

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE TECNOLOGIA SENAI - CIMATEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTHUR PRATES SANTOS BAPTISTA
CAIO SAMPAIO RIOS BASTOS
FERNANDA DE CARVALHO SODRÉ
LUCAS CORREIA DE OLIVEIRA
RUDHÁ MOURA PORTO SOUSA
VANESSA MONTEIRO ALVES

THEOPRAX
PROJETO DE UM GRAB MECÂNICO HIDRÁULICO

SALVADOR- BA

2020

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE TECNOLOGIA SENAI - CIMATEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTHUR PRATES SANTOS BAPTISTA

CAIO SAMPAIO RIOS BASTOS

FERNANDA DE CARVALHO SODRÉ

LUCAS CORREIA DE OLIVEIRA

RUDHÁ MOURA PORTO SOUSA

VANESSA MONTEIRO ALVES

THEOPRAX
PROJETO DE UM GRAB MECÂNICO HIDRÁULICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário SENAI CIMATEC, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro(a) Mecânico(a).

SALVADOR- BA

2020

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de dedicar nossos mais sinceros agradecimentos aos seguintes, os quais foram imprescindíveis durante todo o processo de desenvolvimento do nosso trabalho de conclusão de curso:

À Deus, pelo dom das nossas vidas e por ter nos dado força e resiliência para superarmos todos os desafios das nossas caminhadas.

Às nossas famílias por todo o apoio e dedicação durante todo o nosso processo de educação, por nos ensinarem acima de tudo valores que levaremos por toda as nossas vidas. E principalmente por sempre acreditarem em nós.

Aos nossos amigos que tornaram a caminhada mais leve e estiveram conosco compartilhando momentos bons e ruins, os quais foram importantíssimos nos nossos processos de aprendizagem e crescimento pessoal.

Ao nosso coordenador de curso, Guilherme Souza, por estar sempre tão presente nos conduzindo e tornando-se para nós uma referência.

Ao nosso orientador, Ivo Andrei, por nos guiar sempre nos melhores caminhos.

À empresa ALTUS Equipamentos por acreditar em nós para este desafio. E ao cliente Alexandre Paes por todo suporte nos foi dado.

A todos os professores e funcionários do Centro Universitário SENAI CIMATEC que contribuíram direta e indiretamente para o nosso crescimento acadêmico e pessoal.

Ao Centro Universitário SENAI CIMATEC por nos oferecer uma estrutura acadêmica de excelência.

Por fim, gostaríamos de agradecer imensamente a todas as pessoas que passaram por nossas vidas e contribuíram de alguma forma para o nosso crescimento, cada palavra ou atitude contribuíram para nos tornarmos quem somos hoje.

Muito obrigado!

RESUMO

Os equipamentos de mobilidade de cargas são amplamente utilizados em indústrias, usinas siderúrgicas e terminais portuários, dentre estes maquinários encontra-se o *grab*, também chamado de garra. Devido a sua alta confiabilidade não só no manuseio de materiais pesados, como também de mercadorias a granel, o mesmo vem ganhando cada vez mais destaque. O *grab* é utilizado em conjunto com guindastes, sejam eles fixos, móveis, flutuantes, entre outros. Pode ser direcionado ao transporte de insumos como carvão e materiais pesados (minérios, clínquer e calcário), assim como os finos e leves, como por exemplo areia. Este trabalho tem como proposta apresentar toda a metodologia e desenvolvimento utilizados para se obter os resultados no projeto de dimensionamento de um *grab* mecânico-hidráulico, solicitado pela empresa ALTUS Equipamentos.

Palavras-chave: *Grab*. Projeto. Dimensionamento. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The cargo mobility equipment is widely used in industries, steel mills and port terminals, among these machines is the grab, also called claw. Due to its high reliability not only in the handling of heavy materials, but also in bulk goods, it has gained more and more prominence. The grab is used in conjunction with cranes, be they fixed, mobile, floating, among others. It can be used to transport inputs such as coal and heavy materials (ores, clinker and limestone), as well as fine and light materials, such as sand. This work has as proposal to present all the methodology and development used to obtain the results in the dimensioning project of a mechanical-hydraulic grab, requested by the company ALTUS Equipamentos.

Keywords: Grab. Project. Dimensioning. Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Grab</i> projetado por Leonardo da Vinci	17
Figura 2- Esboço do <i>grab</i> de acionamento hidráulico.	20
Figura 3 - Esquema de designação de peças	21
Figura 4 - Dimensões de modelos de <i>grab</i> mecânico hidráulico	22
Figura 5 - Patente US 682,021 Nail <i>Grab</i>	22
Figura 6 - Resultados de pesquisa através de palavras chave	23
Figura 7 - Estado da arte, fontes e referências.	23
Figura 8 - Principais componentes do equipamento	27
Figura 9 - Soquete aberto	30
Figura 10 - Abertura da concha.....	33
Figura 11 - Fechamento da concha.....	34
Figura 12 - Levantamento e movimentação do equipamento	35
Figura 13 - Abertura para descarregamento	35
Figura 14 - Distribuição das tensões de membrana	37
Figura 15 - Distribuição da tensão de flexão	37
Figura 16 - Tensão admissível para fadiga	39
Figura 17 - Representação de concha em posição aberta.....	43
Figura 18 - Conceito inicial do equipamento	49
Figura 19 - Equipamento carregado com sua capacidade máxima.....	50
Figura 20 - Equipamento durante o impacto com o piso	50
Figura 21 - Vista explodida dos componentes.....	51
Figura 22 - Modelo da concha com os respectivos carregamentos	52
Figura 23 - Modelo da haste os respectivos carregamentos.....	52
Figura 24 - Modelo da cabeça da garra com os respectivos carregamentos	53
Figura 25 - Modelo do bloco de comando com os respectivos carregamentos.....	54
Figura 26 - Modelo da cabeça da garra com os respectivos carregamentos	54
Figura 27 - Modelo CAD 3D finalizado posição fechada	55
Figura 28 - Modelo CAD 3D finalizado posição aberta.....	56
Figura 29 - Vista explodida do equipamento	56
Figura 30 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm ²)	58
Figura 31 - Distribuição das tensões de flexão no modelo (daN/mm ²).....	58

Figura 32 - Distribuição das tensões de membrana no modelo (daN/mm ²)	59
Figura 33 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm ²)	60
Figura 34 - Deslocamentos nodais do modelo (mm).....	60
Figura 35– Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm ²)	61
Figura 36 - Detalhe da distribuição das tensões de Tresca (daN/mm ²)	61
Figura 37 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm ²)	62
Figura 38 - Detalhe das tensões máximas principais no modelo	62
Figura 39 - Distribuição das tensões mínimas principais no modelo (daN/mm ²).....	63
Figura 40 - Detalhe das tensões mínimas principais no modelo	63
Figura 41 - Deslocamentos nodais do modelo (mm).....	64
Figura 42 - Tensões combinadas de Tresca	64
Figura 43 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência de utilização do equipamento.....	39
Tabela 2 - Classificação quanto ao estado de carga.....	40
Tabela 3 - Classificação do grupo do equipamento	40
Tabela 4 - Coeficiente dinâmico	41
Tabela 5 - Coeficiente de Majoração de carga.....	41
Tabela 6 - Tensões admissíveis para diferentes casos de serviço	42
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do aço USI SAC 350	45
Tabela 8-Tensões admissíveis para o aço USI SAC 350 de acordo com o ASME ...	45
Tabela 9 - Tensões admissíveis para o aço USI SAC 350 de acordo com a NBR 8400	45
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do aço USI SAC 350	46
Tabela 11 - Propriedades mecânicas da liga de bronze ASTM C95400 (cast).	46
Tabela 12 - Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento.....	47
Tabela 13 - Cargas aplicadas na concha	51
Tabela 14 - Cargas aplicadas na haste.....	52
Tabela 15 - Cargas aplicadas na cabeça da garra.....	53
Tabela 16 - Cargas aplicadas no bloco de comando	53
Tabela 17 - Cargas aplicadas na travessa	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
Cr	Cromo
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
Cu	Cobre
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEA	Finite Element Analysis
NBR	Norma Brasileira
MEF	Método dos Elementos Finitos
TM	Termomecânica;
Si	Silício

LISTA DE SÍMBOLOS

”	Polegadas
°	Graus
α	Velocidade angular de fechamento
σ_a	Tensão de Tração/Compressão
T_a	Tensão de Cisalhamento
HB	Dureza Brinell
daN	Decanewton
daN/mm ²	Decanewton/melímetro ao quadrado
g/cm ³	Gramas / centímetro ao cúbico
GPa	Gigapascal
HBW	Dureza de Brin
J	Joule
kg/m ³	Kilograma / metro cúbico
N	Newtons
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
m/min	Metros / minutos
MPa	Mega Pascal
m/s	Metros / segundos
P_m	Tensão primária de Membrana generalizada
P_L	Tensão primária de Membrana Localizada
P_b	Tensão primária de flexão
s	Segundos
S	Tensão Admissível
t	Tonelada
Vc	Velocidade de recolhimento dos cabos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
1.4.1 Escopo do Trabalho	15
1.4.2 Definição da Metodologia	15
2. METODOLOGIA	16
3. DESENVOLVIMENTO	16
3.1 INFORMACIONAL	16
3.1.1 Estado da arte	16
3.1.2 Análise de similares	19
3.1.3 Parâmetros de projeto	24
3.1.4 Métodos de análise	25
3.1.5 Descrição de componentes	26
3.1.5.1 Concha / Faca	27
3.1.5.2 Haste / Barra de pressão	28
3.1.5.3 Cilindro hidráulico	28
3.1.5.5 Bloco de comando	29
3.1.5.6 Travessa	29
3.1.5.7 Polias	29
3.1.5.8 Cabos de Tração	29
3.1.5.9 Soquetes	30
3.1.5.9 Pinos de articulação	31
3.1.5.10 Engrenagem	31
3.1.6 Descrição do funcionamento	31
3.1.6.1 Abertura e movimento descendente	32
3.1.6.2 Fechamento e movimento ascendente	33
3.1.6.3 Içamento	34
3.1.6.4 Abertura das conchas para descarga	35
3.1.7 Critérios de aceitação	36

3.1.7.1 Critérios adotados pela ASME	37
3.1.7.2 Critérios adotados pela NBR 8400	39
3.2 CONCEITUAL	42
3.2.1 Estudo do mecanismo	42
3.2.2 Dimensionamento básico	44
3.2.3 Seleção de Materiais	44
3.2.5 Conceito inicial do equipamento	47
3.3 BÁSICO	49
3.3.1 Simulação pelo método de elementos finitos	49
3.3.1.1 Concha	51
3.3.1.2 Haste	52
3.3.1.3 Cabeça da garra	53
3.3.1.4 Bloco de comando	53
3.3.1.5 Travessa	54
3.3.1 Modelo CAD 3D do conjunto	55
3.3.2 Desenho de conjunto	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Resultados da simulação	57
4.1.1 Concha (ASME)	57
4.1.2 Concha (NBR 8400)	60
4.1.3 Concha impacto	64
5. CONCLUSÃO	65
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE 1 – CÁLCULO BÁSICO ANALÍTICO	73
APÊNDICE 2 – DESENHO DO CONJUNTO GERAL	82
APÊNDICE 3 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES DOS COMPONENTES	83

1. INTRODUÇÃO

Este documento abordará o estudo realizado para o dimensionamento de um *grab* mecânico-hidráulico, de capacidade equivalente a 12 m³, para movimentação de grãos. O projeto básico foi solicitado pela empresa ALTUS Equipamentos à presente equipe de *Theoprax*. Neste sentido, serão contempladas as etapas informacional, conceitual e básico, onde será apresentada a descrição do equipamento, além das suas principais aplicações, dimensões, capacidade e características específicas relevantes. Estes serão entregues ao cliente em formato de “*book*” com toda a documentação relativo ao projeto básico como produto do trabalho.

Na etapa informacional foi realizado um *benchmarking*, a fim de entender as melhores práticas do mercado no que tange a fabricação e o dimensionamento de *grabs*, uma vez que este equipamento possui particularidades e características que precisam ser analisadas para se obter um melhor aproveitamento do produto final. Consoante foi realizado um estudo sobre o estado da arte para o dimensionamento de *grabs*, buscando o entendimento das melhores soluções e conceitos aplicados atualmente.

Posteriormente, no projeto conceitual, foi aprofundado o estudo sobre os mecanismos presentes no equipamento, para que pudesse obter o esperado funcionamento do equipamento no que tange suas transmissões e transformações de movimento e força. Nesta etapa também foi iniciada a modelagem em software CAD 3D para que fosse possível estudar o movimento prévio e obter um esclarecimento dos pontos que serão críticos durante o projeto e que, conseqüentemente, precisam de uma maior atenção de modo a garantir o seu correto funcionamento. Assim, a partir do modelo constatou-se, dentre outros pontos, que seria necessária uma maior atenção quanto à angulação e disposição dos elementos móveis para se obter e performar uma melhor eficiência na coleta materiais granulados, dentre outros detalhes que deverão ser discorridos mais tarde neste documento.

No projeto básico foram utilizados os parâmetros estabelecidos e estudados nas etapas anteriores, bem como finalizados os cálculos para dimensionamento e estabelecimento das definições para os mecanismos. Deste ponto foram executadas análises em software de simulação numérica com respeito a resistência e o

comportamento sobre esforços, cargas e forças aplicadas para validação do equipamento projetado.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o avanço da tecnologia e com o aumento no fluxo da informação de maneira globalizada, o mercado está cada vez mais competitivo. Além disso, para fabricar e comercializar um equipamento industrial deve-se avaliar todos os custos envolvidos, desde o projeto até a fabricação, como: mão de obra; material; infraestrutura; energia; segurança; máquinas; dentre outros. O projeto deve ser preciso para atender suas solicitações e cumprir as especificações e expectativas do cliente.

Na execução de um projeto, existem dois tipos de dimensionamentos inadequados, o superdimensionamento e o subdimensionamento, os quais acarretam em consequências negativas no produto final e no lucro final agregado a este. O projeto está subdimensionado quando o produto desenvolvido não suporta as solicitações necessárias para cumprir sua função. Já o superdimensionamento ocorre quando o produto suporta mais do que será solicitado, resultando em um maior consumo de recursos para seu desenvolvimento, logo, mais investimento, menos lucro e menor competitividade no mercado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os *grabs* são amplamente utilizados para manuseio e mobilidade de cargas, grandes volumes de insumos, materiais pesados, entre outros. Por essa razão podem ser encontrados e aplicados em indústrias, terminais portuários, aeroportuários, usinas siderúrgicas e estações de tratamento de lixo.

Diante da sua ampla aplicabilidade e relevância no mercado, assim como a sua notável adição de eficiência em processos de transporte de materiais, a empresa ALTUS Equipamentos solicitou a confecção de um projeto técnico para a fabricação de um modelo deste equipamento. Para isso, faz-se necessário o desenvolvimento e estudo para o seu *design*, dimensionamento e posterior fabricação, estendendo a análise para todos os elementos e peças que o compõe, uma vez que estes devem

suportar as cargas solicitadas com menor custo de fabricação, não sendo superdimensionados.

Assim, visando entrar no mercado de fornecimento de equipamentos portuários o cliente solicitou à presente equipe de *Theoprax* a elaboração de um projeto técnico básico de dimensionamento de um *grab* mecânico-hidráulico para uma capacidade de volume de 12m³.

Desta forma, é relevante destacar a necessidade da realização das etapas de referenciamento bibliográfico e *benchmarking*, com a finalidade de compreender as melhores práticas de engenharia para o projeto de fabricação de *grabs* mecânico-hidráulicos já existentes no mercado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste documento é apresentar o projeto básico do *grab* mecânico-hidráulico. Sendo assim, serão explanadas todas as etapas necessárias para se obter os resultados finais e a metodologia utilizada em cada uma delas.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para a realização deste documento são:

- Definir os parâmetros iniciais do projeto;
- Compreender o funcionamento do *grab*;
- Dimensionar e modelar o *grab* mecânico hidráulico em CAD 3D;
- Simular o protótipo virtual pelo Método de Elementos Finitos;
- Elaborar a documentação de projeto básico com os detalhes e especificações de cada parte.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 a seguir será descrito o projeto informacional, no qual foram coletadas diversas informações a respeito do equipamento, seus componentes e materiais utilizados. O capítulo 3 trata sobre o desenvolvimento do produto, incluindo

todas as etapas que levaram a construção do protótipo virtual. No capítulo 4 o modelo e a estratégia adotada para validação do modelo. Já no capítulo 5, as considerações finais e o capítulo 6 as recomendações para os trabalhos futuros, bem como as fronteiras tecnológicas envolvidas no desenvolvimento deste tipo de equipamento.

1.4.1 Escopo do Trabalho

O trabalho abordará as etapas para desenvolvimento do projeto de um *grab* mecânico-hidráulico com um volume de 12 m³, o qual seu dimensionamento não incluirá cargas com densidade maiores que 2000 kg/m³. O projeto deste equipamento é voltado para ambientes corrosivos, com isso, é proposto identificar e selecionar os materiais mais adequados para esta finalidade.

Além disso, o escopo engloba também as etapas de projetos informacional, conceitual e básico, bem como as simulações realizadas em CAE (*Computer Aided Engineering*) e o modelo virtual, apresentando os resultados alcançados e suas devidas discussões.

1.4.2 Definição da Metodologia

A metodologia deste trabalho será fundamentada tanto nas pesquisas bibliográficas e no estado da arte, quanto na análise de equipamentos similares e benchmarking. A estratégia proposta nestes dois últimos se dá para que seja possível compreender as melhores práticas de projeto de engenharia do equipamento em questão.

Assim, dentre as empresas analisadas neste processo, destacam-se a Saur, a Peiner Smag, a Shanghai Qifan Machinery Co., Ltd e a BLUG Credebug sl., que disponibilizam de desenhos esquemáticos, catálogos e manuais com informações dimensionais, operacionais e de manutenção.

Quanto ao estado da arte, para o levantamento de referências técnicas e científicas foram realizadas pesquisas através de *key-words* ou palavras chaves. O banco de dados do portal Science Direct foi utilizado como biblioteca.

Além disso, foram realizadas pesquisas sobre as patentes existentes para *grabs*, sobre o funcionamento do mecanismo e dispositivos, bom como sistemas de segurança e de movimentação. Nesse sentido, algumas patentes relevantes foram encontradas, são elas: US 682,021 - *Nail Grab*, US1673237 - *Automatic Crane Grabs*, US5156240 - *Rope Grab*, US6712181 - *Safety Rope Grab*, dentre outras.

A partir deste levantamento de conteúdo bibliográfico, foi pensado o dimensionamento do equipamento, levando em consideração alguns fatores como o tipo de movimentação a ser realizada, os materiais apropriados para empregar em sua fabricação e seu mecanismo de funcionamento. Deste ponto deverá ser obtido um protótipo virtual que será submetido a simulações em CAD (*Computer Aided Design*), e CAE (*Computer Aided Engineering*), este último utilizando o Método dos Elementos Finitos.

2. METODOLOGIA

O método do trabalho se baseou na metodologia de desenvolvimento de produto, subdividindo as etapas em informacional, conceitual e básico.

No projeto informacional foram feitos o estudo da arte, análise de similares, parâmetros de projeto, métodos de análise, descrição dos componentes, descrição do funcionamento, critérios de aceitação. Na parte conceitual, foram feitos o estudo do mecanismo, dimensionamento básico, seleção de materiais e modelagem 3D do conceito do equipamento.

Validado o conceito com o cliente, foram gerados os modelos de simulação pelo método de Elementos Finitos, o desenho de conjunto e a lista de materiais com os componentes do *grab* realizando a parte do projeto básico. Vale salientar que o resultado final não foram desenhos de detalhamento de peças e componentes do equipamento, pois este não é o objetivo trabalho.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 INFORMACIONAL

3.1.1 Estado da arte

Os *grabs* são equipamentos projetados para o descarregamento de navios de carga a granel, agarrando o material e transferindo-o para a tremonha no cais

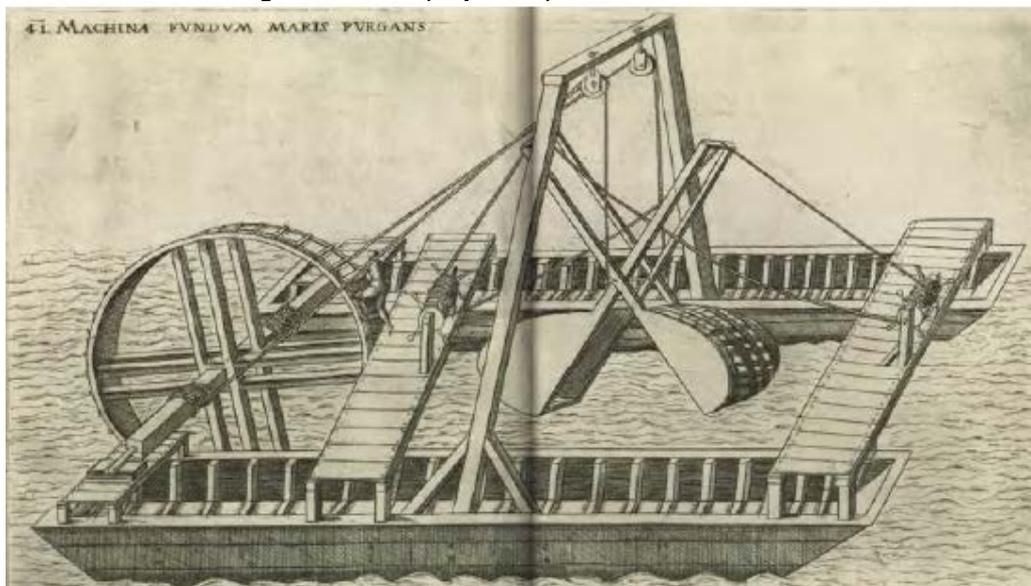
(LOMMEN, 2016). O desenvolvimento de um *grab* é ainda um processo complexo quando se diz respeito a prever sua performance a cada novo *design*. Para este projeto o modelo mecânico hidráulico será selecionado, entretanto diferentes tipos e modelos de equipamentos semelhantes vêm sendo desenvolvido ao longo dos anos.

Inicialmente, foi realizado um *benchmarking* a fim de entender as melhores práticas disponíveis de mercado no que tange a fabricação de *grabs*. Ainda foi realizado o estado da arte, além da definição dos parâmetros iniciais que serão utilizados no desenvolvimento deste projeto.

Um *grab* também pode ser conhecido como uma garra ou um tipo de descarregador bastante versátil, que ganhou aceitação mundial devido a sua confiabilidade, flexibilidade e robustez. Sua principal aplicação é no manuseio de mercadorias a granel. Estes equipamentos podem ser projetados com diversas capacidades de carga, podendo variar entre 4 m³ até 60 m³.

De acordo com Priestman (1946, apud Lommen, 2016), o *grab* mostrado na Figura 1 foi desenvolvido por Leonardo da Vinci (1452- 1519) e é considerado o primeiro *grab* projetado, no entanto ainda não se sabe ao certo se este modelo foi fabricado.

Figura 1 - *Grab* projetado por Leonardo da Vinci



Fonte: LOMMEN (2016).

De acordo com Boumans (1985), embora o conceito básico tenha permanecido praticamente inalterado desde o século XV, os rápidos avanços na tecnologia do aço renderam aços mais leves, porém mais fortes e mais resistentes à abrasão.

Existem diferentes mecanismos de abertura de fechamento de *grab*. Para Scheffler et al. (1998), pode-se classificar *grabs* quanto ao seu mecanismo de fechamento em três principais categorias:

- **Acionados por cabos:** Este tipo de equipamento é acionado mecanicamente através de cabos, geralmente utilizam-se quatro cabos, sendo dois de sustentação e dois para funcionamento do mecanismo.
- **Acionados por motor:** Este tipo de *grab* possui um motor para acionamento do mecanismo. A desvantagem deste tipo de *grab* é a adição de uma massa ao equipamento.
- **Acionamento hidráulico ou pneumático:** A unidade de acionamento hidráulica ou pneumática situa-se no guindaste. Neste tipo, um complicador para funcionamento seria uma longa distância entre a unidade de bombeamento e o atuador.

Ainda uma outra maneira de classificação leva em consideração o tipo de material a ser agarrado, como proposto por Conrad (1969):

- **Dupla concha:** Este tipo de *grab* possui duas conchas opostas e é mais utilizado para materiais a granel.
- **Múltiplas conchas:** Este tipo de *grab* possui mais de duas conchas e pode ser utilizado para materiais a granel ou para largos fragmentos de rochas, sucatas, entulhos.
- **Concha especial:** Alguns tipos especiais de *grabs* foram desenvolvidos e adaptados para carregamento de materiais específicos, como por exemplos *grabs* desenvolvidos para carregamento de troncos de madeira.

Como já esboçado no capítulo anterior, este projeto foca no desenvolvimento de um *grab* por acionamento mecânico hidráulico, utilizando cabos e um par de cilindros hidráulicos passivos, portanto, não possuem uma unidade de bombeamento.

Na seção 3.1.6 será possível compreender a função destes cilindros hidráulicos no sistema de abertura e fechamento do equipamento e todos os demais detalhes de funcionamento do equipamento.

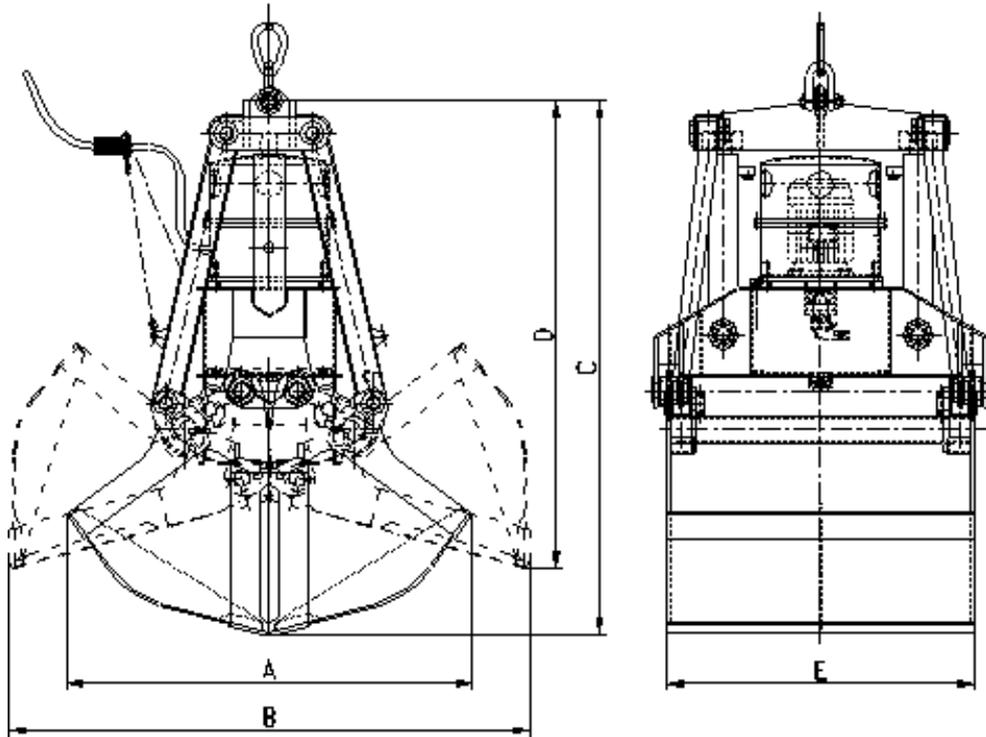
Por se tratar de um equipamento desenvolvido para fins comerciais, optou-se por desenvolver um modelo de vasta aplicação no mercado, com volume e geometria que podem ser utilizados para diferentes tipos de materiais e condições de operação. Portanto, o modelo escolhido pela cliente e que deverá ser desenvolvido para este trabalho será de um *grab* mecânico hidráulico de duas conchas.

3.1.2 Análise de similares

Na pesquisa de trabalhos similares foi possível definir as principais características que definem o modelo de *grab* escolhido para o projeto, como: modo de acionamento; *design* das conchas; práticas de carregamento mais aplicadas no mercado.

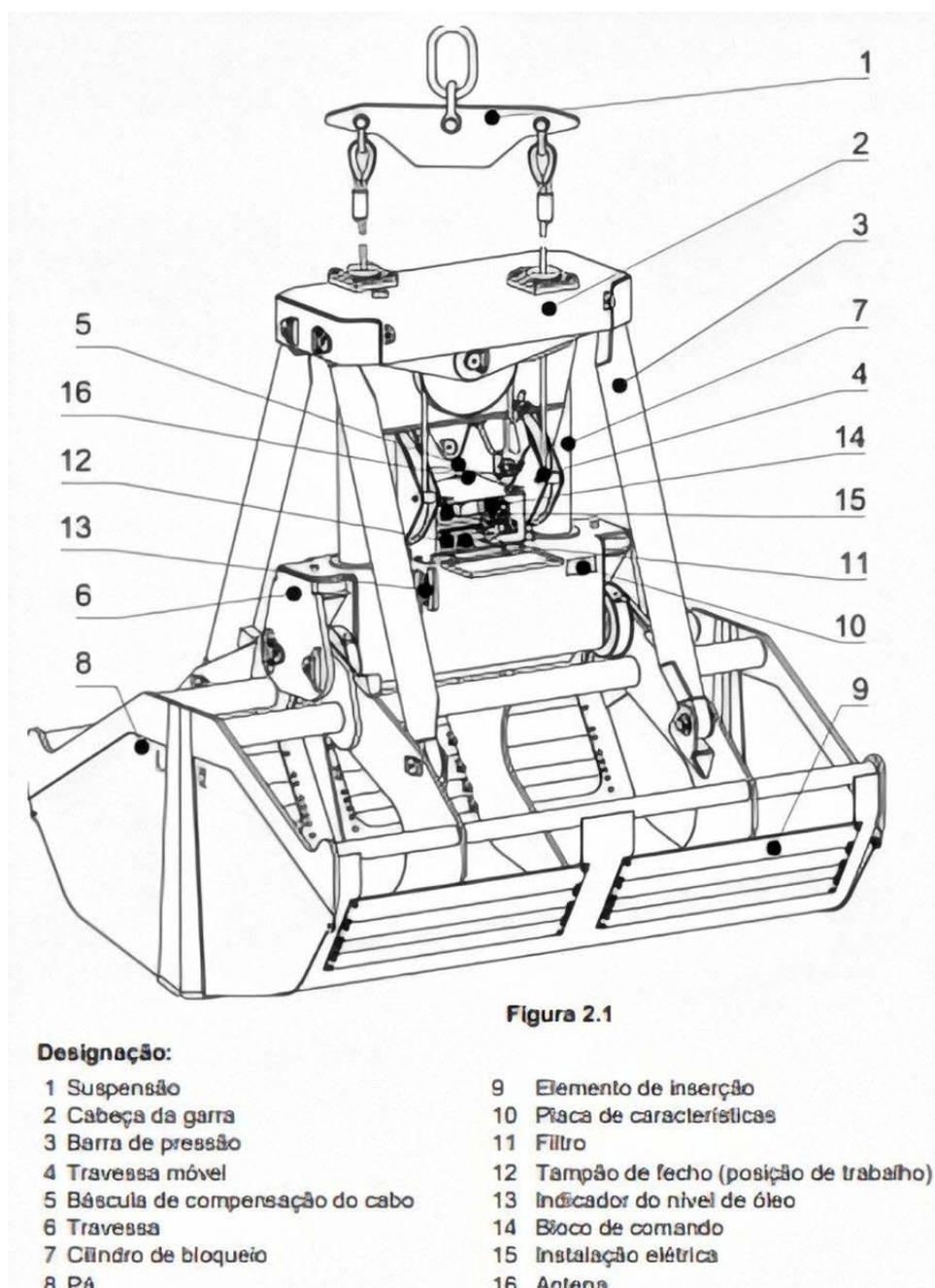
A partir da definição do modelo a ser projetado e após levantamento das primeiras informações e detalhes para projeto, foi realizada uma videoconferência para consultoria técnica com o Engenheiro Mecânico Carlos Eduardo Conceição Santos de Almeida (CREA 3000067211), uma vez que o profissional possui experiência com esse tipo de projeto e pôde trazer uma visão geral e esclarecedora com respeito aos principais pontos a serem observados durante o seu desenvolvimento, além de salientar estratégias importantes no que tange a modelagem em 3D.

A partir disso, se iniciou um trabalho de pesquisa e *benchmarking* para que fosse possível esclarecer e compreender ainda mais as melhores práticas de projeto de engenharia para o equipamento. Dentre as empresas analisadas se destacaram a Saur, a Peiner Smag (Figura 2 e Figura 3), a Shanghai Qifan Machinery Co., Ltd e a BLUG Credebug sl., que disponibilizam desenhos esquemáticos, catálogos e manuais com informações sobre: Dimensões do equipamento; modos de operacionais, dados de manutenção, dentre outras informações relevantes para o projeto.

Figura 2- Esboço do *grab* de acionamento hidráulico.

Fonte: SGMC (2020).

Figura 3 - Esquema de designação de peças



Fonte: PEINER SMAG (2017).

Ainda, em novas pesquisas, foi encontrado em catálogo da empresa BLUG Credebug sl., um modelo de *grab* significativamente semelhante ao contratado para o presente projeto, servindo então como mais uma importante base teórica. O recorte do catálogo apresentado a seguir mostra os principais equipamentos e dimensões dos produtos (*grabs* mecânico hidráulicos) deste fabricante.

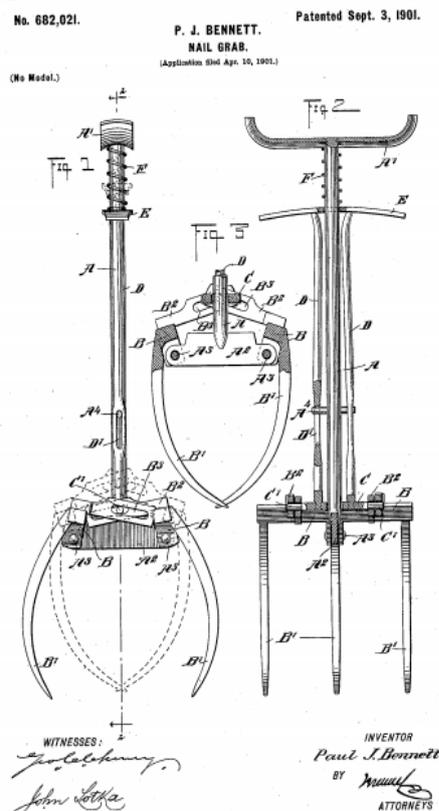
Figura 4 - Dimensões de modelos de grab mecânico hidráulico

Reference	Capacity	Withdrawn cable	Pulley Ø	Cable Ø	Crane SWL	Weight	Dimensions						
	m ³	m	mm	mm	t	kg	A	B	C	D	E	F	G
CM1R-3400-1,8	3,4	3400	450	22	10	3750	2980	3135	2535	2870	2130	7045	7200
CM1R-4200-1,8	4,2	3200	450	24	12,5	4750	2970	3090	2245	2915	2425	6850	6970
CM1R-5400-1,8	5,4	3510	500	26	16	6000	3210	3350	2500	3170	2510	7410	7550
CM1R-6500-1,8	6,5	3720	565	28	20	7500	3485	3615	2650	3410	2700	7900	8025
CM1R-8500-1,8	8,5	4085	625	32	25	9300	3940	4065	2885	3725	2975	8710	8840
CM1R-10000-1,8	10	4800	700	36	30	10000	4100	4300	3100	3900	3200	9500	9300
CM1R-11500-1,8	11,5	5030	700	36	32	10800	4250	4610	3320	4200	3425	10300	10700

Fonte: BLUG (2020).

Ainda foram realizadas pesquisas sobre patentes existentes para estes equipamentos e detalhes de funcionamento dos seus dispositivos, assim como sistema de segurança e de movimentação empregados. Neste sentido, foram identificadas algumas patentes relevantes, como: US 682,021 - *Nail Grab*, ilustrada na figura abaixo; US1673237 - *Automatic Crane Grabs*; US5156240 - *Rope Grab*; US6712181 - *Safety Rope Grab*.

Figura 5 - Patente US 682,021 Nail Grab.



Fonte: BENNET (1901).

O levantamento de referenciais técnicas e científicas para estado da arte foi realizado através de “key-words” ou palavras chaves no banco de dados ou biblioteca disponível no portal online *Science Direct*. Os resultados foram tabulados e podem ser vistos na imagem a seguir:

Figura 6 - Resultados de pesquisa através de palavras chave

Banco de dados Science Direct			Data:	07/06/2020
Busca	Palavras chave (keywords)	Restrições	Resultado(s)	Aproveitados
1	"Grab"	Aberto	93781	
2	"Grab"	Título	2542	
3	"Colher" AND "mecânica"	Aberto	16	
4	"Concha" AND "mecânica"	Aberto	178	
5	"Concha" AND "mecânica" AND ("granel" OR	Aberto	1	
6	"Grab" AND "Design"	Aberto	46916	
7	"Grab" AND "Design"	Title, keywords, abstract "Grab"	1273	1
8	("Clamshells" OR "Grab") AND ("Bulk" or	Aberto	2190	
9	"Grab" AND "Bulk"	Aberto	12811	1
10	"Grab" AND "Bulk"	Title, keywords, abstract	323	2
11	"Grab" AND "Bulk"	Título "Grab"	18	
12	("Grab") AND "Prototype" AND "Engineering"	Título "Grab"	54	

Fonte: Própria.

As quatro fontes obtidas, por sua vez, adicionam mais cinco documentos de orientação para estado da arte, retiradas dos capítulos de referências e menções. Dessa forma, o extrato final pode ser consultado na imagem a seguir.

Figura 7 - Estado da arte, fontes e referências

nº	AUTORES	TEMA	LOCAL	ANO
1	Chang Xu, Hanbin Xiao, Sheng Zou, Rong Zenga	Research on Monitoring Force of Steel Wire Rope of Grab Dredger Base on Wireless Sensing	Wuhan University of Technology - China	2017
2	Xiao Hanbin; Xu Changsheng; Tao Dexin; Xu Chang	Research and Manufacturing of the 18m*3 Large Grab Dredger	Wuhan University of Technology - China	2015
3		Grab or Clamshell dredger		
4	Miedema	A sensitivity analysis of the production of clamshells	Delft University of Technology - Países Baixos	2008
5	Chang Xu, Hanbin Xiao, Sheng Zou, Feng Zhu	Analysis and Verification on Mechanics Mechanism for Flat Digging of Grab	Wuhan University of Technology - China	2018
6	M. Javad Mohajeri et.al	Bulk properties variability and interdependency determination for cohesive iron ore	Delft University of Technology - Países Baixos	2020
7	Stef Lommen et. Al	DEM particle upscaling for large-scale bulk handling equipment and material interaction	Delft University of Technology - Países Baixos	2019
8	C.J Coetzee et. Al	Discrete element parameter calibration and the modelling of dragline bucket filling	Stellenbosch University - Africa do sul	2009
9	Stef Lommen	Virtual prototyping of grabs	Delft University of Technology - Países Baixos	2016

Fonte: Própria

Através desta pesquisa bibliográfica pode-se perceber uma relação dos países que atualmente detém o conhecimento e fabricação dos mais modernos modelos de *grabs* e o número de publicações e pesquisa direcionados para este equipamento.

Atualmente, as mais recentes publicações estão sendo desenvolvidas pela Wuhan University na China e a Delft University nos Países Baixos (Holanda).

É importante ressaltar que a lista de referências não se restringe às selecionadas na etapa de estado da arte, esta serviu como direcionamento de estudo e o entendimento do que existe de mais recente sendo desenvolvido no mundo a respeito desta tecnologia. Visto que, ao longo do desenvolvimento do projeto, diversas outras referências foram utilizadas e derivadas desses materiais selecionados. Inclusive referências base para projetos mecânicos como normas e livros.

3.1.3 Parâmetros de projeto

Foram levantadas referências que definem de forma qualitativa e quantitativa os principais parâmetros para o projeto de um *grab* mecânico hidráulico. Assim, destacam-se:

Segundo Boumans (1985), os *grabs* podem ser dimensionados com algumas características básicas de projeto como:

- O centro de gravidade deve ser o mais baixo possível para aumentar a estabilidade da escavação, aumentando assim o rendimento;
- A relação peso morto / carga útil é normalmente de 2/3 de carga e 1/3 de peso morto, caso o peso morto seja muito menor que esse valor, pode-se ter dificuldade de escavação do material;
- O tempo de fechamento deve ser conhecido e controlado, uma vez que uma concha com fechamento muito rápido pode pegar menos que sua carga máxima.

Talber (1959) apud Miedema (2008) afirma que aumentar o tamanho da concha nem sempre aumenta a capacidade de carga útil, sendo que a relação ideal entre sua largura e extensão fica entre 0,6 e 0,75.

Torke (1962) apud Miedema (2008) chegou à conclusão que a carga útil é inversamente proporcional ao ângulo de corte das arestas da caçamba e que na situação fechada, esse ângulo deve estar o mais próximo possível da horizontal, com valores entre 11 a 12 graus.

Wilkinson (1963) apud Miedema (2008) informa que a melhor concha é a que exerce o maior torque possível no solo, principalmente no final do ciclo de fechamento.

Hupe e Schuszter (1965) apud Miedema (2008) afirmam que *grabs* para trabalharem com materiais mais ásperos devem ser maiores e mais pesados. É importante citar que Gebhardt (1972) apud Miedema (2008) concluiu que os “dentes” no fim das conchas são úteis apenas em materiais ásperos, mas tem efeito negativo em materiais finos com relação às forças de penetração.

3.1.4 Métodos de análise

Piazzze (2014), em seu trabalho sobre análise do projeto de uma barra de carga após falha utilizando método por elementos finitos, aborda diversas práticas possíveis para estudo, verificação e dimensionamento de projetos mecânicos. Para Soriano (2003), existem algumas formas de estudo do comportamento de sistemas físicos como modelos físicos, modelos de laboratório e modelos matemáticos.

Os componentes mais simples como barra simples, vigas, tarugos podem ser relativamente fáceis de analisar utilizando métodos analíticos. Conforme Norton (2013), esses modelos geralmente incluem um modelo do carregamento que consiste em diagramas de corpo livre que apresentam todas as forças, momentos e torques atuando sobre o sistema bem com suas equações apropriadas para seus cálculos.

Segundo Budynas (2011), um protótipo consiste na construção de um objeto em escala reduzida. Trata-se de um método para avaliação e prova final do projeto, provando se o mesmo atende as necessidades, possui boa viabilidade econômica, confiabilidade, facilidade de manutenção e ajustes. O mesmo relata ainda que os componentes reais são mais complexos para soluções analíticas, experimentações ou métodos numéricos e que softwares de engenharia permitem o desenvolvimento de desenhos tridimensionais 3D, possibilitando a realização de cálculos rápidos e precisos.

Devido aos recursos associados a elaboração do projeto, optou-se pela utilização de modelos matemáticos com o uso do software *AutoDesk SIMULATION* que utiliza do método de elementos finitos para teste e validação do protótipo virtual.

Também foi desenvolvida uma etapa de cálculo analítico como forma de pré-dimensionamento do modelo, que serviu como versão inicial do modelo virtual. Vale a pena ressaltar que nem todos os componentes foram passíveis de análise pelo método analítico, visto a complexidade da sua geometria.

Consoante Norton (2013), o método dos elementos finitos (FEA) tornou-se cada vez mais disseminado, devido à disponibilidade de softwares comerciais de análise e à interface, em sua grande maioria, com softwares CAD. Esse método consiste na análise de tensões e deflexão, através da divisão do volume da peça escolhida em um conjunto finito de elementos contíguos e discretos. Em seguida, resolve-se equações para cada elemento da peça e seus respectivos nós (também conhecidos como malha), a partir de determinadas condições de contorno e cargas aplicadas.

Quando se trata da malha, é de suma importância o seguinte entendimento:

Os elementos de maior tamanho podem ser usados em regiões da peça onde o gradiente (inclinação) de tensão varia suavemente. Nas regiões onde o gradiente de tensão muda rapidamente, próximo a concentrações de tensão ou cargas aplicadas, por exemplo, uma malha mais fina (refinada) é necessária. (NORTON, 2013, p. 482).

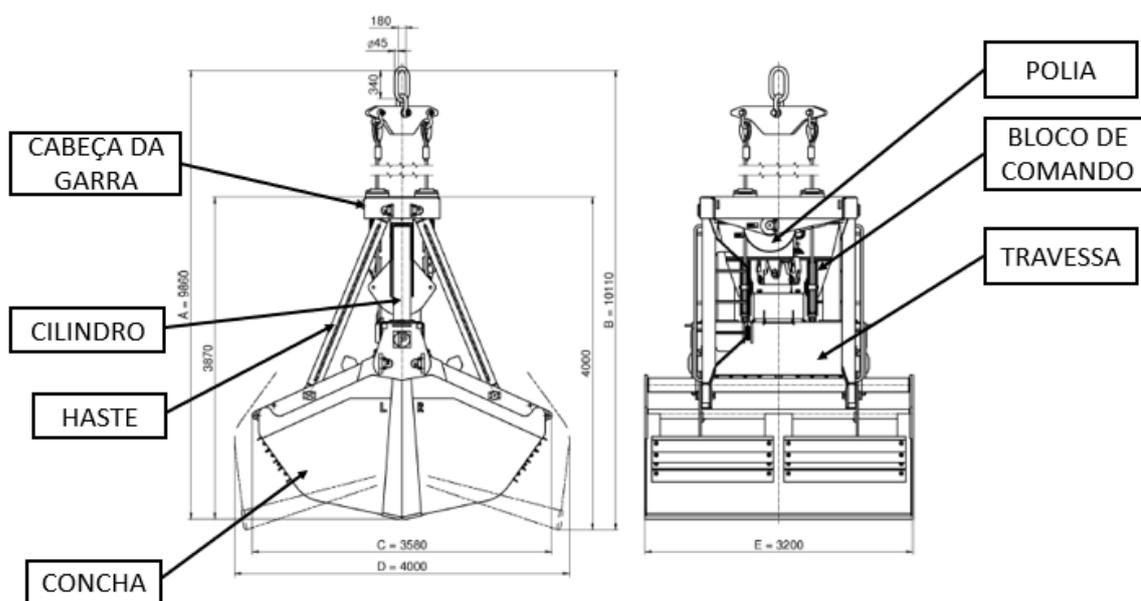
Vale ressaltar que quanto maior o refino da malha, maior será o tempo de processamento, sendo assim, cabe ao analista a otimização entre a precisão e esse tempo.

Para o projeto, foi feita a análise de elementos finitos nos componentes do *grab* separadamente a fim de tornar o modelo mais leve no processamento, para tal, utilizou-se as forças equivalentes e aplicou-se nestes componentes, sendo eles: concha, haste, cabeça da garra, bloco de comando e travessa.

3.1.5 Descrição de componentes

A imagem abaixo indica os principais componentes do equipamento.

Figura 8 - Principais componentes do equipamento



Fonte: Adaptado de PEINER SMAG (2017).

3.1.5.1 Concha / Faca

A concha é o componente principal do *grab*, visto que tem a função de acomodar o granel dentro do equipamento, de forma a evitar que o produto seja despejado quando estiver em transporte. Esse componente é composto por um balde (*bucket*) e por facas (*knife*) instaladas e dispostas de forma simétrica na extremidade do balde.

Consoante Miedema et. al. (2000), afirma que para determinar o modelo da concha, alguns fatores devem ser considerados: o peso morto, o formato do balde, as propriedades mecânicas do solo e a carga útil.

Dentre as classificações das garras acionadas por cabos, as garras mecânicas são as mais usadas para a movimentação de material a granel (Champion, 1989). Esse modelo em especial tem uma construção robusta, tendo um funcionamento mais simples e maior facilidade para operar, além disso, como tem menos peças esse tipo de equipamento está sujeito a poucas falhas, exigindo menor manutenção (Boumans 1985).

As facas estão localizadas nas extremidades das conchas e tem como função principal raspar no solo, de forma mais eficiente, o material a ser transportado. Uma vez que o equipamento é destinado à movimentação de materiais a granel, é de suma

importância que no movimento de fechamento da concha seja coletada a maior quantidade possível de grãos, e vale ressaltar que o ângulo de corte é um dos fatores de maior influência neste caso e deve possuir entre 11 e 12 graus.

Hupe e Schuszter (1965) apud Miedema (2008) afirmam que *grabs* para trabalharem com materiais mais ásperos devem ser maiores e mais pesados. É importante citar que Gebhardt (1972) apud Miedema (2008) concluiu que os “dentes” no fim das conchas são úteis apenas em materiais ásperos, mas tem efeito negativo em materiais finos com relação às forças de penetração.

3.1.5.2 Haste / Barra de pressão

O *grab* possui quatro hastes que permitem o movimento articulado da concha e também suportam parte do peso do granel carregado. É imprescindível o correto funcionamento deste componente, uma vez que é através dele que há a transferência de movimentos de abertura e fechamento dos cilindros hidráulicos para as conchas.

3.1.5.3 Cilindro hidráulico

Os cilindros empregados no *grab* mecânico hidráulico utilizam a energia hidráulica do fluido em seu interior para reduzir os esforços mecânicos que as partes móveis ou mecanismo estão submetidos durante a operação do equipamento.

Ainda estes elementos são imprescindíveis, uma vez que é a partir do seu acionamento ou liberação que ocorre o início do ciclo de movimentação do *grab*, por meio da transferência do óleo hidráulico em seu interior, entre câmaras.

Esses dispositivos ainda têm como finalidade controlar a velocidade de abertura da concha. Ainda, podem ser classificados como cilindros de tipo passivo, portanto, não há central hidráulica para bombeamento do fluido para o seu interior.

3.1.5.4 Cabeça da garra

A cabeça da garra do *grab* é composto por um par de polias fixas que permitem a movimentação de subida e descida do equipamento pelo guindaste. Nela estão fixadas as hastes ou barras de pressão, que possibilitam a movimentação da concha.

Ainda podem ser consideradas a implementação feitos furos de dreno, com o objetivo de facilitar e/ou otimizar a movimentação do equipamento em locais submersos.

3.1.5.5 Bloco de comando

O bloco de comando do *grab* é composto por um par de polias móveis que permitem a movimentação de subida e descida do equipamento pelo guindaste. Nela estão fixados os cilindros hidráulicos, que auxiliam a movimentação da concha.

3.1.5.6 Travessa

A travessa é uma estrutura que tem a função de permitir o fechamento da concha após o acoplamento do bloco de comando. Nessa estrutura estão localizados alguns componentes como o pistão, o filtro, o indicador de nível de óleo e as instalações elétricas do equipamento.

3.1.5.7 Polias

Polias são componentes de máquinas muito utilizadas em elevação de cargas. São utilizadas com cabos e podem ser associadas de maneira a reduzir o esforço necessário de tracionamento do mesmo, sendo que as polias fixas não reduzem o esforço necessário somente alteram a direção de movimentação da carga em relação a direção do esforço, seja este realizado por uma máquina ou homem.

A cada polia móvel no sistema teremos a redução pela metade da força necessária para levantar o objeto. Com isso torna-se imprescindível neste tipo de equipamento o uso de polias e sua associação com uma polia móvel é fundamental para o fenômeno de fechamento do *grab*.

A NBR 10980 determina algumas dimensões básicas de polias e roldanas e determina que os materiais utilizados para este componente podem ser aço fundido, aço laminado, aço forjado ou ferro fundido.

3.1.5.8 Cabos de Tração

Os cabos utilizados na aplicação de elevação de carga são geralmente fabricados por um conjunto de arames de aço com diferentes configurações de arranjo. A composição deste arranjo diz a respeito à resistência a abrasão, flexibilidade, resistência ao amassamento, entre outros fatores. Os cabos podem ter sua alma em fibra ou em aço, a alma é um núcleo em torno do qual as pernas são torcidas e ficam dispostas em forma hélice.

Existem diversas variáveis na escolha de um cabo adequado sendo a resistência de ruptura um dos principais parâmetros empregados e essa resistência é função do diâmetro do cabo, material e sua configuração.

3.1.5.9 Soquetes

Os soquetes são componentes destinados para a fixação dos cabos. Eles são acoplados nas extremidades dos cabos e possuem diversos modelos para diferentes tipos de aplicações. Existem diversos tipos de soquetes comerciais e sua utilização não reduz o limite de carga do conjunto, e ainda atua no retardo ao desgaste dos componentes. Para isso, o material utilizado deve ter alta resistência mecânica e resistência à corrosão.

Figura 9 - Soquete aberto



Fonte: CIMAF (2010)

3.1.5.9 Pinos de articulação

De acordo com Norton (2013), os pinos padronizados retos são fabricados com tolerâncias pequenas, com variação no diâmetro em mais ou menos 0,0001 in (polegadas), o que corresponde em torno de 0,00254 mm.

O elemento pode ser confeccionado nos seguintes materiais: aço de baixo carbono, aço resistente à corrosão (cromo), ligas de bronze e latão, bem como aços-liga endurecidos, com durezas até 40-48 HRC. Por serem um elemento de desgaste, recomenda-se que os pinos sejam inspecionados regularmente, lubrificados e, caso necessário, sejam substituídos.

3.1.5.10 Engrenagem

Consoante Norton (2013), as engrenagens são utilizadas para transmissão de torque e velocidade angular, havendo uma grande variedade de tipos. Em geral, elas são padronizadas quanto à forma do dente e ao tamanho, apresentando aplicações em motores de automóveis, relógios, indústrias siderúrgicas, alimentícias e ferroviárias, dentre outros.

De acordo com Norton (2013), há um número limitado de metais e ligas apropriados para engrenagens que transmitem potências significativas, são eles: aços, bronze, ferros fundidos e ferros maleáveis e nodulares.

Em conformidade com Gasparin (2004), o material escolhido para os pares de engrenagens está relacionado principalmente com a resistência mecânica, o processo de fabricação, bem como o custo associado a este elemento. Devido a isso, a escolha do material se faz importante para o projeto e dimensionamento de engrenagens.

3.1.6 Descrição do funcionamento

O equipamento projetado funciona por meio de um sistema de elementos de vantagem mecânica combinado a dois cilindros hidráulicos (mecânico-hidráulico), de modo a distribuir e atenuar os esforços de abertura e de fechamento das conchas em seus componentes.

O seu sistema de cabos e polias trabalham de forma sincronizada e operam no fechamento e abertura do mecanismo. Os dois cilindros têm como função auxiliar no suporte da carga transportada, assim como permitir o acoplamento e desacoplamento conjunto superior com o conjunto inferior (conchas).

O funcionamento do equipamento pode ser dividido em cinco operações principais:

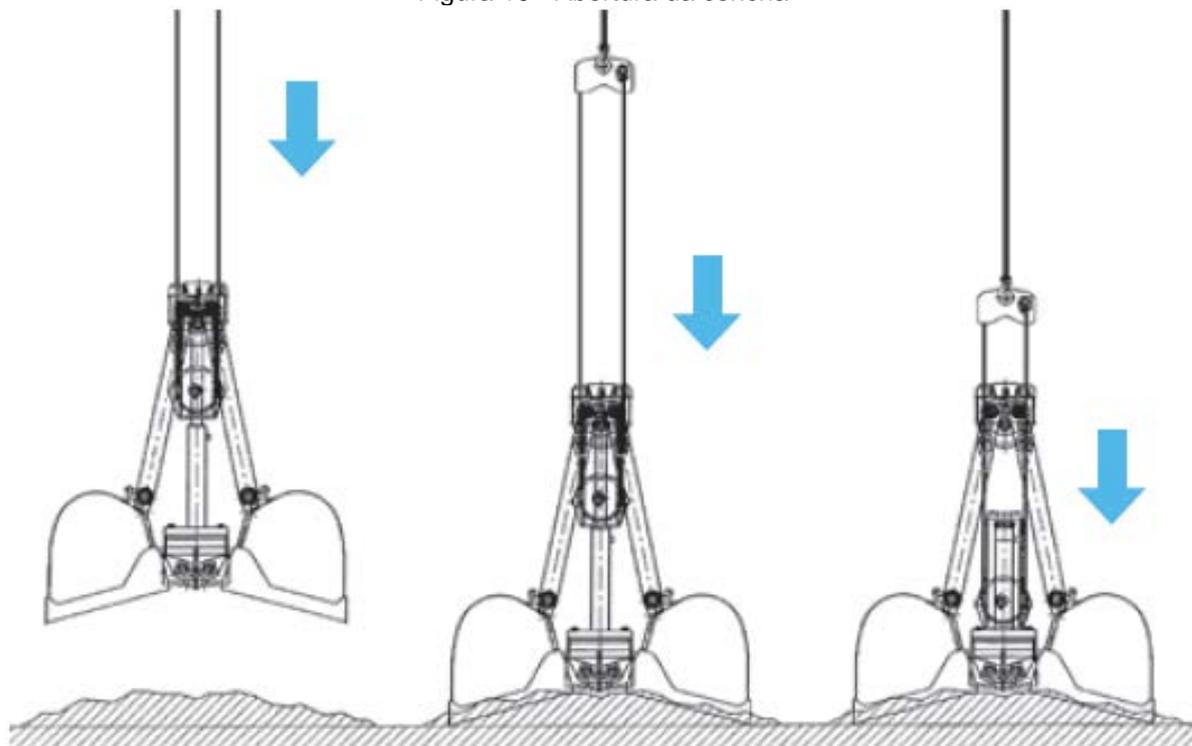
3.1.6.1 Abertura e movimento descendente

A abertura das conchas se inicia a partir de *input* dado pelo operador. Este deverá acionar o comando de abertura de válvulas dos pistões de modo a permitir a passagem do fluido da câmara superior para a câmara inferior do pistão. A ação deverá aliviar a pressão interna dos pistões e liberar a descida do conjunto inferior por ação da gravidade.

De forma controlada, a descida do conjunto inferior resultará na abertura das conchas até o seu fim de curso ou posição totalmente aberta.

O operador da máquina de içamento realiza a descida do *grab* completo (conchas abertas) até este ter contato com o material a ser coletado e ficar completamente assentado.

Figura 10 - Abertura da concha



Fonte: QSL (2020).

3.1.6.2 Fechamento e movimento ascendente

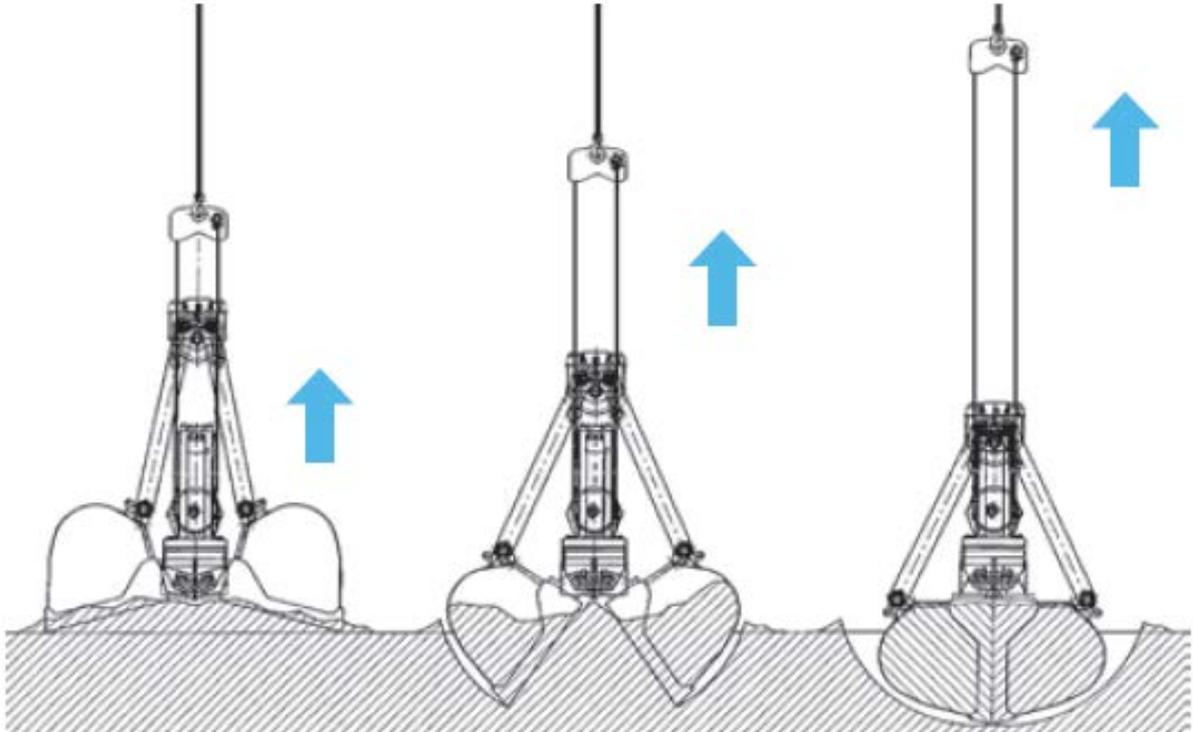
O operador da máquina de içamento realizará a liberação dos cabos de aço de operação do *grab*, o que deverá suceder na descida do conjunto superior. A movimentação descendente do conjunto fará com que o fluido retorne para as câmaras superiores dos dois pistões. As válvulas dos êmbolos são fechadas e mais uma vez os conjuntos superior e inferior são acoplados.

O operador deverá comandar o recolhimento dos cabos de aço de operação do *grab*. Agora, com os conjuntos superior e inferior acoplados, o sistema completo deverá subir realizando o fechamento das conchas e carregando todo o material coletado durante o movimento ascendente. É neste instante que as conchas escavam o material granulado.

Durante essa operação os cabos sofrem grandes esforços de tração, sendo solicitados para forçar a subida do conjunto e fechar das conchas. As forças de tração

são distribuídas pelas polias e equilibradas pela “gangorra” fixada nos terminais dos dois cabos de aço.

Figura 11 - Fechamento da concha

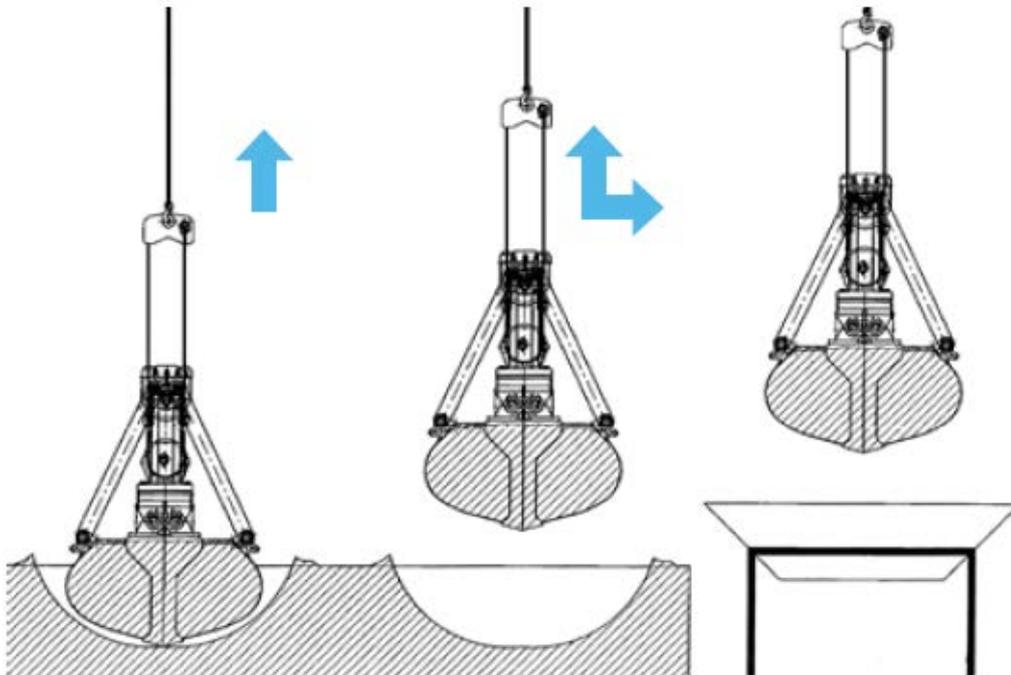


Fonte: QSL (2020).

3.1.6.3 Içamento

Com as conchas do *grab* completamente fechadas, o operador da máquina de içamento deverá realizar a subida do conjunto através do cabo de aço (*crane cable*) e içar o equipamento. O *grab* totalmente carregado poderá então ser transportado para região ou zona descarga.

Figura 12 - Levantamento e movimentação do equipamento

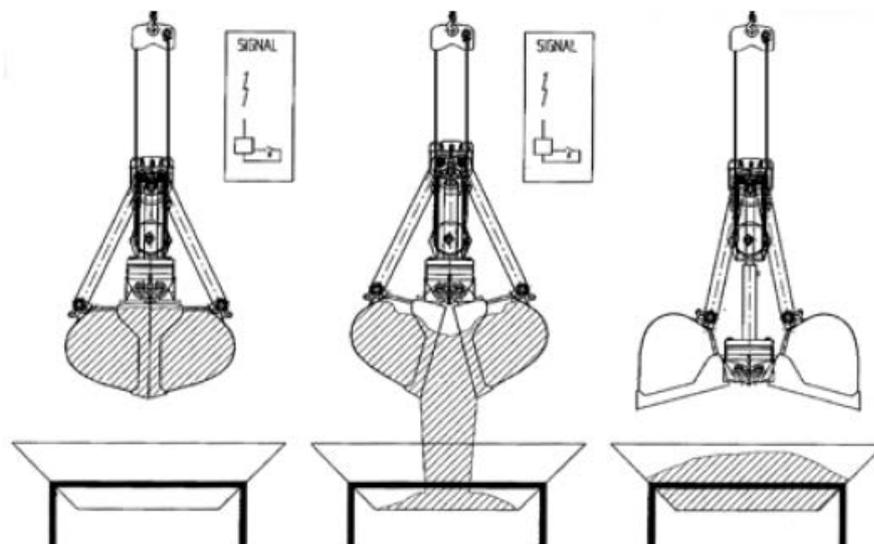


Fonte: QSL (2020).

3.1.6.4 Abertura das conchas para descarga

Quando o *grab* estiver sobre a posição para descarga às conchas devem ser abertas novamente, permitindo que o granel seja despejado no local desejado.

Figura 13 - Abertura para descarregamento



Fonte: QSL (2020).

Para descarga do material granulado, os operadores deverão repetir as operações de abertura e fechamento das conchas sobre o local de desejado. Em seguida, um novo ciclo de operações deverá ser iniciado.

3.1.7 Critérios de aceitação

Como padrão orientativo e de comparação para os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto, é utilizada como base a norma NRB 8400: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro, 1984.

Foi também utilizada a norma ASME seção VIII Div. 2 como forma de comparativo com a NBR 8400. Foi decidido usar essas normas em conversas com o orientador e cliente e também por não haver uma norma específica do equipamento estudado neste trabalho.

Os demais componentes do *grab* foram dimensionados da seguinte forma:

- **Cabos** - Para dimensionamento dos cabos utilizamos o catálogo da CIMAF - Manual Técnico de Cabos, considerando um fator de segurança (FS) de 5, recomendado pelo fabricante para guinchos, guindastes e escavadeiras. Neste caso, a carga de trabalho considerada é equivalente ao peso do granel (24 t) com o equipamento completamente cheio mais peso morto do equipamento (6 t) distribuído igualmente pelos dois cabos.
- **Polias** - As polias foram dimensionadas através da NBR 8400, que determina um diâmetro mínimo de enrolamento em função do diâmetro do cabo, e a NBR 10980 que trata das dimensões básicas de uma polia em função do diâmetro do cabo.
- **Soquetes** - Para a seleção dos soquetes foi utilizado o catálogo da CIMAF - Superlaços onde as dimensões destes são em detrimento do diâmetro do cabo no qual será fixado.
- **Parafusos** - Para o dimensionamento dos parafusos seguimos a AISC Manual of Steel Construction 9th que determina a tensão de ruptura do parafuso em função da área de seção do mesmo para diferentes tipos de materiais.

3.1.7.1 Critérios adotados pela ASME

Os componentes modelados do *grab* foram discretizados como elementos de placa, desta forma foi possível obter as tensões avaliadas pela norma ASME.

Às tensões admissíveis pelo ASME são baseadas nas tensões de membrana (P_m), membrana + flexão (P_L ou $P_m + P_b$), tensões combinadas de Tresca e máximas principais. De forma que, a tensão admissível (S) é de $2/3$ do valor do escoamento, às demais classes são indicadas na Tabela 8.

A tensão de membrana é definida como o valor da tensão normal distribuída uniformemente ao longo de uma determinada espessura, conforme indica a imagem abaixo:

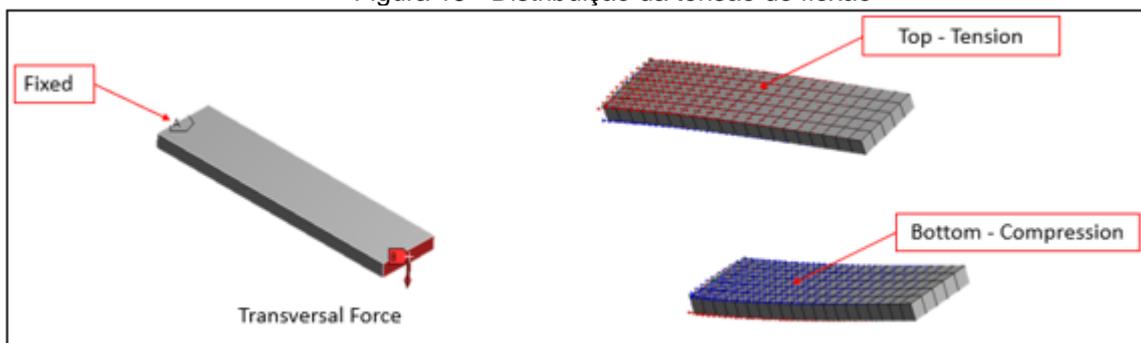
Figura 14 - Distribuição das tensões de membrana



Fonte: Guilherme (2018).

A tensão de flexão, pode ser entendida como uma variação da tensão normal ao longo da espessura, de forma a ser linear ou não linear, conforme indica a imagem abaixo:

Figura 15 - Distribuição da tensão de flexão



Fonte: Guilherme (2018).

Para entender como o ASME define às tensões admissíveis é importante verificar as categorizações das mesmas, que podem ser primária, secundária e de pico.

Às tensões primárias podem ser entendidas como o resultado de um carregamento imposto, necessário para satisfazer às leis de equilíbrio entre as forças e momentos externos e internos. A sua característica básica é não ser autolimitante, ou seja, se exceder o limite de escoamento do material ao longo da espessura, a proteção contra a falha se torna totalmente dependente das propriedades de encruamento do material (ALBUQUERQUE, 1999). Dentro dessa categoria estão às tensões de membrana generalizada P_m , membrana localizada P_L e flexão P_b .

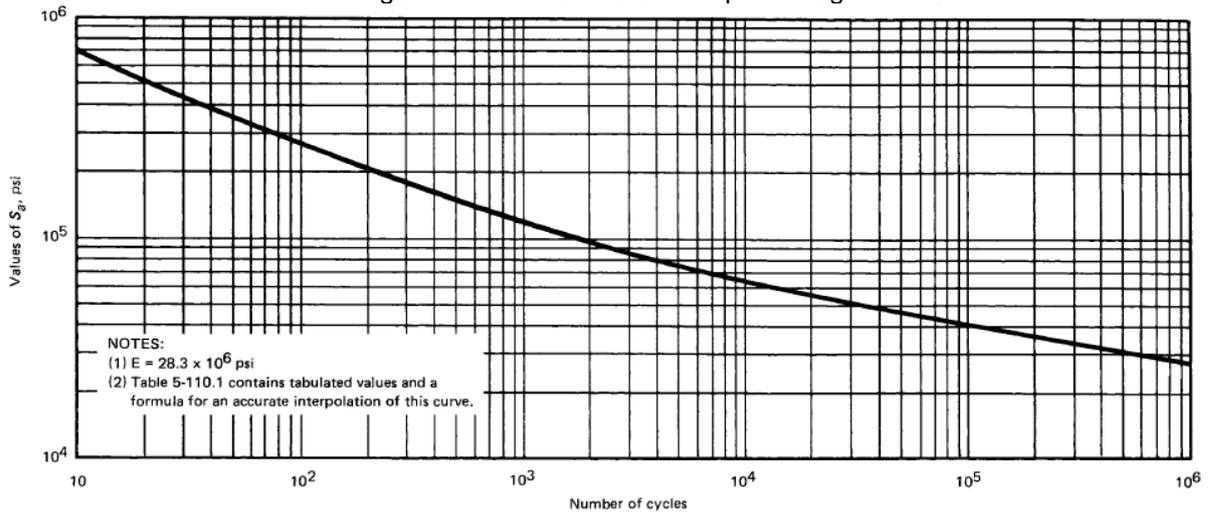
Às tensões secundárias são definidas como o resultado de uma restrição a deformação na própria estrutura, desta forma ao invés de equilibrar um carregamento externo, ela deve satisfazer a um conjunto de deformações impostas, afirma Albuquerque (1999).

A principal característica dessa categoria é ser autolimitante, desta forma, caso as tensões secundárias excedam o limite de escoamento existirá uma redistribuição de tensão, e a falha não existirá (GUILHERME, 2018).

E por fim, às tensões de pico são entendidas como às maiores na região considerada, tendo como característica principal não causar distorções significativas, podendo, porém, gerar uma possível falha por fadiga. (ALBUQUERQUE, 1999).

Para o critério de fadiga foi usado o apêndice 5 do código ASME seção VIII div2, com base na tensão admissível do material (S), conforme indicado na imagem abaixo:

Figura 16 - Tensão admissível para fadiga



Fonte: ASME, 2015

O valor encontrado para a vida infinita foi de 195,2 MPa.

3.1.7.2 Critérios adotados pela NBR 8400

Para a avaliação pela NBR 8400 (2010) os equipamentos podem ser classificados levando em consideração os fatores de classe de utilização e estado de carga, de forma que a primeira se refere à frequência de utilização dos equipamentos em função do movimento de levantamento conforme indica a Tabela 1.

Tabela 1 - Frequência de utilização do equipamento

Classe de utilização	Frequência de utilização do movimento de levantamento	Numero convencional de ciclos de levantamento
A	Utilização ocasional não regular, seguida de longos períodos de repouso	$6,3 \times 10^4$
B	Utilização regular em serviço intermitente	$2,0 \times 10^5$
C	Utilização regular em serviço intensivo	$6,3 \times 10^5$
D	Utilização em serviço intensivo severo, efetuado, por exemplo, em mais de um turno	$2,0 \times 10^6$

Fonte: NBR 8400 (2010).

O valor de um ciclo é determinado quando começa o movimento de levantamento no momento do içamento da carga e termina quando o equipamento está em condições de realizar o levantamento seguinte (NBR 8400, 2010).

Com base na tabela acima o *grab* pode ser classificado como classe de utilização D, por causa do seu uso intensivo nos portos ou outros locais de movimentação de granéis.

Quanto ao estado de carga a classificação ocorre de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2 - Classificação quanto ao estado de carga

Estado de carga	Definição	Fração mínima da carga máxima
0 (muito leve)	Equipamentos levantando excepcionalmente a carga nominal e comumente cargas muito reduzidas	P = 0
1 (leve)	Equipamentos que raramente levantam a carga nominal e comumente cargas de ordem de 1/3 da carga nominal	P = 1/3
2 (médio)	Equipamentos que freqüentemente levantam a carga nominal e comumente cargas compreendidas entre 1/3 e 2/3 da carga nominal	P = 2/3
3 (pesado)	Equipamentos regularmente carregados com a carga nominal	P = 1

Fonte: NBR 8400 (2010).

Como busca-se que o equipamento trabalhe com a maior eficiência possível, ou seja, com a capacidade máxima, desta forma o estado de carga é classificado como 3.

Após essas definições, pode-se escolher qual a classe de utilização do equipamento e com isso determinar os coeficientes de majoração de carga e o coeficiente dinâmico, conforme indicam as tabelas a seguir:

Tabela 3 - Classificação do grupo do equipamento

Estado de cargas (ou estado de tensões para um elemento)	Classe de utilização e número convencional de ciclos de levantamento (ou de tensões para um elemento)			
	A $6,3 \times 10^4$	B $2,0 \times 10^5$	C $6,3 \times 10^5$	D $2,0 \times 10^6$
0 (muito leve) P = 0	1	2	3	4
1 (leve) P = 1/3	2	3	4	5
2 (médio) P = 2/3	3	4	5	6
3 (pesado) P = 1	4	5	6	6

Fonte: NBR 8400 (2010)

Como mostrado nos itens superiores o equipamento é classificado quanto ao estado de carga como 3 e quanto a classe de utilização como D, portanto o grupo do equipamento é o 6, com essa informação os coeficientes podem ser determinados.

O coeficiente dinâmico é determinado com base na velocidade de levantamento do *grab* e quanto ao equipamento que faz esse movimento que pode ser um guindaste com lanças, pontes ou pórticos rolantes, neste caso particular o guindaste com lanças é utilizado.

Tabela 4 - Coeficiente dinâmico

Equipamento	Coeficiente dinâmico ψ	Faixa de velocidade de elevação da carga (m/s)
Pontes ou pórticos rolantes	1,15	$0 < v_L \leq 0,25$
	$1 + 0,6 v_L$	$0,25 < v_L < 1$
	1,60	$v_L \geq 1$
Guindaste com lanças	1,15	$0 < v_L \leq 0,5$
	$1 + 0,3 v_L$	$0,5 < v_L < 1$
	1,3	$v_L \geq 1$

Fonte: NBR 8400 (2010)

O valor do coeficiente dinâmico é de 1,15 considerando a velocidade de levantamento de no máximo 0,5 m/s.

O próximo coeficiente a ser determinado é a majoração de carga, determinado pelo grupo do equipamento, conforme indicado na Tabela 3 que foi 6, portanto, o valor deste coeficiente é exibido na tabela abaixo:

Tabela 5 - Coeficiente de Majoração de carga

Grupos	1	2	3	4	5	6
M_x	1	1	1	1,06	1,12	1,20

Fonte: NBR 8400 (2010)

Como indicado na tabela acima o valor do coeficiente de majoração de carga é de 1,20. Multiplicando este valor pelo fator dinâmico de 1,15, às cargas das análises precisam ser majoradas em 1,38.

Além de inserir um fator nos carregamentos a NBR 8400 (2010) indica reduzir as tensões admissíveis para diferentes casos de operação, que são separados como: Serviço normal sem vento (caso I), serviço normal com vento limite de serviço (caso II), solicitações excepcionais (caso III).

Tabela 6 - Tensões admissíveis para diferentes casos de serviço

Casos de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
Tensão admissível			
σ_a	$\frac{\sigma_e}{1,5}$	$\frac{\sigma_e}{1,33}$	$\frac{\sigma_e}{1,1}$

Fonte: NBR 8400 (2010)

Onde:

σ_e é a tensão de escoamento do material.

Neste caso, se aplica o caso I por ser mais conservador. Este valor da tensão admissível é válido tanto para tração como compressão, para cisalhamento deve-se dividir por $\sqrt{3}$ de acordo com a NBR 8400 (2010).

Portanto, estes são os passos para determinar às máximas tensões permitidas durante a operação e os fatores multiplicadores de carga, atendendo a estes critérios o equipamento estará dimensionado para vida infinita.

3.2 CONCEITUAL

Este capítulo abordará as etapas de projeto conceitual, onde serão demonstrados o estudo do mecanismo, dimensionamento básico de alguns componentes, seleção de materiais e modelo CAD desenvolvido como conceito inicial que serviu como base para os modelos de elementos finitos analisados.

3.2.1 Estudo do mecanismo

Para estudo da trajetória de fechamento das conchas e avaliação da relação de velocidade de fechamento do mecanismo versus a velocidade de recolhimento do cabo de fechamento (*crane cable*), um estudo cinemático do movimento do mecanismo fora desenvolvido com base em modelo simplificado em *software* de CAD. Com isso, foi possível realizar um estudo de mecanismo pelo método de corpo rígido

sob comportamento dinâmico. Esse método consiste em avaliar os deslocamentos e velocidades relativas dos corpos. Portanto, através de um ponto referencial, o *grab* parte da posição de ângulo de abertura máximo até atingir a posição completamente fechada. Avalia-se, portanto, o perfil de fechamento do *grab*, desprezando-se os fenômenos de corte do granel.

Através deste deslocamento é possível obter a razão entre a velocidade angular de fechamento (α) do *grab* e a velocidade de recolhimento dos cabos (V_c).

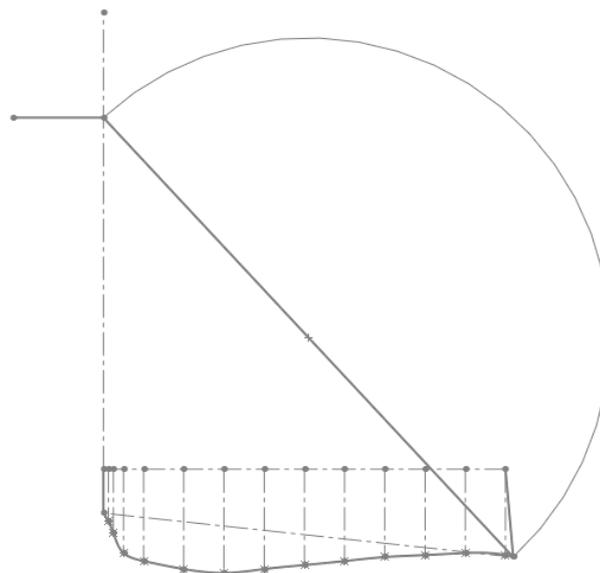
$$\frac{\alpha}{V_c} \cong 17$$

Logo, se estivermos trabalhando com uma velocidade de até 15 m/min para tração dos cabos, ou 0,25 m/s. Teremos:

$$\alpha = 17 * 0,25 = 4,25^\circ/s$$

Sabendo que o *grab* possui ângulo de abertura máxima entre as facas de 157° , teríamos, portanto, um tempo médio de fechamento do *grab* de 17,4 s.

Figura 17 - Representação de concha em posição aberta



Fonte: Própria.

3.2.2 Dimensionamento básico

A estratégia adotada para etapa do dimensionamento básico dos componentes e peças foi baseada em um modelo estático e estabelecida de acordo com as condições mais críticas de esforços, os quais o equipamento é submetido durante a sua operação. Dessa forma, para esta etapa, foi considerada a condição de carregamento máxima (*grab* cheio), tendo em vista a densidade de material máxima definida para o projeto (2000 kg/m^3).

O dimensionamento básico serviu como base para a construção do modelo virtual que fora submetido a simulação computacional. O modelo utilizado consiste em diagramas de corpo livre, com suas devidas forças, momentos e torques atuantes bem como as equações apropriadas para os cálculos. A partir deste estudo, serão compreendidos quais deverão ser os esforços envolvidos e como os componentes receberão estas solicitações. Todas as equações do modelo analítico foram utilizadas partindo de um regime estático conforme APÊNDICE I.

3.2.3 Seleção de Materiais

A escolha dos materiais aplicados no projeto foi realizada de forma colaborativa entre o cliente ALTUS Equipamentos e a equipe do presente projeto *Theoprax*, levando em consideração as condições de operação do equipamento (regime de esforços e ambiente de operação), as premissas estabelecidas no capítulo 3 – DESENVOLVIMENTO, assim como fatores econômicos de relevância para o cliente.

O material base para composição de grande parte dos elementos estruturais e móveis foi o aço baixo carbono manganês microligado USI SAC 350 (nomenclatura comercial Usiminas), com propriedades mecânicas e tensões admissíveis pelas normas adotadas disponíveis na, respectivamente.

O aço possui uma excelente característica de resistência à corrosão atmosférica devido a camada de óxido (normalmente Cu, Cr, Si e P), promovendo um acréscimo significativo na vida esperada dos elementos e componentes fabricados com ele. O material ainda possui uma boa soldabilidade e superfície de fácil aderência para pintura.

Para o presente projeto, a sua aplicação se estende para elementos e peças como: hastes/barras de pressão; conchas; engrenagens (tratamento térmico superficial requerido); chapas de 5/8", 1/4" e 1/2" que compõe as estruturas dos conjuntos superior e inferior do equipamento; bem como perfis tubulares e cilíndricos para união de componentes.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do aço USI SAC 350

Propriedades	Valor (Unidade)
Módulo de Elasticidade	200 (GPa)
Coefficiente de Poisson	0,3
Peso Específico	7,8 (g/cm ³)
Limite de Escoamento	35,0 (daN/mm ²)
Tensão mínima de Ruptura	50,0 (daN/mm ²)

Fonte: USIMINAS (2020)

Tabela 8-Tensões admissíveis para o aço USI SAC 350 de acordo com o ASME

Classificação	Critério	Tensão admissível (daN/mm ²)
P_m	S	23,3
P_L ou P_m+P_b	1.5S	35,0
P_L+P_b	3.S	70,0
Fadiga	-	19,5

Fonte: Própria.

Onde:

 P_m : Tensão primária de Membrana generalizada; P_L : Tensão primária de Membrana Localizada; P_b : Tensão primária de flexão;

Tabela 9 - Tensões admissíveis para o aço USI SAC 350 de acordo com a NBR 8400

Classificação	Símbolo	Tensão admissível (daN/mm ²)
Tração/Compressão	σ_a	23,3
Cisalhamento	τ_a	13,4

Fonte: Própria.

Elementos como as facas instaladas nas conchas para auxílio na escavação do material foram projetadas em *Hardox*®, com algumas das suas propriedades mecânicas disponíveis na Tabela 10 deste documento.

Este material é amplamente utilizado em setores de mineração e escavação, usualmente aplicado em elementos que precisam de boa resistência ao desgaste, como pontas e facas instaladas em máquinas de grande porte para coleta e escavação de sedimentos e minério. O aço possui elevada tenacidade, sendo resistente à abrasão e impactos, além de poder ser encontrado com durezas nominais que variam entre 350 e 650 HBW. Ainda possui boa maleabilidade e soldabilidade.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas do aço USI SAC 350

Propriedades	Valor (Unidade)
Dureza	310 - 370 (HBW)
Charpy V (min.-40°C)	40 (J)
Limite de Escoamento	85,0 (daN/mm ²)
Tensão mínima de Ruptura	124,5 – 137,0 (daN/mm ²)

Fonte: HARDOX (2018).

A liga de bronze selecionada para buchas, pinos e outros elementos articulados deve trazer, dentre as suas propriedades, uma boa relação entre dureza e tenacidade, tornando possível implementar a peça em pontos com cargas específicas elevadas, bem como cargas cíclicas. Ainda deve possuir uma boa resistência a abrasão, corrosão e fadiga superficial.

Ligas de bronze como: bronze-alumínio ASTM C95200, C95400 e Bronze TM (23 ou 620) são usualmente aplicadas à fabricação de engrenagens, buchas, mancais, coroas, guias deslizantes, dentre outros.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas da liga de bronze ASTM C95400 (cast).

Propriedades	Valor (Unidade)
Dureza	170 (HB)
Módulo de Elasticidade	110 (GPa)
Coefficiente de Poisson	0,316
Limite de Escoamento	20,5 (daN/mm ²)
Tensão mínima de Ruptura	61,5 (daN/mm ²)

Fonte: MATWEB (2020).

É fundamental ressaltar que os elementos fabricados a partir deste material devem trabalhar em um regime de lubrificação periódica e preventiva, de modo a garantir a formação de um terceiro corpo (filme lubrificante) entre este o metal base do elemento em que se encontra em contato.

Em avanço a utilização de ferro fundido cinzento é restrita para as polias utilizadas no sistema de tração e abertura do equipamento. Conforme NBR 10980, é indicada a utilização deste material as suas propriedades mecânicas cujos valores são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 12 - Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento

Propriedades	Valor (Unidade)
Dureza	550 (HB)
Módulo de Elasticidade	162 (GPa)
Coefficiente de Poisson	0,330
Limite de Escoamento	42,0 (daN/mm ²)
Tensão mínima de Ruptura	70,0 (daN/mm ²)

Fonte: MATWEB (2020).

Uma vez que o *grab* requer substancial quantidade de solda, torna-se viável para este projeto a utilização da soldagem com eletrodos revestidos, por este processo apresentar não só um baixo custo de investimento e uma aplicação flexível, como também por ser direcionado para ambientes externos, onde geralmente os *grabs* são operados. Vale ressaltar que é recomendável que as soldas sejam executadas segundo a norma DIN 18800 e AWS.

3.2.5 Conceito inicial do equipamento

Dentre os diferentes e variados modelos de *grabs* desenvolvidos para coleta de grãos, o conceito adotado para o presente projeto foi o *grab* mecânico hidráulico com funcionamento descrito no item 3.1.6 deste documento.

O equipamento pode ser caracterizado por um conjunto superior e um conjunto inferior, conectados por quatro barras de pressão e um par de cilindros hidráulicos, montados de forma simétrica no equipamento.

O conjunto superior é composto por dois cabos de aço que correm por uma polia fixa e uma polia móvel, cada. Juntamente com um sistema de compensação ou balancim, os dois sistemas de polias são conectados no centro do conjunto superior.

O conjunto inferior é composto pelas duas conchas com cerca de 6 m³, cada. As conchas são fixadas por duas travessas cilíndricas móveis, permitindo o basculamento do mecanismo completo.

Ainda, pode-se destacar que o sistema de suspensão é responsável por conectar o *grab* ao equipamento de içamento e fixar as duas outras extremidades dos cabos de aço de operação do mecanismo.

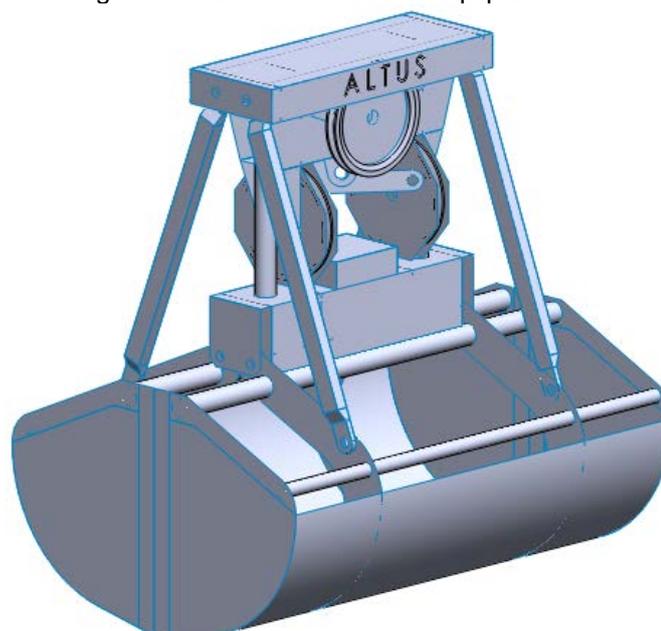
A modelagem do *grab* foi iniciada pela concha, com base nas informações obtidas nas etapas de pesquisa e estudo da arte, exemplo, a relação entre comprimento e largura variando de 0,6 a 0,75 e o ângulo recomendado entre a concha na posição fechada e horizontal ser de 11° a 12°.

Além desses dados, o volume total (12 m³) do equipamento e altura total máxima (4 m) definidos pelo cliente, contribuíram para criação do modelo virtual da concha. Vale ressaltar, que no primeiro momento, esse modelo criado foi baseado em superfície, ou seja, não tinha espessura. Pois o mesmo seria utilizado no *software* (*Autodesk SIMULATION*) para que as análises baseadas em elementos finitos fossem realizadas, assim as tensões geradas foram encontradas e conseqüentemente as espessuras ideais foram estabelecidas, de acordo com as normas adotadas.

Os esforços gerados na concha, foram distribuídos para as outras peças que compõem o equipamento, possibilitando o dimensionamento dessas partes. Após a concha, seguiu-se para a haste, cabeça da garra, bloco de comando e por fim a travessa. Essas são as partes que precisam de fabricação sob medida e não são encontradas comercialmente.

A seguir a imagem do conceito inicial do equipamento desenvolvido durante este trabalho:

Figura 18 - Conceito inicial do equipamento



Fonte: Própria

3.3 BÁSICO

Nesta etapa do trabalho são mostradas as etapas da fase do projeto básico que consistiram na simulação pelo método de elementos finitos, modelagem CAD 3D do equipamento e nos desenhos de conjunto.

3.3.1 Simulação pelo método de elementos finitos

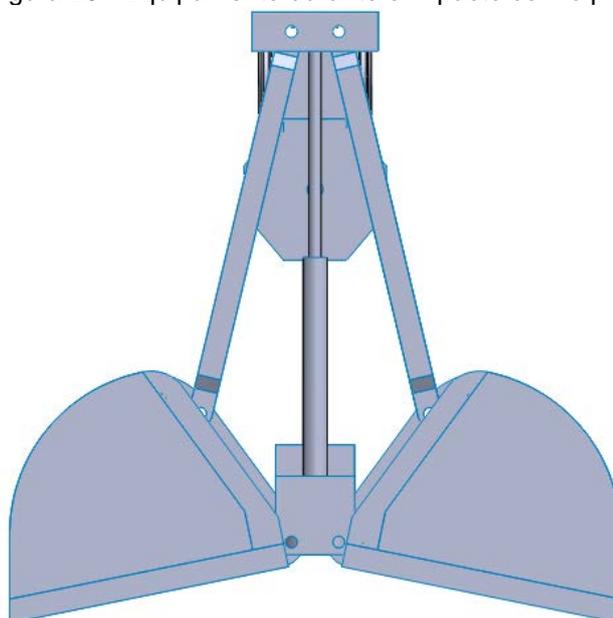
A equipe em conjunto com o orientador e cliente decidiu estudar dois momentos críticos durante a operação do *grab* que seria quando este estiver com a carga máxima de operação e no momento do impacto com a superfície com o piso, conforme indicam as imagens abaixo:

Figura 19 - Equipamento carregado com sua capacidade máxima



Fonte: Própria.

Figura 20 - Equipamento durante o impacto com o piso

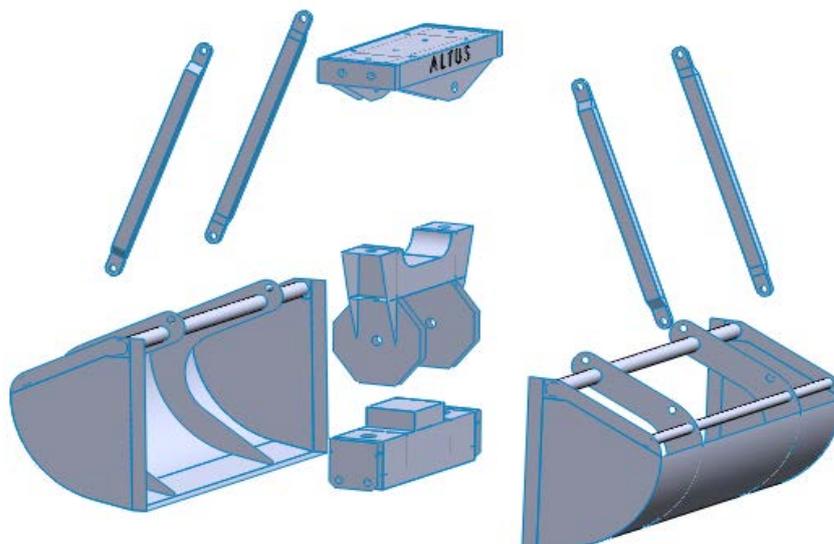


Fonte: Própria.

O equipamento foi modelado no software CAD Solidworks, em seguida exportado para o software *SIMULATION* e foi discretizado como elemento de placa. A placa foi escolhida por permitir maiores iterações de espessuras de chapas, pois foram feitos 5 modelos de cada componente variando as espessuras das superfícies (às espessuras não podem ser divulgadas neste documento por questões de confidencialidade do projeto), a fim de verificar as melhores combinações que permitisse um equipamento mais leve, porém que atendessem às normas adotadas.

A primeira etapa consistiu em separar o modelo em 5 componentes principais que foram analisados separadamente, foi adotado o princípio da simetria, por exemplo, não foram analisadas duas conchas, mas somente uma com a metade da carga e isso se aplicou nos outros componentes que são simétricos.

Figura 21 - Vista explodida dos componentes



Fonte: Própria.

3.3.1.1 Concha

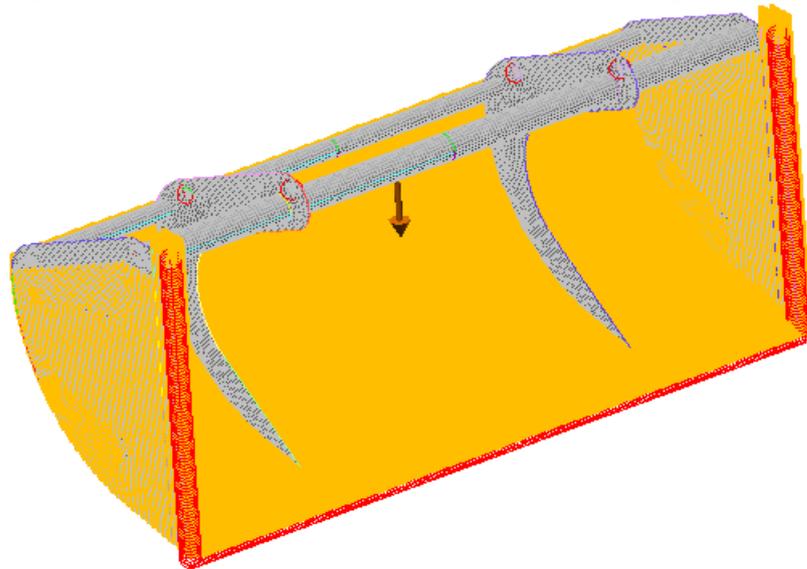
Para o modelo da concha foi usada uma malha de 20 mm, aplicou-se os carregamentos de peso próprio e densidade do granel como indica a tabela abaixo:

Tabela 13 - Cargas aplicadas na concha

Carga	Critério	
	ASME	NBR 8400
Peso próprio	1	1,38
Densidade do Granel	2000 kg/m ³	2760 kg/m ³

Fonte: Própria

Figura 22 - Modelo da concha com os respectivos carregamentos



Fonte: Própria.

3.3.1.2 Haste

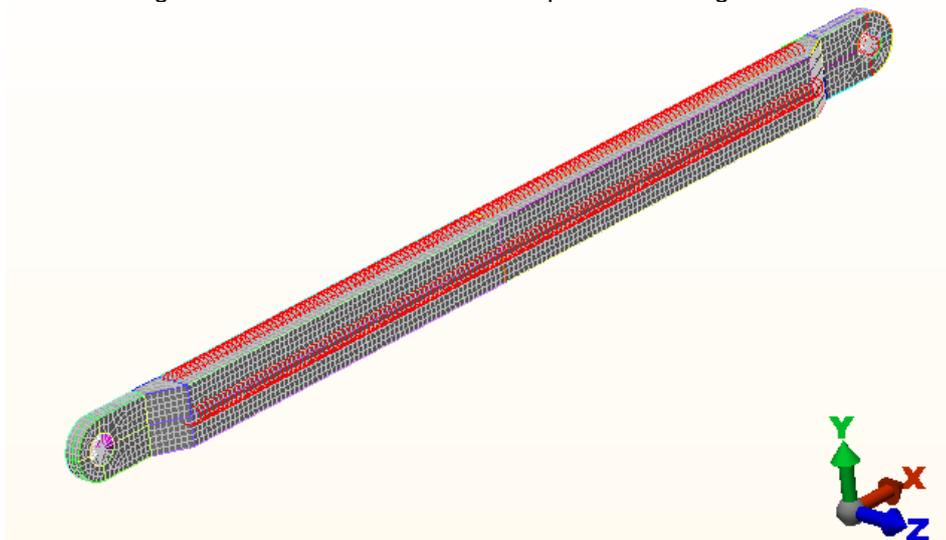
No modelo da haste foi usada uma malha de 15 mm, aplicou-se o carregamento axial como indica a tabela abaixo:

Tabela 14 - Cargas aplicadas na haste

Carga	Critério	
	ASME	NBR 8400
Peso próprio	1	1,38
Carga axial	53.500 N	73.830 N

Fonte: Própria

Figura 23 - Modelo da haste os respectivos carregamentos



Fonte: Própria

3.3.1.3 Cabeça da garra

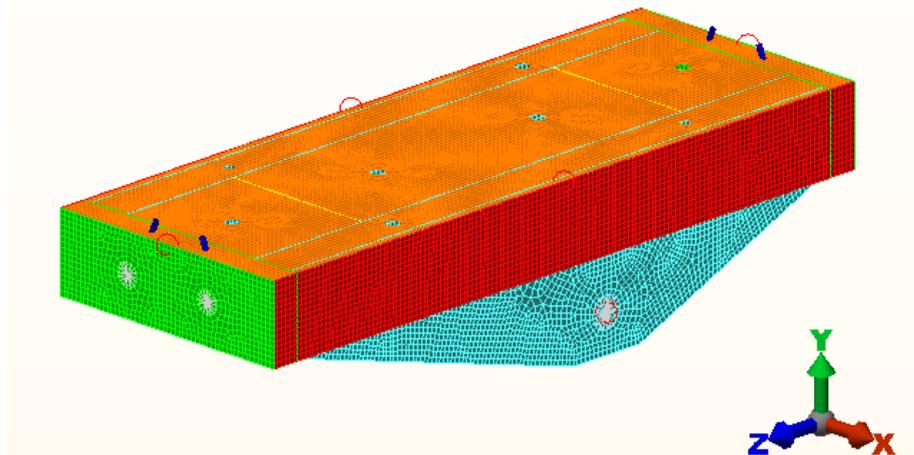
Na análise da cabeça da garra usou-se uma malha no valor de 15mm e aplicou-se os carregamentos na direção da haste nos valores indicados na tabela abaixo:

Tabela 15 - Cargas aplicadas na cabeça da garra

Carga	Critério	
	ASME	NBR 8400
Peso próprio	1	1,38
Carga de cisalhamento	53.500 N	73.830 N

Fonte: Própria.

Figura 24 - Modelo da cabeça da garra com os respectivos carregamentos



Fonte: Própria.

3.3.1.4 Bloco de comando

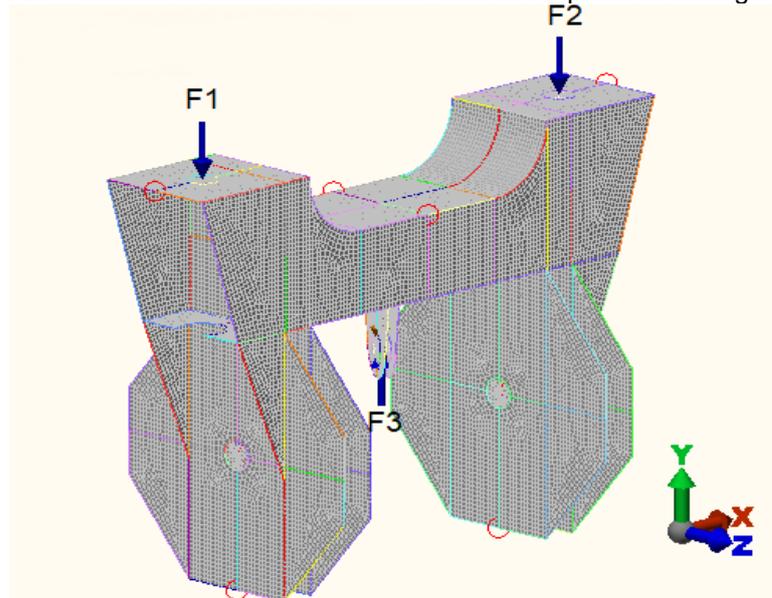
Para o modelo do bloco de comando foi usada uma malha no valor de 15mm e os carregamentos utilizados foram:

Tabela 16 - Cargas aplicadas no bloco de comando

Carga	Critério	
	ASME	NBR 8400
Peso próprio	1	1,38
Carga do pistão (F1 e F2)	44.840 N	61.880 N
Carga do Balancim (F3)	101.103 N	139.523 N

Fonte: Própria.

Figura 25 - Modelo do bloco de comando com os respectivos carregamentos



Fonte: Própria

3.3.1.5 Travessa

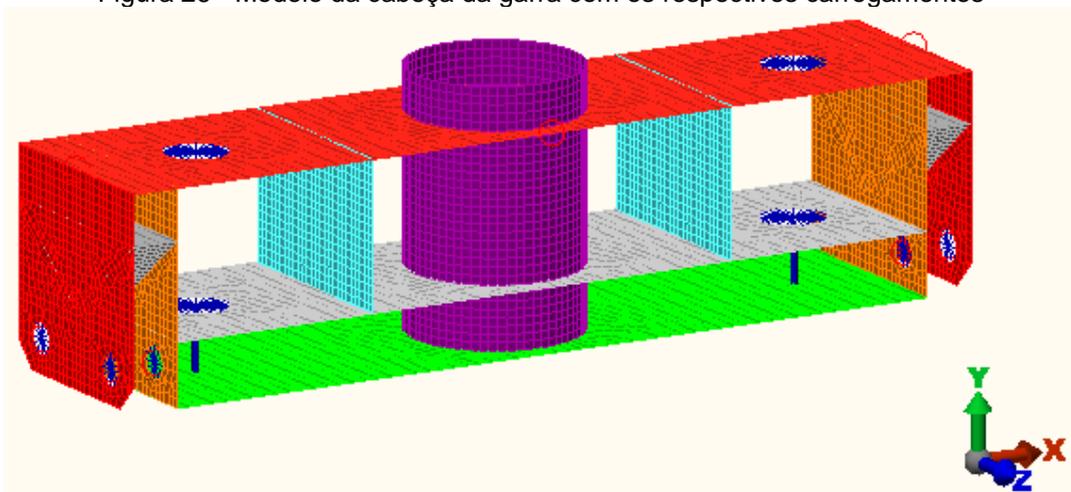
Para o modelo da travessa foi utilizada uma malha no valor de 20mm e os carregamentos estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 17 - Cargas aplicadas na travessa

Carga	Critério	
	ASME	NBR 8400
Peso próprio	1	1,38
Carga do pistão	44.840 N	61.880 N
Pressão interna	3 bar	4,14 bar

Fonte: Própria.

Figura 26 - Modelo da cabeça da garra com os respectivos carregamentos

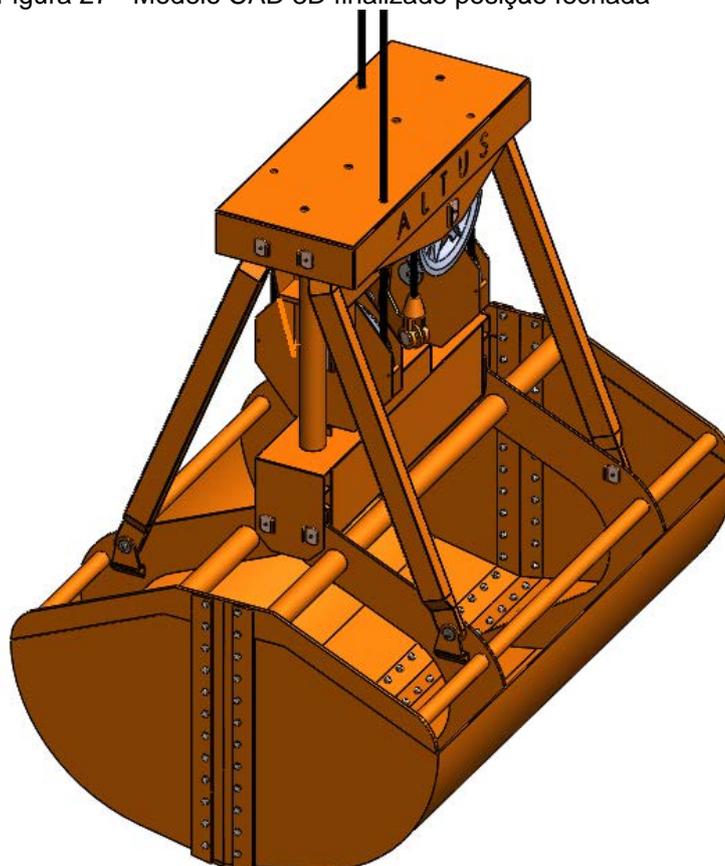


Fonte: Própria.

3.3.1 Modelo CAD 3D do conjunto

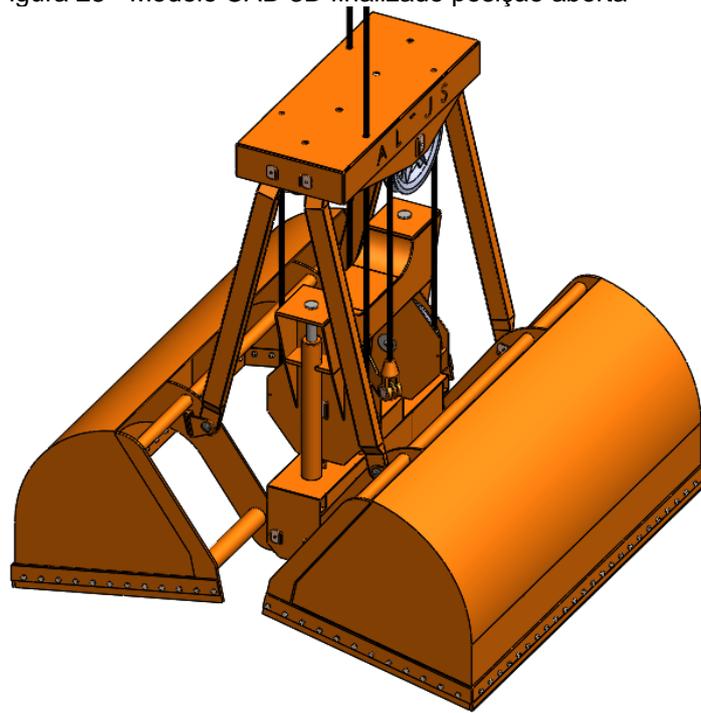
Após as análises por elementos finitos visto no item 4 deste documento, as tensões às quais os componentes estão submetidos foram encontradas e as espessuras das peças analisadas puderam ser determinadas. Vale destacar que as medidas adotadas foram feitas de modo otimizado, pois os componentes não tem uma espessura uniforme, pois isso depende do nível de tensão desenvolvido em cada região da peça. As análises de elementos finitos permitiram também o dimensionamento dos componentes comerciais, como parafusos, cabo de aço, polia, dentre outros. De posse dessas informações o modelo final do equipamento pode ser gerado, atribuindo espessura as peças que foram modeladas como superfície, em seguida adicionando os componentes de prateleira na montagem. Nas Figuras a seguir é possível ver o modelo virtual completo gerado e observar melhor os componentes que integram o equipamento:

Figura 27 - Modelo CAD 3D finalizado posição fechada



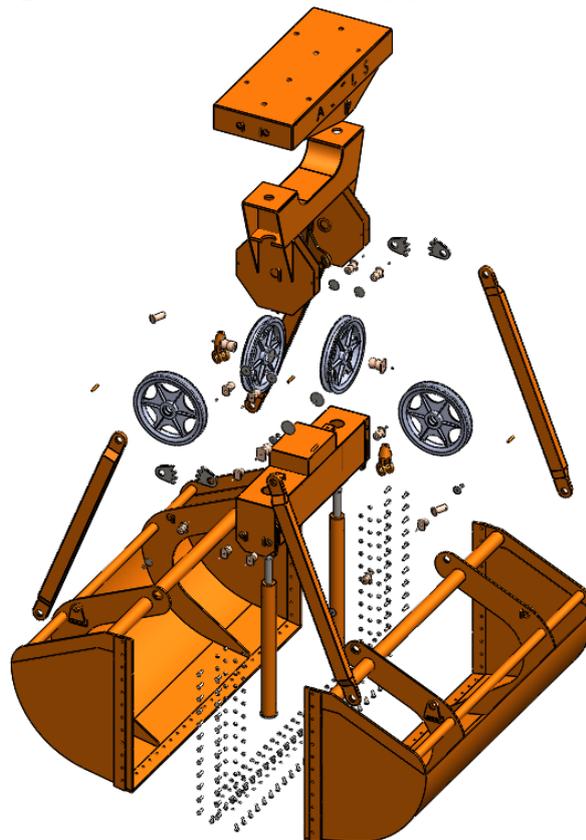
Fonte: Própria.

Figura 28 - Modelo CAD 3D finalizado posição aberta



Fonte: Própria.

Figura 29 - Vista explodida do equipamento



Fonte: Própria.

3.3.2 Desenho de conjunto

Finalizada a montagem virtual do *grab*, foi gerado um desenho 2D do conjunto geral do equipamento, visto no APÊNDICE 2, contendo as medidas gerais e informações sobre os componentes principais, como peso, material e quantidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

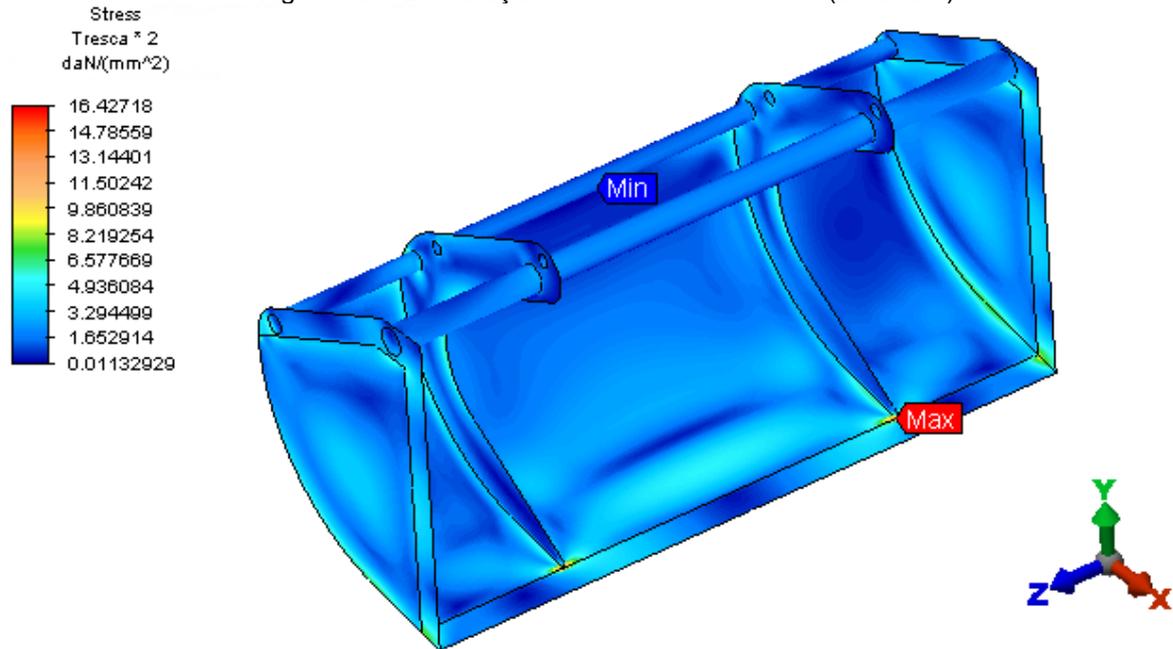
Nesta parte do documento são descritos os resultados das simulações dos modelos listados acima. Foram feitas cinco simulações de cada componente com espessuras de chapas diferentes, porém neste documento serão mostrados apenas os resultados de um modelo por componente, os demais foram enviados para o cliente.

Para este tópico não ficar relativamente longo, será mostrado os resultados somente da concha, avaliada pelo ASME e pela NBR 8400, os demais componentes serão mostrados no APÊNDICE 3 deste documento.

4.1 Resultados da simulação

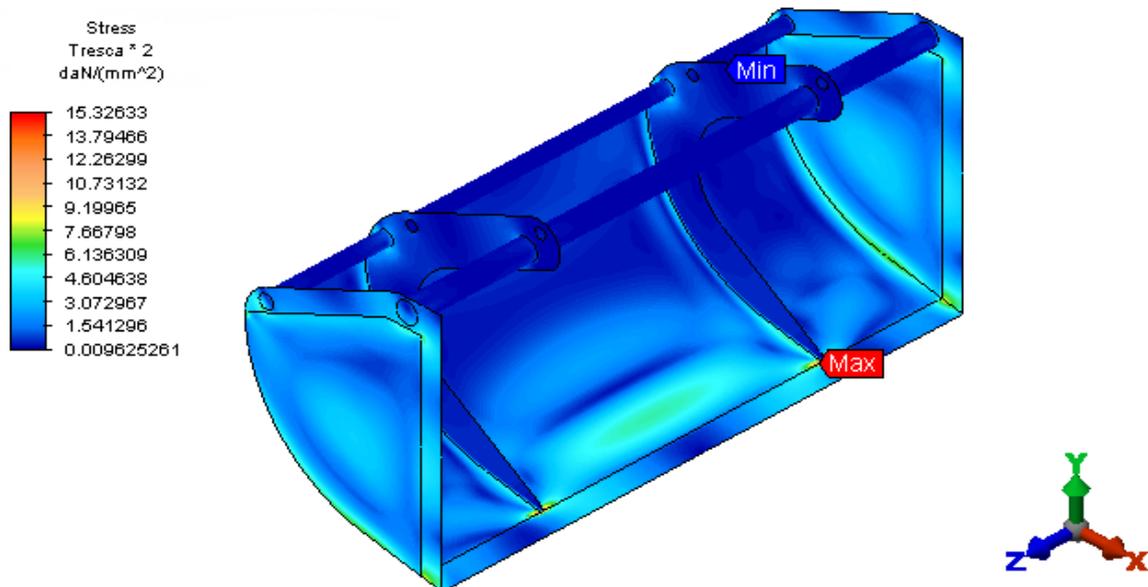
4.1.1 Concha (ASME)

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, na concha do *grab* sob os esforços de peso próprio e carga de 12.000 daN referente a metade da carga do equipamento.

Figura 30 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

Fonte: Própria

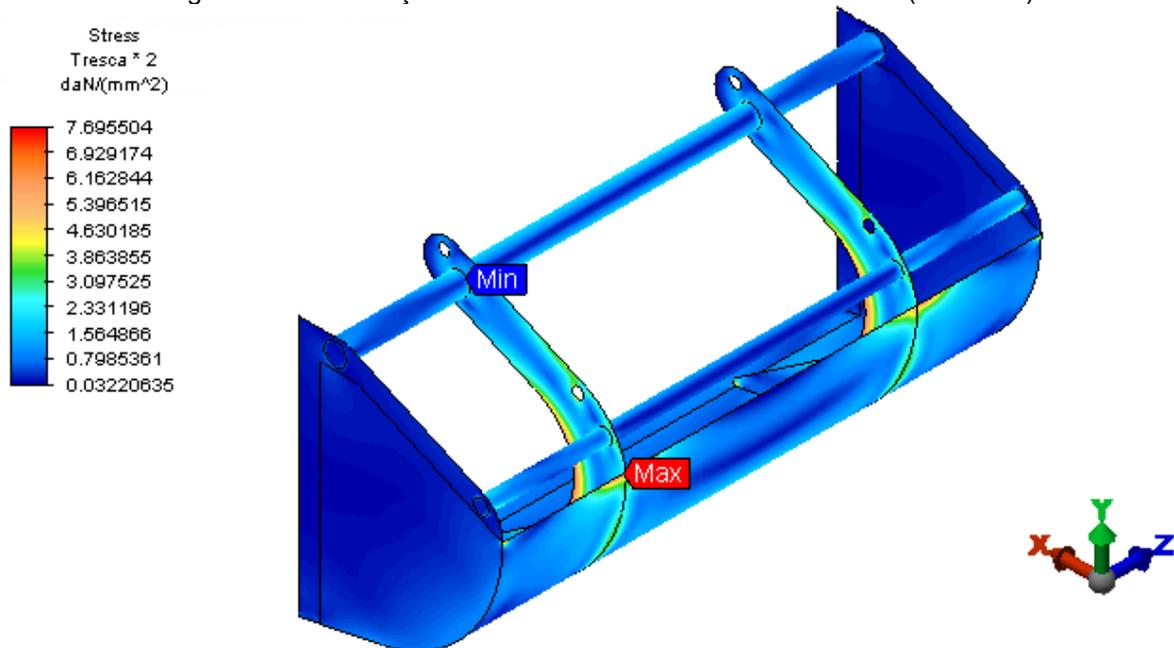
Os valores máximos alcançados (16,4 daN/mm²) ocorreram próximo a junção da costela com a faca, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm². A seguir os resultados de tensão de flexão no modelo.

Figura 31 - Distribuição das tensões de flexão no modelo (daN/mm²)

Fonte: Própria

Os valores máximos alcançados ($15,4 \text{ daN/mm}^2$) ocorreram próximo a junção da costela com a faca, ficando abaixo do limite admissível de $35,0 \text{ daN/mm}^2$. A seguir os resultados das tensões de membrana no modelo.

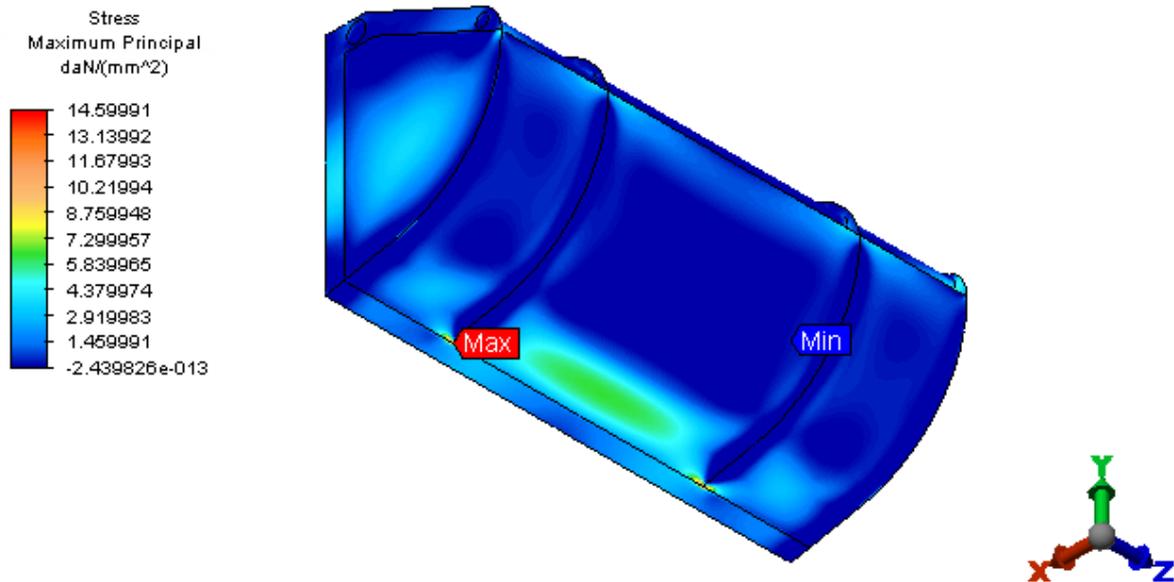
Figura 32 - Distribuição das tensões de membrana no modelo (daN/mm^2)



Fonte: Própria.

Os valores máximos alcançados ($7,7 \text{ daN/mm}^2$) ocorreram próximo a junção da costela com o costado da concha, ficando abaixo do limite admissível de $23,4 \text{ daN/mm}^2$. A seguir os resultados das tensões máximas principais.

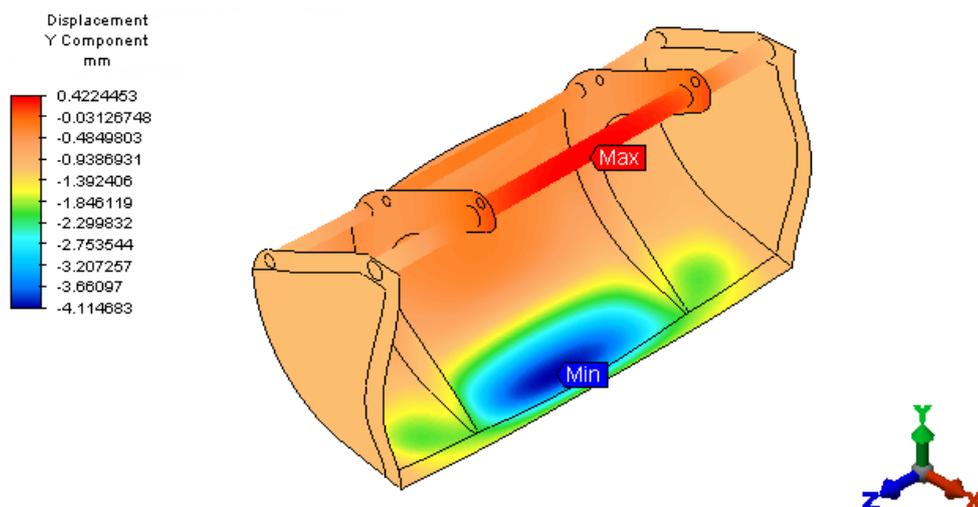
Figura 33 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)



Fonte: Própria.

Os valores máximos alcançados (14,6 daN/mm²) ocorreram próximo a junção da costela com o costado da concha, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm² para vida infinita. A seguir os resultados dos deslocamentos nodais no modelo.

Figura 34 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)



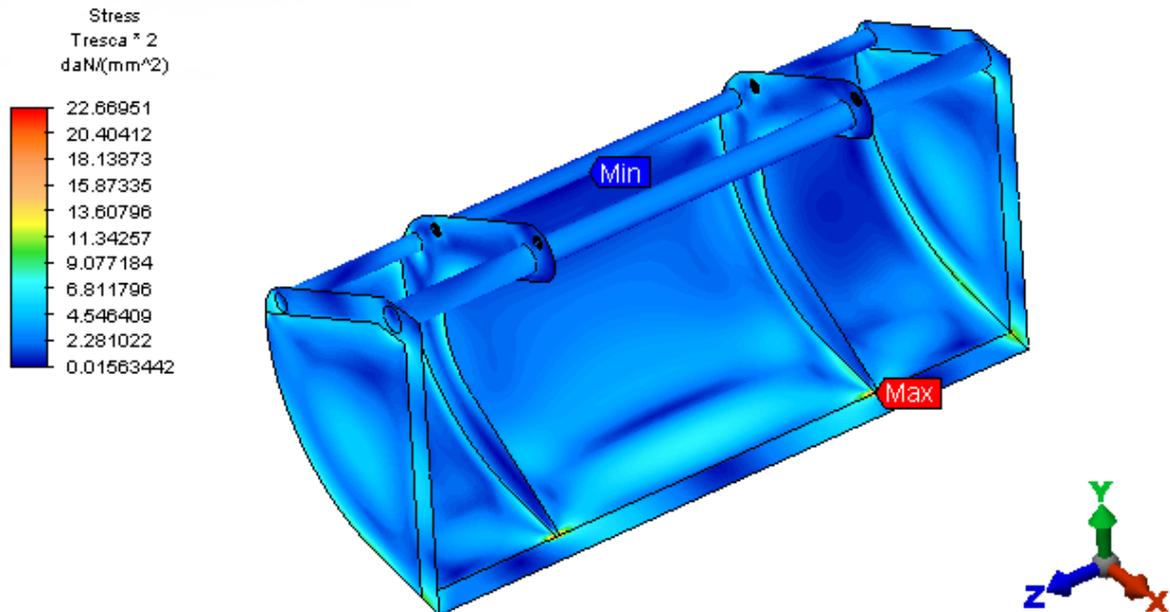
Fonte: Própria

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 4,1 mm no centro da concha entre as costelas justamente no maior vão.

4.1.2 Concha (NBR 8400)

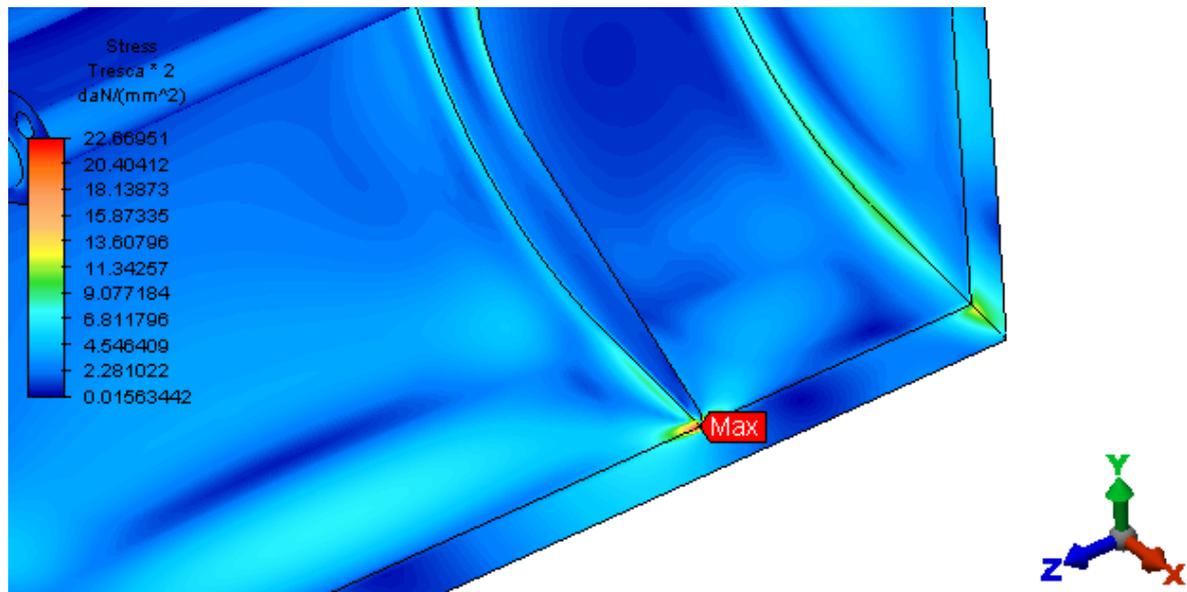
A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da concha do *grab* sob os esforços de peso próprio, e carga de 16.560 daN referente ao peso do granel com os coeficientes de majoração.

Figura 35 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)



Fonte: Própria.

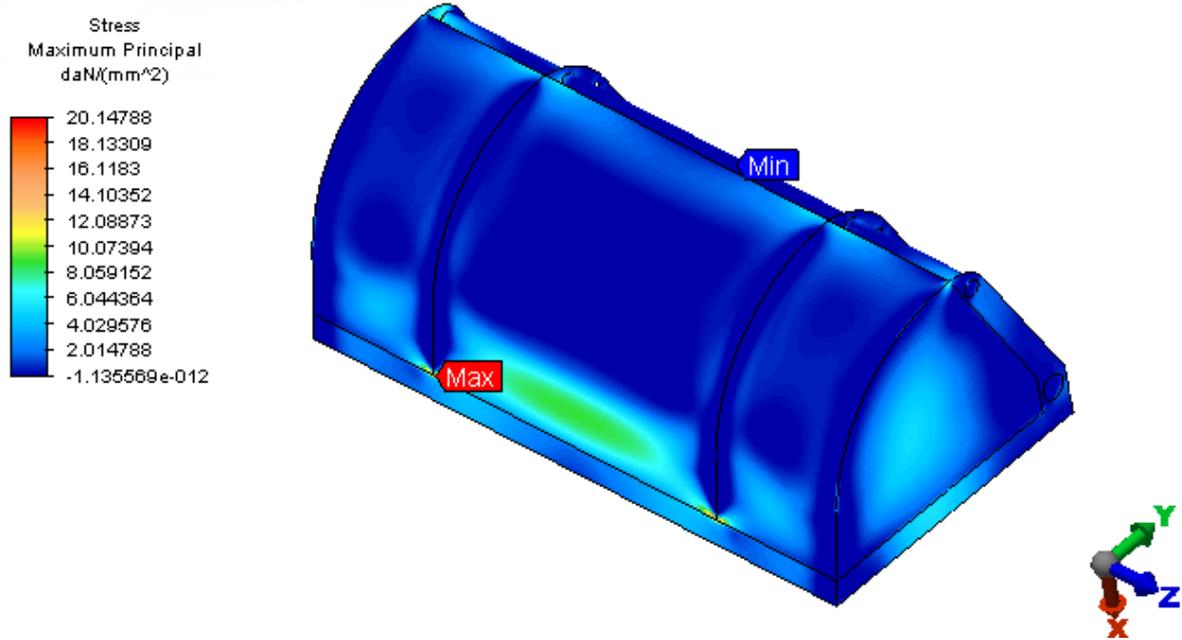
Figura 36 - Detalhe da distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)



Fonte: Própria.

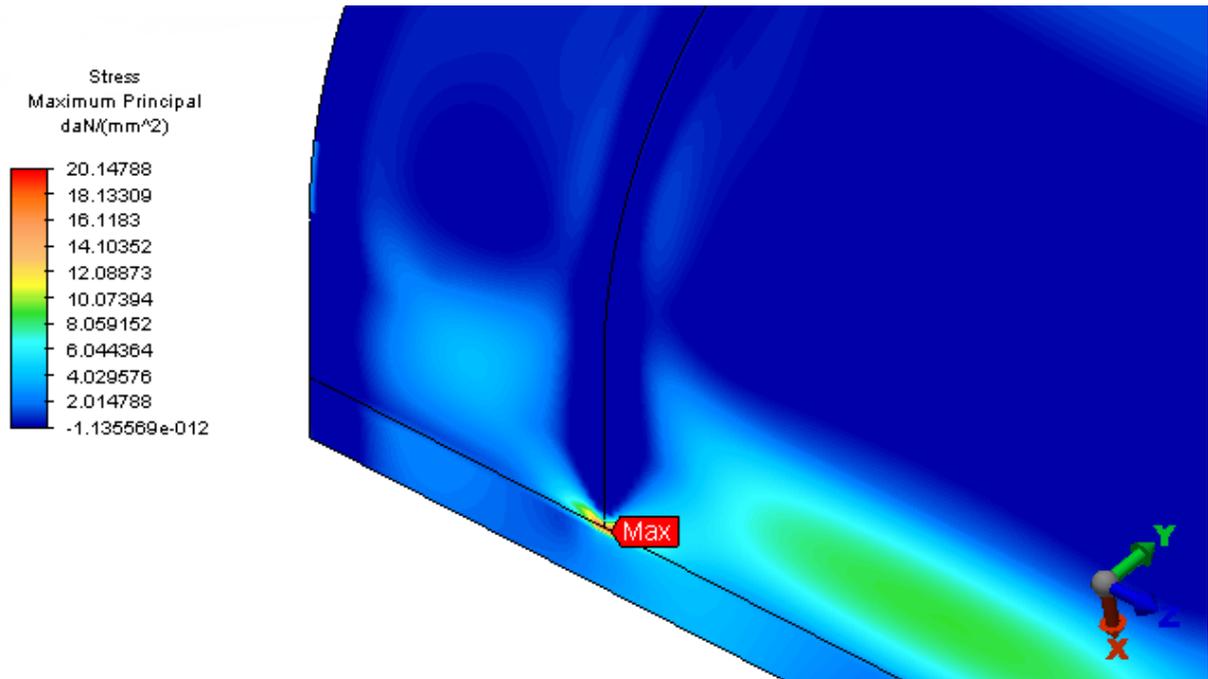
Os valores máximos alcançados (22,6 daN/mm²) ocorreram próximo a junção da costela com a faca, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas e mínimas principais.

Figura 37 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)



Fonte: Própria.

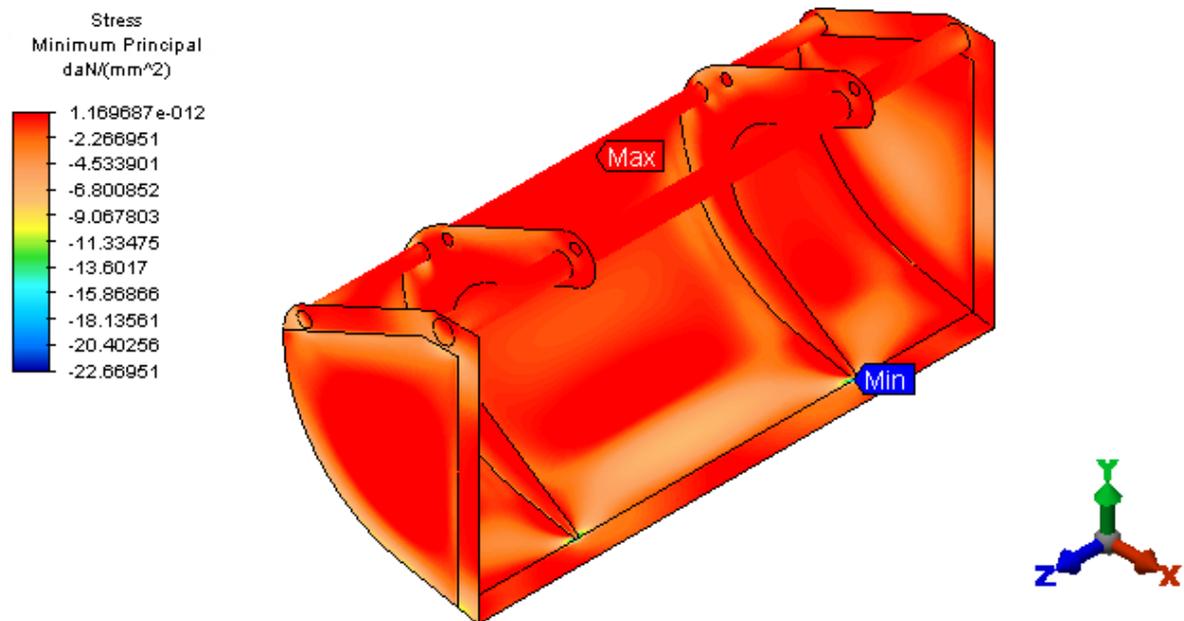
Figura 38 - Detalhe das tensões máximas principais no modelo



Fonte: Própria.

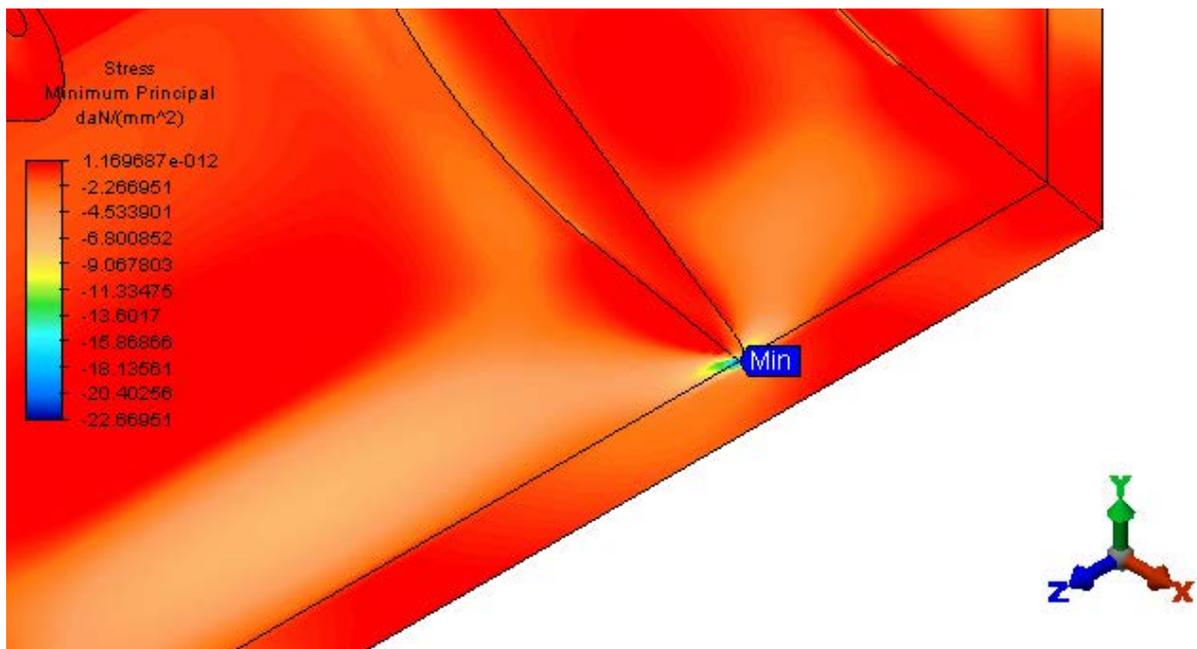
Os valores máximos alcançados (20,2 daN/mm²) ocorreram próximo a junção da costela com o costado da concha, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões mínimas principais.

Figura 39 - Distribuição das tensões mínimas principais no modelo (daN/mm²)



Fonte: Própria.

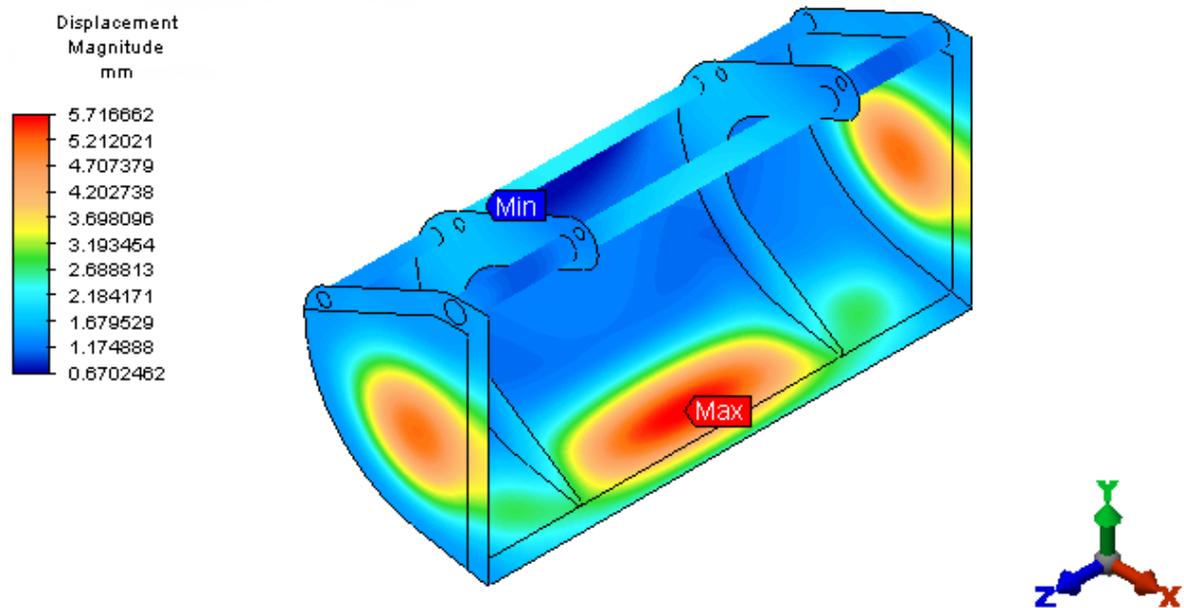
Figura 40 - Detalhe das tensões mínimas principais no modelo



Fonte: Própria.

Os valores máximos alcançados (22,7 daN/mm²) ocorreram próximo a junção da costela com o costado da concha, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados dos deslocamentos.

Figura 41 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)



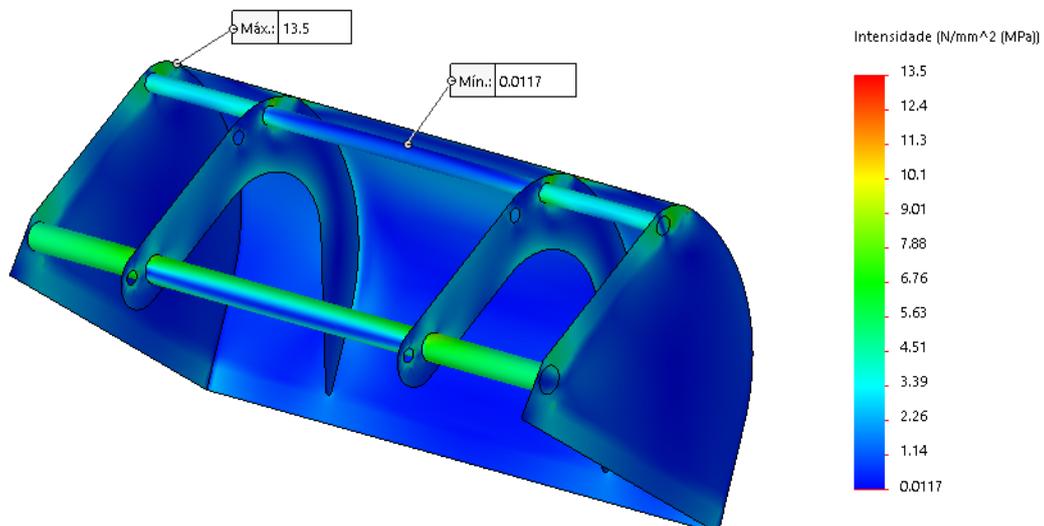
Fonte: Própria.

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 5,8 mm no centro da concha entre as costelas justamente no maior vão.

4.1.3 Concha impacto

A seguir, apresenta-se às tensões combinadas de Tresca no modelo da concha simulando o impacto com o solo.

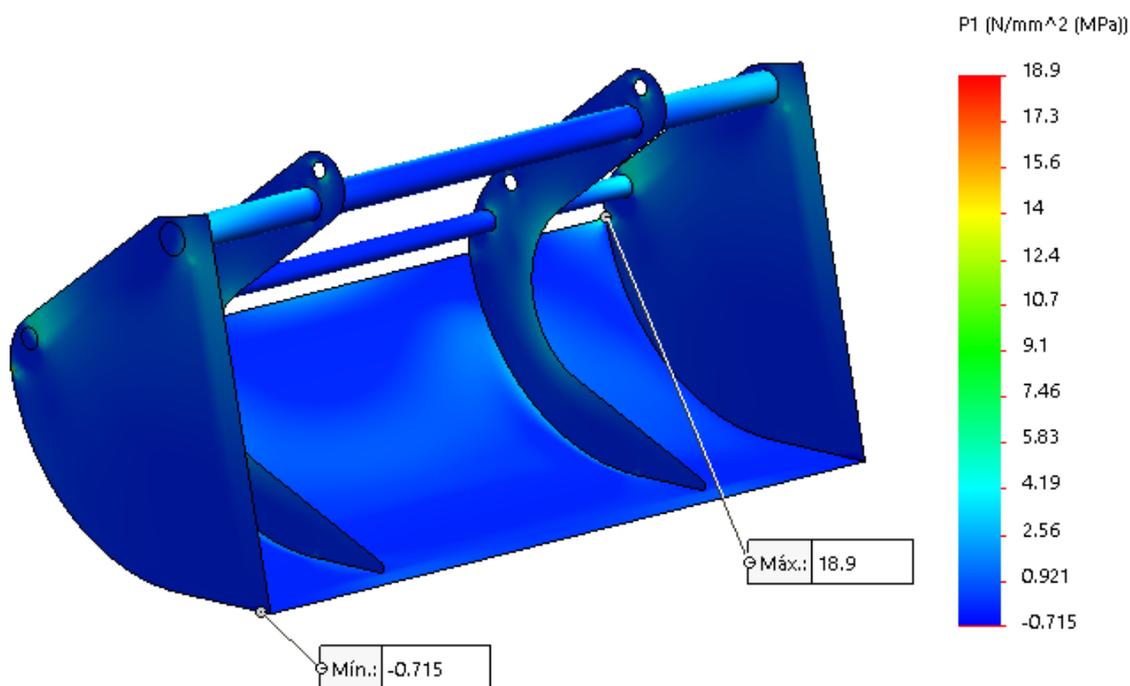
Figura 42 - Tensões combinadas de Tresca



Fonte: Própria.

A máxima tensão combinada de Tresca ocorreu próximo a descontinuidade da faca com o costado da concha, no valor de 1,4 daN/mm², ficando abaixo da tensão admissível de 23,3 daN/mm². A seguir às tensões máximas principais do modelo a fim de verificar quanto ao esforço de fadiga.

Figura 43 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo



Fonte: Própria.

Os valores máximos alcançados (1,9 daN/mm²) ocorreram próximo a junção das chapas do costado da concha, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm² para vida infinita. Para este modelo não foram feitas verificações de tensão de membrana, flexão e deslocamentos pelos valores serem muito baixos não afetando na resistência do equipamento. Também não foram transferidos os esforços e analisados os outros componentes pelo mesmo motivo.

5. CONCLUSÃO

O *grab*, também conhecido como garra, ganhou destaque no cenário mundial devido a sua confiabilidade, flexibilidade e robustez. Este equipamento é aplicado em indústrias, terminais portuários, aeroportuários, usinas siderúrgicas e estações de tratamento de lixo, diante da sua ampla aplicabilidade, visando entrar no mercado de fornecimento de equipamentos portuários, a empresa ALTUS Equipamentos solicitou

a elaboração de um projeto técnico de dimensionamento de um *grab* mecânico-hidráulico com capacidade de 12m³.

Diante o exposto, foram apresentadas as etapas desenvolvidas para o projeto do *grab* mecânico-hidráulico. Sendo assim, na etapa de informacional a aproximação com profissionais experientes na área, o acesso aos conteúdos técnicos de fabricantes de equipamentos semelhantes, bem como a leitura de artigos científicos, foram de grande valia para se estabelecer os primeiros critérios e limitações para o projeto, assim como direcionaram a definição de um primeiro design funcional que facilitaria na concepção do equipamento.

Assim, na fase informacional, foram compreendidos como pontos principais e critérios de partida para o projeto: O design da concha e a sua influência com o desempenho do equipamento; o posicionamento das massas para controle do centro de gravidade; controle do acionamento de partes móveis; características do material a ser coletado pelo *grab*.

Posteriormente, na etapa de projeto conceitual, foi aprofundado o estudo sobre os mecanismos presentes no equipamento, visando-se obter o funcionamento esperado no que tange as transmissões e transformações de movimento e força do equipamento. Neste momento também foi iniciada a modelagem em software CAD 3D fazendo-se um estudo do movimento prévio e buscando-se obter um esclarecimento dos pontos que seriam críticos durante o projeto e que, conseqüentemente, precisariam de uma maior atenção.

Por fim, na etapa do projeto básico, foram aplicados os parâmetros estabelecidos nas fases anteriores do projeto, assim como foram finalizados os cálculos para dimensionamento dos mecanismos. Nesta fase também foram executadas as análises pelo MEF – Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o software *SIMULATION* nos seguintes elementos do *grab*: conchas, hastes, cabeça da garra, bloco de comando e travessa, sendo estes modelados em CAD 3D. Verificados os esforços, as cargas e as forças aplicadas, o equipamento foi validado.

Sendo assim, ao perpassar pelas etapas supracitadas foi possível concretizar o projeto do *grab*, garantindo-se a máxima captação de material e a total abertura da

concha, de forma a despejar completamente o granel sem que fique resíduo aderido à superfície interna, conforme solicitado pelo cliente. Através das análises realizadas no software *SIMULATION*, verificou-se que o dimensionamento do equipamento estava em conformidade com todos os parâmetros do projeto adotados e as normas técnicas aplicáveis, garantindo-se segurança e eficiência. Desta forma, o projeto técnico básico do *grab* mecânico-hidráulico funcional poderá ser utilizado como base para projetos de *grabs* similares, com a possibilidade de fabricação para comercialização através de tecnologias do mercado.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho fora desenvolvido um modelo de *grab* comercial considerando somente os esforços de carga estática após o instante de corte, entretanto, faz-se necessário um estudo dos esforços dinâmicos envolvidos durante o processo de corte do granel na etapa de escavação do *grab*. Dessa forma é possível associar a relação do peso morto do *grab* com a carga útil não somente de maneira empírica como havia sendo feito até então, mas quantificando os esforços envolvidos e a influência do peso morto nesse processo. De acordo com Miedema (2000), Pfahl (1912) investigou a influência da relação do peso morto com a carga útil do *grab*, ele conclui que esta relação obedece a uma proporção linear.

Conforme citado por Miedema (2000) alguns outros autores como Tauber (1959) e Niemann (1935) estudaram também não só a relação de peso morto e carga útil, mas também geometria da concha, propriedades mecânicas do solo, força de tração nos cabos de fechamento. Scheffler, Pajer e Kurth (1976) fizeram um overview do aspecto mecânico dos diferentes tipos de *grabs*, concluíram após 50 anos de pesquisa que a interação entre solo *grab* ainda é simplificada e que o entendimento do *grab* ainda é limitado.

Miedema (2000) estuda em sua dissertação as forças de corte envolvidas no processo de corte de areia saturada. Ele relata que as forças envolvidas durante o processo de corte de areia saturada são transmitidas da lâmina através da tensão do grão e pressão da água, esses esforços são basicamente, a tensão normal devido a inércia do material, tensão de cisalhamento resultante do atrito entre solo e lâmina, tensão de cisalhamento resultante da adesão entre sólido e lâmina, pressão sob a lâmina, pressão abaixo da lâmina. Lommen (2016) em sua dissertação cita o trabalho

de Miedema e relata que eles desenvolveram um modelo para prever as forças envolvidas no processo de areia saturada usando a teoria de corte, entretanto, ainda não está definido se estes modelos podem ser aplicados a outros tipos de materiais.

Diversos pesquisadores tentaram descrever outros modelos que expliquem os esforços envolvidos no processo de escavação de materiais a granel como Lipsett e Moghaddam (2011) que definem a tensão de cisalhamento como proveniente de atrito e coesão, e a tensão normal como proveniente da inércia do material para casos em que os efeitos dinâmicos são desprezíveis.

Para Lommen (2016) o desenvolvimento de projetos de *grabs* e outros tipos de equipamentos para manuseio de materiais a granel é ainda um processo complicado, assim como prever a performance de um novo *design* é difícil. Segundo o mesmo, o modo atual de se fazer projeto é baseado em anos de experiência e consiste em construir o protótipo do novo modelo projetado e testar em local apropriado. Sendo essa uma alternativa que demanda muitos recursos, como por exemplo um guindaste e material suficiente para teste, desse modo não é fácil avaliar qual o parâmetro deve ser modificado para garantir a eficiência do modelo. Em sua dissertação, Lommen avalia a performance de protótipos testando um modelo virtual do *grab*, onde tanto o *grab* quanto o material a ser avaliado são modelados.

Uma combinação do Discrete Element Method (DEM) e Multibody Dynamics (MBD) poderia capturar ambos, comportamento do material e do *grab* e prever a performance do *grab*. [...] hoje o poder computacional é ainda insuficiente para simular todas as partículas, portanto, técnicas para acelerar a simulação precisam ser desenvolvidas, enquanto ambos os modelos também precisam ser acoplados. (LOMMEN, 2016, p. 3, tradução nossa).

Como recomendações para trabalhos futuros faz-se necessário a avaliação do fenômeno dinâmico de corte, ainda que este possa ser um modelo simplificado ou ainda não validado cientificamente, dada a sua importância em prever o comportamento do equipamento, a possibilidade de redução do peso morto e eficiência do *grab*.

Acreditamos que com o avanço das tecnologias de processamento computacional e softwares robustos de simulação o desenvolvimento de novos modelos de *grab* possam ser acessíveis. Possibilitando a avaliação dos diversos parâmetros do modelo do *grab* sob a influência operacional de manipulação de um determinado granel, tendo em vista que para diferentes tipos de materiais teríamos

diferentes modelos de contato e diferentes formatos de partícula. Desta forma um modelo ideal de *grab* é ideal para um determinado tipo de material.

Assim sendo, o cliente entende as limitações do projeto, sejam estas computacionais, financeiras ou devido ao tempo previsto para realização do projeto. Não obstante, ciente da estratégia adotada para dimensionamento do equipamento, tendo em vista que o peso morto é um parâmetro fundamental no funcionamento do *grab*.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Levi Barcelos. **Categorização de tensões em modelos de elementos finitos de conexões bocal-vaso de pressão**. Disponível em <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Levi%20Barcelos%20de%20Albuquerque_M.pdf>. Acesso em 04 dez. 2020;

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC). **Manual of Steel Construction**. 9 ed, 1989;

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Section VIII Division 2: Rules for Construction of Pressure Vessels**. New York, 2015;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8400: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas**. Rio de Janeiro, 2010;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **PB 1446: Roldana – Dimensões e materiais**. Rio de Janeiro, 1989.

BLUG. **Clamshell grabs CM1R-1,8**. Disponível em: <<http://blug.es/eng/productos/clamshell-grabs/mechanical-grabs/of-material-to-handling-up-to-1-8-t-m-i/cm1r-1-8-ca24>>. Acesso em 14 de jul. de 2020.

BOUMANS, G. **Grain Handling and Storage**. Elsevier, v. 5, Mar. 1985. Disponível em: <<https://b-ok.lat/book/2211246/46e1e5>>. Acesso em 14 de jul. de 2020.

BUDYNAS, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley**, 8.Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CRUZ, Antonio Jose Ramos de Souza. **Elementos de Máquinas**. Disponível em: <<https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/3/35/Sdfg.pdf>>. Acesso em 22 de ago. 2020.

GEBHARDT, R. **Eindringwiderstande korniger haufwerke**. Hebezeuge und Fordermittel 12, 1972, page 241-247.

GOMES, Paulo Flores José. **Cinemática e Dinâmica de engrenagens: Aspectos Gerais sobre Engrenagens**. Universidade do Minho. 45 f. Guimarães, 2014.

GUILHERME, José. **Análise de tensões ASME VIII-DIV 2**. Disponível em <<https://ensur.com.br/analise-tensao-asme-viii-div2/>>. Acesso em 04 dez. 2020;

HARDOX® HITUF. **Hardox Wear Plate, Datasheet 170br Hardox® HiTuf 2018-06-25**. Disponível em:

<https://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=81928B7FA4F64A6B9624DC70BE5D6E66&language=pt-BR>. Acesso em 01 de dez. de 2020.

HUNERJAGER, H., "***Kenngrossen fur das Forderverhalten von Schuttgutern***". Dissertation TU Hannover 1957.

HUPE, W; SCHUSZTER, M. ***Verbesserte Motorgreifer als Beitrag zur allgemeinen Verbesserung des Grefernumschlages***. Hebezeuge und Fordermittel 1965, nr. 1, page 6-9.

INFOMET. **Aços & Ligas | Aços e Ferros Fundidos | Ferros Fundidos Cinzentos**. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=145>. Acesso em 01 de dez. de 2020.

LIEBHERR. ***Guindastes com grab mecânico 4 cabos – CBG***. Disponível em: <<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/guindastes-maritimos/solucoes-para-transbordo-em-flutuantes/guindastes-com-grab-mecanico-4-cabos-%E2%80%93-cbg/guindastes-com-grab-mecanico-4-cabos-%E2%80%93-cbg.html#!/accordion-start-module-1=accordion-item-start-module>>. Acesso em: 17 de jul. de 2020.

MIEDEMA, S. A. ***A sensitivity analysis of the production of clamshells***. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237816178_A_SENSITIVITY_ANALYSIS_OF_THE_PRODUCTION_OF_CLAMSHELLS>. Acesso em 14 de jul. de 2020.

NORTON, R.L. **Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**, 4º Edição, Ed. Bookman. 2013.

NORTON, Robert L. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. Porto Alegre: AMGH, 2010.

PEINER SMAG. **Manual de Instruções**. Windmühlenbergstr, 2017.

QSL. ***Single rope hydraulic grab with remote control***. Disponível em: <<https://www.qsl.com/imports/medias/fichier-medias/qslbro-grabs-v2.pdf>>. Acesso em 14 de jul. de 2020.

SAUR. **Catálogo de Produtos**. Panambi, 2016.

SCHEFFLER, M., FEYRER, K., MATTHIAS, K., 1998. ***Fördermaschinen; Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge. Fördertechnik und Baumaschinen***. Vieweg, Braunschweig.

SGMC. ***Shanghai Qifan Machinery Co., Ltd.*** Disponível em <<http://www.mechanicalgrabs.com/pt/application.html>>. Acesso em 16 de jul. 2020.

SORIANO, L. Humberto. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. 1ª Edição. São Paulo, Ed. Edusp. 2003.

STEF, Lommen. ***Virtual prototyping of grabs Co-simulations of discrete element and rigid body models.*** Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:418996d9-9b48-4349-823e-b78d8349af25?collection=research>>. Acesso em 14 de jul. de 2020.

TAUBER, B.A., "***The effect of the design of a cable grab on its scooping capacity***". Coll. of scientific works of MLTI 8 (1958), page 30-34.

TORKE, H.J., "***Untersuchungen uber Fullvorgang bei Versuchen im Sand***". Deutsche Hebe- und Fordertechnik, 1962 Nr. 8.

WILKINSON, H.N. ***Research in the design of grabs by tests on models.*** Proc. of the Institution of Mechanical Engineering 178 (1963), nr. 31, 1963/1964 page 831-846.

APÊNDICE 1 – CÁLCULO BÁSICO ANALÍTICO

Caso 1:

Considerações:

Caso estático no instante em que o grab encontra-se na iminência de subir somente por ação dos cabos de fechamento

O grab está carregado em sua capacidade máxima, considerando um sobrematerial (13 m³)

A densidade do granel é de 2 t/m³

$$\text{Dados: } \rho := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}$$

$$A := 1.93749179 \text{ m} \cdot \text{m} \quad w := 3.700 \text{ m} \quad V := 2 \cdot A \cdot w = 14.337 \text{ m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$$

$$m := \rho \cdot V \quad m = 28674.88 \text{ kg}$$

DCL Grab:

$$\Sigma F_y = 0 \quad 2 \cdot F_{\text{cabo}} - m \cdot g = 0 \quad F_{\text{cabo}} := \frac{m \cdot g}{4} = 70.301 \text{ kN}$$

onde m é a massa total do equipamento mais a massa do granel, neste primeiro caso estamos somente considerando a massa do granel. A força de tração nos cabos é dividida então por 4 por conta da presença de duas polias móveis no equipamento

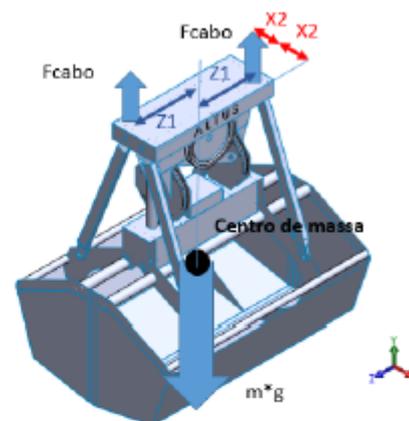
$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$\Sigma M_y = 0$$

$$\Sigma M_x = 0 \quad F_{\text{cabo}} \cdot (z1) - F_{\text{cabo}} \cdot (z1) = 0$$

$$\Sigma M_z = 0 \quad F_{\text{cabo}} \cdot (x2) - F_{\text{cabo}} \cdot (x2) = 0$$



Conclui-se que as distâncias dos cabos até a linha vertical do centro de massa devem ser as mesmas para os cabos, de modo a evitar a criação de um momento

Para a avaliação dos esforços nos componentes analisaremos o plano 2D de ação das forças tendo em vista que:

Não há nenhuma carga significativa na direção Z

Não há desbalanço de carga que gere momento em torno de X ou Y, tendo em vista a condição de simetria do equipamento, tanto geométrica quanto de carregamento

Iteração 1: Desprezando massa dos componentes

DCL Concha:

$$m := \frac{19500}{4} \text{ kg} \quad x_3 := 372 \text{ mm} \quad x_2 := 319 \text{ mm} \quad x_1 := 903 \text{ mm} \quad \theta := 21.18^\circ$$

$$\Sigma M_A = 0 \quad m \cdot g \cdot x_2 - F_{inf_concha} \cdot x_1 + R_x \cdot x_3 = 0$$

Inserindo eq. b:

$$F_{inf_concha} = \frac{m \cdot g \cdot x_2 + F_{haste} \cdot \sin(\theta) \cdot (x_3)}{x_1}$$

Inserindo eq. a:

$$F_{inf_concha} = \frac{m \cdot g \cdot x_2 + \left(\frac{m \cdot g - F_{inf_concha}}{\cos(\theta)} \right) \cdot \sin(\theta) \cdot (x_3)}{x_1}$$

$$A := \frac{\sin(\theta) \cdot (x_3)}{\cos(\theta) \cdot x_1} = 0.16$$

$$F_{inf_concha} := \frac{\frac{m \cdot g \cdot x_2}{x_1} + \frac{\frac{m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot (x_3)}{\cos(\theta)}}{x_1}}{1 + A} = 21.145 \text{ kN}$$

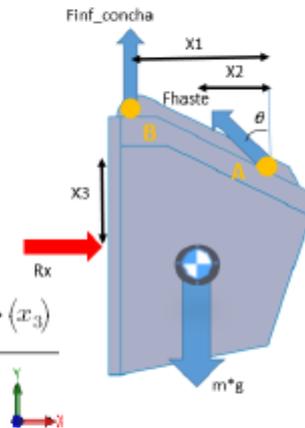
$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{inf_concha} + F_{haste} \cdot \cos(\theta) - m \cdot g = 0$$

$$F_{haste} = \frac{m \cdot g - F_{inf_concha}}{\cos(\theta)} \quad \text{Equação a}$$

$$F_{haste} := \frac{m \cdot g - F_{inf_concha}}{\cos(\theta)} = 28.594 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad F_{haste} \cdot \sin(\theta) - R_x = 0$$

$$R_x := F_{haste} \cdot \sin(\theta) = 10.331 \text{ kN} \quad \text{Equação b}$$



DCL Cabeça:

Massa dividida por 2 representando a distribuição da carga para a face 2D oposta

$$m := 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

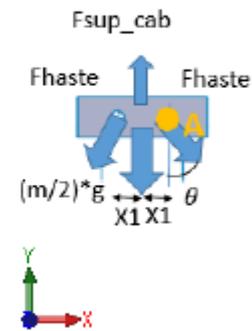
$$-2 \cdot F_{haste} \cdot \cos(\theta) + F_{sup_cab} - \frac{m}{2} \cdot g = 0$$

$$F_{sup_cab} := 2 \cdot F_{haste} \cdot \cos(\theta) = 53.325 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\left(\frac{m}{2} \cdot g\right) \cdot x_1 - F_{sup_cab} \cdot x_1 - F_{haste} \cdot \cos(\theta) \cdot (2 \cdot x_1) = 0$$



DCL Haste:

$$\Sigma F_y = 0$$

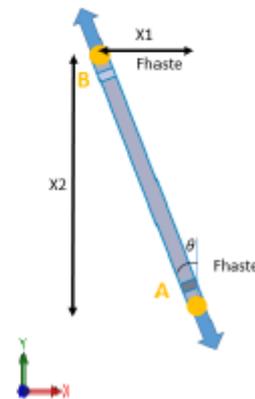
$$F_{haste} \cdot \cos(\theta) - F_{haste} \cdot \cos(\theta) = 0$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{haste} \cdot \text{sen}(\theta) - F_{haste} \cdot \text{sen}(\theta) = 0$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$F_{haste} \cdot \cos(\theta) \cdot (x_1) - F_{haste} \cdot \text{sen}(\theta) \cdot (x_2)$$



DCL Cabeça Inferior:

$$F_{concha_inf} := F_{inf_concha} \quad m_{inf} := 0$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{cil_inf} - 2 \cdot F_{concha_inf} - \frac{m_{inf}}{2} \cdot g = 0$$

$$F_{cil_inf} := 2 \cdot F_{concha_inf} = 42.29 \text{ kN}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

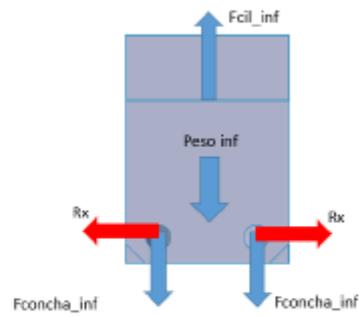
$$\Sigma F_x = 0 \quad Rx - Rx = 0$$

DCL Pistão:

$$F_{inf_cil} := F_{cil_inf} \quad m_{cil} := 0$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{sup_cil} - F_{inf_cil} - m_{cil} \cdot g = 0$$

$$F_{sup_cil} := F_{inf_cil} = 42.29 \text{ kN}$$

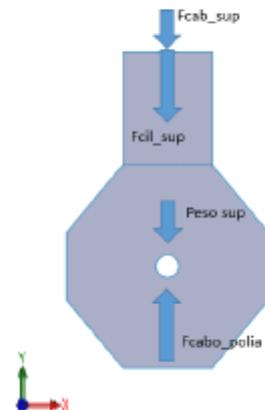


DCL Suporte Superior:

$$F_{cabo_polia} := 2 \cdot F_{cabo} = 140.602 \text{ kN} \quad F_{cil_sup} := F_{sup_cil} \quad m_{sup} := 0$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{cabo_polia} - F_{cil_sup} - F_{cab_sup} - \frac{m_{sup}}{2} \cdot g = 0$$

$$F_{cab_sup} := F_{cabo_polia} - F_{cil_sup} = 98.313 \text{ kN}$$



Caso 2:

Considerações:

Caso estático no instante em que o grab encontra-se na iminência de abrir aliviando os cabos e transferindo a carga somente para a haste

O grab está carregado em sua capacidade máxima, considerando um sobrematerial (14 m³)

A densidade do granel é de 2000 kg/m³

$$\text{Dados: } \rho := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}$$

$$A := 1.93749179 \text{ m} \cdot \text{m} \quad w := 3.700 \text{ m} \quad V := 2 \cdot A \cdot w = 14.337 \text{ m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$$

$$m := \rho \cdot V \quad m = 28674.88 \text{ kg}$$

DCL Grab:

$$\Sigma F_y = 0 \quad 2 \cdot F_{\text{cabo}} - m \cdot g = 0 \quad F_{\text{caboH}} := \frac{m \cdot g}{2} = 140.602 \text{ kN}$$

onde m é a massa total do equipamento mais a massa do granel, neste segundo caso estamos somente considerando a massa do granel. A força de tração nos cabos é dividido então por 2 por conta da presença de dois cabos de sustentação

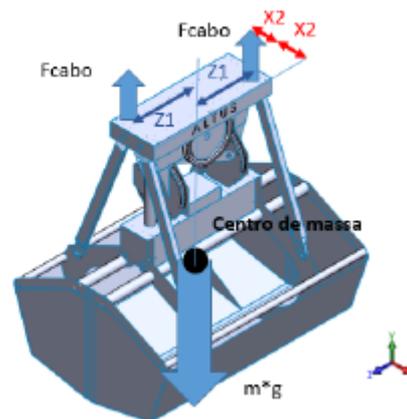
$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$\Sigma M_y = 0$$

$$\Sigma M_x = 0 \quad F_{\text{cabo}} \cdot (z1) - F_{\text{cabo}} \cdot (z1) = 0$$

$$\Sigma M_z = 0 \quad F_{\text{cabo}} \cdot (x2) - F_{\text{cabo}} \cdot (x2) = 0$$



Conclui-se que as distâncias dos cabos até a linha vertical do centro de massa devem ser as mesmas para os cabos, de modo a evitar a criação de um momento

Para a avaliação dos esforços nos componentes analisaremos o plano 2D de ação das forças tendo em vista que:

Não há nenhuma carga significativa na direção Z

Não há desbalanço de carga que gere momento em torno de X ou Y, tendo em vista a condição de simetria do equipamento, tanto geométrica quanto de carregamento

Iteração 1:

DCL Concha:

Massa granel $m := \frac{m}{4}$

Massa concha $m_{concha} := 0 \text{ kg}$

$x_3 := 372 \text{ mm}$ $F_{inf_concha} := 0$ ajustar valor conforme DCL cabeça inferior:
 $x_2 := 319 \text{ mm}$ $x_1 := 903 \text{ mm}$ $\theta := 21.18^\circ$

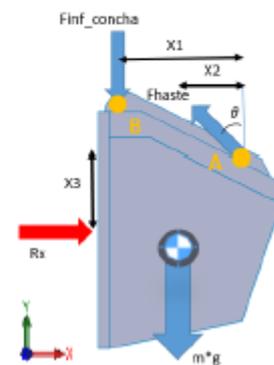
$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{haste} \cdot \cos(\theta) - ((m + m_{concha}) \cdot g) - F_{inf_concha} = 0$$

$$F_{haste} = \frac{((m + m_{concha}) \cdot g) + F_{inf_concha}}{\cos(\theta)}$$

$$F_{haste} := \frac{((m + m_{concha}) \cdot g) + F_{inf_concha}}{\cos(\theta)} = 75.394 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad F_{haste} \cdot \sin(\theta) - Rx = 0$$

$$Rx := F_{haste} \cdot \sin(\theta) = 27.24 \text{ kN}$$



Tensão na haste:

Material A-36

Tensão escoamento $\sigma_e := 250 \text{ MPa}$

Coefficiente de segurança $N := 1$

$$\sigma_{adm} := \frac{\sigma_e}{N}$$

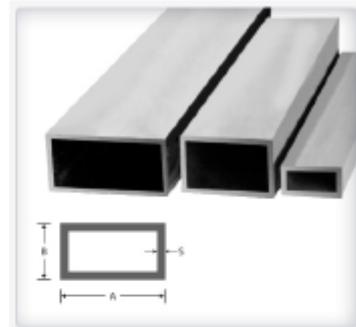
$$\sigma_{adm} = \frac{F_{haste}}{A} \quad \text{área} := \frac{F_{haste}}{\sigma_{adm}} = 301.576 \text{ mm}^2$$

Espessura perfil retangular:

$$B := 80 \text{ mm} \quad A := 100 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{área} &= (A \cdot B) - ((A - 2 S_{min}) \cdot B) \\ \text{área} &= AB - AB + 2 S_{min} B \end{aligned}$$

$$S_{min} := \frac{\text{área}}{2 \cdot B} = 1.885 \text{ mm}$$



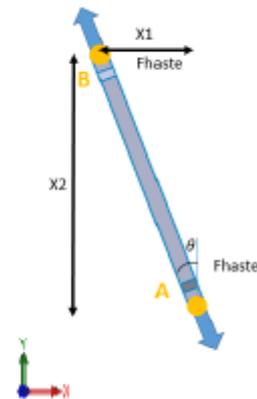
<http://www.acoideal.com.br/tubo-industrial-retangular/>

DCL Haste:

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \\ F_{haste} \cdot \cos(\theta) - F_{haste} \cdot \cos(\theta) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ F_{haste} \cdot \text{sen}(\theta) - F_{haste} \cdot \text{sen}(\theta) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_A &= 0 \\ F_{haste} \cdot \cos(\theta) \cdot (x1) - F_{haste} \cdot \text{sen}(\theta) \cdot (x2) &= 0 \end{aligned}$$



DCL Cabeça:

Massa dividida por 2 representando a distribuição da carga para a face 2D oposta

$$m_{cabeça} := 0 \text{ kg}$$

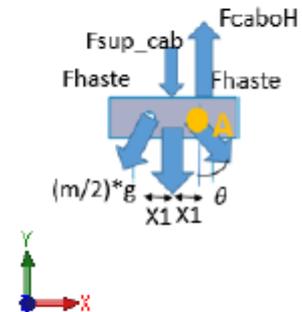
$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{caboH} - 2 \cdot F_{haste} \cdot \cos(\theta) - F_{sup_cab} - \frac{m_{cabeça}}{2} \cdot g = 0$$

$$F_{sup_cab} := F_{caboH} - 2 \cdot F_{haste} \cdot \cos(\theta) - \frac{m_{cabeça} \cdot g}{2} = 0 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma M_A = 0$$

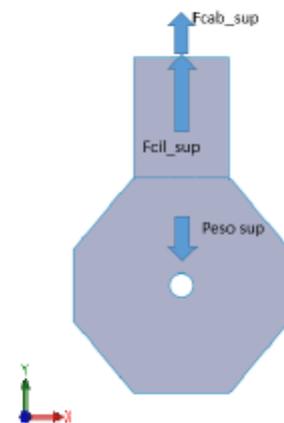


DCL Suporte Superior:

$$F_{cil_sup} = F_{sup_cil} \quad m_{sup} := 0 \text{ kg}$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{cil_sup} + F_{cab_sup} - \frac{m_{sup}}{2} \cdot g = 0$$

$$F_{cil_sup} := \frac{(m_{sup} \cdot g)}{2} - F_{sup_cab} = 0 \text{ N}$$



DCL Pistão: $F_{sup_cil} := F_{cil_sup} \quad m_{cil} := 0$

$$\Sigma F_y = 0 \quad F_{inf_cil} - F_{sup_cil} - m_{cil} \cdot g = 0$$

$$F_{inf_cil} := F_{sup_cil} = 0 \text{ N}$$



DCL Cabeça Inferior:

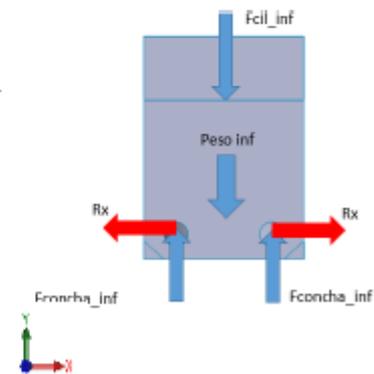
$$F_{cil_inf} := F_{inf_cil} \quad m_{inf} := 0 \text{ kg} \quad F_{concha_inf} = F_{inf_concha}$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad -F_{cil_inf} + 2 \cdot F_{concha_inf} - \frac{m_{inf}}{2} \cdot g = 0$$

$$F_{concha_inf} := \frac{\frac{m_{inf}}{2} \cdot g + F_{cil_inf}}{2} = 0 \text{ N}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad Rx - Rx = 0$$



APÊNDICE 3 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES DOS COMPONENTES

HASTE – ASME

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da haste do grab sob os esforços de peso próprio e carga de 5.350 daN referente a carga oriunda da concha.

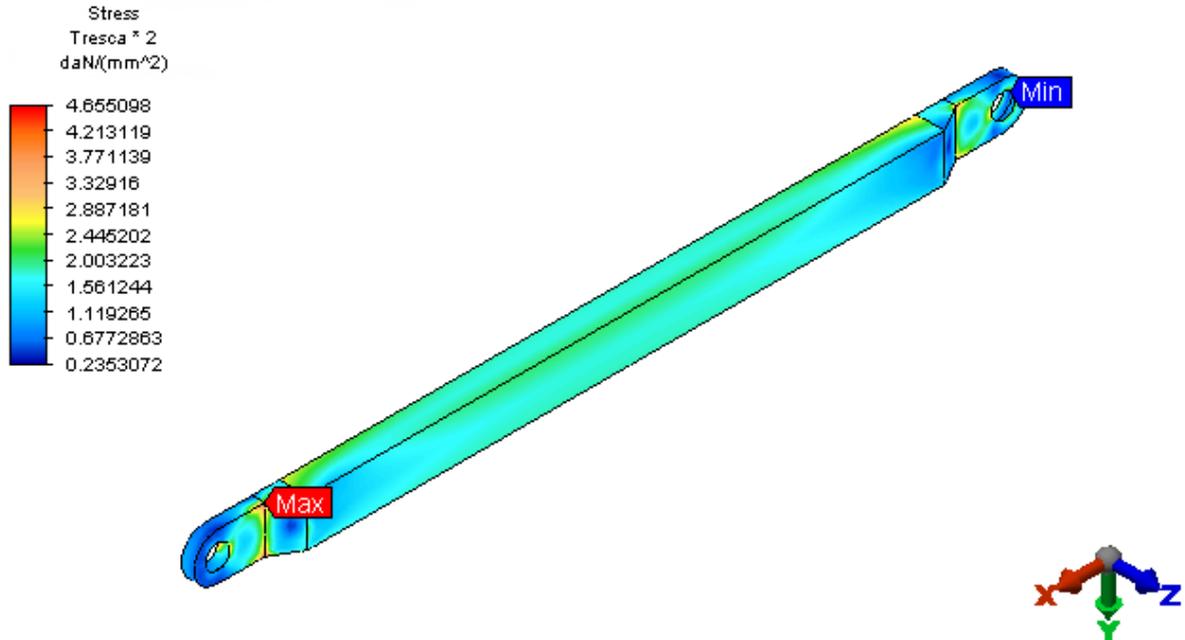


Figura 44 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

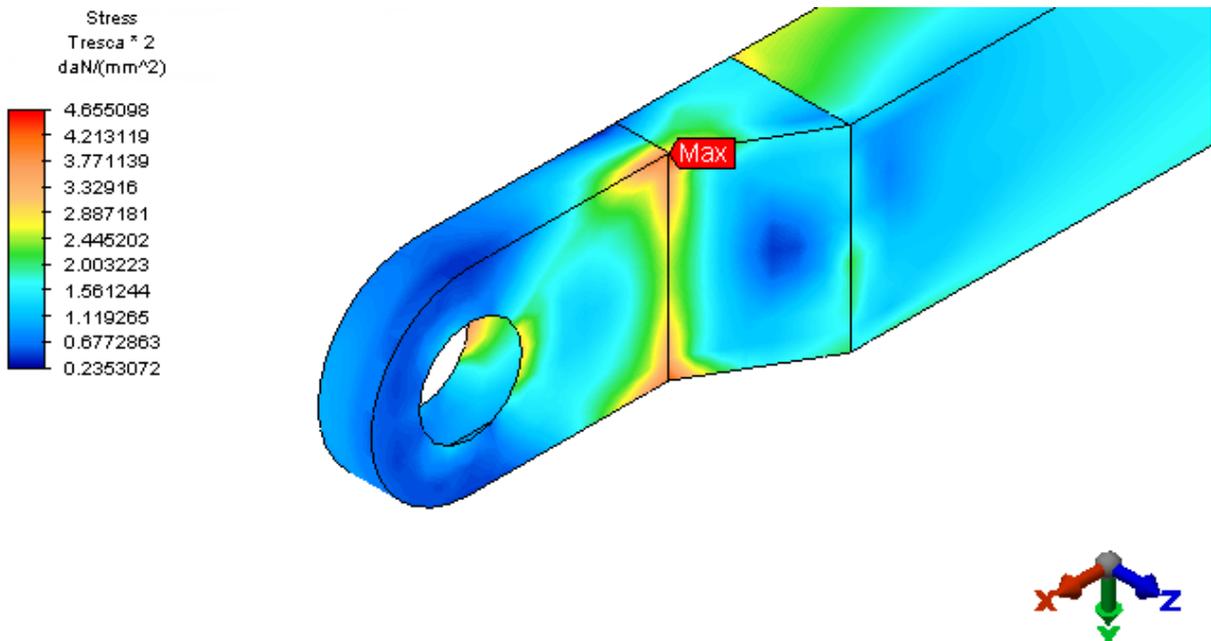


Figura 45 - Detalhe da distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados (4,7 daN/mm²) ocorreram próximo a junção do olhal com o corpo da haste, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm². A seguir os resultados de tensão de flexão no modelo.

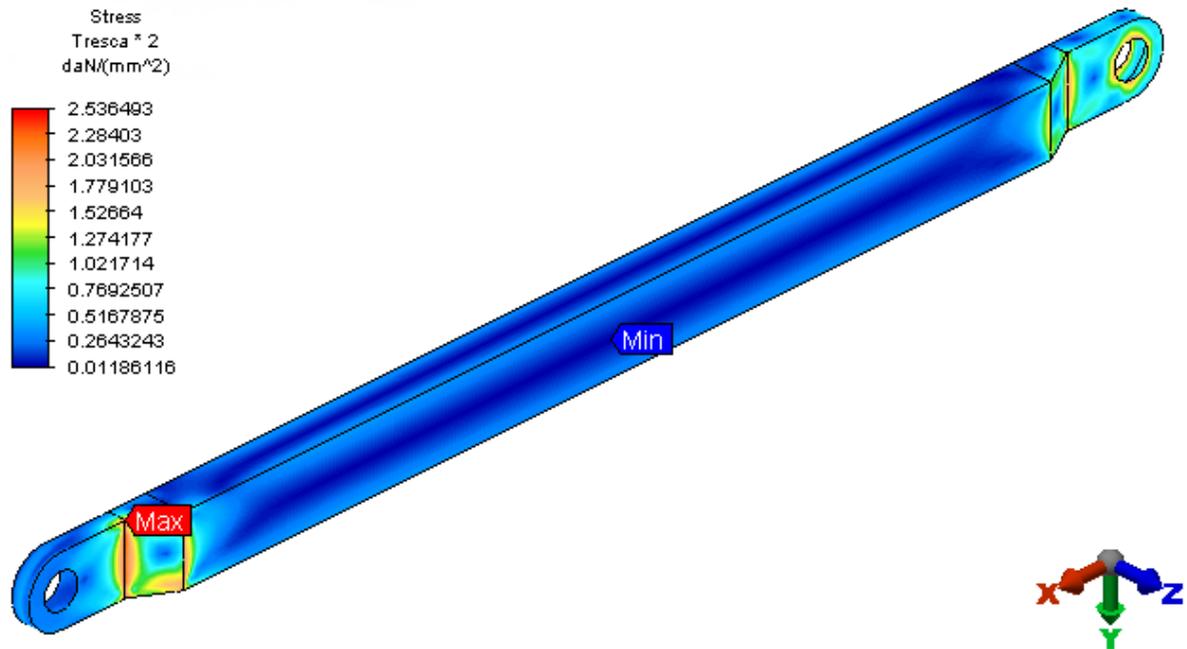


Figura 46 - Distribuição das tensões de flexão no modelo (daN/mm²)

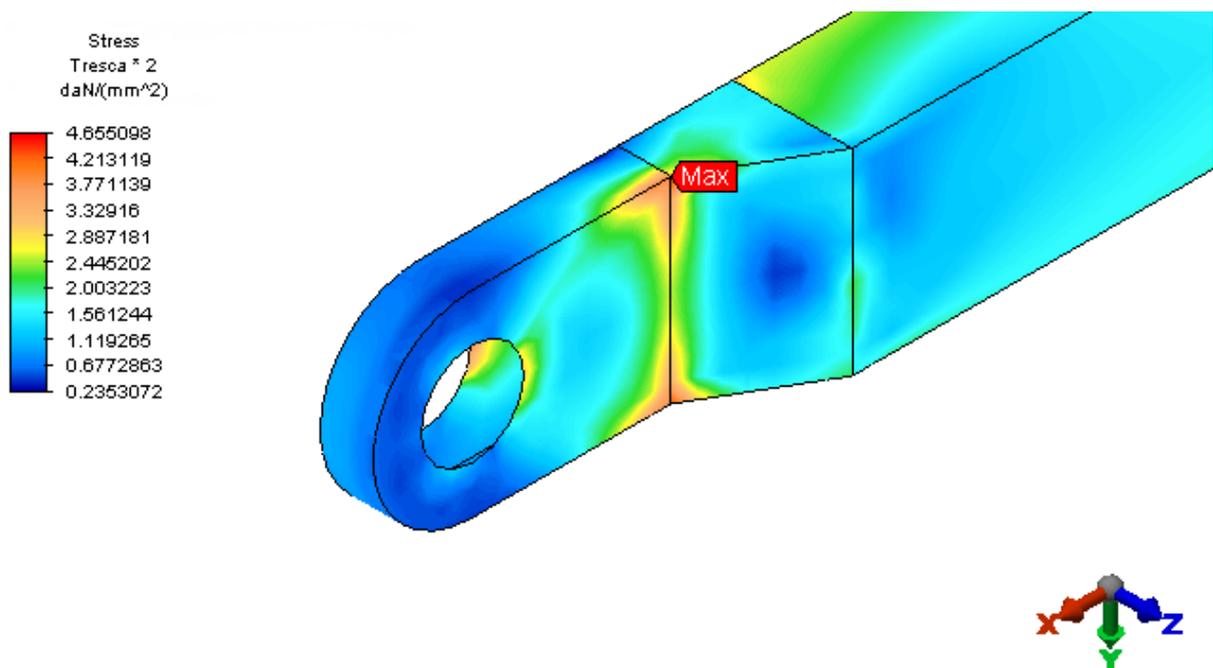


Figura 47 - Detalhe das tensões de flexão no modelo

Os valores máximos alcançados (4,7 daN/mm²) ocorreram próximo a junção do olhal com o corpo da haste, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm². A seguir os resultados das tensões de membrana no modelo.

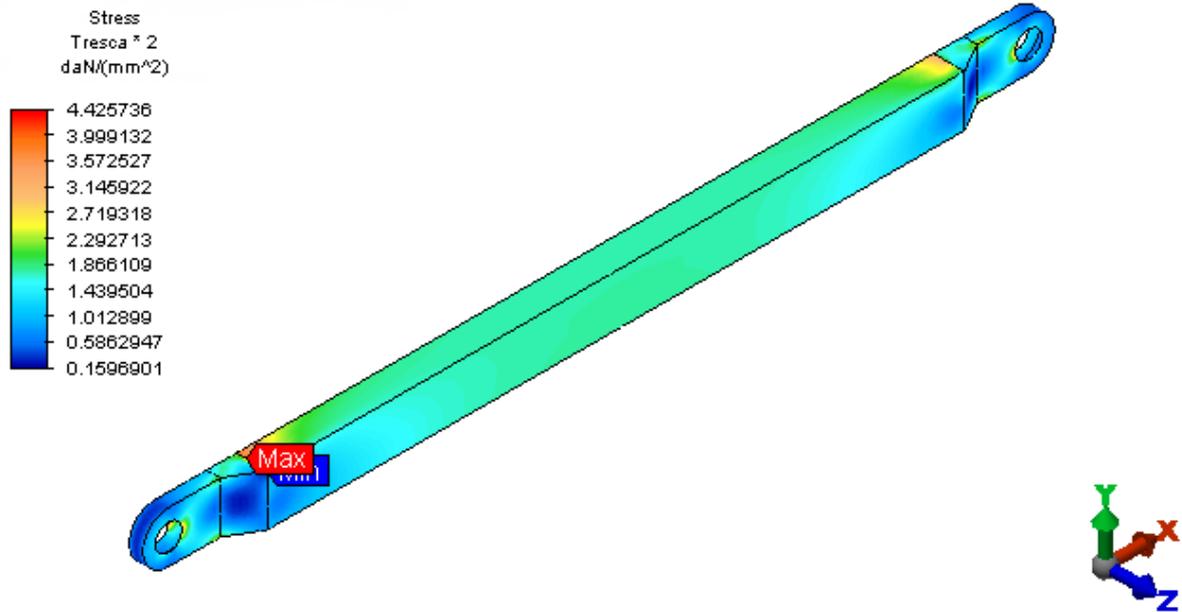


Figura 48 - Distribuição das tensões de membrana no modelo (daN/mm²)

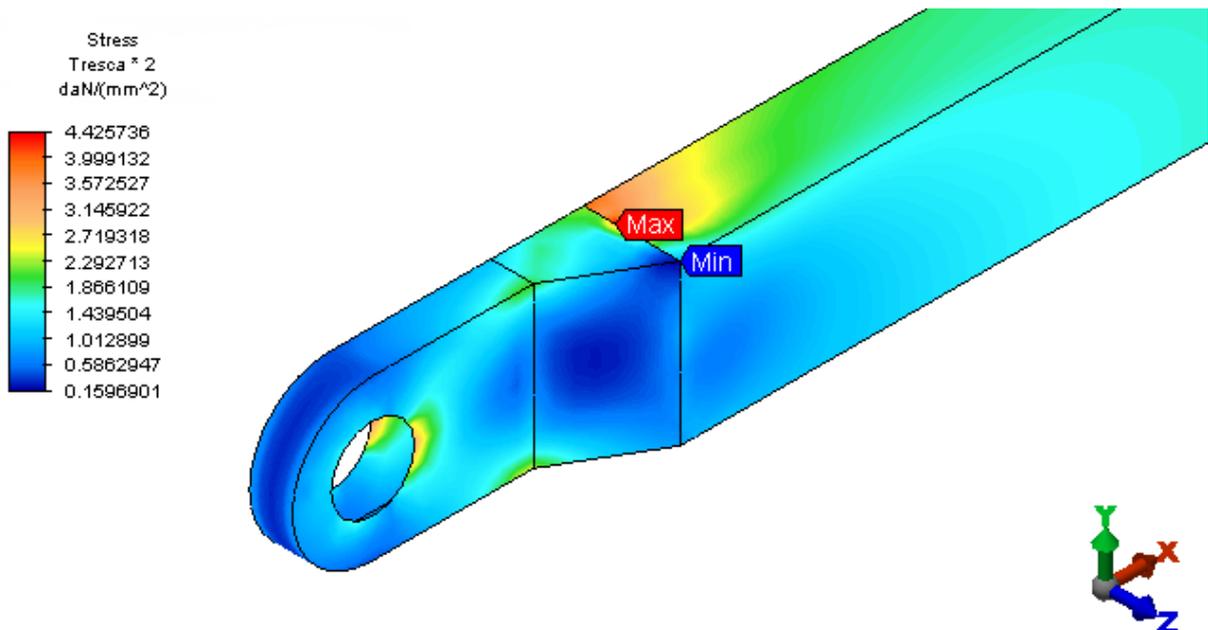


Figura 49 - Detalhe das tensões de membrana no modelo

Os valores máximos alcançados (4,5 daN/mm²) ocorreram na transição do olhal para o corpo da haste, ficando abaixo do limite admissível de 23,4 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais.

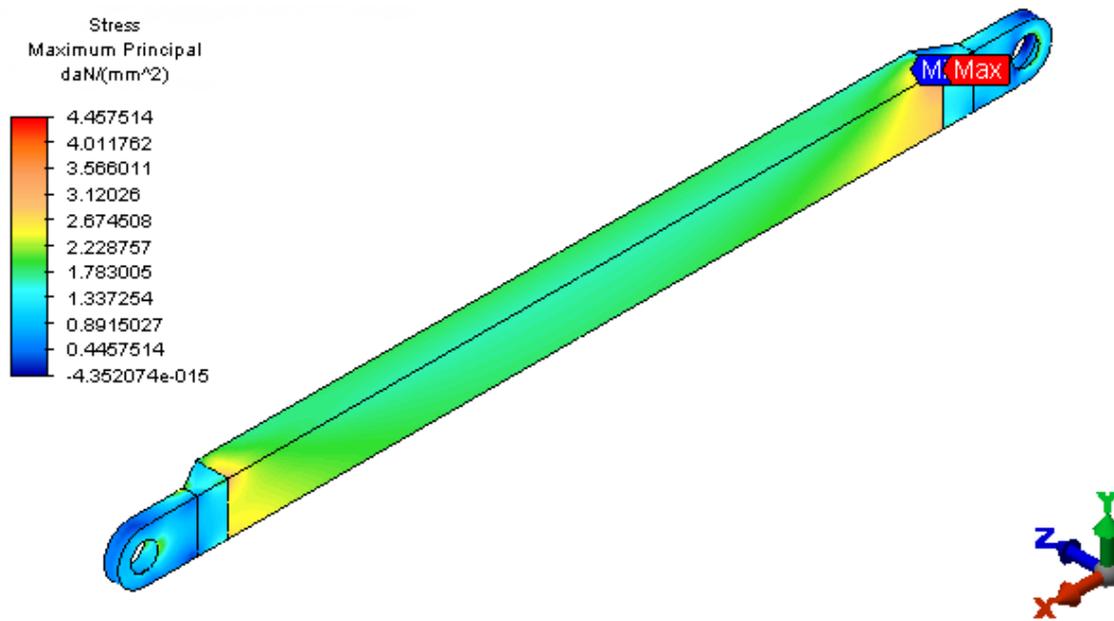


Figura 50 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

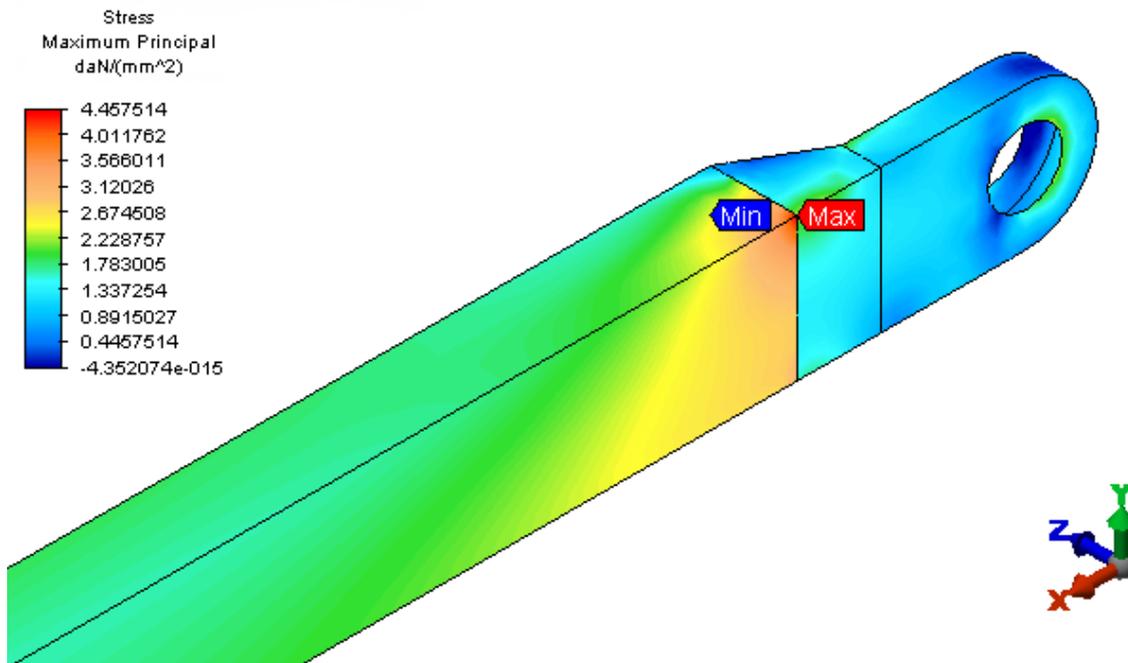


Figura 51 – Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (4,5 daN/mm²) ocorreram na transição do olhal para o corpo da haste, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm² para vida infinita. A seguir os resultados dos deslocamentos nodais no modelo.

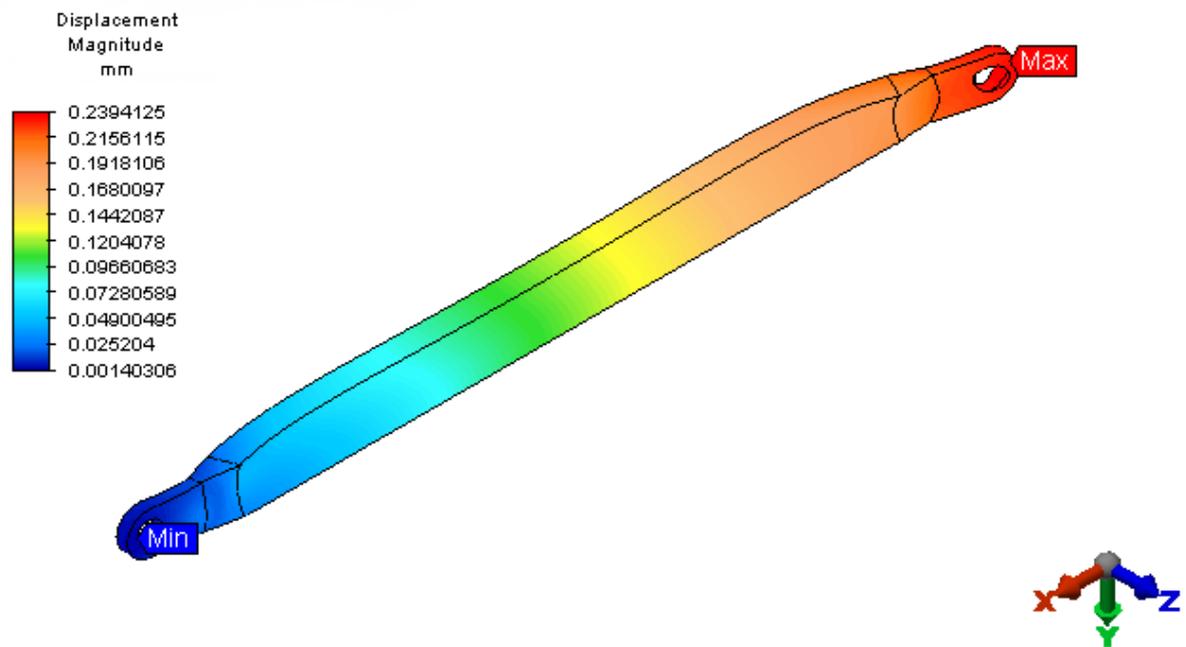


Figura 52 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 0,3 mm no local de aplicação da carga.

CABEÇA DA GARRA – ASME

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da cabeça da garra sob os esforços de peso próprio e carga axial em cada pino de 5.350 daN referente a carga oriunda das hastes.

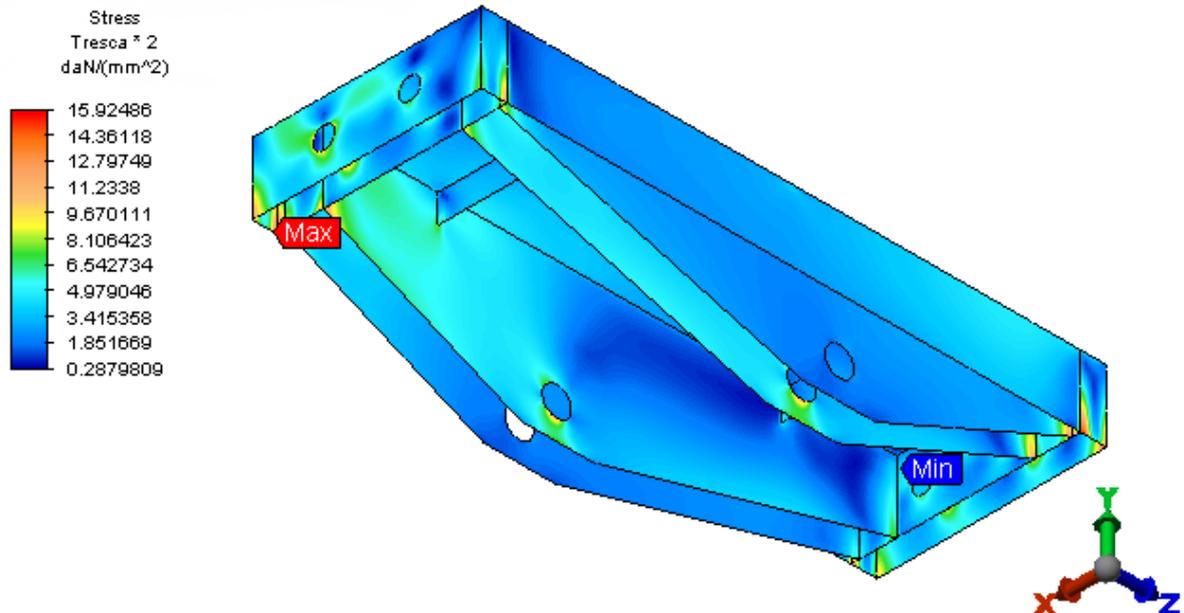


Figura 53 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm^2)

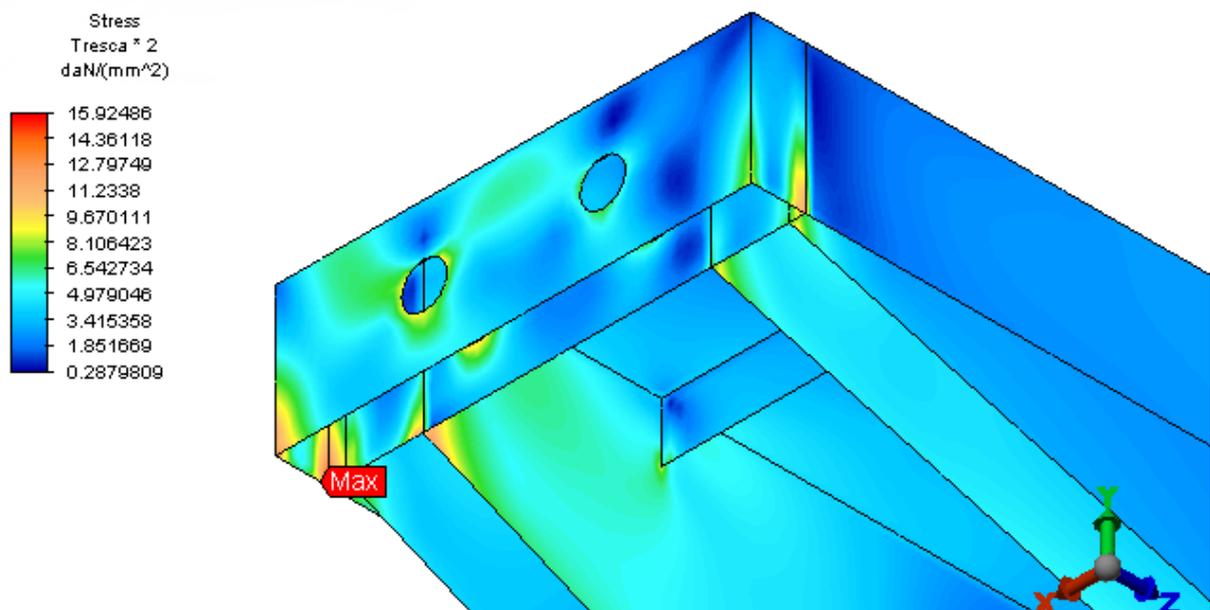


Figura 54 - Detalhe da distribuição das tensões de Tresca (daN/mm^2)

Os valores máximos alcançados (16,0 daN/mm^2) ocorreram próximo a junção da chapa do contorno externo com as chapas do suporte das polias, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm^2 . A seguir os resultados de tensão de flexão no modelo.

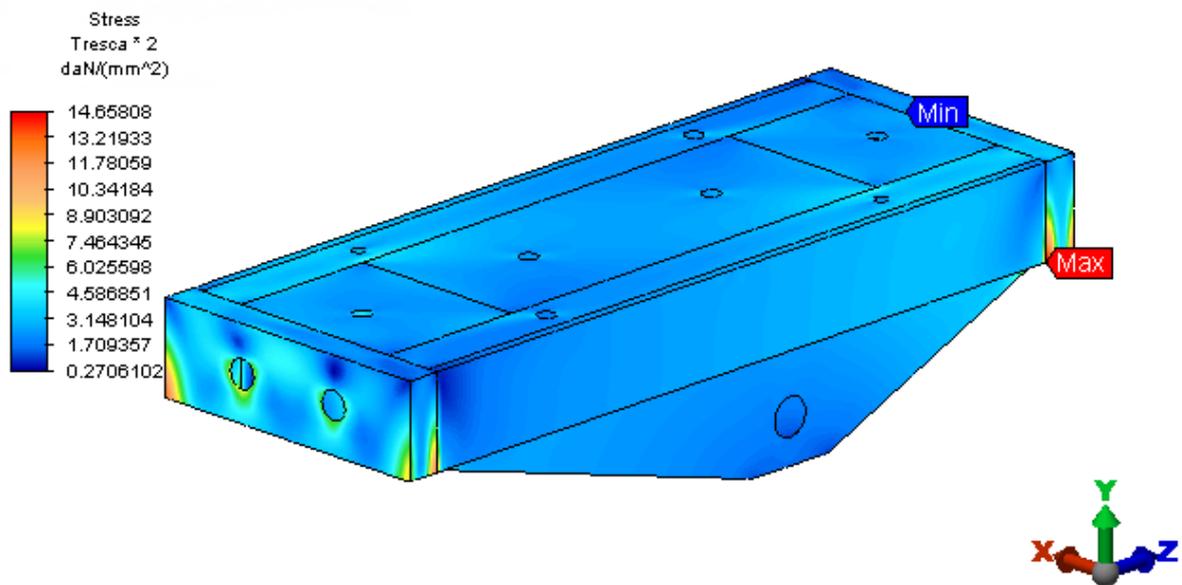


Figura 55 - Distribuição das tensões de flexão no modelo (daN/mm²)

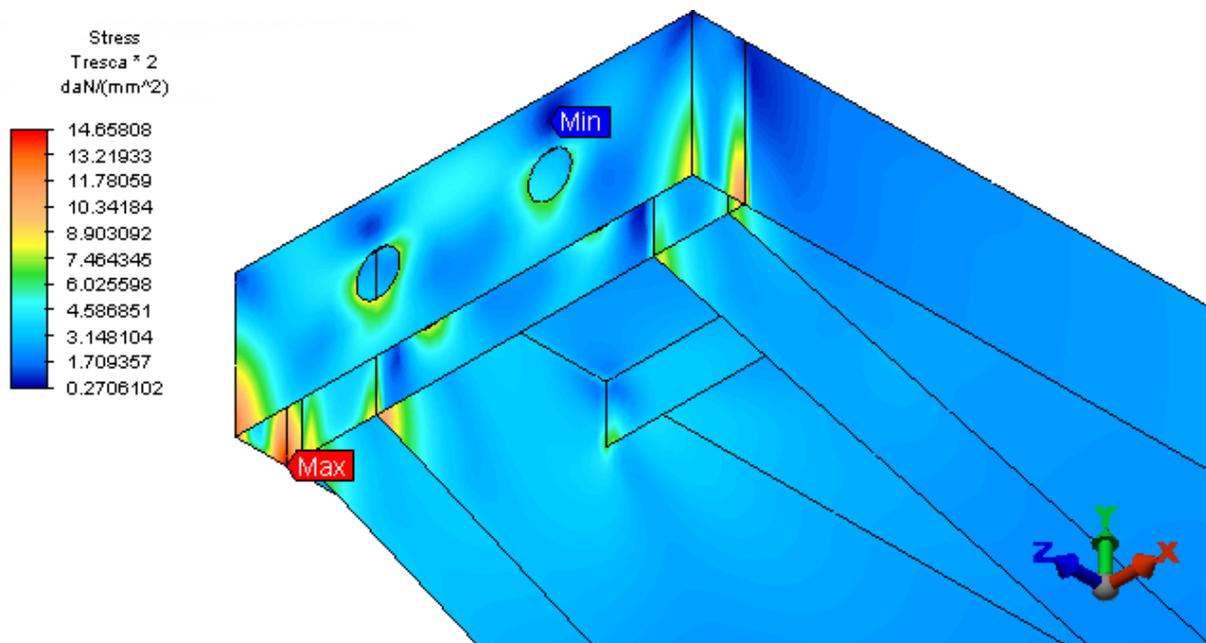


Figura 56 - Detalhe das tensões de flexão no modelo

Os valores máximos alcançados (14,7 daN/mm²) ocorreram próximo a junção da chapa do contorno externo com as chapas do suporte das polias, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm². A seguir os resultados das tensões de membrana no modelo.

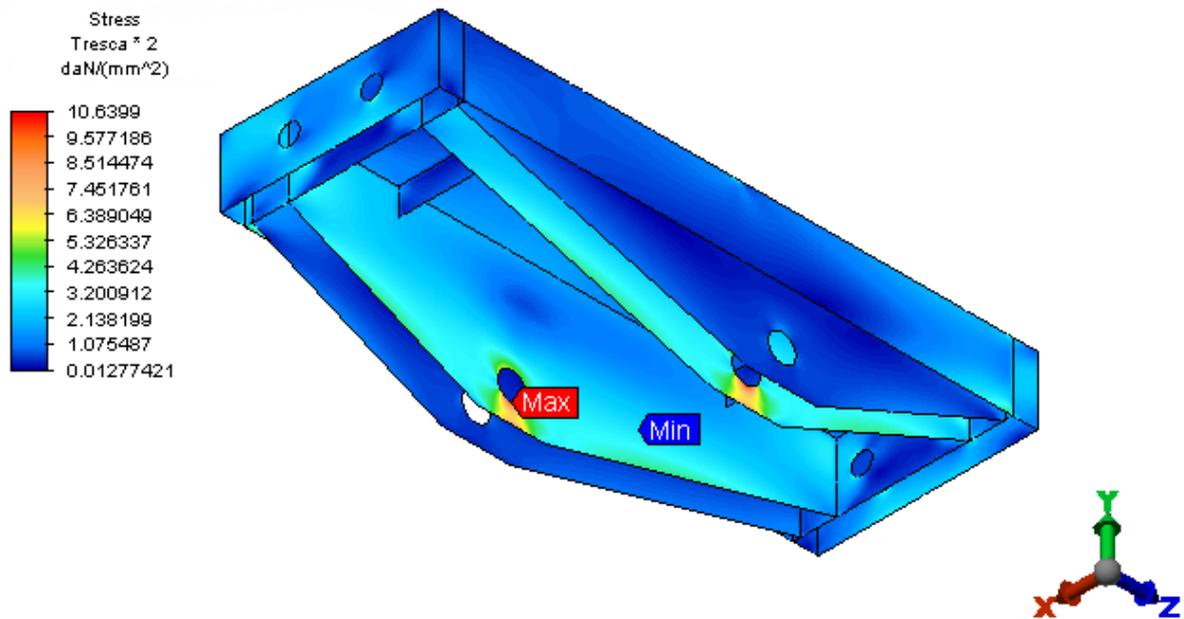


Figura 57 - Distribuição das tensões de membrana no modelo (daN/mm²)

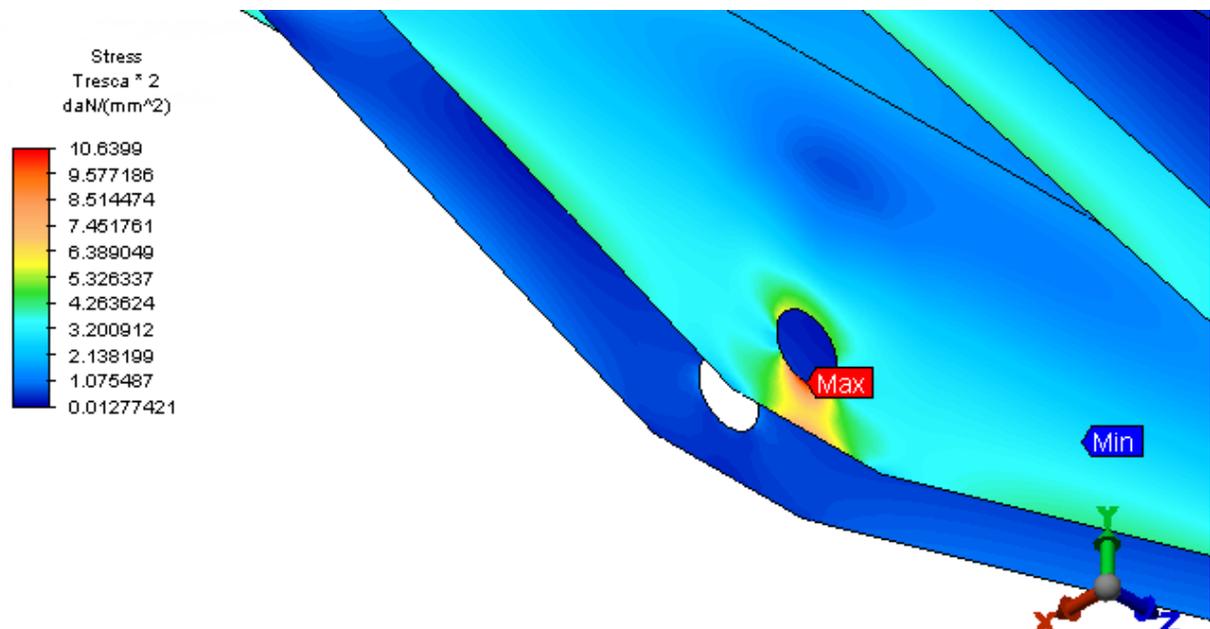


Figura 58 - Detalhe das tensões de membrana no modelo

Os valores máximos alcançados (10,7 daN/mm²) ocorreram no olhal do suporte da polia, ficando abaixo do limite admissível de 23,4 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais.

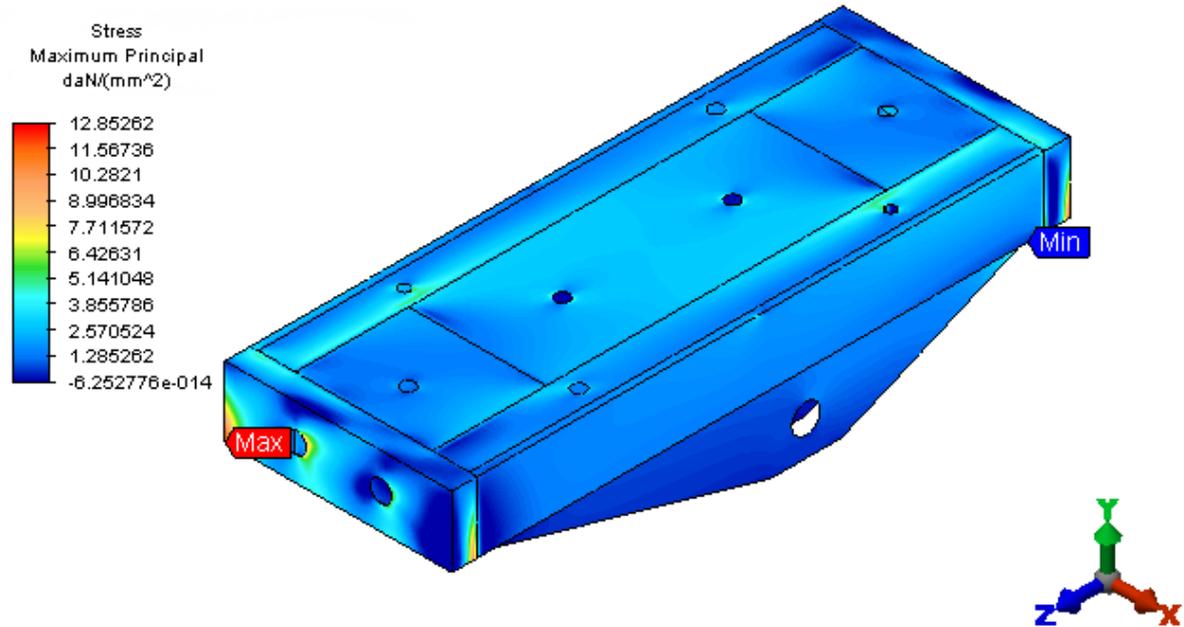


Figura 59 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

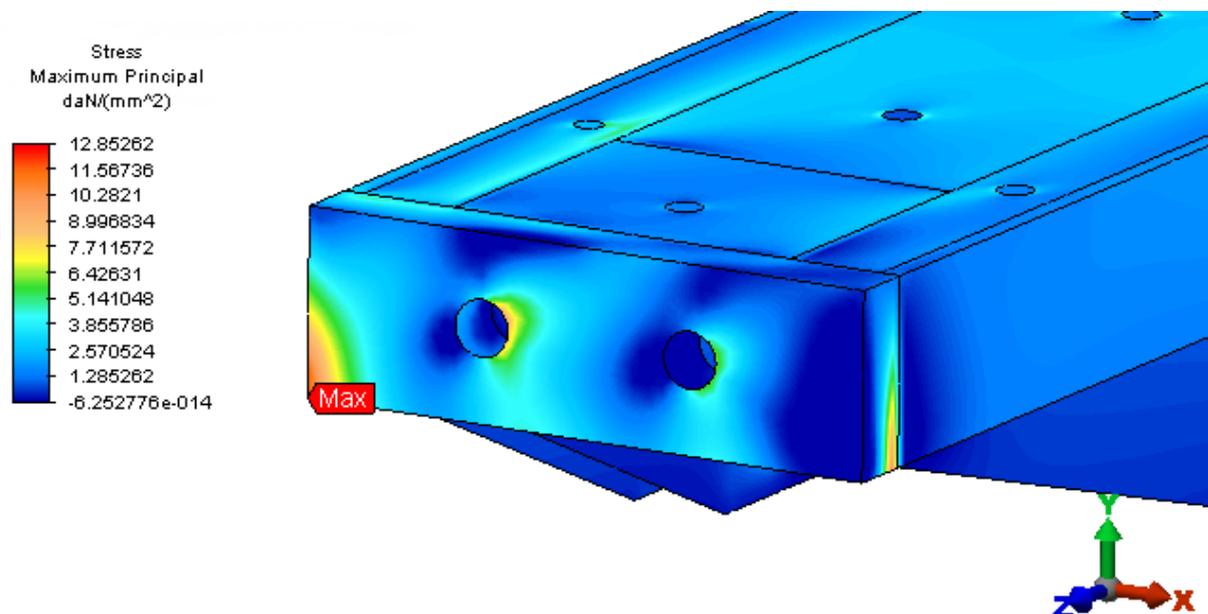


Figura 60 – Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (12,9 daN/mm²) ocorreram na junção das chapas do contorno, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm² para vida infinita. A seguir os resultados dos deslocamentos nodais no modelo.

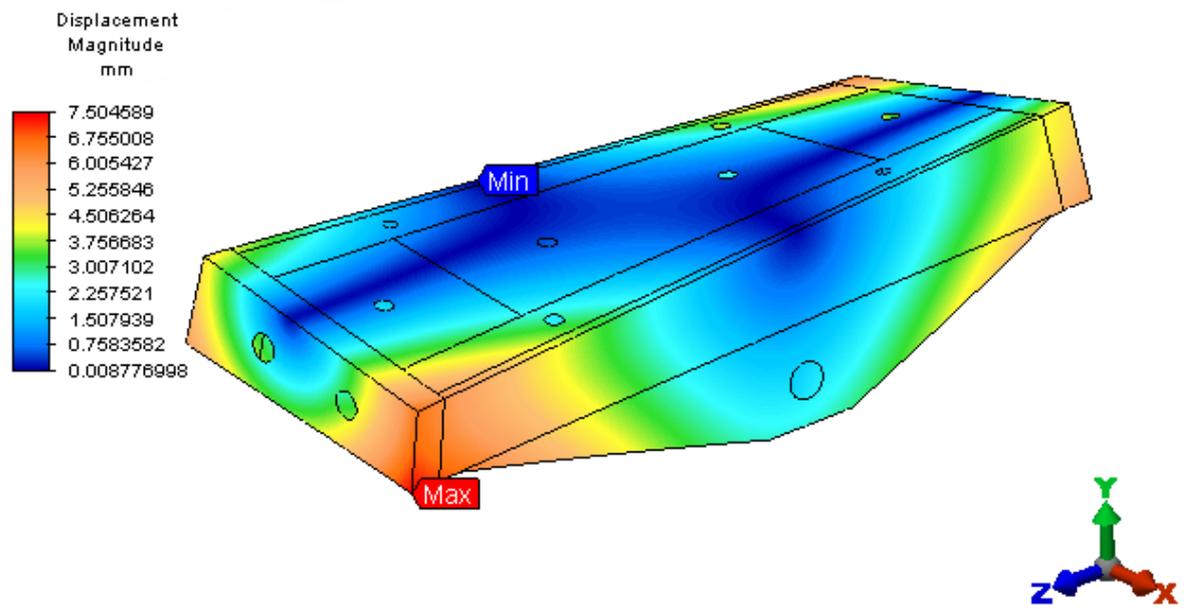


Figura 61 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 7,6 mm.

BLOCO DE COMANDO - ASME

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, no bloco de comando do grab sob os esforços de peso próprio, carga vertical de 4.484 daN em cada apoio do pistão e carga vertical de 10.110 daN no olhal referente a carga oriunda dos pistões e do balancim.

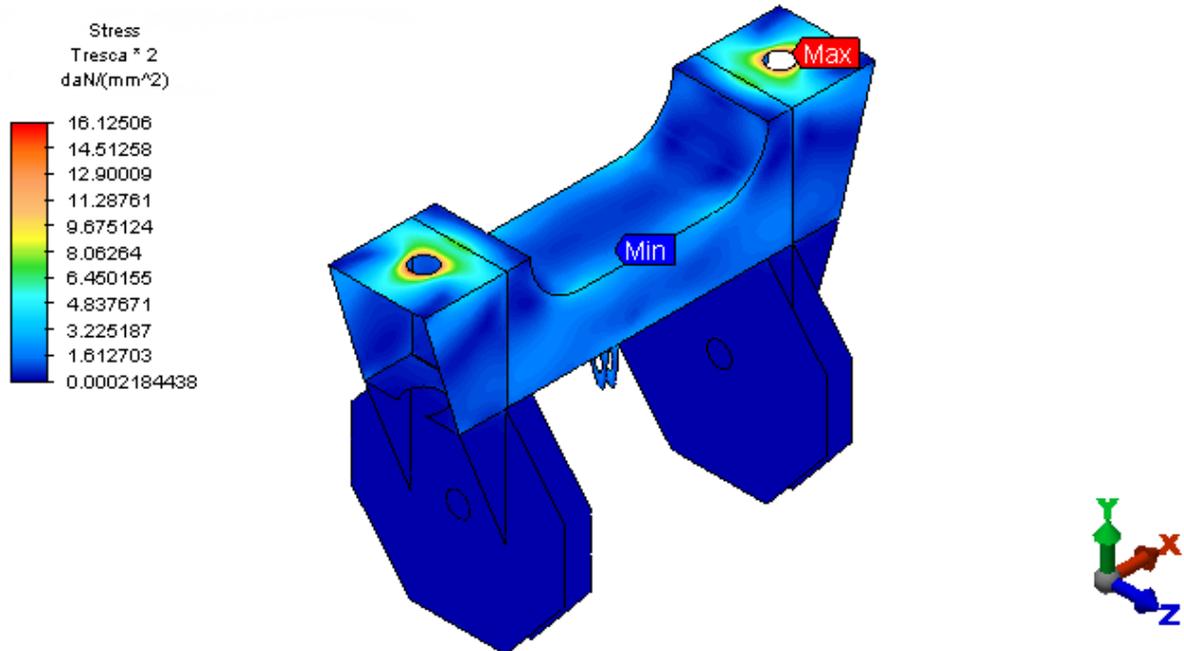


Figura 62 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

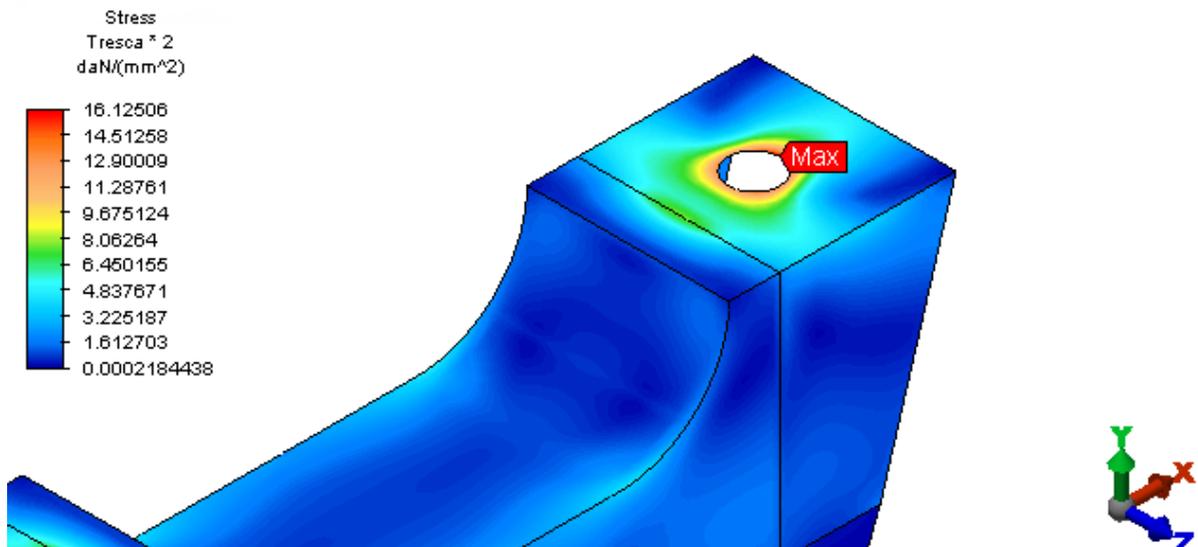


Figura 63 - Detalhe da distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados (16,2 daN/mm²) ocorreram na chapa de apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm². A seguir os resultados de tensão de flexão no modelo.

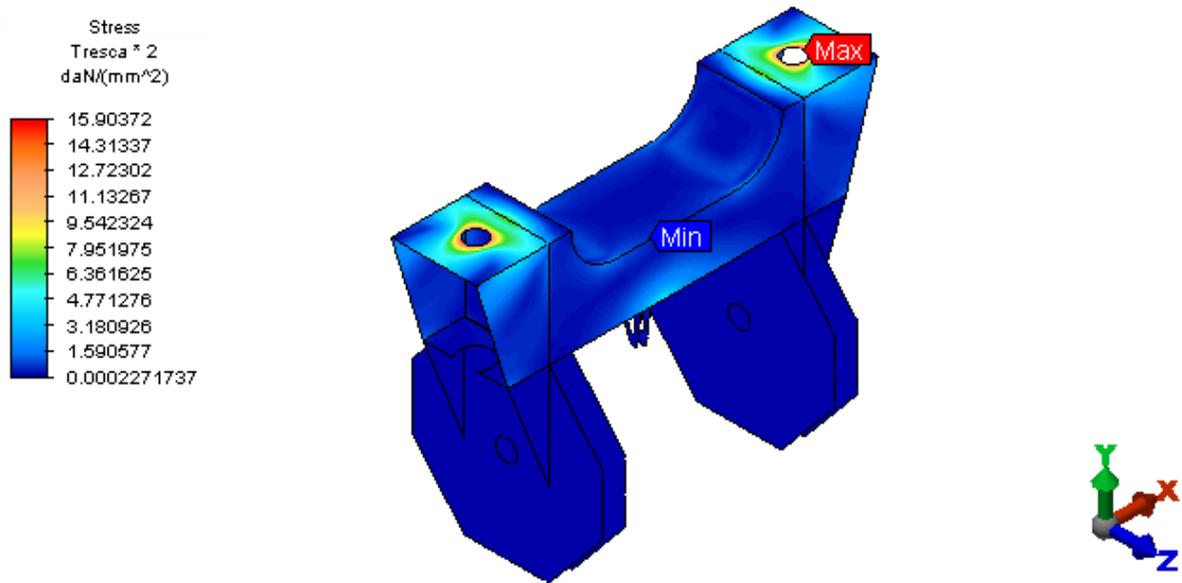


Figura 64 - Distribuição das tensões de flexão no modelo (daN/mm²)

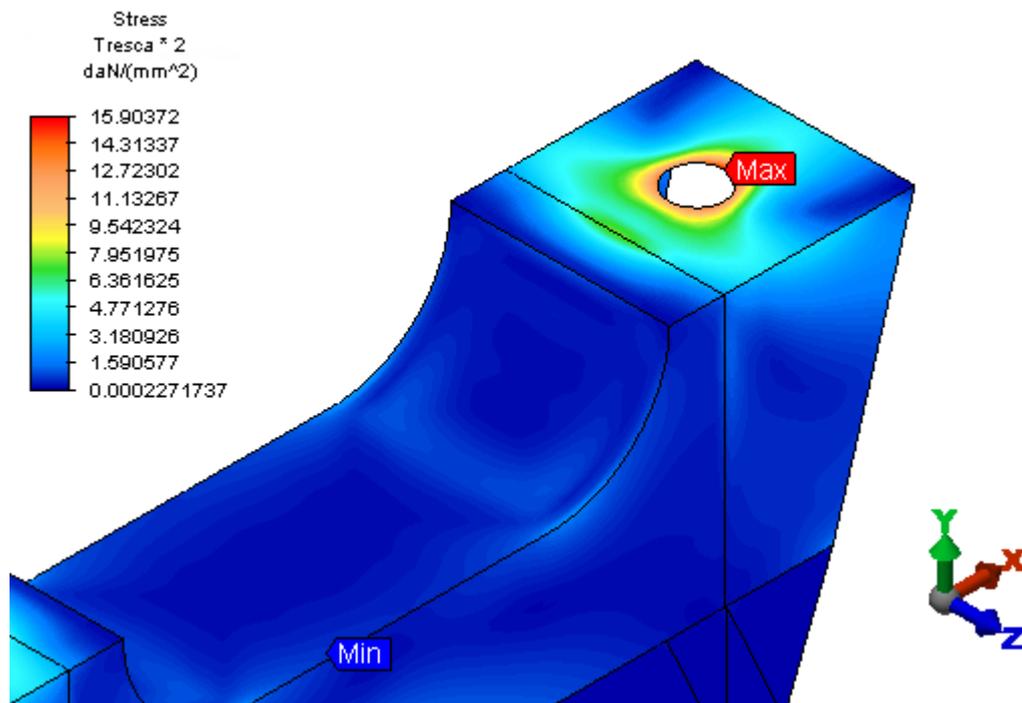


Figura 65 - Detalhe das tensões de flexão no modelo

Os valores máximos alcançados (16,0 daN/mm²) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 35,0 daN/mm². A seguir os resultados das tensões de membrana no modelo.

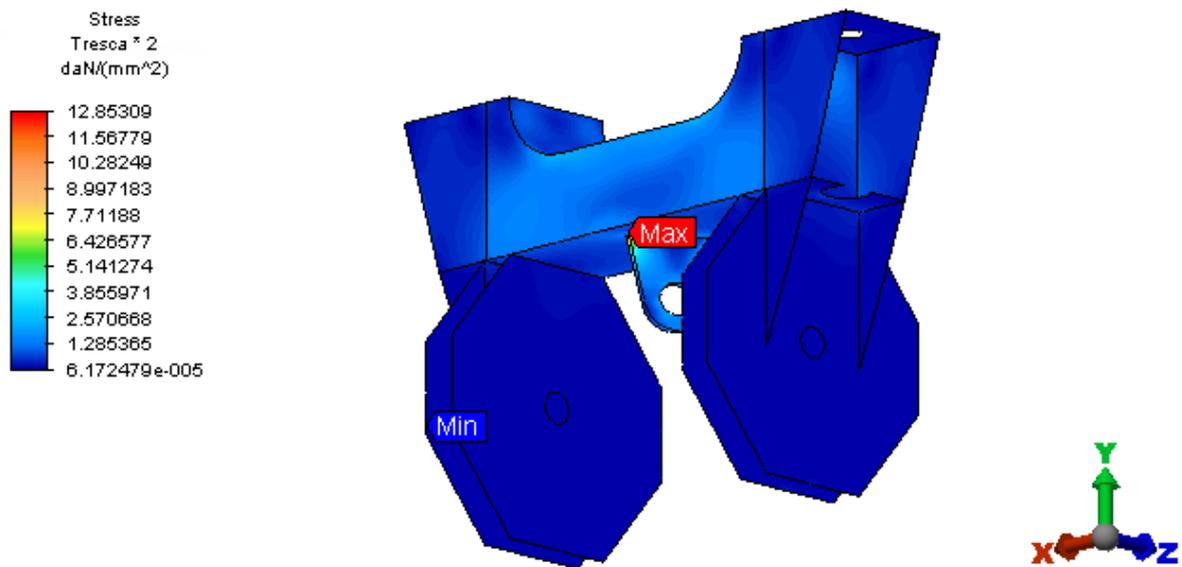


Figura 66 - Distribuição das tensões de membrana no modelo (daN/mm²)

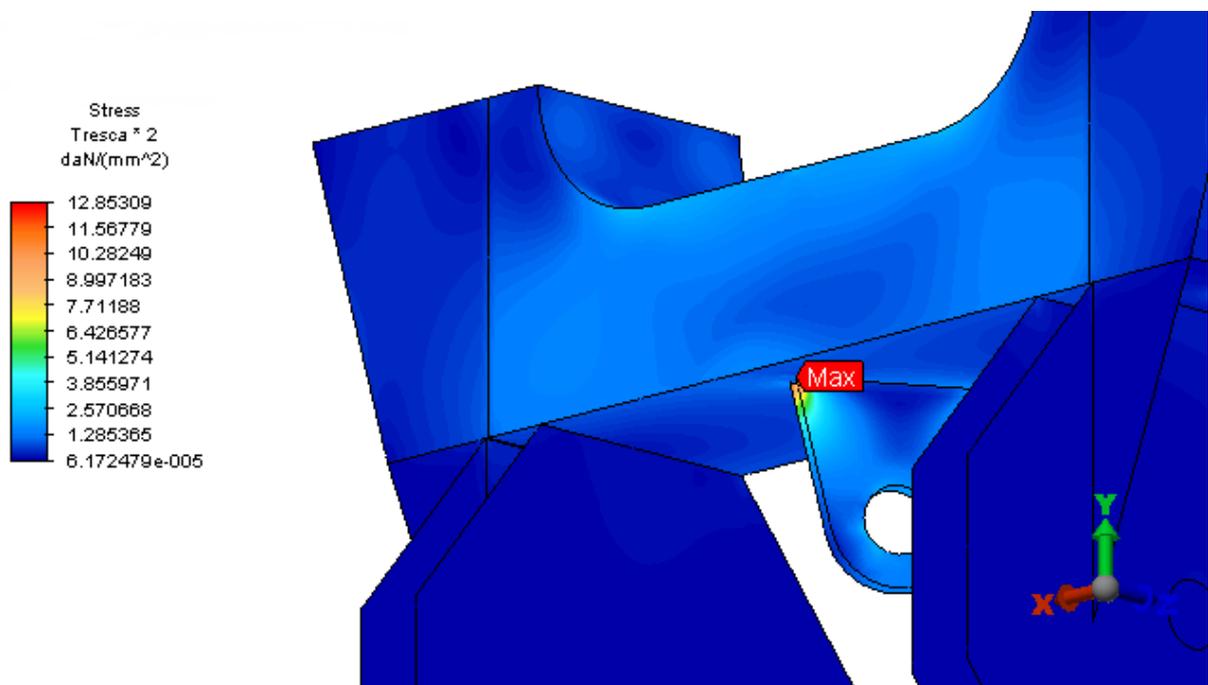


Figura 67 - Detalhe das tensões de membrana no modelo

Os valores máximos alcançados (12,9 daN/mm²) ocorreram próximo a junção do olhal com a chapa inferior, ficando abaixo do limite admissível de 23,4 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais.

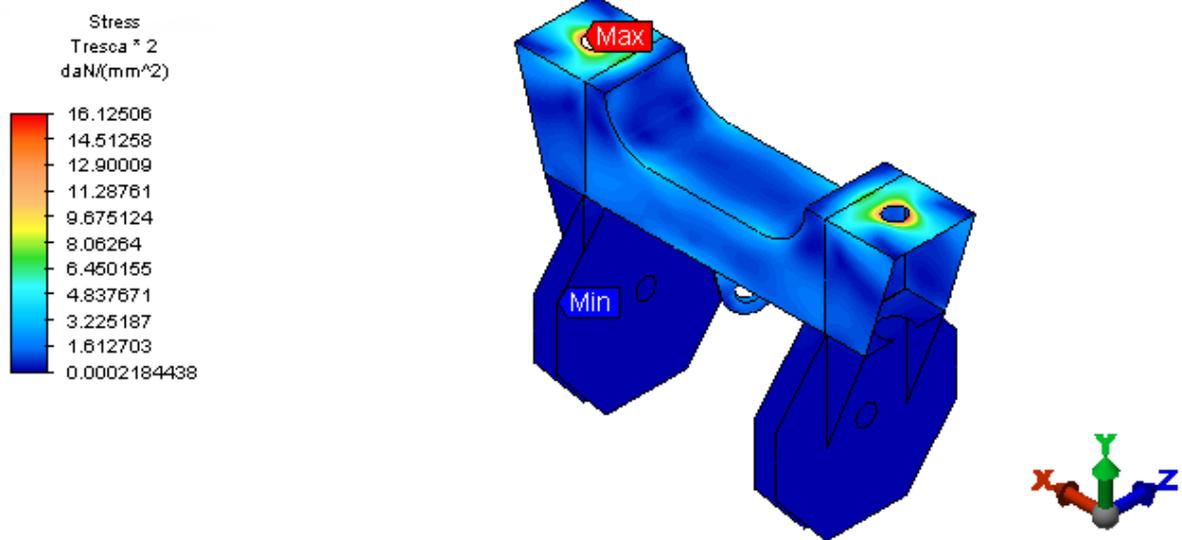


Figura 68 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

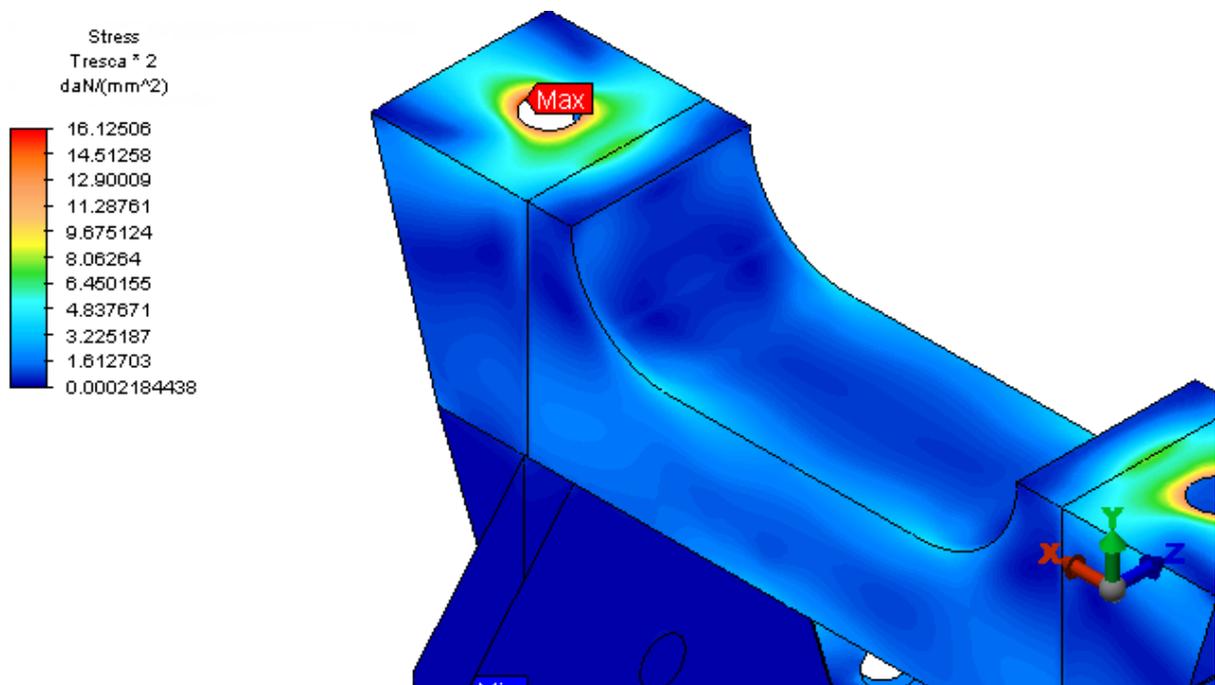


Figura 69 – Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (14,9 daN/mm²) ocorreram no apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm² para vida infinita. A seguir os resultados dos deslocamentos nodais no modelo.

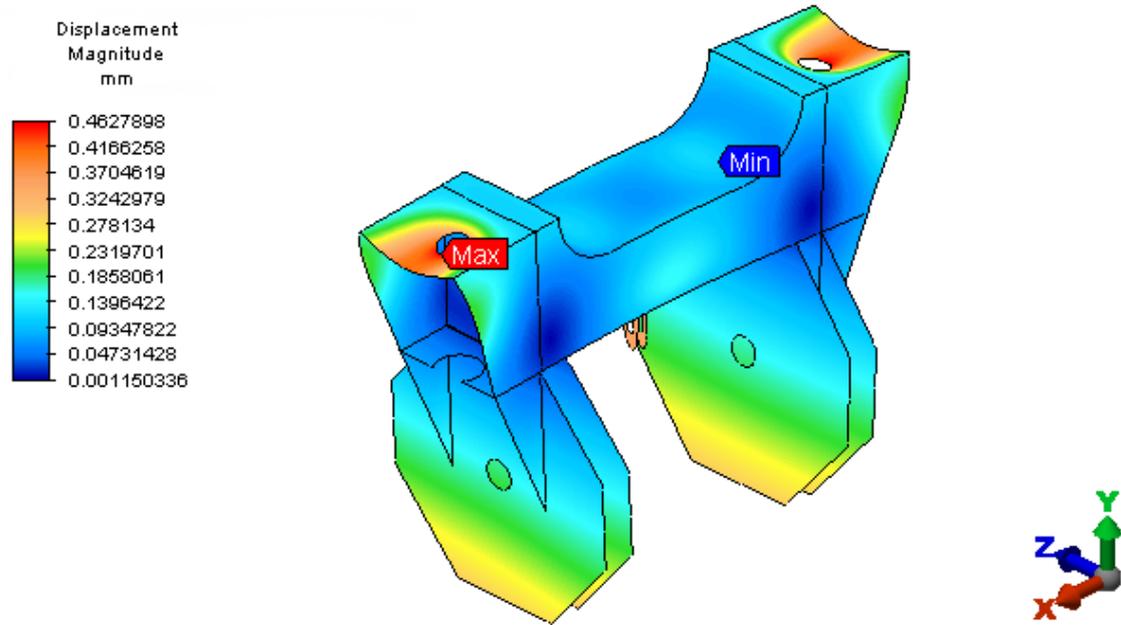


Figura 70 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 0,5 mm no local de apoio do pistão.

TRAVESSA - ASME

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da travessa do grab sob os esforços de peso próprio, pressão interna de 3 bar e carga de 4.484 daN referente a carga oriunda dos pistões.

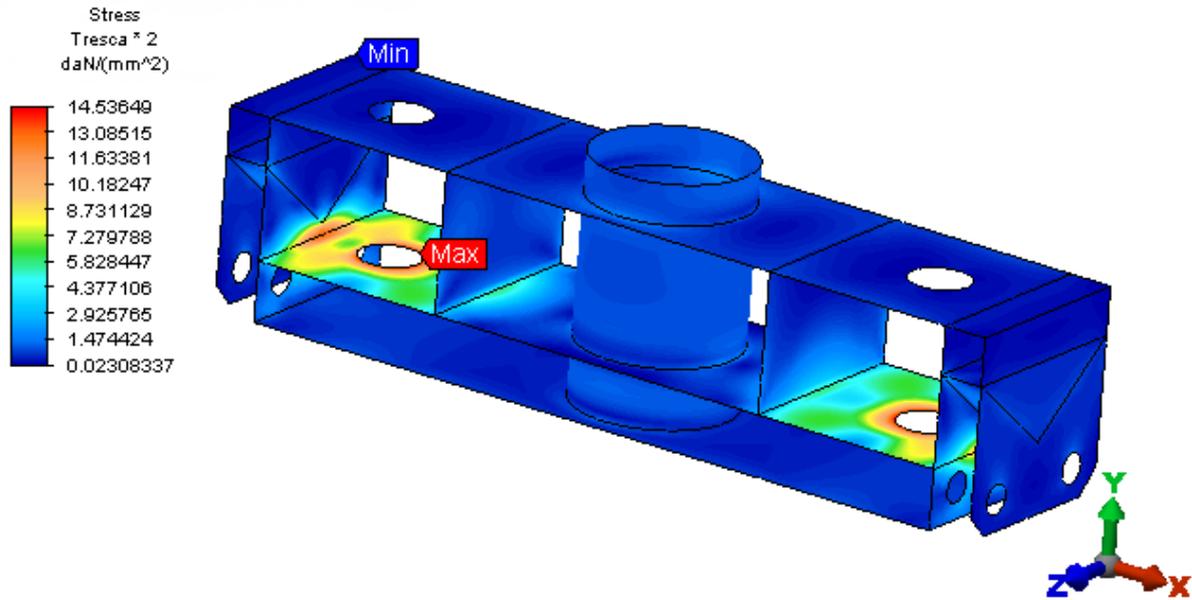


Figura 71 – Distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

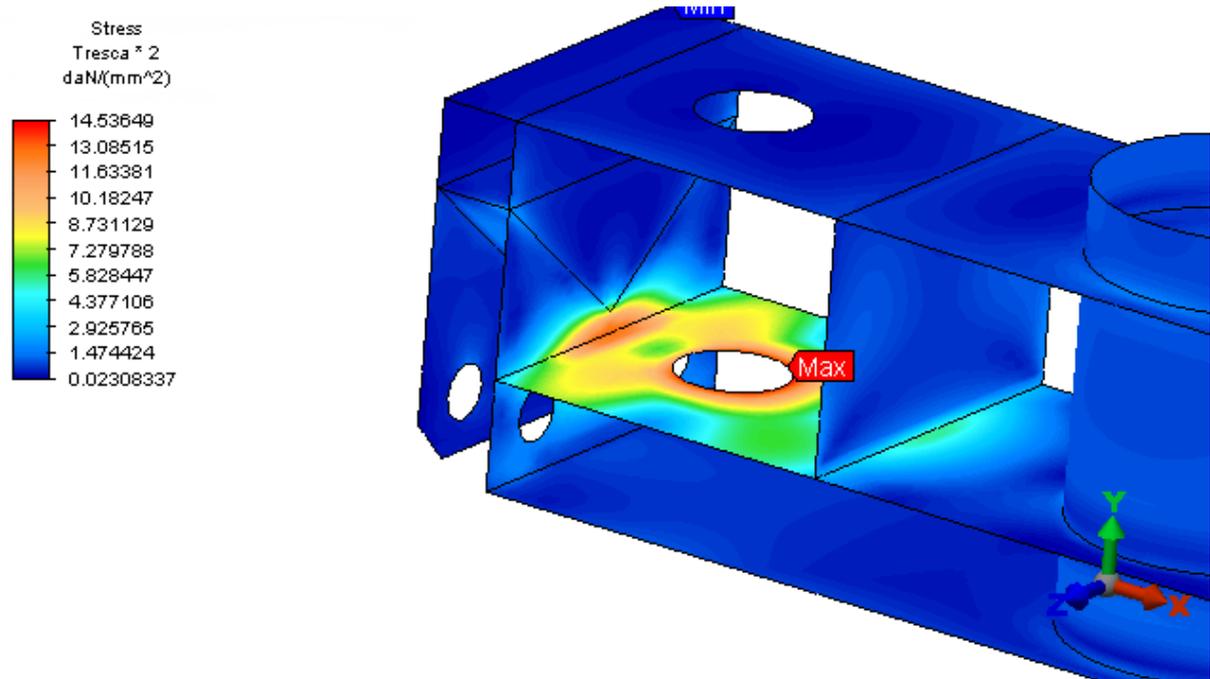


Figura 72 - Detalhe da distribuição das tensões de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados ($14,6 \text{ daN/mm}^2$) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de $35,0 \text{ daN/mm}^2$. A seguir os resultados de tensão de flexão no modelo.

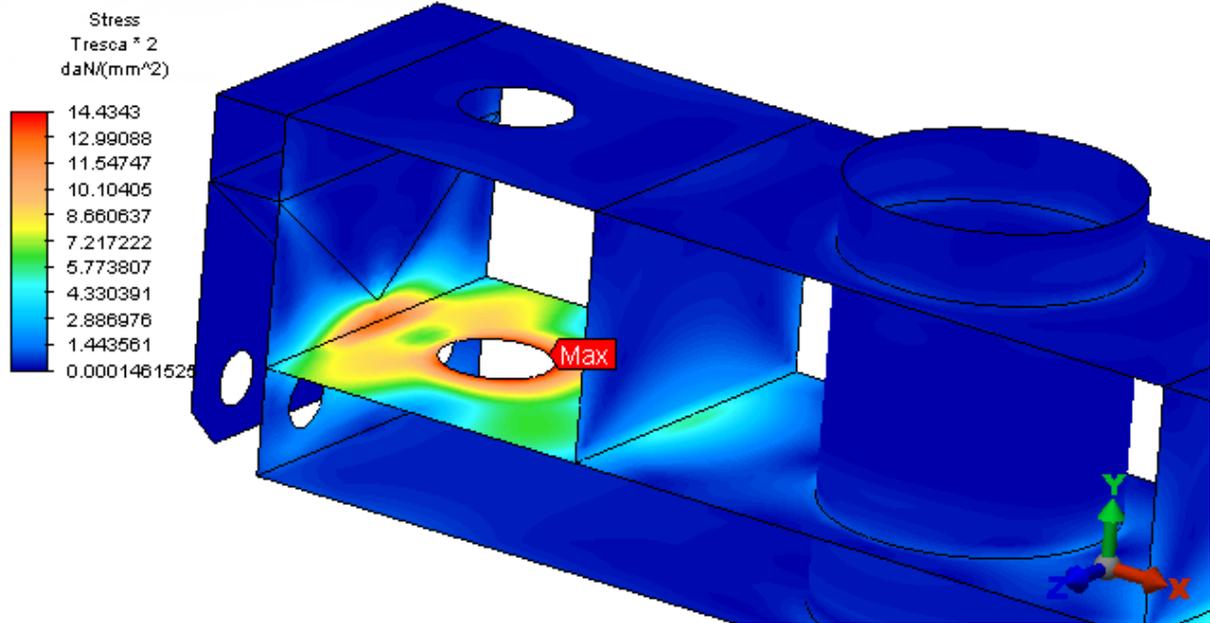


Figura 73 - Distribuição das tensões de flexão no modelo (daN/mm^2)

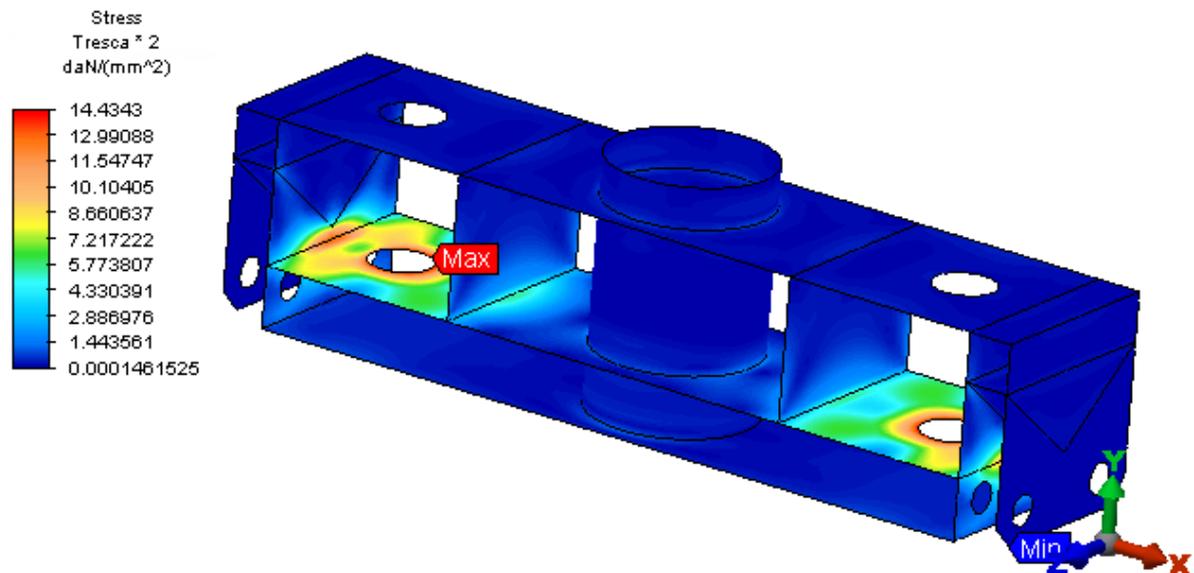


Figura 74 - Detalhe das tensões de flexão no modelo

Os valores máximos alcançados ($14,5 \text{ daN/mm}^2$) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de $35,0 \text{ daN/mm}^2$. A seguir os resultados das tensões de membrana no modelo.

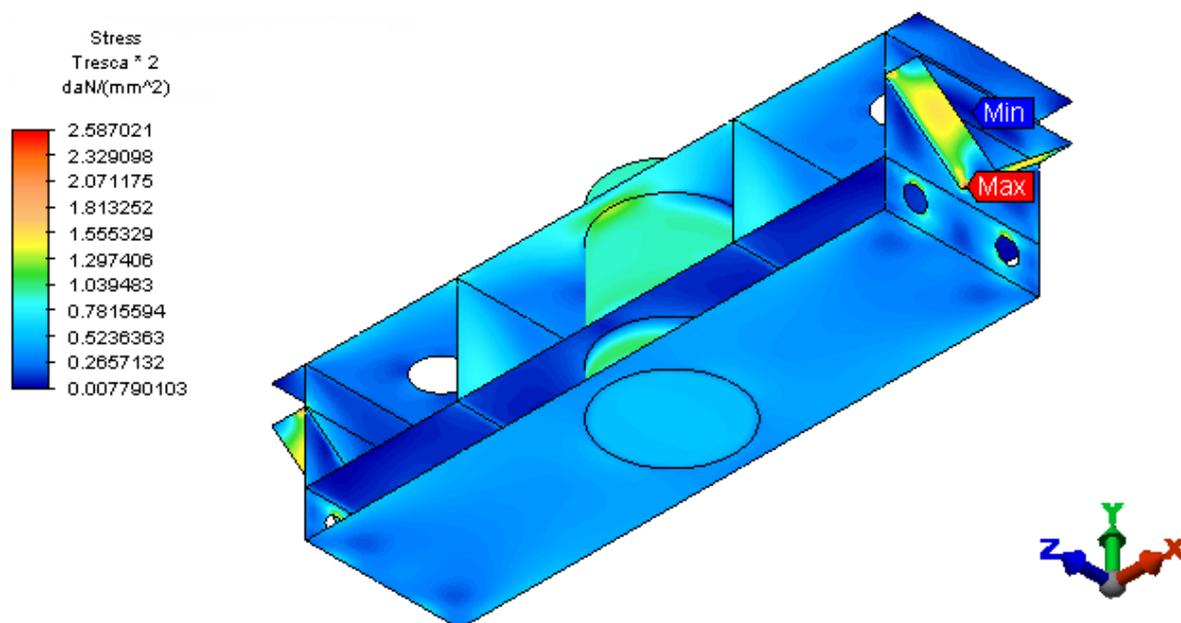


Figura 75 - Distribuição das tensões de membrana no modelo (daN/mm²)

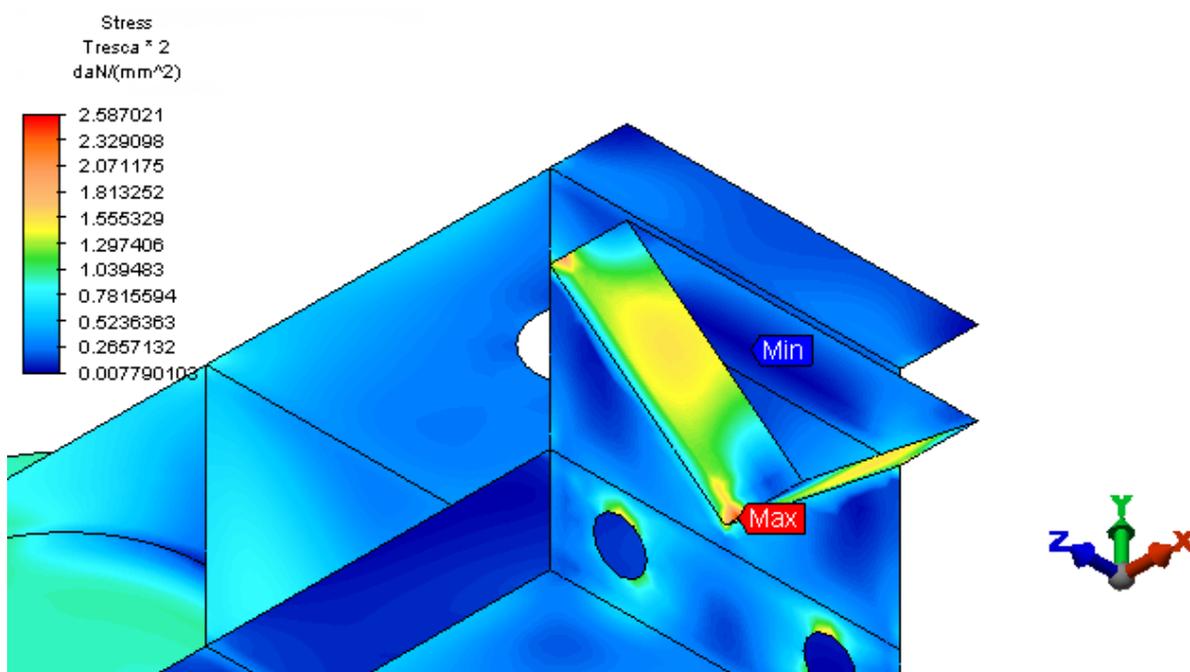


Figura 76 - Detalhe das tensões de membrana no modelo

Os valores máximos alcançados (2,6 daN/mm²) ocorreram na região protetora da engrenagem, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais.

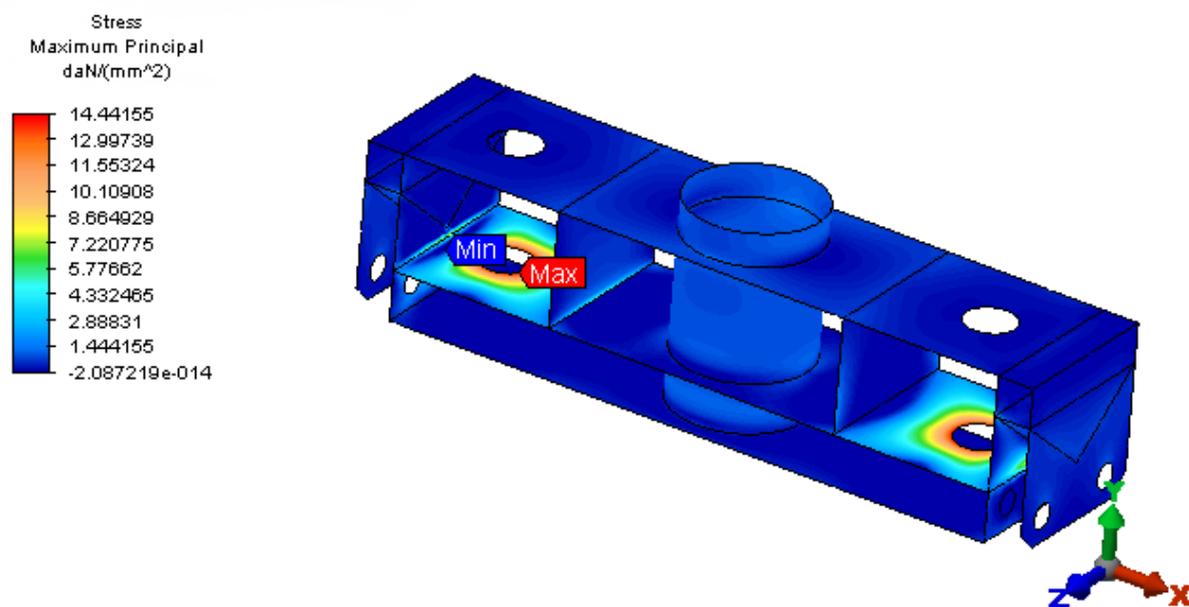


Figura 77 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

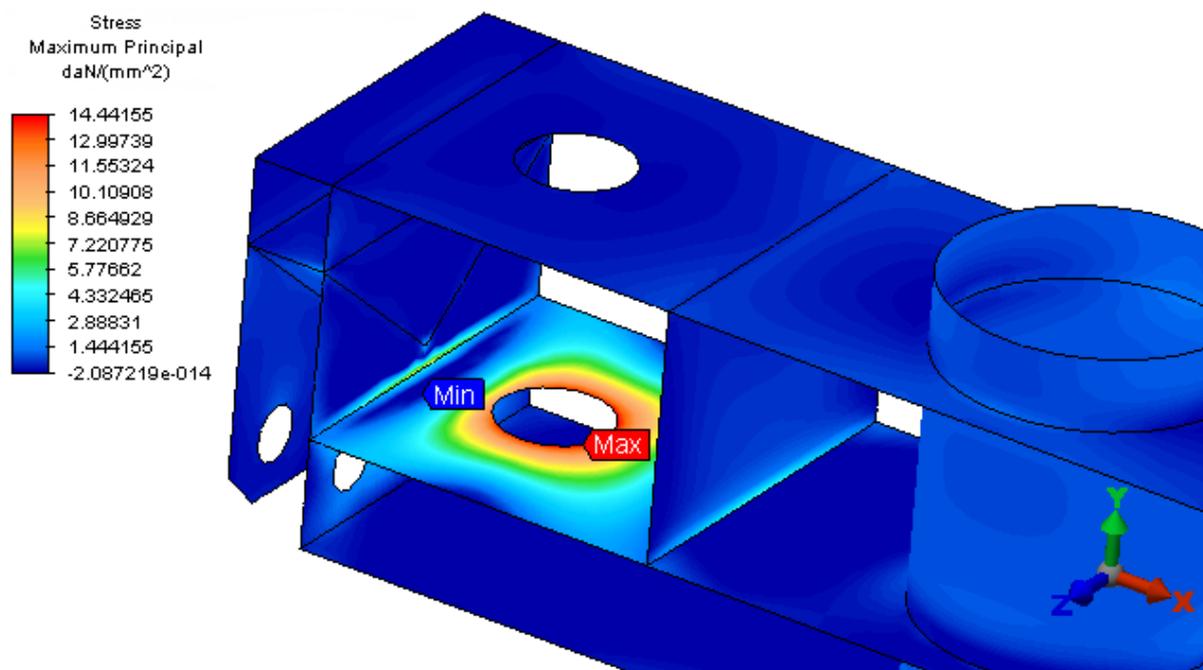


Figura 78 – Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (14,5 daN/mm²) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 19,5 daN/mm² para vida infinita. A seguir os resultados dos deslocamentos nodais no modelo.

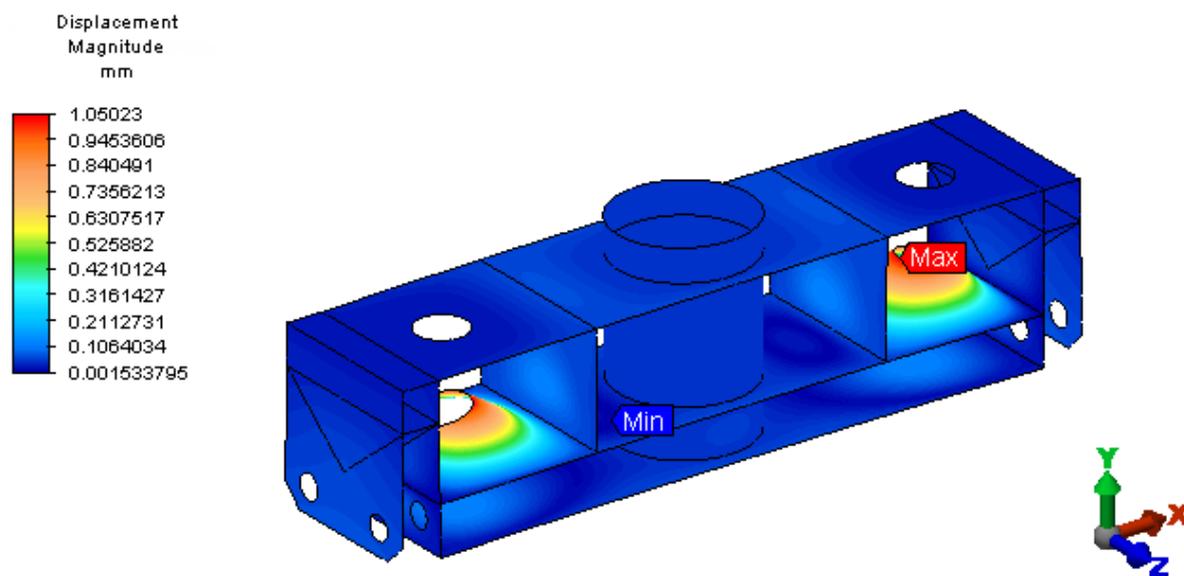


Figura 79 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 1,1 mm no local de apoio do pistão.

HASTE- NBR 8400

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da haste do grab sob os esforços de peso próprio e carga de 7.383 daN referente a carga oriunda da concha.

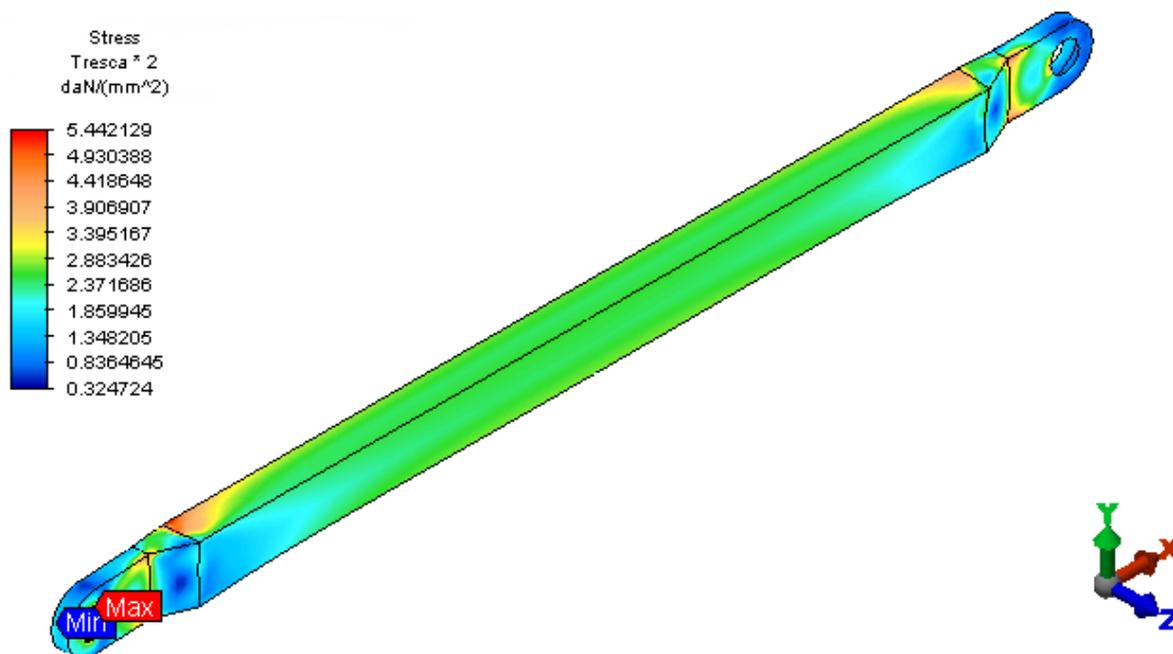


Figura 80 – Distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

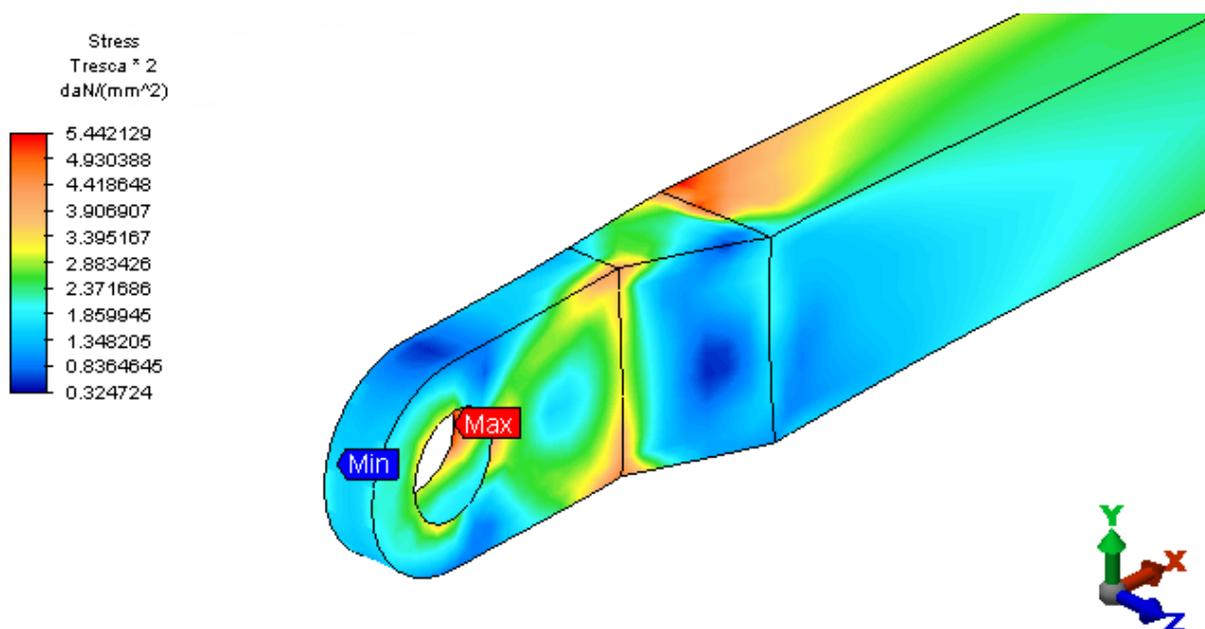


Figura 81 - Detalhe da distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados (5,5 daN/mm²) ocorreram próximo a junção do olhal com o corpo da haste, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais no modelo.

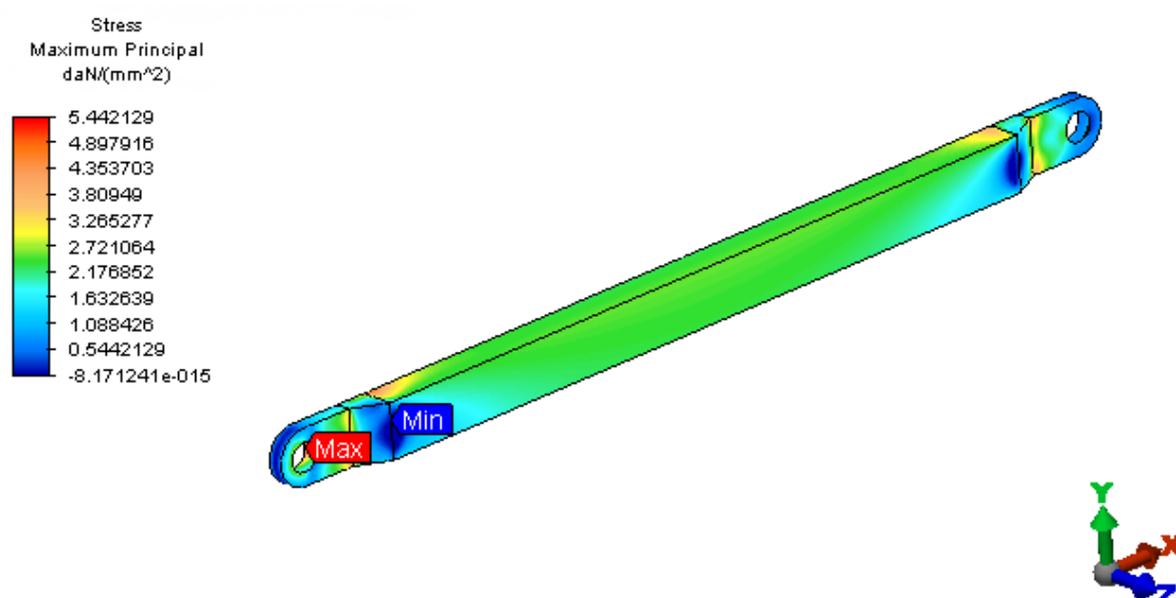


Figura 82 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

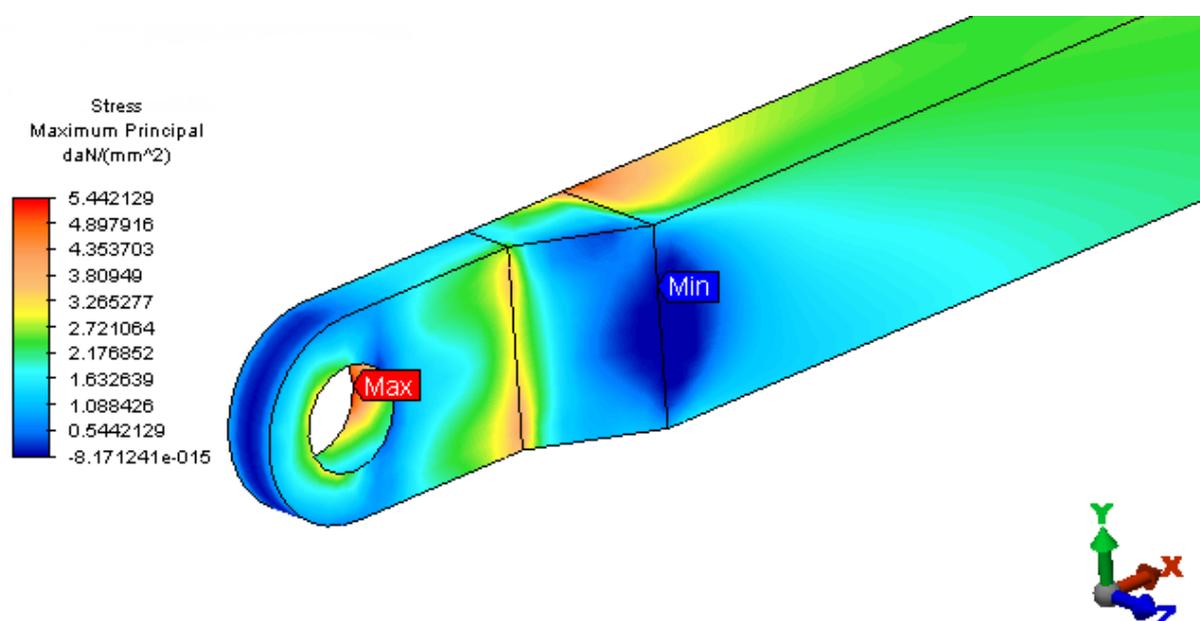


Figura 83 - Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (5,5 daN/mm²) ocorreram próximo a região do furo do olhal, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões mínimas principais no modelo.

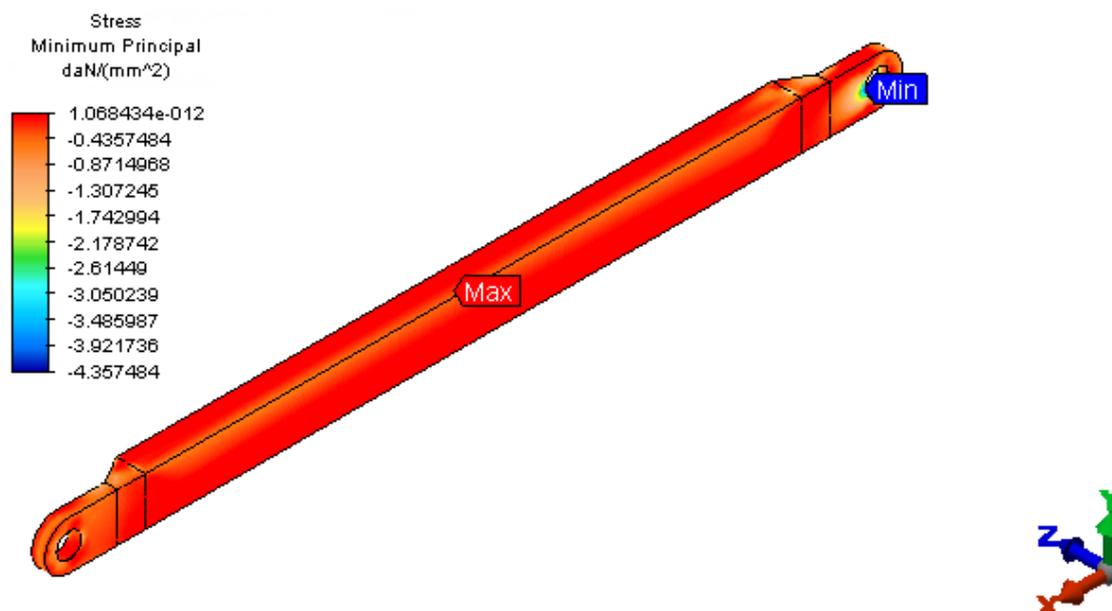


Figura 84 - Distribuição das tensões mínimas principais no modelo (daN/mm²)

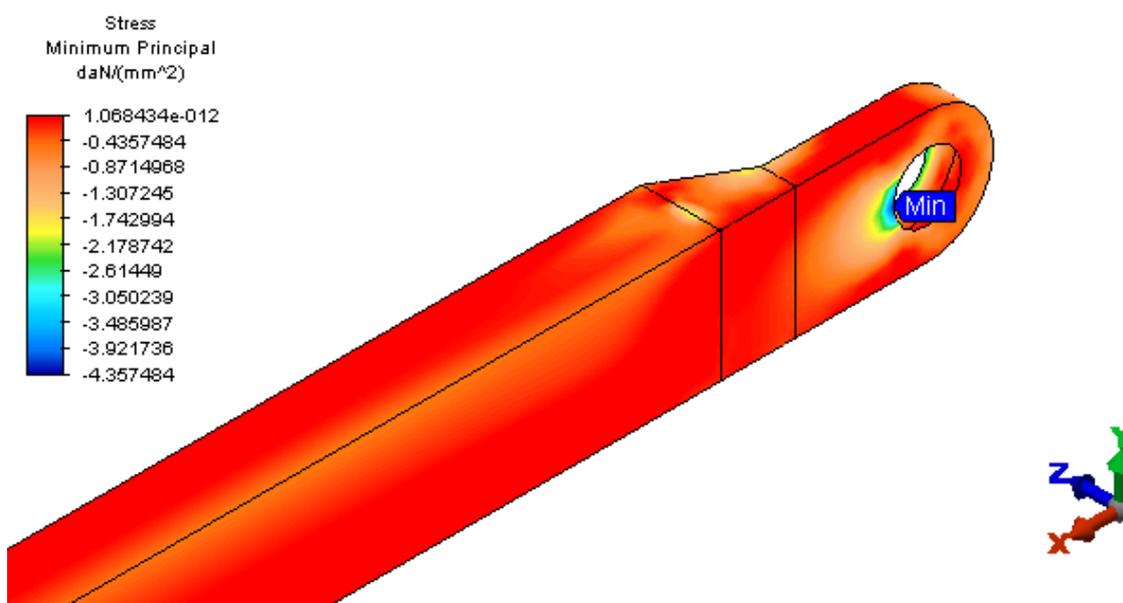


Figura 85 - Detalhe das tensões mínimas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (4,4 daN/mm²) ocorreram próximo a região do furo do olhal, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados dos deslocamentos.

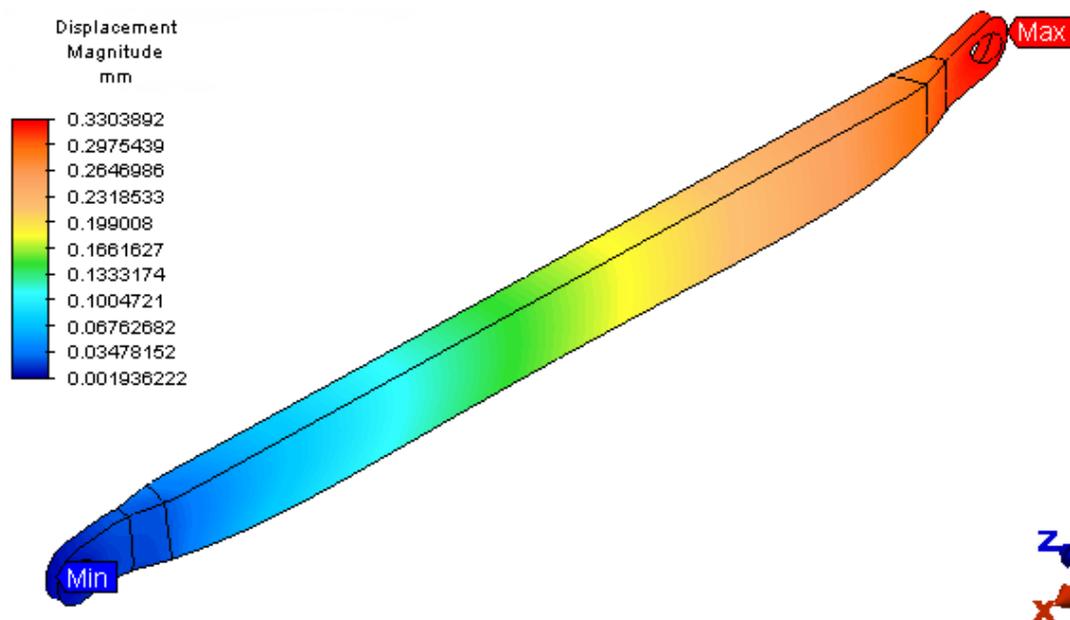


Figura 86 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 0,4 mm na extremidade da haste.

CABEÇA DA GARRA – NBR 8400

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da cabeça da garra sob os esforços de peso próprio e carga axial em cada pino de 7.383 daN referente a carga oriunda das hastes.

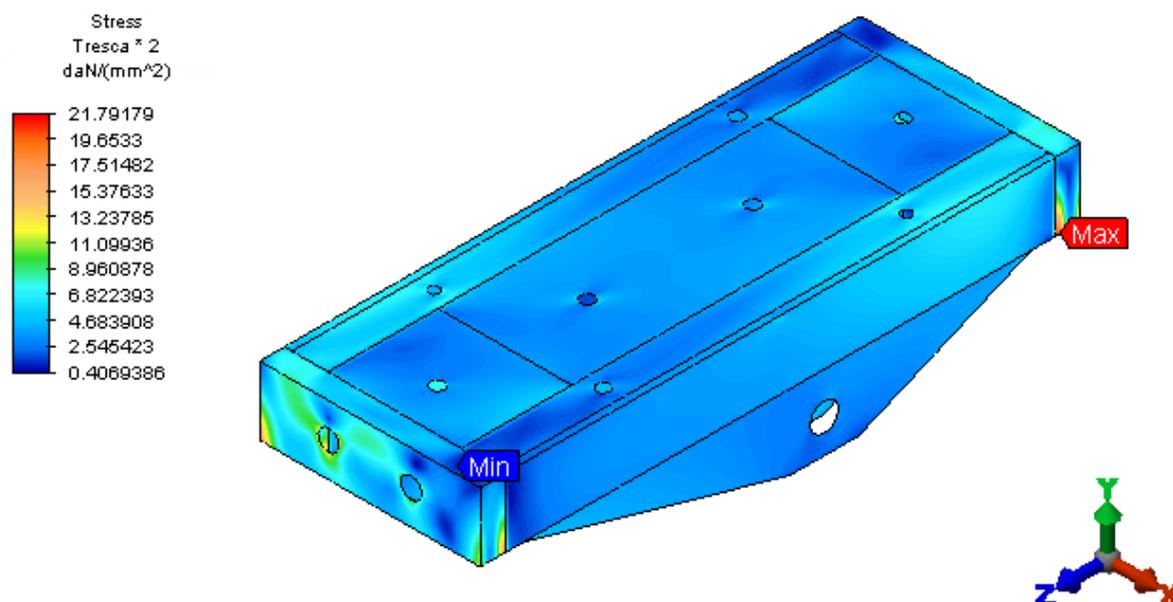


Figura 87 – Distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

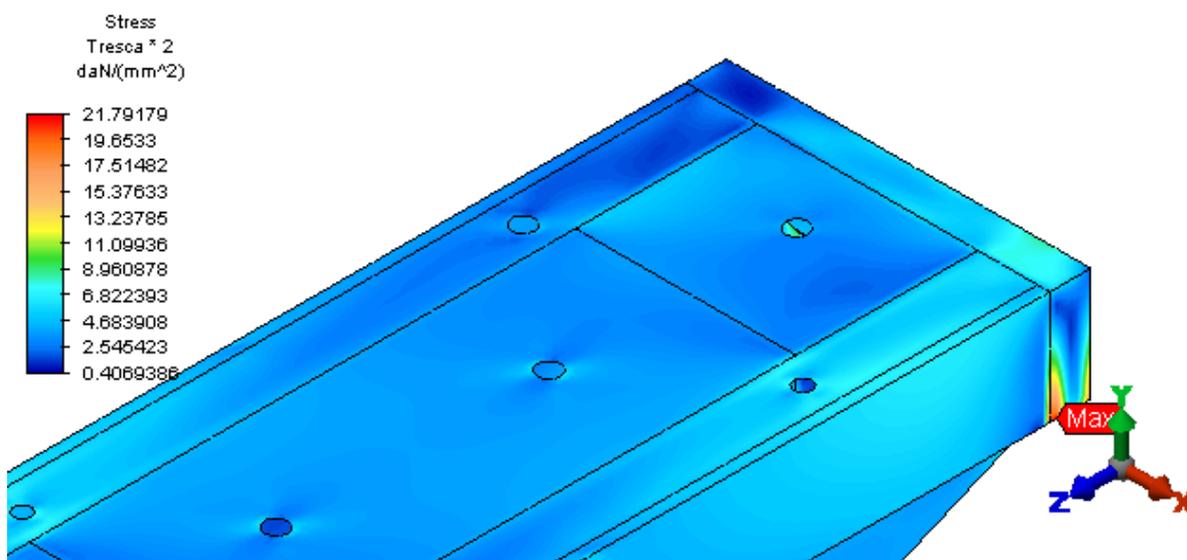


Figura 88 - Detalhe da distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados (21,8 daN/mm²) ocorreram nas chapas de contorno da cabeça, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais no modelo.

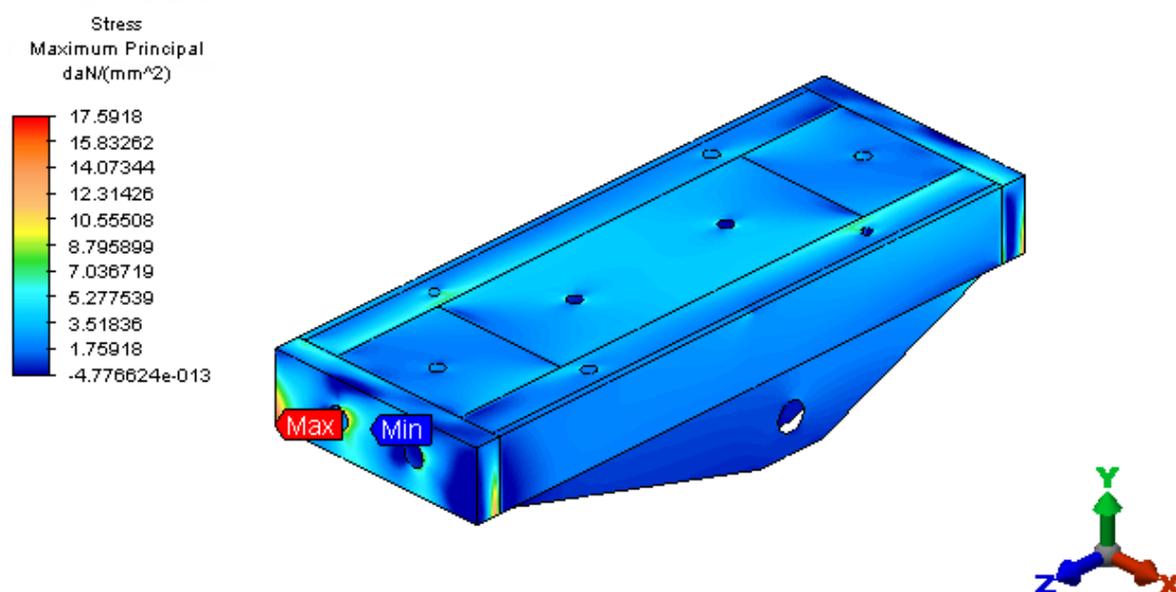


Figura 89 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

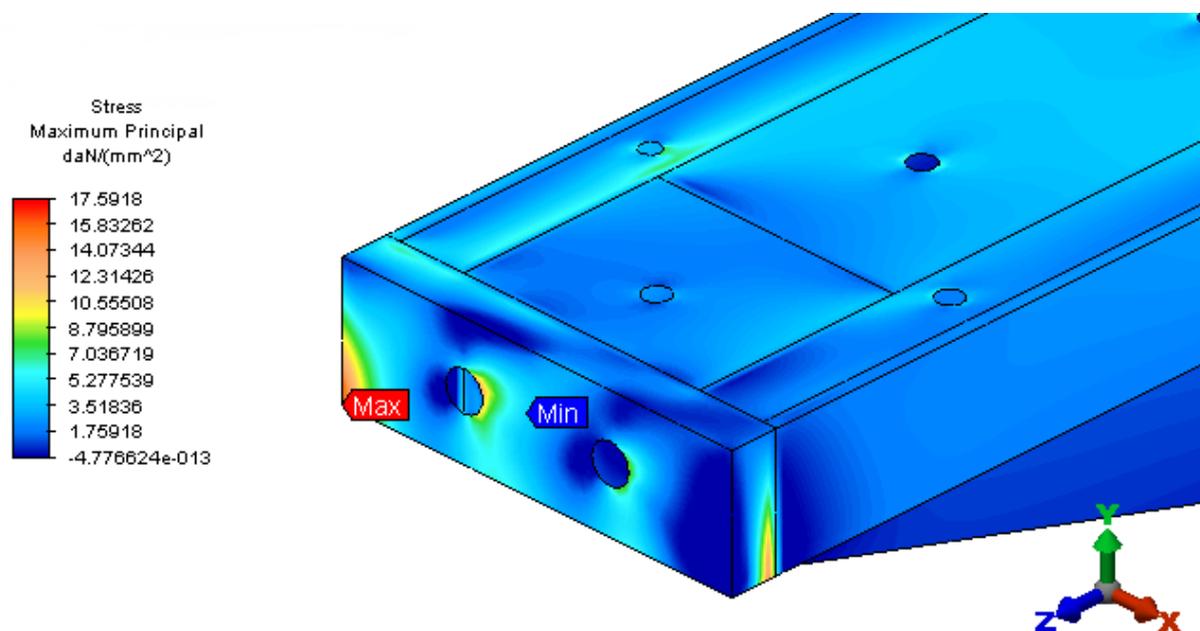


Figura 90 - Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (17,6 daN/mm²) ocorreram nas chapas de contorno da cabeça, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões mínimas principais no modelo.

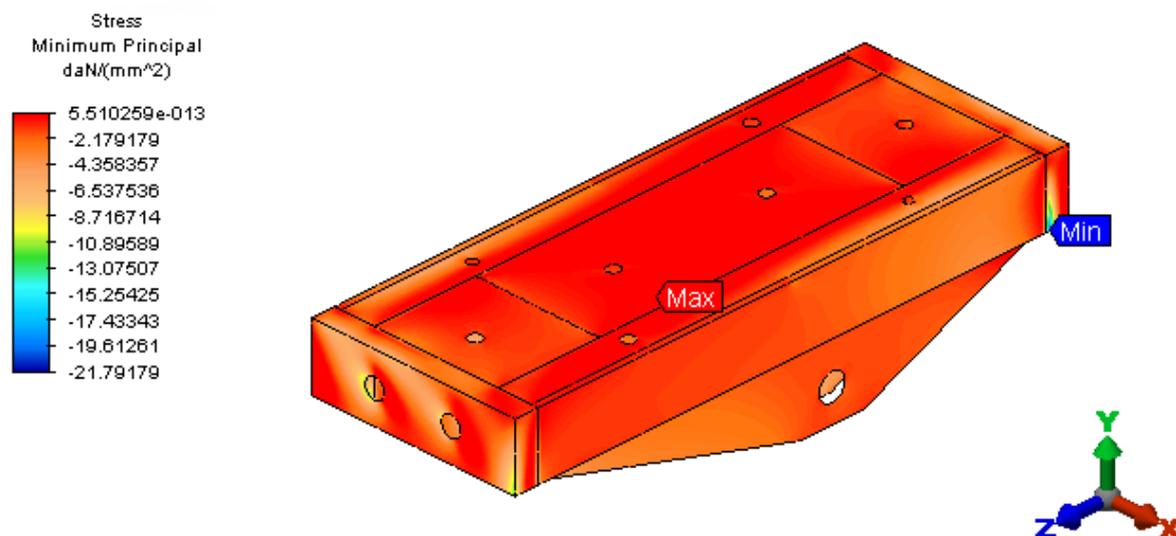


Figura 91 - Distribuição das tensões mínimas principais no modelo (daN/mm²)

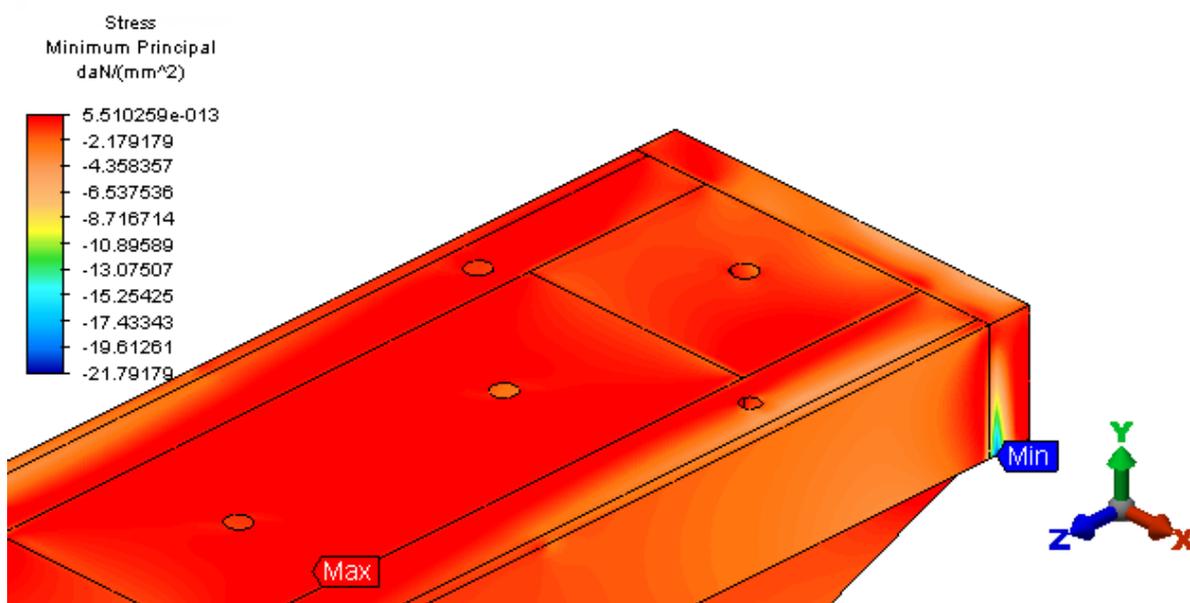


Figura 92 - Detalhe das tensões mínimas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (21,8 daN/mm²) ocorreram nas chapas de contorno da cabeça, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados dos deslocamentos.

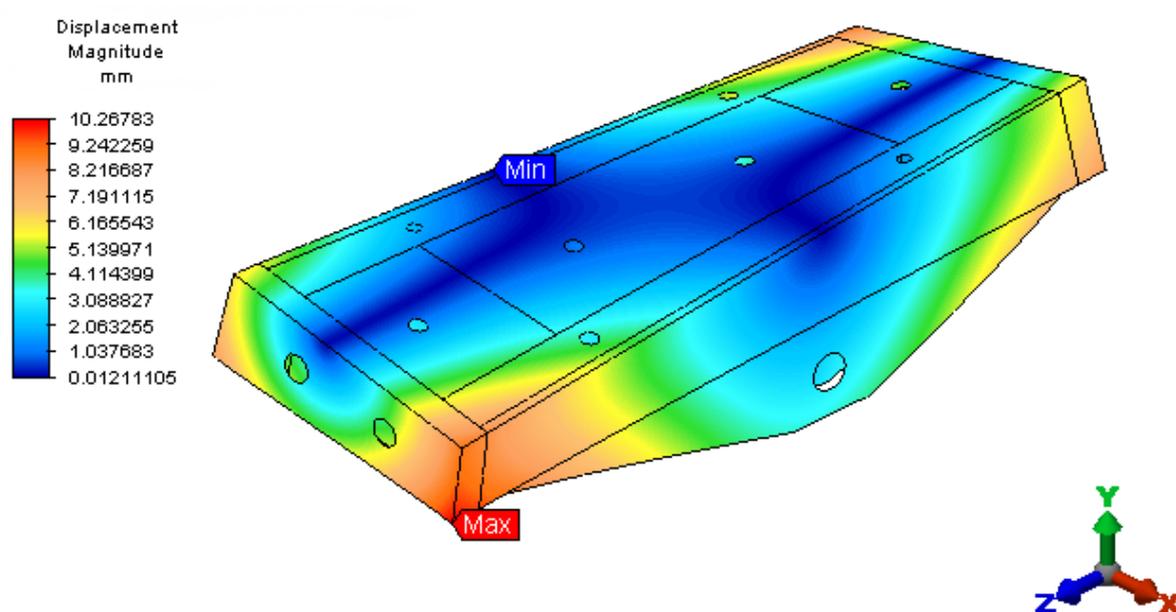
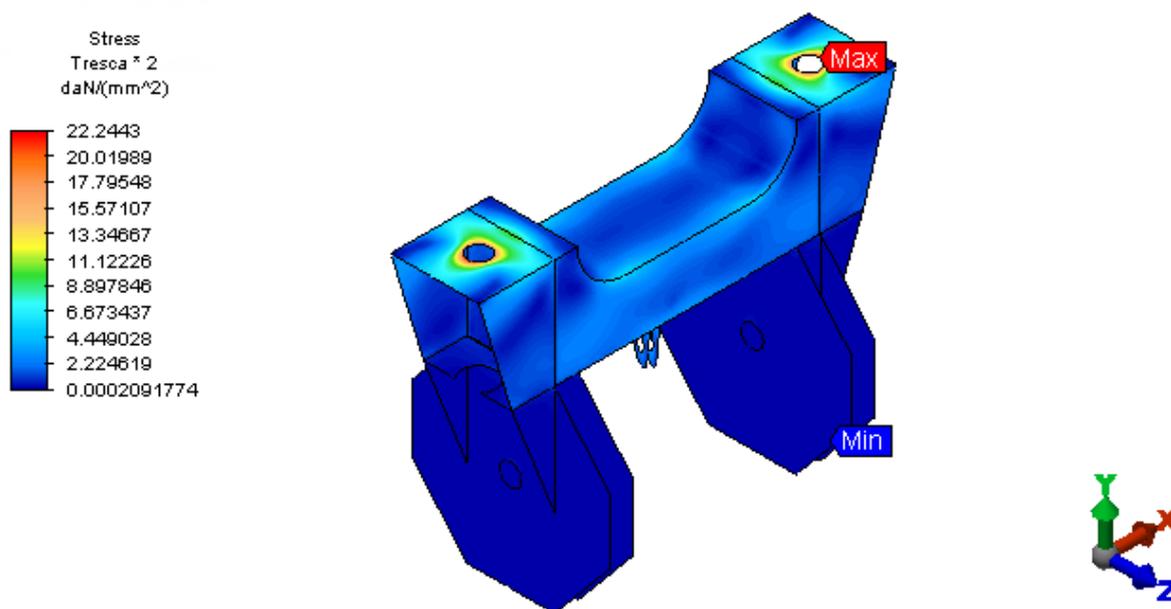
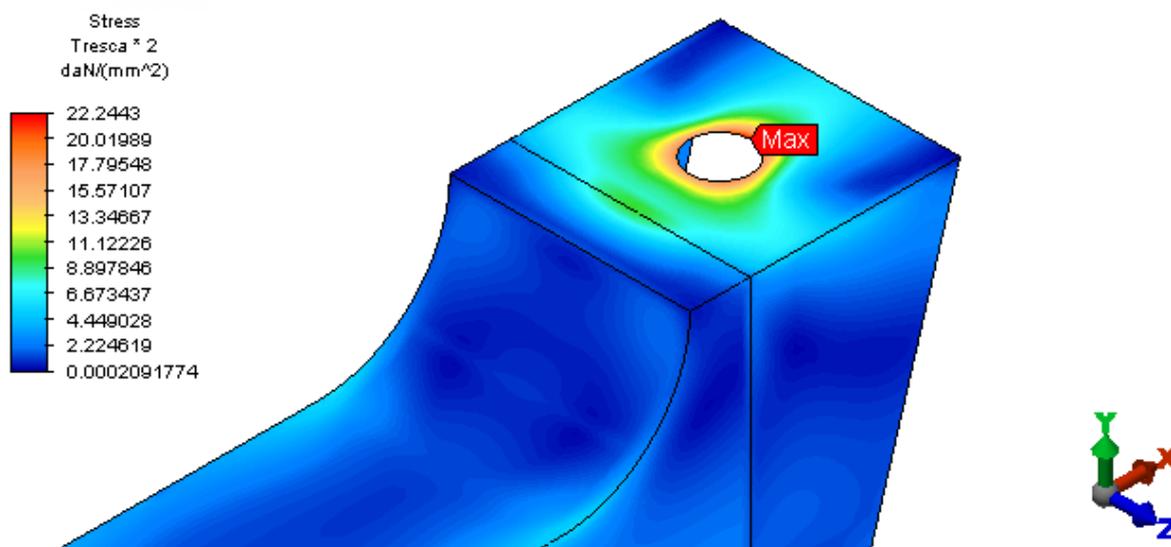


Figura 93 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 10,3 mm na extremidade da cabeça.

BLOCO DE COMANDO – NBR 8400

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, no bloco de comando do grab sob os esforços de peso próprio, carga vertical de 6.188 daN em cada apoio do pistão e carga vertical de 13.952 daN no olhal referente a carga oriunda dos pistões e do balancim.

Figura 94 – Distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)Figura 95 - Detalhe da distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados (22,3 daN/mm²) ocorreram na chapa de apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais no modelo.

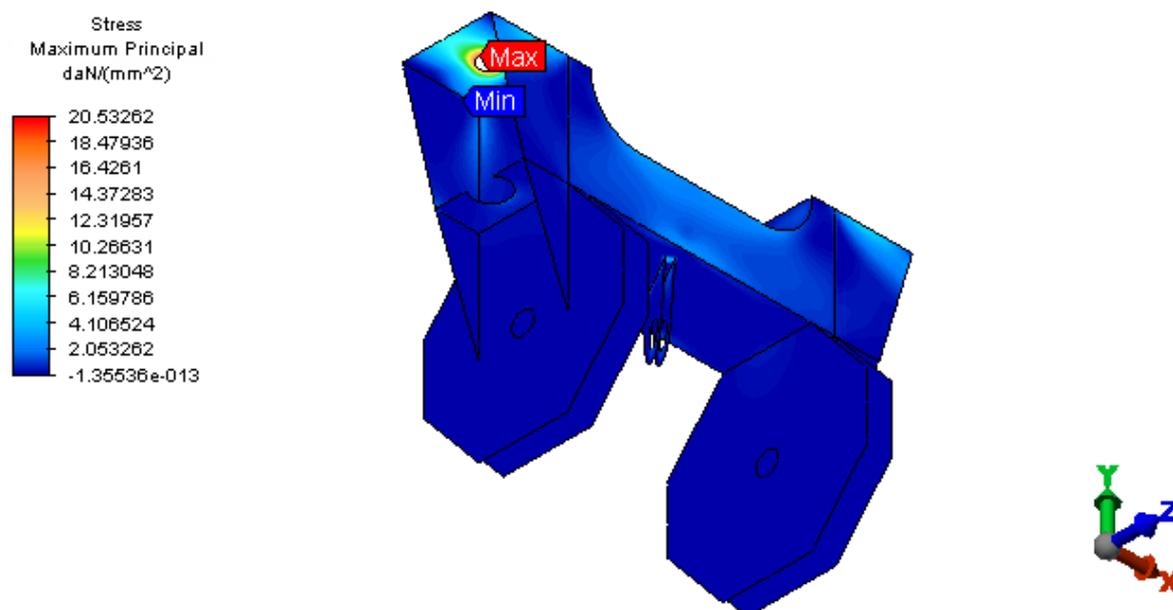


Figura 96 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

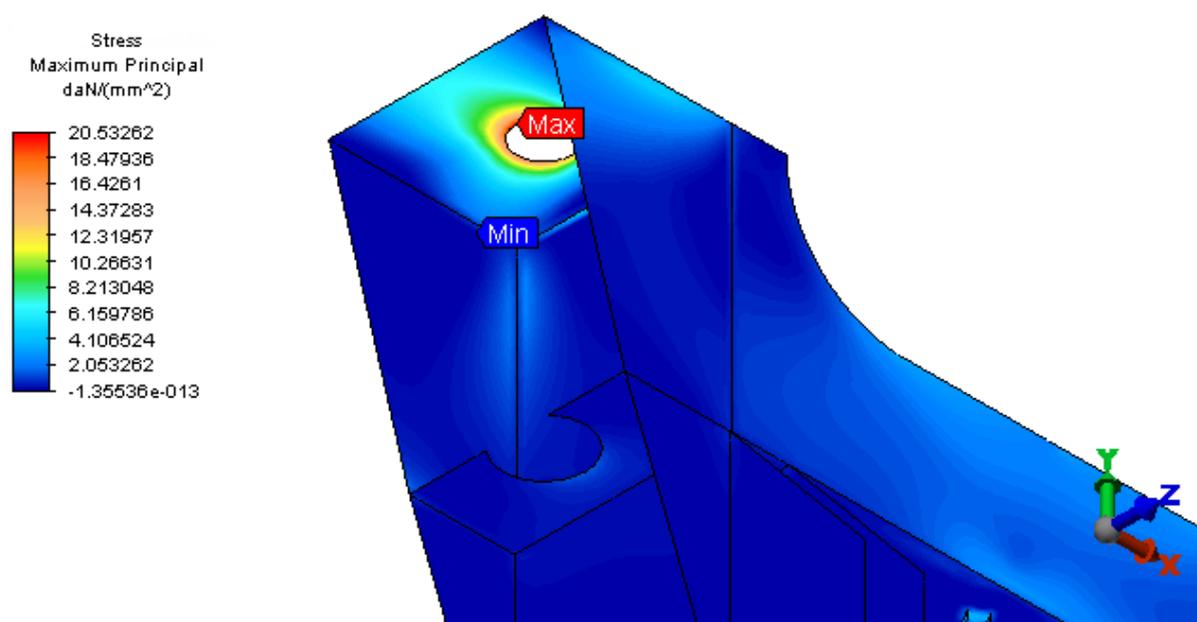


Figura 97 - Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados ($20,6 \text{ daN/mm}^2$) ocorreram na chapa de apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de $23,3 \text{ daN/mm}^2$. A seguir os resultados das tensões mínimas principais no modelo.

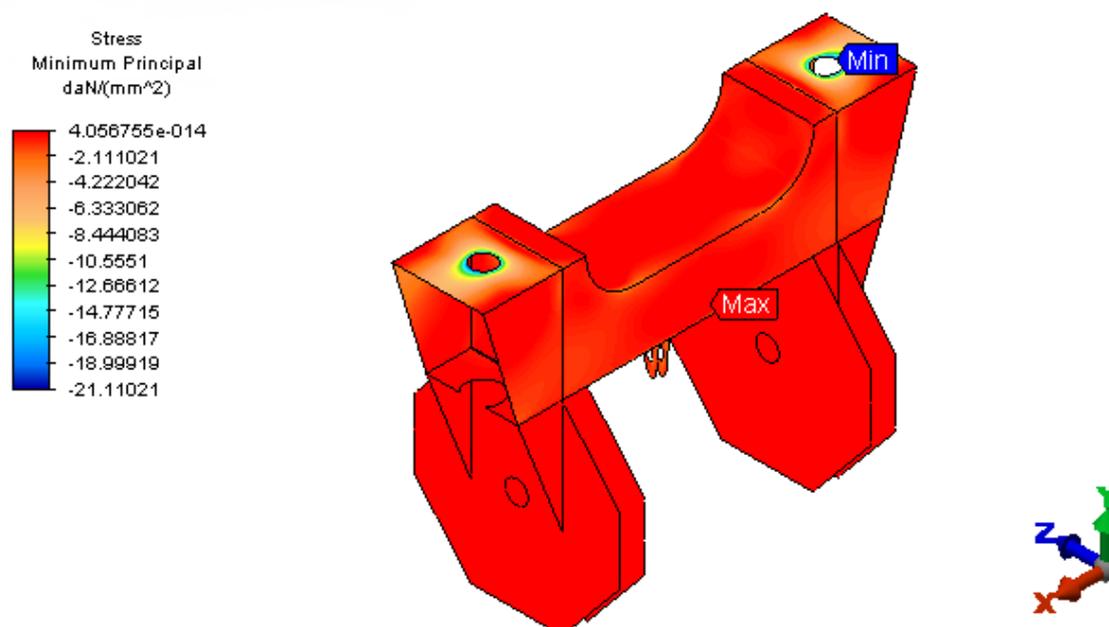


Figura 98 - Distribuição das tensões mínimas principais no modelo (daN/mm²)

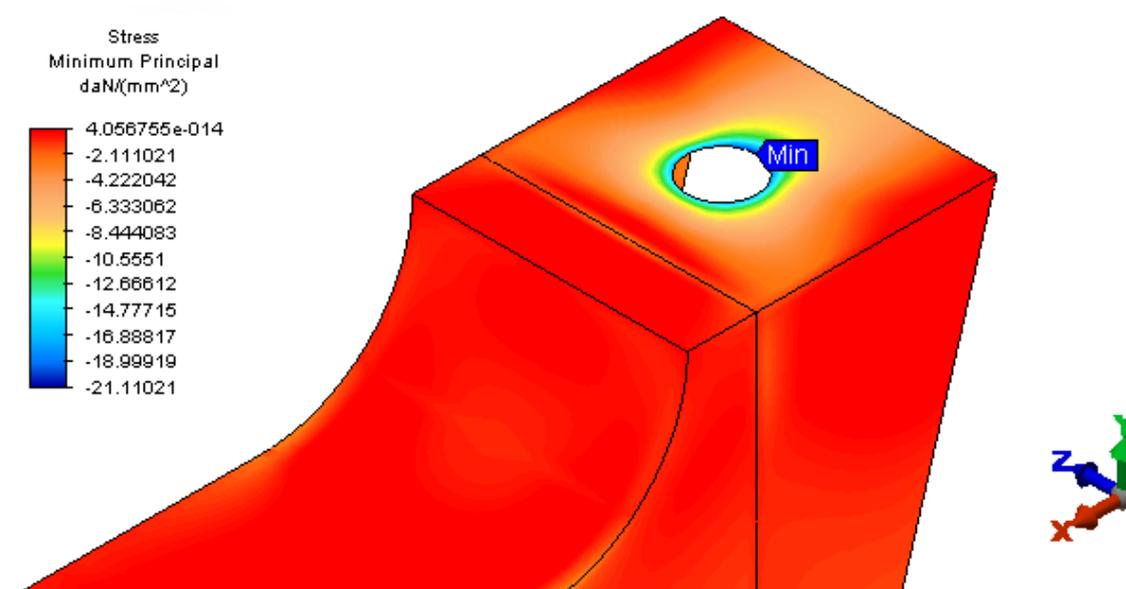


Figura 99 - Detalhe das tensões mínimas principais no modelo

Os valores máximos alcançados ($21,2 \text{ daN/mm}^2$) ocorreram na chapa de apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de $23,3 \text{ daN/mm}^2$. A seguir os resultados dos deslocamentos.

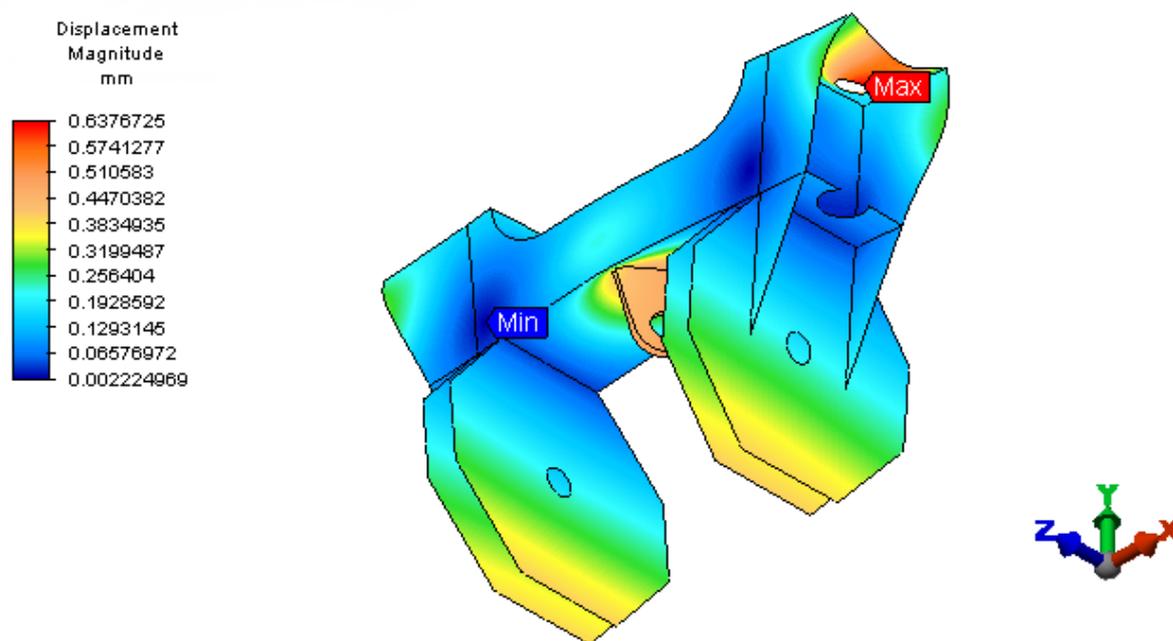


Figura 100 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 0,7 mm no local de apoio do pistão.

TRAVESSA – NBR 8400

A seguir, apresenta-se a distribuição das tensões combinadas de Tresca, da travessa do grab sob os esforços de peso próprio, pressão interna de 3 bar e carga de 6.188 daN referente a carga oriunda dos pistões.

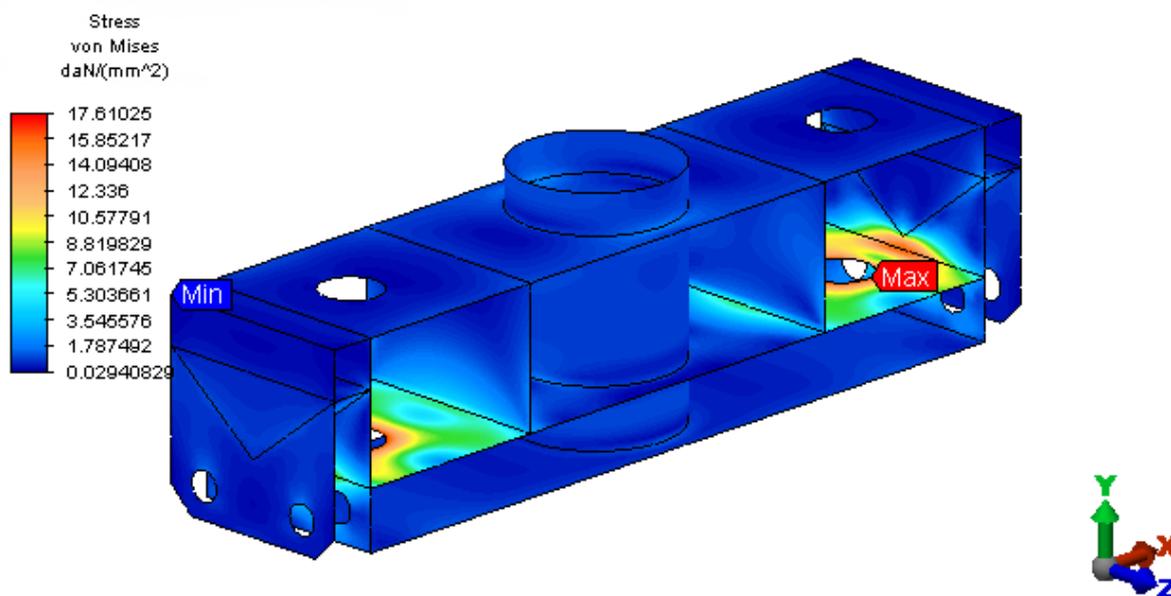


Figura 101 – Distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

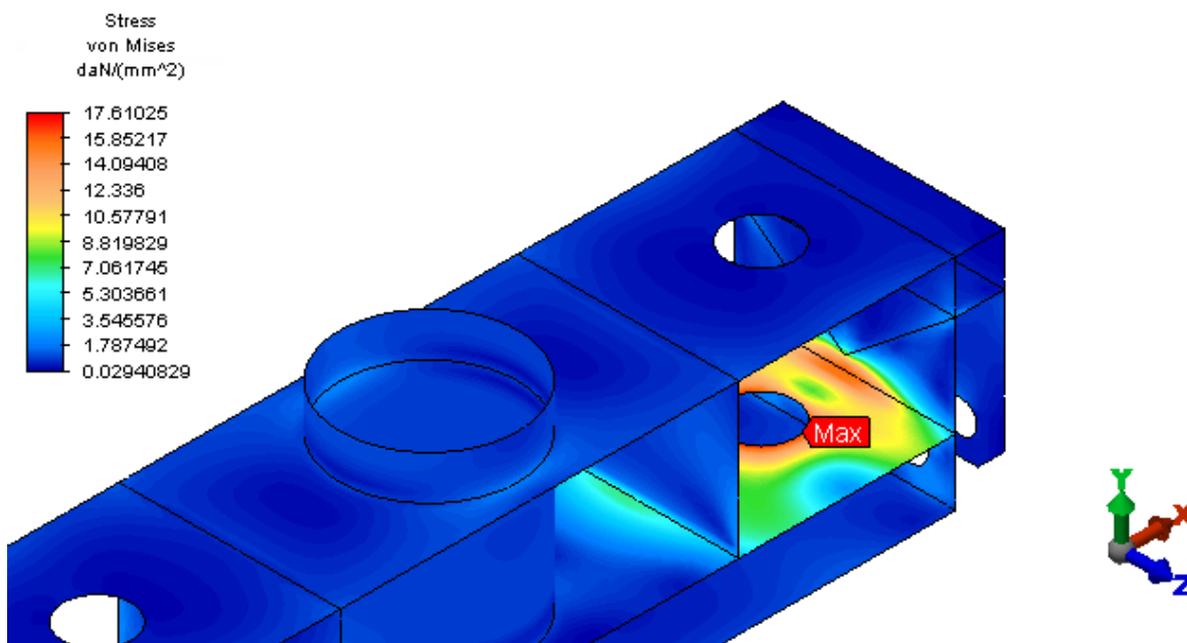


Figura 102 - Detalhe da distribuição das tensões combinadas de Tresca (daN/mm²)

Os valores máximos alcançados (17,7 daN/mm²) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões máximas principais no modelo.

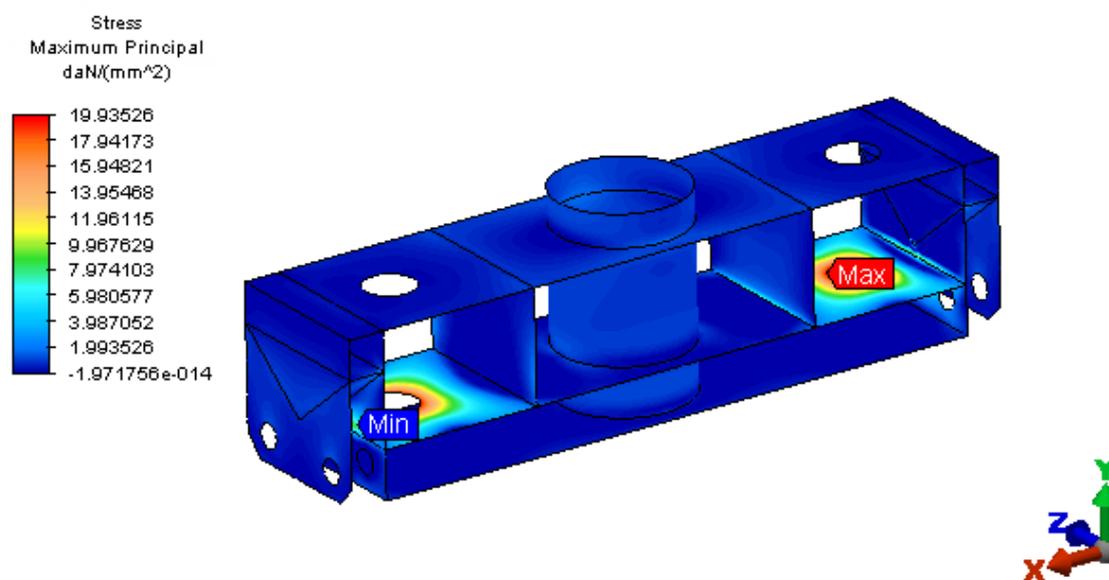


Figura 103 - Distribuição das tensões máximas principais no modelo (daN/mm²)

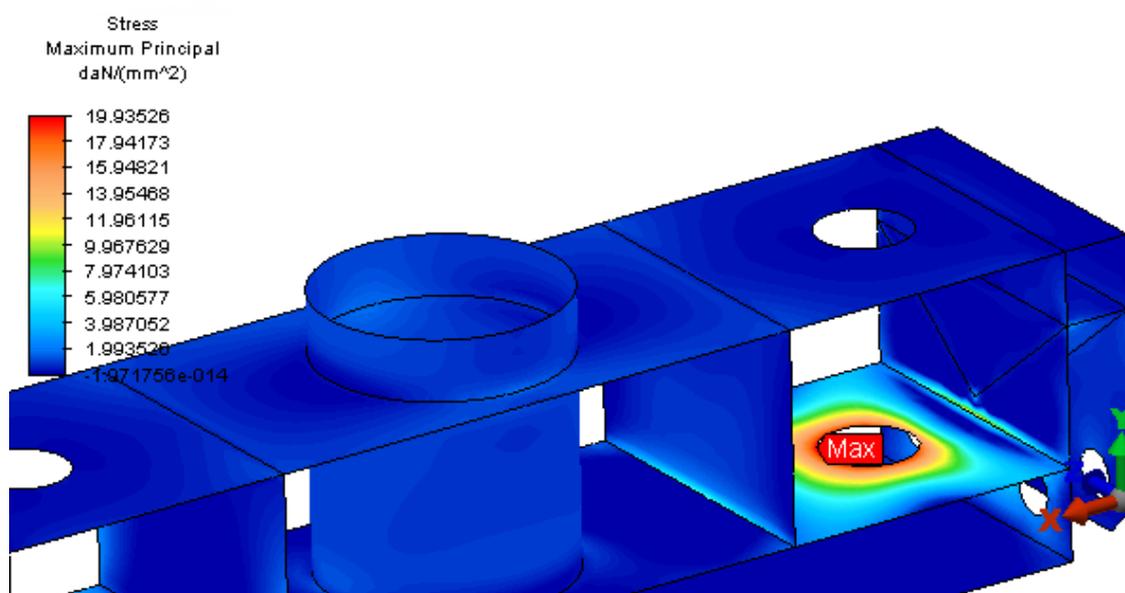


Figura 104 - Detalhe das tensões máximas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (20,0 daN/mm²) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados das tensões mínimas principais no modelo.

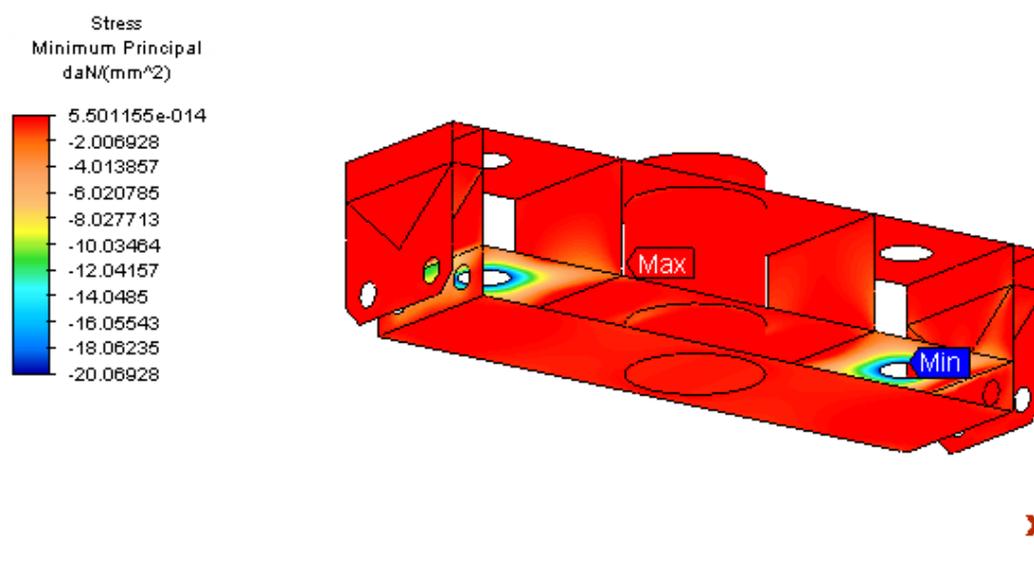


Figura 105 - Distribuição das tensões mínimas principais no modelo (daN/mm²)

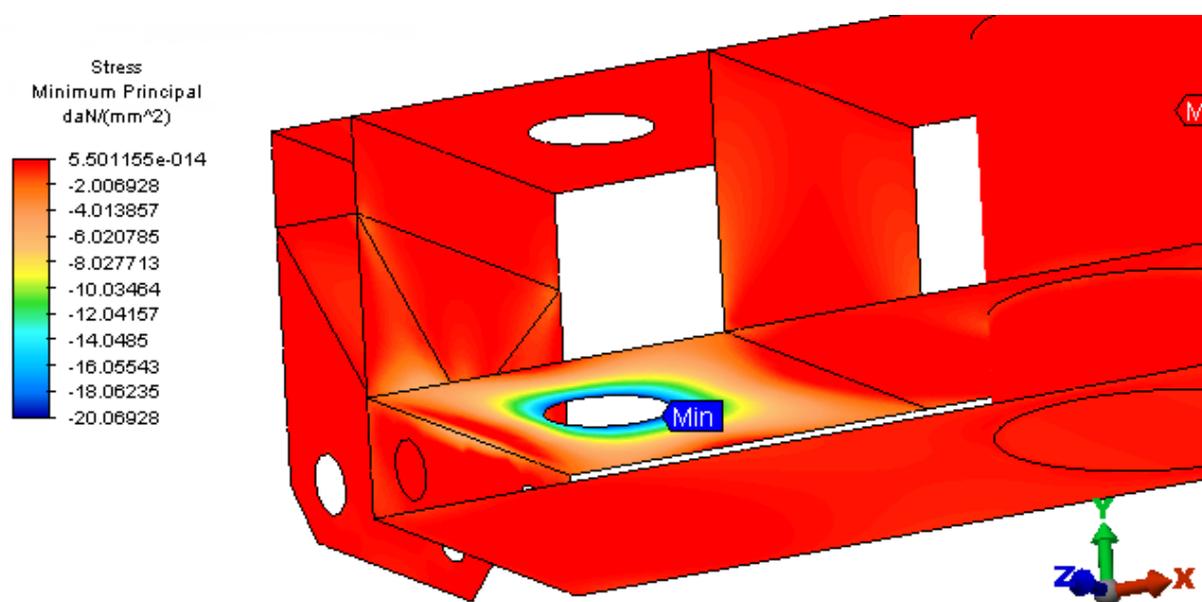


Figura 106 - Detalhe das tensões mínimas principais no modelo

Os valores máximos alcançados (20,1 daN/mm²) ocorreram no local do apoio do pistão, ficando abaixo do limite admissível de 23,3 daN/mm². A seguir os resultados dos deslocamentos.

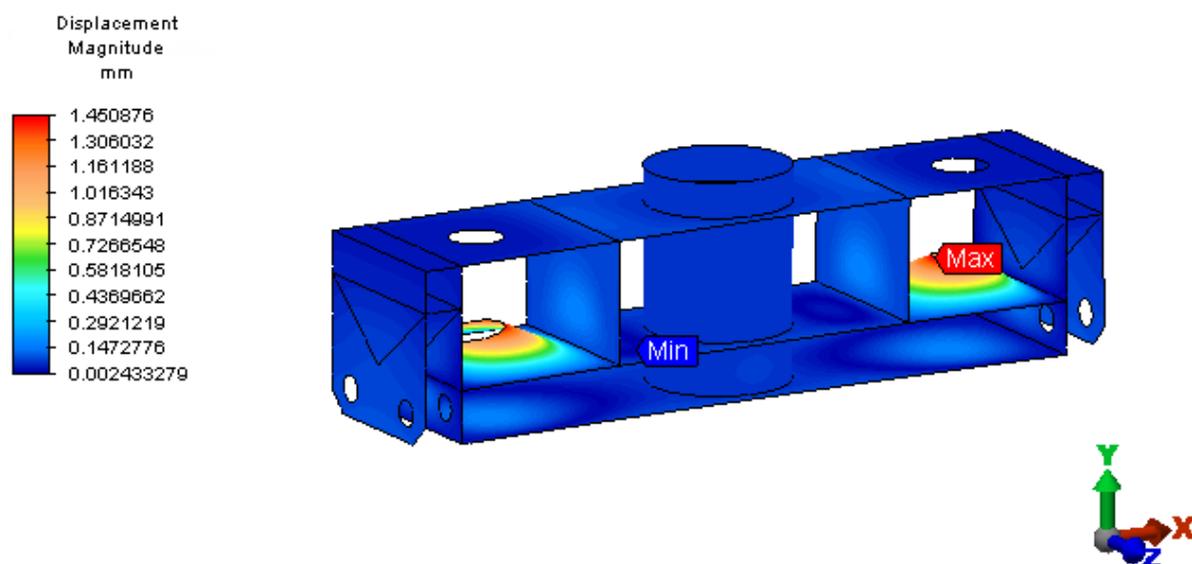


Figura 107 - Deslocamentos nodais do modelo (mm)

O máximo deslocamento combinado encontrado foi de 1,5 mm no local de apoio do pistão.

