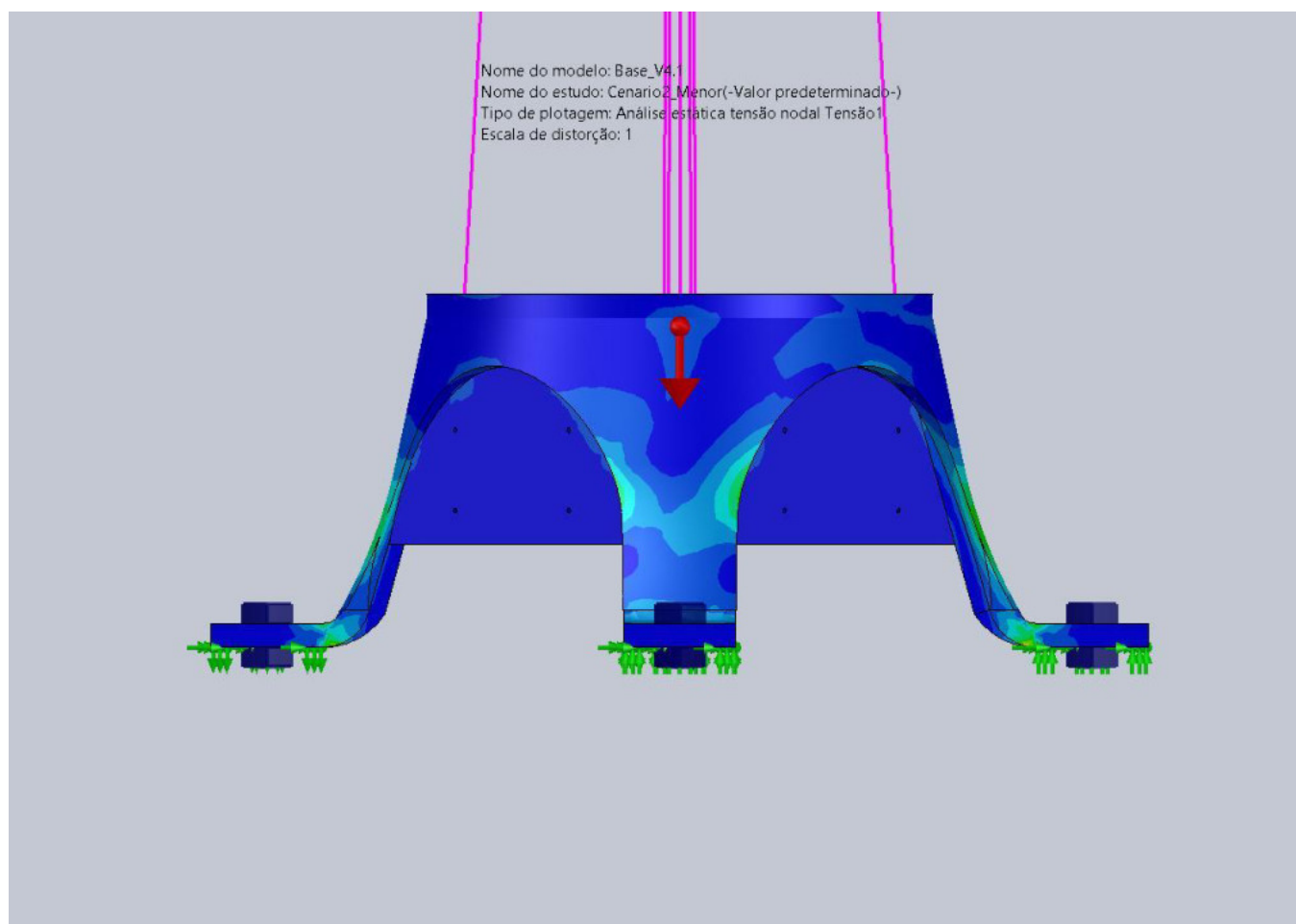


Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenario2_Menor(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
 Escala de distorção: 1

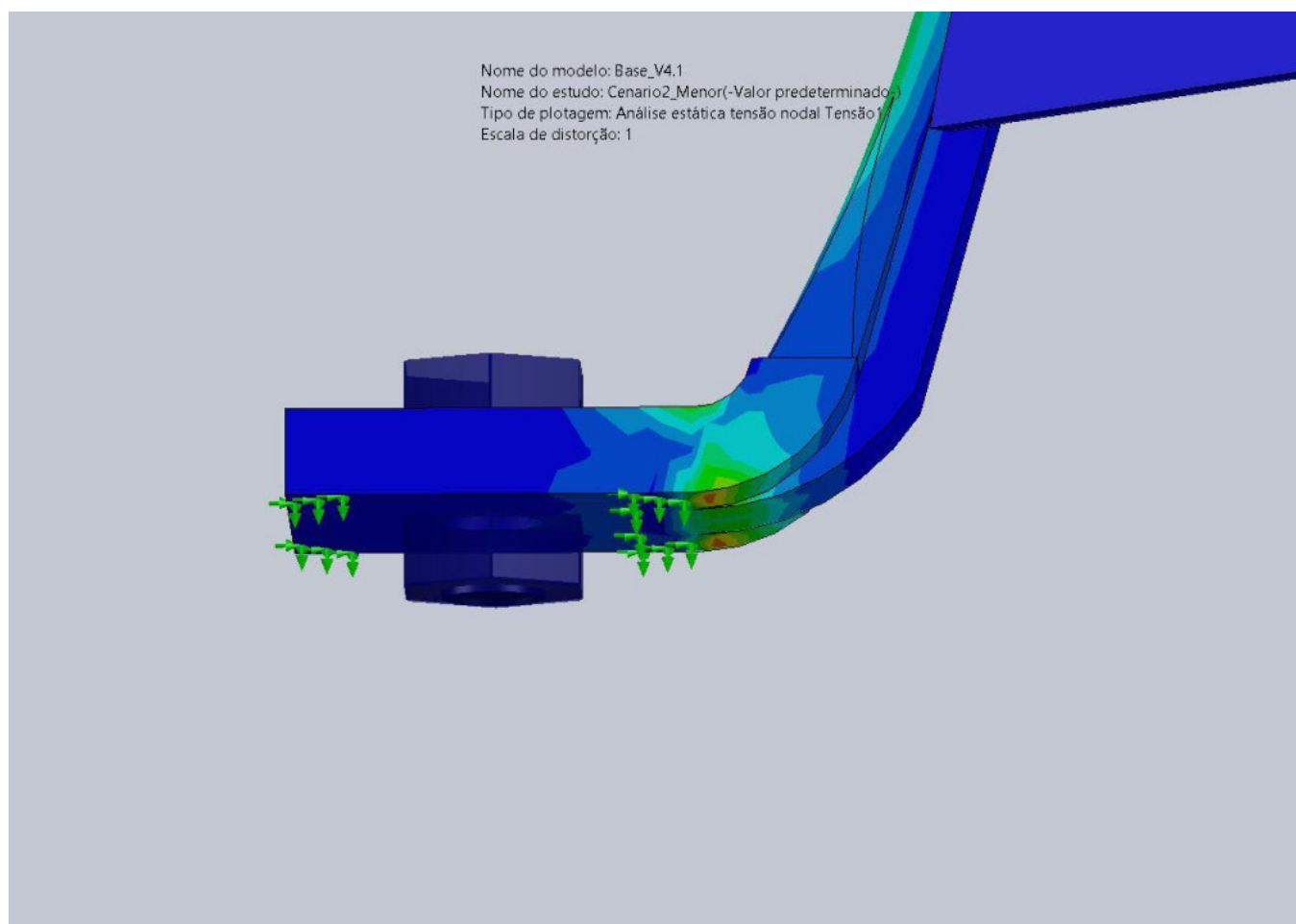


Vista frontal_Von Mises



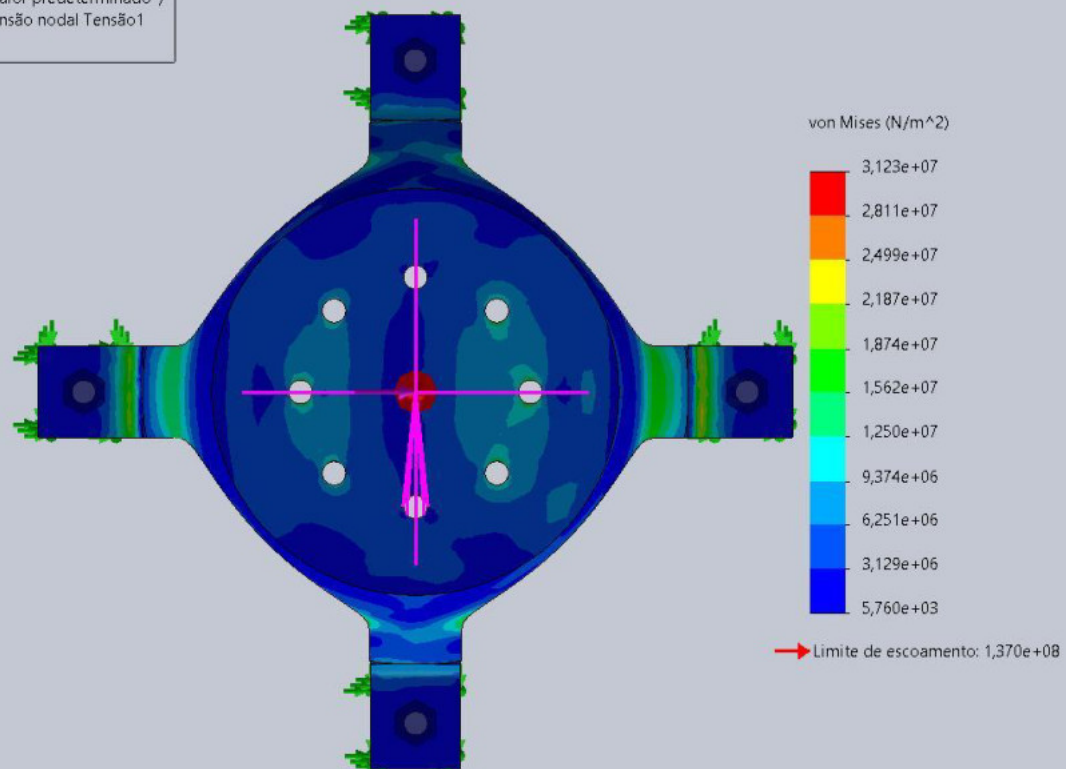


Vista lateral_Von Mises



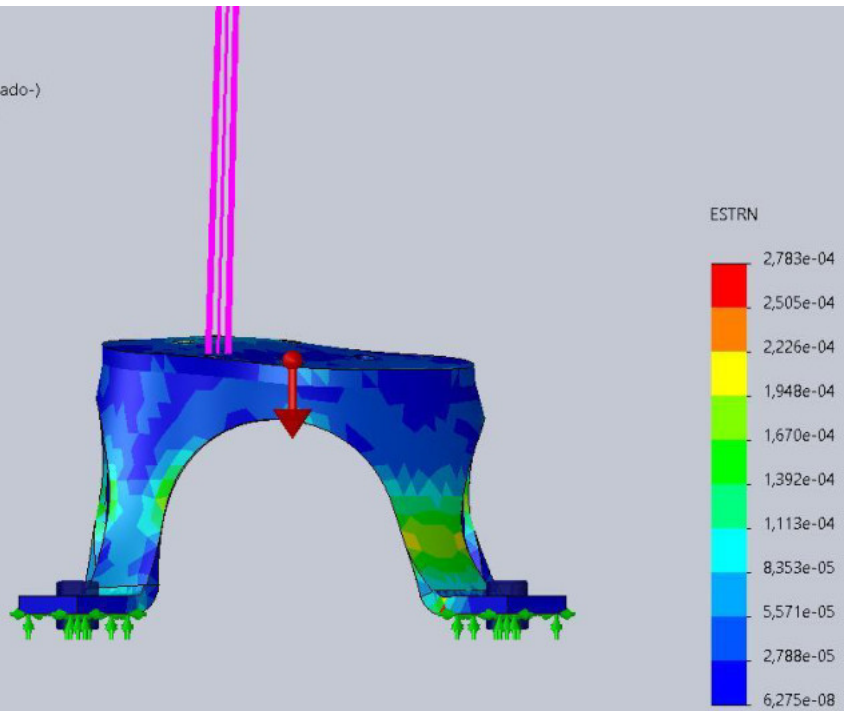
Vista lateral_Von Mises_Zoom

Nome do modelo: Base_V4.1
Nome do estudo: Cenário2_Menor(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 1



Vista superior_Von Mises

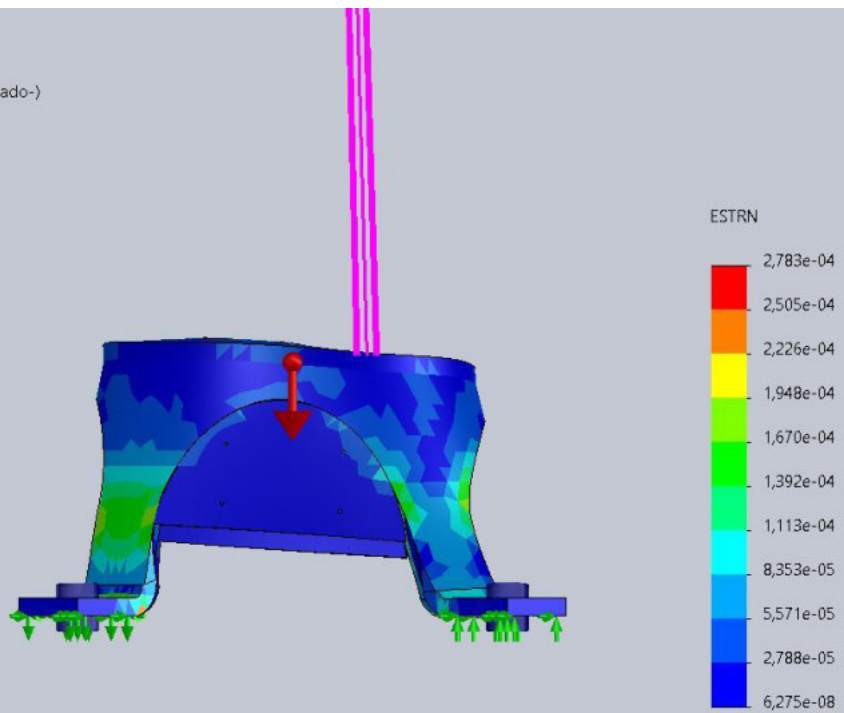
Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenário2_Menor(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 350



Vista frontal_Deformação



Nome do modelo: Base_V4.1
 Nome do estudo: Cenário2_Menor(-Valor predeterminado-)
 Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
 Escala de distorção: 350



Vista direita_Deformação



APÊNDICE D – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO - CENÁRIO 3



Descrição

Simulação com base no cenário 3, que corresponde ao carregamento do peso dos equipamentos sobre a base e o carregamento SCL.

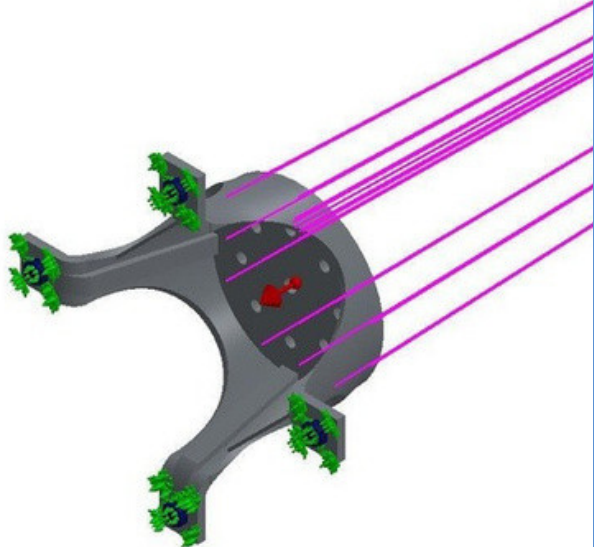
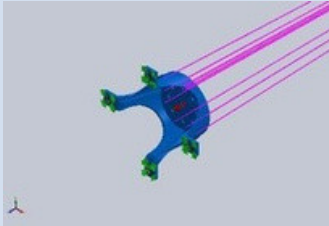
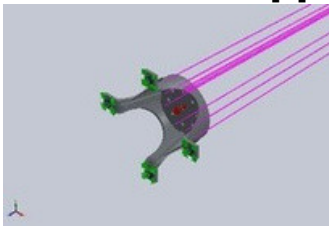
Simulação de Base

Projetista: Yasmin da Mata Georgetti Silva
Nome do estudo: Cenário 3
Tipo de análise: Análise estática

Sumário

Descrição	1
Informações do modelo	2
Propriedades do estudo	3
Unidades	3
Propriedades do material	4
Acessórios de fixação e Cargas	5
Definições de conector	7
Informações de malha	9
Detalhes do sensor	9
Forças resultantes	10
Resultados do estudo	11

Informações do modelo

 Nome do modelo: Base Configuração atual: Valor predeterminado		
Corpos sólidos		
Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas
Corte-extrusão11 	Corpo sólido	Massa:7,78533 kg Volume:0,00290442 m ³ Densidade:2.680,51 kg/m ³ Peso:76,2963 N
Ressalto-extrusão23[2] 	Corpo sólido	Massa:0,154035 kg Volume:5,74757e-05 m ³ Densidade:2.680 kg/m ³ Peso:1,50954 N

Propriedades do estudo

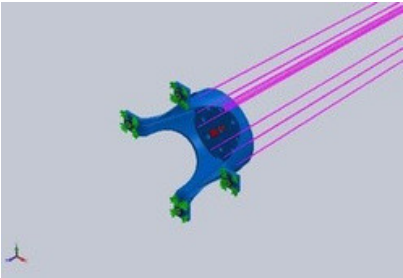
Nome do estudo	Cenário3
Tipo de análise	Análise estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeito térmico:	Ativada
Opção térmica	Incluir cargas de temperatura
Temperatura de deformação zero	298 Kelvin
Inclui efeitos da pressão de fluidos do SOLIDWORKS Flow Simulation	Desativada
Tipo de Solver	Automático
Efeito no plano:	Desativada
Mola suave:	Desativada
Atenuação inercial:	Desativada
Opções de união incompatíveis	Automático
Grande deslocamento	Desativada
Calcular forças de corpo livre	Ativada
Atrito	Desativada
Usar método adaptável:	Desativada

Unidades

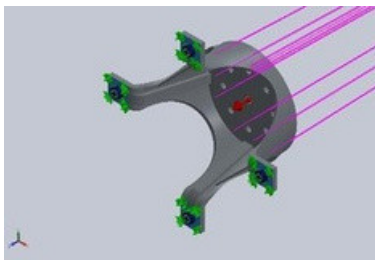
Sistema de unidades:	SI (MKS)
Comprimento/Deslocamento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/s
Pressão/Tensão	N/m ²



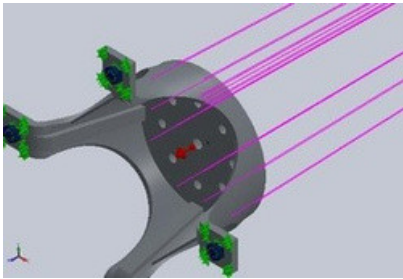
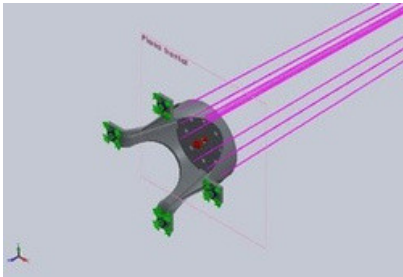
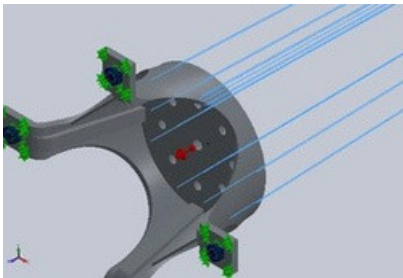
Propriedades do material

Referência do modelo	Propriedades
	Nome: SAE323 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha Desconhecido predeterminado: Limite de escoamento: $1,37 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Resistência à tração: $1,96 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0,33 Massa específica: 2.680 kg/m^3 Módulo de cisalhamento: $2,7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de expansão térmica: $2,3 \times 10^{-5} / \text{Kelvin}$
Dados da curva: N/A	

Acessórios de fixação e Cargas

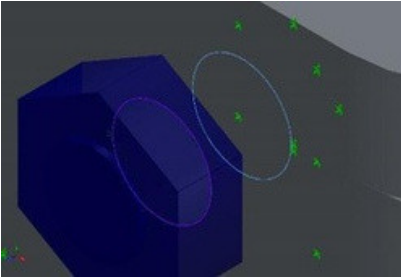
Nome do acessório de fixação	Imagem de acessório de fixação	Detalhes de acessório de fixação		
Em faces planas-1		Entidades: 4 face(s) Tipo: Em faces planas Translação: 0; 0; 0 Unidades: mm		
Forças resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Força de reação(N)	-4.551,76	14,5415	-2.070,46	5.000,55
Momento de reação(N.m)	0	0	0	0



Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Massa distribuída-1		Entidades: 1 face(s) Tipo: Deslocamento (transferência direta) Sistema de Coordenadas: s coordenadas: cartesianas globais ---; ---; --- Translação: ---; ---; --- Valores: mm Rotação: ---; ---; --- Valores: deg Coordenadas: 0 0 0 mm de referência: Massa remota: 197 kg Momento de inércia: 0;0;0;0;0;0 inércia: kg.m² Componentes transferidos: NA
Gravidade-1		Referência: Plano frontal Valores: 0 0 9,81 Unidades: m/s²
Carga remota (conexão distribuída)-1		Entidades: 1 face(s) Tipo de conexão: Distribuído Fator de pesagem: Padrão (Constante) Sistema de Coordenadas: s coordenadas: cartesianas globais Componentes de translação: 7.500 N;---;--- Componentes de rotação: ---;---;--- Coordenadas de referência: 0 0 -4.700 mm

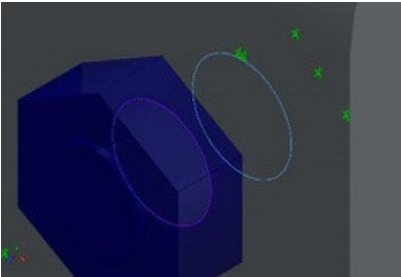
Definições de conector

Conector de pino/parafuso/rolamento

Referência do modelo	Detalhes de conector	Detalhes de resistência
 Com rebaixo com porca-1	Entidades: 2 borda(s) Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo) Tipo de conexão: Distribuído Diâmetro da cabeça: 30 mm Diâmetro da porca: 30 mm Diâmetro de haste nominal: 18 mm Nome do material: Liga de aço Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ Coefficiente de Poisson: 0,28 Pré-carregamento (Torque): 0 N.m Fator de atrito (K): 0,2 Ajuste apertado: Não	Sem dados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-200,46	200,46
Força de cisalhamento (N)	-3.906,6	2,0782	0	3.906,6
Momento de curvatura (N.m)	-0,018895	-29,208	0	29,208

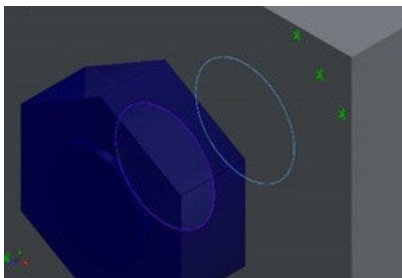
	Entidades: 2 borda(s) Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo) Tipo de conexão: Distribuído	Sem dados
---	---	-----------



Com rebaixo com porca-2	Diâmetro da cabeça: 30 mm Diâmetro da porca: 30 mm Diâmetro de haste nominal: 18 mm Nome do material: Liga de aço Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0,28 Pré-carregamento (Torque): 0 N.m Fator de atrito (K): 0,2 Ajuste apertado: Não	
-------------------------	---	--

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-402,95	51,086	0	408,78
Momento de curvatura (N.m)	-0,3499	-3,078	0	3,0978



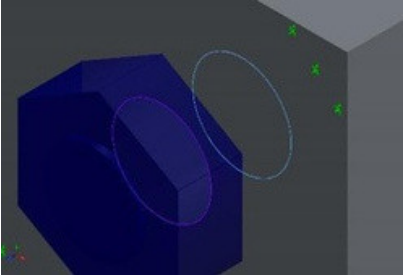
Com rebaixo com porca-3

Entidades: 2 borda(s)
 Tipo: Parafuso(Diâmetro ro cabeça/porca)(Furo com rebaixo)
 Tipo de conexão: Distribuído
 Diâmetro da cabeça: 30 mm
 Diâmetro da porca: 30 mm
 Diâmetro de haste nominal: 18 mm
 Nome do material: Liga de aço
 Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 Coeficiente de Poisson: 0,28
 Pré-carregamento (Torque): 0 N.m
 Fator de atrito (K): 0,2
 Ajuste apertado: Não

Semdados

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-0	0
Força de cisalhamento (N)	-4138,5	14,11	0	4138,5
Momento de curvatura (N.m)	-0,09392	-17,598	0	17,598

	Entidades: 2 borda(s) Tipo: Parafuso(Diâmetro cabeça/porca)(Furo com rebaixo) Tipo de conexão: Distribuído Diâmetro da cabeça: 30 mm Diâmetro da porca: 30 mm Diâmetro de haste nominal: 18 mm Nome do material: Liga de aço Módulo de Young: $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ Coefficiente de Poisson: 0,28 Pré-carregamento (Torque): 0 N.m Fator de atrito (K): 0,2 Ajuste apertado: Não	Semdados
---	---	-----------------

Forças de conector

Tipo	Componente X	Componente Y	Componente Z	Resultante
Força axial (N)	0	0	-1,9833	-1,9833
Força de cisalhamento (N)	-432,07	-15,806	0	432,36
Momento de curvatura (N.m)	0,11524	-3,0366	0	3,0388

Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	14,8018 mm
Tamanho de elemento mínimo	2,96035 mm
Qualidade da malha	Alta



Informações de malha - Detalhes

Total de nós	28778
Total de elementos	15005
Proporção máxima	159,79
% de elementos com Proporção < 3	93,8
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	1,13
Porcentagem de elementos distorcidos	0

Forças resultantes**Forças de reação**

Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	-17.242,1	54,7728	-2.243,16	17.387,5

Momentos de reação

Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	0

Forças de corpo livre

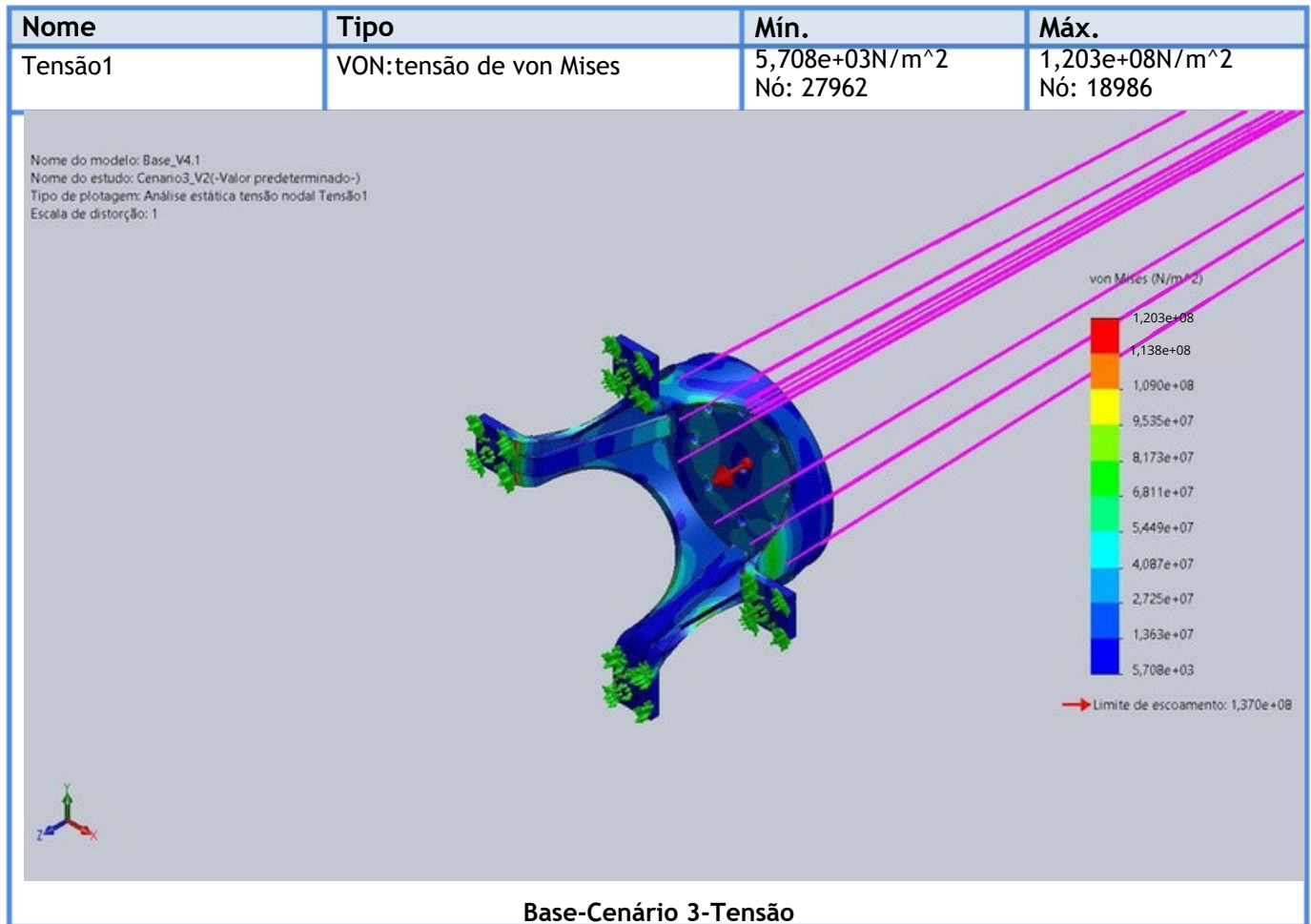
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	0,0264244	0,00256348	-55,5869	55,5869

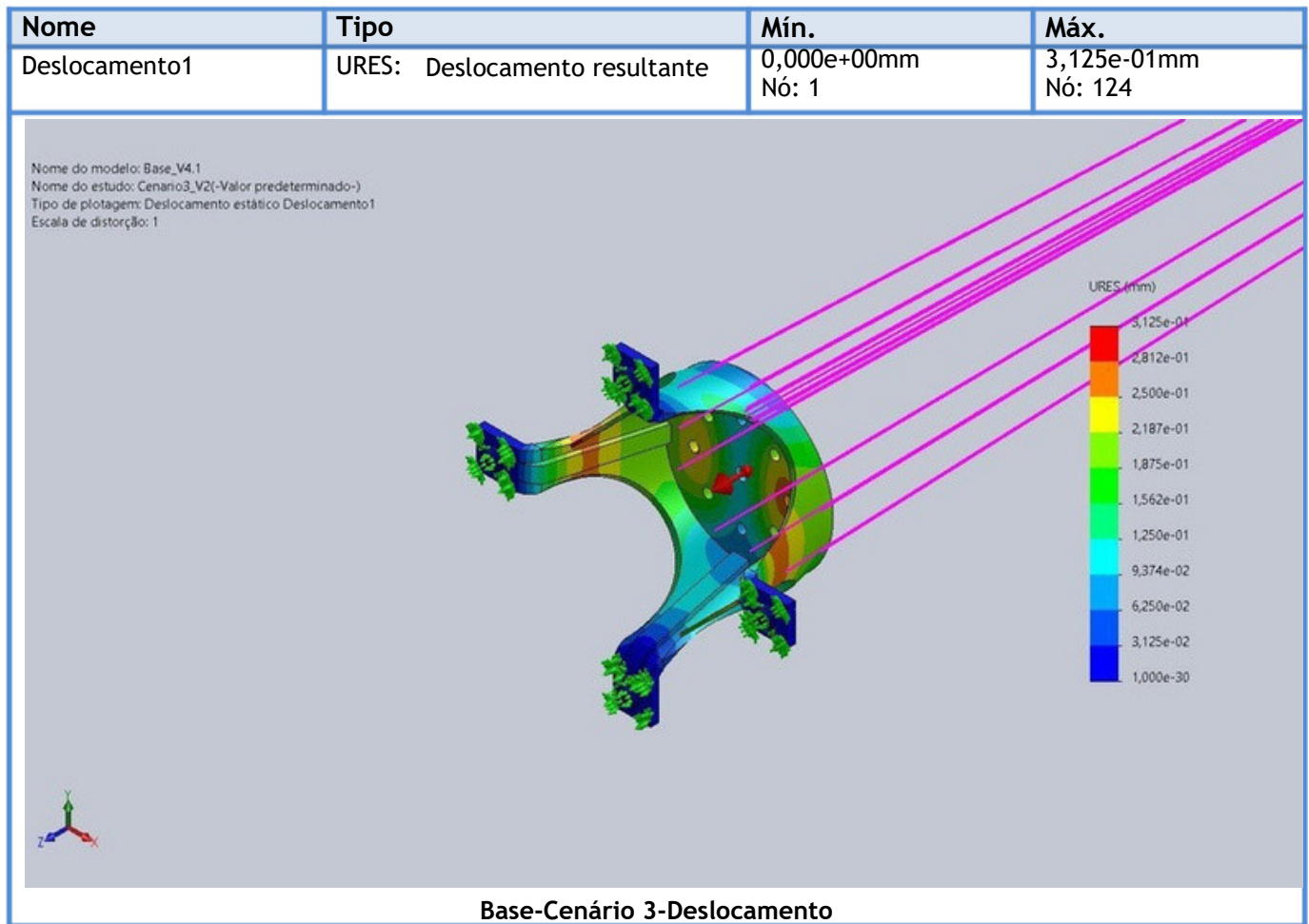
Momentos de corpo livre

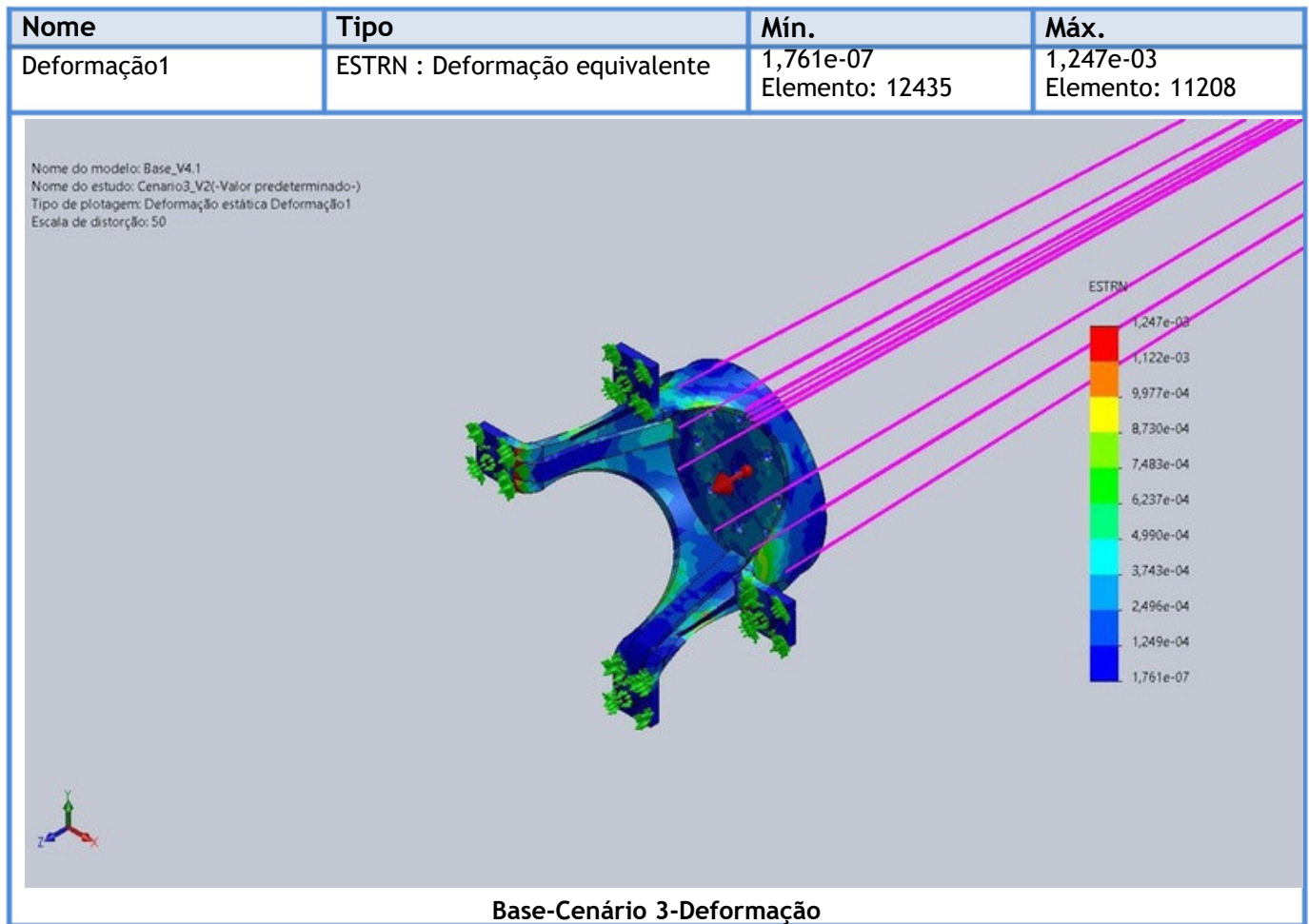
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	1e-33



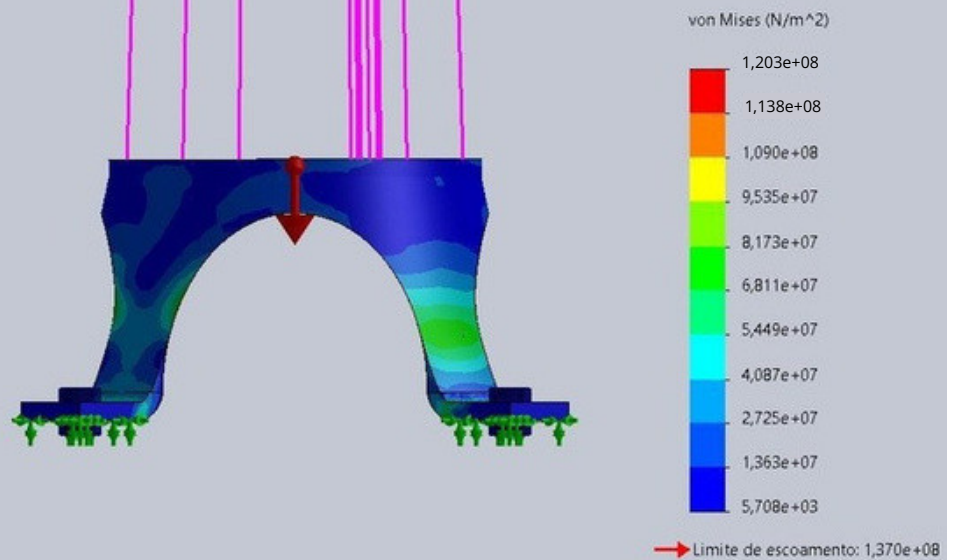
Resultados do estudo





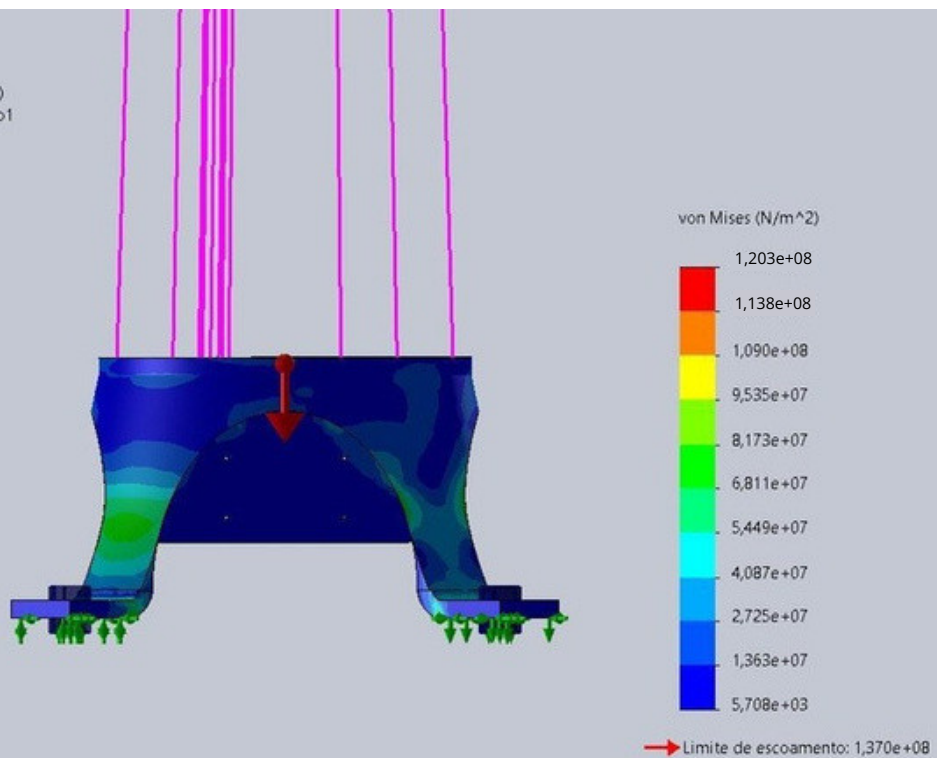


Nome do modelo: Base_V4.1
Nome do estudo: Cenário3_V2(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 1



Vista frontal_Von Mises

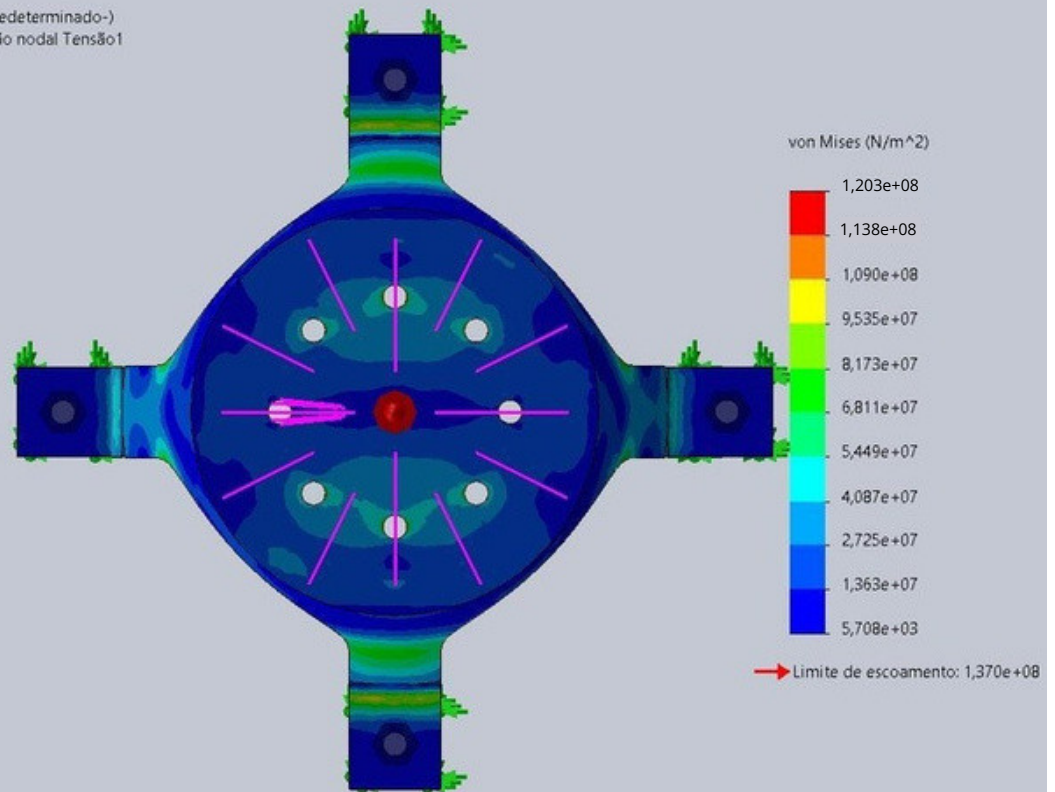
Nome do modelo: Base_V4.1
Nome do estudo: Cenário3_V2(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 1



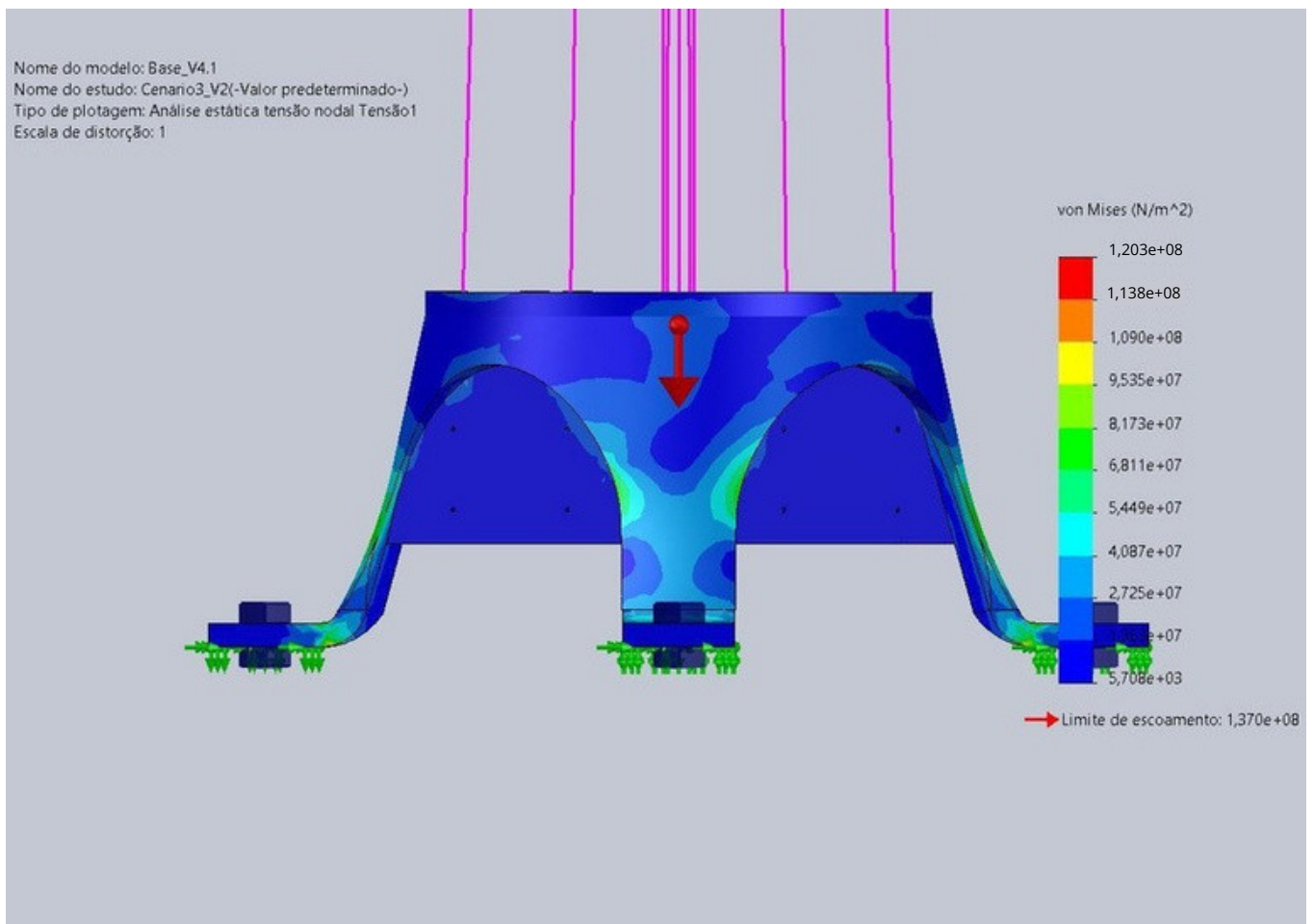
Vista direita_Von Mises



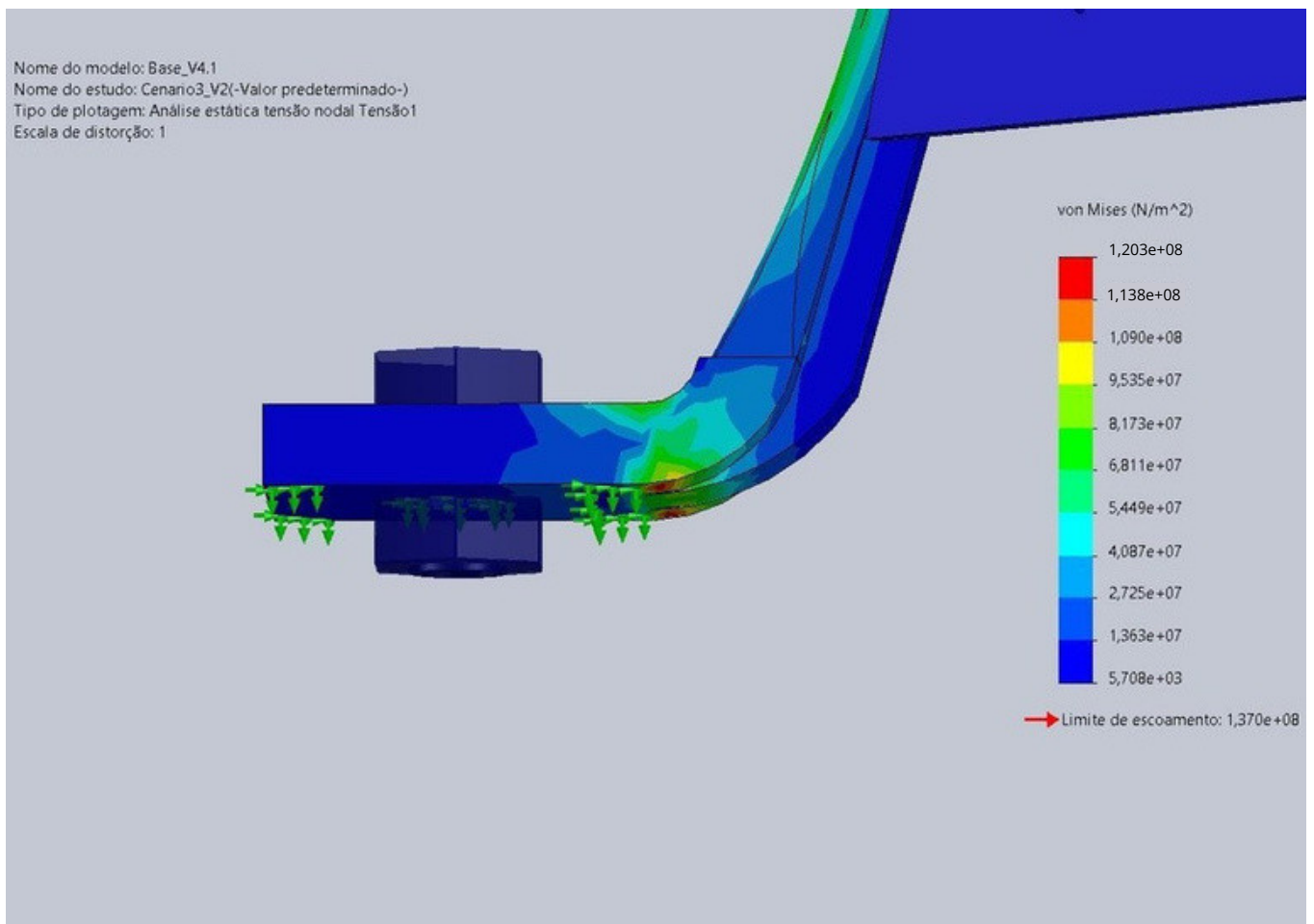
Nome do modelo: Base_V4.1
Nome do estudo: Cenário3_V2(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 1



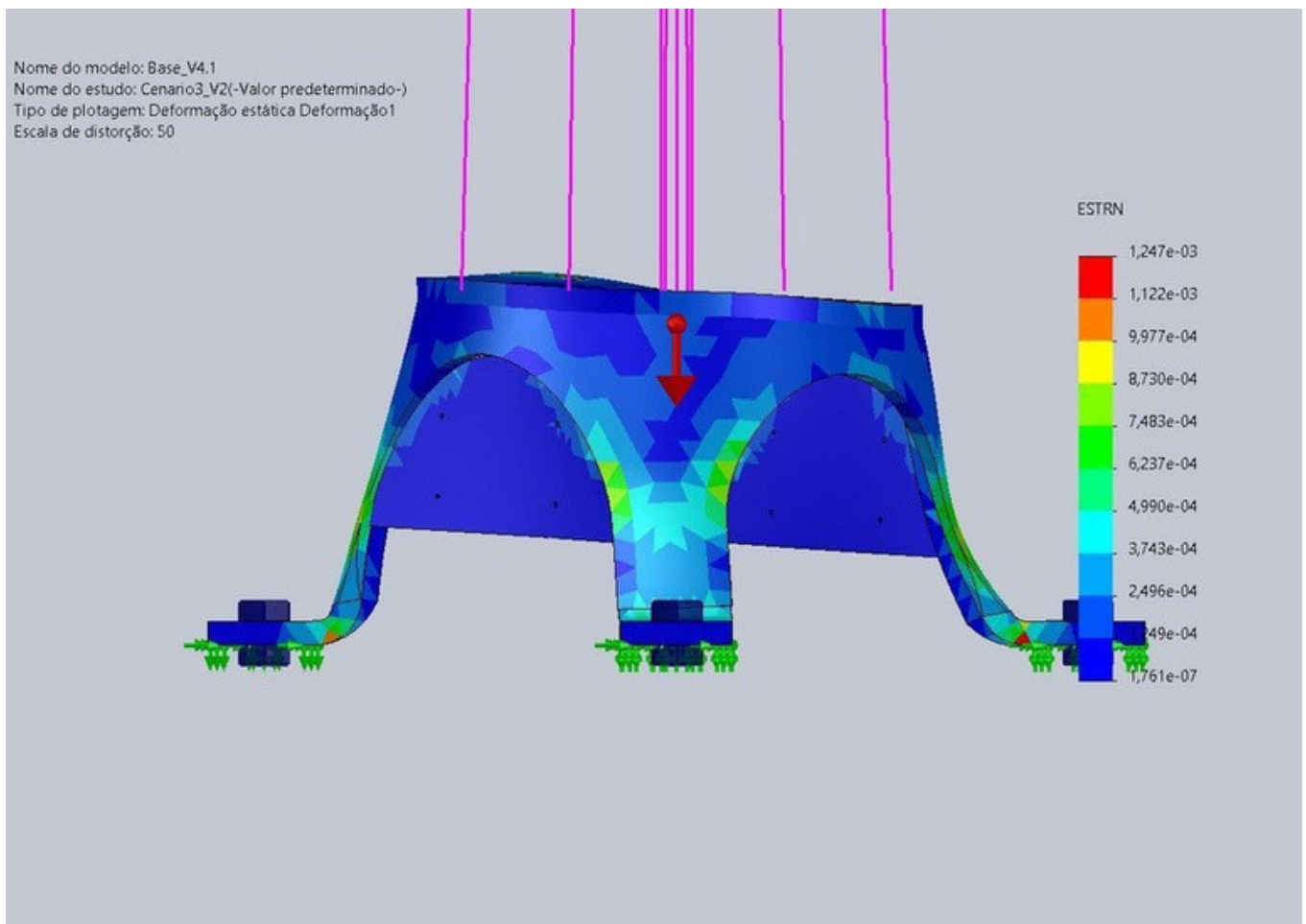
Vista superior_Von Mises



Vista Lateral_Von Mises



Vista Lateral_Von Mises_Zoom



Vista Lateral_Deformação