

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
AREA DE CONHECIMENTO DE CIENCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

JONES LEANDRO BECKER

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE COMPONENTE A BASE DE PÓ FENÓLICO
OBTIDOS POR PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA**

CAXIAS DO SUL

2024

JONES LEANDRO BECKER

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE COMPONENTE A BASE DE PÓ FENÓLICO
OBTIDOS POR PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica apresentado como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof.: Dr. Carlos Alberto Costa.

CAXIAS DO SUL

2024

JONES LEANDRO BECKER

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE COMPONENTE A BASE DE PÓ FENÓLICO
OBTIDOS POR PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Mecânica.

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto Costa
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Me. Eng. Thomas Ribeiro
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Neste trabalho abordou-se a utilização do método de elementos finitos, através do software ANSYS, na análise estrutural de uma peça técnica moldada a partir de pós fenólicos por entender que os componentes produzidos por esse método apresentam características únicas de estabilidade dimensional e resistência a altas temperaturas, tornando a análise estrutural essencial para garantir a segurança e o desempenho otimizado do produto. O foco central do estudo foi realizar essa análise, visando à validação de ensaios experimentais e testes de resistência mecânica, embasada em estudos sobre pós de moldagem fenólicos para a seleção de modelos de elementos finitos adequados a realização de simulações pelo MEF para analisar o comportamento estrutural sob diferentes condições de carga. A análise foi conduzida por meio de simulações computacionais pelo MEF, testes destrutivos e não destrutivos e na compreensão do comportamento estrutural dos materiais fenólicos permitindo identificar áreas de potencial falha. Tendo como resultado a indicação de pontos críticos de tensão e a inadequação do componente para os esforços inicialmente pretendidos, possibilitando ajustes geométricos e redução do torque de aparafusamento, que geraram uma condição segura de utilização do componente. O estudo fornece uma base metodológica utilizando o MEF e informações detalhadas sobre o comportamento do componente.

Palavras-chave: Moldagem, Pó fenólico, Termofixo, Elementos Finitos, ANSYS.

ABSTRACT

This work addressed or discussed the use of the finite element method, through the ANSYS software, in the structural analysis of a technical part molded from phenolic powders, understanding that the components produced by this method present unique characteristics of dimensional stability, and resistance to high temperatures, making structural analysis essential to ensure safety and optimized product performance. The central focus of the study was to carry out this analysis, aiming to validate experimental tests and mechanical resistance tests, based on studies on phenolic molding powders for the selection of finite element models suitable for carrying out FEM simulations to analyze structural behavior, under different load conditions. The analysis was conducted through computational simulations by MEF, destructive and non-destructive tests and understanding the structural behavior of phenolic materials, allowing areas of potential failure to be identified. Resulting in the indication of critical tension points and the inadequacy of the component for the initially intended efforts, enabling geometric adjustments and reduction of screwing torque, which generated a safe condition for using the component. The study provides a methodological basis using the FEM and detailed information about the component's behavior.

Keywords: Molding, Phenolic powder, Thermosetting, Finite Elements, ANSYS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema ilustrativo de uma injetora.....	20
Figura 2 - Processos típicos de conformação de polímeros termofixos: (a) moldagem por compressão e (b) moldagem por transferência.	21
Figura 3 - Etapas durante a transferência de termofixos	22
Figura 4 - Curvas típicas para materiais flexíveis (plásticos) e rígidos (frágeis).	25
Figura 5 - Esquema da notação matricial do modelo discreto.....	30
Figura 6 - Tipos de elementos bidimensionais e tridimensionais.....	32
Figura 7 - Teoria da tensão normal máxima.....	34
Figura 8 - Imagem do componente.....	35
Figura 9 - Procedimento de montagem.	36
Figura 10 - Norma SWN 42103-01.	37
Figura 11 - Trincas evidenciadas pelo ensaio de líquido penetrante na empresa “X”.	38
Figura 12 - Trincas evidenciadas pelo ensaio de líquido penetrante realizado na IPOS.....	39
Figura 13 - Diagrama de Ishikawa.	40
Figura 14 - Propriedades do material CB-8018, criado na biblioteca do software ANSYS	42
Figura 15 - Modelo importado na ferramenta workbench -ANSYS	43
Figura 16 - Estatísticas de malha workbench -ANSYS.....	44
Figura 17 - Área engastada software Mechanical - ANSYS	45
Figura 18- Direção da Força de torque de aparafusamento.....	46
Figura 19 - Área de aperto de parafusos de fixação	48
Figura 20 - Recomendação de utilização e torque de aperto.....	50
Figura 21 - Vista de “meio corte” do modelo 3D.....	50
Figura 22 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 1 - ANSYS.....	51
Figura 23 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 1 - ANSYS	52
Figura 24 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 1 - ANSYS.....	52
Figura 25 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 2 - ANSYS.....	53
Figura 26 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 2 - ANSYS	54
Figura 27 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 2 - ANSYS.....	54
Figura 28 - Propriedades do material X611, criado na biblioteca do software ANSYS	55
Figura 29 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 3 - ANSYS.....	56
Figura 30 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 3 - ANSYS	57
Figura 31 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 3 - ANSYS.....	57

Figura 32 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 4 - ANSYS.....	58
Figura 33 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 4 - ANSYS	59
Figura 34 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 4 - ANSYS.....	59
Figura 35 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 1a - ANSYS	62
Figura 36 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 1b - ANSYS	62
Figura 37 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 2 - ANSYS	63
Figura 38 - Sobreposição modelos original e modelo da proposta melhoria 2	64
Figura 39 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 2 - ANSYS	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de torque com base na condição do parafuso	47
Tabela 2 – Cenários de modelos de simulação.....	49
Tabela 3 - Resumo da análise dos resultados	60
Tabela 4 - Resumo de resultados das propostas de melhoria	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Força de pré carga.....	46
Equação 2 – Coeficiente de torque.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UCS	Universidade de Caxias do Sul
SI	Sistema Internacional de Unidades
AEF	Análise de Elementos Finitos
MEF	Método dos Elementos Finitos
Tg	Transição Vítrea
LP	Líquido Penetrante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA E AMBIENTE DE TRABALHO	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	ABORDAGEM E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	PÓ DE MOLDAGEM FENÓLICO.....	17
2.1.1	Principais Características	18
2.2	MOLDAGEM POR INJEÇÃO E TRANSFERÊNCIA	20
2.2.1	Cura e pós-cura.....	23
2.3	COMPORTAMENTO DO PRODUTO TERMOFIXO MOLDADO	24
2.4	MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS	25
2.4.1	Sobre o Método de Elementos Finitos.....	26
2.4.2	Sistemas discretos	27
2.4.3	Méritos e Limitações do Método	28
2.4.4	Considerações Importantes para Análise Estrutural.....	28
2.4.5	Tipos de Estruturas para Análise.....	28
2.4.6	Modelo de cálculo através da matriz de rigidez.....	29
2.4.7	Tipos de elemento, malha e contatos.....	31
2.5	CRITÉRIO DE FALHA PARA MATERIAIS FRÁGEIS	34
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	INTRODUÇÃO	35
3.2	AValiação DO PROBLEMA	35
3.3	PROPOSTA DE TRABALHO	40
3.4	PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANSYS	41
3.4.1	Definição das propriedades do material utilizado	42
3.4.2	Modelagem do Flange 4147-120-2301-D.....	42
3.4.3	Definição dos elementos de malha.....	43
3.4.4	Malha de elementos finitos.....	44

3.4.5	Condições de contorno	45
3.4.6	Configuração da análise	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1	RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO NO CENÁRIO 1	51
4.2	RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO DO CENÁRIO 2	53
4.3	RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO DO CENÁRIO 3	55
4.4	RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO DO CENÁRIO 4	58
4.5	COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	60
4.6	CENÁRIOS DE MELHORIA DE GEOMETRIA DO COMPONENTE.....	61
4.7	RESULTADOS PARA CENÁRIOS DE MELHORIA DE GEOMETRIA DO COMPONENTE.....	61
5	CONCLUSÕES.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	ANEXO A – DATASHEET MATÉRIA PRIMA NACIONAL	70
	ANEXO B – DATASHEET MATÉRIA PRIMA IMPORTADA	71

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria tem enfrentado uma crescente demanda por materiais e processos inovadores que possam atender aos desafios complexos de projeto e fabricação de componentes. Isso tem impulsionado constantes evoluções tecnológicas, as quais requerem produtos mais eficientes, confiáveis e sustentáveis.

A substituição de materiais metálicos por polímeros é uma tendência na indústria devido a várias vantagens dos polímeros, como menor peso, resistência à corrosão, flexibilidade de design e custos potencialmente mais baixos. Isso é especialmente relevante em setores como automobilístico e aeroespacial, onde a redução de peso é decisiva para melhorar a eficiência e reduzir o consumo de combustível. No entanto, a escolha entre metais e polímeros depende das necessidades específicas de cada aplicação, considerando fatores como resistência mecânica, temperatura de operação e requisitos de durabilidade.

Nesse cenário, a análise detalhada das propriedades dos materiais utilizados, tornou-se indispensável para garantir o desempenho e a durabilidade das peças, especialmente sob condições de carga.

A baquelite, nome popular, é uma resina termofixa formada a partir do fenol e do formaldeído, que é considerada o primeiro polímero artificial produzido e ainda tem atraído atenção considerável para aplicações que demanda elevada resistência térmica e elétrica. Este tipo de termofixo é obtido utilizando um composto de pó fenólico de moldagem pelo processo de compressão, transferência ou injeção. As propriedades únicas do pó fenólico, incluindo alta resistência térmica, boa resistência química e excelente estabilidade dimensional, o tornam uma escolha atraente para diversas aplicações industriais. Por causa dessas propriedades esse material é, muitas vezes, produzido com insertos metálicos para aplicações de ordem mais funcional e técnica, como sistemas de flanges, suportes de carburador e tampas de motores de partida.

Para confeccionar produtos técnicos feitos a partir de compostos de moldagem termofixos, é necessário um conhecimento abrangente do material e do processo, que atualmente não está disponível e disseminado em literaturas básicas, na mesma extensão que tem-se informações para termoplásticos.

O método de elementos finitos (MEF) surge como uma ferramenta fundamental para analisar e investigar o comportamento mecânico das peças produzidas. O MEF permite a simulação virtual detalhada de condições operacionais reais, possibilitando a avaliação de

tensões, deformações e outros parâmetros críticos. Isso não apenas agiliza o processo de desenvolvimento e otimização de produtos, bem como, fornece *insights* valiosos sobre como as propriedades do material podem impactar no desempenho das peças sob diferentes cargas e condições de uso. Sendo assim, o presente trabalho se propõe a explorar a influência das propriedades de peças produzidas a partir do pó fenólico na resistência e capacidade de carga de componentes mecânicos, tendo o método de elementos finitos como ferramenta de análise. Foram abordados os aspectos teóricos relacionados às propriedades do material e os princípios da análise de elementos finitos.

Diante disso, este estudo visa preencher uma lacuna de conhecimento, explorando como as propriedades do pó fenólico afetam o comportamento mecânico das peças produzidas. Ao apresentar informações e resultados, espera-se contribuir para a melhoria dos projetos e da fabricação de componentes industriais.

1.1 JUSTIFICATIVA E AMBIENTE DE TRABALHO

O ambiente de desenvolvimento do trabalho é a empresa IPOS Indústria Metalúrgica Ltda. A empresa foi fundada no ano de 1979, tendo como estrutura inicial um pavilhão de 200 m², no bairro Floresta com 4 funcionários. Os produtos, inicialmente, fabricados eram peças em termoplástico e termofixo, destinadas à aplicação em máquinas e materiais elétricos.

Atualmente, a empresa está localizada no Distrito Industrial de Caxias do Sul, na Avenida João Triches, 431, estabelecida numa área de 2000 m², sendo mais de 1600 m², de área construída, com um quadro de 50 funcionários. Produz mais de 100 itens, entre estes, produtos próprios da categoria “Linha Branca”¹, também a prestação de serviços em injeção de peças técnicas para os setores: automobilístico, agrícola, eletroeletrônico e outros.

A política de qualidade da empresa visa fornecer produtos e serviços que superem a expectativa de seus clientes, desde 2006 possui a certificação ISO 9001, atualmente a IPOS é uma das primeiras empresas certificada com selo Qualidade Assegurada STIHL, mérito fornecido pela empresa alemã STIHL S.A.

Nesse contexto de produtos técnicos, o estudo da influência das propriedades do pó fenólico na resistência e carga de componentes é uma questão relevante e atual. O pó fenólico, devido às suas características particulares, como resistência química, isolamento elétrico e

¹ Os eletrodomésticos de linha branca ou os produtos linha branca são aqueles tipos de itens que a maioria das casas já possuem, como a geladeira, o fogão, além do micro-ondas, das máquinas de lavar, o ar-condicionado e lava-louças

estabilidade térmica, tem encontrado aplicações em uma ampla gama de setores industriais, incluindo automotivo, eletrônico e aeroespacial. Portanto, compreender como as propriedades específicas do pó fenólico afetam o comportamento mecânico dos componentes fabricados a partir desse material é um desafio crítico.

A resistência e a carga suportada por um componente são aspectos diretamente ligados à sua integridade estrutural e funcionalidade. Nesse sentido, é fundamental investigar como propriedades como a composição química do pó fenólico, o tamanho das partículas, a distribuição de poros, a densidade, e demais informações do *datasheet* desta matéria prima que afetam as características mecânicas das peças produzidas.

O item denominado “Flange”² produzido na IPOS para a empresa “X”³, tem a função primária de conexão entre o carburador e o cilindro, criando uma barreira térmica para minimizar a transferência de calor do cilindro para o carburador, evitando degradação do combustível na mistura explosiva, e como função secundária, realiza a sustentação do conjunto de combustão/filtragem.

Testes de torque de aparafusamento é um procedimento habitualmente realizado em setores como da indústria. Esse teste tem o objetivo de simular a condição de aperto manual (em campo) onde os parafusos estejam apertados com a quantidade de torque excessivos. Desta forma é comprovada a segurança e a funcionalidade de produtos e estruturas, pois em caso de falha, pode haver a perda de função secundária, tornando o equipamento ainda operável, mas com nível reduzido de desempenho e gerando desconforto ao operador.

A análise de elementos finitos surge como uma ferramenta capaz de simular em peças com geometria complexa o comportamento sob diferentes condições de carga, possibilitando ao projetista aperfeiçoar o design dos componentes.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho serão descritos a seguir.

² Flange é basicamente um item intermediário, ou um acoplamento que serve para unir outros componentes por meio de parafusos e porcas.

³ A título de informação, vamos denominar o nome da empresa como “X” como forma de preservação, considerando que não existe uma autorização formal para a divulgação.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar análise estrutural de uma peça técnica moldada a partir de pós fenólicos, para validação de ensaios experimentais e testes de resistência de torque.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica sobre pós de moldagem fenólicos, seus compostos e propriedades mecânicas e térmicas.
- b) Levantar e selecionar modelos de elementos finitos que representem adequadamente o comportamento mecânico do compósito de pó de moldagem fenólico.
- c) Realizar simulações pelo método de elementos finitos para analisar o comportamento estrutural do compósito estudado sob diferentes condições de carga.

1.3 ABORDAGEM E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Através de uma pesquisa qualitativa, o presente trabalho se propõe a explorar a influência dos dados do *datasheet* do pó fenólico na resistência e capacidade de carga de componentes mecânicos, empregando o método de elementos finitos como ferramenta de análise.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é apresentar os estudos correlacionados da literatura, auxiliando o desenvolvimento deste trabalho e a interpretação dos resultados obtidos.

O foco será a resina fenólica, suas características desde a estrutura molecular até o processo de cura. Serão abordados neste capítulo, a formação e os processos de fabricação de materiais compósitos, dando ênfase ao processo de injeção por transferência.

2.1 PÓ DE MOLDAGEM FENÓLICO

As resinas fenólicas são polímeros termorrígidos considerados como os primeiros materiais poliméricos totalmente sintéticos e foram patenteadas pela primeira vez em 1899 por A. Smith (SMITH, 1899). Desde então, estas resinas têm sido usadas em diversas aplicações, tais como: adesivos para compensados, recobrimento de superfícies, matrizes na fabricação de compósitos na indústria aeroespacial, automobilística e naval (manufatura de componentes mecânicos e estruturais, equipamentos elétricos), em espuma para isolamento térmico acústico, entre outras.

As resinas fenólicas, também conhecidas como resina fenol-formaldeído, possuem excelente estabilidade térmica, sendo resistentes a chamas e a altas temperaturas (cerca de 900°C), provocando pouca fumaça e baixa emissão de gases tóxicos, quando comparadas com outras resinas termorrígidas, tais como: poliésteres e epoxídicas, caracterizadas como fundamentais em ambientes, onde a segurança contra o fogo é de suma importância.

A degradação térmica de resinas fenólicas leva à produção de material carbonizado, que resulta em taxas muito baixas de propagação de chama quando comparada com as resinas poliésteres. As resinas fenólicas estão entre as resinas que menos produzem fumaça durante a queima. Além disso, a fumaça liberada por elas é menos tóxica que a produzida pela maioria dos retardantes de chama. Por exemplo, uma resina fenólica padrão, comparada com uma resina poliéster retardante de chama, produz quatro vezes menos monóxido de carbono, seis vezes menos ácido clorídrico e níveis muito baixos de ácido bromídrico (HILTZ; KUZAK e WAITKUS, 2001).

Os materiais termorrígidos são frágeis e rígidos devido às ligações cruzadas intermoleculares que formam uma rede tridimensional, impedindo a movimentação livre das cadeias como nos termoplásticos, tornando-os infusíveis. Além disso, são bastante estáveis a variação de temperatura. Entre os vários tipos de resinas termorrígidas, pode-se citar: fenólicas, poliésteres, epoxídicas, uréicas, dentre outras.

Do ponto de vista mecânico, o material de moldagem fenólico, sendo um termofixo, faz parte do grupo de materiais poliméricos que apresenta comportamento frágil. Sendo que, de acordo com Callister (2000), o seu módulo de elasticidade está entre os mais elevados dentre os polímeros, da ordem de até 14 GPa e sua deformação típica até a fratura é bastante limitada, entre 1,5% e 2% em solicitações de tração.

A curva tensão versus deformação típica da resina fenólica, em solicitação de tração, é muito similar à curva de um material de alta fragilidade, lembrando materiais cerâmicos, visto que a ruptura ocorre ainda na porção da curva que exhibe comportamento elástico, sem deformação permanente antes da quebra. Estas propriedades são esperadas para materiais termofixos, visto que esta subclasse dos materiais poliméricos apresenta aspectos de comportamento frágil, dentre os quais pode-se citar, além da reduzida deformação até a ruptura, uma superfície de fratura típica de material frágil, com aspectos que lembram vidros ou cerâmicos. Bem como, os materiais fenólicos apresentam excelente resistência química, isolamento elétrico, dureza superficial e estabilidade dimensional (Callister, 2000).

2.1.1 Principais Características

Os materiais de moldagem são o resultado de desenvolvimento e engenharia customizados para atender a situações específicas de moldagem ou requisitos de uso final de aplicações individuais, isso resulta em uma ampla gama de formulações fenólicas e graus de plasticidade, embora muitas das formulações sejam adequadas para avaliação em aplicações típicas.

Conforme Plenco (2023) as principais propriedades relacionadas aos produtos produzidos com esses tipos de resinas são:

1) Performance térmica: É frequentemente reconhecido na avaliação de plásticos disponíveis para uma determinada aplicação que a característica marcante do material de moldagem fenólico termofixo curado é o seu excelente desempenho térmico. Isto é, especialmente significativo, quando se considera o custo unitário relativamente baixo destes materiais. O desempenho térmico refere-se à capacidade de um produto plástico moldado de manter sua integridade estrutural, sob carga mecânica durante uma exposição prolongada a temperaturas elevadas. O desempenho térmico dos sistemas poliméricos está intimamente relacionado à sua temperatura de transição vítrea (Tg). Esta é a temperatura na qual as moléculas ganham rapidamente mobilidade à medida que a amostra moldada curada é aquecida. Mesmo na presença de enchimentos e reforços que proporcionem a aparente rigidez inicial.

2) *Resistência à fluência projetada:* A temperatura de transição vítrea relativamente alta de polímeros reticulados, como os fenólicos, resulta em excelente resistência à fluência sob carga mecânica. Uma propriedade única do fenólico curado é a capacidade de aumentar sua Tg por meio de um protocolo pós-cozimento, cuidadosamente controlado, após a peça ser moldada. Quando aplicado corretamente, o programa pós-cozimento pode resultar em uma melhoria adicional na resistência à fluência, na estabilidade dimensional e no módulo (rigidez) em temperaturas elevadas.

3) *Resistência térmica:* Devido ao excelente desempenho térmico, os materiais de moldagem fenólicos são especificados para isolar e proteger componentes sensíveis dos efeitos adversos da exposição a altas temperaturas. Existem classes materiais de moldagem fenólicos projetados para uso em altas temperaturas, e são formuladas com sistemas de resina Resole ou Novolac, com cargas e reforços especialmente selecionados, a fim de atender às especificações de uso final, isto os torna candidatos ideais em aplicações que exigem ótimas características de inflamabilidade. Ao contrário de muitas resinas termoplásticas, as peças moldadas fenólicas, quando expostas a uma fonte de ignição, não gotejam partículas flamejantes.

4) *Estabilidade dimensional:* Muitos dos materiais de moldagem fenólicos são formulados para fornecer dimensões estreitas com deformação mínima sob carga mecânica em temperaturas elevadas. Esta característica é crítica ao considerar requisitos de calibração, retenção de torque do parafuso e especificações dimensionais para evitar falhas térmicas, mecânicas ou elétricas, especialmente durante o ciclo térmico de produtos finais utilizados. Por esta razão, componentes do trem de força, carcaças de motores elétricos, placas de escovas, carcaças de controle são produzidos com esta classe de matéria prima.

5) *Auto lubrificação:* Essa premissa proporciona excelente lubrificação e resistência à abrasão para componentes que exigem ciclos mecânicos repetidos ou contato peça a peça. Uma vantagem importante dos componentes moldados a partir de materiais, com estas características, é a sua capacidade de manter a suavidade da superfície após o polimento mecânico. Os materiais fenólicos autolubrificantes são usados em dispositivos de medição de gás, impulsores de combustível.

2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO E TRANSFERÊNCIA

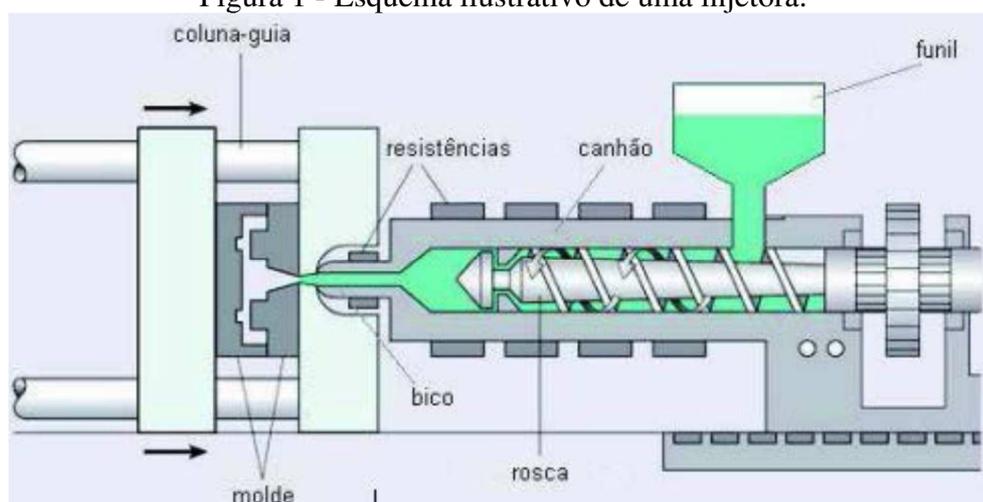
A moldagem por injeção é uma das técnicas mais versáteis empregadas no processamento de polímeros, destaca-se por sua praticidade, elevada produtividade e eficiência para a produção de peças com formas complexas. Devido ao alto custo das máquinas, moldes e equipamento auxiliar, a alta produtividade é fundamental para tornar esse método viável.

Segundo Becker (1988) em princípio, a moldagem por injeção termofixa difere apenas em termos de processo e tecnologia de máquina e, não é, fundamentalmente, diferente da moldagem por injeção termoplástica. No entanto, isso requer tecnologia de ferramentas e máquinas apropriadamente adaptada para compostos de moldagem termofixos, devido as características, comportamento de endurecimento por fluxo e o alto efeito de desgaste.

Antes de ser transferido para cavidade do molde os compostos de moldagem termofixos devem ser convertidos em um material fluido através da aplicação de calor, mas sem que a reação de endurecimento ocorra de forma excessiva. Após a moldagem final, a reação de endurecimento é desencadeada pelo fornecimento renovado de calor acionados para que eles façam a transição para o estado de material sólido reticulado

Um equipamento de injeção possui dois componentes principais, a injetora e o molde de injeção. O ciclo de injeção envolve uma etapa com o molde fechado para receber o material fundido, a sua estabilização por resfriamento e então ocorre a abertura do molde e liberação da peça injetada, conforme o esquema ilustrativo da Figura 1.

Figura 1 - Esquema ilustrativo de uma injetora.



Fonte: Harper, 2003.

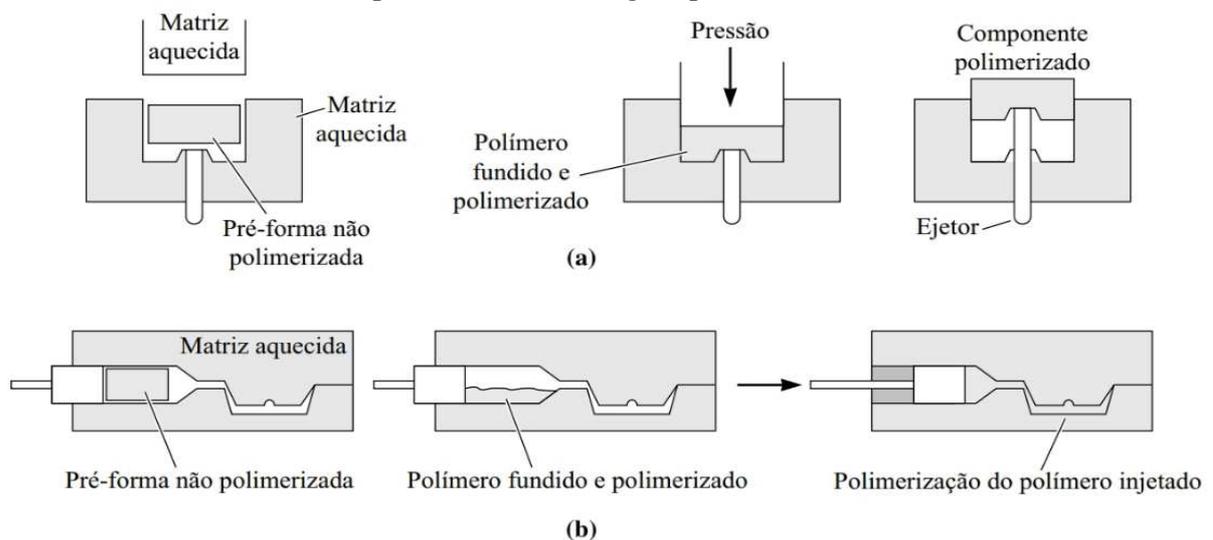
Os moldes de injeção para processamento de compostos de moldagem termofixos são geralmente aquecidos eletricamente, ou seja, aquecimento por resistência elétrica na forma de

cartuchos de aquecimento, aquecedores tubulares ou tiras de aquecimento, e isso é regulado por sensores de temperatura localizados na ferramenta, o mais próximo possível da cavidade. Mas também existe a possibilidade de aquecer a ferramenta com óleo de transferência de calor. As temperaturas típicas da ferramenta estão entre 140 e 180 °C. As perdas gerais de calor e os efeitos da chaminé podem ser reduzidos ou evitados isolando todos os lados com painéis isolantes. Os tempos típicos de injeção são de 5 a 10 segundos, dependendo do tamanho do componente (English, 2015).

Quanto ao processo de moldagens de transferência, constitui, tecnicamente, um processo evolutivo intermédio entre a moldagem por compressão e a moldagem por injeção. Ou seja, consiste em colocar uma certa quantidade de material em forma de pastilha, em uma câmara de pressão e força, transferindo este material por meio de calor e pressão de um pistão, fazendo-o fluir para as cavidades do molde fechado para cura final.

Segundo Askeland (2019), na moldagem por transferência de polímeros termofixos, usa-se uma câmara dupla, na qual o polímero é aquecido sob pressão em uma câmara e após fundido, é injetado na cavidade da matriz. Esse processo permite que algumas configurações da moldagem por injeção possam ser usadas para polímeros termofixos. Como pode-se observar na Figura 2.

Figura 2 - Processos típicos de conformação de polímeros termofixos: (a) moldagem por compressão e (b) moldagem por transferência.

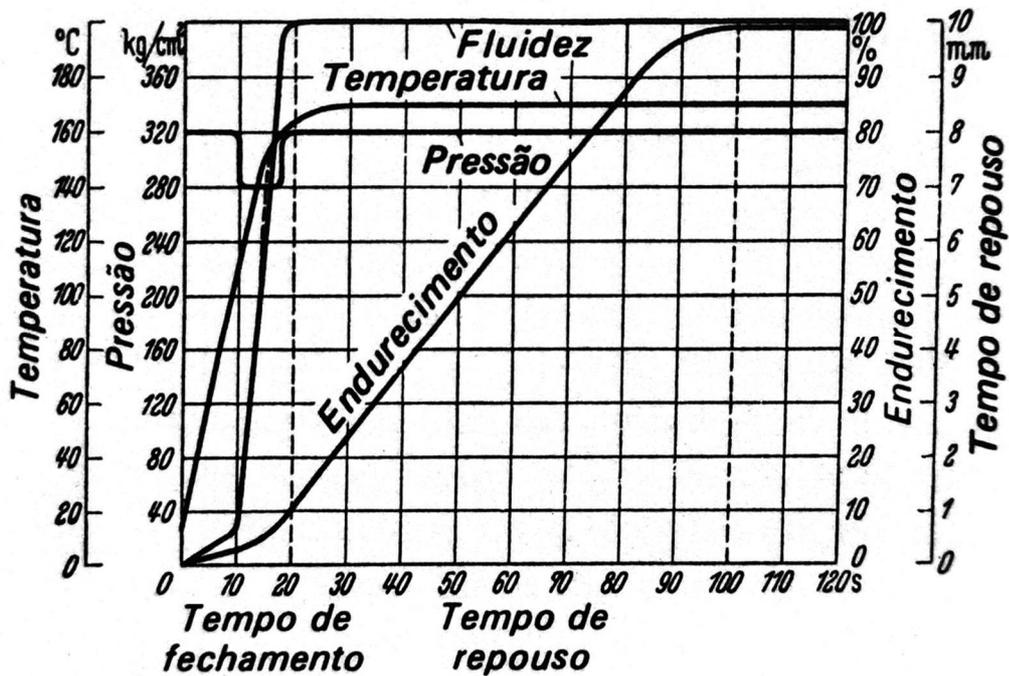


Fonte: Askeland, 2019.

Em geral os parâmetros fundamentais para ambos processos de injeção e transferência são a temperatura, tempo, pressão de injeção, temperatura do molde, pressão de fechamento do molde e tempo de estabilização para abertura do molde.

Segundo Nielsen (1977) o desenvolvimento de processos no molde, desde o enchimento até o final do período de endurecimento, pode ser representado por 4 curvas que representam a variação em função do tempo de 4 fatores, que são: temperatura, pressão, fluidez e endurecimento. Conforme a Figura 03.

Figura 3 - Etapas durante a transferência de termofixos



Fonte: Nielsen, 1977.

Conforme Nielsen (1977) as principais etapas de processo são:

a) A fluidez é medida a partir do momento em que a pressão começa a ser aplicada até o momento em que a forma é completamente fechada. Ela começa quando a temperatura da massa prensada é suficiente para amolecê-la, permitindo que ela flua rapidamente após o amolecimento, sem oferecer resistência à pressão. Com o passar do tempo e o aumento da temperatura, a fluidez diminui gradualmente devido ao início do endurecimento. A relação entre fluidez e tempo fornece uma representação dinâmica do processo tecnológico de estampagem das massas prensadas. O período durante o qual a massa prensada flui é conhecido como tempo de fechamento.

b) O endurecimento é medido como a fração da dureza máxima que pode ser alcançada para um determinado material prensado. Ele é influenciado exclusivamente pela temperatura da massa prensada. A velocidade de endurecimento dobra para cada aumento de 10°C na faixa de temperatura de 120 a 180°C. Uma vez que a massa prensada atinge a temperatura do molde, a velocidade de endurecimento se mantém constante. Mesmo após o fechamento do molde, o

endurecimento não é completo, sendo necessário um tempo adicional, chamado tempo de repouso.

c) A pressão é aplicada ao molde pela prensa. Quando a pressão hidráulica é eficiente o suficiente, não se observa uma queda na pressão durante a prensagem. No caso da pressão mecânica, que oferece uma alimentação de pressão mais limitada, pode ocorrer uma diminuição da pressão durante o período de máxima fluidez. A relação entre pressão e tempo é importante em situações onde se espera uma alta fluidez e uma pressão limitada.

d) A temperatura da massa prensada é influenciada por três fontes de calor: o calor proveniente do contato com as paredes aquecidas do molde, o calor gerado pelo atrito durante a fluidez sob pressão e o calor liberado durante o processo de endurecimento. Das três fontes, apenas as duas primeiras são relevantes para produtos de parede fina; a terceira só é significativa para grandes quantidades de massa prensada. O aquecimento inicial da massa prensada ocorre, principalmente, devido ao contato direto com as paredes do molde, dependendo da condutividade térmica da massa. Após o amolecimento, é adicionado o calor gerado pelo atrito interno durante a fluidez. Pré-aquecendo as massas prensadas, parte do calor pode ser transferido fora do molde, reduzindo assim o tempo de fechamento. A relação entre temperatura e tempo é particularmente importante quando há um aumento significativo do calor de reação.

2.2.1 Cura e pós-cura

Quando o material de moldagem é injetado na cavidade da ferramenta aquecida, começa o processo de endurecimento, ou seja, a formação da estrutura molecular da resina, que inicialmente é composta de moléculas oligoméricas. Ao final do ciclo de moldagem por injeção, o endurecimento deve estar avançado o suficiente para que as peças moldadas estejam livres de bolhas e mantenham sua forma dimensional, podendo então ser removidas do molde. Após a remoção, as peças esfriam em temperatura ambiente, continuando o endurecimento do material ainda quente.

Segundo English (2015), durante o processo de moldagem, a temperatura típica do molde para compostos de resina fenólica varia de 170 a 180 °C. Além da reticulação molecular, há também um processo de endurecimento através da conversão de pontes de amina em pontes de metileno. No entanto, o endurecimento completo das peças não é alcançado após a moldagem por injeção devido a diversos fatores.

À medida que o endurecimento progride, a temperatura do material se aproxima da temperatura de moldagem, mudando de um estado elástico baseado em entropia para um estado elástico baseado em energia. Nesse estado, o endurecimento continua, mas em um ritmo mais lento devido à reduzida mobilidade molecular. Esse endurecimento incompleto é importante para aplicações em que as peças estarão sujeitas a altas temperaturas durante o uso.

Após a moldagem, as peças podem passar por um processo adicional chamado revenido, no qual são expostas a temperaturas elevadas em fornos para aumentar sua dureza ou temperatura de transição vítrea. Durante o revenido, é crucial garantir que as peças não sejam expostas a temperaturas acima de sua temperatura de transição vítrea, pois isso pode comprometer suas propriedades mecânicas e dimensionais.

Ainda de acordo com English (2015), o aumento da temperatura de transição vítrea durante o revenido visa melhorar a estabilidade dimensional e as propriedades termomecânicas das peças moldadas, especialmente em altas temperaturas. No entanto, é importante controlar cuidadosamente o processo de revenido para evitar danos às peças, como porosidade e redução na resistência.

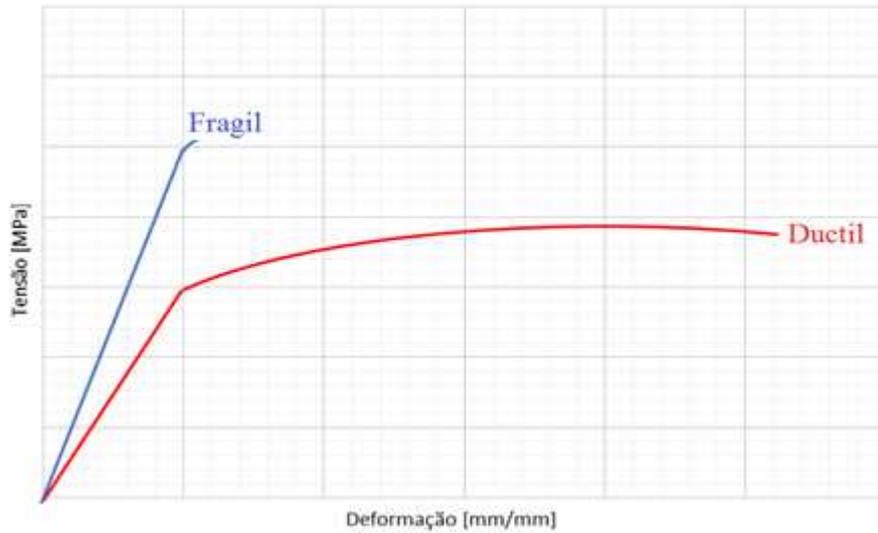
O aumento da dureza durante o revenido ajuda a reduzir a tendência à deformação das peças e a aumentar sua resistência mecânica, mas pode resultar na liberação de gases que podem causar porosidade. As reações químicas durante o revenido, geralmente, ocorrem em temperaturas entre 200 e 240 °C, enquanto a decomposição dos materiais só começa acima de 250 °C.

2.3 COMPORTAMENTO DO PRODUTO TERMOFIXO MOLDADO

Os materiais termofixos são frágeis e não apresentam uma fase de escoamento, ou seja, praticamente não existe um ponto característico que define início da fase plástica. Conforme descrito por Callister (2000), a deformação típica até a fratura é bastante limitada, situando-se entre 1,5% e 2% em condições de tração.

A curva tensão versus deformação da resina fenólica apresentada na Figura 4 demonstra que durante solicitação de tração esta assemelha-se muito à curva de materiais altamente frágeis, lembrando materiais cerâmicos, uma vez que a ruptura ocorre ainda na porção elástica da curva, sem deformação permanente prévia à quebra. A carga de tração crescente provoca uma deformação elástica e logo ao ultrapassar o limite de proporcionalidade, o corpo de prova rompe-se.

Figura 4 - Curvas típicas para materiais flexíveis (plásticos) e rígidos (frágeis).



Fonte: Adaptado de ASTM D638.

Então para o ensaio de materiais frágeis, as tensões a serem observadas no diagrama são o limite de proporcionalidade, que é a tensão até a qual vale a Lei de Hooke, e esta região da curva pode ser bem reduzida, como no caso de ferros fundidos cinzentos ou brancos. E o limite de ruptura, que é definida como o ponto máximo da curva tensão-deformação, para caracterizar as propriedades de resistência mecânica. O ponto de ruptura, coincide com o máximo da curva tensão-deformação, portanto a tensão de limite de resistência, coincide com a tensão de ruptura, diferentemente do comportamento dos materiais dúcteis.

2.4 MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS

A presente etapa deste trabalho aborda o aprofundamento na teoria que envolve a análise estrutural deformacional, utilizando a abordagem da metodologia de elementos finitos e estabelecendo conexões significativas com o método apresentado no contexto.

Os programas de elementos finitos são ferramentas que dependem da “capacidade que o engenheiro apresenta em entender a natureza física do fenômeno que se propõe a resolver [...] tecendo hipóteses sobre o comportamento do sistema estrutural a ser analisado, que constituirão a base para um bom desenvolvimento do projeto” criado e desenvolvido no programa para obtenção de respostas confiáveis (Alves Filho, 2000).

A utilização desse método numérico num contexto industrial apresenta-se como uma importante ferramenta para solução de problemas estruturais, uma de suas vantagens é a

possibilidade de profunda geração de conhecimento sobre o produto sem que haja necessidade de fabricação de protótipos físicos. Assim, estas ferramentas de simulação numérica permitem significativa redução de custos e prazos para desenvolvimento de novos produtos.

2.4.1 Sobre o Método de Elementos Finitos

Para Azevedo (2003), na necessidade de análise de uma estrutura por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), deve-se levar em consideração alguns aspectos: geometria da estrutura, material de construção e as solicitações externas aplicadas. Há diferentes tipos de análises, tais como: análise estática, dinâmica, linear e modal.

Em se tratando da análise estática, Alves Filho (2008), afirma que esta é realizada em estruturas, onde a ação de um carregamento não varia ao longo do tempo, ou varia tão lentamente, que em cada instante é correto considerá-lo estático. No caso de uma análise dinâmica são observados os efeitos das acelerações que causam variação de velocidade dos componentes e fazem com que os carregamentos variem rapidamente com o tempo, tirando assim a estrutura da sua condição de equilíbrio estático.

O MEF é descrito por Amaral (2016) como um método que

“consiste na discretização da geometria do componente estudado em um número finito de elementos conectados entre si por nós que representam de maneira aproximada o domínio contínuo. Após a geração da malha utilizando os elementos que melhor representam o fenômeno físico a ser estudado, é necessário informar as características do material, as condições de contorno e o carregamento ao qual o mesmo está submetido. Para alguns tipos de elementos é necessário fornecer informações complementares que não estão presentes na geometria modelada, tais como a seção transversal, necessária quando se utiliza elementos de viga ou a espessura, necessária ao elemento de casca (Amaral, p.26, 2016).

Nas análises dinâmicas de uma estrutura são consideradas as ações causadas pelas forças de inércia associadas às acelerações de cada membro que a compõem, por outro lado, a análise estática, considera que essas forças são aplicadas de forma lenta e não causam efeito suficiente (Azevedo, 2003).

Conforme Azevedo (2003), a análise linear e não linear se difere em relação às considerações feitas sob a geometria da estrutura. Em uma análise linear, essas considerações são sob a geometria, inicialmente, sem deformação aparente, por outro lado, a análise não linear considera a geometria deformada pela ação das tensões e carregamentos. Já na visão de Alves Filho (2008), tanto a análise linear quanto a análise não linear de uma estrutura estão relacionada ao conceito de rigidez, sendo que na análise linear a rigidez da estrutura não se

altera à medida que o carregamento se manifesta, por outro lado, em uma análise não linear a rigidez da estrutura é dependente do estágio do carregamento em que ela se encontra.

2.4.2 Sistemas discretos

Conforme Azevedo (2003), a discretização de sistemas contínuos permite a análise nodal de uma estrutura, por meio da qual, calcula-se o deslocamento de cada nó. Este deslocamento elucidada sobre o comportamento de cada elemento da estrutura, e finalmente, o comportamento de cada elemento integra o comportamento da estrutura simulada como um todo. Para discretizar sistemas contínuos, o MEF divide o domínio (sistema) em subdomínios chamados elementos finitos de geometria simples, como triângulos e/ou retângulos para análise bidimensional. Esses elementos são conectados por pontos chamados pontos nodais ou simplesmente nós. Dentro de cada elemento, os valores dos campos de deslocamentos nos nós são calculados por meio de funções de aproximação, conhecidas como funções de interpolação polinomiais. As incógnitas do problema tornam-se os valores dos deslocamentos nos nós, conhecidos como graus de liberdade elementares. Isso permite a montagem das matrizes dos elementos para construir matrizes e vetores globais, levando em consideração as condições de compatibilidade e equilíbrio nos nós compartilhados por elementos vizinhos. Por fim, são aplicadas as condições de contorno necessárias para resolver o sistema de equações.

Na maioria das situações, as complexidades associadas à condução de ensaios experimentais em estruturas de engenharia complexas, como fuselagens de aeronaves e *risers*, tornam os métodos numéricos a escolha preferencial em muitas aplicações práticas. O objetivo é simular a realidade, e, nesse contexto, o MEF tem se destacado nos últimos anos como uma ferramenta numérica na modelagem de diversos sistemas de engenharia. Isso se deve às suas numerosas vantagens, como a capacidade de realizar uma variedade de análises e obter soluções viáveis. O MEF é amplamente reconhecido como uma ferramenta universal para análise estrutural, com vários softwares comerciais, incluindo ALTAIR e ANSYS, baseados nessa abordagem numérica.

No MEF, a região sob investigação é representada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos, previamente, definidos. A capacidade de dispor esses elementos em diversas configurações permite a modelagem de formas geométricas bastante complexas. Além disso, o método oferece ao projetista uma considerável flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, tornando-o o método mais empregado em análises estruturais (Sanchez, 2001).

2.4.3 Méritos e Limitações do Método

A principal força desse método reside em sua versatilidade, ou seja, na possibilidade de aplicá-lo a uma variedade de problemas. O objeto em análise pode apresentar superfícies, cargas e condições arbitrárias. A malha criada para discretizar o problema, pode consistir em diferentes tipos de elementos (Cook, 1989). É relevante destacar que, com o avanço tecnológico dos computadores, o método tornou-se acessível, possibilitando a obtenção de soluções realistas em computadores pessoais convencionais.

A desvantagem do método reside, principalmente, em sua natureza numérica, que resulta em uma solução aproximada do problema. Além disso, sua aplicação requer o conhecimento prévio por parte dos usuários para evitar erros na obtenção e interpretação dos resultados (Cook, 1989).

2.4.4 Considerações Importantes para Análise Estrutural

Ao enfrentar a necessidade de resolver um problema de análise estrutural, a primeira consideração é a classificação do problema em relação à geometria, ao comportamento do material e às cargas aplicadas. A formulação e aplicação do método de elementos finitos dependem, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema, como se a estrutura está sujeita a esforços estáticos ou dinâmicos, é linear ou não linear, além do tipo de estrutura a ser analisada, como abordado brevemente a seguir (Azevedo, 2003).

2.4.5 Tipos de Estruturas para Análise

O (MEF) é um método numérico para aproximação de equações diferenciais parciais oriundas da análise de tensão e deformação. Pode ser aplicado na solução de inúmeros problemas de engenharia, para resolver equações de problemas estruturais e problema de modelagem da estrutura (Guimarães, 2012)

A classificação dos elementos estruturais, refere-se à sua geometria, sendo essa classificada como reticuladas, laminares ou sólidas, sendo descrita por Azevedo (2003) como:

- Estruturas laminares: desenvolvem-se para ambos os lados de uma superfície média, permanecendo em sua vizinhança. Podem ser parede, laje ou casca plana, dependendo se a superfície média é plana ou não.

- Estruturas reticuladas: consistem em barras prismáticas, sendo os pórticos e treliças distinguidos pela consideração ou não da compatibilidade de rotações nas extremidades das barras adjacentes.
- Estruturas sólidas: são os elementos que não se enquadram às laminares e reticuladas. Ou seja, estruturas que possuem dimensões consideráveis nos 03 eixos que envolve geometria e cargas que se repetem ao longo de um eixo retilíneo, podendo ser estudada em duas ou três dimensões.

O autor, também aponta para a análise de estruturas axissimétricas, onde a estrutura é um sólido de revolução e as cargas são axissimétricas em relação a um eixo. Podem ser diferenciados os casos de sólido e lâmina de revolução.

2.4.6 Modelo de cálculo através da matriz de rigidez

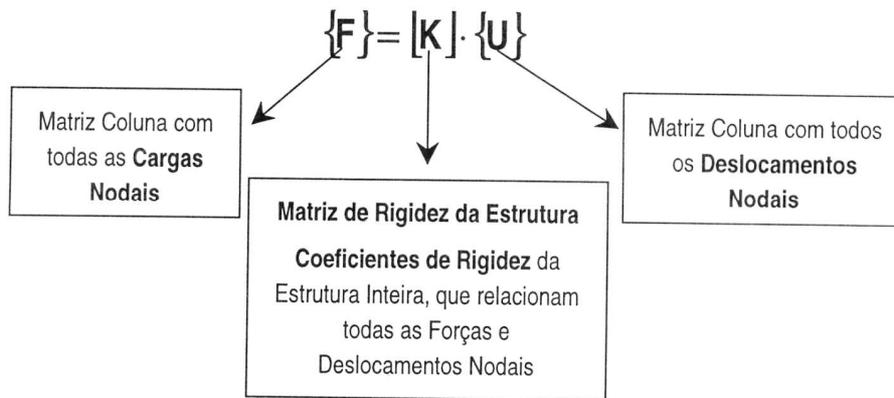
A discretização do corpo, tal como em qualquer análise diferencial, mantém-se em equilíbrio na ausência de cargas externas. Contudo, ao aplicar uma carga, ocorre a transferência dessa carga através das forças de interação, gerando esforços discretos entre os nós do sistema. De forma similar, as forças de interação entre os elementos de um sistema são expressas por meio de esforços discretos nas suas juntas e nós (ALVES FILHO, 2000).

Portanto, a função primordial do método de elementos finitos é estabelecer a relação entre essas forças e os deslocamentos nodais de cada elemento individual. Essa relação está intrinsecamente ligada ao conceito de rigidez, que pode ser compreendido como a interação entre a força aplicada e o deslocamento resultante.

Um exemplo intuitivo desse conceito é o coeficiente elástico de uma mola, que expressa a relação linear entre a força aplicada axialmente na mola e o deslocamento resultante.

Assim, ao determinar o coeficiente de rigidez do problema matemático em todos os nós da malha gerada e conhecendo os valores das forças nodais, torna-se possível calcular a deformação equivalente em cada ponto do corpo estudado. A Figura 5 apresenta o esquema da notação matricial previamente explicada, onde é possível observar a matriz das cargas nodais como o resultado da multiplicação entre a matriz de rigidez da estrutura e os deslocamentos nodais do sistema discreto.

Figura 5 - Esquema da notação matricial do modelo discreto.



Fonte: Alves Filho, 2000.

A sequência de cálculos e transformações de matrizes para a construção da matriz de rigidez do sistema é proposta através da solução de um sistema discreto em quatro etapas:

- Discretização do domínio do problema (transformar o sistema em um conjunto de elementos).
- Equilíbrio do elemento (condições de equilíbrio de cada elemento em relação às variáveis).
- Equilíbrio do conjunto (interconexão de elementos para estabelecer um conjunto de equações simultâneas).
- Cálculo de resposta (a resposta de cada elemento é calculada com base nas variáveis e utilizando os requisitos de equilíbrio do elemento).

Ainda segundo ALVES FILHO (2000), a etapa inicial consiste na idealização do sistema, determinando o número de graus de liberdade de cada elemento para dimensionar a matriz de rigidez correspondente. Por exemplo, um elemento bilinear com quatro nós e dois graus de liberdade em cada nó terá uma matriz de rigidez 8x8.

Em seguida, aplica-se um deslocamento unitário para calcular as forças resultantes em cada nó e sua transferência aos nós subsequentes, revelando o sentido do deslocamento da malha.

A matriz de rigidez é analisada para determinar a rigidez e o sentido do deslocamento de cada grau de liberdade permitido, considerando zero para os graus de liberdade restritos. Na análise de materiais isotrópicos, a simetria da matriz indica linearidade elástica.

Na terceira etapa, o equilíbrio do conjunto é alcançado determinando-se a matriz de rigidez da estrutura através da superposição das matrizes dos elementos. Isso envolve a conexão

entre os deslocamentos dos nós por meio do somatório dos coeficientes elásticos das matrizes de rigidez.

Por fim, na etapa final, calcula-se a resposta, identificando os pontos com restrição de movimento e sem restrição para simplificar a matriz em duas partes.

2.4.7 Tipos de elemento, malha e contatos

O método de elementos finitos requer algumas definições vinculadas ao pré-processamento para que haja uma adequação a análise que será executada. No caso específico da utilização do Ansys é importante o estudo, e posterior escolha, dos elementos requisitados para a análise, do tipo de malha que deve ser gerada e, por fim, dos contatos aplicados no modelo virtual.

A seleção do tipo de elemento para modelagem é crucial, pois deve satisfazer as exigências tanto da análise térmica, quanto da estrutural mecânica. Antes de escolher o elemento apropriado, é importante entender cada tipo disponível.

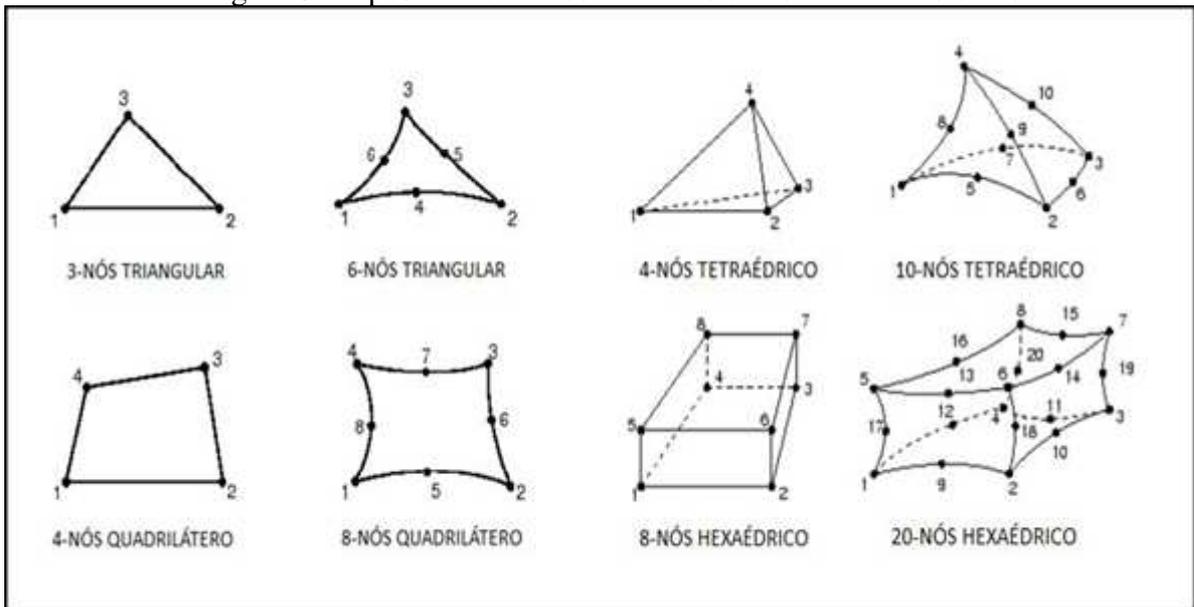
No Ansys, tanto em análises bidimensionais, quanto tridimensionais, existem duas formulações principais de elementos: triangular ou quadrilátero para bidimensional, e tetraédrico ou hexaédrico para tridimensional. Essas formulações podem ser de primeira ou segunda ordem.

Os elementos de primeira ordem têm um nó por aresta, resultando em três ou quatro nós para elementos bidimensionais e quatro ou oito para elementos tridimensionais. Já os elementos de segunda ordem têm um nó por aresta mais um nó no centro de cada linha, proporcionando uma análise mais detalhada. Esses são recomendados para geometrias complexas ou áreas de concentração de tensão.

Para elementos de segunda ordem, os números de nós por elemento são seis ou oito para bidimensionais e dez ou vinte para tridimensionais. A escolha do elemento depende do modelo aplicado, bidimensional ou tridimensional, e da necessidade de refinamento.

A Figura 6 apresenta os elementos típicos que podem ser utilizados em malhas do *software* Ansys.

Figura 6 - Tipos de elementos bidimensionais e tridimensionais



Fonte: ESSS, 2011.

A seleção adequada da malha na modelagem é crucial para alcançar a convergência nos modelos estudados. A definição do tipo de malha e do refinamento necessário na região crítica ou pontos frágeis já conhecidos, garante uma análise precisa com custo computacional razoável.

Existem dois tipos principais de malha:

- Malha não estruturada ou livre: ideal para geometrias complexas, pois não segue nenhum padrão geométrico específico.
- Malhas estruturadas: apresentam um padrão regular de distribuição de elementos, sendo quadriláteras para superfícies bidimensionais e hexaédricas para geometrias tridimensionais. São indicadas para áreas e volumes retangulares.

A malha livre oferece flexibilidade na adaptação à geometria e gera um grande número de elementos, porém requer elementos tetraédricos de alta ordem, resultando em alto custo computacional. Por outro lado, a malha estruturada gera menos elementos e pode usar elementos de baixa ordem, acelerando o processamento, mas é mais difícil de aplicar em geometrias complexas e requer regularidade na forma e na discretização da malha.

Ao determinar o número de elementos da malha, é recomendado aumentar gradualmente e avaliar os resultados para garantir a convergência. Após um certo número de refinamentos, pequenas variações nos resultados indicam a convergência da análise. Caso contrário, pode indicar singularidades no modelo, como concentração de tensão ou restrição de movimento.

Uma abordagem útil é usar ferramentas de refinamento local na geometria, especialmente em zonas secção transversal restrita e transições de geometria, para concentrar elementos, onde ocorre concentradores de tensões. Isso otimiza o número de elementos, resultando em um processamento mais eficiente dos resultados.

A seleção de contatos no software Ansys define a interação entre as peças de um componente montado, sendo crucial para garantir que a simulação corresponda à realidade. Um contato é a ligação entre duas superfícies, transmitindo forças normais e tangenciais sem interpenetração. Esse contato transmite forças compressivas normais e forças friccionais tangenciais, podendo ou não transmitir forças tensoras normais, dependendo da possibilidade de separação das superfícies (ANSYS, 2012 *apud* Vetturazzi, 2013).

O Ansys emprega dois modelos de contatos:

1. Contato Linear: Neste modelo, o contato entre as superfícies permanece constante, sem variação na extensão do comprimento ou área de contato. Isso ocorre devido à ausência de um coeficiente de fricção entre as superfícies, impedindo uma interação dinâmica durante o processamento computacional.

Existem dois tipos de contato linear: o Contato *Bonded*, que não permite separação ou deslizamento entre as superfícies de contato, e o Contato *No Separation*, que permite pequenos deslizamentos tangenciais entre as superfícies, mas não considera penetrações ou folgas, mantendo as superfícies em contato perfeito. (ESSS, 2010 *apud* Vetturazzi, 2013).

2. Contato Não-Linear: Este modelo permite a separação entre as superfícies, resultando em mudanças na área de contato durante a análise. É especificado um coeficiente de atrito do contato para uma análise mais precisa e próxima da realidade.

Os contatos não lineares são divididos em três tipos: *Frictionless*, que permite a separação e deslizamento tangencial sem impedimentos; *Frictional*, semelhante ao *Frictionless*, mas com um coeficiente de atrito definido pelo usuário; e *Rough*, que permite a separação das superfícies, mas não o deslizamento tangencial, com um coeficiente de atrito considerado infinito (para modelar condições específicas).

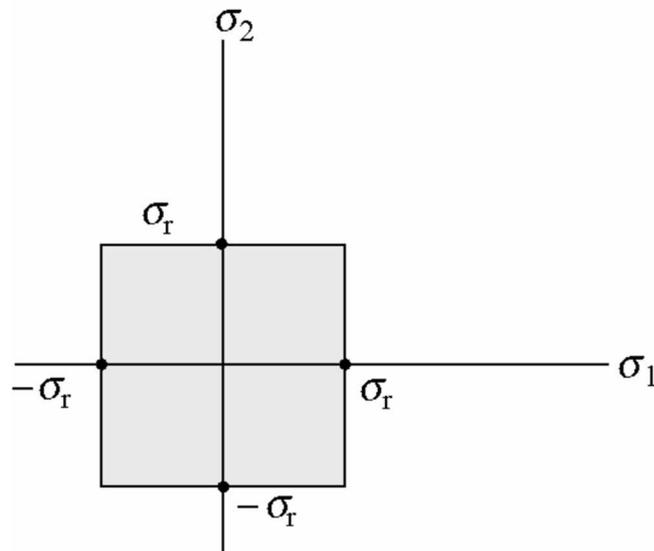
2.5 CRITÉRIO DE FALHA PARA MATERIAIS FRÁGEIS

A simplicidade do critério de Rankine é uma vantagem significativa, especialmente para materiais frágeis como cerâmicas, vidros e alguns polímeros. Ele fornece uma maneira direta de prever a falha com base em tensões principais, sem a necessidade de considerar tensões cisalhantes ou estados de tensões complexos.

Segundo Timoshenko (1980), a falha de materiais frágeis é caracterizada pela iniciação e propagação de trincas. Este processo é governado pela tenacidade à fratura do material e pelo fator de intensidade de tensão na ponta da trinca.

De acordo com Ensus (2024), materiais frágeis, por sua natureza, têm propensão a falhas abruptas por fratura, sem apresentar escoamento aparente. Em um ensaio de tração, a fratura ocorre quando a tensão normal atinge o limite de resistência. A teoria da tensão normal máxima Rankine estabelece que um material frágil falha quando a tensão principal máxima (σ) atinge um valor igual ao limite de resistência suportado pelo material sob tração simples. Caso o material esteja submetido ao estado plano de tensões tem-se que: $|\sigma_1| = \sigma_r$. A figura 7 mostra graficamente a teoria da tensão normal máxima.

Figura 7 - Teoria da tensão normal máxima



Fonte: Ensus, 2024

No projeto de componentes feitos de materiais frágeis, a teoria de Rankine é frequentemente usada para garantir que as tensões principais máximas em qualquer ponto do componente permaneçam abaixo do limite de resistência do material. Isso é crucial para evitar falhas catastróficas que ocorrem de forma súbita e sem aviso.

3 METODOLOGIA

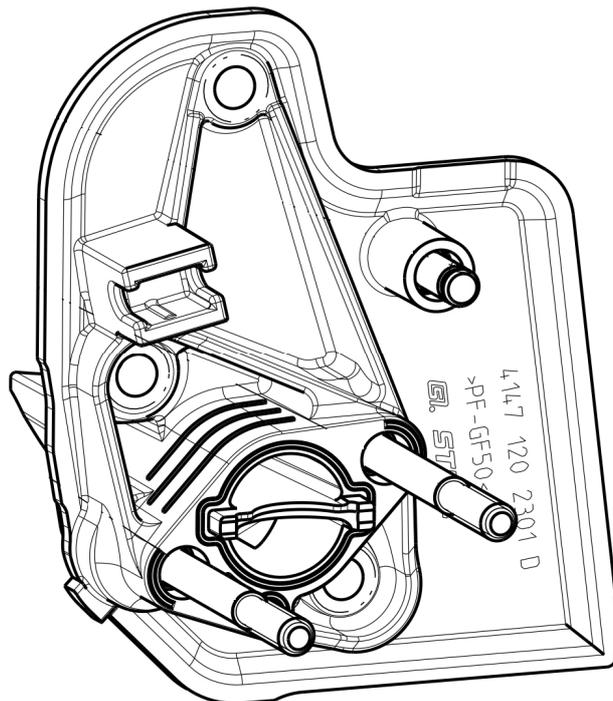
3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a descrição dos métodos e dos materiais utilizados para a realização dos experimentos. O estudo em questão trata-se da busca do entendimento e análise estrutural em componentes a base de pó fenólico, obtidos por processo de transferência, assim como, as etapas de execução do trabalho realizadas de forma a compreender o problema apresentado.

3.2 AVALIAÇÃO DO PROBLEMA

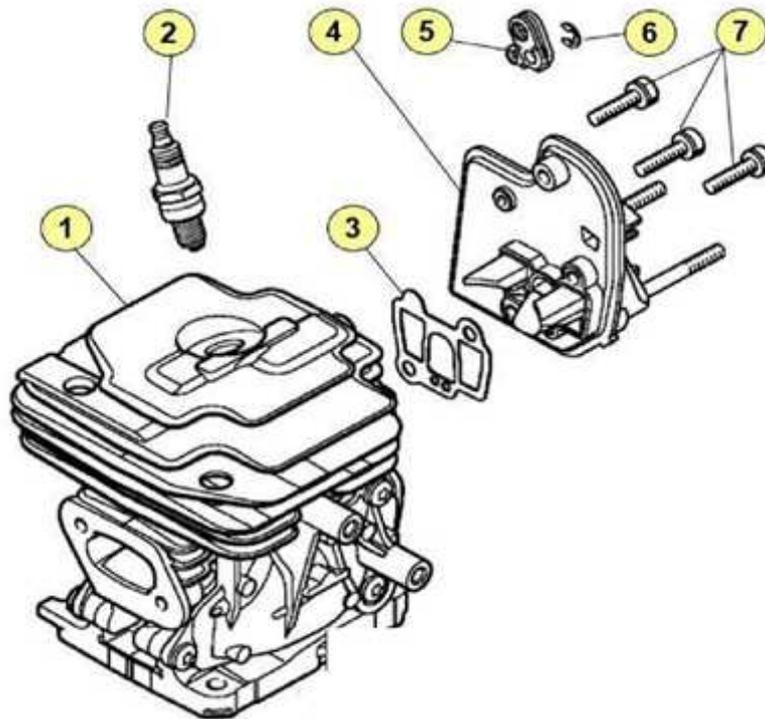
O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo, como já ressaltado na introdução, a necessidade de compreender a resistência e a carga suportada por um componente moldado, uma vez que esses aspectos estão diretamente ligados à sua integridade estrutural e funcionalidade. O item, conhecido como (Flange 4147-120-2301), representado na Figura 8, passa por uma série de testes durante a fase de homologação e, frequentemente, é submetido a novos testes para verificar a integridade e os coeficientes de segurança para o trabalho diário. Isso ocorre porque simula a condição de aperto manual em campo, onde os parafusos podem ser apertados com uma quantidade excessiva de torque.

Figura 8 - Imagem do componente



A Figura 9 apresenta a disposição de montagem, mostrando todos componentes que possuem interface com o objeto de estudo.

Figura 9 - Procedimento de montagem.



Fonte: Adaptado de SWN 42103-01, 2024

Nas instruções de aperto, ou seja, as normas de processo indicam a seguinte sequência:

- posicionar o cilindro (1) no dispositivo e apontar a vela (2) mínimo 3 voltas;
- fixar a vela (2) com parafusaderia eletrônica com soquete;
- reposicionar conjunto cilindro com vela no dispositivo;
- posicionar junta (3) no flange (4) e montá-los no conjunto do cilindro;
- posicionar 3x parafuso IS-M5x24 (7) no flange (4) e fixar com parafusaderia eletrônica com ponteira torx;
- montar alavanca (5) no flange (4) e montar o anel (6);
- armazenar o conjunto.

Além do torque de montagem de linha, o componente ainda é submetido, a testes de resistência em laboratório, onde novamente existe um requisito mínimo superdimensionado, visto que, já não existe coeficiente de segurança, nem sobre o torque aplicado na linha de montagem.

Na Figura 10, pode-se observar que se deseja um coeficiente de segurança de 1,4 para o aperto no cilindro e um coeficiente de segurança de 2,0 para o aperto de montagem no carburador. Estes coeficientes são valores arbitrados encontrados no manual de fornecimento.

Figura 10 - Norma SWN 42103-01.

SWN 42103-01		Torque de falha na direção do cilindro	
$\frac{\bar{M}_{\bar{U}}}{M_A} \geq 1,4$	= 13 N.m	$\frac{M_{\bar{U},min}}{M_A} \geq 1,2$	= 11 N.m

Torque de falha na direção do carburador			
$\frac{\bar{M}_{\bar{U}}}{M_A} \geq 2$	= 7 N.m	$\frac{M_{\bar{U},min}}{M_A} \geq 1,7$	= 6 N.m

- $\bar{M}_{\bar{U}}$: Torque médio de falha
- M_A : Torque de Aplicação
- $M_{\bar{U},min}$: Torque mínimo de falha

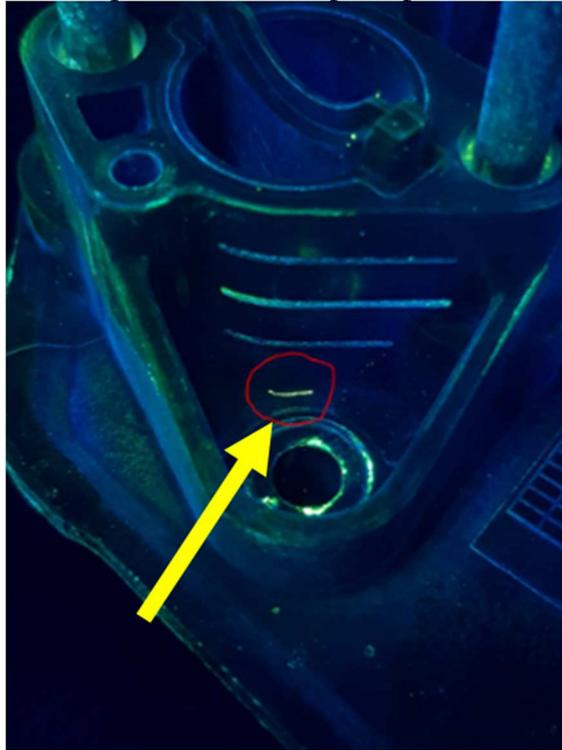
Fonte: Adaptado de SWN 42103-01, 2024

Para a certificação de integridade do produto, nos lotes de aprovação inicial do produto, após a montagem, o produto é desmontado e, minunciosamente, avaliado para verificação de possíveis falhas. Estas falhas no cenário atual se tratam de trincas ou micro trincas, quase imperceptíveis em uma inspeção visual, portanto é aplicado teste com líquido penetrante, mostrando uma trinca no componente como evidenciado na Figura 11.

No caso do teste de líquido penetrantes realizado na empresa “X”, é utilizado uma tecnologia de líquido fluorescente, com pó revelador e visível, somente em ambientes totalmente escuros e utilizando lâmpadas UVA. Esta tecnologia demanda uma área específica adequada, além de insumos de alto valor agregado, não sendo de fácil reprodução sem grandes investimentos.

Para a reprodução do ensaio de (LP) líquido penetrante na IPOS, foi utilizado outra tecnologia, sendo esta com o material de revelação visível a luz e olhar comum, sendo mais fácil de aplicar no ambiente industrial, e com nível de precisão equivalente ao ensaio realizado na empresa “X”.

Figura 11 - Trincas evidenciadas pelo ensaio de líquido penetrante na empresa “X”.



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 12 mostra os detalhes em uma amostra que apresentou uma trinca, que não havia sido observada em inspeção visual, sendo somente identificada após a aplicação do ensaio de LP.

Figura 12 - Trincas evidenciadas pelo ensaio de líquido penetrante realizado na IPOS



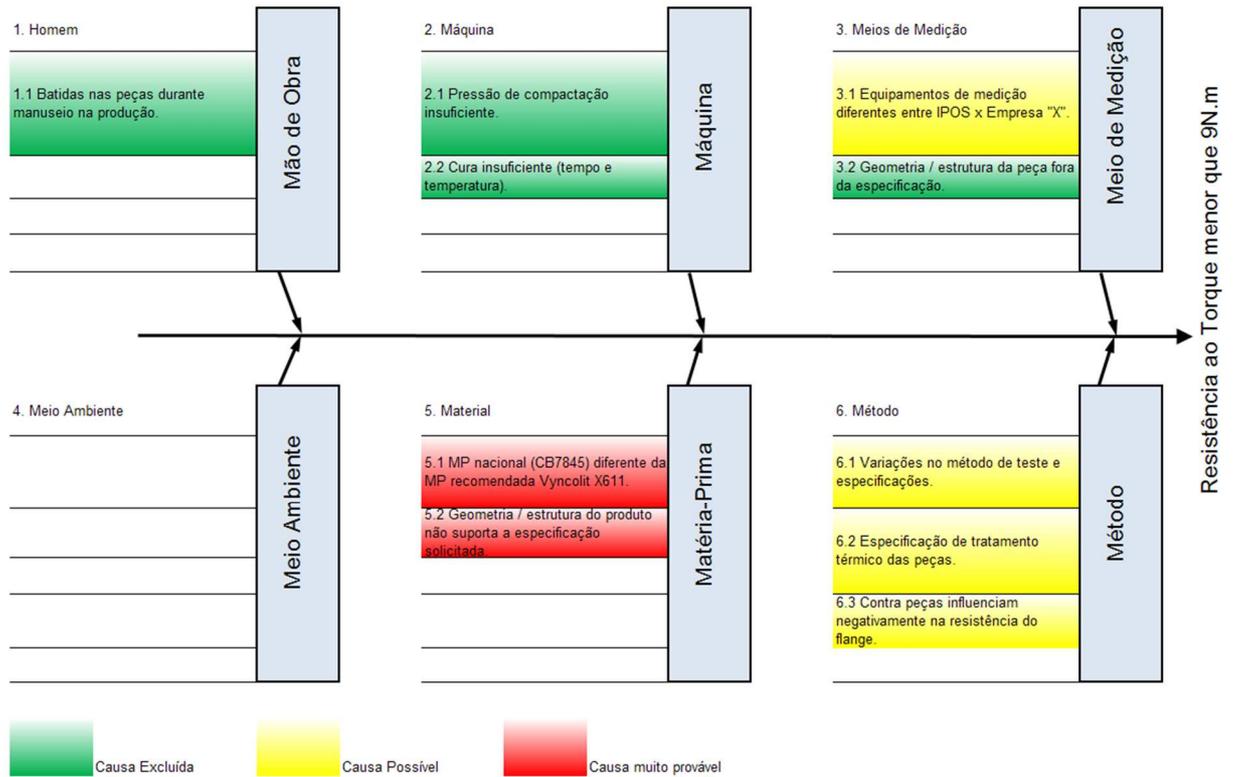
Fonte: Autor, 2024.

Estes testes de torque de aparafusamento e de ensaio de líquidos penetrantes, apenas fornecem informações iniciais do problema e não indicam quais mecanismos estão associados às falhas evidenciadas nos componentes, muito menos fornecem possibilidades de melhorias a serem implementadas.

Para entender melhor as possíveis causas das falhas evidenciadas, e proporcionar uma maior assertividade nas ações de correção, foi elaborado um Diagrama de Ishikawa, conforme Figura 13.

O Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta de análise de processos que auxilia na identificação das causas raízes de um problema ou efeito específico. Amplamente utilizado na melhoria de processos, resolução de problemas e identificação de oportunidades de melhoria, este diagrama oferece uma representação visual que facilita a compreensão das relações entre diversas causas potenciais e o problema central. Assim, as equipes podem visualizar de maneira mais clara as diferentes áreas que podem estar contribuindo para o problema.

Figura 13 - Diagrama de Ishikawa.
Ishikawa



Fonte: Autor, 2024.

Na busca das prováveis causas das falhas de se tratam de trincas evidenciadas nos itens 5.1 e 5.2 do diagrama, a análise de elementos finitos, surge como uma ferramenta capaz de simular com precisão o comportamento sob diferentes condições de carga, permitindo simular cenários complexos e oportunizar ajustes necessários no design dos componentes. Assim, para esse estudo pretende-se utilizou-se software de MEF, ANSYS para ajudar na identificação das falhas ou pontos críticos.

3.3 PROPOSTA DE TRABALHO

A análise estrutural tem como objetivo a determinação de respostas e resultados de uma estrutura quando esta é sujeita a ações externas. As respostas de interesse mais comuns na análise estrutural são: deslocamentos, deformações, tensões, esforços internos (momento fletor, esforço cortante, esforço normal, momento torçor).

Para obter os dados necessários para a análise por meio de software de elementos finitos, é imprescindível dispor de informações técnicas, eventualmente não acessíveis publicamente ou fornecidos de forma insuficiente no laudo técnico do fornecedor da matéria-prima.

A situação ideal demandaria a confecção de corpos de prova e posterior análise em equipamentos adequados para extrair os valores que são utilizados como *input*, para alimentar o software, tais como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansão térmica, resistência à tração, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, além do gráfico tensão *versus* deformação.

Assim, adotou-se uma abordagem mais simplificada, de considerar as propriedades divulgadas pelos fabricantes das matérias-primas avaliadas, como por exemplo informações de resistência à tração, módulo de elasticidade, deformação máxima, além de dados sobre a resistência à flexão, módulo de flexão e deformação antes da ruptura.

Serão utilizados os dados do pó de moldagem fenólico nacional CB-8018 (Anexo A) homologado para a confecção do produto, alvo deste estudo, e sua matéria-prima importada equivalente, denominada Vyncolit X611 (Anexo B).

Após a coleta de dados do material, o desenvolvimento de estudos com o Método dos Elementos Finitos (MEF) será utilizado com o objetivo de compreender o comportamento sob diferentes condições de carga, e oportunizar ajustes design.

O desenvolvimento segue uma sequência: modelagem geométrica detalhada da estrutura, geração de malha, atribuição de propriedades de material aos elementos, definição de condições de contorno e simulação da aplicação de cargas externas. A solução numérica das equações ocorre considerando as condições de contorno e as cargas aplicadas. Os resultados são pós-processados e comparados com critérios de projeto e normas aplicáveis.

A validação do modelo foi feita comparando os resultados do software com dados experimentais. Se os resultados convergem, o modelo é validado, assegurando confiabilidade, possibilitando na sequência a otimização e intervenções no modelo para aprimorar a eficiência da estrutura.

3.4 PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANSYS

O software escolhido para a etapa de simulação foi o ANSYS que utiliza o pacote Workbench desenvolvido para proporcionar um ambiente no qual, vários tipos de simulações possam ser realizados.

É através do ANSYS que se obtêm a análise estática de estruturas que tem por objetivo principal quantificar a magnitude de tensões e dos deslocamentos que se manifestam em qualquer sistema estrutural, quando ele é submetido a esforços. Neste caso, no momento que ocorre a montagem do item Flange 4147-120-2301, o esforço de torque de aparafusamento é

transferido pela área da cabeça do parafuso de fixação, sendo desprezado, a variação do tempo, forças de amortecimento e forças de inercia, que cada parafuso de fixação está sujeito.

3.4.1 Definição das propriedades do material utilizado

Um dos primeiros parâmetros para configurar a simulação é o material do qual o componente é constituído. A maioria das análises usando o MEF assume que o material é isotrópico e homogêneo. As principais propriedades dos materiais que são necessárias para a caracterização de um modelo para uma análise linear estática utilizando MEF são o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, o módulo de cisalhamento e a densidade do material, conforme observado na Figura 14.

Figura 14 - Propriedades do material CB-8018, criado na biblioteca do software ANSYS

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	<input checked="" type="checkbox"/> Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
4	Derive from	Young's... <input type="text"/>			
5	Young's Modulus	14000	MPa <input type="text"/>		<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,3			<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	11667	MPa		<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	5384,6	MPa		<input type="checkbox"/>
9	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	70	MPa <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	<input checked="" type="checkbox"/> Compressive Yield Strength	250	MPa <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor, 2024.

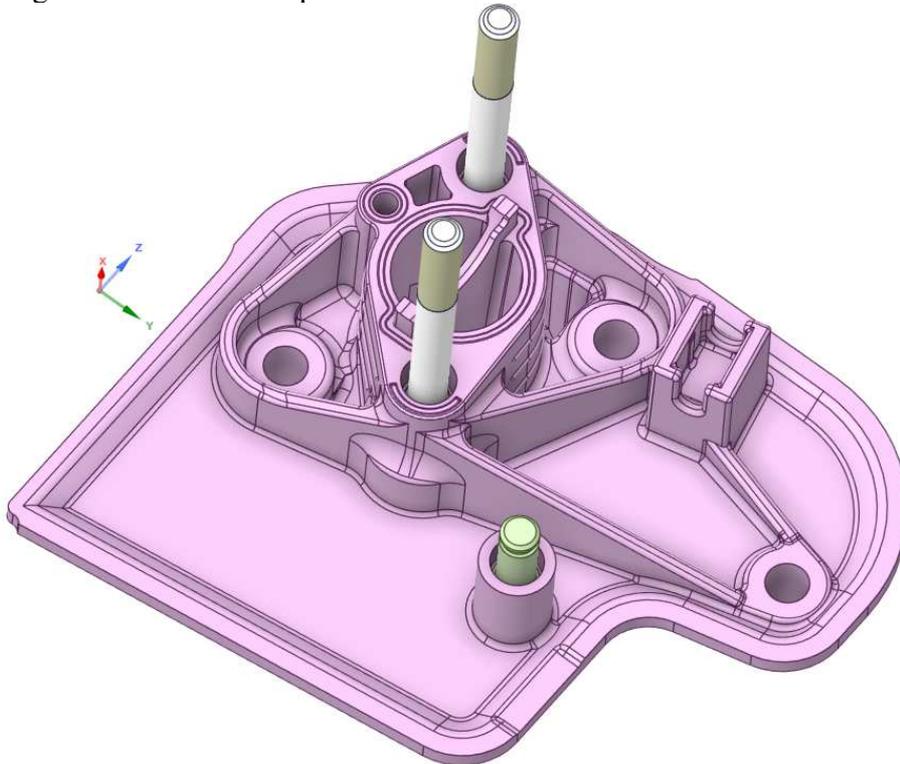
Como o módulo de cisalhamento não está disponível no *data sheet*, optou-se por utilizar o valor de limite de resistência a tração, sendo que os esforços trativos são o ponto frágil de materiais termofixos. Com estes dados de entrada o *software* calcula os valores referentes ao módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento do material.

3.4.2 Modelagem do Flange 4147-120-2301-D

O modelo 3D para utilização na simulação deve ter a geometria fiel ao componente final moldado, portanto deve ser verificado se não existem divergências de versões do mesmo produto, e se o dimensionamento do modelo corresponde em totalidade ao componente físico que apresenta falhas no momento do aparafusamento.

Além dos cuidados com a equivalência do modelo físico e o virtual, é necessário que o modelo 3D seja preparado para utilização no software ANSYS, verificando e corrigindo faces abertas, aristas desencontradas ou qualquer outra deformação que possa prejudicar ou impossibilitar as etapas seguintes da simulação. A Figura 15 apresenta o modelo proposto.

Figura 15 - Modelo importado na ferramenta workbench -ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

3.4.3 Definição dos elementos de malha

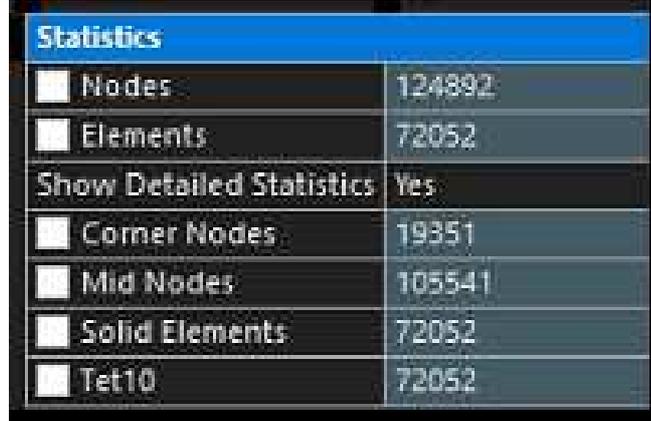
Considerando que se trata de uma geometria complexa, conforme ESSS (2011, *apud* Vetturazzi, 2013) é necessário que se use o modelo do tipo sólido com malha não estruturada ou livre, onde não ocorrem restrições geométricas. Nesta situação, a malha não segue nenhum padrão geométrico.

O *Element Size* (tamanho dos elementos) selecionado foi 2mm na configuração geral do componente e 1mm nas regiões consideradas críticas. Os demais parâmetros relacionados à malha foram deixados no padrão sugerido pelo ANSYS 2023R2.

Utilizando o método mais simples, o software utiliza o Controle Automático de Método, para tentar usar a varredura para modelos sólidos e geração de elemento quadrilateral para modelos de corpo de superfície. Se os corpos sólidos não puderem ser varridos, o corpo

será integrado ao gerador de malhas do Tetraedro em conformidade com o patch do software. Como resultado, obteve-se a configuração conforme apresenta a Figura 16.

Figura 16 - Estatísticas de malha workbench -ANSYS



Statistics	
Nodes	124892
Elements	72052
Show Detailed Statistics	Yes
Corner Nodes	19351
Mid Nodes	105541
Solid Elements	72052
Tet10	72052

Fonte: Autor, 2024.

Logo, a malha apresenta, aproximadamente, 125.000 nós (*nodes*) e, aproximadamente, 72.000 elementos, pois a versão educacional utilizada tem o limite de 128.000 nós.

3.4.4 Malha de elementos finitos

O processo de discretização no Método dos Elementos Finitos (MEF) é comumente referido como a geração da malha, sendo esta a forma de comunicação com o programa de MEF. A precisão da solução depende, substancialmente, da qualidade da malha, geralmente definida pela convergência do problema. A convergência é essencial para que os deslocamentos globais atinjam um valor estável, enquanto outros resultados devem convergir, localmente, para garantir a qualidade da solução.

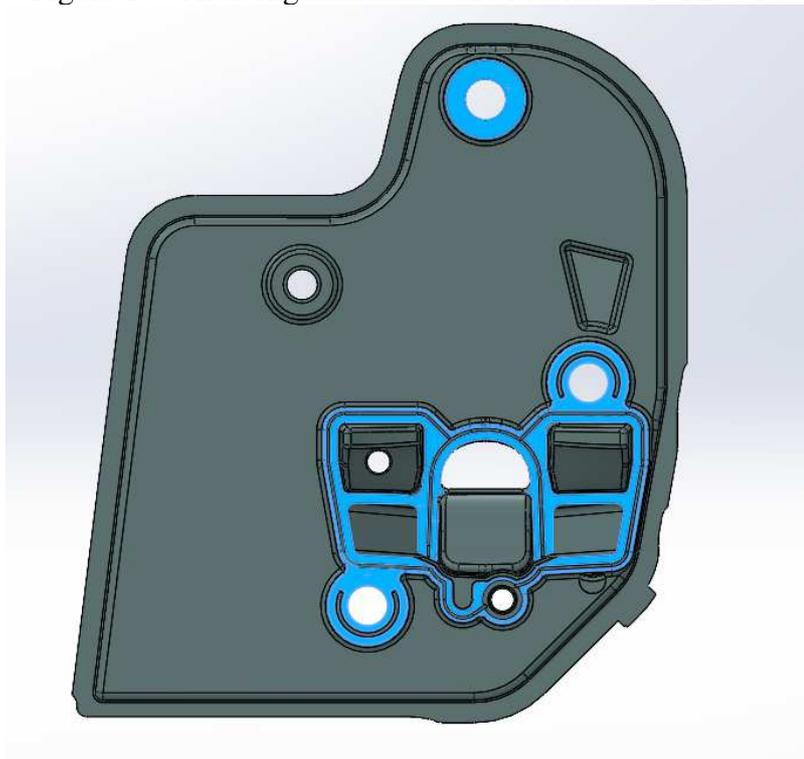
Uma abordagem que facilita o processamento de resultados é a utilização de ferramentas do *software* que permitem um refinamento maior da malha em locais específicos da geometria. Para Sousa (2014) é necessário considerar um aumento do refinamento da malha de elementos finitos de modo a precisar as zonas onde existam variações de tensões acentuadas, portanto, dependendo da complexidade da geometria e conexões da estrutura a ser analisada, o *Ansys* fornece opções para a seleção da malha a ser criada. Os tipos pré-estabelecidos são os *coarse* (grosseira), *medium* (intermediária) e *fine* (refinada).

3.4.5 Condições de contorno

As condições de contorno referem-se aos aspectos que não são intrínsecos ao modelo, mas são atribuídos a ele para representar com precisão o seu contexto de aplicação. Essas condições são incorporadas ao modelo como cargas e restrições. As cargas podem manifestar-se como forças, momentos, pressões, gravidade, entre outras formas. Por outro lado, as restrições podem ser aplicadas para evitar rotações ou deslocamentos induzidos pelas cargas em uma ou mais direções. Além disso, é viável impor ao modelo deslocamentos conhecidos para analisar a configuração dos esforços resultantes.

A área de engaste, que são os pontos de fixação e interface do componente com o cilindro do motor foi configurada no software ANSYS, como sendo uma superfície fixa, como destacada na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Área engastada software Mechanical - ANSYS



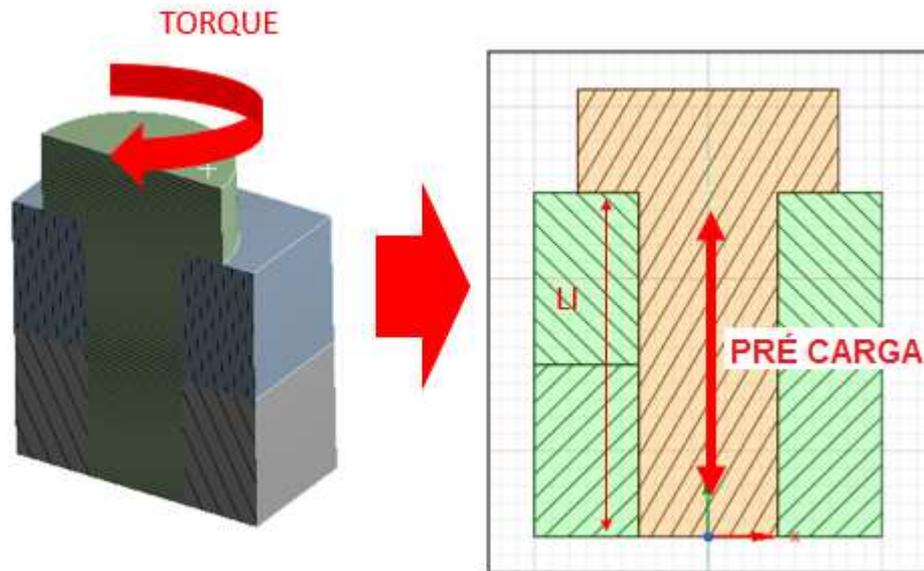
Fonte: Autor, 2024.

3.4.6 Configuração da análise

Para que a fixação seja realizada, é necessário aplicar uma força de pré-carga no parafuso, fazendo com que as peças sejam comprimidas (força de união).

A força de pré carga é atingida através do torque aplicado no parafuso e convertida em uma força axial no parafuso, gerando a força de compressão nas partes unidas como demonstrado na Figura 18.

Figura 18- Direção da Força de torque de aparafusamento



Fonte: Ensus, 2024

A força de pré carga teórica pode ser calculada pela equação (1)

$$F_{pc} = \frac{T}{K_t \cdot d_{nom}} \quad (1)$$

Onde:

- F_{pc} - Força de pré carga;
- T - Torque;
- K_t - Coeficiente de torque;
- d_{nom} - Diâmetro nominal do parafuso;

Onde K_t é calculado pela equação (2)

$$K_t = \left(\frac{r_t}{d_{nom}} \right) * \left(\frac{\tan \lambda + f_t \cdot \sec \alpha}{1 - f_t \cdot \tan \lambda \cdot \sec \alpha} \right) + \frac{f_{crc}}{d_{nom}} \quad (2)$$

Onde:

- r_t - raio médio da rosca;
- r_c - raio médio do colar de contato;
- f_t - coeficiente de atrito entre as superfícies da rosca;
- f_c - coeficiente de atrito entre as superfícies da cabeça do parafuso e porca;
- λ - Ângulo inicial;
- α - semi ângulo da rosca;

Como o coeficiente de torque depende de alguns fatores como grau de lubrificação, dimensional e limpeza das roscas, entre outros fatores que possam gerar de alguma forma mais ou menos atrito entre as peças em contato, foi utilizado o K_t do parafuso revestido de zinco, da Tabela 1.

O objetivo é conseguir que o coeficiente de atrito que se enquadre na condição real de utilização, para a condição de revestimento do parafuso e da classe especificada na instrução de montagem do parafuso IS-M5x24 do fornecedor EJOT.

Tabela 1 - Coeficientes de torque com base na condição do parafuso

Condição do Parafuso	K_t
Não revestido	0,30
Revestido de zinco	0,20
Lubrificado	0,18
Revestimento de cádmio	0,16
Com antiaderente	0,12

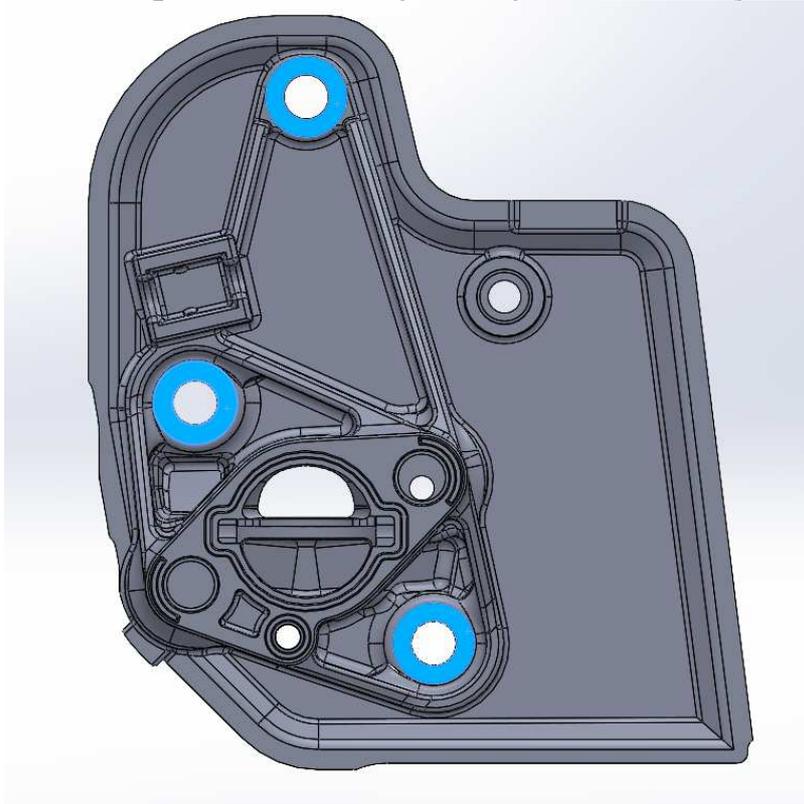
Fonte: Adaptado de Ensus, 2024

Portanto para configuração de carga foram utilizadas as seguintes forças:

- a) Cargas padrão de linha de montagem de 9 Nm de torque, gerando 9 kN de força de fixação em cada parafuso.
- b) Cargas padrão de ensaio de falha em laboratório de 13 Nm de torque, gerando 13 kN de força de fixação em cada parafuso.

A Figura 19 mostra as regiões onde estas cargas de aparafusamento incidem no componente:

Figura 19 - Área de aperto de parafusos de fixação



Fonte: Autor, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são abordados os resultados verificados no presente estudo e a discussão dos mesmos com o intuito de converter os dados obtidos em parâmetros de validação do modelo virtual de carregamento.

Conforme visto anteriormente, para as diferentes condições de carregamento e diferentes materiais, foram criados quatro cenários, mantendo modelos virtuais, sem alterações nos elementos, na malha e nos contatos. A Tabela 2 apresenta os cenários, nomeando cada modelo e referenciando com sua formulação. Esta primeira abordagem visa a busca pelo modelo virtual ideal, ou seja, o que mais se aproxima da situação real de carregamento e falha, verificando também qual matéria prima possui maior coeficiente de segurança.

Tabela 2 – Cenários de modelos de simulação

	Carregamento	Material
Modelo 1	9 kN	CB - 8018
Modelo 2	13 kN	CB - 8018
Modelo 3	9 kN	Vyncolit X611
Modelo 4	13 kN	Vyncolit X611

Fonte: Autor, 2024.

Na análise dos resultados ocorreu a verificação da validação do componente através do uso de um critério de máxima tensão. O objetivo dessa análise de resultados é que com a utilização desse critério, se observe a existência de possíveis falhas ocasionadas por tensões próximas ou superiores ao limite de resistência indicado no *datasheet* do material.

Sendo assim, para o componente moldado ser considerado com aplicação segura, nenhuma tensão, muito próxima ou superior a limite de resistência deve ser encontrada no modelo numérico. Caso ocorram valores no modelo numérico superiores a esse limite, poderá haver a ocorrência de falhas permanentes no componente e como consequência invalidar o mesmo.

Na configuração do software ANSYS foram evidenciados alguns pontos críticos para montagem do conjunto. Para análise de estrutural no Flange 4147-120-2301-D ficou evidenciado que solicitação de torque de aperto dos parafusos do cilindro em linha de montagem estão perto do limite máximo, segundo normas e recomendação do fabricante do parafuso, conforme evidenciado na Figura 20.

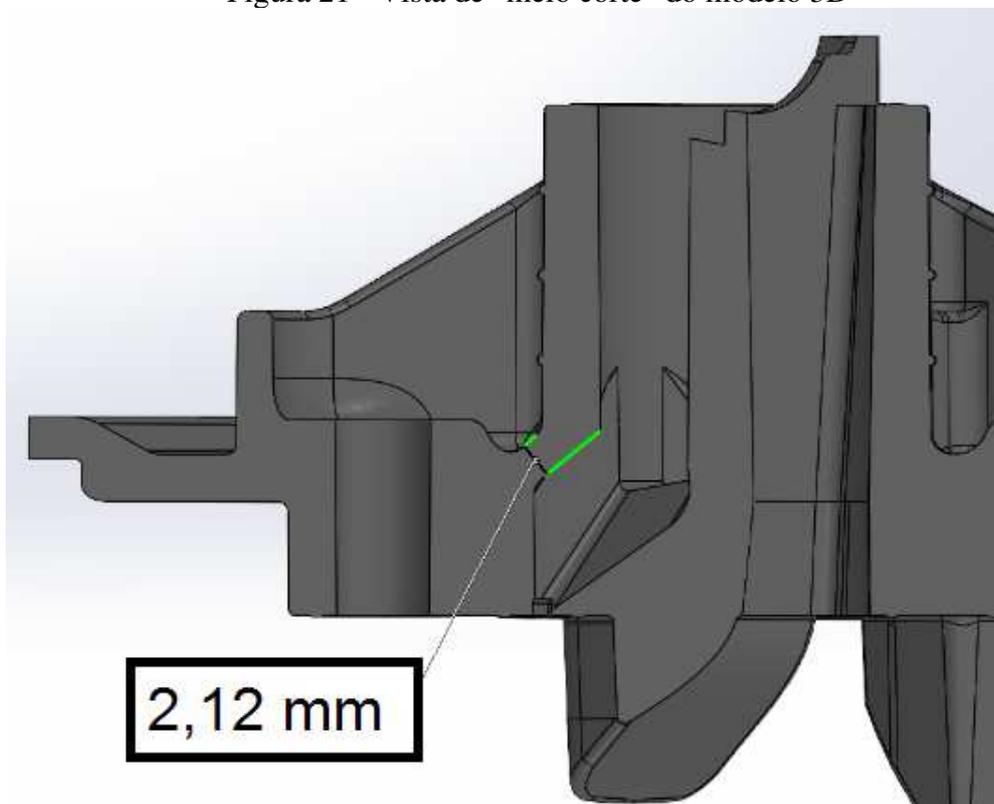
Figura 20 - Recomendação de utilização e torque de aperto

VALORES DE TORÇÃO (Nm)*		Classe	4.6	5.6	6.9	8.8	10.9	12.9
Estes valores de torção são utilizados para roscas métricas conforme norma DIN 13 e para as medidas de cabeças conforme normas DIN 912, 931, 934, 6912, 7984 e 7990. Os parafusos podem sofrer um esforço de até 90% do seu limite de carga, com um coeficiente de atrito de 0,14, para parafusos sem uso e sem lubrificação. Obs.: para situações em que os parafusos são lubrificados devemos reduzir os valores de torção em 20%.		M2	0,123	0,162	0,314	0,373	0,520	0,628
		M2,3	0,196	0,265	0,510	0,598	0,843	1,010
		M2,6	0,284	0,373	0,726	0,863	1,206	1,451
		M3	0,441	0,588	1,128	1,344	1,883	2,256
		M3,5**	0,677	0,902	1,736	2,060	2,893	3,481
		M4	1,000	1,344	2,599	3,040	4,315	5,148
		M5	1,961	2,648	5,099	6,031	8,483	10,200
		Classes de Qualidade conforme norma DIN 267						

Fonte: Adaptado de DIN267.

O produto Flange 4147-120-2301-D possui alguns pontos críticos, com espessura finas e com transição geométrica que são concentradores de tensão, principalmente de esforços de tração que é o ponto frágil dos termofixos, conforme evidenciado na Figura 21.

Figura 21 - Vista de “meio corte” do modelo 3D

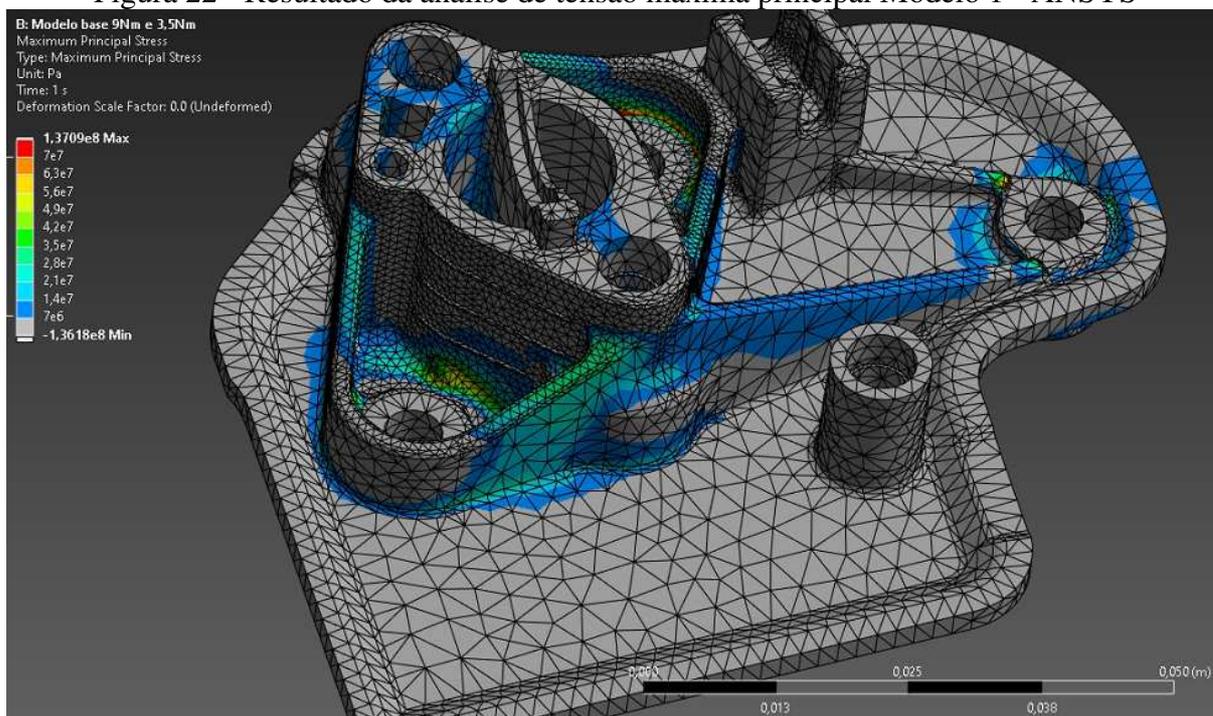


Fonte: Autor, 2024.

4.1 RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO NO CENÁRIO 1

Para facilitar a visualização das tensões trativas que possuem o menor limite de resistência e são associadas ao material de fratura frágil, foi gerada uma análise através do critério de Rankine ou da Máxima Tensão Principal, gerando um carregamento de visualização adequada, não trazendo as tensões compressivas na região de aperto dos parafusos, conforme os resultados da simulação demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 1 - ANSYS

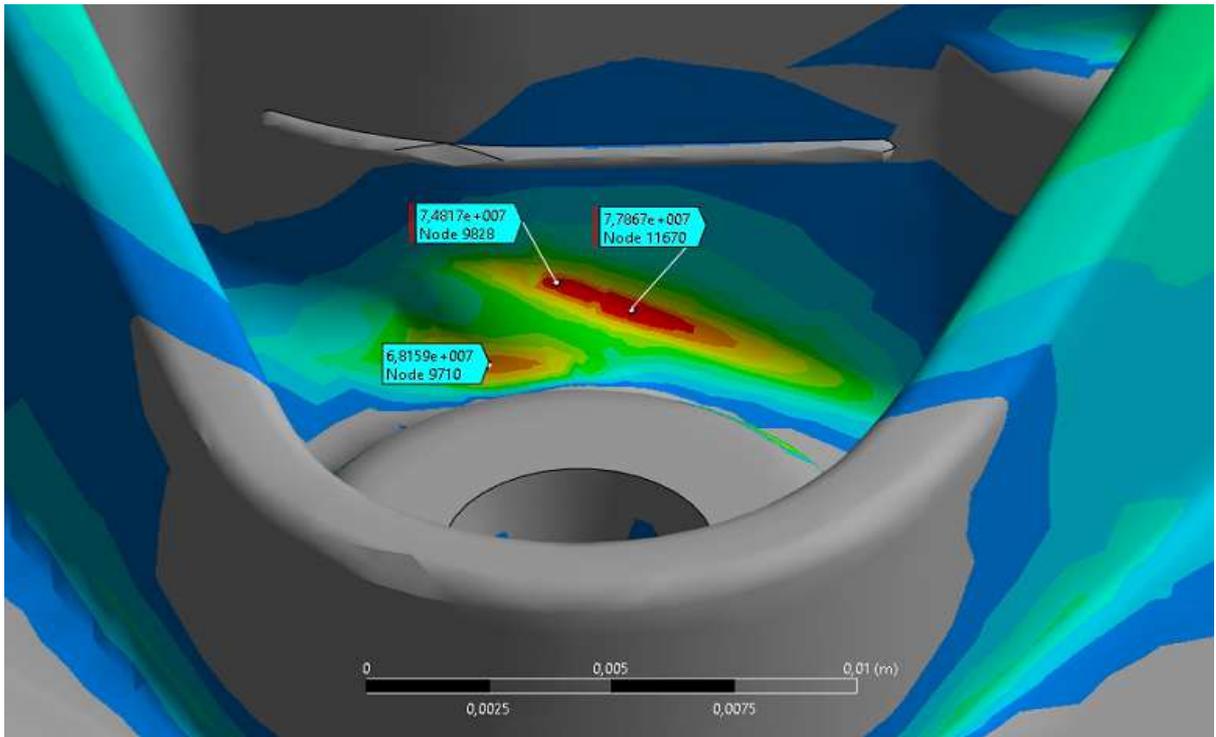


Fonte: Autor, 2024.

Os resultados desta análise indicam que a região próxima à área de aperto dos parafusos, possui uma concentração de tensões superiores ao limite de resistência do material, conforme mostra a Figura 23 e a Figura 24.

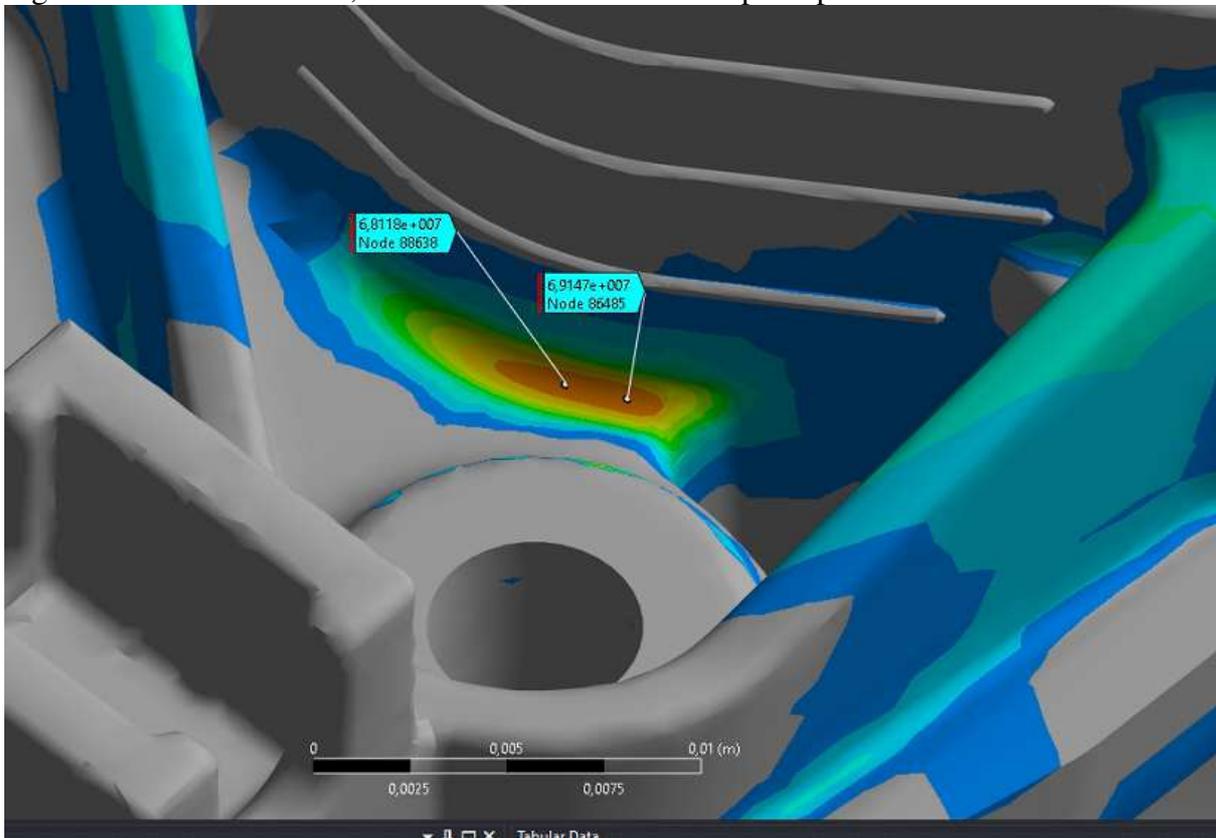
No ‘lado A’ do Modelo 1, foram encontrados valores de aproximadamente 78 MPa. E, no ‘lado B’ do Modelo 1, foram encontrados valores de aproximadamente 69 MPa.

Figura 23 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 1 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

Figura 24 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 1 - ANSYS



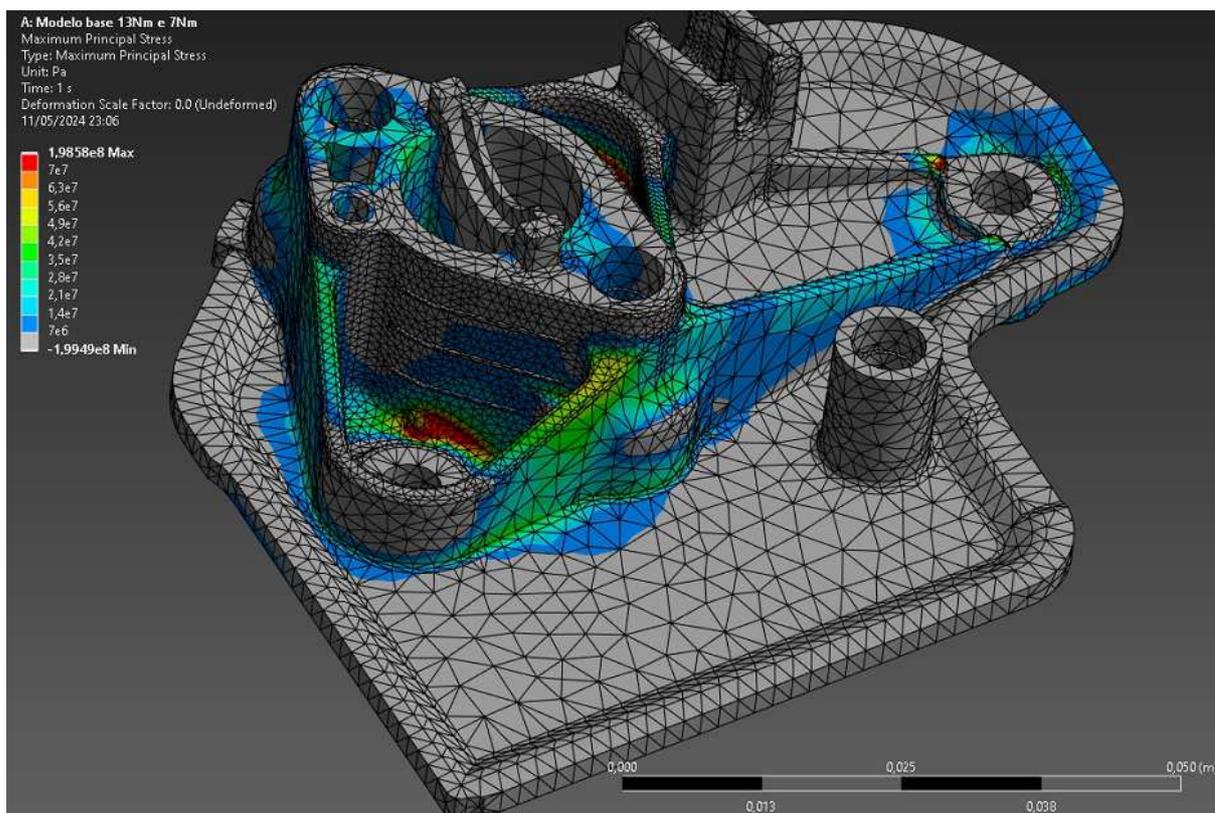
Fonte: Autor, 2024.

4.2 RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO DO CENÁRIO 2

Para a condição de teste em laboratório foi gerada uma simulação idêntica a anteriores, chamada de Modelo 1, ajustando somente a força de carregamento gerada pela maior sollicitação de torque de aperto dos parafusos.

A Figura 25 mostra o resultado da simulação pelo critério de Rankine ou da Máxima Tensão Principal.

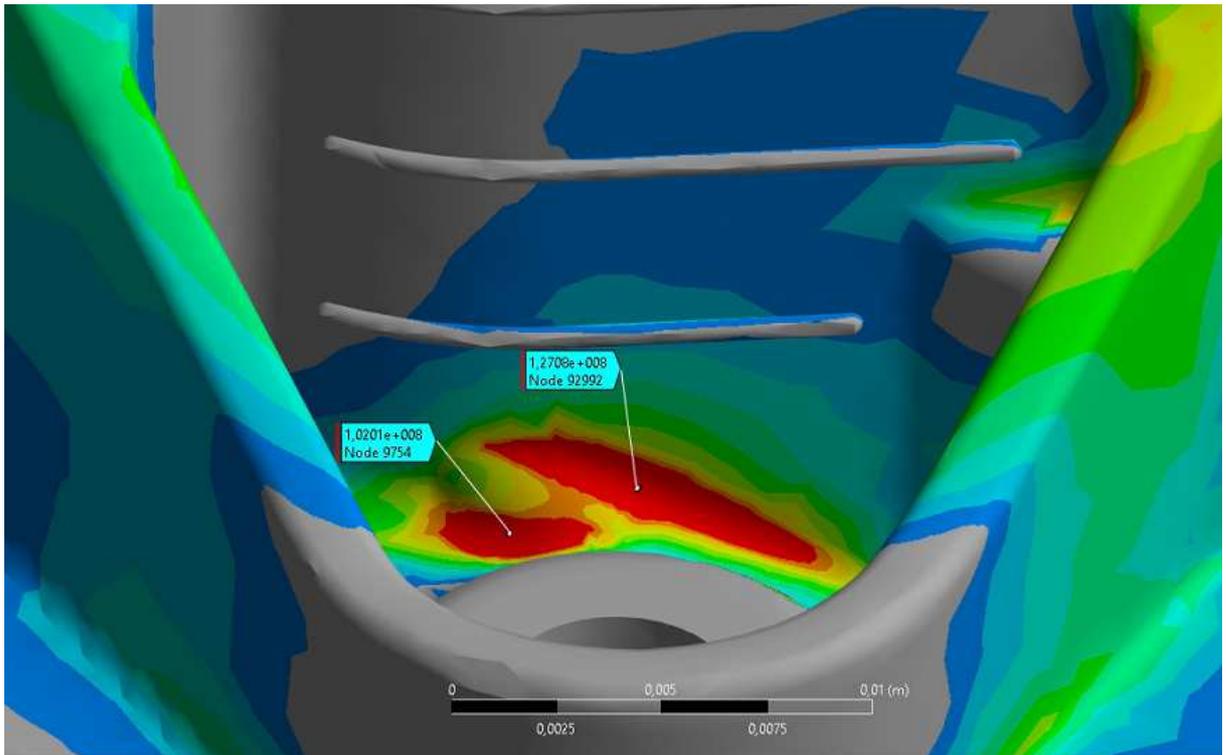
Figura 25 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 2 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

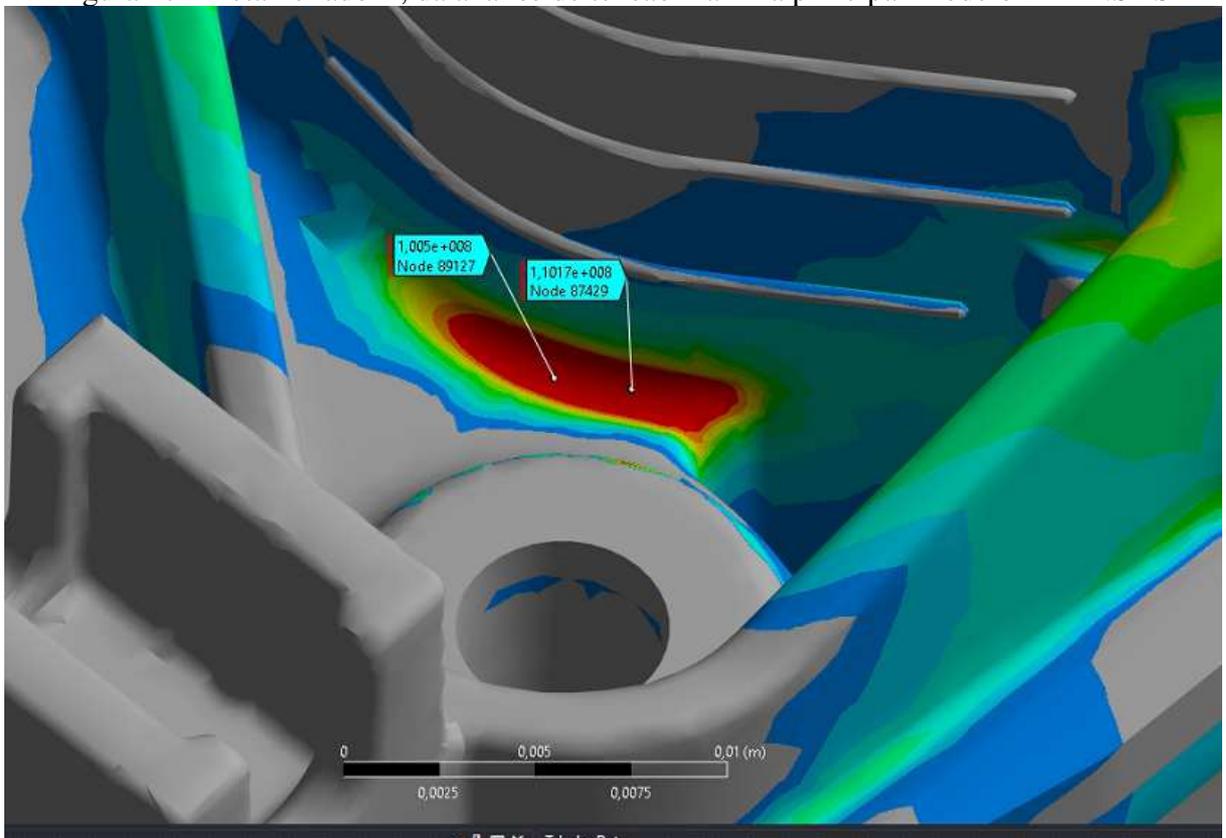
Os resultados desta análise indicam que a região próxima à área de aperto dos parafusos, possui uma concentração de tensões, muito superior ao limite de resistência do material, conforme mostra a Figura 26 e a Figura 27. Sendo que, no ‘lado A’ do Modelo 1, foram encontrados valores de aproximadamente 127 MPa. No ‘lado B’ do Modelo 1, foram encontrados valores de aproximadamente 110 MPa.

Figura 26 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 2 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

Figura 27 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 2 - ANSYS

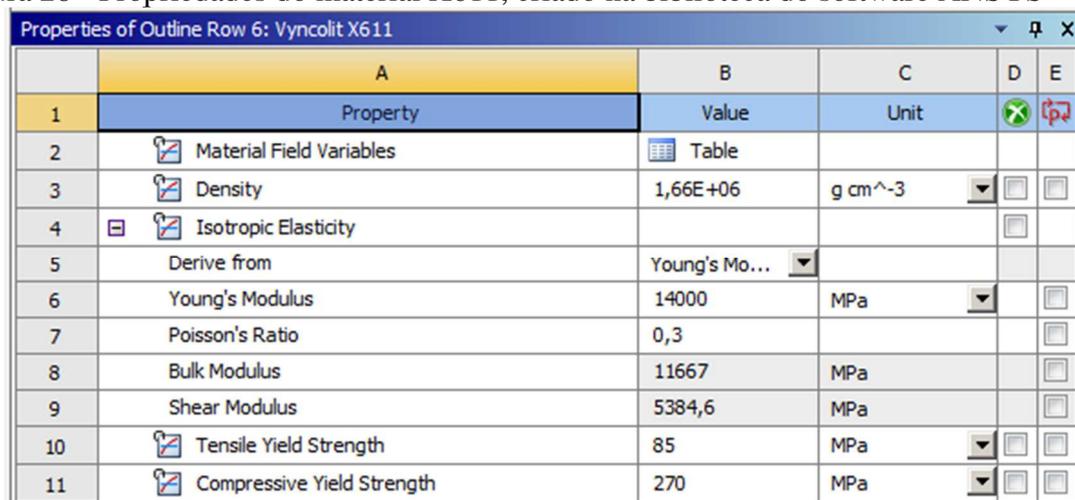


Fonte: Autor, 2024.

4.3 RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO DO CENÁRIO 3

Para a simulação utilizando a matéria prima importada, o Vyncolit X611, foram repetidas todas as condições de contorno e carregamento do Modelo 1 e Modelo 2, modificando somente as especificações do *datasheet* do material, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 - Propriedades do material X611, criado na biblioteca do software ANSYS

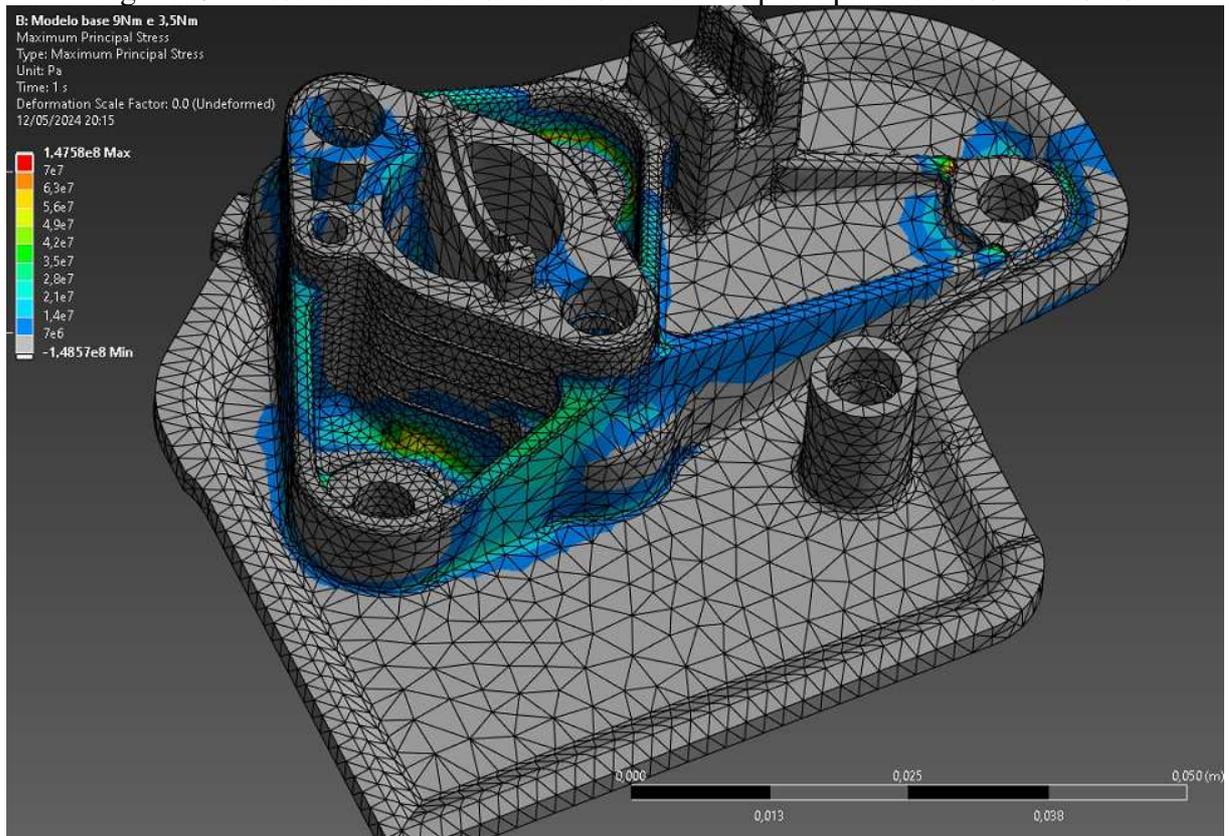


Properties of Outline Row 6: Vyncolit X611				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,66E+06	g cm ⁻³	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
5	Derive from	Young's Mo...		
6	Young's Modulus	14000	MPa	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0,3		<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	11667	MPa	<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	5384,6	MPa	<input type="checkbox"/>
10	Tensile Yield Strength	85	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
11	Compressive Yield Strength	270	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Fonte: Autor, 2024.

O resultado desta simulação pelo critério de Rankine ou da Máxima Tensão Principal está representado na Figura 29

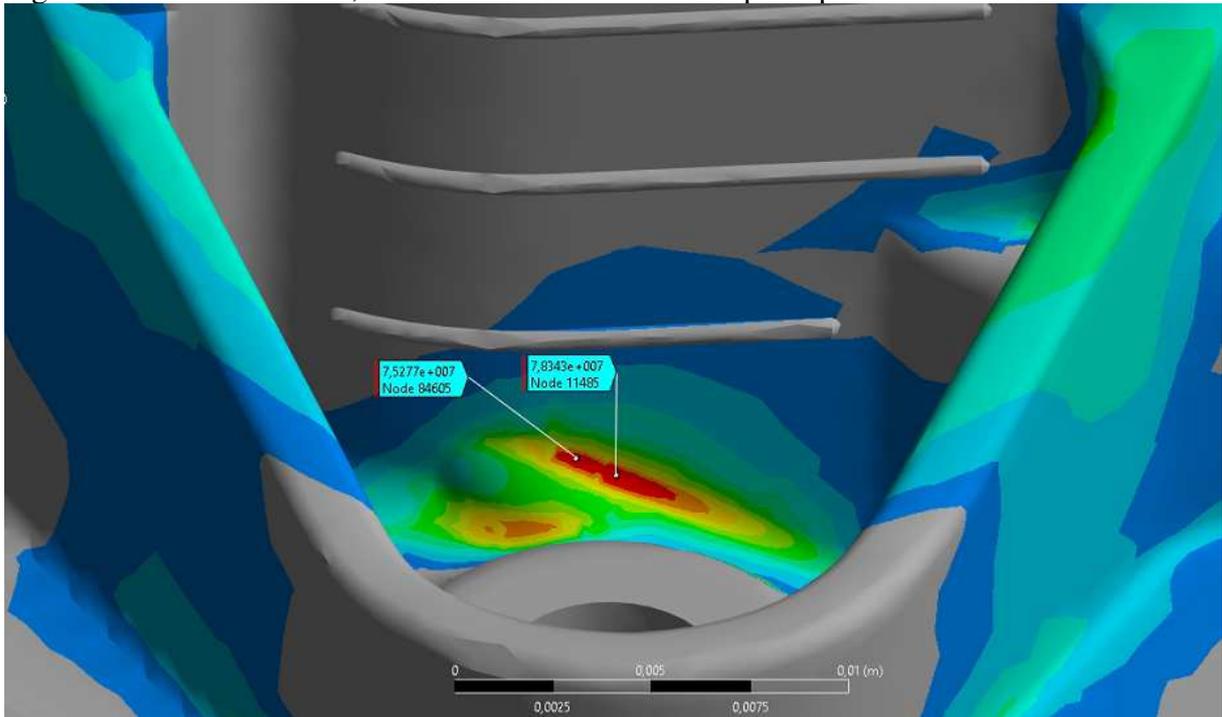
Figura 29 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 3 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

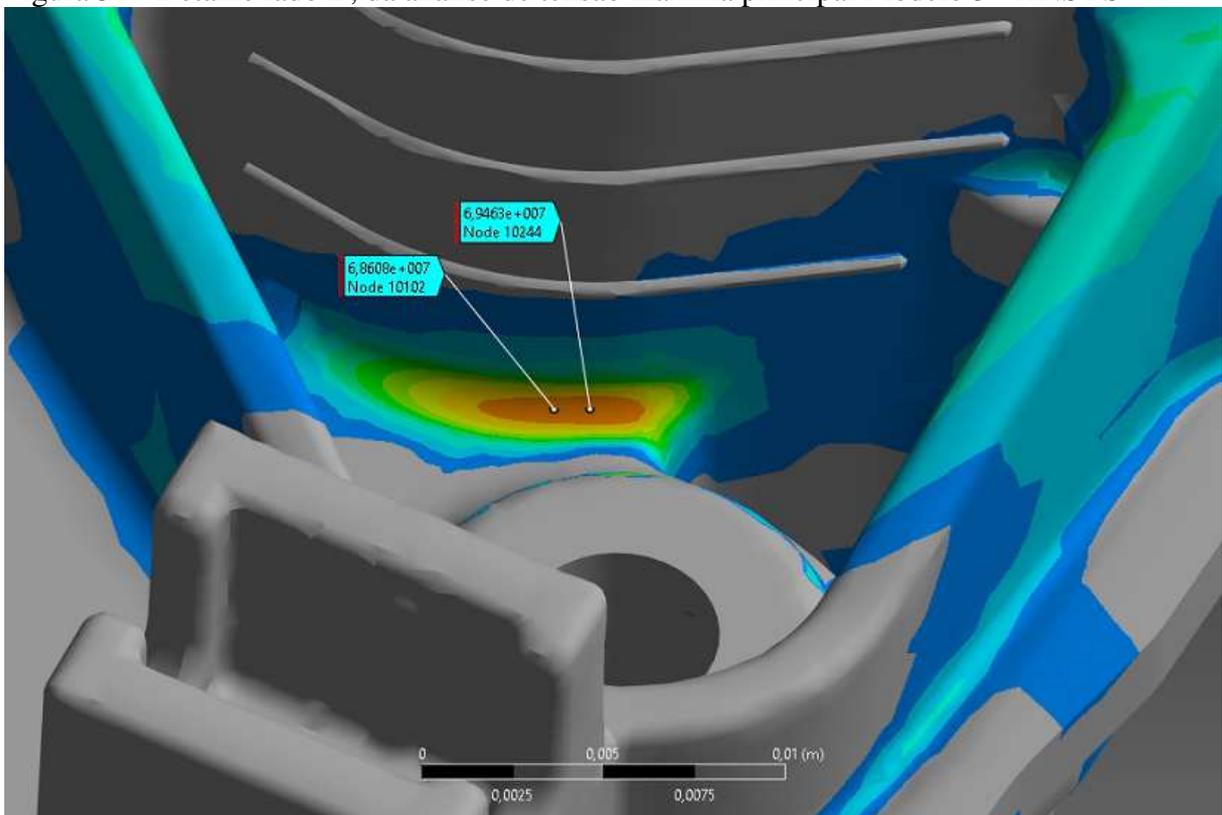
Os resultados desta análise indicam que assim como na análise descrita no capítulo 4.1 a região próxima à área de aperto dos parafusos, possui uma concentração de tensões muito próximas, porém, levemente abaixo do limite de resistência do material, pois o material importado possui um maior limite de resistência de tração superior, se comparado a matéria prima nacional, conforme mostra a Figura 30 e a Figura 31. Sendo que no ‘lado A’ do Modelo 3, foram encontrados valores de aproximadamente 78 MPa. No ‘lado B’ do Modelo 3, foram encontrados valores de aproximadamente 69 MPa.

Figura 30 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 3 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

Figura 31 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 3 - ANSYS



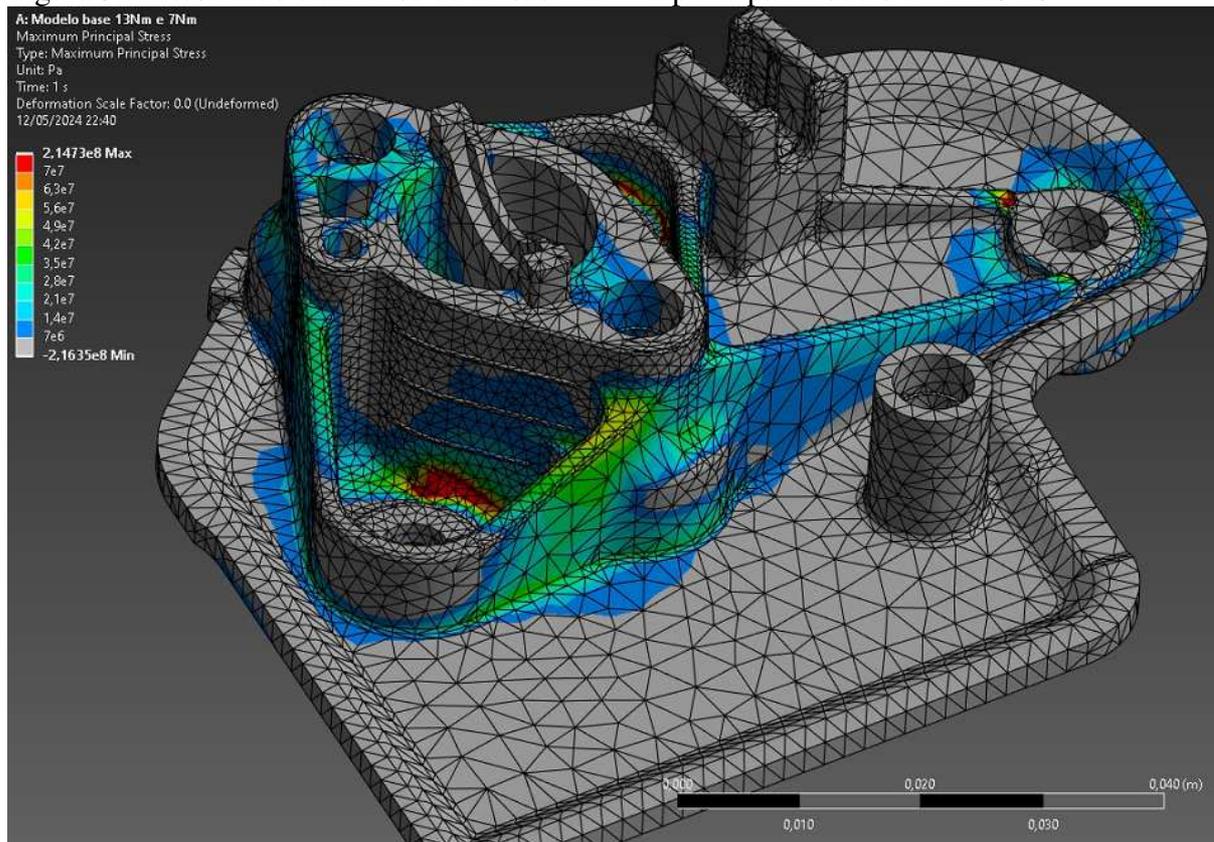
Fonte: Autor, 2024.

4.4 RESULTADOS PARA CARGAS PADRÃO DO CENÁRIO 4

Para a condição de teste em laboratório foi gerada uma simulação idêntica à anterior, ajustando somente a força maior gerada pelo maior torque de aperto dos parafusos.

A Figura 32 mostra o resultado da simulação pelo critério de Rankine ou da Máxima Tensão Principal.

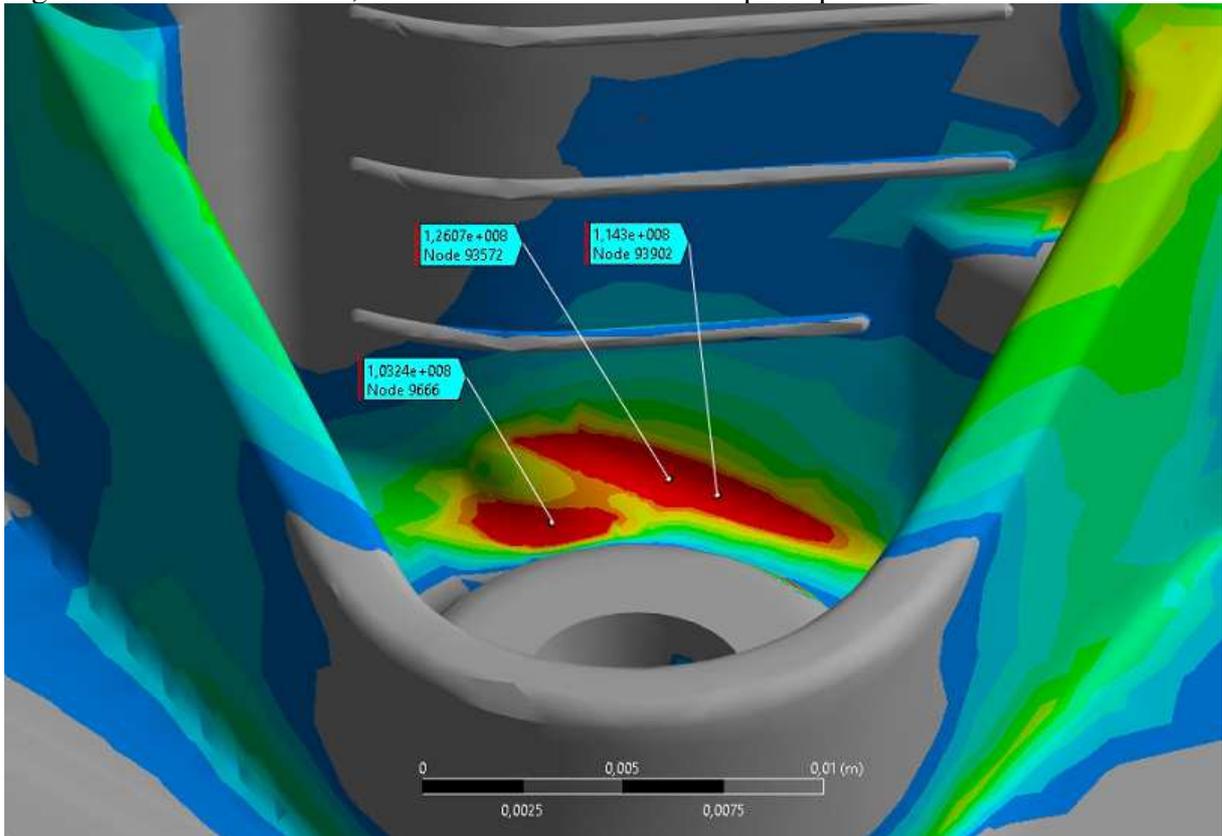
Figura 32 - Resultado da análise de tensão máxima principal Modelo 4 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

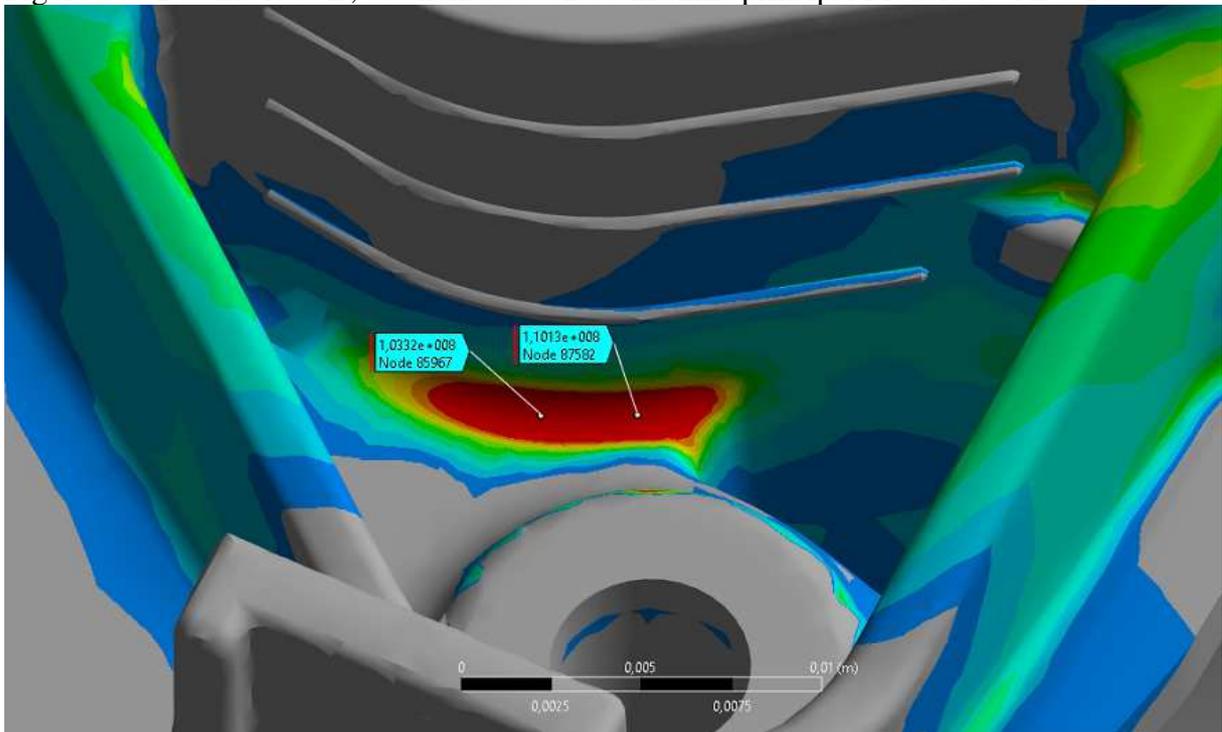
Apesar da matéria prima importada possuir um limite de resistência melhor que o material nacional utilizado nos “Modelos 1 e 2”, para as condições de carregamento de laboratório, ainda existem tensões que ultrapassam muito o limite de resistência do material, como pode ser observado na Figura 33 e Figura 34. Sendo que no ‘lado A” do Modelo 4, foram encontrados valores de aproximadamente 126 MPa. No ‘lado B” do Modelo 4, foram encontrados valores de aproximadamente 110 MPa.

Figura 33 - Detalhe lado A, da análise de tensão máxima principal Modelo 4 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

Figura 34 - Detalhe lado B, da análise de tensão máxima principal Modelo 4 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

4.5 COMPARATIVO DE RESULTADOS

Durante a análise, observou-se uma tensão elevada de 160 MPa próxima a região de fixação da cabeça dos parafusos, que são regiões, onde existe mudança de comportamento do material, saindo de uma região sujeita a esforços de compressão, pois se trata da área configurada recebendo o esforço de aparafusamento. Após, alguns refinamentos, notou-se que as tensões continuavam subindo, caracterizando uma singularidade e erro do método. Por esse motivo os resultados nessa região foram desprezados.

Diante de todas as análises geradas, criou-se a Tabela 3 onde é possível observar a Tensão Principal Máxima, estabelecida pelo critério de Rankine, encontrada para cada carregamento.

Tabela 3 - Resumo da análise dos resultados

	Carregamento	Material	Limite de Resistência (MPa)	Maior tensão Lado A (MPa)	Maior tensão Lado B (MPa)
Modelo 1	9 kN	CB - 8018	70	77,9	69,2
Modelo 2	13 kN	CB - 8018	70	127,1	110,2
Modelo 3	9 kN	Vyncolit X611	85	78,5	69,5
Modelo 4	13 kN	Vyncolit X611	85	126,1	110,1

Fonte: Autor, 2024.

Mesmo desprezando as tensões de singularidades localizados fora da região considerada crítica, na qual se focaram as análises, é observada a existência de pontos ou pequenas regiões com tensões superiores ao do limite de resistência informado pelo fabricante das matérias primas.

Deste modo, os modelos de simulação para essa condição de carregamento e parâmetros analisados do componente Flange 4147-120-2301, moldado pelo processo de transferência de pó de moldagem fenólico, foi considerado como validados. Por outro lado, a integridade estrutural e a resistência do componente foram consideradas invalidada por possuir pontos com tensões principais máximas de Rankine, acima do limite de resistência estimado para o material, que nessa região chegam a valores próximos a 78 MPa.

4.6 CENÁRIOS DE MELHORIA DE GEOMETRIA DO COMPONENTE

As tensões identificadas nos cenários anteriores superaram os limites de resistência do material fenólico utilizado CB-8018 e estão muito próximos do limite para o material Vyncolit X611, portanto mesmo com a substituição do material, os problemas persistiram, indicando que ajustes no design e no processo de montagem são necessários.

Como se trata de um produto da empresa “X”, grandes modificações no produto tendem a ser, sumariamente, desprezadas, assim como a prospecção de materiais com melhores propriedades mecânicas para aumentar a resistência estrutural pode ser não aceita, devido à falta de opção no mercado nacional, além da necessidade de um longo e oneroso período de homologação.

Portanto, a abordagem sugerida são ajustes sutis que não descaracterizem o produto, nem afetem o conjunto do produto final. São elas:

- a) Reforçar as áreas próximas aos pontos de fixação dos parafusos aumentando a espessura do material. Chamada de proposta de melhoria 1.
- b) Implementar raios de curvatura maiores nas transições geométricas para reduzir a concentração de tensões que levam às falhas. Chamada de proposta de melhoria 2.
- c) Revisar e ajustar as especificações de torque conforme a resistência da matéria prima e design revisado. Chamada de proposta de melhoria 3.

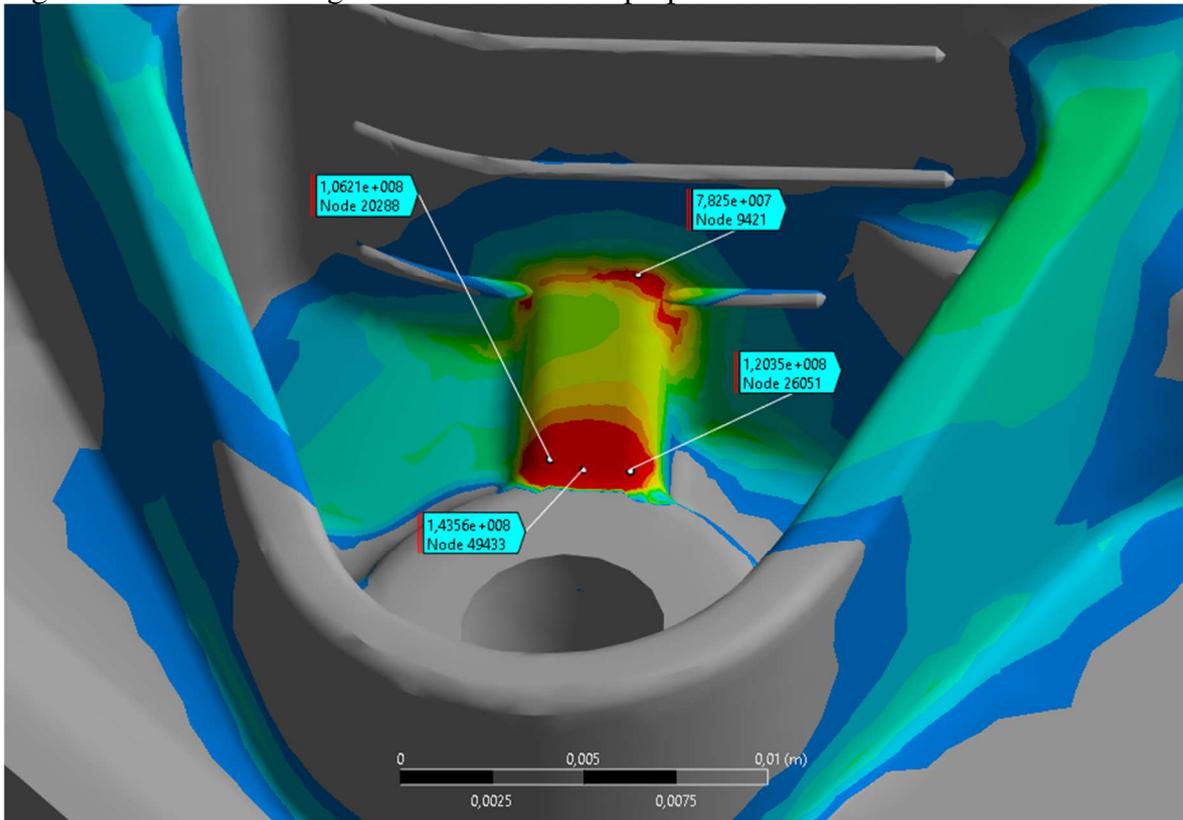
Na sequência desta etapa de modificação de geometria e especificações de aperto, utilizou-se novamente o software ANSYS para realizar simulações com o novo design e sob novas condições de carga, priorizando o uso da matéria prima nacional, CB-8018, já homologada para este componente.

4.7 RESULTADOS PARA CENÁRIOS DE MELHORIA DE GEOMETRIA DO COMPONENTE

Para as abordagens da proposta de melhoria 1, todas as tentativas de reforços estruturais na região crítica não tiveram bons resultados, pelo contrário, as modificações no produto geraram regiões com níveis de concentração de tensão superiores a geometria inicial.

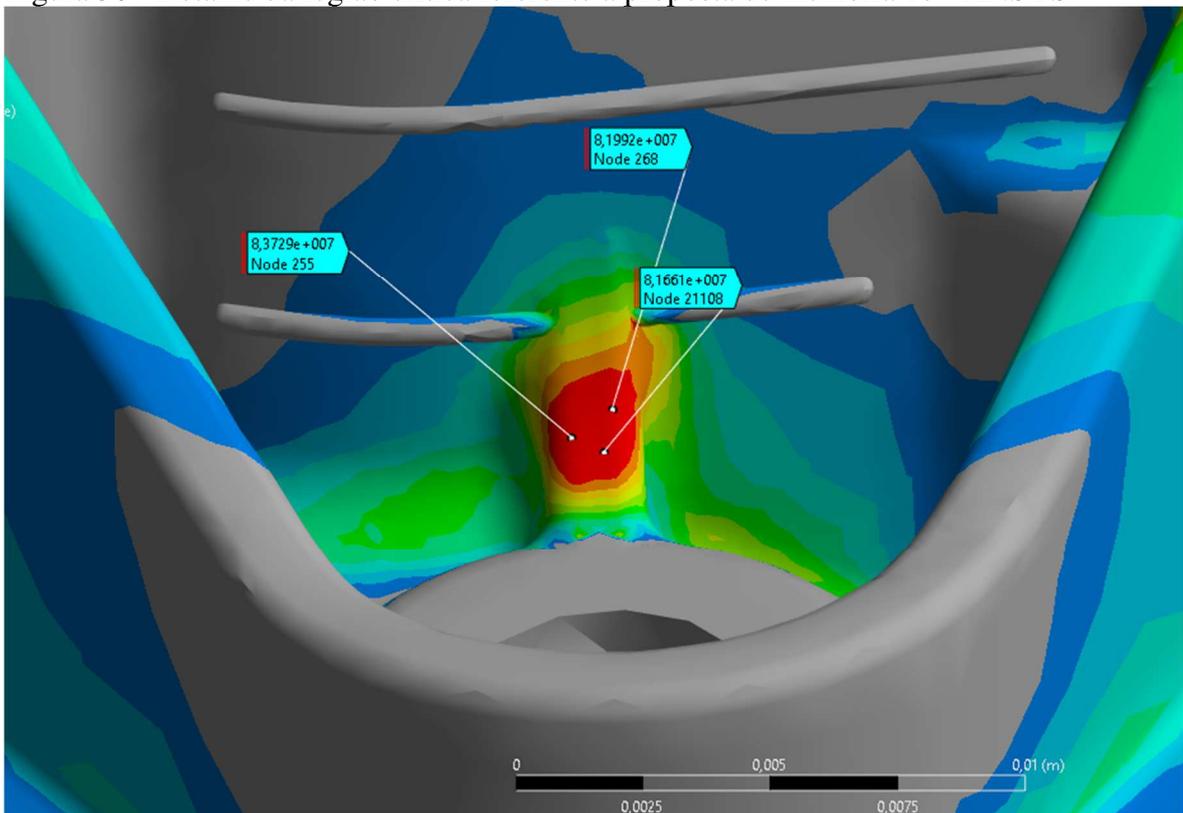
A Figura 35 e a Figura 36 mostram o resultado das tensões do critério de Rankine ou da Máxima Tensão Principal encontradas em duas tentativas diferentes de reforços do tipo “mão francesa”.

Figura 35 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 1a - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

Figura 36 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 1b - ANSYS



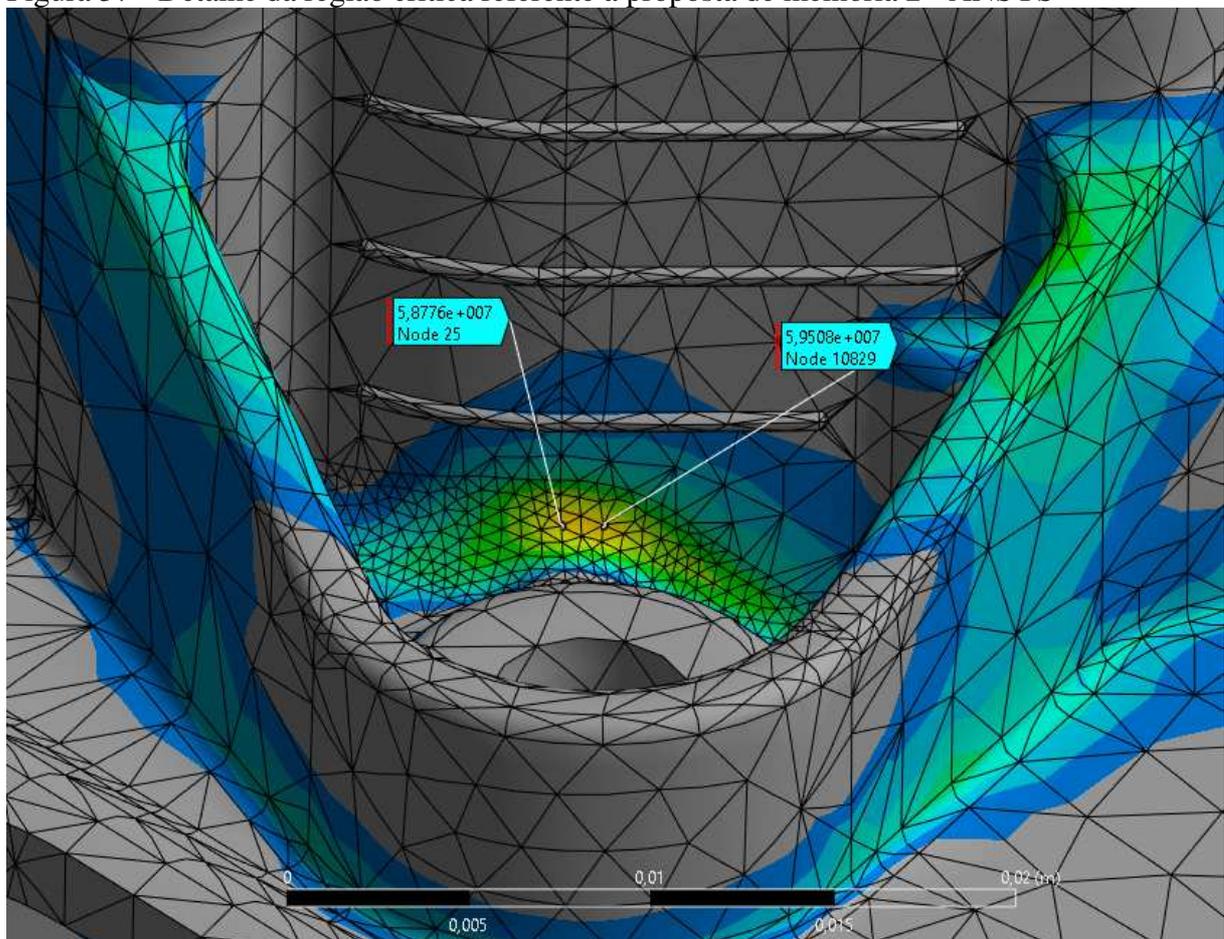
Fonte: Autor, 2024.

Na primeira tentativa de implementar reforços na geometria do produto descrito na proposta de melhoria 1, foram encontrados valores de tensão de aproximadamente 143 MPa, baseado na teoria de Máxima Tensão Principal. E em uma segunda geometria modificada baseada na proposta de melhoria 1, foram encontrados valores de aproximadamente 83 MPa.

Os melhores resultados de redução de tensão foram encontrados somando as propostas de melhoria 2 e 3, descritas anteriormente. Esta condição traz a implementação de raios de curvatura maiores nas transições geométricas para reduzir a concentração de tensões que levam às falhas e o ajuste de especificações de torque, conforme a capacidade da matéria prima.

A Figura 37 traz o resultado da melhor condição geométrica obtida neste estudo, chamada de proposta de melhoria 2.

Figura 37 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 2 - ANSYS

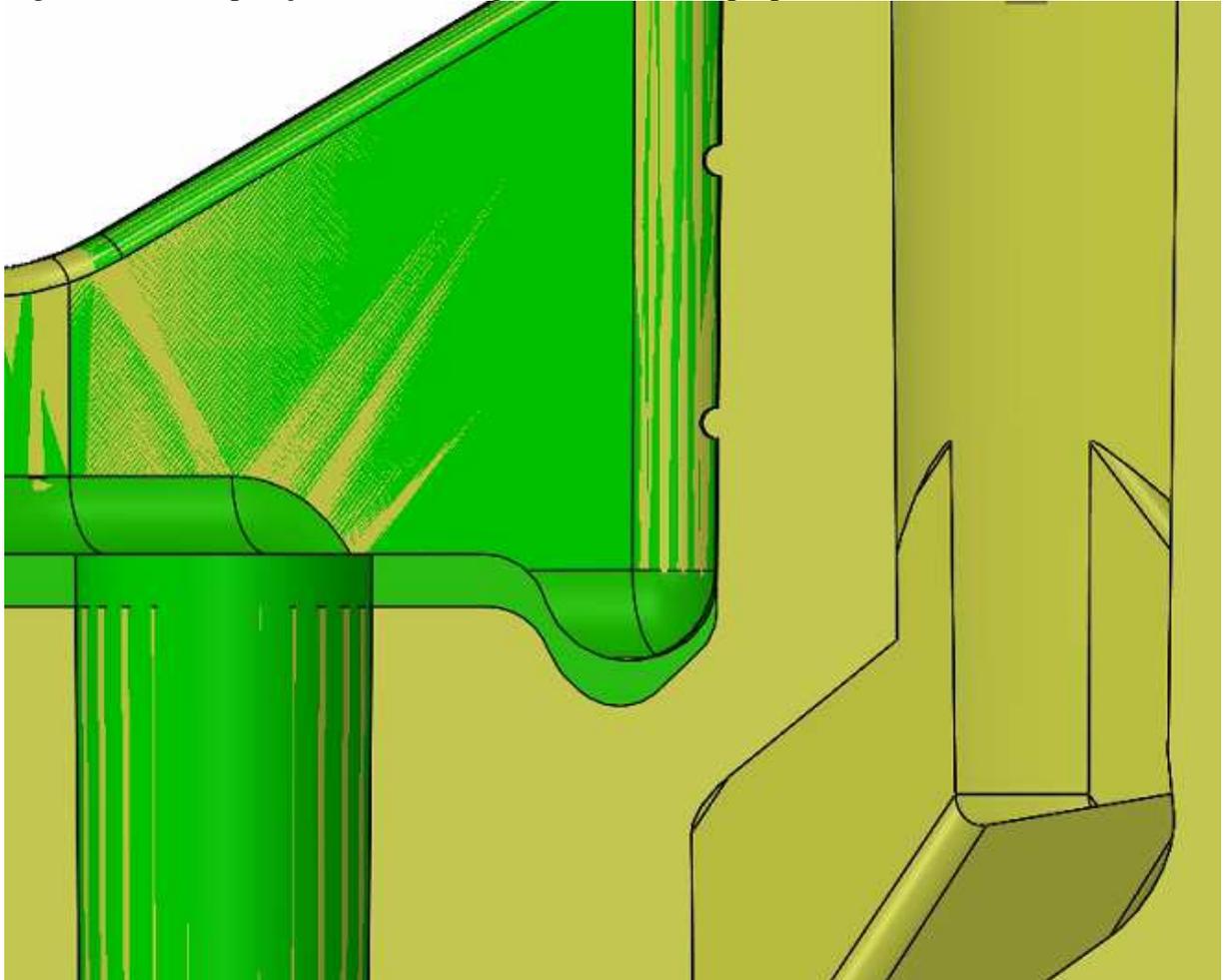


Fonte: Autor, 2024.

Na proposta de melhoria 2, foram encontrados valores de aproximadamente 59 MPa de tensão, da análise de Máxima Tensão Principal, onde a principal modificação foi uma

suavização geométrica de regiões que continham transições geométricas com raios pequenos, demandando somente um aumento e ajuste de 1mm de espessura na face de assentamento cabeça do parafuso de fixação., como mostrado na Figura 38.

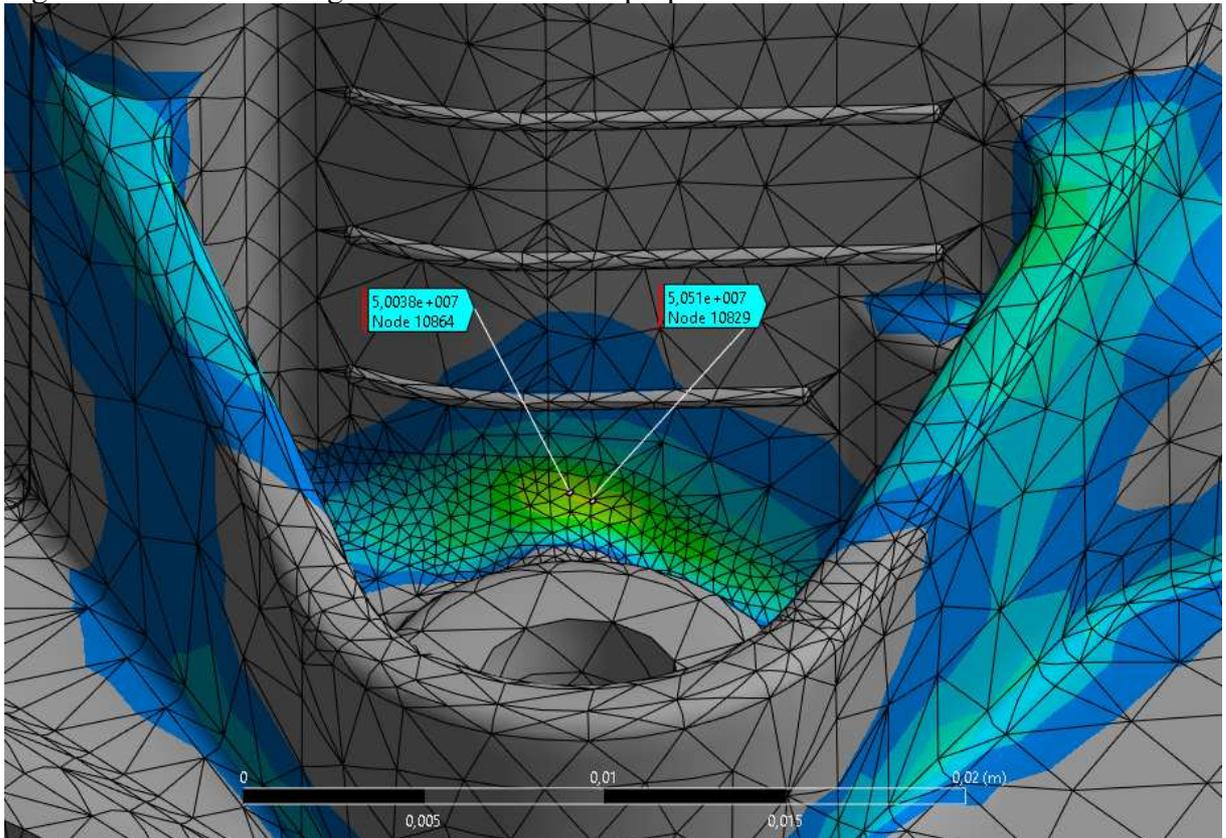
Figura 38 - Sobreposição modelos original e modelo da proposta melhoria 2



Fonte: Autor, 2024.

Quando a melhor condição geométrica anteriormente citada é somada a redução do torque de aparafusamento para 7 Nm nos três parafusos de fixação, descrita na proposta de melhoria 3, finalmente foi atingido pela avaliação de elementos finitos, uma condição segura de utilização do componente, chamada de proposta de melhoria 3, mostrada na Figura 39.

Figura 39 - Detalhe da região crítica referente a proposta de melhoria 2 - ANSYS



Fonte: Autor, 2024.

Na Proposta de melhoria 3, foram encontrados valores de aproximadamente 50 MPa de tensão, segundo o critério Rankine ou Máxima Tensão Principal.

Diante de todas as análises geradas, criou-se a Tabela 4, onde é possível observar a Tensão Principal Máxima, estabelecida pelo critério de Rankine, encontrada para cada carregamento.

Tabela 4 - Resumo de resultados das propostas de melhoria

	Carregamento	Material	Limite de Resistência	Maior tensão (MPa)
Proposta Melhoria 1a	9 kN	CB - 8018	70 MPa	143
Proposta Melhoria 1b	9 kN	CB - 8018	70MPa	83
Proposta Melhoria 2	9 kN	CB - 8018	70 MPa	59
Proposta Melhoria 3	7 kN	CB - 8018	70 MPa	50

Fonte: Autor, 2024.

5 CONCLUSÕES

Após a realização deste trabalho conclui-se que foram encontrados os pontos críticos do componente analisado, quando submetido aos esforços de carregamentos durante a sua utilização.

Para maioria das condições analisadas a estrutura do componente apresentou tensões superiores ao limite de resistência estimado. Sendo que o seu ponto crítico apresentado na análise foram as regiões de transição geométrica que são acumuladores de tensões.

Como o termofixo fenólico é um material frágil, o próprio esforço de aparafusamento gera movimentação e acomodação que resultam em forças e tensões destrutivas ao mesmo.

Para a condição de carregamento de laboratório que buscam encontrar um fator de segurança na aplicação do componente, foram encontradas as maiores regiões tensões considerando o critério de Rankine das Tensões Máximas Principais, sendo estas, muito superiores ao limite de resistência a tração estimado para o material.

Por fim, pode-se considerar que o objetivo geral deste trabalho foi alcançado, pois foram geradas análises para as principais condições de utilização do componente, apresentando os pontos críticos de tensão do mesmo, indicando não ser recomendável sujeitar este componente a esforços desta magnitude inicialmente pretendidos.

Além de toda avaliação e entendimento dos mecanismos de falha, foi possível propor um ajuste de geometria efetiva no componente termofixo moldado, gerando uma condição melhor para utilização, e se somada a uma redução consciente do torque de aperto na montagem, obtem-se uma condição segura para utilização do componente objeto deste estudo.

Também é possível considerar que este trabalho é importante para a empresa IPOS, pois além de fornecer informações sobre o projeto deste componente, poderá ser útil para projetos futuros. O processo de análise detalhado e executado neste trabalho poderá ser utilizado como base em novas aplicações desta linha de produto e em outros projetos estruturais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Realizar ensaios experimentais com corpos de prova para os levantamentos das curvas de tensão versus deformação, e conferência de dados do *datasheet* das matérias primas.
- b) Realizar análise dinâmica do conjunto do componente analisado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE: Análise dinâmica**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2008.

_____. **Tecnologia CAE é Competitividade: Método dos Elementos Finitos**. Revista Cadware. São Paulo, 2000. Disponível em: <revista.cadware.com.br>. Acesso em: novembro de 2023.

AMARAL, Janaína Ribas de. **Otimização do projeto estrutural de embarcações de alta velocidade produzidas em material compósito**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. JOINVILLE. 2016.

ASKELAND, Donald R; Wendelin J. Wright, **Ciência e engenharia dos materiais** – Tradução da 4ª edição norte-americana, 2019.

ASTM D638 – 14: **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1 ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto/Pt, 2003.

BECKER, G.W.; Braun, D.: **Manual de Plásticos Volume 10 - Duroplasts**, Carl Hanser Verlag, Munique, 1988.

CALLISTER Jr., W. D.; **Materials science and engineering: an introduction**; 5th. ed. New York: J. Wiley, 1999, c2000.

COOK, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. – **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, Third Edition, University of Wisconsin, 1989.

ENGLICH, S. **Strukturbildung bei der Verarbeitung von glasfasergefüllten Phenolformaldehydharzformmassen**. Doktorarbeit, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, Deutschland, 2015.

https://www.researchgate.net/publication/282601802_Strukturbildung_bei_der_Verarbeitung_von_glasfasergefullten_Phenolformaldehydharzformmassen Acessado em: 10-04-24

ENSUS, <<https://ensus.com.br/category/extensometria-strain-gauge>> Acesso em: 22 de março de 2024.

_____. <<https://ensus.com.br/analise-de-tensoes>> Acesso em: 22 de março de 2024.

GUIMARÃES, José Manoel Freire; CARVALHO, Michel José Caldas; LINS, Erb Ferreira e HARPER, Charles A.; PETRIE, Edward M. **Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003

HILTZ, R. S.; KUZAK, R. P.; WAITKUS, P. (2001). "**Phenolic resins.**" In: **Handbook of Thermoset Plastics (2nd ed.)**, edited by S. R. T. Christensen and A. S. Hay, p. 185-216. Marcel Dekker, New York.

NIELSEN, Andreas. **Plásticos termofixos (duroplásticos)**. Tradução de Cláudio R. Püschel. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

PHILPOT, Timothy A. **Mecânica dos Materiais: um sistema integrado de ensino**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2013.

PLENCO. <<https://plenco.com/phenolic-molding-materials.htm>>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

SANCHEZ, C. A. A., - **Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análise não Linear**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

SMITH, A. (1899). "**Phenolic resins.**" **Patent No.** [Número da Patente], Estados Unidos.

SOUG, Andreas. Norma Externa SWN 42103-01. Empresa "X", 2023

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Teoria da elasticidade**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1980.

VETTURAZZI, R. **Deformações em estruturas soldadas: avaliação comparativa entre o método de elementos finitos e a análise real aplicado em aço de baixo carbono e aço de alta resistência**. Caxias do Sul. UCS, 2013.

ANEXO A – Datasheet matéria prima Nacional

RESINS & SPECIALTIES

ASKCHEMICALS



PÓ DE MOLDAGEM

CB-8018

Descrição

CB-8018 é um pó de moldagem fenólico, granulado, preto, à base de resina fenólica tipo novolaca, com reforços orgânicos e inorgânicos.

Aplicação

- CB-8018 é recomendado para a moldagem de peças que necessitem de boa resistência mecânica;
- Processo: Compressão;
- Temperatura do molde: 160 - 180 °C.

Características

- Peso Específico: 1,65 - 1,75 g/cm³
- Umidade: 1 - 2,5 %
- Teor de Cinzas: 45 - 53 %
- Impacto Charpy: 5 - 20 KJ/m²
- Drop Test: 20 - 45 Polegadas
- Rigidez Dielétrica: 15 - 20 KV/mm
- Brabender Ponto B: 6,5 - 10 Nm
- Brabender T.P.: 33 - 65 Segundos
- Teor de Finos: Máximo 3 %
- Deflexão Térmica (Martens): 177 - 187 °C

Características Orientativas

- Densidade Aparente: 0,50 - 0,65 g/cm³
- Contração: 0,38 - 0,58 %
- Absorção de Água: Máximo 0,2 %
- Resistividade Superficial: 10 - 15 Ohm
- Resistividade Volumétrica: 10 - 15 Ohm.cm
- Resistência à Tração: 70 - 95 MPa
- Resistência à Flexão: 170 - 200 Mpa

Código: Q01310 Revisão: 00 Aprovação: 20/04/2023

Page 1 of 2

ASK Crios Produtos Químicos do Brasil | Av. Brasil, 4500 | Rio Claro, SP 13505-600 | Tel.: +55 (19) 3535 6700 | www.ask-chemicals.com

The following marks are registered by ASK Chemicals GmbH, ASK Chemicals Metallurgy GmbH or ASK Chemicals LLC in one or more countries: ALPHASET, ASKOBOND, ASKOCOAT, ASKOFEN, ASKRONING, ASKURAN, BERANOL, BETASET, BIOLIN, CERAMCOTE, CHEM-REZ, DENODUL, DISPERSIT, EXACTCALC, EXACTCAST, EXACTFLO, EXACTPORE, ECO-CURE, ECOPART, FLEXPORE, FLEXPOR, GERMALLOY, INFORM, INOBAKE, INOTEC, ISOCOTE, ISOCURE, ISO-FAST, ISOMAX, LINO-CURE, MAGNASET, MIRATEC, NECOLIN, NECOWEL, NOVACURE, NOVANOL, NOVASET, OPTIGRAN, OPTINOC, PEP SET, REMMOS, SMW-INSERT, UDICELL, VEINO, VELVACOAT, ZIP-CLEAN, ZIP SLIP.

Visit www.ask-chemicals.com/trademarks for a complete list of our trademarks. Please contact ASK for any questions concerning the usage of these marks.

ANEXO B – Datasheet matéria prima Importada



Folha de dados técnicos

Material termofixo de engenharia

Vyncolit® X611

Descrição Vyncolit® X611 é um composto fenólico reforçado com fibra de vidro para moldagem com excelentes propriedades mecânicas e elétricas, boa estabilidade dimensional, resistência térmica e química.

Identificação genérica > PF-(GF+MD)55< (de acordo com ISO 11469: 2000) fibra de vidro

Endimento principal de vidro

Resina novolac

Cor Preto Verde

Método de moldagem compressão, transferência, injeção

FENÓLICO

	Propriedades:	Valor típico ²	Unidade	Método	
Físico	Densidade	1,66	g/cm ³	ISO 1183	
	Densidade aparente	0,68	g/cm ³	ISO 60	
	Encolhimento da moldagem	0,3	%	ISO 2577	
	Pós-encolhimento	0,07	%	ISO 2577	
	Absorção de água	0,1	%	ISO 62	
	Coeficiente de fricção	Estático	-	-	-
Dinâmico		-	-	-	
Térmico	Temperatura de deflexão sob carga	208	°C @ 1,8MPa °C @ 8,0 MPa	ISO 75 AF ISO 75 C	
	Condutividade térmica		W/m K	ASTM E1461	
	Inflamabilidade UL ₉₄	V0	-	UL 94	
	Coeficiente de linear expansão térmica	Paralelo	14	10. ⁻⁶ /°C	TMA
Perpendicular		52	10. ⁻⁶ /°C	TMA	
Mecânico	Resistência à flexão	195	MPa	ISO 178	
	Módulo de flexão	14	GPa	ISO 178	
	Deformação flexural na ruptura	1,42	%	ISO 178	
	Resistência à tração	85	MPa	ISO 527-1	
	Módulo de Young de tração	14	GPa	ISO 527-1	
	Tensão de tração na ruptura	0,6	%	ISO 527-1	
	Resistência ao impacto Charpy	entalhado	3	kJ/m ²	ISO 179-1
		sem entalhe	12.2	kJ/m ²	ISO 179-1
	Força compressiva	270	MPa	ISO 604	
	Elétrico	Resistividade superficial	1.91e+013	Ohm	CEI 60093
Resistividade volumétrica		7.02e+014	Oh cm	CEI 60093	
Força elétrica		30	kV/mm	CEI 60243-1	
Índice de rastreamento comparativo (CTI)		175	V	CEI 60112	

RoHS: Vyncolit® X611 está em conformidade com RoHS2 (2011/65/UE, Restrição de Substâncias Perigosas).

REEE: As peças produzidas a partir de Vyncolit® X611 não estão sujeitas a 'tratamento seletivo' de acordo com a Diretiva 2002/96/CE sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos.

PFOS: Vyncolit® X611 não contém perfluorooctansulfonato (PFOS) de acordo com a Diretiva Europeia 2006/122/EC.

REACH/SVHC: Vyncolit® X611 não contém quaisquer Substâncias de Alta Preocupação (SVHC), conforme listado no lista de candidatos publicada pela ECHA.

¹ Propriedades medidas em corpos de prova moldados por injeção - MPTS - ISO 3167.

² Os valores relatados são médias e não se destinam a fins de especificação. Entre em contato com seu Representante Vyncolit.

³ Listado pela UL.