

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

MICHEL FRANCISCO PEZZI

**ANÁLISE ESTRUTURAL E OTIMIZAÇÃO DAS LONGARINAS DO CHASSI DE
UMA USINA MÓVEL DE ASFALTO**

CAXIAS DO SUL

2021

MICHEL FRANCISCO PEZZI

**ANÁLISE ESTRUTURAL E OTIMIZAÇÃO DAS LONGARINAS DO CHASSI DE
UMA USINA MÓVEL DE ASFALTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica na
Universidade de Caxias do Sul.
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli

CAXIAS DO SUL

2021

MICHEL FRANCISCO PEZZI

**ANÁLISE ESTRUTURAL E OTIMIZAÇÃO DAS LONGARINAS DO CHASSI DE
UMA USINA MÓVEL DE ASFALTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica na
Universidade de Caxias do Sul.
Orientador: Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli

Aprovado(a) em ____ / ____ / ____

Banca examinadora

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

Prof. Me. André Alaniz Cesário
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, e por ter me dado saúde para conquistar esta caminhada.

Aos meus queridos pais, Altair e Fani, por formarem meu caráter e estarem sempre comigo me encorajando, acreditando em meu potencial, e me auxiliando em momentos de dificuldades e apreensões.

A minha irmã, Patrícia, por ser um exemplo de dedicação e esforço, o que certamente ajudou a ser quem sou hoje.

Ao meu orientador, Alexandre Vieceli, pela constante ajuda e orientação neste trabalho, além de toda contribuição fundamental em minha formação.

A instituição de ensino, Universidade de Caxias do Sul, e a todos os professores que compartilharam seus conhecimentos ajudando em meu desenvolvimento.

Aos amigos e colegas da faculdade, pelos grupos de estudos, trocas de conhecimento, e pelos momentos de descontração e diversão.

Aos meus colegas de trabalho, por toda contribuição em meu crescimento profissional, e pelo apoio diário nas tarefas e nos estudos.

E, por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram nesse processo de transformação acadêmica.

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

Albert Einstein

RESUMO

Desenvolveu-se no presente trabalho um estudo de análise estrutural com proposta de otimização das longarinas do chassi de uma usina móvel de asfalto reduzindo a massa do implemento. Teve-se também como objetivo entender o comportamento da estrutura durante sua aplicação, fazendo uso de uma nova ferramenta de projeto para a empresa. Para isso, foram levantadas as informações de carregamentos e funcionamento na obra, e então, realizada a discretização do domínio para análise estrutural utilizando o *software* SolidWorks, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Posteriormente, foram aplicadas técnicas de otimização estrutural através da ferramenta de Otimização de Projeto do *software*, buscando encontrar os possíveis cenários com resultados válidos. Propondo 15 novos cenários de otimização com três diferentes tipos de aços estruturais, e validando sob um coeficiente de segurança mínimo de 1,3, alcançou-se uma redução de massa de 21,04% em relação ao modelo inicial.

Palavras-chave: Chassi. Usina Móvel de Asfalto. Análise Estrutural. Método dos Elementos Finitos. Otimização de Projeto.

ABSTRACT

In the present work, a study of structural analysis was developed with proposal for the optimization the chassis spars of a mobile asphalt plant, reducing implement mass. The aim was also to understand the behavior of the structure during its application, using a new project tool for the company. For this, the information on loading and operation in the work was found, and then, realized the discretization of the system for structural analysis using the SolidWorks software, through the Finite Element Analysis (FEA). Subsequently, structural optimization techniques were applied using the Project Optimization from software tool, looking to find the possible scenarios with valid results. Proposing 15 new optimization scenarios with three different kinds of structural steels, and validating with a minimum safety factor of 1,3, a mass reduction of 21,04% was achieved compared to the initial model.

Keywords: Chassis. Mobile Asphalt Plant. Structural Analysis. Finite Element Analysis. Project Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina de Asfalto	13
Figura 2 - Estruturas de Pavimentos.....	18
Figura 3 - Classificação do Revestimento Asfáltico	19
Figura 4 - Processo de Mistura na Usina.....	20
Figura 5 - Instalação de Usina de Asfalto Fixa	21
Figura 6 - Transporte de Usina Móvel.....	23
Figura 7 - Componentes Básicos de um Semirreboque.....	24
Figura 8 - Chassi Rodoviário Semirreboque	24
Figura 9 - Diagrama Tensão - Deformação Convencional para Material Dúctil	26
Figura 10 - Modelo Aplicado ao MEF com Malha, Nós e Elementos	34
Figura 11 - Tipos de Elementos Finitos 1D, 2D e 3D	35
Figura 12 - Tipos de Otimização Estrutural	37
Figura 13 - Fluxograma de Desenvolvimento das Atividades	40
Figura 14 - Chassi Rodoviário Usina 20-40	41
Figura 15 - Longarinas e Travessas do Chassi	42
Figura 16 - Instalação da Usina na Obra	42
Figura 17 - Diagrama de Cargas e Apoios da Usina	43
Figura 18 - Modelo Geométrico Simplificado em Casca	44
Figura 19 - Geração da Malha de Elementos Finitos	44
Figura 20 - Dados da Malha de Elementos Finitos	45
Figura 21 - Carregamentos e Condições de Contato	45
Figura 22 - Cenários de Otimização	47
Figura 23 - Sensor de Coleta de Dados	47
Figura 24 - Valores de Tensão de von Mises	48
Figura 25 - Valores de Tensões Próximos ao Valor Máximo	49
Figura 26 - Refinamento da Malha na Região de Maiores Tensões.....	49
Figura 27 - Valores Coletados Afastados da Singularidade	50
Figura 28 - Deslocamentos Máximos Encontrados.....	51
Figura 29 - Fator de Segurança do Implemento	51
Figura 30 - Resultados do Estudo de Projeto	52
Figura 31 - Criação de Recortes na Estrutura com Otimização Dimensional.....	59
Figura 32 - Empalme e Aleta de Reforço para Suportes Simples	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exportação de Usinas	14
Quadro 2 - Massa Total da Usina Móvel 20-40	39
Quadro 3 - Resultados dos Cenários de Otimização	52
Quadro 4 - Validação dos Cenários em Função dos Tipos de Aços Estruturais	53
Quadro 5 - Cenários Validados Utilizando-se o Material ASTM A283 Gr. D	54
Quadro 6 - Cenários Validados Utilizando-se o Material ASTM A36	54
Quadro 7 - Cenários Validados Utilizando-se o Material ASTM A572 Gr. 50	55
Quadro 8 - Melhor Resultado Encontrado para o Aço ASTM A283 Gr. D	56
Quadro 9 - Melhor Resultado Encontrado para o Aço ASTM A36	56
Quadro 10 - Melhores Resultados Encontrados para o Aço ASTM A572 Gr. 50	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas e Químicas - Chapa de aço ASTM A36.....	29
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas e Químicas - Chapa de aço ASTM A283 Gr. D.....	30
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas e Químicas - Aço ASTM A572 Gr. 50.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEO	<i>Chief Executive Officer</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FOB	<i>Free on Board</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MR	Média Resistência
NCM	Nomenclatura Comum Mercosul
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SIGLAS

S_y	Limite de Escoamento [MPa]
S_{ut}	Limite de Resistência a Tração [MPa]
σ	Tensão Normal [MPa]
E	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young [MPa]
ϵ	Deformação Normal [mm/mm]
ϵ_{lat}	Deformação Lateral [mm/mm]
ϵ_{long}	Deformação Longitudinal [mm/mm]
σ_x	Tensão Normal ao longo de x [MPa]
σ_y	Tensão Normal ao longo de y [MPa]
σ_z	Tensão Normal ao longo de z [MPa]
ϵ_x	Deformação Normal ao longo de x [mm/mm]
ϵ_y	Deformação Normal ao longo de y [mm/mm]
ϵ_z	Deformação Normal ao longo de z [mm/mm]
ν	Coefficiente de Poisson [...]
G	Módulo de cisalhamento [MPa]
σ_1	Tensão Principal 1 [MPa]
σ_2	Tensão Principal 2 [MPa]
σ_3	Tensão Principal 3 [MPa]
σ'	Tensão Equivalente de von Mises [MPa]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	AMBIENTE DE ESTUDO	14
1.2	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	PAVIMENTAÇÕES ASFÁLTICAS	17
2.2	USINAS DE ASFALTO	19
2.2.1	Usinas Contínuas Estacionárias.....	20
2.2.2	Usinas Contínuas Móveis.....	21
2.3	CHASSI SEMIRREBOQUE.....	23
2.3.1	Componentes do semirreboque.....	23
2.3.2	Longarinas do chassi do semirreboque	24
2.3.3	Resposta das vigas aos carregamentos	25
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	25
2.4.1	Relação tensão e deformação do material.....	25
2.4.2	Coefficiente de Poisson e Lei de Hooke.....	27
2.5	CRITÉRIOS DE FALHAS	27
2.5.1	Teoria da Máxima Energia de Distorção	28
2.6	AÇOS ESTRUTURAIS	28
2.6.1	Aço ASTM A36.....	29
2.6.2	Aço ASTM A283 Gr. D	29
2.6.3	Aço ASTM A572 Gr. 50.....	30
2.7	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	30
2.7.1	Análise estática e dinâmica.....	31
2.7.2	Análise linear e não linear	32
2.7.3	Etapas do método	33
2.7.4	Discretização do problema	33
2.7.5	Tipos de elementos.....	34
2.7.6	Análise de resultados.....	35
2.8	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	35

2.8.1	Técnicas para otimização estrutural.....	36
2.8.2	Otimização paramétrica	37
2.8.3	Otimização de configuração	38
2.8.4	Otimização topológica.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1	TRANSPORTE E OPERAÇÃO	39
3.2	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	40
3.3	DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES.....	41
3.3.1	<i>Software</i> CAD (Modelo 3D para análise)	41
3.3.2	Caracterização do implemento.....	41
3.3.3	Aplicação na obra.....	42
3.3.4	MEF (Pré-Processamento).....	43
3.3.5	<i>Software</i> CAE (Processamento e Pós-Processamento)	46
3.3.6	Otimização Dimensional (Pré-Processamento).....	46
3.3.7	Otimização Dimensional (Processamento)	47
4	RESULTADOS.....	48
4.1	OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL (PÓS-PROCESSAMENTO)	48
4.2	ADEQUAÇÃO AOS PADRÕES COMERCIAIS	53
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
5	CONCLUSÃO	58
6	TRABALHOS FUTUROS.....	59
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a permanente necessidade de melhoria na qualidade de rodovias, e a importância da ampliação em infraestrutura de transportes rodoviários, investimento e pesquisa constantemente vem sendo aplicados no desenvolvimento de novos produtos asfálticos. Não menos relevantes quanto novos produtos, sistemas e modernas técnicas de pavimentação vêm sendo ampliadas, de acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos - ABEDA (2010).

Embora haja muitas deficiências e má estado de conservação em boa parte das rodovias brasileiras, o sistema rodoviário é o principal meio de transporte do país conforme reportado pelo blog Portal Brasil (2020). De acordo com o Anuário da Confederação Nacional do Transporte – CNT (2020), nos últimos 10 anos houve aproximadamente um aumento de 39,4% de pavimentação asfáltica da malha rodoviária nacional, sendo no ano de 2020 pavimentados em torno de 23,7 mil km de rodovias em âmbito nacional.

Para a preparação da massa asfáltica utilizada no processo de pavimentação de estradas e rodovias, Usinas de Asfalto (Figura 1) são implementos habitualmente utilizados, onde basicamente são caracterizadas pela sua capacidade produtiva em toneladas de asfalto por hora. Preparada de acordo com a especificação técnica definida pelo laboratório, os elementos básicos da mistura são o CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo e agregados de diversos tamanhos (Pó de Brita, Brita e Cal), onde por meio do controle do operador e da receita, o produto é elaborado. Através dos processos de aquecimento e mistura dos produtos, ao final do processo este é carregado em caminhões, que levarão a massa para ser aplicada na obra.

Figura 1 - Usina de Asfalto



Fonte: Civilização Engenheira (2018).

Além da demanda interna no consumo de Usinas de Asfalto, de acordo com o Portal Comex Stat (2021), no ano de 2020 os fabricantes brasileiros exportaram cerca de 14,7 milhões de dólares referentes à entrega de 32 usinas para os mais diferentes blocos econômicos como África, Europa, Ásia e todas as Américas. Se comparado com os 3 anos anteriores, houve um decaimento no número de exportações, onde o setor se mantinha com resultados superiores à 30 milhões de dólares ano, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Exportação de Usinas

Exportação de Usinas de Asfalto Brasileiras		
Ano	Número de Usinas	Valor FOB em milhões (US\$)
2017	54	40,2
2018	55	32,1
2019	66	36,4
2020	32	14,7

Fonte: Elaborado pelo autor com base na NCM 8474 (2021).

Em rumo oposto à queda evidenciada nas exportações brasileiras, a Margui Engenharia de Equipamentos registrou um crescimento médio de mais de 110% nos últimos três anos segundo Gilberto Luz, CEO da empresa, em entrevista à Revista M&T Mercado e Tecnologia (2020). Como tendência para o setor, segundo a Revista Construa Negócios (2020), o Ministério de Infraestrutura do Brasil entende que uma das soluções para o país crescer novamente vem da geração de empregos mediante concessões de obras de infraestrutura como a pavimentação de rodovias. Ainda, a revista acrescenta que o Ministério tem um plano de concessões rodoviárias, onde este afirma que, sendo atingidas as metas estabelecidas pelo governo, até o final de 2022 cerca de 38% da malha pavimentada federal estará concedida, prognosticando aumento na demanda de equipamentos e mão de obra para o segmento.

1.1 AMBIENTE DE ESTUDO

A Plamex – Soluções para abastecimento, em sua essência, é uma empresa fabricante de tanques e reservatórios para os mais diversos tipos de combustíveis e produtos químicos. Localizada na cidade de Vale Real com uma planta de 4.200 m², e atuante na área há aproximadamente 7 anos, esta conta com uma unidade fabril com os mais diversos tipos de equipamentos e processos metalúrgicos, desde corte, dobra e soldagem, até jateamento, pintura e revestimentos especiais.

Próximo ao final do primeiro semestre de 2020, a empresa Margui Engenharia de Equipamentos, instalada atualmente na cidade de Flores da Cunha, realizou a aquisição da empresa Plamex, mantendo seu nome original e linha de produtos, bem como ampliando a fabricação de tanques e outros implementos para acrescer sua linha de produtos voltada a ao ramo de usinas de asfalto.

Todo o conhecimento já adquirido ao longo dos anos com o desenvolvimento de produtos no segmento da linha de combustíveis junto à Plamex, tornou-se também aplicável aos reservatórios e produtos voltados à linha asfáltica. Novos fundamentos e aprendizagens vêm sendo transferidos entre os setores de engenharia de ambas as empresas, desde o âmbito de projeto e montagem, até instalação e funcionamento dos equipamentos.

Tal convergência entre as engenharias faz-se muito pertinente neste momento, pois com a integração de novos produtos, a expertise de fabricação de uma, e os conceitos de aplicação em campo por parte da outra, juntam o conhecimento necessário para a elaboração de projetos mais assertivos e melhorias contínuas. Por fim, também as experiências trocadas entre as áreas da qualidade, pós-vendas e produção alicerçam os desenvolvimentos de produtos na engenharia.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Identificando a forte influência da Engenharia Plamex junto às definições técnicas e projetos das usinas de asfalto, faz-se notável a importância de novos estudos e conhecimentos no que envolve a fabricação de novos implementos. Uma vez agregando ao produto final não apenas os reservatórios, agora também, a fabricante integra um papel de fornecimento de subconjuntos, como silos, secadores, correias transportadoras e dosadoras, bem como os chassis das usinas móveis, itens até então adquiridos com empresas externas do grupo.

Considerando a trajetória da empresa Margui, seus projetos já vêm sendo validados através de seus clientes e operação em campo, todavia, a perícia em âmbito de dimensionamento de itens adquiridos de outras empresas para a composição de suas usinas, finda por ficar nelas mesmas, uma vez encerrado o processo de aquisição vindas destas.

Como principal objetivo, este trabalho buscará avaliar um modelo em CAD do chassi de uma usina móvel projetado pela Engenharia Plamex, com base em um equipamento semelhante ao modelo de Usinas Móveis. Ao final da verificação e validação do modelo através de uma análise estrutural, buscar-se-á propor uma otimização geométrica para redução de massa do implemento.

Como inovação para os setores das empresas, inserir o modelo em CAD à uma simulação computacional entendendo o comportamento e validando o mesmo, será imprescindível para esta nova etapa do desenvolvimento do produto e da fabricação de seu protótipo. Mais do que verificar um modelo para um novo produto, agora interno, também implementar o método e utilizar deste modelo como referência para futuras simulações. Este desenvolvimento buscará expandir um leque de possibilidades com uma ferramenta disponível, porém até então inexplorada pela empresa, podendo ser aplicado desde uma validação estrutural e otimizações geométricas voltadas à redução de custos, buscando assertividade no protótipo e reduzindo seu tempo de lançamento.

1.3 OBJETIVOS

Aliado à escolha do tema, objetivo geral e específicos serão estabelecidos para orientar o estudo deste trabalho, delimitando a proposta e conduzindo-a através das etapas julgadas como essenciais para obtenção dos resultados ao final deste trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

Realizar análise estrutural e otimização dimensional nas longarinas do chassi de uma usina móvel de asfalto.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Verificar, através de simulação computacional, o modelo do chassi projetado pela empresa;
- b) realizar otimização estrutural do modelo verificado, visando alcançar redução de massa;
- c) definir procedimento de análise e critério de aceitação do modelo simulado;
- d) comparar a aplicação de aços estruturais de diferentes classes visando reduções de massa e custo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento deste capítulo, fez-se o levantamento preliminar do embasamento teórico fundamental e ferramentas que trazem alicerce ao estudo do tema escolhido. Tão significativo quanto a busca pelos resultados, entender as variáveis que envolvem o sistema faz-se indispensável quando se busca validação ou otimização de um componente.

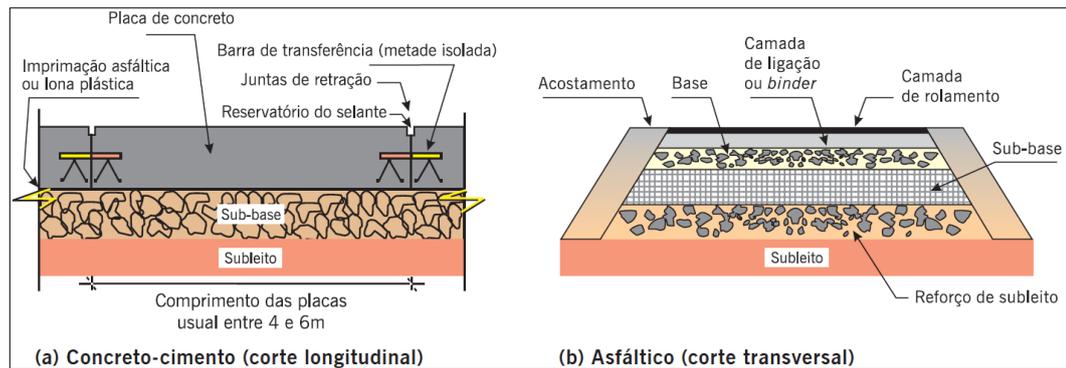
2.1 PAVIMENTAÇÕES ASFÁLTICAS

De um ponto de vista estrutural e funcional, segundo Bernucci et al., (2008, p. 9), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Pavimentos rodoviários, tradicionalmente classificam-se em dois tipos: rígidos, e flexíveis.

Também conhecidos como pavimento concreto-cimento e asfálticos respectivamente, indicam assim o seu tipo de revestimento do pavimento. Bernucci et al., (2008, p. 9) explicam as diferenças básicas na formação da base da estrutura abaixo do pavimento (Figura 2). Para o primeiro caso, a espessura das camadas é definida em função da resistência à flexão das placas do concreto (podendo ser armadas com barra de aço, ou não) e das resistências das camadas subjacentes. Já para o outro, o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos, sendo formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

O revestimento asfáltico é a camada mais superior da composição da estrutura, destinada a resistir diretamente às ações do tráfego de veículos e transmiti-las de forma acentuada para as camadas inferiores, bem como impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). Tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada, podendo também apresentar esse efeito pelo envelhecimento do ligante asfáltico e ações climáticas.

Figura 2 - Estruturas de Pavimentos



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Segundo Marques (2018), pavimentos flexíveis são constituídos por camadas que não trabalham à tração. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas superpostas, onde as de melhor qualidade encontram-se mais próximas da carga aplicada.

Já pavimentos rígidos, são constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração. Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes de placas de concreto de cimento, as quais são apoiadas em uma camada de transição, a sub-base. A determinação da espessura é obtida a partir da resistência à tração do concreto e são feitas considerações em relação à fadiga, coeficiente de reação do subleito e cargas aplicadas. São pouco deformáveis e com uma vida útil maior.

O dimensionamento do pavimento flexível é comandado pela resistência do subleito e do pavimento rígido pela resistência do próprio pavimento. Além dos pavimentos rígidos e flexíveis, existem ainda os pavimentos semirrígidos (semiflexíveis): É o caso das misturas solo-cimento, solo-cal, solo-betume dentre outras, que apresentam razoável resistência à tração.

Segundo o ponto de vista de manutenção e durabilidade, a Road Expert SLA (2018), destaca a importância da análise na escolha do tipo de pavimento para a obra. Seja para construção de estradas ou pavimentação de ruas, dentre as diversas características de um projeto de pavimentação de asfalto, a intensidade do tráfego no local, tipo de solo da região e um sistema de drenagem superficial – além de um plano de manutenção periódica - são fatores importantes para escolher qual tipo de pavimentação usar.

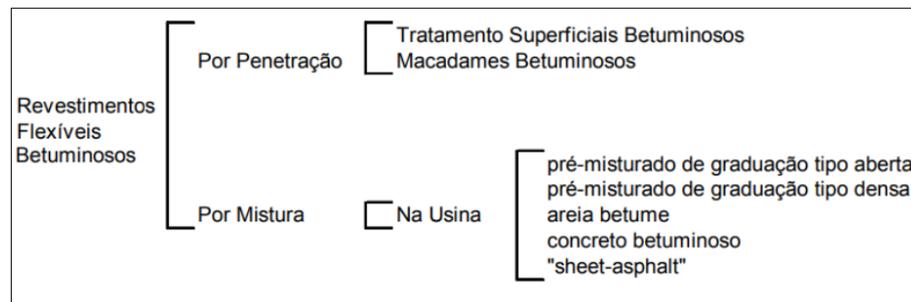
O flexível é indicado para vias de menor movimento, possui duração entre 5 e 10 anos. De fácil manutenção, permite reparos localizados, podendo também ser reciclado totalmente caso seja necessário. O semirrígido traz uma base de cimento recoberta por asfalto. É indicado

onde há tráfego de veículos mais “pesados”. Apresenta um investimento menor de execução e manutenção comparado ao rígido, que é construído com placas de concreto. O asfalto rígido é ideal para locais de parada com grandes cargas estáticas e pontos de frenagem. Apesar de envolver uma despesa menor de manutenção, os custos para implantação/execução são os maiores entre os 3 pavimentos.

Os revestimentos asfálticos constituídos da associação de agregados e de materiais asfálticos, podem ser preparados para aplicação de duas maneiras principais: por penetração ou por mistura. No processo de penetração, a atividade é executada através de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas diretamente sobre o solo. No caso da mistura, o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico diretamente na usina, para então após obtenção da mistura homogênea, passar pelo processo de compressão na aplicação no solo.

Segundo o site Guia da Engenharia (2019) os revestimentos asfálticos são classificados de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT segundo os métodos de associação dos agregados e os materiais betuminosos, conforme exposto pela Figura 3.

Figura 3 - Classificação do Revestimento Asfáltico

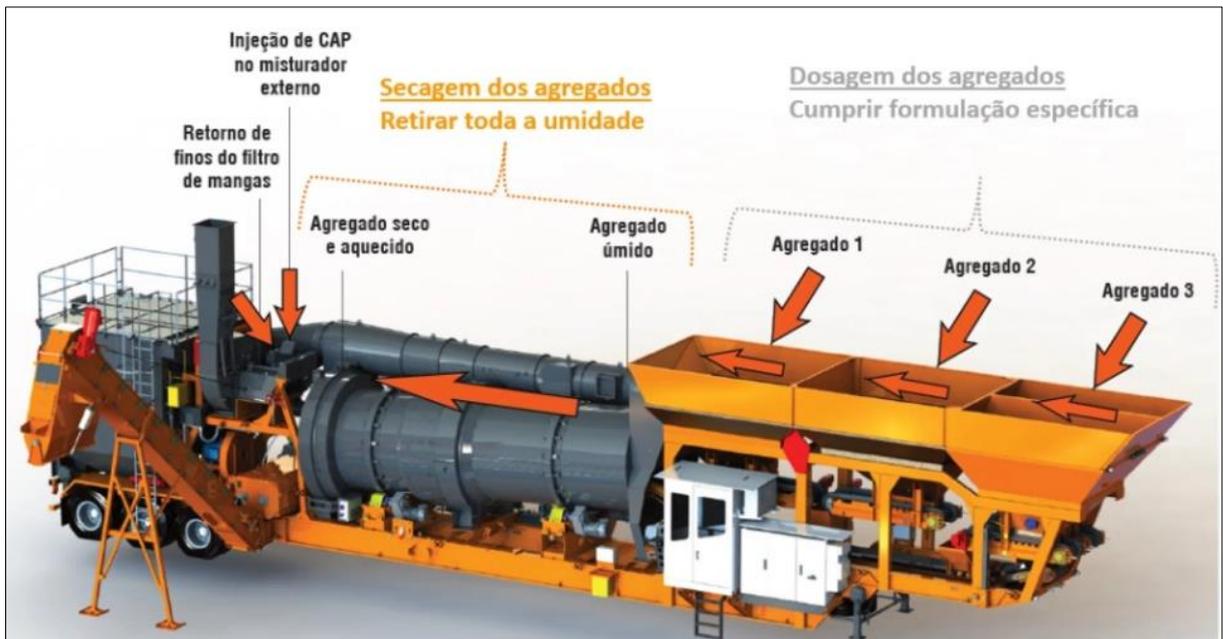


Fonte: Guia da Engenharia (2019).

2.2 USINAS DE ASFALTO

Usinas de asfalto são as responsáveis pela dosagem dos materiais, secagem e aquecimento dos agregados para juntamente com o ligante asfáltico executar a mistura e obter a massa asfáltica, conforme exemplificado através da Figura 4. Segundo Gewehr (2021), embora pareça ser uma simples função, a usina de asfalto é não apenas um equipamento, mas sim uma unidade industrial. Podendo atender diversos níveis de exigência no processo e variar o ritmo de produção de toneladas de massa por hora conforme a demanda da obra. Podem ser customizadas quanto ao tamanho, modelo de instalação e de adequação as exigências do modelo de trabalho do cliente.

Figura 4 - Processo de Mistura na Usina



Fonte: Civilização Engenharia (2018).

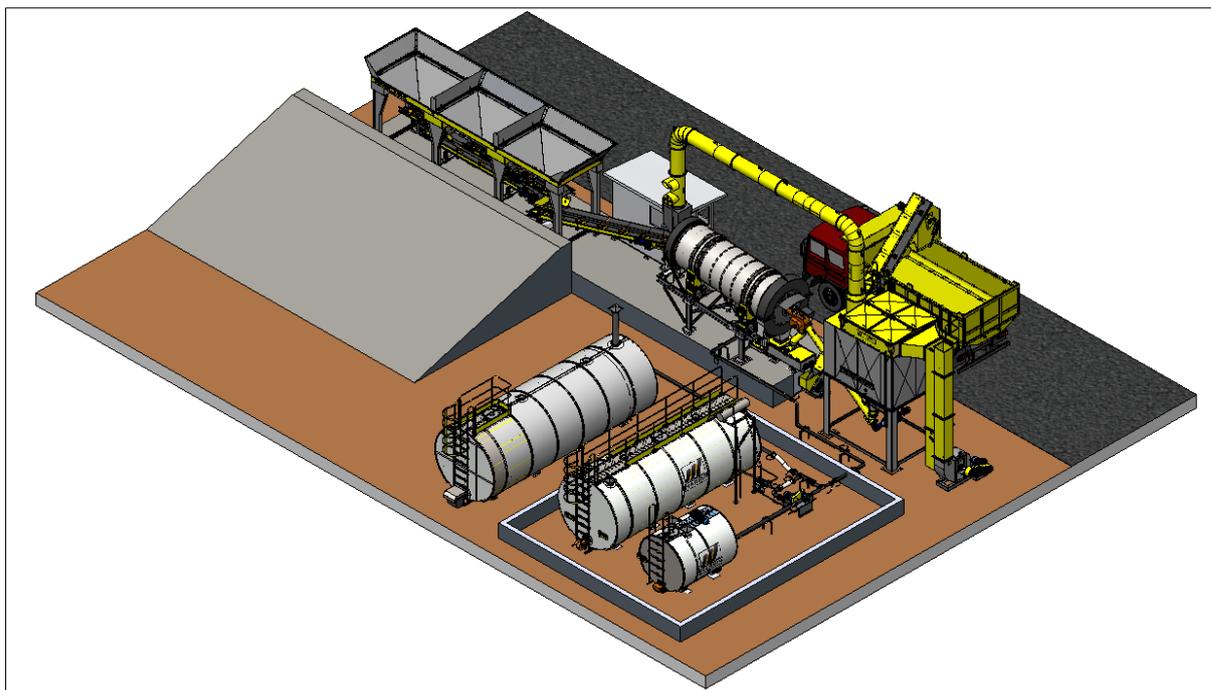
Segundo Antonello (2015), Usinas que operam em Processo Contínuo processam seus materiais em regime de fluxo contínuo e caracterizam-se por dosar os agregados virgens, na condição: frio, com umidade e com sua classificação granulométrica proveniente do sistema de britagem da pedreira.

Embora possa haver variação dimensional, capacidade de produção e princípios de proporção dos componentes, segundo Bernucci et al., (2008), Usinas Contínuas podem ser subdivididas em dois grupos construtivos: Usinas Contínuas Estacionárias e Móveis.

2.2.1 Usinas Contínuas Estacionárias

Usinas Fixas ou Estacionárias são caracterizadas pela sua montagem e disposição dos subconjuntos de componentes sobre uma base fixa, onde uma fundação deve ser dimensionada e projetada a modo de receber os componentes conforme Figura 5.

Figura 5 - Instalação de Usina de Asfalto Fixa



Fonte: Banco de dados empresa Margui Engenharia (2021).

2.2.2 Usinas Contínuas Móveis

Compostas pelos mesmos sistemas e funcionamento que as Usinas Estacionárias, as Usinas Móveis têm um grande diferencial na mobilidade e instalação se comparadas ao modelo das fixas, segundo Gewehr (2019). Equipada sobre um chassi rodoviário, sua grande vantagem é a otimização na instalação em obras, uma vez que seus subconjuntos já saem de fábrica instalados sob o chassi, logo, boa parte da automação e instalação elétrica também já são realizadas no equipamento antes do chegar na obra.

Permitindo serem transportadas para outro espaço ao final de uma obra, sua estrutura sobre chassi móvel permite que a instalação e o transporte da usina sejam rápidos. Segundo a fabricante de usinas de asfalto chinesa, Tietuo Machinery (2004), tal mobilidade possibilita a sua realocação simplesmente sendo acoplada em um caminhão e transportada até seu novo destino. Sua construção exige um correto dimensionamento do chassi, sendo ele o responsável pela sustentação durante o transporte, e como elemento de apoio para a usina durante o processo de manufatura da massa asfáltica durante sua operação na obra.

Tratando-se de um chassi rodoviário, o semirreboque da usina de asfalto deve atender as resoluções pertinentes a cada país em que serão transportadas e instaladas. No caso do Brasil, os Limites Legais para dimensões, peso bruto total e peso por eixo, são definidas pelo Conselho

Nacional de Trânsito (CONTRAN) que através das Resoluções nº 12/98, 184/05 e nº 62/98, regulamentou os artigos 99 e 100 do Código de Trânsito Brasileiro atribuindo tais definições, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2021).

De acordo com Dewes (2021), pode-se destacar os principais componentes básicos de uma usina pertencentes processo de preparação da massa asfáltica:

- i. Silos de Carregamento:** são responsáveis pelo armazenamento dos agregados que farão parte da mistura. Construídos em formato de pirâmide invertida, eles separam os agregados úmidos de acordo com cada tipo de agregado e sua granulometria.
- ii. Correias Dosadoras:** realizam modulação da quantidade de agregado provenientes do silo para o processo seguinte, além de transportar material ao tambor do secador.
- iii. Secador:** efetua o processo de aquecimento e secagem dos agregados que são recebidos úmidos da etapa anterior. Incrementado com uma fonte geradora de calor e realizando um movimento radial ao entorno de seu eixo inclinado, ele entrega a mistura de agregados pronta em sua saída para o misturador da usina. Também gera alta quantidade de poeira pelo seu processo de movimentação e aquecimento.
- iv. Filtro de Mangas:** juntamente com a tubulação de ar do sistema, é responsável pela coleta e controle da emissão de particulados sólidos em suspensão gerados pelo secador, evitando assim a contaminação do ar. Tais particulados coletados e estabilizados, podem voltar para o processo sendo incrementados na mistura da massa asfáltica como um agregado.
- v. Tanques de armazenamento:** normalmente são instalados próximos à obra, suprindo as necessidades de combustível para o funcionamento dos aquecedores, bem como de ligante asfáltico para mistura. Dependendo do tipo de combustível e do ligante armazenado, os tanques podem possuir sistemas próprios de agitadores de produto e aquecedores para deixar o fluido na temperatura ideal para o processo.
- vi. Misturador tipo Pug Mill:** composto por sistema controlado de entrada e saída de produto, é o responsável pela mistura entre os agregados e o ligante. Através de controle de temperatura, e sistema de eixos giratórios, ele entrega a mistura homogênea ideal para a obra.
- vii. Elevador de Arraste:** atuam na movimentação da massa asfáltica extraída do misturador para o caminhão, ou silo de armazenamento de massa asfáltica.
- viii. Cabine de comando:** local onde o operador da usina realiza as operações e acionamentos dos dispositivos. É de lá que a batelada de produção é definida, bem como a proporção de elementos de acordo com a receita da massa asfáltica.

A Figura 6, mostra uma usina móvel, pronta para ser transportada até a obra.

Figura 6 - Transporte de Usina Móvel



Fonte: Banco de dados empresa Margui Engenharia (2021).

2.3 CHASSI SEMIRREBOQUE

Caracterizado por ser um veículo de carga independente, os semirreboques são implementos utilizados para meio de transporte por vias rodoviárias podendo serem fabricados em diversas configurações, atendendo carregamento e transporte de diversos tipos produtos. Segundo Uva (2021), o semirreboque necessita de tração externa para se movimentar e cumprir suas finalidades. A tração que o movimenta só pode acontecer por meio de um caminhão trator, do tipo cavalo mecânico, sendo comum em vias rodoviárias no transporte de cargas pesadas.

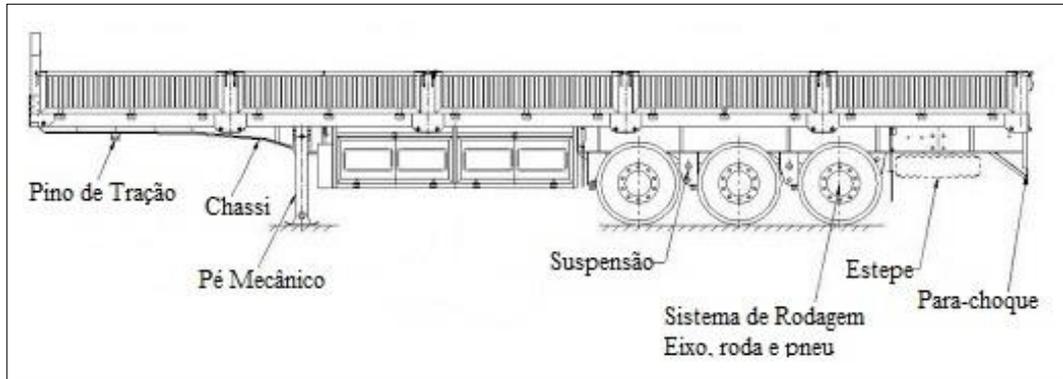
Normalmente variando sua forma construtiva de um a três eixos, um semirreboque acaba não tendo equilíbrio por si só. De acordo com Silva (2019), faz-se necessário um ponto de apoio/engate localizado no veículo trator para apoiar pelo menos uma parte de seu peso. Uma grande vantagem deste tipo de implemento, é que, dentro das leis de trânsito estabelecidas, cargas mais longas também podem ser transportadas, graças ao espaço gerado por conta do entre eixos, conforme explica o fabricante Librelato (2021) em seu blog.

2.3.1 Componentes do semirreboque

Os semirreboques são constituídos estruturalmente por um chassi, onde nele são incorporados os sistemas mecânicos do implemento, como por exemplo eixos e a suspensão. Demais subcomponentes que compõe o implemento, de acordo com cada tipo de equipamento, fazem parte dos itens que são fixados e transportados sob tal estrutura, além da carga que será transportada.

Podem-se destacar os principais componentes do semirreboque (Figura 7), que, em atendimento às normas de trânsito e de segurança, visam atender com a função de transporte e movimentação de carga de forma segura (SINOTRUCK, 2017).

Figura 7 - Componentes Básicos de um Semirreboque



Fonte: Adaptado de Sinotruck (2017).

2.3.2 Longarinas do chassi do semirreboque

Chassis de usinas móveis são constituídos de uma estrutura robusta, fabricada em aço de baixa liga e alta resistência, gerando assim uma estrutura de boa resistência e rigidez segundo a fabricante Liaoyuan Machinery (2021).

Longarinas são fabricadas normalmente em formato de “Perfil I” ou “Perfil C”, onde com travessas em formato de “Perfil U” ou “Perfil G”, faz-se a ligação entre as longarinas, obtendo assim uma estrutura do tipo chassi escada, conforme Figura 8. (PALMEIRA IMPLEMENTOS, 2021; FACCHINI S/A, 2021).

Figura 8 - Chassi Rodoviário Semirreboque



Fonte: Facchini (2021).

2.3.3 Resposta das vigas aos carregamentos

Vigas são elementos muito comuns em diversos modelos de estruturas e máquinas de todos os tipos. Estruturas de vigamento de pisos, caibros de telhados, eixos de máquinas, molas e chassis são alguns exemplos de elementos frequentemente carregados como vigas. As vigas geralmente são sujeitas a uma combinação de tensões normais e de cisalhamento distribuídas em suas seções transversais (NORTON, 2013).

Podendo ser submetidas a vários tipos de carregamentos externos, forças de superfície se desenvolvem nos pontos de apoio da estrutura, ou pontos de contato entre os corpos (denominadas reações de apoio). O equilíbrio de um corpo quando em situação estática, exigirá um equilíbrio de forças para impedir translações ou movimentos ao longo de uma trajetória, bem como, um equilíbrio de momentos para impedir que o corpo gire. (HIBBELER, 2010).

Curvas, obstáculos (lombadas, buracos), acelerações e frenagens causam transferência de peso em um veículo ou implemento, o que se converte em uma força vertical. Captadas pelo sistema de rodagem e transmitidas para a suspensão, finalmente são repassadas para a carroceria ou estrutura do veículo. Segundo Barata (2014) durante uma curva, ou em um processo dinâmico de frenagem ou aceleração a carga é lateral ou longitudinalmente distribuída, diferentemente de uma situação estática. A ação destas forças verticais em diferentes amplitudes causa o fenômeno de torção à estrutura.

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

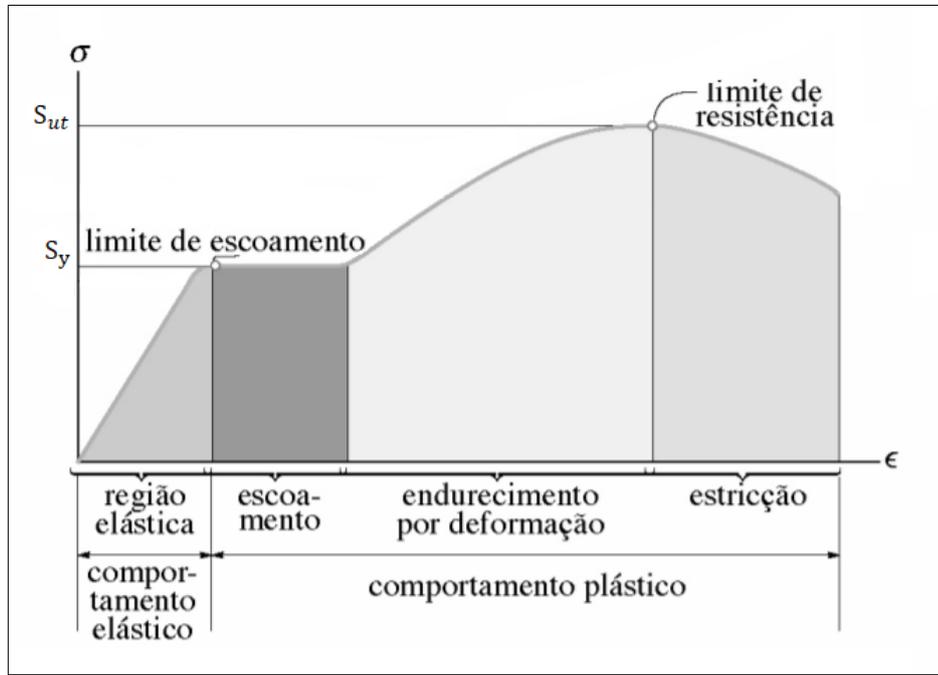
Propriedades mecânicas definem o comportamento de materiais quando sujeitos à esforços mecânicos ou carregamentos, e estão relacionadas diretamente à capacidade do material de resistir ou transmitir estes esforços nele aplicados sem romper ou deformar-se de forma incontrollável, ou imprevisível (TRIGO, 2006).

2.4.1 Relação tensão e deformação do material

Para Hibbeler (2004), a resistência mecânica de um material depende de sua capacidade de suportar a carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa é propriedade do próprio material e pode por exemplo ser determinada a partir de um teste experimental de tração. Com tal experimento, em diversas etapas no mesmo corpo de prova podem ser feitas medições que resultarão em um diagrama de tensão-deformação. Em uma curva característica para materiais

dúcteis, pode-se identificar quatro diferentes regiões de deformação possíveis até a sua ruptura, conforme Figura 9.

Figura 9 - Diagrama Tensão - Deformação Convencional para Material Dúctil



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2004).

Norton (2004), diz que o ponto de escoamento do material é quando este começa a ceder com maior facilidade à tensão que está sendo aplicada e sua taxa de deformação aumenta. Este é o ponto onde o valor da tensão define a tensão limite de escoamento S_y do material. A resistência a tração, S_{ut} representa o valor máximo da curva tensão deformação, indicando a máxima tensão suportada por uma estrutura que se encontra sobre tração.

Conforme Shigley et al (2005), quando um corpo sofre carregamento até o limite da região de seu comportamento é linear, ou região de deformação elástica, não ocorrerão deformações permanentes observadas no material. Em contrapartida, um corpo cujo carregamento ocorra acima da tensão de escoamento sofrerá com uma deformação plástica, logo não retornando ao seu ponto inicial quando o carregamento for removido.

No intervalo linear, a relação uniaxial entre a tensão e a deformação sofrida por determinado material é fornecida pela lei de Hooke, sendo representada matematicamente pela Equação (1) onde σ é a tensão, E dado como módulo de elasticidade ou Módulo de Young, e ϵ é a deformação específica:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

2.4.2 Coeficiente de Poisson e Lei de Hooke

De acordo com Hibbeler (2004), quando um corpo que se deforma é exposto a uma força axial de tração, não apenas se alonga, mas também se contrai lateralmente. Da mesma maneira, se uma força de compressão atuar sobre o corpo, fará com que ele se contraia na direção da força e se expanda lateralmente. Matematicamente o coeficiente de Poisson (ν) é obtido pela Equação (2), onde ϵ_{lat} corresponde à deformação lateral e ϵ_{long} à deformação longitudinal:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{lat}}}{\epsilon_{\text{long}}} \quad (2)$$

Ainda, segundo Hibbeler (2004), quando o material estiver sujeito a um estado de tensões triaxiais σ_x , σ_y e σ_z em determinado ponto, se desenvolverá nele deformações normais associadas ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z . As tensões são relacionadas às deformações por meio do princípio da superposição, da relação de Poisson e da lei de Hooke aplicada na direção uniaxial. O conjunto de Equações (3) demonstra a forma geral da lei de Hooke para um estado de tensão triaxial.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (3)$$

O módulo de elasticidade E relaciona-se ao de cisalhamento G pela Equação (4):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

2.5 CRITÉRIOS DE FALHAS

Norton (2004), menciona que, embora existam exceções, materiais dúcteis submetidos a carregamentos estáticos são limitados pelas suas tensões de cisalhamento, já materiais mais frágeis são limitados pela tensão normal.

2.5.1 Teoria da Máxima Energia de Distorção

Segundo Shigley et al (2005), a teoria prevê que ocorre escoamento quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede à energia de deformação por distorção por unidade de volume correspondente ao escoamento sob tração ou compressão do mesmo material.

Norton (2004), cita que, frequentemente, em situações envolvendo tensões combinadas normais e de cisalhamento ao mesmo ponto, é necessário definir uma tensão equivalente que possa ser usada para representar a combinação de tensões. Sendo assim a tensão equivalente de von Mises permite tratar casos de tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento como se fossem devido a um carregamento de tração pura. A tensão equivalente de von Mises é encontrada através da Equação (7):

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (5)$$

A condição de escoamento através da Teoria da Máxima Energia de Distorção, determina que a tensão equivalente σ' tem que ser maior que o limite de escoamento do material S_y , e pode ser escrita como pela Equação (8).

$$\sigma' \geq S_y \quad (6)$$

2.6 AÇOS ESTRUTURAIS

Aços estruturais são muito importantes na indústria da construção por terem alta resistência mecânica e suportarem grandes carregamentos. Os aços estruturais normalmente são aços carbono ou com pequenas quantidades de elementos de liga.

De acordo com Pannoni (2005), os principais elementos que influenciam nas propriedades mecânicas dos aços carbono estruturais são a composição química, a termomecânica do material, temperatura, tensões e velocidade de deformação. O aspecto de maior relevância nas propriedades do aço é sua composição química. Nos aços comuns, o carbono e o manganês influenciam no controle da resistência, ductilidade e soldabilidade.

2.6.1 Aço ASTM A36

O aço ASTM A36 (ou MR 250), é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica. Amplamente utilizado em diversos setores da indústria metalmeccânica e construção civil, ele apresenta uma boa soldabilidade e uma média resistência mecânica (METALICA, 2021).

Chapas e perfis estruturais são aplicados em componentes estruturais variados, desde os mais comuns até os mais elaborados, tais como: estruturas metálicas em geral, máquinas, serralheria, passarelas e implementos agrícolas, além de implementos rodoferroviários (ALLGAYER 2017). Através da Tabela 1 podem ser visualizadas as Propriedades Mecânicas e Químicas - Chapa de aço ASTM A36.

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas e Químicas - Chapa de aço ASTM A36

Propriedades Mecânicas		Composição Química [%]	
Limite de Resistência à Tração (S_{ut})	400 - 550 MPa	Carbono (C)	0,25 - 0,29
Limite de Escoamento (S_y)	250 MPa	Cobre (Cu)	0,20
Alongamento	20% (em 200 mm)	Ferro (Fe)	98
	23% (em 50 mm)	Manganês (Mn)	1,03
Módulo de Elasticidade (E)	200 GPa	Fósforo (P)	$\leq 0,04$
Coefficiente de Poisson (ν)	0,26	Silício (Si)	0,28
Módulo de Cisalhamento (G)	79,3 GPa	Enxofre (S)	$\leq 0,05$

Fonte: Adaptado de MatWeb (2021).

2.6.2 Aço ASTM A283 Gr. D

Também classificado como um aço carbono de média resistência mecânica e com aplicações similares ao ASTM A36, Através da Tabela 2 podem ser visualizadas as Propriedades Mecânicas e Químicas - Chapa de aço ASTM A283 Gr. D.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas e Químicas - Chapa de aço ASTM A283 Gr. D

Propriedades Mecânicas		Composição Química [%]	
Limite de Resistência à Tração (S_{ut})	415 - 515 MPa	Carbono (C)	0,27
Limite de Escoamento (S_y)	230 MPa	Cobre (Cu)	0,20
Alongamento	20% (em 200 mm)	Ferro (Fe)	98
	23% (em 50 mm)	Manganês (Mn)	0,9
Módulo de Elasticidade (E)	200 GPa	Fósforo (P)	0,04
Coefficiente de Poisson (ν)	0,26	Silício (Si)	0,04
Módulo de Cisalhamento (G)	80,0 GPa	Enxofre (S)	0,05

Fonte: Adaptado de MatWeb (2021).

2.6.3 Aço ASTM A572 Gr. 50

O aço ASTM A572 Gr. 50 (ou AR 350), é classificado como um aço estrutural de alta resistência mecânica e baixa liga. Possuindo propriedades mecânicas superiores ao ASTM A36, normalmente é utilizado nas mesmas aplicações na indústria. Sua desvantagem, é o custo mais elevado se comparado com o anterior (AÇOS PORTE, 2021). Através da Tabela 2 podem ser visualizadas Propriedades Mecânicas e Químicas - Aço ASTM A572 Gr. 50.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas e Químicas - Aço ASTM A572 Gr. 50

Propriedades Mecânicas		Composição Química [%]	
Limite de Resistência à Tração (S_{ut})	450 MPa	Carbono (C)	$\leq 0,23$
Limite de Escoamento (S_y)	345 MPa	Ferro (Fe)	98,00
Alongamento	18% (em 200 mm)	Manganês (Mn)	1,35
	21% (em 50 mm)	Fósforo (P)	$\leq 0,04$
Módulo de Cisalhamento (G)	80 GPa	Silício (Si)	$\leq 0,40$
-	-	Enxofre (S)	$\leq 0,05$

Fonte: Adaptado de MatWeb (2021).

2.7 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Alves Filho (2007), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta muito empregada em análises estruturais, tendo por objetivo a determinação do estado de tensões e deformações de um sólido de geometria arbitrária, sujeito a ações exteriores. Contudo

o MEF pode ainda ser aplicado a outros tipos de estudos, como fluidodinâmica (CFD) e eletromagnetismo (EMAG).

De acordo com Bathe (1996), a etapa inicial para a análise pelo método dos elementos finitos é a criação da representação ou modelo geométrico da estrutura que será analisada. Nessa fase as propriedades dos materiais empregados, os carregamentos aplicados e as condições de contorno da geometria devem ser definidos. Se a geometria ou outro dado for muito complexa, é necessária então uma simplificação para a obtenção de um bom modelo matemático.

Sob o ponto de vista de Silva et al (2001), após as definições de entrada do modelo, ocorre à divisão da geometria, a ser analisada em partes discretas menores. Esse processo é conhecido como discretização ou a geração da malha. Na sequência, as equações diferenciais inerentes ao tipo de análise escolhida, correspondentes a cada parte discretizada da geometria, conhecida usualmente como elemento finito, são resolvidas a partir de rotinas numéricas do *software* que será utilizado.

Para Azevedo (2003), ao solucionar problemas de análises estruturais através do MEF, alguns aspectos devem ser levados em conta, como: a definição da geometria, o tipo de material aplicado, a inserção de carregamentos e o estabelecimento das condições de contorno. Além disso, antes de iniciar o processo, faz-se fundamental definir se a análise será dinâmica ou estática, linear ou não linear, a utilização de algoritmos implícitos ou explícitos, dentre outros.

2.7.1 Análise estática e dinâmica

Ainda, para Azevedo (2003), em algumas situações em que a análise pelo MEF é realizada, torna-se razoável considerar que ações externas são aplicadas de um modo suficientemente lento, a considerar-se como desprezíveis as forças de inércia. Nestes casos a designação é dada como análise estática. Nesta, são determinadas tensões, deslocamentos, deformações, forças nas estruturas e resultantes do carregamento aplicado.

Segundo Andrade (2011), quando uma estrutura é submetida a ações dinâmicas, além das questões estáticas devem ser consideradas também a variação no tempo, e as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos componentes ficam sujeitas, sendo assim designa-se análise dinâmica.

2.7.2 Análise linear e não linear

Azevedo (2003), ainda trata que em uma análise linear admite-se que não exista a influência da modificação da geometria da estrutura em função da distribuição dos esforços e das tensões. Logo, todo o estudo é feito com base na geometria inicial não deformada. Também é comum considerar que, o nível do material que constitui a estrutura, e a relação entre tensão e deformação é linear. De forma contrária, quando tais hipóteses não sejam consideradas, o estudo passa a ser então uma análise não linear.

Não linearidades geométricas, segundo Ribeiro (2009), estão relacionadas às não linearidades da estrutura provenientes de variações na geometria, como mudanças de forma e rotações. Essas variações podem levar a estrutura a ter alterações consideráveis na configuração de equilíbrio.

Segundo Pereira (2002), pode-se destacar os principais tipos de não linearidades:

- i. Não-linearidade Física:** esta decorre do fato do material não apresentar uma relação tensão-deformação linear (não segue a lei de Hooke), ou seja, o comportamento do material não é elástico linear. Os efeitos não lineares são descritos por formas mais complexas de equações constitutivas (matrizes constitutivas não-lineares e/ou equações constitutivas em termos de “taxas” ou “incrementos”). Pode-se ter também não linearidade física nas relações momento-rotação de conexões semirrígidas ou flexíveis, ou de rótulas inelásticas oriundas de mecanismos de colapso localizados (flambagem, plastificação ou fissuração localizadas em componentes estruturais).
- ii. Não-Linearidade Geométrica:** uma estrutura pode ter um comportamento não linear, ainda que constituída de um material que obedeça à lei de Hooke. Para valores relativamente grandes de deslocamentos, a deflexão lateral de um membro pode trazer como consequência, o aparecimento de momentos fletores adicionais (denominadas de segunda ordem), em virtude da presença de um esforço normal. Neste caso os efeitos não lineares estão associados às equações de equilíbrio, que consideram a configuração deformada, e as relações deformação deslocamento.
- iii. Não-Linearidade de Contato:** diz respeito às alterações nas condições iniciais de apoio ou aplicação das cargas, e das condições de contorno do problema. Tais mudanças, podem ser suficientemente importantes para os resultados, para que tais condições iniciais não possam mais ser utilizadas para exprimir equilíbrio e compatibilidade, por conta de novos contatos na estrutura por conta das deformações.

2.7.3 Etapas do método

Três etapas para a formulação e implementação computacional de uma análise de elementos finitos são sugeridas segundo Hearn (1997), independente do problema:

- i. Pré-processamento:** etapa a que compete ao usuário responsável pela análise determinar os seguintes aspectos: identificação de viabilidade de análise pelo método, identificação do tipo de análise (linear elástica, dinâmica, não-linear, etc.), idealização e escolha do tipo de elemento (viga, sólido, casca, etc.), discretização através da elaboração da malha de elementos finitos, criação do modelo, aplicação das condições de contorno e criação de arquivos de dados e determinação do tipo de saídas necessárias. Nesta etapa também, é realizada a escolha e aplicação do tipo de material no estudo, onde as propriedades de E e ν determinam o comportamento mecânico, deslocamentos e deformações na estrutura;
- ii. Processamento:** esta etapa sequencial é realizada pelo solver do *software* CAE, onde são definidos aspectos como: formulação das matrizes características dos elementos, montagem das matrizes dos elementos para geração das equações da estrutura, solução das equações de equilíbrio para fornecer valores das variáveis de campo (deslocamentos) e computação de deslocamento dos elementos (deformações);
- iii. Pós-processamento:** etapa que compete ao analista (usuário) responsável pela análise, que deve: interpretar e validar os resultados, e em casos de necessidade de alterações no modelo ou na aplicação, modificar e rodar a análise novamente.

2.7.4 Discretização do problema

Segundo Silva (2001), o MEF é uma ferramenta que utiliza uma metodologia de aproximação numérica para resolver equações diferenciais pelo método de integração. Esse método é aplicado pela divisão de um sistema ou domínio, em partes discretas de tamanhos inferiores chamados de subdomínios, de forma a se tratar simplesmente de “elementos”.

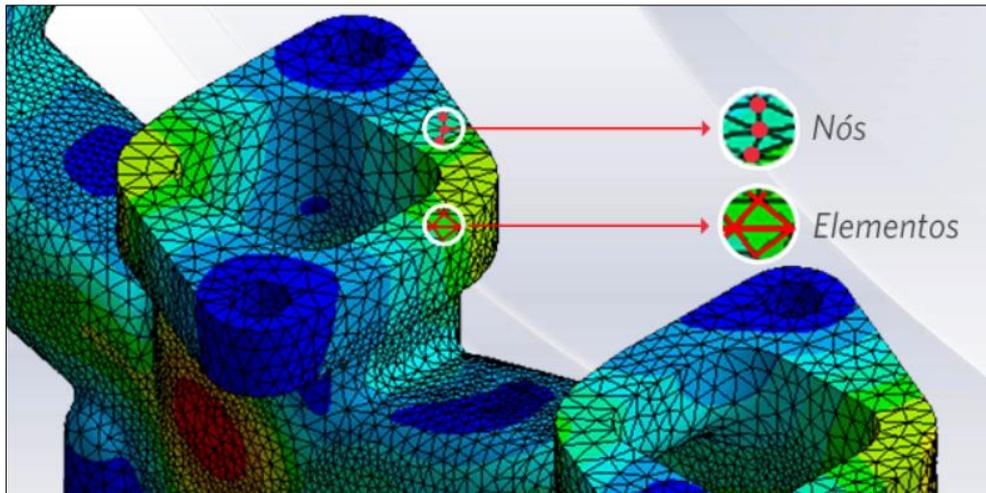
De acordo com Lubliner (1990), quando um domínio apresenta apenas uma dimensão, os elementos serão necessariamente segmentos de reta. Já quando um domínio é composto de duas ou três dimensões, as divisões em subdomínios formarão a chamada malha dos elementos, formando geometricamente polígonos e poliedros, respectivamente para cada caso.

Os elementos que representam o sistema físico são conectados uns aos outros por meio de pontos nodais, também conhecidos como “nós”. Estes, podem também serem encontrados

internamente no elemento e não somente nas conexões. Logo, juntamente com os elementos finitos, os pontos nodais formam a geometria da malha de elementos finitos. (SOUZA, 2003).

Um exemplo de peça tridimensional com sua malha e respectivamente conjunto de elementos e nós, pode ser visualizada através da Figura 10:

Figura 10 - Modelo Aplicado ao MEF com Malha, Nós e Elementos



Fonte: Instituto ESSS (2021)

2.7.5 Tipos de elementos

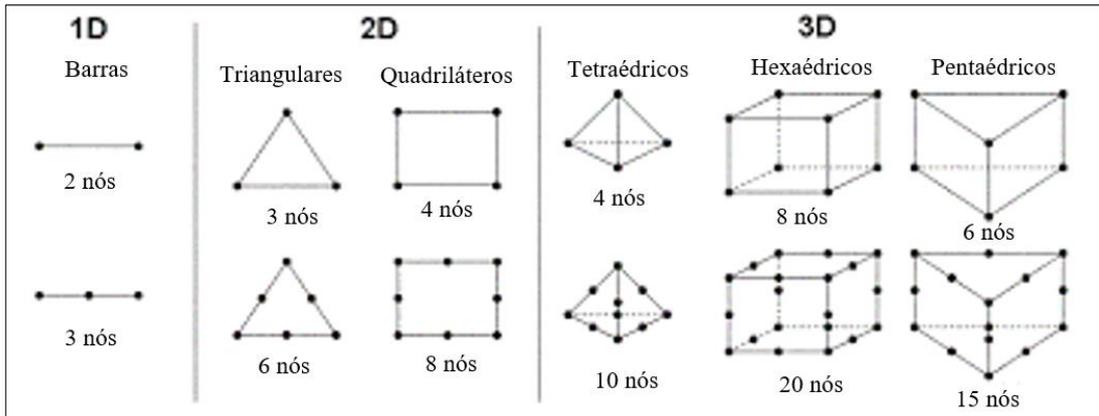
Para Shigley, Budynas e Nisbett (2011), os elementos mais típicos para aplicações pelo Método de Elementos Finitos, são: elemento linear, elemento de superfície e elemento sólido.

Conforme Fish e Belytschko (2007), elementos lineares ou elementos de viga, conforme são usuais quando a geometria tratada na aplicação é unidimensional.

Para Sousa (2011), elementos do tipo casca são mais utilizados quando a espessura da estrutura for muito pequena se comparada com as demais dimensões do modelo. Estas podem ser de geometrias triangulares ou quadrangulares de primeira, segunda ou terceira ordem. Ainda, quando se busca fazer análises de tensão e deslocamento, em uma estrutura com geometrias mais complexas, utilizam-se também elementos sólidos. Esse tipo de elemento pode ser de uma geometria do tipo prismática com forma triangular, hexaédrica ou também um sólido tetraédrico, podendo também ser um elemento de primeira, segunda e terceira ordem.

Segundo Macedo (2020) os elementos mais comuns podem ser vistos pela Figura 11.

Figura 11 - Tipos de Elementos Finitos 1D, 2D e 3D



Fonte: Adaptado de Macedo (2020).

2.7.6 Análise de resultados

De acordo com Cury (2018), a avaliação das tensões e deformações sempre são feitas em função de propriedades específicas do material designado. Porém, não basta apenas que estas grandezas sejam encontradas, deve-se confrontar tais valores com os limites pré-estabelecidos e assim verificar o estado em que o material se encontra, após as solicitações que venha a sofrer.

Em outras palavras, é necessário que se identifique os valores de tensão e deformação que levarão o material a falhar (romper ou escoar, por exemplo), em determinada situação e, além disso, determinar um critério de falha específico para cada situação.

2.8 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Em um ambiente de competição de mercado, custos de fabricação e escassez de recursos, sistemas estruturais devem ser projetados e dimensionados levando-se em conta, além de sua funcionalidade, seu custo de construção e operação, bem como sua capacidade de gerar lucro. Portanto, verifica-se que a minimização do custo de um sistema estrutural passa, necessariamente por um processo de otimização de parâmetros para o qual o sistema foi projetado (MAIA, 2009).

Segundo Yildiz (2019), o propósito mais geral da otimização de projeto é atingir diferentes objetivos e restrições simultaneamente, como minimizar o peso do componente, maximizar a rigidez, minimizar deslocamentos, aumentar a frequência natural ou minimizar a tensão máxima.

Para Silva (2002), a otimização estrutural inserida em meio à projetos mecânicos, consiste na utilização de métodos computacionais para obtenção de formas, dimensões ou topologia ótima para a aplicação solicitada. Reduções de massa geradas através das otimizações elevam o desempenho de componentes mecânicos e diminuem o custo de estruturas, algo que tem se tornado decisivo para definir a competitividade das indústrias da área metalmeccânica, no mundo todo.

Para Panagant et al. (2021), o aumento da concorrência e as dificuldades econômicas nos últimos anos levaram a melhorias em custos e redução de peso na indústria automotiva e em todos os outros setores. Logo, a maneira mais simples de minimizar os custos do produto é reduzindo o tempo necessário para desenvolvimento e fabricação, ou reduzindo a quantidade de material usado. Em outras palavras, maximizar a produtividade nos processos de projeto e manufatura. Métodos de otimização de topologia, fornecem a distribuição de material mais apropriada na etapa de projeto, e oferecendo direcionamento em alcançar os produtos ideais.

Sob a visão de Perini (2008), a prática da metodologia de otimização estrutural, tornando-se cada vez mais frequente no auxílio ao desenvolvimento de novos produtos. Premissas de projeto para baixo custo e elevada qualidade em um espaço de tempo reduzido, são realidade em grande parte dos setores de engenharia das empresas. Com tal realidade, a conjugação de análises estruturais por elementos finitos e otimização, tem se difundido rapidamente para a assertividade no lançamento de novos produtos.

2.8.1 Técnicas para otimização estrutural

Segundo Haftka e Gürdal (1992), de acordo o parâmetro que se deseja maximizar ou minimizar por meio da otimização, relaciona-se uma função objetivo com o problema de engenharia. Para componentes mecânicos de estruturas, uma função objetivo a ser atingida, por exemplo pode ser o atendimento de determinada rigidez, frequência de vibração, tensões, deslocamento, o volume, entre outros. As ditas restrições constituem os limites impostos à solução da otimização, onde um exemplo de restrição: máximo volume que a peça pode apresentar, deslocamento máximo, ou o valor máximo de tensão em um dado ponto específico.

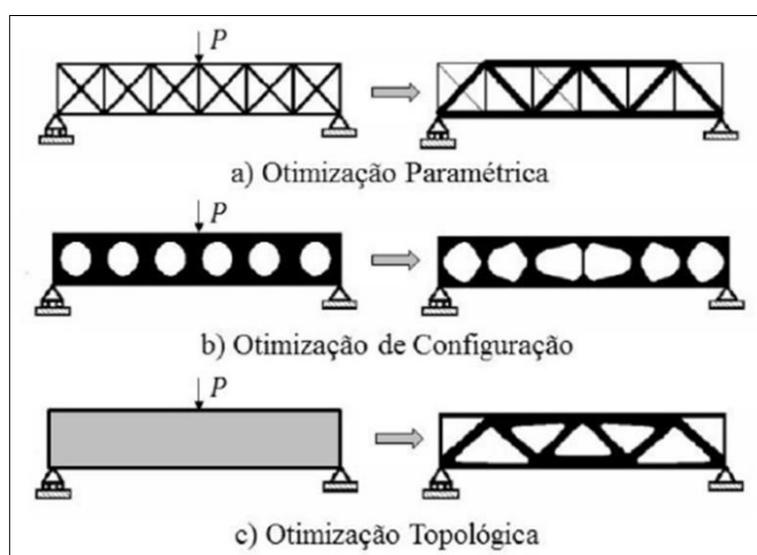
Em resumo, as restrições impõem um compromisso específico na melhora da função objetivo. As variáveis do projeto por sua vez, são os parâmetros definidos que podem ser sujeitos a alterações definidas pelo *software* durante o processo de otimização.

Em problemas onde a otimização paramétrica é utilizada, não ocorrerão alterações relacionadas a topologia ou a forma da estrutura estudada. As propriedades de rigidez do

elemento serão as variáveis do projeto: propriedades do material, espessura, área da seção ou momento de inércia. Para casos de otimização de forma, o formato ao redor da geometria ao redor de furos e as suas posições serão alteradas para atender a uma função objetivo requisitada. E por fim, para otimização topológica, uma estrutura base é introduzida e escolhe-se a melhor distribuição dentro deste universo. (COUTINHO, 2006).

De acordo com a complexidade do sistema, existem três classificações quando se fala em tipos de otimização, conforme Figura 12:

Figura 12 - Tipos de Otimização Estrutural



Fonte: Bendsoe e Sigmund (2002).

2.8.2 Otimização paramétrica

Para uma otimização paramétrica ou dimensional, segundo Perini (2008), as variáveis de projeto serão as dimensões, ou as razões das dimensões do modelo. Apresentando certas limitações para o processo de otimização, é aplicada principalmente em tarefas que necessitam apenas de um ajuste fino na geometria estabelecida, e onde não seja necessário alterar a malha de elementos finitos durante as iterações.

Ainda conhecida como otimização geométrica de tamanho, nesta aplicação as variáveis de projeto são definidas por algumas propriedades dos elementos da estrutura, como: espessuras, propriedades de seção transversal, massa, rigidez, entre outros. Durante o processo de otimização, estes parâmetros são alterados pelo algoritmo até que o objetivo final seja atingido (CASCINI et al., 2011).

2.8.3 Otimização de configuração

Otimização de configuração ou de forma se assemelha muito com a dimensional, contudo permite que durante o processo de otimização possam ocorrer variações no contorno da geometria do componente (Figura 16). Neste caso, os contornos podem ser representados através de curvas suaves, desde que não gere problemas na exatidão do elemento finito que está sendo analisado, ou provoque alguma instabilidade no algoritmo que gerencia o processo. Ainda, durante a otimização podem ocorrer mudanças significativas da geometria do modelo, o que resulta na necessidade de que a discretização do domínio seja redefinida (PERINI, 2008).

2.8.4 Otimização topológica

A otimização topológica é baseada em uma metodologia que possibilita projetar a topologia ótima de uma determinada estrutura, conforme um critério como por exemplo de máxima rigidez, e menor peso. Este método, tem por objetivo alocar o material no domínio fixo maximizando ou minimizando uma função específica de objetivo (BENDSOE, 1995).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção tem como objetivo explorar o produto objeto do estudo, conhecendo sua aplicação prática na obra e as condições que a ele são impostas, assim, podendo elaborar uma metodologia de verificação, integrando o projeto à uma análise estrutural e propondo cenários de otimização.

3.1 TRANSPORTE E OPERAÇÃO

Após a fabricação do chassi semirreboque, os componentes que fazem parte da usina são fixados sobre ele, e pré-montados a modo de agilizar o start técnico em campo. Conforme tratado no capítulo anterior, neste momento um veículo de tração é então acoplado ao implemento, e este se desloca por via rodoviária até sua localização de destino.

Durante sua condição de rodagem, o veículo trafega em velocidade controlada máxima de 60 km/h por vias condizentes com o tipo de carga. Além disso, evidencia-se aqui a grande característica do chassi da usina móvel de asfalto, que é o fato da mesma nunca transitar com carga de materiais utilizados em seu processo, apenas com sua massa própria. Devidamente instalada em campo, a usina móvel é então abastecida com os insumos da receita, e começa a produzir a massa asfáltica.

Para efeito de comparação de cargas entre as condições apresentadas anteriormente, pode-se observar fatores percentuais de operação através do Quadro 2. Percebe-se que em condição de transporte, a massa é apenas a própria do implemento, igualmente à uma condição de 0% de operação na obra. Já quando se verifica a condição máxima de funcionamento, o carregamento sujeito à estrutura do chassi é cerca de 4 vezes maior que durante o transporte.

Quadro 2 - Massa Total da Usina Móvel 20-40

Fator de operação (%)	Massa Total (TON)
Transporte	20,0
0	20,0
50	39,5
75	55,3
100	79,0

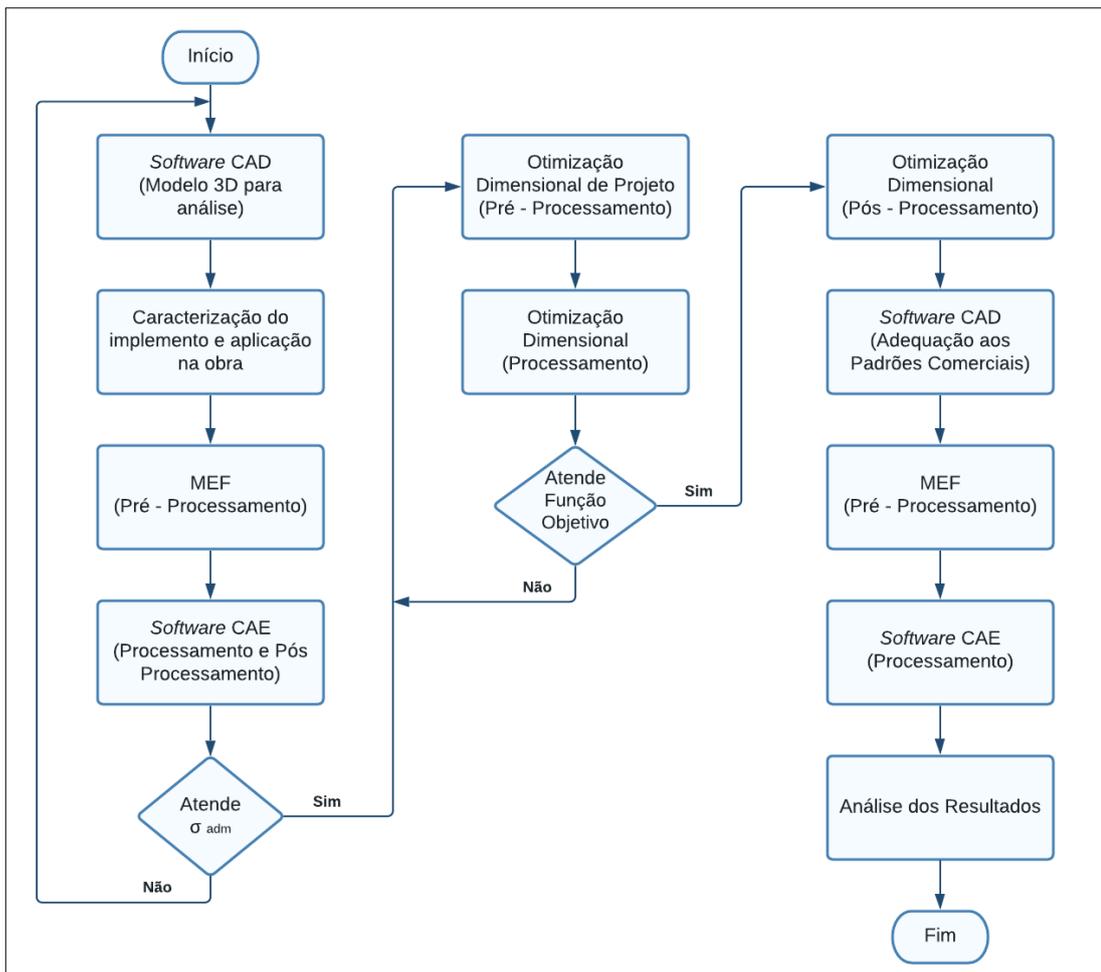
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da empresa Margui (2021).

Além das considerações acima, faz-se importante entender a diferença entre transporte e funcionamento da usina, pois as condições de apoio e os carregamentos são distintos. Diferentemente do transporte onde sistema de rodagem do implemento e ponto de engate com o veículo guia suportam sua carga total, durante a operação a usina de asfalto fica sobre uma quantidade maior de apoios, denominados de pés fixos. Estes, devidamente distribuídos ao longo da estrutura, elevam do solo todo o sistema de rodagem. Desta maneira, este estudo buscou verificar e otimizar as longarinas do chassi na condição estática, durante o funcionamento da usina.

3.2 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

Buscando estabelecer as etapas, e definir uma metodologia para as atividades a serem realizadas neste estudo, a Figura 13 traz um fluxograma das atividades propostas.

Figura 13 - Fluxograma de Desenvolvimento das Atividades



Fonte: O autor (2021).

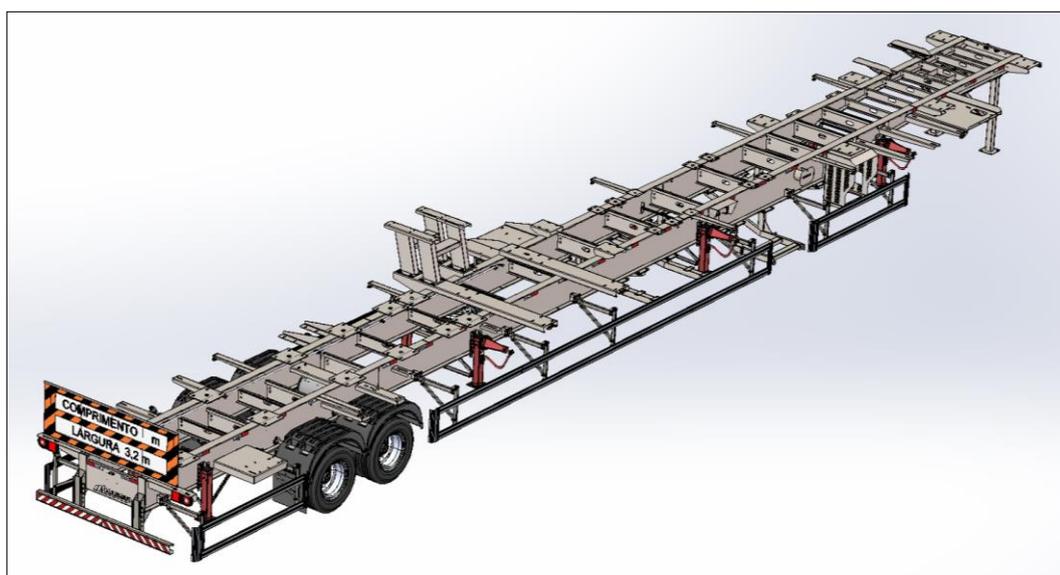
3.3 DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES

Cada etapa será composta por atividades julgadas necessárias para o entendimento físico do produto, e aplicação das ferramentas de simulação, otimização e obtenção de resultados.

3.3.1 *Software CAD (Modelo 3D para análise)*

Desenvolvido pela engenharia Plamex com base em um equipamento semelhante ao modelo de Usinas Móveis, o chassi rodoviário foi projetado com geometria, componentes e suportes de acordo com as requisições da instalação da usina. Realizado através do *Software SolidWorks*, através da Figura 14 é possível visualizar o modelamento 3D do implemento.

Figura 14 - Chassi Rodoviário Usina 20-40

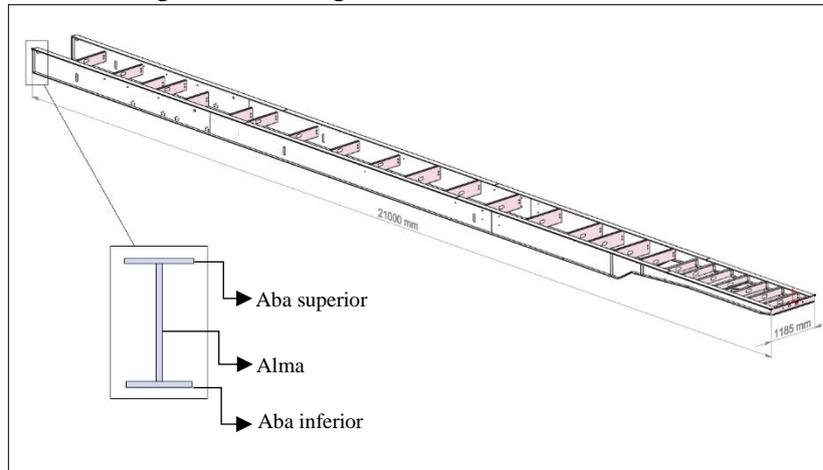


Fonte: Banco de dados empresa Plamex (2021).

3.3.2 **Caracterização do implemento**

O implemento tratado como Chassi Rodoviário da Usina 20-40, é uma estrutura do tipo chassi escada, fabricada a partir de chapas de aço estruturais de espessuras variadas, processadas através de cortes térmicos, conformações mecânicas e processo de soldagem. O elemento estudado, é composto essencialmente por duas longarinas paralelas, e travessas dispostas perpendicularmente, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Longarinas e Travessas do Chassi

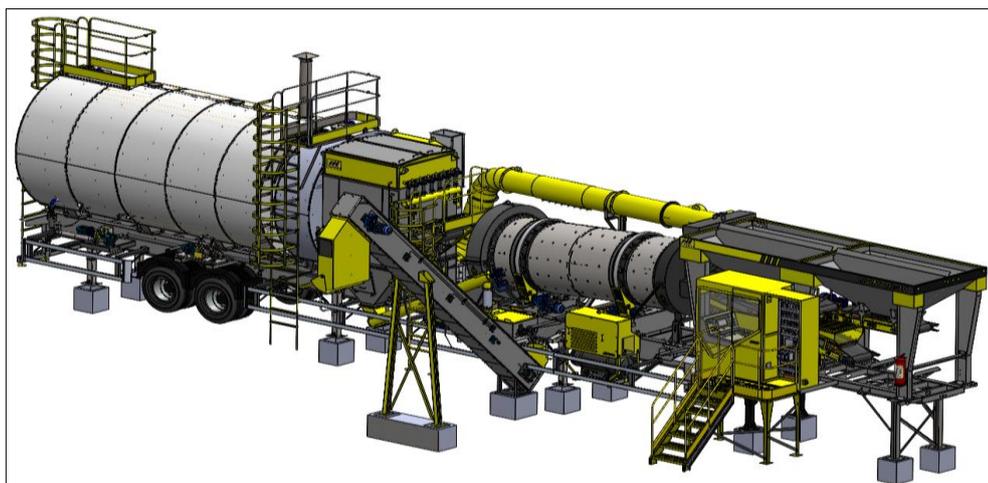


Fonte: Banco de dados empresa Plamex (2021).

3.3.3 Aplicação na obra

Antes de iniciar o funcionamento em campo, inicialmente a Usina Móvel é apoiada por pés de apoio inferiores, elevando do solo o sistema de rodagem do chassi. Desta forma, as distribuições de carga de sua própria massa e a dos agregados que fazem parte do processo, são distribuídas através de tais apoios. Abaixo dos pés de apoio da usina, sapatas de concreto reforçado são preparadas na obra, de modo a estruturar a base e resistir aos carregamentos, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Instalação da Usina na Obra



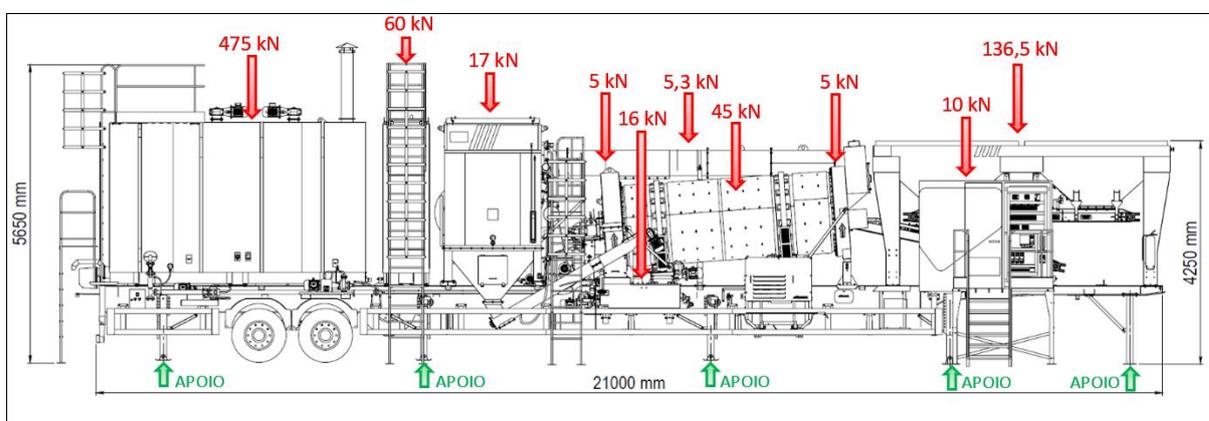
Fonte: Banco de dados empresa Margui (2021).

Por se tratar de itens comerciais e dimensionados conforme padrões normativos vigentes para a aplicação e cargas, os pés de apoio não foram considerados no modelo da simulação,

somente suas reações de contato (fixação). Entendendo que, assim como eles, as fundações de alvenaria também não são o objeto do estudo, por serem dimensionadas para a aplicação, estes itens foram considerados como bases rígidas, não constando na simulação como corpos deformáveis.

Conhecendo o funcionamento na obra, através da Figura 17 pode-se visualizar um diagrama com as principais cargas e apoios referentes a condição de operação máxima da usina quando carregada de insumos.

Figura 17 - Diagrama de Cargas e Apoios da Usina



Fonte: O autor (2021).

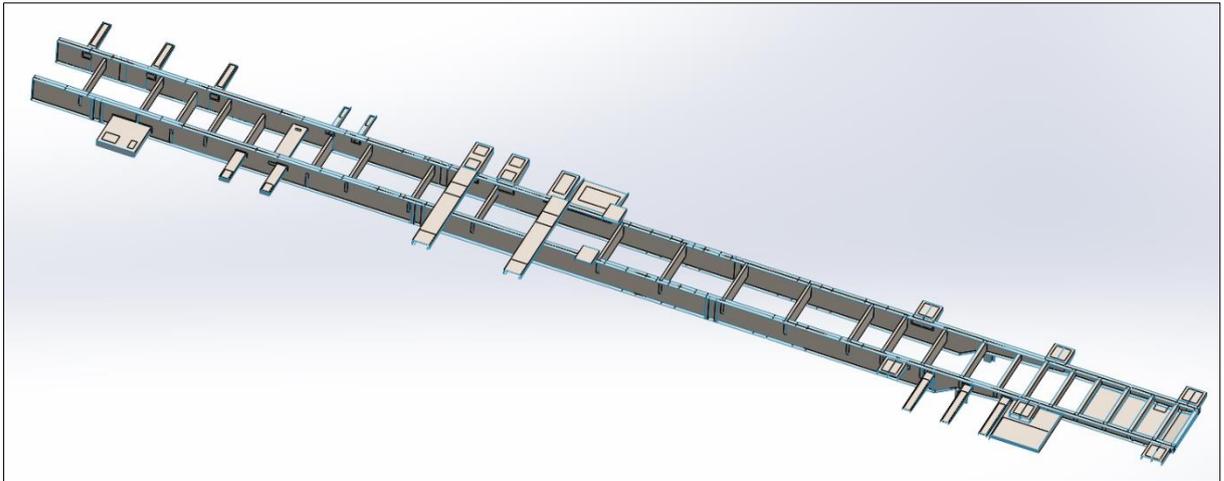
3.3.4 MEF (Pré-Processamento)

Com base na definição do funcionamento do implemento desenvolvida anteriormente, delimitou-se o cobrimento deste estudo por uma análise estrutural do tipo estática. Para a definição dos carregamentos e apoios, é preciso identificar junto a engenharia da empresa Margui as regiões da estrutura que efetivamente recebem as cargas da usina, bem como massas específicas dos produtos (ligante asfáltico, combustível e agregados).

Compreendendo que o projeto do implemento foi preparado com o maior nível de detalhes voltados ao processo de manufatura, fez-se necessário inicialmente realizar uma simplificação da geometria para aplicação da ferramenta de simulação. Itens que compunham sistema de rotação de transporte, bem como componentes que não fazem parte da estrutura e da sustentação da usina dificultariam a aplicação do método, e não trariam melhores resultados.

Assim sendo, a primeira etapa realizada foi a elaboração do modelo geométrico simplificado, utilizando recursos de superfícies para a geração de um modelo geométrico em casca. Modelo este, elaborado por meio do *software* SolidWorks, como mostra a Figura 18.

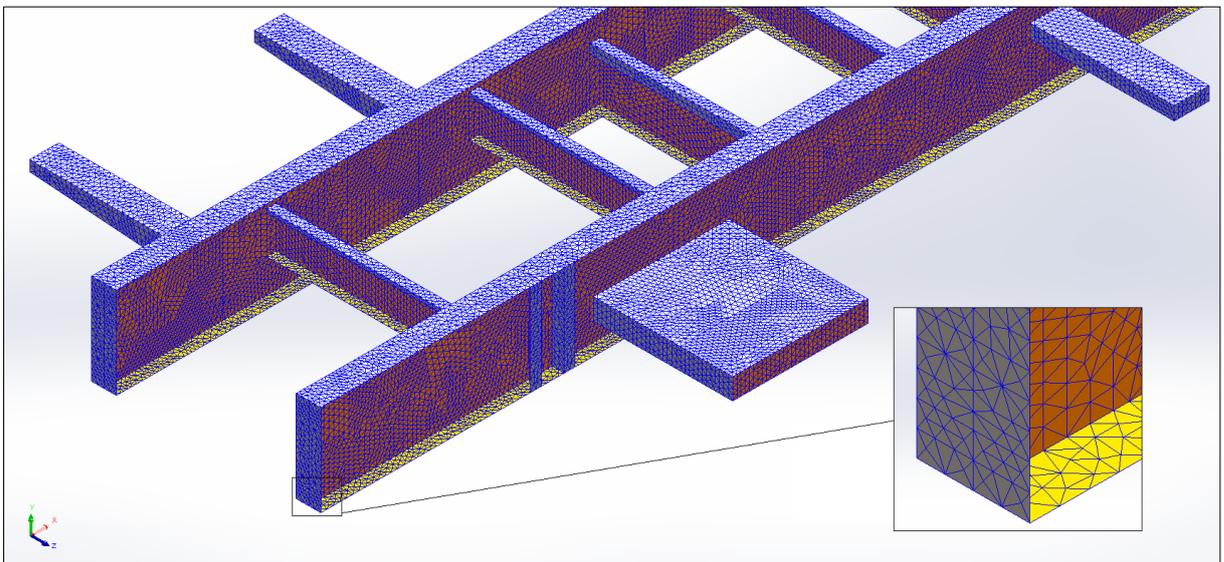
Figura 18 - Modelo Geométrico Simplificado em Casca



Fonte: O autor (2021).

Após a geração do modelo simplificado, ele foi discretizado em elementos do tipo triangular de segunda ordem, que por sua vez compuseram a malha de elementos finitos. Para a geração da malha alguns cuidados foram dados, como a criação de linhas de divisão e condições de contato de união entre componentes, originando assim uma malha compatível entre os elementos, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Geração da Malha de Elementos Finitos



Fonte: O autor (2021).

Uma vez desenvolvido o modelo em superfície, utilizando elementos de casca, para a geração da malha optou-se pela escolha do elemento triangular de segunda ordem, por ser este o elemento de maior número de graus de liberdade disponível no *software* para tal aplicação em modelos de superfície. Após realizar os refinamentos necessários na malha a modo de tornar

os resultados da simulação convergentes a um resultado aceitável, percebeu-se que utilizando elementos de tamanho entre 20 e 25mm não havia mais variações consideráveis nos resultados obtidos. Desta forma, considerou-se a malha devidamente refinada para a aplicação. Após a finalização desta etapa, foi extraído um relatório de dados da malha de elementos finitos, como pode ser visto pela Figura 20.

Figura 20 - Dados da Malha de Elementos Finitos

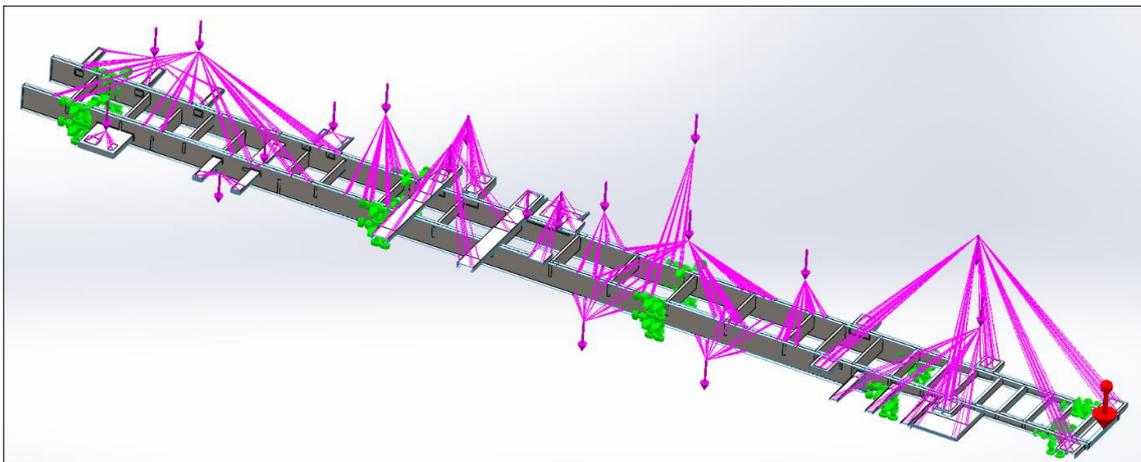
Malha Detalhes	
Nome do estudo	Análise estática 1 (-Chassi Usina-)
Tipo de malha	Malha de casca usando superfícies
Gerador de malhas usado	Malha com base em curvatura
Verificação Jacobiana para cascas	Ativada
Tamanho máximo do elemento	25 mm
Tamanho mínimo do elemento	20 mm
Qualidade da malha	Alta
Total de nós	443039
Total de elementos	218337
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss)	00:00:23
Nome do computador	

Fonte: O autor (2021).

Finalizado o modelo e sua discretização, nesta etapa foram inseridos os pontos de apoio fixos, e as cargas dos componentes além do peso próprio do chassi, considerando-se uma situação de carregamento máximo (100%) da capacidade da usina.

Para representar da melhor forma possível através das ferramentas do *software*, para cada subcomponente que gera um carregamento, foram criados os seus centros de massa geométricos, para, a partir destes pontos, aplicar sua carga. Desta forma, tornou-se possível representar além do carregamento vertical, também o momento fletor que cada um dos corpos oferece à estrutura (Figura 21).

Figura 21 - Carregamentos e Condições de Contato



Fonte: O autor (2021).

Vinculadas às superfícies de cada corpo modelado, foram atribuídas as espessuras utilizadas no processo de fabricação atual do implemento. Para representação física do comportamento do implemento, também foi aplicado à seleção o Aço ASTM A572 Gr. 50.

3.3.5 Software CAE (Processamento e Pós-Processamento)

Durante a etapa de processamento, o solver do *software* realizou a simulação obtendo as tensões e deslocamentos nodais da estrutura sob sua condição inicial, utilizando o MEF. Nesta etapa, foram encontrados os pontos máximos de tensões localizadas na estrutura, bem como máximas deformações. Com esta etapa, pode-se conhecer o coeficiente de segurança atual, bem como onde ocorrem as maiores solicitações na estrutura.

Como método de validação, foi considerado o critério de falha de von Mises, determinando que tensões encontradas na análise estrutural superiores ao limite de escoamento do material resultariam em deformações plásticas ao componente, invalidando a proposta.

3.3.6 Otimização Dimensional (Pré-Processamento)

Tendo-se o modelo atual validado pela análise estrutural através do MEF, na etapa de Pré-Processamento da Otimização Dimensional, foi utilizada a ferramenta de Estudo de Projeto de Simulação do *software*. Buscando redução de massa do implemento foram definidas variáveis para serem aplicadas às abas e almas das longarinas (travessas e suportes foram mantidos com suas espessuras originais). Para isso, valores discretos de espessuras comerciais de chapas disponíveis para a aplicação foram empregados, forçando assim a obtenção de resultados aplicáveis na prática, próximos ao máximo de um cenário ótimo.

Fazendo uso dos mesmos carregamentos, material, modelo discretizado e malha da simulação da condição inicial, pode ser visto pela Figura 22 além da atual condição (Cenário 01) outros 15 possíveis cenários de otimização gerados.

Figura 22 - Cenários de Otimização

Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
<input checked="" type="checkbox"/>									
9.53mm	12.7mm	15.9mm	19.05mm	9.53mm	12.7mm	15.9mm	19.05mm	9.53mm	12.7mm
4.25mm	4.25mm	4.25mm	4.25mm	4.75mm	4.75mm	4.75mm	4.75mm	6.35mm	6.35mm
Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16				
<input checked="" type="checkbox"/>									
15.9mm	19.05mm	9.53mm	12.7mm	15.9mm	19.05mm				
6.35mm	6.35mm	8mm	8mm	8mm	8mm				

Fonte: O autor (2021).

3.3.7 Otimização Dimensional (Processamento)

Para buscar validação entre as combinações dos cenários originados, foram adicionados ao modelo da simulação sensores de coleta de dados (Figura 23), sendo estes vinculados às superfícies que buscavam ser otimizadas. Utilizando a ferramenta de Estudo de Projeto, o *software* realiza a análise estrutural variando todas as combinações possíveis de espessuras definidas.

Figura 23 - Sensor de Coleta de Dados

Fonte: O autor (2021).

Por sua vez, a validação dos cenários de otimização é dada pela coleta dos dados dos sensores sob as superfícies selecionadas. Na aplicação realizada, dois sensores foram criados (um para as abas, e outro para as almas), e também estabelecida a função objetivo: redução de massa criada, sendo atendida por cenários validados a um valor máximo de tensão de 345 MPa.

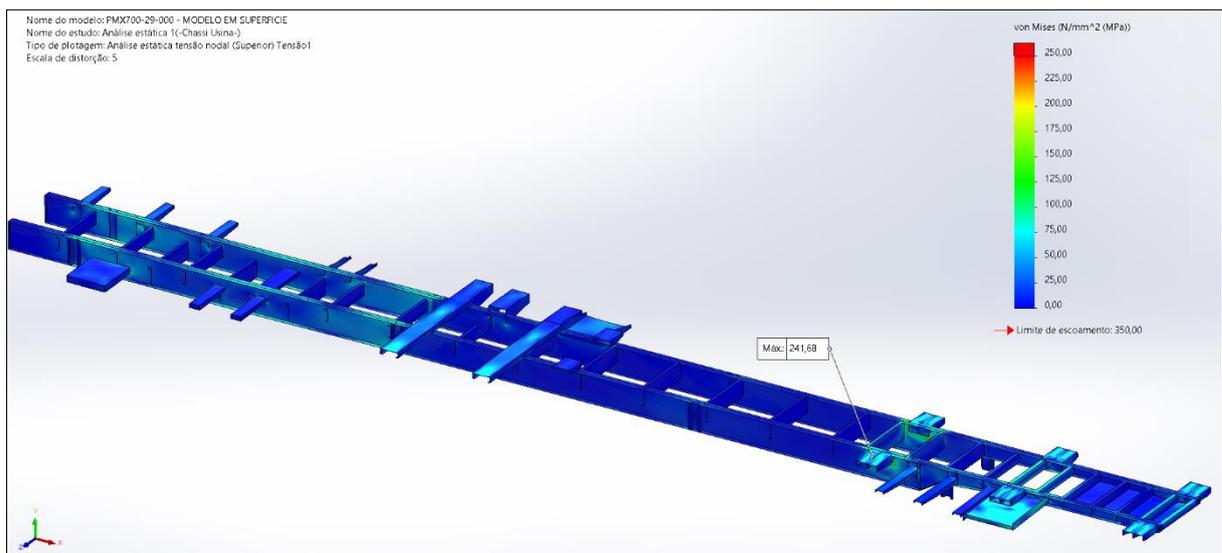
4 RESULTADOS

Desenvolvida a metodologia de análise e otimização do modelo, neste capítulo foram analisados os resultados obtidos das simulações, visando a validação estrutural e otimização, além da redução da massa do implemento.

4.1 OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL (PÓS-PROCESSAMENTO)

Realizando a análise estrutural do cenário atual, foi possível verificar os pontos com maiores valores de tensão de von Mises encontrados, demonstrando assim onde a estrutura é mais solicitada, como pode ser visto na Figura 24.

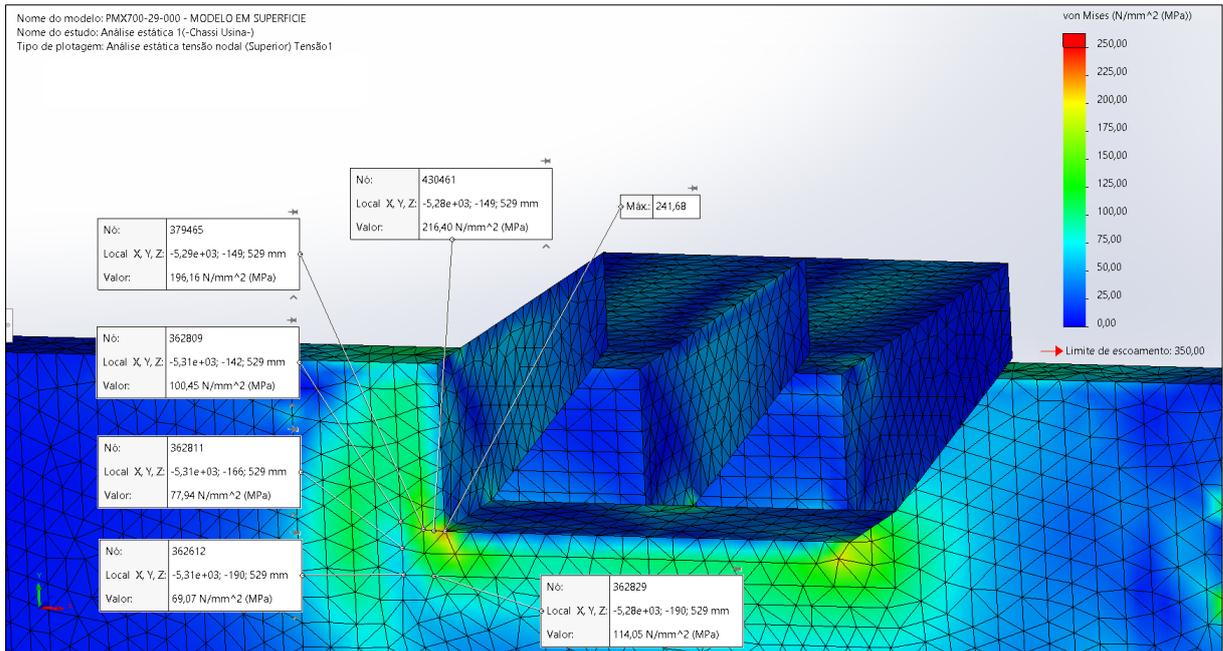
Figura 24 - Valores de Tensão de von Mises



Fonte: O autor (2021).

Pode ser encontrada na região o valor de tensão máxima do modelo de aproximadamente 241 MPa localizada no ponto do elemento da malha que une a sapata de fixação do Silo de Agregados e a Alma da Longarina. Verificando os elementos das proximidades do ponto máximo de tensão encontrado, pode-se perceber uma dissemelhança, até mesmo de valores de tensão do mesmo elemento que trouxe o valor da tensão máxima, conforme mostra a Figura 25.

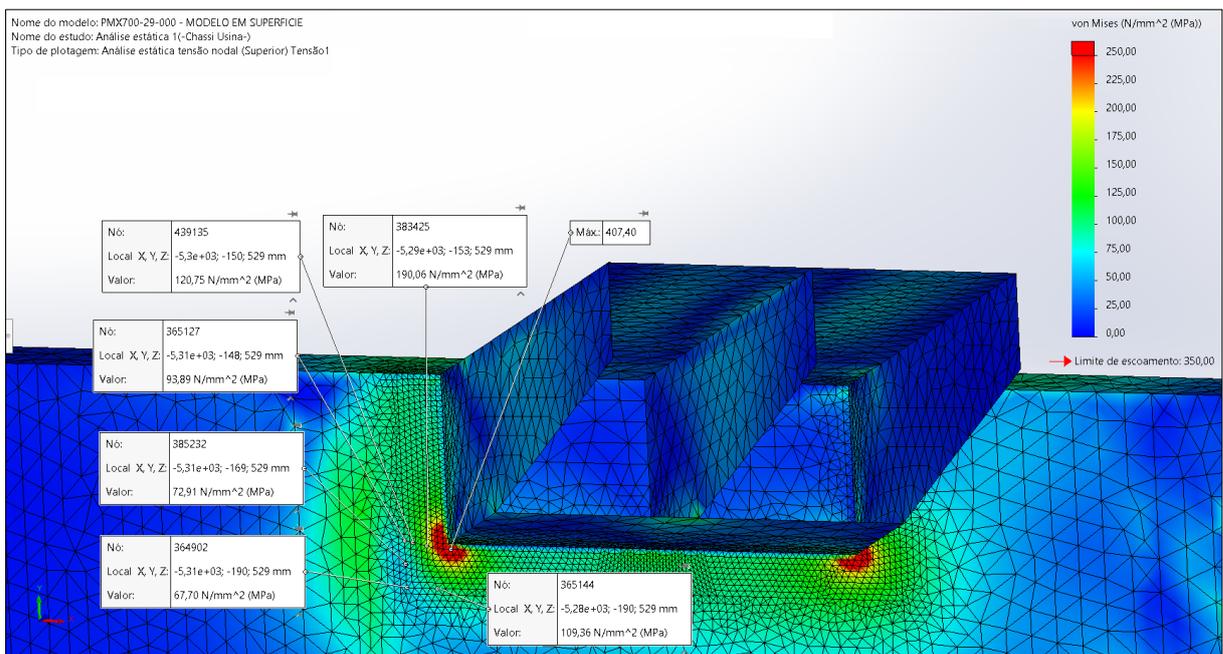
Figura 25 - Valores de Tensões Próximos ao Valor Máximo



Fonte: O autor (2021).

Realizando um refinamento na malha diminuindo o tamanho dos elementos, pode-se perceber um comportamento de elevação da tensão máxima no ponto. Tal característica no valor máximo de tensão encontrado próximo a quina, sugere uma singularidade numérica (Figura 26).

Figura 26 - Refinamento da Malha na Região de Maiores Tensões

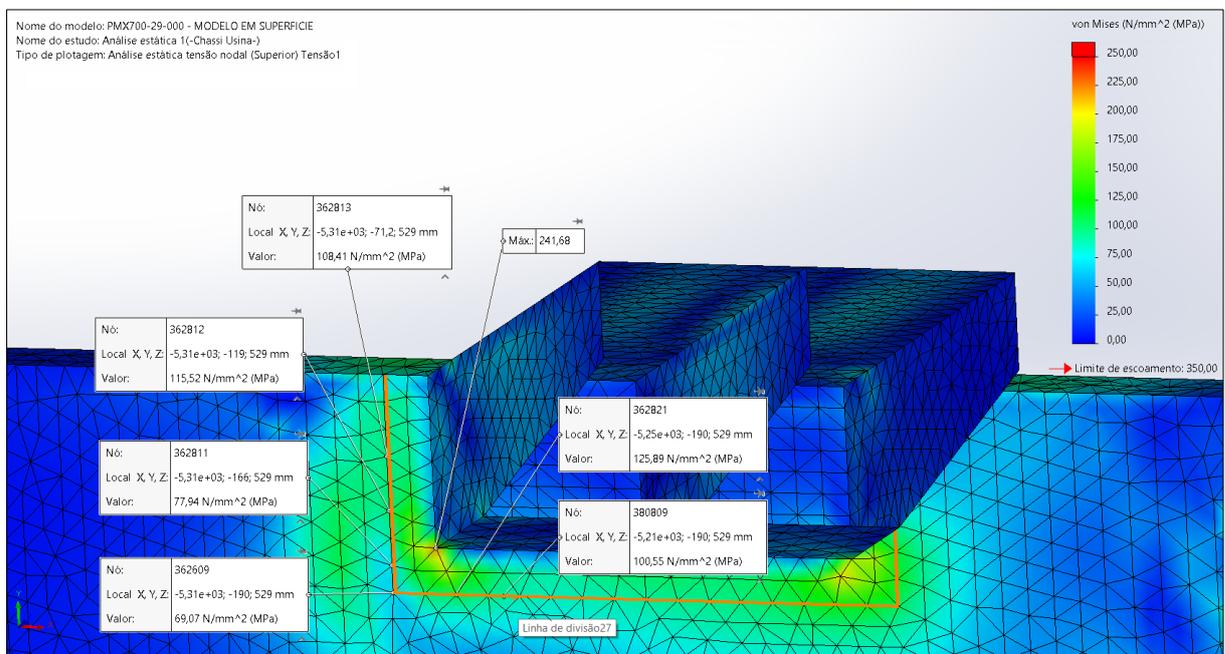


Fonte: O autor (2021).

Para efeito de considerações, esse valor máximo de tensão será desconsiderado da simulação, aceitando o princípio de Saint Venant. Este estabelece que em regiões localizadas próximas às aplicações de carga ou restrições, o nível de tensão na peça atinge valores elevados. Tais valores se difundem na medida em que se afastam dessas regiões, tendendo ao valor médio de tensão (HIBBELER, 2004).

Sendo assim, elaborou-se uma linha de divisão, de modo que os valores coletados para o Estudo de Projeto fossem apenas os pontos localizados na segunda “camada de elementos” afastados da singularidade, onde os valores de tensão se mostraram estáveis frente ao refinamento da malha, como mostra a Figura 27.

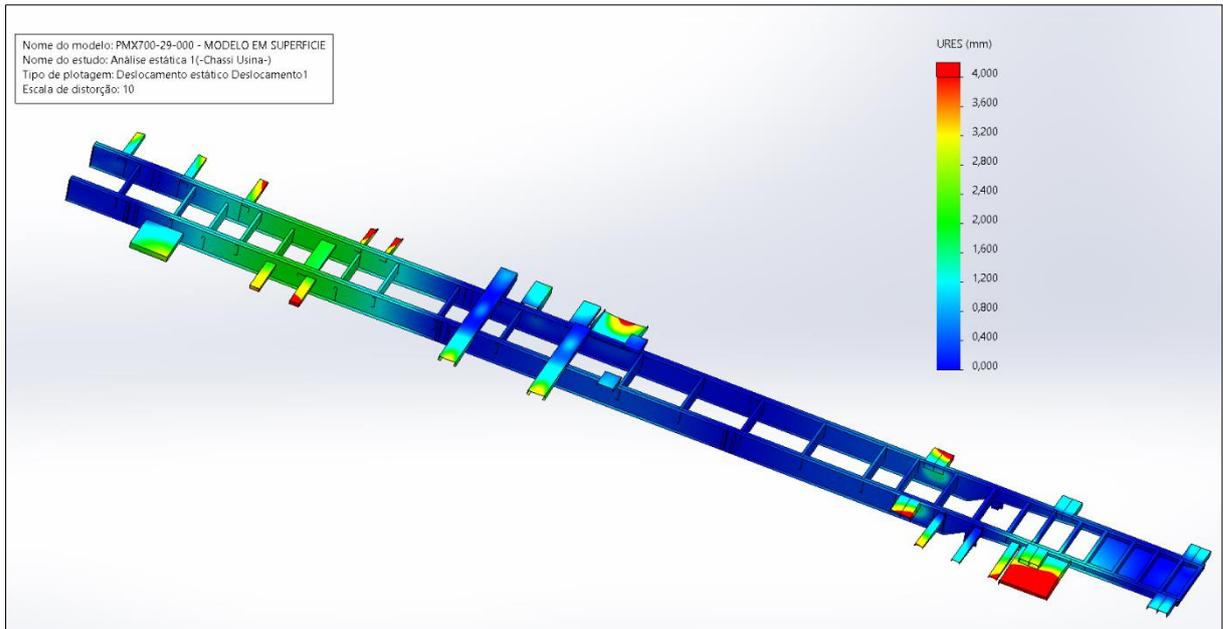
Figura 27 - Valores Coletados Afastados da Singularidade



Fonte: O autor (2021).

Além da análise de tensões equivalentes de von Mises, através da Figura 28, podem ser evidenciados os deslocamentos originados no implemento. Pode-se perceber que os valores máximos encontrados foram aproximadamente de 4 mm de deslocamento, porém não onde as maiores tensões surgiram, mas sim em suportes de componentes da Usina.

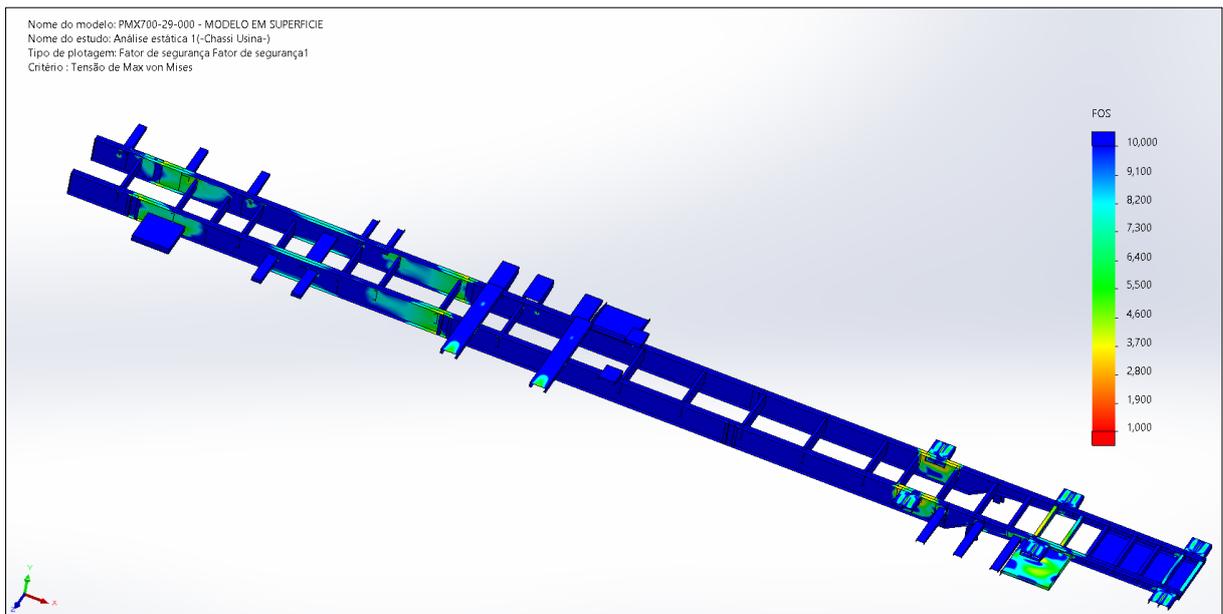
Figura 28 - Deslocamentos Máximos Encontrados



Fonte: O autor (2021).

Através da Figura 29, pode-se verificar o coeficiente de segurança atual do implemento. Percebeu-se que os valores mínimos estavam demarcados nas regiões de singularidade. De forma geral, percebeu-se que a estrutura possuía altos valores de coeficiente de segurança nas longarinas e alguns suportes para os carregamentos aos quais é empregado.

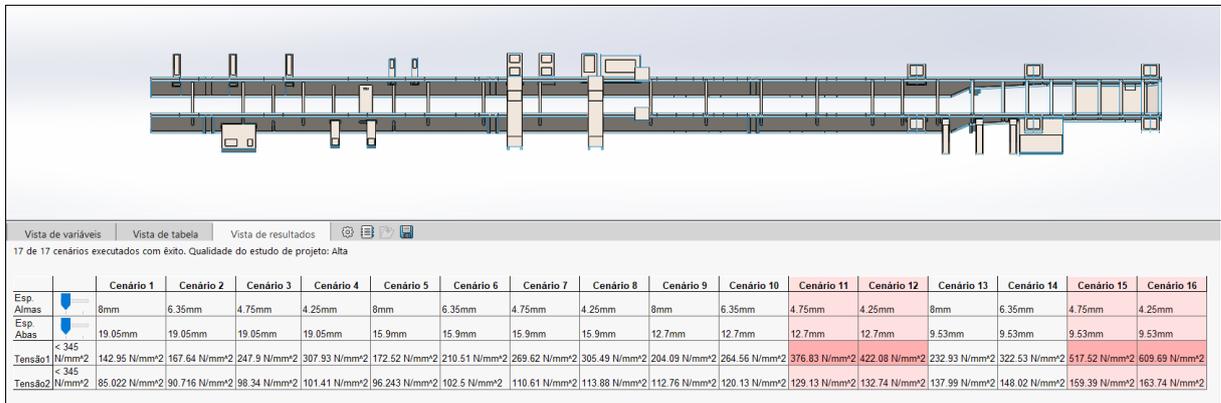
Figura 29 - Fator de Segurança do Implemento



Fonte: O autor (2021).

Executando-se o Estudo de Projeto, dentre 16 cenários originados, pode-se encontrar validações e desaprovações as condições propostas (Figura 30).

Figura 30 - Resultados do Estudo de Projeto



Fonte: O autor (2021).

Comparando-se os resultados da otimização, pode-se verificar a influência na alteração das espessuras das chapas do modelo e os resultados de tensão de von Mises encontrados. Os resultados podem ser vistos através do Quadro 3:

Quadro 3 - Resultados dos Cenários de Otimização

Nome do componente	Unidades	Cenário 1 (atual)	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Esp. Almas	mm	8,00	6,35	4,75	4,25	8,00	6,35	4,75	4,25
Esp. Abas	mm	19,05	19,05	19,05	19,05	15,90	15,90	15,90	15,90
Massa Total	kg	3867,09	3641,30	3422,40	3353,90	3597,86	3372,07	3153,10	3084,70
Sensor Tensão Almas	MPa	142,95	167,64	247,90	307,93	172,52	210,51	269,62	305,49
Sensor Tensão Abas	MPa	85,02	90,72	98,34	101,41	96,24	102,50	110,61	113,88

Nome do componente	Unidades	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16
Esp. Almas	mm	8,00	6,35	4,75	4,25	8,00	6,35	4,75	4,25
Esp. Abas	mm	12,70	12,70	12,70	12,70	9,53	9,53	9,53	9,53
Massa Total	kg	3324,36	3098,60	2833,72	2564,51	3053,40	3037,52	2765,74	2496,52
Sensor Tensão Almas	MPa	204,09	264,56	376,83	422,08	232,93	322,53	517,52	609,69
Sensor Tensão Abas	MPa	112,76	120,13	129,13	132,74	137,99	148,02	159,39	163,74

Fonte: O autor (2021).

4.2 ADEQUAÇÃO AOS PADRÕES COMERCIAIS

Tendo-se os valores de tensão dos cenários propostos definidos, pode-se fazer a validação de cada cenário em função de cada tipo de aço estrutural que poderia ser aplicado. O Quadro 4 apresenta a validação de cenários em função do tipo de aço estrutural escolhido:

Quadro 4 - Validação dos Cenários em Função dos Tipos de Aços Estruturais

Material	Limite de Escoamento (MPa)	Tensões (MPa)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
ASTM A283 Gr.D	230	Almas	142,95	167,64	247,9	307,93	172,52	210,51	269,62	305,49
		Abas	85,02	90,72	98,34	101,41	96,24	102,5	110,61	113,88
ASTM A36	250	Almas	142,95	167,64	247,9	307,93	172,52	210,51	269,62	305,49
		Abas	85,02	90,72	98,34	101,41	96,24	102,5	110,61	113,88
ASTM A572 Gr. 50	345	Almas	142,95	167,64	247,9	307,93	172,52	210,51	269,62	305,49
		Abas	85,02	90,72	98,34	101,41	96,24	102,5	110,61	113,88

Material	Limite de Escoamento (MPa)	Tensões (MPa)	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16
ASTM A283 Gr.D	230	Almas	204,09	264,56	376,83	422,08	232,93	322,53	517,52	609,69
		Abas	112,76	120,13	129,13	132,74	137,99	148,02	159,39	163,74
ASTM A36	250	Almas	204,09	264,56	376,83	422,08	232,93	322,53	517,52	609,69
		Abas	112,76	120,13	129,13	132,74	137,99	148,02	159,39	163,74
ASTM A572 Gr. 50	345	Almas	204,09	264,56	376,83	422,08	232,93	322,53	517,52	609,69
		Abas	112,76	120,13	129,13	132,74	137,99	148,02	159,39	163,74

Fonte: O autor (2021).

Podendo-se analisar os diferentes resultados obtidos para cada material, percebe-se que alguns cenários são invalidados pelo limite de escoamento mínimo ser inferior à um valor de tensão encontrado na alma ou na aba da longarina. Contudo, em um mesmo cenário, porém com outra escolha de material, este se torna uma possibilidade válida. Sendo o cenário 1 o estado inicial do modelo, através do Quadro 5 podem ser vistos os possíveis resultados de redução de massa obtidos com coeficiente de segurança da estrutura ≥ 1 para o Aço ASTM A283 Gr. D.

Quadro 5 - Cenários Validados Utilizando-se o Material ASTM A283 Gr. D

Cenário 1 - Atual		Massa (kg)	Cenário 2		Massa (kg)	Cenário 5		Massa (kg)	Cenário 6		Massa (kg)
S mín alma	1,61	3867,1	S mín alma	1,37	3641,3	S mín alma	1,33	3597,9	S mín alma	1,09	3372,1
S mín abas	2,71		S mín abas	2,55		S mín abas	2,39		S mín abas	2,24	
Red massa %		-	Red massa %		5,84	Red massa %		6,96	Red massa %		7,39

Cenário 9		Massa (kg)
S mín alma	1,13	3324,4
S mín abas	2,04	
Red massa %		14,03

Fonte: O autor (2021).

Da mesma forma, através do Quadro 6 podem ser vistos os possíveis resultados de redução de massa obtidos com coeficiente de segurança da estrutura ≥ 1 para o Aço ASTM A36.

Quadro 6 - Cenários Validados Utilizando-se o Material ASTM A36

Cenário 1 - Atual		Massa (kg)	Cenário 2		Massa (kg)	Cenário 3		Massa (kg)	Cenário 5		Massa (kg)
S mín alma	1,75	3867,1	S mín alma	1,49	3641,3	S mín alma	1,01	3422,4	S mín alma	1,45	3597,9
S mín abas	2,94		S mín abas	2,77		S mín abas	2,54		S mín abas	2,60	
Red massa %		-	Red massa %		5,84	Red massa %		11,50	Red massa %		6,96

Cenário 6		Massa (kg)	Cenário 9		Massa (kg)	Cenário 13		Massa (kg)
S mín alma	1,19	3372,1	S mín alma	1,22	3324,4	S mín alma	1,07	3053,4
S mín abas	2,44		S mín abas	2,22		S mín abas	1,81	
Red massa %		12,80	Red massa %		14,03	Red massa %		21,04

Fonte: O autor (2021).

Por fim, através do Quadro 7 podem ser vistos os possíveis resultados de redução de massa obtidos com coeficiente de segurança da estrutura ≥ 1 para o Aço ASTM A572 Gr. 50.

Quadro 7 - Cenários Validados Utilizando-se o Material ASTM A572 Gr. 50

Cenário 1 - Atual		Massa (kg)	Cenário 2		Massa (kg)	Cenário 3		Massa (kg)	Cenário 4		Massa (kg)
S mín alma	2,41	3867,1	S mín alma	2,06	3641,3	S mín alma	1,39	3422,4	S mín alma	1,12	3353,9
S mín abas	4,06		S mín abas	3,83		S mín abas	3,51		S mín abas	3,40	
Red massa %		-	Red massa %		5,84	Red massa %		11,50	Red massa %		13,27
Cenário 5		Massa (kg)	Cenário 6		Massa (kg)	Cenário 7		Massa (kg)	Cenário 8		Massa (kg)
S mín alma	2,00	3597,9	S mín alma	1,64	3372,1	S mín alma	1,28	3153,1	S mín alma	1,13	3084,7
S mín abas	3,59		S mín abas	3,37		S mín abas	3,12		S mín abas	3,03	
Red massa %		6,96	Red massa %		12,80	Red massa %		18,46	Red massa %		20,23
Cenário 9		Massa (kg)	Cenário 10		Massa (kg)	Cenário 13		Massa (kg)			
S mín alma	1,69	3324,4	S mín alma	1,30	3098,6	S mín alma	1,48	3053,4			
S mín abas	3,06		S mín abas	2,87		S mín abas	2,50				
Red massa %		14,03	Red massa %		19,87	Red massa %		21,04			

Fonte: O autor (2021).

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma vez conhecido o comportamento inicial da estrutura frente aos deslocamentos, tensões e coeficiente de segurança mínimo, fez-se imprescindível para análise dos resultados e escolha de uma nova melhor condição, definir junto à empresa um coeficiente de segurança mínimo para a validação das propostas. Desta maneira, o setor de engenharia do grupo Margui e Plamex, em consenso e com base em aplicações semelhantes para implementos rodoviários de usinas de asfalto desenvolvidos por empresas parceiras no passado, estipulou este como valor mínimo de 1,3 sob o limite de escoamento do material.

Visando ainda a comparação de custo em função das reduções de massa encontradas através das simulações, faz-se importante denotar que, de acordo com a disponibilidade de material encontrado no mercado de chapas e bobinas, eventualmente a empresa opta pela alteração do aço estrutural na construção do implemento. Desta forma, a análise de resultados foi feita comparando uma situação de custo inicial e final, para cada material aplicado.

Também é importante ressaltar, que os cálculos de custos do chassi foram feitos apenas comparando a massa do implemento em termos globais de toda a estrutura (longarinas e demais suportes metálicos). Sendo assim, custos vinculados à impostos governamentais de compra e

venda, custos de processos de manufatura e fretes, e demais componentes da usina e do implemento que foram suprimidos para realização do estudo, aqui não se fazem presentes.

Buscando nos dados da base de custos de matérias primas da empresa, e escolhendo o cenário de maior redução de massa, porém preservando o coeficiente de segurança mínimo, pode ser visto através do Quadro 8, que o melhor resultado encontrado para o Aço ASTM A283 Gr. D é cenário de número 5:

Quadro 8 - Melhor Resultado Encontrado para o Aço ASTM A283 Gr. D

Cenário 1 - Atual ASTM A283 Gr. D		Massa (kg)	Custo Aço (R\$/kg)	Custo Atual (R\$)	Cenário 5 ASTM A283 Gr. D		Massa (kg)	Redução (kg)	Custo Aço (R\$/kg)
S mín alma	1,61	3867,1	10,66	41.223,18	S mín alma	1,33	3597,9	269,2	10,66
S mín abas	2,71				S mín abas	2,39			
					Red massa (%)	6,96	Red custo (R\$)	2.869,99	
					Valor final com Red (R\$)		38.353,19		
					S mín alma		1,33		
					S mín abas		2,39		

Fonte: O autor (2021).

Através do Quadro 9, percebe-se que assim como para o material anterior, para o Aço ASTM A36 o cenário de número 5 continua sendo a melhor opção a se escolher:

Quadro 9 - Melhor Resultado Encontrado para o Aço ASTM A36

Cenário 1 - Atual ASTM A36		Massa (kg)	Custo Aço (R\$/kg)	Custo Atual (R\$)	Cenário 5 ASTM A36		Massa (kg)	Redução (kg)	Custo Aço (R\$/kg)
S mín alma	1,75	3867,1	9,40	36.350,65	S mín alma	1,45	3597,9	269,2	9,40
S mín abas	2,94				S mín abas	2,60			
					Red massa (%)	6,96	Red custo (R\$)	2.530,76	
					Valor final com Red (R\$)		33.819,88		
					S mín alma		1,45		
					S mín abas		2,60		

Fonte: O autor (2021).

Diferentemente dos materiais anteriores, para o Aço ASTM A572 Gr. 50 surge uma oposição entre a relação coeficiente de segurança X redução de massa. Para os casos anteriores, os primeiros cenários que superaram o valor mínimo de 1,3 estipulado (cenário 5) foram

coincidentalmente os de maiores reduções de massa, sugerindo que, quando menor o coeficiente de segurança, maior a redução de custo do equipamento.

Contudo, através do Quadro 10, percebe-se que o cenário 10 é aceito pelo menor coeficiente de segurança válido, porém não é o cenário que propõe a maior redução de custo. Portanto, para tal material, o cenário 13 se torna o mais adequado, pois, além de ser o de maior redução de massa, ainda propõe um coeficiente de segurança mais elevado se comparado ao cenário 10.

Quadro 10 - Melhores Resultados Encontrados para o Aço ASTM A572 Gr. 50

Cenário 1 - Atual ASTM A572 Gr. 50		Massa (kg)	Custo Aço (R\$/kg)	Custo Atual (R\$)
S mín alma	2,41	3867,1	11,30	43.698,12
S mín abas	4,06			

Cenário 10 ASTM A572 Gr. 50		Massa (kg)	Redução (kg)	Custo Aço (R\$/kg)
S mín alma	1,30	3098,6	768,5	11,30
S mín abas	2,87			
Red massa (%)		19,87	Red custo (R\$)	8.683,94

Cenário 13 ASTM A572 Gr. 50		Massa (kg)	Redução (kg)	Custo Aço (R\$/kg)
S mín alma	1,48	3053,4	813,7	11,30
S mín abas	2,50			
Red massa (%)		21,04	Red custo (R\$)	9.194,70

Valor final com Red (R\$)		34.503,42
S mín alma	1,48	
S mín abas	2,50	

Fonte: O autor (2021).

De maneira geral, dentre os cenários escolhidos, e levando-se em consideração o custo das matérias primas, a aplicação com o Aço ASTM A36 utilizando o cenário de número 5, é a que melhor se enquadra como nova possibilidade de manufatura deste implemento.

5 CONCLUSÃO

Ao término deste estudo, foi possível compreender o comportamento da estrutura na condição de aplicação na obra, e como ela é requerida frente aos carregamentos impostos. Mais do que apenas realizar uma análise estrutural, toda a pesquisa e embasamento feitos durante este trabalho também desencadearam novos aprendizados.

Aprendendo a utilizar os recursos de simulação do *software* SolidWorks, foi possível com uma ferramenta até então pouco explorada pela empresa, desenvolver um estudo modelo para futuras aplicações. Além dos novos conhecimentos para o setor de engenharia das empresas, também conseguiu-se alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

Conhecendo o funcionamento da usina, através da simulação computacional, a análise estrutural e a otimização geométrica nas longarinas do chassi puderam ser alcançadas. Através da discretização do sistema e utilização de um modelo em superfícies e elementos de casca, uma malha de elementos finitos com cerca de 318 mil elementos foi gerada para aplicação do método. Resultando em valores de tensão máximos de 142 MPa nas almas e 85 MPa nas Abas, além de uma deformação máxima de 4 mm nos suportes, o projeto atual foi validado.

Uma vez definido o procedimento de análise e verificação dos resultados da simulação para a condição inicial, estipulou-se a função objetivo de redução de massa, para novas possibilidades de otimização. Nesta, valores discretos de espessuras de chapas comerciais foram aplicados para as abas e almas das longarinas, variando nas espessuras de 4,25, 4,75, 6,35, 8,00, 9,53, 12,70, 15,90 e 19,05 mm, onde surgiram cenários de variadas espessuras para cada tipo de aço estrutural, alcançando-se redução de massa.

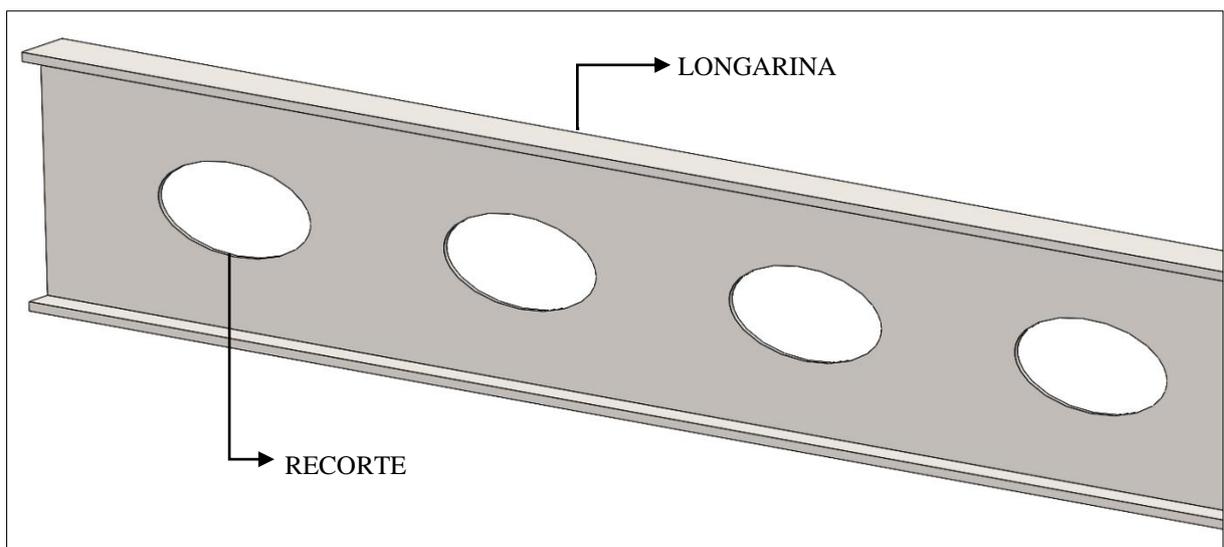
Definido pela engenharia da empresa e atribuído um coeficiente de segurança mínimo de 1,3 para validação da análise, puderam-se encontrar 4 cenários de otimização para o Aço ASTM A283 Gr. D, 6 cenários para o Aço ASTM A36 e 10 cenários para o Aço ASTM A572 Gr. 50. Dentre tais cenários, frente a condição inicial para ele, encontrou-se a maior redução de massa de 21,04 % para o ASTM A572 Gr. 50. Em termos de custos do equipamento, ainda, o melhor cenário encontrado manteve-se com o Aço ASTM A36 resultando em uma redução massa de 6,96 %.

6 TRABALHOS FUTUROS

Dentre os resultados encontrados, poder-se-ia ainda desenvolver um estudo pensando em mesclar materiais, entre as abas e almas das longarinas. Uma vez verificado que, na análise estática, as maiores solicitações estão nas almas que possuem maiores valores de tensões, uma alternativa seria manter um material de maiores propriedades mecânicas para este, e nas abas, onde a solicitação é menor, utilizar-se outro de menores propriedades. Tal proposta, ainda, iria requerer análise de processo, principalmente no que diz respeito à soldagem, além de um estudo de custos mais apurado para de fato validar a viabilidade. Além de alternar materiais entre aba e alma, espessuras para o mesmo componente de acordo com a requisição em determinadas regiões, também poderiam ser trabalhadas, diminuindo espessuras em pontos de menores cargas.

Além das comparações de materiais e espessuras propostas pela otimização geométrica, outra possibilidade de redução de massa a ser explorada seria a criação de “vazios” ou recortes definidos na estrutura, através da otimização dimensional (Figura 31). Como visto, os coeficientes de segurança mostraram-se elevados em grandes partes da estrutura, logo existe possibilidade de estudo neste campo. Contudo, novamente entra a necessidade de validação por processo, e real redução de custos, uma vez que, tal material removido deveria remeter aproveitamento para outras aplicações, para assim se tornar viável financeiramente à empresa.

Figura 31 - Criação de Recortes na Estrutura com Otimização Dimensional

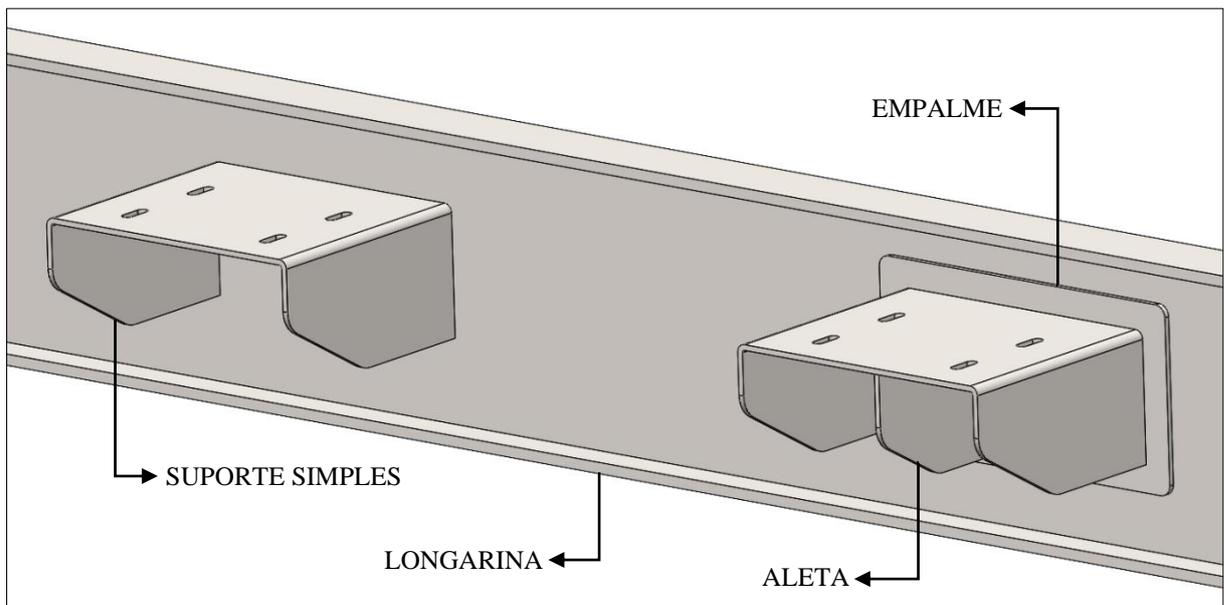


Fonte: O autor (2021).

Comparando-se os deslocamentos encontrados nas longarinas do chassi com os demais suportes, percebeu-se que os carregamentos originaram maiores deformações nos suportes de componentes que nas próprias longarinas. Na prática, tal efeito de deslocamento pode causar fraturas por fadiga em situações cíclicas de carga e descarga de material, na Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelos processos de soldagem. Ainda, por mais que esse efeito não tenha sido evidenciado em campo até o presente momento, estes deslocamentos também podem gerar desalinhamento dos componentes comprometendo algum funcionamento mecânico da usina, ou mesmo tendo efeito estético negativo para o produto.

Como possibilidade para minimização destes deslocamentos e tal efeito de fratura da ZTA, pode-se adicionar empalmes e aletas de reforço nos suportes, ao invés de soldar um suporte simples diretamente na longarina. Desta forma, aumentara-se a área de contato bem como a rigidez do suporte, amenizando estes efeitos, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 - Empalme e Aleta de Reforço para Suportes Simples



Fonte: O autor (2021).

Evidenciado também, através deste estudo, a influência dos posicionamentos das travessas junto às deformações geradas nas longarinas pela ação das cargas dos subconjuntos da usina. Para trabalhos futuros pode-se adequar o posicionamento delas em regiões mais propensas a torções e deslocamentos, minimizando assim tais efeitos.

Deve-se ter em mente que este estudo abordou apenas a situação estática do implemento, onde a condição de transporte foi desconsiderada. Para assegurar mudanças e geração do

primeiro protótipo otimizado, algumas abordagens podem ser realizadas para simular a condição dinâmica do implemento.

Uma análise modal é um estudo das propriedades dinâmicas de estruturas lineares. Essas propriedades dinâmicas incluem frequências de ressonância (também chamadas de "frequências naturais") e os modos (ou "modos próprios") de vibrar. As propriedades dinâmicas dependem da massa, rigidez e distribuição de atenuação na estrutura, e determinam o comportamento de vibração estrutural quando expostas a cargas operacionais. Desta forma, se faz possível conhecer melhor o comportamento da estrutura para todas as condições de funcionamento e operação, prolongando a vida do equipamento.

Por fim, vinculado aos estudos de simulações dinâmicas para o implemento, pode-se realizar um trabalho experimental de extensometria com a utilização de sensores do tipo *strain gages*, avaliando as condições de carga em vazio, e na situação de operação. Com as respostas frente aos carregamentos, comparar os valores práticos de tensões e deformações com os resultados obtidos através das simulações, validando as mesmas.

REFERÊNCIAS

- ABEDA. **Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto**. Rio de Janeiro, 2010. Versão on-line. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/mercado/#mercado-evolucao>. Acesso em: 09 mar. 2021.
- AÇOS CONTINENTE. **Produtos**. Umbaré, 2021. Disponível em: <http://www.acoscontinente.com.br/#>. Acesso em: 11 maio 2021.
- AÇOS PORTE. **Aço ASTM A572**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.acosporte.com.br/aco-astm-a572>. Acesso em: 10 maio 2021.
- ALLGAYER, Alexandre André. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta de aço astm a36 soldado pelo processo de arco submerso (saw) com diferentes aportes térmicos**. 2017. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica - Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2017.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007. 294 p. ISBN 97887571947412.
- ANDRADE, E. J. S. D. **Modelação e análise estática e dinâmica em componentes estruturais de um automóvel de competição**. Portugal. 2011. 111 p. Dissertação de mestrado - Universidade do Minho, Escola de engenharia.
- ASFALTO DE QUALIDADE. **Usinas de asfalto: Tópicos Importantes**. 2019. Versão on-line. Disponível em: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com/2019/03/usina-de-asfalto-topicos-importantes.html>. Acesso em: 07 abril 2021.
- AZEVEDO, A. F. M. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. **Método dos elementos finitos**, 2003. Disponível em: <www.fe.up.pt/~alvaro>. Acesso em: 05 jun. 2021.
- BATHE, K.-J. **Finite element procedures**. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996. ISBN 0133014584
- BEER, F. P.; JR., E. R. J.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2021. ISBN 978-65-5804-009-5.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O.. **Topology optimization: Theory, methods and applications**. Berlin: Springer, 2002. 370 p.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008.
- CASCINI, Gaetano et al. **Systematic Design Through the Integration of TRIZ and Optimization Tools**. Elsevier, 2011.
- CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA. **Como Funciona uma Usina de Asfalto**. 2018. Versão on-line. Disponível em: <https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2018/04/30/como-funciona-uma-usina-de-asfalto/>. Acesso em: 11 mar. 2021.

CNT. **Malha Rodoviária Pavimentada**. 2020. Versão on-line. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2020/Rodoviario/1-3-1-1-2-/Malha-rodovi%C3%A1ria-pavimentada>. Acesso em: 18 mar. 2021.

COMEX STAT. **Exportação e Importação Geral**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 23 mar. 2021.

COUTINHO, Karilany Dantas. **Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

CURY, Alexandre. **Critérios de falha**. Versão 2018. MAC, UFJF. Juiz de Fora, 2018.

DEWES, Emerson. Emerson Dewes: Depoimento [abr. 2021]. Entrevistador: M. Pezzi. Vale Real, 2021.

DNIT. **2. Limites Legais**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/qfv%20pdf.pdf>. Acesso em: 07 abril 2021.

ESSS. **Método dos Elementos Finitos: o que é?**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 10 jun. 2021.

FACCHINI S/A. **Produtos Semirreboque Carga Seca**. Votuporanga, 2021. Disponível em: <https://www.facchini.com.br/produto/semirreboque-cargaseca>. Acesso em: 11 maio 2021.

FEITEP. **Flexão em Vigas e Projeto de Vigas – Apostila**. Versão on-line. Disponível em: <https://4semestrecivil.files.wordpress.com/2015/02/apostila-flexc3a3o-em-vigas.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2021.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **A First Course in Finite Elements**. Chichester, England: John Wiley & Sons Inc., 2007.

GUIA DA ENGENHARIA. **Entenda o que é um Pavimento Asfáltico**. 2019. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-asfaltico/>. Acesso em: 18 abril 2021.

HAFTKA, Raphael T.; GÜRDAL, Zafer. **Elements of Structural Optimization**. 3. ed. Blacksburg: Kluwer Academic Publishers, 1992.

HEARN, E. J. **Mechanics of Materials 2: the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials**. 3. ed. Johannesburg: Elsevier, 1997.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 670 p. ISBN 8587918672.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN 978-85-7605-373-6

INFOESCOLA. **Propriedades Mecânicas**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/propriedades-mecanicas/>. Acesso em: 12 jun. 2021.

Infraestrutura rodoviária: tendência de crescimento para os próximos anos. **Construa Negócios**, 2020. Disponível em: <https://revistaconstrua.com.br/noticias/principal/infraestrutura-rodoviaria-tendencia-de-crescimento-para-os-proximos-anos/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

LIAOYUAN MACHINERY. **Usina de Asfalto Supermóvel CMB**. Nanyang, 2021. Disponível em: <https://www.lyroad.com/cmb-integrated-mobile-asphalt-plant.html>. Acesso em: 12 maio 2021.

LIBRELATO. **Reboque ou Semirreboque: qual a diferença?**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <https://www.librelatoconsorcio.com.br/blog/reboque-ou-semirreboque>. Acesso em: 25 abril 2021.

LUBLINER, J. **Plasticity Theory**. New York: Macmillan Publishing Company, 1990.

MACEDO, Leandro. **Notas de aula disciplina Estruturas Mecânicas e de Veículos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Versão 2020. São Paulo, 2020.

MARGUI ENGENHARIA. Base de dados de Projetos e obras de clientes. Flores da Cunha, 2021.

MARGUI ENGENHARIA. Catálogo de produtos. Flores da Cunha, 2021. Disponível em: http://www.margui.com.br/catalogo_margui.pdf. Acesso em: 06 abril 2021.

Margui Engenharia de Equipamento adquire empresa de tanques de armazenamento. **M&T Mercado e Tecnologia**, São Paulo, 2020. Disponível em: <http://revistamt.com.br/Noticias/Exibir/margui-engenharia-de-equipamento-adquire-empresa-de-tanques-de-armazenamento>. Acesso em: 23 mar. 2021.

MAIA, João Paulo Ribeiro. **Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver**. 2009. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARQUES, Geraldo Luciano De Oliveira. **Notas de aula disciplina Pavimentação**. Versão 2018. Juiz de Fora, 2018.

MATWEB. **Aço ASTM A283, grau D**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=caff8670b59f4e0ca206dc37e25ce051&ckck=1>. Acesso em: 05 dezembro. 2021.

MATWEB. **Aço ASTM A36, chapa**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6>. Acesso em: 10 maio 2021.

MATWEB. **Aço ASTM A572, grau 50**. 2021. Versão on-line. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9ced5dc901c54bd1aef19403d0385d7f>. Acesso em: 10 maio. 2021.

NEW ROADS CONSULTORIA. **Usinas de Asfalto: Tecnologia e Aplicação**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://newroads.com.br/usinas-de-asfalto-tecnologia-e-aplicacao/>. Acesso em: 31 mar. 2021.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931 p. ISBN 9788536302737.

NORTON R. L. **Projeto de Máquinas. Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8260-023-8

O que é torção Estrutural?. **FlatOut**, 2014. Disponível em: <https://flatout.com.br/rigidez-a-torca-o-que-raios-e-isso/>. Acesso em: 16 maio 2021.

PALMEIRA IMPLEMENTOS. **Semirreboque Reto**. Joinville, 2021. Disponível em: <https://www.palmeiraimplementos.com.br/produto/3>. Acesso em: 10 maio 2021.

PANAGANT, N.; PHOLDEE, N.; BUREERAT, S.; KAEN, K.; RIZA, A.; SADIQ, M.; YILDIZ, A. R.; **Seagull optimization algorithm for solving real-world design optimization problems**. International Journal. p. 640, feb. 2021. Department of Automotive Engineering Uludag University, Görükle, Bursa, Turkey. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/120.111529/html>. Acesso em: 13 jun. 2021

PORTAL BRASIL. **Transporte e Mapa de Rodovias**. 2020. Versão on-line. Disponível em: https://www.portalbrasil.net/brasil_transportes/. Acesso em: 11 mar. 2021.

ROADEXPERTSLA. **Conheça os Tipos de Pavimentação Asfáltica**. 2018. Disponível em: <https://www.roadexperts.com/pt-br/noticias/detalhes/conheca-os-tipos-de-pavimentacao-asfaltica#:~:text=E%20utilizam%2Dse%203%20tipos,as%20deforma%C3%A7%C3%B5es%20naturais%20do%20terreno>. Acesso em: 18 abril 2021.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p. ISBN 8536305622.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Tradução de João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

SILVA, Emílio Carlos Nelli. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. São Paulo, abr. 2002.

SILVA, J. G. S. D.; SOEIRO, J.C.P; TRIGUEIRO, G.S.; ROBERTO, M. A. R. **Análise estrutural de chassi de veículos pesados com base no emprego do programa Ansys**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2001.

SILVA, José Guilherme Santos, et. al. **Análise Estrutural de Chassis de Veículos Pesados com Base no Emprego do Programa Ansys**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SINICESP. **Usinas de Asfalto Contrafluxo**. São Paulo, 2015. Disponível em: [http://sinicesp.org.br/materias/2015/bt04a.htm#:~:text=Existem%20dois%20tipos%20conhecidos%20de,\(processo%20por%20fluxo%20cont%C3%ADnuo\).&text=1%2D%20Processo%20Descont%C3%ADnuo%3A%20S%C3%A3o%20as,por%20bateladas%2C%20tamb%C3%A9m%20chamadas%20Gravim%C3%A9tricas](http://sinicesp.org.br/materias/2015/bt04a.htm#:~:text=Existem%20dois%20tipos%20conhecidos%20de,(processo%20por%20fluxo%20cont%C3%ADnuo).&text=1%2D%20Processo%20Descont%C3%ADnuo%3A%20S%C3%A3o%20as,por%20bateladas%2C%20tamb%C3%A9m%20chamadas%20Gravim%C3%A9tricas). Acesso em: 11 abril 2021.

SINOTRUCK. **Principais partes do Semirreboque**. Jinan, 2017. Disponível em: <http://pt.chengdatrailer.com/news/main-parts-of-semi-trailer-6222066.html>. Acesso em: 01 maio 2021.

SOUZA, Remo Magalhães. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

SOUSA, T. L. C. D. **Análise estrutural estática e dinâmica de ventilador industrial**. 2011. 79 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PANNONI, Fabio Domingos. **Aços Estruturais**. 2005.

PEREIRA, A. **Projeto ótimo de pórticos planos com restrição à flambagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

PERINI, Gustavo. **Otimização paramétrica de um suporte do estepe objetivando a minimização da massa utilizando software pro/Mechanica**. 2008. 81f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

RIBEIRO, J. C. L. **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema Computacional para Simulação via Método dos Elementos Finitos do Comportamento de Estruturas de Aço e Mistas em Situação de Incêndio**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

TIETUO MACHINERY. **Usina de Asfalto com Tremonhas Integradas - Usina Fixa**. Quanzhou, 2004. Disponível em: <http://ttm-asphaltplant.com.br/4-integrated-mixing-plant.html#>. Acesso em: 24 abril 2021.

YILDIZ, B. S.; YILDIZ, A. R.; **The Harris hawks optimization algorithm, salp swarm algorithm, grasshopper optimization algorithm and dragonfly algorithm for structural design optimization of vehicle components**. International Journal. p. 744, jul. 2019. Department of Automotive Engineering Uludag University, Görükle, Bursa, Turkey. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/120.111379/html>. Acesso em: 13 jun. 2021