

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Tarcísio Augusto Santos Almeida

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NO COMPORTAMENTO
ESTRUTURAL DO CHASSI DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA USADOS NA
MINERAÇÃO À CÉU ABERTO**

Belo Horizonte

2021

Tarcísio Augusto Santos Almeida

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NO COMPORTAMENTO
ESTRUTURAL DO CHASSI DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA USADOS NA
MINERAÇÃO À CÉU ABERTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Jánes Landre Junior

Belo Horizonte

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

A447i Almeida, Tarcísio Augusto Santos
Influência das condições de operação no comportamento estrutural do chassi de caminhões fora de estrada usados na mineração à céu aberto / Tarcísio Augusto Santos Almeida. Belo Horizonte, 2021.
111 f. : il.

Orientador: Jánes Landre Junior
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Falhas estruturais. 2. Metais - Fadiga. 3. Caminhões - Manutenção e reparos. 4. Imagem tridimensional. 5. Método dos elementos finitos. 6. Simulação (Computadores). 7. Minérios de ferro. 8. Deformações e tensões. I. Landre Junior, Jánes. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 620.172.24

Tarcísio Augusto Santos Almeida

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NO COMPORTAMENTO
ESTRUTURAL DO CHASSI DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA USADOS NA
MINERAÇÃO À CÉU ABERTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. János Landre Júnior – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Claysson Bruno Santos Vimieiro – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Yukio Shigaki – CEFET-MG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 30 de julho de 2021

AGRADECIMENTOS

*À Deus, minha família, noiva e amigos:
O apoio de vocês é combustível para as minhas conquistas.*

“Ideias são commodity. Execução não é”

Michael Dell

RESUMO

Os caminhões fora de estrada utilizados na mineração operam em condições severas, transportando elevadas quantidades de material por pistas não pavimentadas durante longas jornadas de trabalho. Estas condições provocam quebras prematuras no chassi do equipamento, demandando manutenções corretivas ou até renovação antecipada de frota, trazendo prejuízos financeiros ou diminuição da produtividade da mina, devido à indisponibilidade do caminhão. Diversas variáveis operacionais como a forma de condução, o design da pista e a carga útil transportada afetam a integridade estrutural do chassi, mas há uma dificuldade em saber quais delas são mais prejudiciais, visto que atuam simultaneamente, impedindo que saibamos o efeito individual de cada uma delas. Este trabalho propõe a criação de uma metodologia de análise da integridade estrutural do chassi de um caminhão fora de estrada, submetido a diferentes variáveis operacionais, permitindo avaliar as suas influências individuais no comportamento estrutural do chassi. Utilizando os conceitos de cálculo de vida em fadiga, acúmulo de dano e dinâmica veicular, um modelo 3D de um chassi de caminhão fora de estrada comercial é submetido a diversas variáveis operacionais, através de métodos numéricos virtuais utilizando um software de simulação estrutural por mesh-free. Os resultados apresentam um mapeamento dos 40 pontos mais críticos do chassi e um ranking de falha entre eles. Além disso, este trabalho mostra uma análise comparativa de consumo de vida em fadiga provocado por diferentes variáveis operacionais como inclinações de subidas e descidas, inclinações laterais de pista (superelevação), raios de curvatura, velocidade de tráfego e balanceamento de carga útil, apresentados em forma de um ranking de prejudicialidade. Além de apresentar onde estão localizados os pontos mais críticos do chassi do caminhão fora de estrada, este trabalho também evidencia que as variáveis operacionais mais prejudiciais à estrutura são aquelas que causam maior ângulo de rolagem na carroceria. Também conclui-se que o desbalanceamento de payload mais prejudicial é o lateral, pois também provoca maiores ângulos de rolagem na estrutura e acontece mais frequentemente. O conhecimento mais claro da influência individual destas variáveis operacionais na vida útil do chassi permite que usuários e fabricantes destes caminhões avaliem melhor a criticidade de diferentes pistas de minas, criando ações de engenharia e manuais de boas práticas para atenuar os efeitos das operações mais críticas e aumentar a previsibilidade das falhas.

Palavras-chave: Caminhão fora de estrada; Integridade estrutural; Fadiga; Variável operacional.

ABSTRACT

Mining haul trucks operate in severe conditions, transporting large payloads along unpaved roads during full-day services. These conditions induce premature failures in truck's chassis, requiring corrective maintenance or even early fleet renewal, causing financial losses or decreasing mine productivity due to truck's unavailability. Several operation parameters, such as speed, road design and conditions, amount and arrangement of payload, affect the chassis structural integrity, but is difficult to know which of them are most harmful, since they act simultaneously, preventing us from knowing their individual contribution to failures. This work proposes an analysis methodology of chassis structural behavior of mining haul trucks, submitted to different operation variables, allowing the evaluation of their individual influences and harmfulness. Using concepts of fatigue life calculations, damage accumulation and vehicle dynamics, a haul truck chassis 3D model was subjected to several operational configurations, through a numerical method using a meshfree software. The results present a mapping of the 40 most critical spots in a commercial haul truck's chassis and a failure ranking between them. In addition, this work shows a comparative analysis of fatigue life consumption effect of different operation variables such as uphill and downhill grades, lateral road slope (superelevation), curvatures radii, traffic speed and payload balance, presented in a harmfulness ranking form. Besides to showing where the most critical spots are located, this work also shows that the most harmful operating variables to the structure integrity are those that cause a greater roll angle on truck's body. It is also concluded that the most harmful payload unbalance is the lateral one, as it also causes larger roll angles on the structure and are more frequently. Knowledge about the individual influence of these operation variables on the chassis service life allows truck's users and manufacturers to better evaluate the harmfulness of different mine sites, create engineering actions and good practice manuals to mitigate the effects of most injurious operations and have a better failure predictability.

Keywords: Mining haul truck, Structural integrity, Fatigue, Operation variables

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Imagem 1 - Ciclo de tensões constantes	16
Imagem 2 - Ciclo de tensões variáveis	17
Imagem 3 - Curva S-N de um aço UNS G41 300 obtido através de ensaios de fadiga axial completamente reversa	18
Imagem 4 - Fração da resistência à fadiga (f) de Sut a 10^3 ciclos	19
Imagem 5 - Diagrama de falha por fadiga de Soderberg.....	21
Imagem 6 - Carregamento de amplitude variável dividido em ciclos constantes	22
Imagem 7 - Contagem de ciclo no método rainflow	24
Imagem 8 - Exemplo de contagem de ciclos utilizando o método de rainflow.....	25
Imagem 9 - Sistema de coordenadas segundo SAE J610	26
Imagem 10 - Posicionamento longitudinal (a) e transversal (b) do C.G.	28
Imagem 11 - Variação do ângulo de rolagem em curvas	29
Imagem 12 - Posicionamento vertical do C.G.....	31
Imagem 13 - (a) Trajetória de solução MEF com elementos no sistema de coordenadas locais; (b) Trajetória de solução mesh-free com pontos nodais no sistema de coordenadas global	32
Imagem 14 - Ciclo operacional do caminhão fora de estrada em minas à céu aberto.....	36
Imagem 15 - Caminhões fora de via em operação em uma mina à céu aberto	37
Imagem 16 - Dimensões do caminhão fora de estrada.....	39
Imagem 17 – Chassi e âncora do caminhão fora de estrada	40
Imagem 18 - Trinca em chassi de caminhão fora de estrada reparada com cordões de solda .	41
Imagem 19 - Pá carregadeira realizando o carregamento de um caminhão fora de estrada....	42
Imagem 20 - Diferença de volumes formados entre o ROM (esq.) e o estéril (dir.).....	43
Imagem 21 - Distribuição ideal do peso nos eixos do caminhão quando carregado.....	44
Imagem 22 – Payload com desbalanceamento lateral (roll) e a deformação da estrutura.....	45
Imagem 23 - Marca do centro de gravidade na caçamba para guiar o carregamento	45
Imagem 24 - Praça de carregamento com piso irregular	46
Imagem 25 - Uso correto de <i>grade</i> em trechos verticais	49
Imagem 26 - Irregularidade de <i>grade</i> em uma via principal	50
Imagem 27 - Camber (crown e cross-slope) em uma pista de mineração	50
Imagem 28 - Transferência de sobrecarga (lateral) no camber	51
Imagem 29 - Estrada de mina à céu aberto com raios de curvatura aguda em rampas	52

Imagem 30 - Desenho esquemático mostrando a geometria de raio de curvatura (a) e as forças que são geradas quando há uma superelevação (b).....	53
Imagem 31 - Buraco formado por acúmulo de água	54
Imagem 32 - Ábaco de performance em inclinações de pista positiva para o caminhão 793D56	
Imagem 33 - Ábaco de performance de freio em descidas para o caminhão 793D	57
Imagem 34 - Fluxograma das atividades deste trabalho.....	59
Imagem 35 - Modelo 3D do chassi do caminhão fora de estrada.....	60
Imagem 36 - Regiões de aplicação das cargas estáticas	62
Imagem 37 - Caminhão (a) simplificado em chassi e caçamba e seus locais de acoplamento (b), totalizando 6 pontos, sendo os dois centrais apoiados em longarinas (c).....	62
Imagem 38 - Malha utilizada na análise estática da caçamba (a); resultados de tensão encontrados (b); vetores de força de reação nos 6 pontos de apoio do chassi.....	63
Imagem 39 - 6 locais do chassi onde são carregados os esforços vindos da caçamba, com enfoque para os pontos 1 e 2 onde existem os pad's de amortecimento	64
Imagem 40 - Aplicações de cargas estáticas vindas do conjunto caçamba/payload	64
Imagem 41 - Condições de restrição do chassi.....	65
Imagem 42 - Condições de amortecimento do modelo do chassi	65
Imagem 43 - Conector pino entre o corpo principal do chassi e a âncora.....	66
Imagem 44 - Dados coletados de operação real com caminhão fora de estrada	67
Imagem 45 - Fluxograma de criação do ranking dos pontos mais críticos do chassi do caminhão fora de estrada.....	68
Imagem 46 - Inclinações do caminhão para simulação estática	69
Imagem 47 - Posicionamentos de payload, sendo eles o posicionamento balanceado(a), e os desbalanceamentos diagonal (b), lateral (c), frontal (d) e traseiro(e).....	70
Imagem 48 - Mapeamento de trincas em um chassi real coletados pela técnica de ensaio por líquido penetrante	71
Imagem 49 - Pista padrão para tráfego do caminhão fora de estrada.....	73
Imagem 50 - Pista padrão, seus trechos e suas variações (pistas 1, 2 e 3), criando um ciclo completo	77
Imagem 51 - Fluxograma de estudo da influência individual das operações na integridade estrutural do chassi do caminhão.....	81

Imagem 52 - Fluxograma de criação do ranking de operações mais críticas ao chassi do caminhão fora de estrada	83
Imagem 53 - Fluxograma de avaliação do posicionamento de payload mais crítico	85
Imagem 54 - Resultado da análise estática S1 (piso plano e carregamento igualmente distribuído na caçamba) e da análise estática S8 (piso com camber 3% e carregamento desbalanceado lateralmente na caçamba)	86
Imagem 55 - Pontos críticos do chassi do caminhão fora de estrada e seus critérios	87
Imagem 56 - Ranking dos pontos críticos do chassi do caminhão fora de estrada	88
Imagem 57 - Histórico de tensões de Von Mises em alguns pontos críticos quando trafegando pela pista padrão	89
Imagem 58 - Comparativo do histórico de tensões dos 5 pontos mais críticos vs. 5 pontos menos críticos quando em tráfego pela pista padrão	90
Imagem 59 - Influência individual da inclinação da subida no comportamento estrutural do chassi	91
Imagem 60 - Influência individual da inclinação da descida no comportamento estrutural do chassi	92
Imagem 61 - Influência individual da inclinação da superelevação no comportamento estrutural do chassi	93
Imagem 62 - Influência individual da velocidade em curvas planas no comportamento estrutural do chassi	94
Imagem 63 - Influência individual do raio de curvatura no comportamento estrutural do chassi	95
Imagem 64 - Influência individual da subida reta vs. subida curva no comportamento estrutural do chassi	96
Imagem 65 - Influência individual da descida reta vs. descida curva no comportamento estrutural do chassi	97
Imagem 66 - Ranking das operações mais críticas à fadiga do chassi do caminhão.....	98
Imagem 67 - Tensões geradas no chassi por um payload balanceado.....	101
Imagem 68 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento dianteiro .	101
Imagem 69 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento traseiro ...	102
Imagem 70 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento diagonal..	103
Imagem 71 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento lateral	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas do caminhão fora de estrada	38
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos aços usados na fabricação do chassi do caminhão fora de estrada	40
Tabela 3 - Dimensões da superrelação de acordo com a velocidade e raio da curva	53
Tabela 4 - Velocidade máxima de tráfego do caminhão fora de estrada.....	55
Tabela 5 - Cargas estáticas do caminhão, suas amplitudes e pontos de aplicação	61
Tabela 6 - Simulações estáticas conduzidas no chassi	70
Tabela 7 - Variáveis operacionais de cada pista padrão	73
Tabela 8 - Simulações estáticas com aspecto dinâmico e as variáveis operacionais	78
Tabela 9 - Dez operações comumente desempenhadas pelo caminhão fora de estrada.....	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações iniciais	12
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Objetivo geral	14
1.4	Objetivos específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Fadiga	15
2.1.1	Ciclos de amplitude de tensão	16
2.1.2	Método Tensão-Vida	18
2.1.3	Critério Soderberg de falha por fadiga	20
2.1.4	Teoria do dano cumulativo	22
2.1.5	Contagem de ciclos por Rainflow	23
2.2	Dinâmica veicular.....	25
2.2.1	Sistema de coordenadas.....	26
2.2.2	Localização do centro de gravidade	27
2.3	Análise estrutural utilizando o método <i>mesh-free</i>	31
2.3.1	Análise estática	33
2.3.2	Análise dinâmica	33
2.4	Operações de lavra em minas à céu aberto	34
2.4.1	Etapas de carregamento e transporte	35
2.4.2	Operações realizadas pelo caminhão fora de estrada em minas à céu aberto.....	36
2.5	Caminhão fora de estrada e sua estrutura	37
2.5.1	Especificações do caminhão fora de estrada	38
2.5.2	Chassi do caminhão fora de estrada	39
2.6	Variáveis operacionais.....	41
2.6.1	Sobrecarga de payload.....	41
2.6.2	Distribuição de payload	43
2.6.3	Carregamento em praça irregular	46
2.6.4	Falhas na suspensão.....	47
2.6.5	Configuração da mina.....	48
2.6.6	Design, manutenção e operação nas pistas	48
3	METODOLOGIA	59
3.1	Fluxograma de atividades.....	59
3.2	Preparação do modelo 3D e configuração das simulações estruturais	60

3.2.1	Cargas estáticas e variáveis	61
3.2.2	Condições de restrição.....	64
3.2.3	Condições de amortecimento.....	65
3.2.4	Conectores	66
3.2.5	Definição das fontes excitadoras	66
3.3	Metodologia de criação do ranking dos pontos mais críticos do chassi.....	68
3.3.1	Critério para definição de um ponto crítico.....	70
3.3.2	Pista padrão	72
3.3.3	Análise estrutural e método de avaliação dos resultados	78
3.3.4	Contagem de ciclos de fadiga (rain-flow) e dano acumulativo.....	79
3.4	Metodologia de avaliação da influência individual das variáveis operacionais no comportamento estrutural do chassi	81
3.5	Metodologia de criação do ranking de operações mais críticas	83
3.6	Metodologia de definição do posicionamento de payload mais crítico	85
4	RESULTADOS.....	86
4.1	Ranking dos pontos críticos do chassi.....	86
4.2	Avaliação da influência individual das variáveis operacionais no comportamento estrutural do chassi	90
4.3	Ranking das operações mais críticas ao chassi.....	98
4.4	Definição do posicionamento de payload mais crítico ao chassi	100
5	CONCLUSÕES.....	105
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A indústria extrativa mineral brasileira desempenha papel decisivo no cenário econômico nacional, representando em torno de 1,4% do PIB entre 2018 e 2019. Sua participação é ainda mais notória no mercado externo onde, em 2018, foram exportados 409 milhões de toneladas de bens minerais, representando 36,6% do saldo comercial e 12,5% das exportações brasileiras (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM, 2020; IBRAM, 2019)

A mineração é praticada em todo o mundo, e suas técnicas de extração estão em constante evolução em prol da melhoria contínua da sua viabilidade econômica. Dentre estas técnicas, podemos destacar o estudo do método de lavra, que consiste na escolha de como será feita a exploração de um determinado depósito mineral, onde são considerados critérios geológicos, sociais, ambientais e de segurança, além da capacidade produtiva e os métodos de recuperação do minério. No Brasil, os métodos de lavra mais comuns são as minas subterrâneas e à céu aberto, sendo esta última a mais utilizada, representando 87,7% das minas nacionais (IBRAM, 2019; MACEDO; BAZANTE; BONATES, 2001)

A viabilidade econômica de uma mina é expressivamente influenciada pela disponibilidade e desenvolvimento dos equipamentos usados na extração, especialmente em minas com alta produção, por apresentarem grandes áreas, alto grau de sincronia entre ativos e controle dos seus tempos, principalmente nas etapas de carregamento e transporte. No Brasil, cerca de 30% das minas à céu aberto são de grande porte, com produção de ROM (*run-of-mine* ou minério bruto) acima de 1.000.000 ton/ano, evidenciando que a disponibilidade destes equipamentos é sinônimo de elevados faturamentos para o setor.

Outro fator decisivo na viabilidade econômica de uma mina é o preço do mineral extraído, fortemente influenciado pelo mercado externo. O minério de ferro, por exemplo, sofreu forte queda de aproximadamente 50% nos últimos 10 anos devido ao fim do ciclo da alta das commodities, provocada, especialmente, pela redução do crescimento econômico da China, maior comprador de minério de ferro do mundo (INDEX MUNDI, 2019; THE WORLD BANK, 2020) .

Esta queda, aliada à situação do cenário econômico mundial, motivou as mineradoras a buscarem estratégias para a redução dos seus custos de produção, que, dentre outras ações, busca otimizar o uso e conservação dos seus ativos e seus consumíveis. Com os recursos

financeiros reduzidos, a simples substituição de um ativo antigo por um novo embasada somente na sua vida útil, sem uma análise criteriosa, já não é mais possível, dando lugar a técnicas de manutenção melhor elaboradas e a estudos de falha, buscando uma previsibilidade mais assertiva da falha do ativo e do momento correto da sua troca.

Neste contexto, o caminhão basculante, também chamado de caminhão fora de estrada, é um importante ativo usado na mineração, responsável por transportar grandes massas, que podem chegar a 400 toneladas, por longas distâncias. Seu custo de aquisição é alto, chegando a US\$6 mi e sua vida útil é definida pela durabilidade do seu chassi, que é aproximadamente 70.000h. Durante o seu ciclo operacional, o caminhão é submetido a vários esforços causados por diferentes fontes, como a velocidade de tráfego, geometria da pista e carregamento, que induzem tensões no chassi, podendo levar ao surgimento de trincas. Estas podem comprometer a integridade estrutural do equipamento, gerando falhas prematuras e, portanto, indisponibilidade do ativo e prejuízos financeiros (SRILATHA, 2017).

Sendo assim, este trabalho aborda o estudo de alguns vários fenômenos existentes no ciclo operacional de um caminhão fora de via em mineração à céu aberto e suas influências individuais no comportamento estrutural do chassi do ativo.

1.2 Justificativa

O elevado custo de aquisição de um caminhão fora de estrada não é o único motivador para a constante busca pela sua melhor conservação e aumento da vida útil. A manutenção deste ativo também representa custos significativos na OPEX (despesas operacionais) de uma operação, sem falar nos prejuízos provocados pela sua indisponibilidade. Segundo uma grande mineradora brasileira, a etapa de transporte (onde atuam os caminhões fora de estrada), representou 39% dos custos globais da fase mina em 2018, sendo que 28% destes custos foram com gastos em manutenção. Se forem analisados os gastos com manutenção nos complexos de Itabira e Carajás desta mineradora no ano de 2018, eles representaram aproximadamente 17% dos gastos com manutenção, o que certamente representa um elevado custo para a operação.

Nas ocasiões em que ocorrem falhas estruturais do chassi dos caminhões, é preciso optar em realizar a manutenção do ativo ou a renovação da frota, dependendo da viabilidade de recuperação da falha e o capital disponível para investimento. Todas as duas alternativas estão associadas à novos custos para a operação.

Neste cenário, ter uma melhor previsibilidade e assertividade destas falhas estruturais permite que manutenções preventivas programadas e/ou investimentos em novas frotas sejam feitos com melhor planejamento, reduzindo custos. Além disso, um estudo da influência que cada condição operacional do caminhão tem sobre estas falhas estruturais, permite intervenções de engenharia em busca de atenuar estas influências, aumentando a vida útil do caminhão.

1.3 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a criação e aplicação de uma metodologia de estudo do comportamento estrutural do chassi de caminhões fora de estrada em operação nas minas à céu aberto, identificando as variáveis operacionais mais críticas à integridade estrutural do chassi e os seus pontos de falha.

1.4 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são listados abaixo:

- Dentre as várias condições de operação que o caminhão fora de estrada é submetido durante seu ciclo operacional, definir quais dessas condições são as mais severas do ponto de análise de falha estrutural no chassi.
- Definir quais os pontos do chassi do caminhão fora de estrada são mais críticos quando submetidos aos carregamentos cotidianos do uso do equipamento
- Avaliar a influência individual que as principais variáveis operacionais têm na integridade estrutural do chassi do caminhão fora de estrada
- Definir quais as operações rotineiras do caminhão são mais críticas à integridade estrutural do seu chassi
- Estudar a influência do desbalanceamento que o payload causa na integridade estrutural do chassi, definindo qual tipo de desbalanceamento é mais crítico

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O fato dos caminhões fora de estrada operarem em ciclos produtivos repetitivos nas minerações e apresentarem danos prematuros no chassi, normalmente em formas de trincas, é um forte indício de que a falha esteja ocorrendo pelo fenômeno chamado fadiga. Isto porque, a fadiga é um modo de falha que acontece quando há estas cargas cíclicas, ou seja, cargas repetidas, em amplitude iguais ou variáveis, que promovem um acúmulo de dano na estrutura, levando ao surgimento de trincas que, ao se propagarem, podem causar falhas inesperadas e catastróficas (FUCHS; STEPHENS; SAUNDERS, 2001). Sendo assim, é apresentado a seguir o conceito mais aprofundado deste fenômeno, de que modo os carregamentos contribuem para esta falha e como calculá-los.

2.1 Fadiga

O projeto de qualquer equipamento, independente do seu tamanho e função, compreende em criar designs e escolher materiais e processos de fabricação para que os componentes deste equipamento desempenhem as suas funções de forma efetiva durante um determinado tempo (vida do produto). Para atingir esta vida, o projetista precisa prever modos de falha aos quais o equipamento será submetido durante sua operação, criando uma estrutura capaz de resistir a estes fenômenos.

Em equipamentos com estruturas metálicas deformáveis, o projetista deve prever os mecanismos de falha por deformações elásticas e inelásticas, ou seja, variações de geometria em regime elástico ou ainda as deformações permanentes que acontecem quando o limite de tensão de escoamento do material é ultrapassado. Porém, mesmo que não seja atingida a tensão de escoamento, a estrutura pode vir a falhar quando há a presença de carregamentos repetidos, em um fenômeno conhecido como fadiga (GRANDT, 2004).

Segundo Dowling (2013), os carregamentos cíclicos podem ser de quatro categorias diferentes, dependendo da sua fonte, conforme abaixo:

- a) Cargas estáticas: Não variam de amplitude no tempo e estão continuamente presentes;
- b) Cargas de trabalho: Variam de amplitude ao longo do tempo de acordo com a operação do equipamento;
- c) Cargas vibratórias: São promovidas pelo ambiente de trabalho ou por efeitos secundários de funcionamento do equipamento, e normalmente se apresentam em alta frequência.
- d) Cargas acidentais: Eventos raros que ocorrem em circunstâncias anormais de operação.

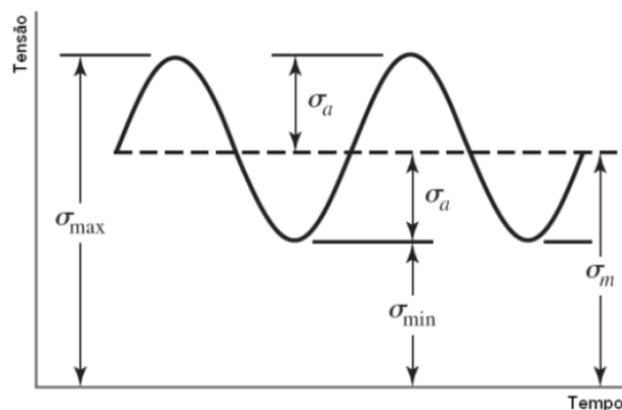
As cargas de trabalho e as cargas vibratórias são os ciclos de cargas que contribuem mais para as falhas por fadiga. Por outro lado, caso as cargas estáticas sejam elevadas, os danos causados por fadiga costumam ter proporções bem maiores. Já as cargas acidentais, embora mais raras, também podem contribuir pra estas falhas por fadiga, ou pelo dano de um componente individual do equipamento (DOWLING, 2013). Hertzberg (1996) afirma que os componentes mecânicos precisam resistir à estas diversas cargas aplicadas, e em suas numerosas direções, inclusive com reversões de sentido, durante suas vidas úteis.

O processo de fadiga ocorre em três fases distintas: A primeira é a nucleação da trinca, etapa de iniciação da trinca por alguma incrustação no material, pontos de concentração de tensão, etc. Logo em seguida, inicia-se a etapa de propagação da trinca, onde a trinca caminha por direções definidas. E por fim, no terceiro estágio, ocorre um crescimento rápido e instável da trinca, que leva a sua ruptura total. Este trabalho não pretende detalhar os estágios de fadiga e propagação de trincas no chassi dos caminhões fora de estrada, mas descobrir como as variáveis operacionais contribuem para a geração deste fenômeno na estrutura. Serão abordados neste estudo quais as cargas cíclicas que uma determinada variável operacional pode provocar no chassi, e qual a contribuição dela para levar a estrutura à fadiga.

2.1.1 Ciclos de amplitude de tensão

Os cenários onde existam equipamentos sob a influência de carga cíclicas podem ser bastante diferentes. Existem equipamentos que serão submetidos a cargas simples e repetitivas, que criam os chamados ciclos de tensão constante, conforme mostrado na imagem 1.

Imagem 1- Ciclo de tensões constantes



Fonte: (MARTINS, 2013)

Os ciclos de carregamento poderão ser definidos em função das suas tensões máximas e mínimas, onde serão calculados parâmetros que caracterizam este carregamento e auxiliam na comparação a outros. Estes parâmetros estão listados abaixo:

- Tensão média (σ_m) – Média aritmética entre tensão máxima e tensão mínima;

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (1)$$

- Tensão alternada (σ_a) – Metade da diferença entre tensão máxima e tensão mínima;

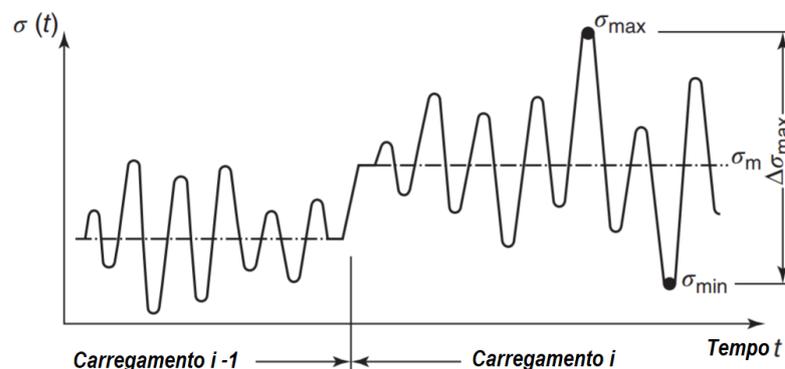
$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \quad (2)$$

- Razão de carregamento (R) – Razão entre tensão mínima e tensão máxima (equação 3);

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (3)$$

Por outro lado, a maioria das aplicações sob carregamentos cíclicos ocorre de forma extremamente aleatória, tanto em amplitude quanto em frequência, criando os ciclos de tensão variáveis, onde as ondas de carregamentos não são senoidais, conforme imagem 2. Porém, a aleatoriedade das cargas pode apresentar porções de carregamento mais determinístico, criando padrões que se repetem. Por exemplo, nos caminhões fora de estrada, os carregamentos são extremamente dinâmicos e randômicos, mas eles acabam se repetindo, já que o caminhão cumpre etapas repetitivas ao longo da sua jornada durante o dia, como será descrito nas próximas sessões deste trabalho

Imagem 2 - Ciclo de tensões variáveis



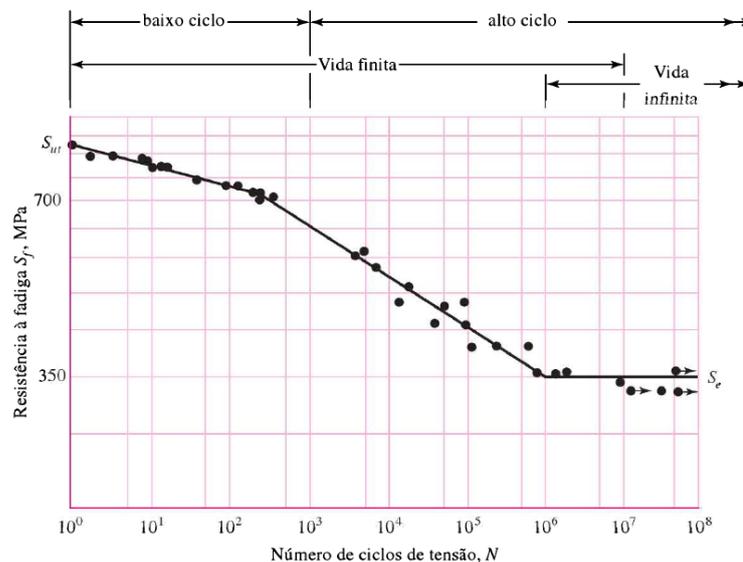
Fonte: Adaptado de (FRICKE, 2017)

2.1.2 Método Tensão-Vida

Para estabelecer a resistência à fadiga de um determinado material, diversos corpos de prova são submetidos a tensões cíclicas até ocorrer a sua falha, permitindo criar uma curva estatística da fadiga. Realiza-se um grande número de testes, iniciando por carregamentos que geram tensões logo abaixo da tensão de ruptura do material, seguido de reduções graduais destas tensões, enquanto os pontos são plotados em um diagrama log-log de tensão x ciclo (S-N), chamado de curva S-N.

Para metais ferrosos e suas ligas, a curva S-N se torna horizontal a partir de um certo número de ciclos (normalmente entre 10^6 e 10^7 ciclos), quando é atingida a tensão de resistência a fadiga (S_e). Neste ponto se define a fronteira entre uma região de vida finita e uma região de vida infinita do material, como mostrado na imagem 3, que exige a curva S-N do aço UNSG41300.

Imagem 3 - Curva S-N de um aço UNS G41 300 obtido através de ensaios de fadiga axial completamente reversa



Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

Segundo Budynas and Nisbett (BUDYNAS; NISBETT, 2011), a partir desta curva é possível calcular, para uma determinada tensão, quantos ciclos aquele material suporta antes de fadigar, chamado de vida finita. Esta metodologia é usada quando as tensões atuantes são muito inferiores ao limite de escoamento do material, também conhecido como fadiga de alto ciclo

(FAC) ou fadiga de baixa tensão (FBT). Em um estudo de fadiga, quando não possuímos a curva S-N em bibliografias, é possível defini-la através de cálculos analíticos. Neste caso, a região de alto ciclo, antes de atingir o limite de resistência à fadiga (S_e), é representado pelas equações 4, 5 e 6

$$S_f = a * N^b \quad (4)$$

$$a = \frac{(f * S_{ut})^2}{S_e} \quad (5)$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log * \left(\frac{(f * S_{ut})}{S_e} \right) \quad (6)$$

Sendo:

S_f = Tensão limite de fadiga para vida finita

N = Número de ciclos até a falha

a e b = constantes

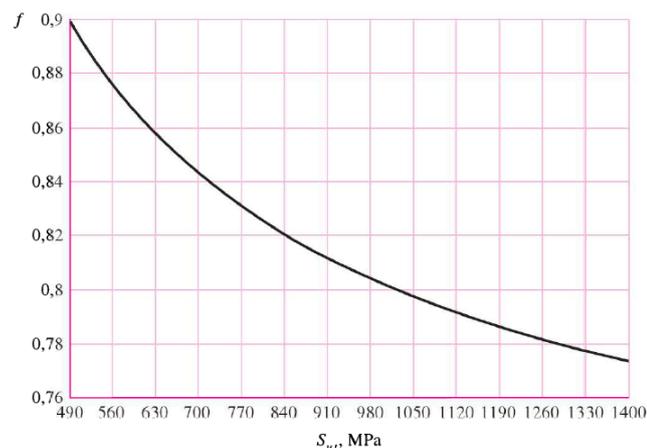
S_{ut} = Tensão limite de resistência à tração do material

f = Fração da S_{ut}

S_e = Tensão limite de fadiga do material (limite de endurance)

O coeficiente f é obtido por uma metodologia experimental de cálculo que pode ser feita para vários valores de S_{ut} . Para aços, recomenda-se adotar o valor de f conforme gráfico 2, aplicável para materiais onde $490 \leq S_{ut} \leq 1400$ MPa. Para materiais $S_{ut} < 490$ MPa, adota-se $f = 0,9$ (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

Imagem 4 - Fração da resistência à fadiga (f) de S_{ut} a 10^3 ciclos



Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

Como explicado na seção 2.1.1 deste trabalho, as tensões geradas em ciclos de amplitude variável não são tensões estáticas (estáveis) mas sim, tensões flutuantes, que precisam ser calculadas em função das tensões médias e alternadas. Porém, nos ensaios para determinação da curva S-N, a tensão aplicada é reversa totalmente e a tensão média é nula. Por outro lado, nas operações dos caminhões fora de estrada, espera-se que a tensão seja flutuante e a tensão média não nula. Por isso, a tensão média faz um grande papel na análise de fadiga e precisa ser estudada. Nestes casos, faz-se necessário adotar critérios de falha por fadiga para tensões flutuantes, como o critério de Soderberg, explicado a seguir.

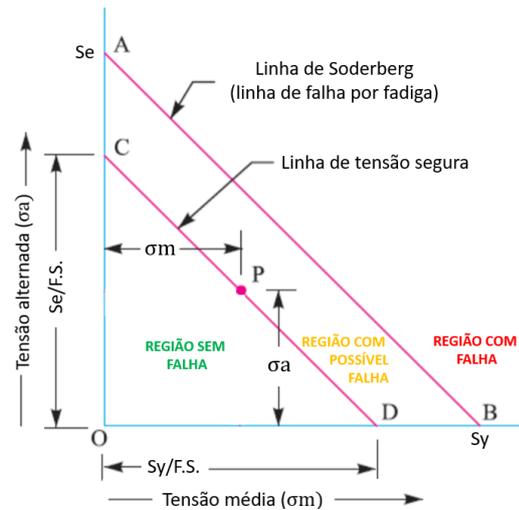
2.1.3 Critério Soderberg de falha por fadiga

Por definição, objetos que são solicitados por cargas puramente estáticas ($\sigma_a = 0$), falham quando suas tensões atingem a tensão de escoamento do material (S_y). Por outro lado, objetos que são solicitados por cargas puramente oscilatórias ($\sigma_m = 0$), falham quando suas tensões atingem o limite de fadiga do material (S_e).

Para objetos que apresentam uma combinação de σ_a e σ_m , ou seja, carregamentos estáticos e oscilatórios combinados, o critério de falha por fadiga de Soderberg permite calcular um limite de falha. Este critério é baseado em um diagrama, onde no eixo x é plotado a tensão média (σ_m) e no eixo y, a tensão alternada (σ_a). Uma linha \overline{AB} então é traçada entre os pontos $\sigma_a = S_y$ e $\sigma_m = S_e$, como mostrado na imagem 5. Além disso, o fator de segurança (F.S.), variável amplamente utilizada em fases de projeto, pode ser aplicado nestes critérios, rebaixando esta linha para patamares mais seguros, compensando erros de projetos, criando uma nova linha \overline{CD} .

Para saber se um determinado ponto solicitado de um objeto irá falhar, basta calcular suas tensões média e alternada, plotar o ponto P deste estado de tensão no diagrama de Soderberg e, caso o ponto se encontre abaixo da linha, ele irá falhar e, se o ponto se encontrar sob ou acima da linha, é provável que ocorra a falha por fadiga deste local analisado. Uma outra forma analítica de análise é calcular, pela equação 7, o valor do coeficiente de segurança de Soderberg (n_s), que deve ser maior que 1 para que não ocorra falhas (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Imagem 5 - Diagrama de falha por fadiga de Soderberg



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, por trigonometria, a equação da linha de Soderberg é descrita conforme equação 7:

$$\frac{\sigma a}{S_e} + \frac{\sigma m}{S_y} = \frac{1}{ns} \quad (7)$$

Sendo:

S_e = Tensão limite de fadiga do material (limite de endurance)

S_y = Tensão de escoamento do material

σa = Tensão alternada

σm = Tensão média

ns = Coeficiente de segurança de Soderberg

Neste caso, a falha provavelmente ocorrerá quando atender a condição abaixo:

$$\frac{\sigma a}{S_e} + \frac{\sigma m}{S_y} > \frac{1}{ns} \quad (8)$$

Simplificando, a falha ocorrerá para a condição abaixo:

$$ns < 1 \quad (9)$$

Em uma análise de vida finita à fadiga de um componente mecânico, é possível fazer uma adaptação no método de Soderberg para se encontrar o número de ciclos que o componente irá suportar até a sua falha. Como o S_e é o limite de fadiga para uma vida infinita, substitui-se o

Se por S_f , encontra o valor de S_f e aplica aos cálculos analíticos da curva S-N para então encontrar a vida finita do componente. Sendo assim, o valor de S_f , segundo Soderberg, será:

$$S_f = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{S_y}\right)} \quad (10)$$

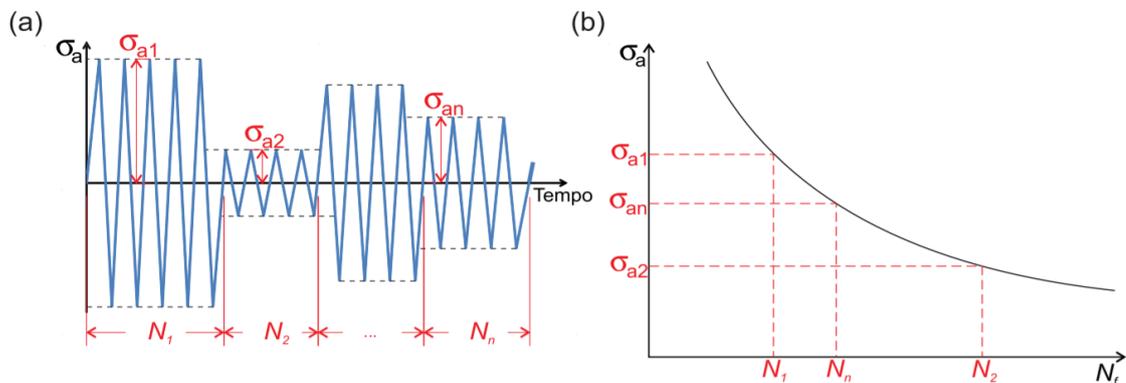
Em seguida, basta aplicar o valor de S_f na equação 4 para encontrar o valor de N , número de ciclos que o componente mecânico suportará até a falha.

2.1.4 Teoria do dano cumulativo

Qualquer amplitude de carga cíclica aplicada sobre uma estrutura sempre contribuirá para a geração do seu processo de fadiga, tornando este fenômeno acumulativo e irreversível. Portanto, cada carregamento individual, por menor que seja, irá somatizar para que, em um período de tempo, a estrutura venha a falhar (GRANDT, 2004). Para se obter os danos por fadiga provocado por todos os ciclos de carregamento, primeiramente deve ser feito um cálculo de cada ciclo e em seguida um somatório para cálculo do dano total (LI; TIAN; FRIMPONG, 2016).

Palmgren (1924) e Miner (1945) criaram a regra de Palmgren-Miner para análise de fadiga em ciclos de tensões variáveis. Para exemplificação, considere um carregamento variável simplificado como o da imagem 3a.

Imagem 6 - Carregamento de amplitude variável dividido em ciclos constantes



Fonte: (NEGRÃO, 2014)

Inicialmente, aplica-se N_1 ciclos de carregamento de amplitude σ_{a1} . O dano produzido por esse carregamento pode ser definido como $D_1 = N_1/N_{f1}$, onde N_{f1} é o número de ciclos de carregamento de amplitude σ_{a1} necessários para falha do material, obtido pelo diagrama S-N existente para cada material, mostrado na imagem 3b, que correlaciona uma determinada amplitude de tensão de trabalho ao número de ciclos máximo que este material suporta sob esta tensão, chamado também de resistência à fadiga (LISOWSKI; LISOWSKI, 2020). Aplica-se então N_2 ciclos de carregamento de amplitude σ_{a2} e o dano produzido é $D_2 = N_2/N_{f2}$. Esta forma é aplicada para N_i ciclos de carregamento de amplitude σ_{ai} , que provocarão o dano $D_i = N_i/N_{fi}$. A regra de Palmgren-Miner diz que o material terá uma falha por fadiga quando a soma dos danos provocados pelos N_i ciclos for igual a 1 ou 100%.

$$\sum_{i=1}^n D_i = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \dots + \frac{N_n}{N_{fn}} = 1 \quad (11)$$

Caso o conjunto de ciclos descrito na imagem 6 se repita, basta seguir somando os danos acumulados em cada ciclo, até que atinja o valor de 1, representando a falha.

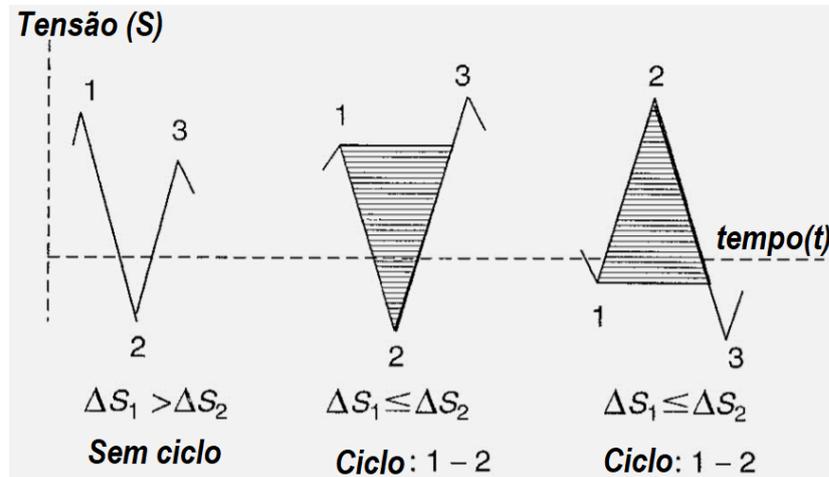
2.1.5 Contagem de ciclos por Rainflow

Os carregamentos de amplitude de tensão variável normalmente não se apresentam de forma variavelmente homogênea como na imagem 6. Os carregamentos cíclicos variáveis são, em maioria, randômicos e complexos, o que torna difícil definir o que é exatamente um ciclo e qual sua amplitude. Sendo assim, existem técnicas de contagem de ciclos que buscam reduzir um espectro de carregamentos complexo em um número de eventos de carregamentos simples com amplitude constante, usados para calcular danos acumulados e estimar a vida do componente. Dentre os inúmeros métodos existentes, o chamado método *Rainflow* é reconhecido como o melhor (NEGRÃO, 2014).

Este método, criado por Matsuishi et. al (1968), consiste em analisar três pontos consecutivos em uma história de carregamento para determinar se um ciclo de fadiga foi ou não formado. Conforme exemplificado na imagem 7, as tensões S1, S2, S3 são variantes no tempo para um mesmo ponto de análise e, portanto, ligados ponto a ponto, criando deltas: $\Delta S1 = |S1 - S2|$ e $\Delta S2 = |S2 - S3|$. Se $\Delta S1 \leq \Delta S2$, um ciclo de carregamento é extraído e colocado em

uma tabela com seus valores mínimo e máximos, S_1 e S_2 . Caso contrário, nenhum ciclo é formado e deve-se analisar os próximos pontos.

Imagem 7 - Contagem de ciclo no método Rainflow



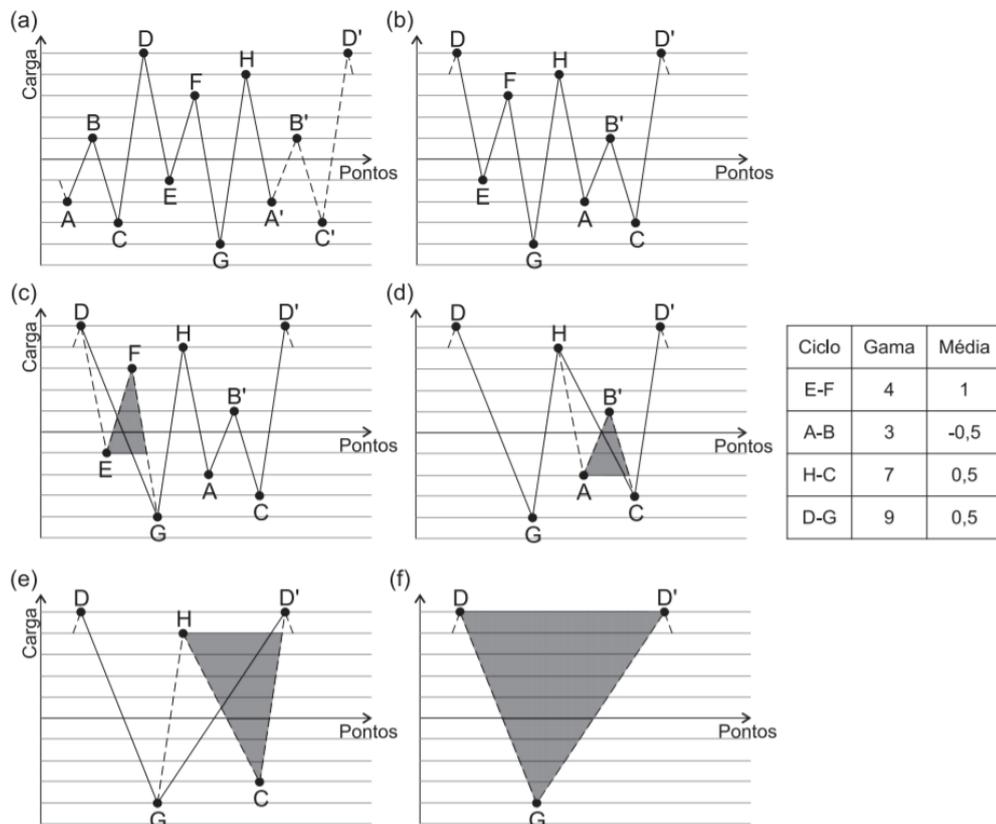
Fonte: Adaptado de (BAPTISTA, 2020)

No método *Rainflow*, a história de carregamento deve ser rearranjada sempre que um ciclo de carregamento for retirado, e os pontos remanescentes conectados entre si. A análise deve iniciar no pico mais alto ou o vale mais profundo, aquele que for maior em valor absoluto. O procedimento é repetido até que não reste nenhum evento de carregamento (BAPTISTA, 2020). Como output deste método será gerado uma tabela que apresenta os ciclos de fadiga contidos no sinal inteiro, que podem ser usados pra previsão de vida restante, ou outras análises similares. A melhor maneira de entender o funcionamento deste método é através de um exemplo, conforme passo a passo a seguir:

1. $Y = |D - E|$; $X = |E - F|$; $X < Y$. Não se conta um ciclo.
2. $Y = |E - F|$; $X = |F - G|$; $X > Y$. Conta-se $|E - F|$ como um ciclo e descartam-se os pontos E e F, conforme imagem 5c.
3. $Y = |D - G|$; $X = |G - H|$; $X < Y$. Não se conta um ciclo.
4. $Y = |G - H|$; $X = |H - A|$; $X < Y$. Não se conta um ciclo.
5. $Y = |H - A|$; $X = |A - B|$; $X < Y$. Não se conta um ciclo.
6. $Y = |A - B|$; $X = |B - C|$; $X > Y$. Conta-se $|A - B|$ como um ciclo e descartam-se os pontos A e B, conforme imagem 5d
7. $Y = |G - H|$; $X = |H - C|$; $X < Y$. Não se conta um ciclo.

8. $Y = |H - C|$; $X = |C - D|$; $X > Y$. Conta-se $|H - C|$ como um ciclo e descartam-se os pontos H e C, conforme imagem 5e
9. $Y = |D - G|$; $X = |G - D|$; $X > Y$. Conta-se $|D - G|$ como um ciclo e descartam-se os pontos D e G, conforme imagem 5f
10. Fim da contagem. O resultado da contagem de ciclos é mostrado na tabela da imagem 5.

Imagem 8 - Exemplo de contagem de ciclos utilizando o método de Rainflow



Fonte: (NEGRÃO, 2014)

Além dos conceitos de fadiga e acúmulo de danos apresentado anteriormente, este trabalho também demanda o entendimento de alguns conceitos de dinâmica veicular pois, embora os danos no chassi sejam causados por fadiga, as condições de carregamento que induzem esta fadiga são provenientes de dinâmicas veiculares do caminhão, que serão abordadas a seguir.

2.2 Dinâmica veicular

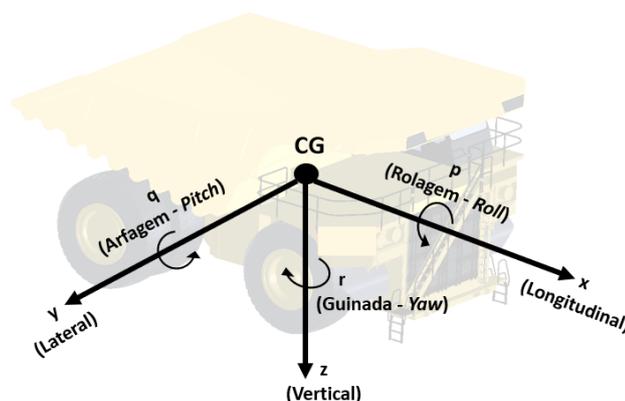
Os principais movimentos de um veículo sob uma superfície, independente do seu tamanho, podem ser simulados ou avaliados analiticamente pela dinâmica veicular. O comportamento

dinâmico do caminhão fora de estrada compreende as forças impostas pela gravidade, aerodinâmica e contato com o solo (pneus). Os componentes do caminhão precisam ser estudados para que sejam determinadas quais forças serão geradas em uma determinada manobra, e como o veículo como um todo responderá a estes esforços. Por este motivo é necessário conhecer o equipamento e modo de operação, para que sejam definidas condições de contorno que tornam a análise matemática mais próxima da realidade (GILLESPIE, 1992).

2.2.1 Sistema de coordenadas

A *Society of Automotive Engineers* (SAE) criou uma norma internacional SAEJ670, que dentre várias outras recomendações sobre práticas na análise dinâmica veicular, adota um sistema de coordenadas único para facilitar as aplicações dos métodos de análise. Neste sistema, uma vez que todos os componentes do caminhão se movem juntos, independente da manobra, a massa do caminhão pode ser considerada aglutinada no centro de gravidade (CG), levando em consideração as propriedades de massa e inércia (SAE INTERNACIONAL, 2008). Em um campo gravitacional homogêneo, todas as forças gravitacionais e de inércia que afetam o corpo rígido podem ser substituídas por uma única força atuando no CG, que é um ponto imaginário no qual toda a massa do veículo pode ser concentrada (SKRUCANY et al., 2018). A estrutura do caminhão é considerada rígida, ou seja, o centro de massa é sempre no mesmo ponto do CG, e este ponto é corrigido de acordo com os momentos de inércia rotacionais apropriados em relação à manobra executada. Na imagem 9 está representado o sistema de coordenadas da norma SAEJ670 no caminhão fora de estrada.

Imagem 9 - Sistema de coordenadas segundo SAE J610



Fonte: Elaborado pelo autor

Este sistema de coordenadas estabelece as seguintes variáveis:

x – deslocamento longitudinal;

y – deslocamento lateral;

z – deslocamento vertical;

p – velocidade de rolagem em torno do eixo x;

q – velocidade de arfagem em torno do eixo y;

r – velocidade de guinada em torno do eixo z.

2.2.2 Localização do centro de gravidade

A localização do centro de gravidade (CG) de um veículo é um importante parâmetro no dimensionamento de sistemas dinâmicos veiculares, pois muitas vezes ele é o ponto de referência para análise de forças do sistema. O CG pode mudar consideravelmente de acordo com as várias condições de condução (LEE et al., 2018). Por ser um ponto cartesiano, com localização definida por três eixos (longitudinal, transversal e vertical), existe uma forma de cálculo diferente para sua determinação em cada um destes eixos, conforme mostrado a seguir.

- Posicionamento longitudinal

Conhecendo a distância entre eixos (L), o peso total do veículo (W) e uma das forças de reação dos eixos dianteiro ou traseiro ao solo (W_f ou W_r) é possível encontrar as distâncias L_f e L_r através do somatório de momentos em relação aos pontos A e B, representados na imagem 10. As fórmulas para encontrar L_f e L_r , posição longitudinal do CG no veículo, estão apresentadas abaixo:

$$L_f = \frac{W_r}{W} * L \quad (12)$$

$$L_r = \frac{W_f}{W} * L \quad (13)$$

- Posicionamento transversal em trecho reto

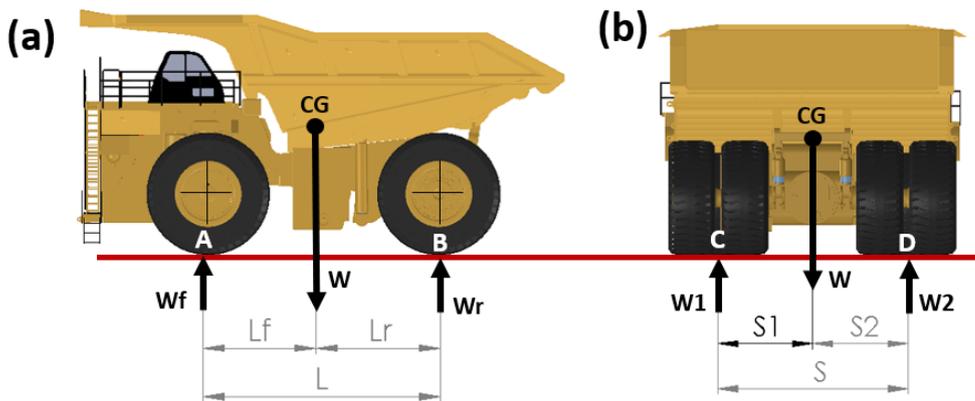
O posicionamento transversal do CG é calculado de forma análoga ao posicionamento longitudinal, relacionando as cargas distribuídas do lado esquerdo e direito do veículo e as

distâncias referentes, conforme mostrado na imagem 10 e calculado conforme equações 14 e 15.

$$S_1 = \frac{W_2}{W} * S \quad (14)$$

$$S_2 = \frac{W_1}{W} * S \quad (15)$$

Imagem 10 - Posicionamento longitudinal (a) e transversal (b) do C.G.



Fonte: Elaborado pelo autor

- Posicionamento transversal em trecho curvo (rolagem)

Em trechos curvos, acontece uma transferência de carga no sentido lateral da curva, provocando um giro da carroceria em um movimento denominado momento de rolagem. Existem diversos modelos para cálculo deste fenômeno, com diferentes complexidades e ponderações.

Gillespie (1992) propõe um modelo onde os mecanismos que regem o momento de rolagem sob o eixo do veículo estão apresentados na imagem 11. Todas as suspensões do veículo são sumarizadas em duas molas, que possuem uma distância entre elas, desempenhando uma resistência à rolagem da carroceria proporcional à diferença de ângulo entre a carroceria e o eixo do veículo (ângulo de rolagem Φ). Esta contraposição à rolagem imposta pelas suspensões é chamada de rigidez à rolagem da mola, que pode ser calculado a partir da sua rigidez vertical (GILLESPIE, 1992).

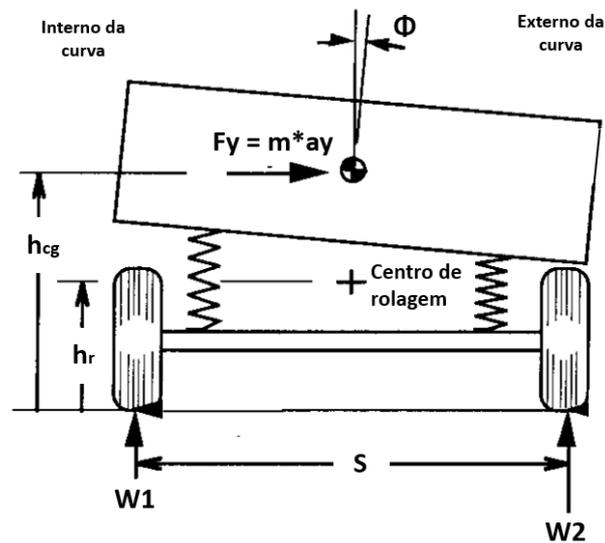
$$K_{\phi} = 0,5 * K_s * s^2 \quad (16)$$

Onde:

- K_{ϕ} = Rigidez à rolagem da suspensão
- K_s = Rigidez vertical (axial) da suspensão
- s = Distância lateral entre os centros das duas suspensões

Após o cálculo do valor da rigidez à rolagem da suspensão, é possível determinar a relação entre as cargas nas rodas, a força lateral e o ângulo de rolagem, através do cálculo por momento de forças, conforme determinado por Gillespie (1992) na equação 17 e ilustrado na imagem 11.

Imagem 11 - Variação do ângulo de rolagem em curvas



Fonte: Adaptado de (GILLESPIE, 1992)

$$W_1 - W_2 = (2 * F_y * \frac{h_r}{s}) + (2 * k_{\phi} * \frac{\phi}{t}) \quad (17)$$

Sendo

- m = Massa suspensa total
- a_y = Aceleração centrípeta
- h_{cg} = Altura vertical do centro de gravidade
- h_r = Altura do centro de rolamento
- s = distância entre centros laterais das rodas
- g = força da gravidade

- W_1 = Força de reação de apoio da roda esquerda ao solo
- W_2 = Força de reação de apoio da roda direita ao solo
- ϕ = Ângulo de rolagem
- v = velocidade longitudinal do caminhão
- r = raio da curva (até o centro lateral do veículo)

A aceleração centrípeta pode ser escrita conforme equação 18:

$$a_y = \frac{v^2}{r} \quad (18)$$

Isolando o ϕ , temos:

$$\phi = \left(\frac{(W_1 - W_2) - \left(2 * m * \frac{v^2}{r} * \frac{hr}{S} \right)}{2 * k\phi} \right) * S \quad (19)$$

O modelo de cálculo acima desconsidera, dentre vários fatores, o deslocamento lateral dos pneus, porém, como o caminhão trafega em baixas velocidades, esta consideração se torna aceitável.

- Posicionamento vertical

Dentre os diversos modelos para se determinar o posicionamento vertical do CG de um veículo, Milliken e Milliken (1995) propõem um modelo de cálculo onde a roda traseira é erguida e a roda dianteira mantida ao solo, criando um ângulo entre o solo e a linha de centro das rodas. A altura do solo até o C.G. é definida pela equação 20 e apresentado na imagem 12.

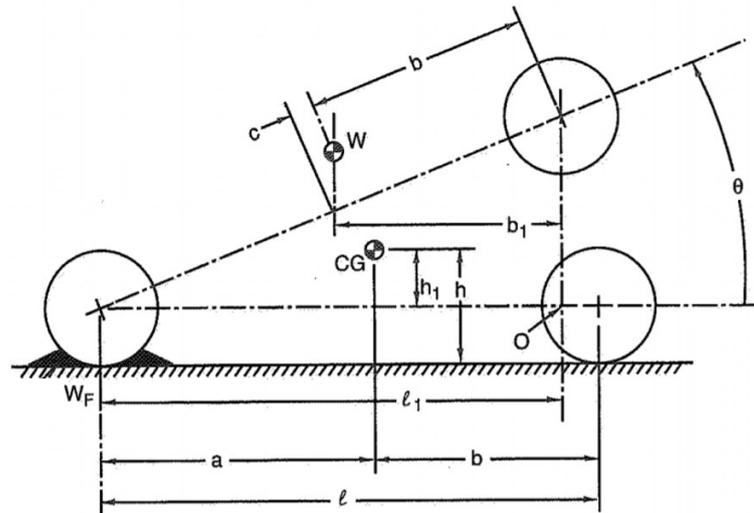
$$h = R + \frac{W_f * l - W * b}{W * \tan(\theta)} \quad (20)$$

Onde:

- h = Altura do solo até o C.G.
- W_f = Força no eixo dianteiro

- l = distância entre eixos do veículo
- W = Carga total do veículo
- b = Distância horizontal do C.G. até o eixo traseiro
- R = Raio das rodas do veículo (iguais)

Imagem 12 - Posicionamento vertical do C.G.



Fonte: (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995)

Os cálculos analíticos da dinâmica veicular apresentados anteriormente permitem descobrir o comportamento físico da carroceira do caminhão quando em transporte (deslocamentos e giros), o que também causa um reposicionamento dos esforços aplicados ao chassi do caminhão. Ainda de forma analítica, utilizando softwares computacionais, é possível analisar como estes esforços influenciam o comportamento estrutural do chassi, através de análises estruturais, apresentadas a seguir.

2.3 Análise estrutural utilizando o método *mesh-free*

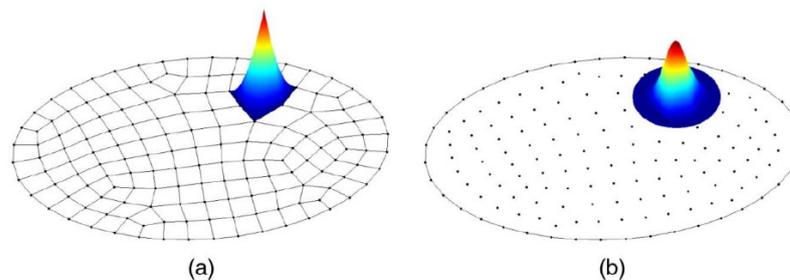
Fenômenos da natureza, físicos, químicos ou biológicos, podem ser descritos de forma algébricas, diferenciais ou integrais e, em seguida, resolvidos através de técnicas numéricas e soluções aproximadas, incluindo a análise do comportamento de estruturas quando submetido às cargas de serviço. Esta prática consiste em transformar um problema prático complexo em um simples e discreto problema matemático, resolvê-lo de forma ágil através de processadores de computador e, finalmente, revelar os fenômenos de forma virtual de acordo com os requisitos do problema analisado (GARG; PANT, 2018). Dentre as várias técnicas numéricas existentes

atualmente, uma das mais conhecidas é o método dos elementos finitos (MEF) que subdivide o modelo analisado em elementos finitos de forma e tamanho definidos, em um processo chamado de discretização, onde os cálculos são aplicados aos elementos individualmente, que se conectam entre si através dos nós (pontos nodais), criando uma solução global aproximada para o problema. Ao conjunto destes elementos e nós é dado o nome de malha, e o tamanho dos seus elementos define a precisão dos seus resultados, sendo que, quanto menor, mais preciso o resultado será, porém, por outro lado, maior se torna o tempo de processamento computacional da solução.

A confiabilidade do MEF com malha leva à algumas complicações e perda de precisão quando utilizada em modelagens que apresentam grandes deformações (com elementos que ficam muito tortos ou compridos), simulação de crescimentos de trincas ou descontinuidades que não coincidem com as linhas originais da malha (GARG; PANT, 2018).

Para superar estes problemas, um novo método de análise sem malha e sem elementos alcançou um progresso notável nos últimos anos, com resultados satisfatórios principalmente em análises de mecânica dos sólidos, como é o caso deste trabalho. Chamado de *mesh-free*, este método consiste na criação de equações algébricas do sistema analisado à partir de uma nuvem de pontos (nós) espalhada por todo o modelo e seus contornos, sem a necessidade de subdividi-lo em elementos, como mostrado na imagem 13 (GARG; PANT, 2018). Enquanto o comportamento de um ponto nodal em uma análise MEF é construído na coordenada natural do elemento analisado e depois transformado na coordenada cartesiana global, na análise *mesh-free* os pontos nodais são calculados diretamente no sistema de coordenadas cartesianas globais, criando uma solução contínua e independente de elementos (CHEN; HILLMAN; CHI, 2017).

Imagem 13 - (a) Trajetória de solução MEF com elementos no sistema de coordenadas locais; (b) Trajetória de solução mesh-free com pontos nodais no sistema de coordenadas global



Fonte: Adaptado de (CHEN; HILLMAN; CHI, 2017)

Segundo um fabricante de software de análise estrutural que utiliza este método, o *mesh-free* permite simular sem necessidade de simplificação prévia do modelo, analisar montagens grandes e complexas em segundos e elimina o longo tempo de processamento de malha que outros softwares de MEF consomem (ALTAIR ENGINEERING, INC., 2020).

Independente de utilizar MEF ou *mesh-free*, esta escolha se trata apenas do método algébrico de solução do sistema, sendo que o conceito de transformar um problema real em virtual permanece o mesmo. Sendo assim, é comum os engenheiros se depararem com situações em que precisam decidir se uma análise será estática ou dinâmica. Para escolher a opção certa, é necessário entender a complexidade dos cenários de carregamento e a física por trás do estudo (DATTAKUMAR; GANESHAN, 2017).

2.3.1 Análise estática

A análise estrutural aborda a mudança do comportamento de um componente físico sob a aplicação de cargas, sendo que a natureza da resposta do sistema é totalmente dependente da forma como estas cargas são aplicadas ao componente. Se a carga for aplicada lentamente, o efeito inercial e o amortecimento serão negligenciados e este estudo é chamado de análise estática (DATTAKUMAR; GANESHAN, 2017).

Na análise estática a estrutura é submetida às condições de contorno de restrições e aplicação de cargas conhecidas para o propósito prático do estudo, e então, se obtém dados de deslocamentos, tensões e deformações que servirão de parâmetro para verificar a resistência do material de construção utilizado, avaliar pontos críticos da geometria, fazer análise de espessuras ou de material, dentre outras análises. Muitas vezes, a análise estática é utilizada como um pré estudo para validação de geometria ou resultados preliminares de estudos mais complexos (RODRIGUES et al., 2015).

2.3.2 Análise dinâmica

Dinâmico significa que se altera no tempo e, como o nome sugere, as cargas aplicadas são variáveis no tempo e, assim, induzem respostas também variáveis (deslocamentos, velocidades, acelerações, forças de reação, tensões, etc.). Uma das diferenças mais notáveis na análise dinâmica é a consideração explícita das forças inerciais sob a estrutura quando ela é excitada pelas cargas (DATTAKUMAR; GANESHAN, 2017). As cargas dinâmicas causam acelerações

e velocidade nos elementos ou em toda a estrutura, removendo-a de sua condição de equilíbrio estático. Como a estrutura tem massa, surgem as forças inerciais, regidas pela primeira lei de Newton (RODRIGUES et al., 2015).

Em uma simulação estrutural veicular dinâmica, como a abordada neste trabalho, as forças inerciais induzidas pelo tráfego do caminhão podem ser calculadas pelo próprio software, em uma análise complexa por corpos flexíveis, onde o caminhão percorre virtualmente uma pista e as excitações induzidas por este movimento vão sendo aplicadas aos componentes da sua estrutura. Outra forma, mais simples, porém ainda muito eficaz, é realizar os cálculos destas forças inerciais de forma analítica (baseado em formulações matemáticas) e aplicar os resultados encontrados na estrutura do caminhão em uma análise estática. Este método de análise é chamado de simulação estática com aspecto dinâmico, pois, embora a simulação seja realizada de forma estática, ela aborda a influência de variáveis dinâmicas no domínio do tempo.

Pelo fato de incluir estas características variáveis no tempo, a análise dinâmica é mais realista em relação ao evento estudado do que análises puramente estáticas, mas também exigem mais poder de processamento computacional e/ou tempo de cálculos analíticos.

Pelo fato deste trabalho abordar um estudo do comportamento estrutural do chassi do caminhão quando em operação, além dos princípios da fadiga, dinâmica veicular e de como serão feitas as análises estruturais, é fundamental o entendimento de como é o chassi do caminhão fora de estrada e quais são as operações desempenhadas por este equipamento quando em serviço. Estas informações estão apresentadas a seguir.

2.4 Operações de lavra em minas à céu aberto

Na mineração, denomina-se como um processo de lavra à céu aberto toda extração de material que é feita em ambiente exposto ao ar livre, sem cobertura de outras rochas. Existem operações de mineração realizadas de forma subterrânea, porém, a aplicação do método de lavra à céu aberto é predominante, motivada por vantagens de segurança, flexibilidade, capacidade de mecanização e de ganhos de produção, dentre outros (CARLI, 2013).

O processo de lavra em minas à céu aberto é composto por uma série de operações unitárias cíclicas, com o objetivo principal de desmontar e transportar o material lavrado até a usina. A sequência de operações mais comuns que compõem o ciclo operacional produtivo de uma mina são: perfuração, desmonte, carregamento e transporte (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002;

LAGES, 2018). Estas operações podem variar em função do avanço tecnológico e automação das minas, como por exemplo, as minerações contínuas, onde as etapas de desmonte e carregamento são compreendidas em uma só operação, ou em minas com transportadores de correias como substituição aos caminhões na etapa de transporte (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

Porém, em grande parte das minas, o ciclo operacional é composto por quatro principais etapas, sendo o enfoque deste trabalho, as etapas de carregamento e transporte, onde operam os caminhões fora de estrada.

2.4.1 Etapas de carregamento e transporte

A frente de lavra ou também chamada de área de escavação, são os locais onde se faz a extração e remoção do material explorado. Para isso, as rochas são perfuradas e preenchidas com explosivos que, quando detonados, diminuem o material rochoso inteiro à pedaços menores. Estas duas etapas são chamadas de perfuração e desmonte, e são os dois primeiros estágios do ciclo operacional produtivo da mina.

Em seguida, o material desmontado é levado da frente de lavra até os diferentes pontos de descarga, que podem ser:

- Britador: Responsável por triturar o material em tamanhos menores para que em seguida ele seja enviado até a usina de beneficiamento;
- Pilhas de homogeneização: Empilhamento de material proveniente de diferentes frentes de lavra em camadas horizontais de modo a permitir uma melhor homogeneidade entre eles;
- Pilhas de estéril: Armazenamento do material descartado pela operação de lavra e que não será reaproveitado na etapa do beneficiamento;

Estas duas etapas, nomeadas de carregamento e transporte, são as fases mais críticas no ciclo produtivo da mina, já que representam mais de 60% do custo operacional dentre todos os estágios, motivados pela aquisição de equipamentos de alto custo, consumo elevado de combustível e de custo de manutenção, dentre outros fatores (ÇETIN, 2004).

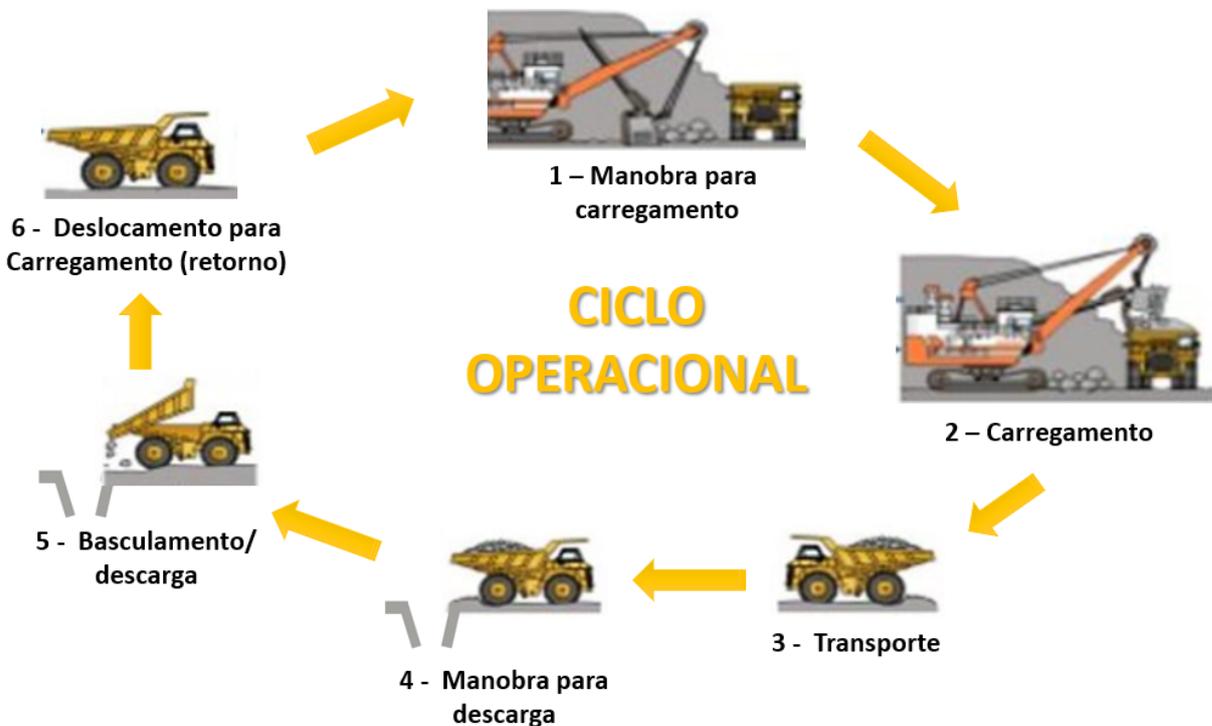
Além disso, o carregamento e transporte são interdependentes e, portanto, devem apresentar uma sincronia que evite a falta ou o mal aproveitamento da força de trabalho de um ativo. O correto dimensionamento e escolha dos modelos dos ativos de acordo com a produção requerida

são fundamentais para que eles sejam bem aproveitados. Além disso, os custos que envolvem a manutenção e as suas paradas são importantes e devem ser sempre otimizados. Os métodos de manutenção corretivo, preventivo ou preditivo podem ser aplicados a frota de caminhões fora de estrada em um modelo denominado manutenção detectiva, onde é observado a natureza e a importância do sistema a ser mantido para o sistema produtivo, e escolhido o melhor método de manutenção para aquela situação (PORTO et al., 2015). Porém, mesmo com esta análise prévia, é possível ocorrerem paradas não programadas, que podem ocasionar longos períodos de manutenção, aumentando os custos da operação e criando desfalques na força de trabalho na frente de lavra.

2.4.2 Operações realizadas pelo caminhão fora de estrada em minas à céu aberto

Durante a etapa de transporte, o ciclo operacional de um caminhão fora de estrada em mineração à céu aberto é composto por 6 estágios, conforme imagem 14. No início da jornada de trabalho do ativo, após ser alocado pela equipe de planejamento, o caminhão se movimenta vazio até a frente de lavra designada, onde se inicia o ciclo operacional abaixo: (COUTINHO, 2017):

Imagem 14 - Ciclo operacional do caminhão fora de estrada em minas à céu aberto



Fonte: Elaborado pelo autor

1. Manobra para carregamento: Ao chegar à frente de lavra o caminhão manobra de ré ao lado de equipamento de carga (carregadeira ou escavadeira) para que seja realizado o despejo do material em sua caçamba.
2. Carregamento: Consiste no despejo do material na caçamba do caminhão, realizado pelo equipamento de carga em alguns passes até que seja atingida a capacidade de carga máxima do caminhão.
3. Transporte: Com a caçamba preenchida, o caminhão se desloca até o local onde o material será despejado, que pode ser em um britador ou em pilhas.
4. Manobra para descarga: Similar à etapa de manobra para carregamento, o caminhão se posiciona de ré, desta vez alinhando a caçamba a frente do bocal de alimentação do britador ou a frente da pilha a ser despejado o material.
5. Basculamento: Consiste no levantamento da caçamba até que seja esvaziada por completo, exceto o peso morto (material que fica retido por adesão na caçamba).
6. Deslocamento para carregamento (retorno): Locomoção do caminhão em vazio para a frente de lavra, onde ele aguardará até que seja autorizado o novo carregamento, e, portanto, o ciclo se reinicia.

2.5 Caminhão fora de estrada e sua estrutura

Caminhões fora de via são um dos equipamentos mais importantes para atividades de mineração, pois transportam grandes massas por longas distâncias, além de serem flexíveis à diferentes estágios de operação da mina (GANDRA, 2017). Existem diversos modelos de caminhão com carga útil operacional diferentes, podendo alcançar até 400 ton., sendo que, no Brasil, as minerações à céu aberto normalmente tem carga útil de aproximadamente 250 ton.

Imagem 15 - Caminhões fora de via em operação em uma mina à céu aberto



Fonte: (VALER, 2020)

2.5.1 Especificações do caminhão fora de estrada

Para fins de estudo, neste trabalho, utilizaremos como modelo de referência um caminhão fora de estrada comercial, largamente utilizado em operações de mineração à céu aberto ao redor do mundo. Este caminhão tem capacidade de transporte de aproximadamente 232 toneladas, quantidade considerada mediana para este tipo de veículo.

Abaixo está apresentado a tabela 1, contendo dados técnicos de um modelo com esta capacidade, extraídos e adaptados de catálogos e manuais do fabricante. A imagem 16 apresenta as principais dimensões do equipamento.

Tabela 1 - Especificações técnicas do caminhão fora de estrada

Motor	
Potência total do motor	1715 Kw
Velocidade máxima	51.3 m/s
Componentes	
Pneu utilizado (2 no eixo dianteiro e 4 no traseiro)	Modelo 40.00R57
Pesos e capacidades	
Peso bruto operacional	384.000 Kg
Carga de material transportável	232.711 Kg
Peso vazio (sem báscula)	114.300 Kg
Peso total da caçamba	33.189 Kg
Capacidade tanque combustível	4.731 L
Peso tanque combustível vazio	2.093 Kg
Peso motor diesel vazio	8.471 Kg
Peso do óleo lubrificante do motor diesel	250 Kg
Peso do radiador	1.205 Kg
Peso do conversor de torque	973 Kg
Peso da cabine de operação	1.814 Kg
Peso tanque de óleo de freio e elevação da báscula	1.436 Kg
Peso cilindro de elevação (cada)	1.150 Kg
Capacidade de líquido de arrefecimento	684 L
Fluido do diferencial	662 L

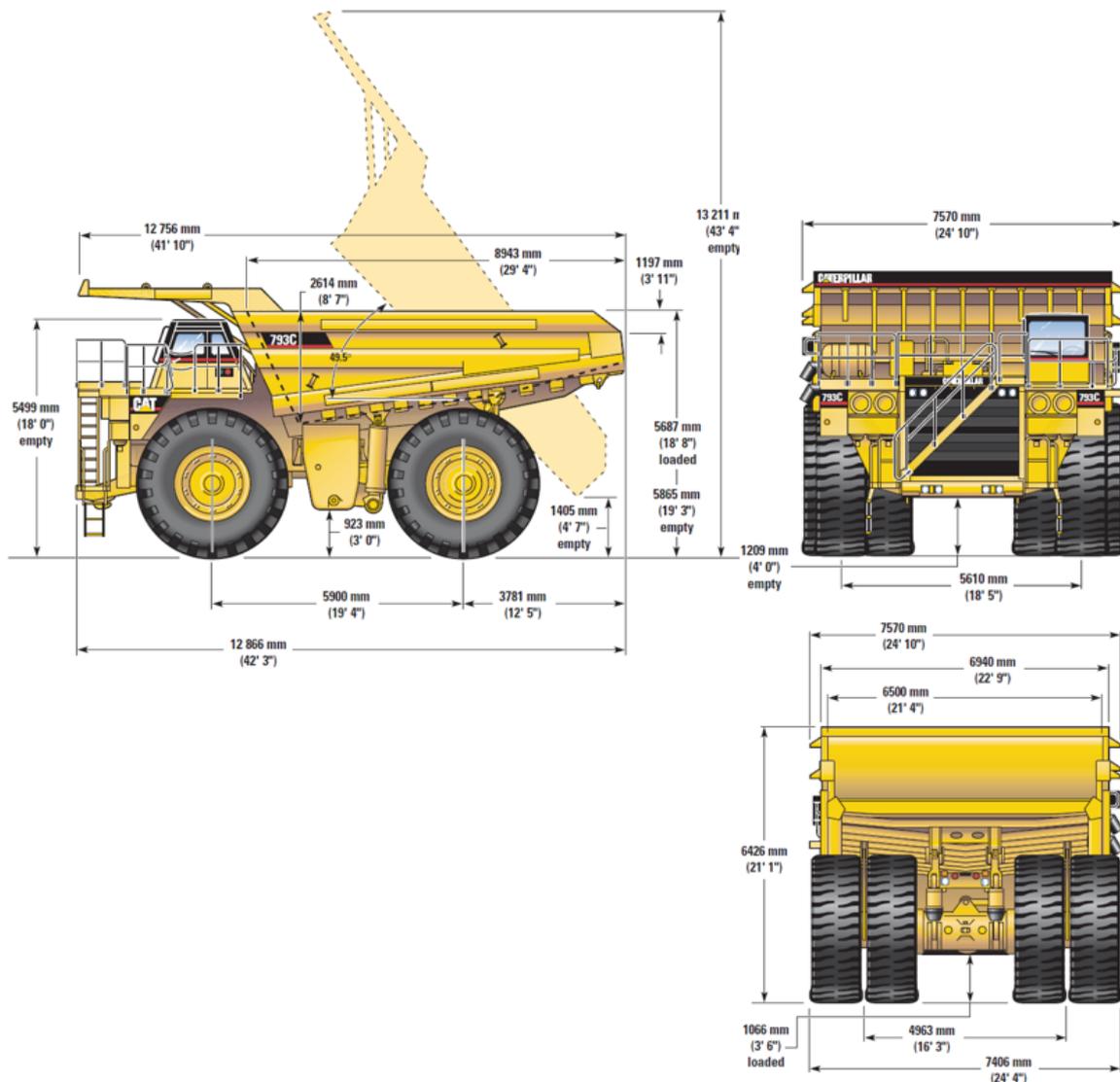
Fonte: Adaptado de (CATERPILLAR, 2000)

2.5.2 Chassi do caminhão fora de estrada

A estrutura de um caminhão fora de estrada é composta principalmente pelo chassi, cabine, caçamba, sistema de suspensão, mecanismo de levantamento hidráulico e motor/trem de força (SRILATHA, 2017).

Como objeto principal deste trabalho, o chassi é a estrutura do equipamento fabricada em materiais de alta resistência, responsável por suportar todas as cargas mecânicas submetidas ao equipamento, garantindo a segurança dos sistemas e da operação (SOARES et al., 2012).

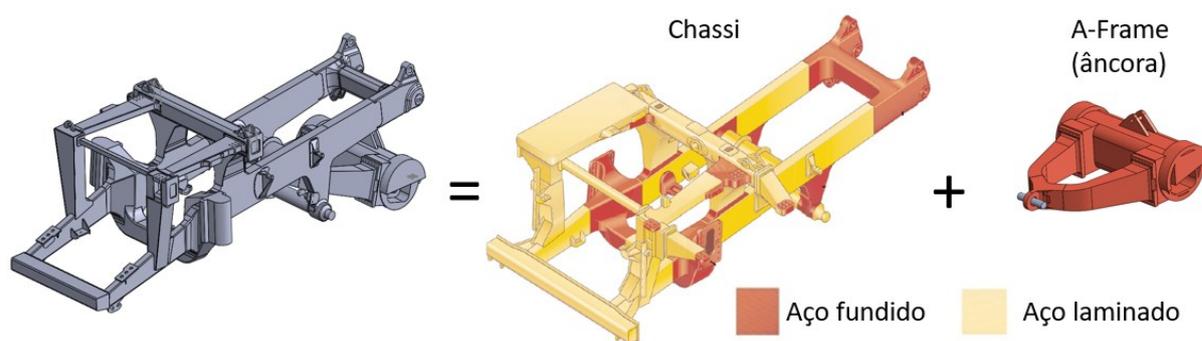
Imagem 16 - Dimensões do caminhão fora de estrada



Fonte: (CATERPILLAR, 2000)

Nos caminhões fora de estrada, o chassi é fabricado por uma junção soldada de aço laminado e aço fundido, conforme apresentado na imagem 17. De acordo com ensaios metalográficos, de tração e fadiga realizados à partir de corpos de prova coletados de um chassi real, Gandra (2017) apresenta as propriedades mecânicas do aço laminado e do aço fundido que integram o chassi de um caminhão fora de estrada, apresentados na tabela 2.

Imagem 17 – Chassi e âncora do caminhão fora de estrada



Fonte: Adaptado de (CATERPILLAR, 2000; GANDRA, 2017)

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos aços usados na fabricação do chassi do caminhão fora de estrada

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Tensão limite de fadiga (MPa)
Aço laminado	339	488	31	NA
Aço fundido	331	509	28	260

Fonte: Adaptado de (GANDRA, 2017)

O chassi é quem limita a vida útil do caminhão já que, enquanto outros itens como pneus, motor, suspensão, dentre outros, podem ser trocados após atingirem suas vidas, o chassi não permite esta possibilidade. A sua vida útil estimada é de 70.000 horas, porém, antes de atingir este tempo, é comum ocorrerem falhas prematuras, como o surgimento de trincas em diversos pontos, provocados pela fadiga em serviço, surgindo as primeiras entre 2200 a 3600h de serviço. Estas trincas surgem com mais frequência em junções soldadas do chassi (SRILATHA, 2017). Para evitar que estas trincas sejam catastróficas, as mineradoras incluíram em seus checklists de manutenção, operações de inspeção e correção das mesmas, aplicando cordões de

solda por eletrodo sob as trincas, evitando a sua propagação, como mostra a imagem 18 (CATERPILLAR, 2017; VALE, 2015)

Imagem 18 - Trinca em chassi de caminhão fora de estrada reparada com cordões de solda



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.6 Variáveis operacionais

A seguir são apresentadas as principais variáveis operacionais existentes na rotina de operação de um caminhão fora de estrada em uma mina à céu aberto, suas características e como elas podem influenciar na integridade estrutural do chassi do equipamento.

2.6.1 Sobrecarga de payload

O carregamento do material desmontado para a caçamba dos caminhões fora de estrada é normalmente realizado por pás carregadeiras ou escavadeiras do tipo *shovel* (hidráulicas ou a cabo). O operador do caminhão manobra de ré ao lado da escavadeira ou carregadeira, cujo operador é responsável pelo posicionamento correto da carga na caçamba do caminhão, até que se atinja uma quantidade útil adequada, chamada de payload (CHAMANARA, 2013). Cada frota possui um payload característico que define a sua capacidade de transporte e performance, sendo este dado muito utilizado pelas mineradoras para cálculo da massa total transportada dentro de um determinado período de análise (TEIXEIRA; MUNARETTI; FERNANDES, 2016).

A quantidade de material que é colocado na caçamba do caminhão é de responsabilidade do operador da pá carregadeira/escavadeira, que precisa colocar uma quantidade mais próxima do payload útil do equipamento possível. No caso de um subcarregamento, mesmo podendo se mover em velocidades maiores, a produtividade do caminhão pode diminuir pelo fato de estar carregando menos material do que poderia. Já no caso de um sobrecarregamento, mesmo levando uma maior quantidade de material, o consumo de combustível e de pneus tende a aumentar, além de aumentar os esforços na estrutura do caminhão, elevando os riscos de surgimento de trincas.

Imagem 19 - Pá carregadeira realizando o carregamento de um caminhão fora de estrada



Fonte: Elaborada pelo autor

Para guiar o operador do equipamento de carregamento, os Fabricantes de Equipamentos Originais (do inglês *Original Equipments Manufacturers* – OEM), desenvolveram sistemas que monitoram as pressões dos pneus ou das suspensões do caminhão em tempo real, exibindo na lateral do caminhão um sinal luminoso que informa quando é o momento de realizar o último passe de carregamento ou ainda, um mostrador digital que exibe o peso já inserido na caçamba (CATERPILLAR, 2012). Mesmo com a utilização destas tecnologias, ainda é possível ocorrerem erros de leitura ou carregamentos excessivos no último passe, o que permitem a ocorrência de sobrecargas de payload. Sendo assim, algumas mineradoras optam por delimitar a carga útil como sendo 10% inferior em relação ao payload máximo do equipamento, como sendo um fator de segurança na operação, aumentando a vida útil do equipamento e dos seus componentes.

2.6.2 Distribuição de payload

Embora a sobrecarga de payload seja uma variável operacional relativamente controlada nas operações, a distribuição correta do payload na caçamba segue sendo um desafio. Como os materiais extraídos em uma frente de lavra podem ser variáveis, suas densidades também variam. Portanto, existem materiais que são muito densos e que, com poucos passes de carregamento, atingem o payload máximo do caminhão, sobrando espaço na caçamba. Nestes casos, o payload deve estar corretamente distribuído, evitando desbalanceamentos que podem provocar torções na estrutura (HENZE et al., 2017). Como exemplo, a imagem 20 apresenta um comparativo entre o material estéril e o ROM (*run of mine*, minério bruto). A centralização do estéril na caçamba é mais fácil, pois ele ocupa praticamente toda a área útil, devido à sua densidade menor, enquanto o posicionamento do ROM exige mais habilidade do operador do equipamento de carregamento (TEIXEIRA, 2016)

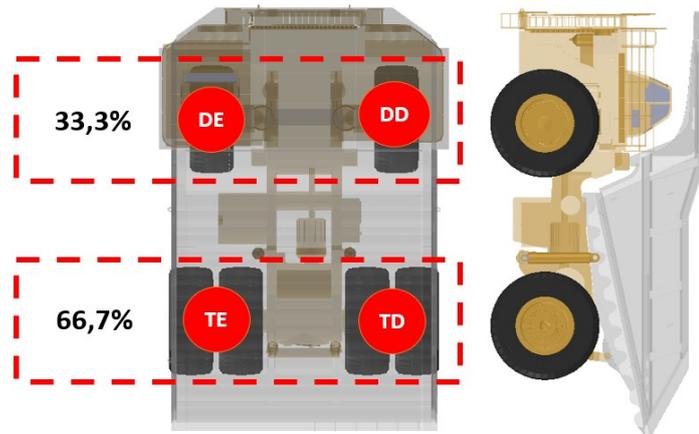
Imagem 20 - Diferença de volumes formados entre o ROM (esq.) e o estéril (dir.)



Fonte: (TEIXEIRA, 2016)

Os caminhões fora de estrada são projetados para operar com o peso do veículo carregado uniformemente distribuído entre todos os seis pneus. Desta forma, segundo o fabricante, como existem dois pneus no eixo dianteiro e quatro na parte traseira, isso equivale a uma distribuição de peso carregado de 33,3% no eixo dianteiro e 66,7% no eixo traseiro. O peso deve estar igualmente balanceado entre as suspensões dianteira direita e esquerda (DD e DE) e traseira direita e esquerda (TD e TE) (CATERPILLAR, 2000; HENZE et al., 2017).

Imagem 21 - Distribuição ideal do peso nos eixos do caminhão quando carregado



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando a carga não está uniformemente distribuída, existem três posições de carregamento que causam sobrecargas na estrutura, que estão diretamente ligadas aos fenômenos de fadiga estrutural do chassi. Estas descentralizações de carga criam esforços característicos no chassi, conhecidos como *rack*, *roll* ou *pitch*. Estes três tipos de esforços foram padronizados para serem usadas como indicadores de performance (KPI – *key performance indicators*) nas operações de mina, e podem ser originados a partir de diversas variáveis operacionais como condição de pista, velocidade, curvatura, posição de payload, dentre outras (CHAMANARA, 2013; TEIXEIRA; MUNARETTI; FERNANDES, 2016). Nesta sessão será abordado a influência da posição do payload nestes esforços característicos. São eles:

- *Rack*: Movimento torcional provocado por forças de torção ou tração aplicadas ao chassi do caminhão que eventualmente serão transferidas para outros componentes. Fenômeno presente quando a carga é posicionada de forma cruzada na caçamba.
- *Roll (Bias)*: Movimento lateral provocado por forças compressivas comparativamente muito maiores em um lado do chassi do caminhão em relação ao outro, criando um desbalanceamento lateral. Fenômeno presente quando a carga é posicionada descentralizada lateralmente.
- *Pitch*: Movimento longitudinal provocado por forças compressivas comparativamente muito maiores na frente do chassi do caminhão em relação à traseira (*pitch dianteiro*) ou o inverso (*pitch traseiro*). Fenômeno presente quando a carga é posicionada descentralizada longitudinalmente.

Imagem 22 – Payload com desbalanceamento lateral (roll) e a deformação da estrutura

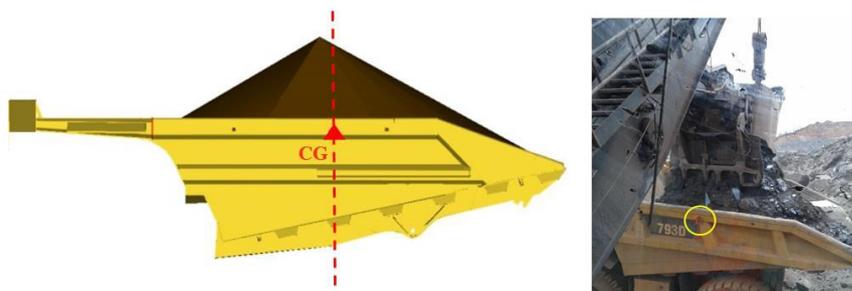


Fonte: (TEIXEIRA; MUNARETTI; FERNANDES, 2016)

OEM's e mineradoras criaram sistemas que buscam ajudar os operadores das escavadeiras/carregadeiras na etapa de carregamento, informando sobre o peso total da carga carregada, varreduras por telemetria e pesagem pós-carregamento, porém, todas estas ferramentas são de leitura pós-carregamento e não uma assistência durante a colocação. Como a visibilidade do operador da escavadeira é frequentemente limitada, seria benéfico fornecer aos operadores um melhor vista da carga útil, permitindo que eles melhorassem a distribuição do material dentro da carroceria do caminhão (HENZE et al., 2017).

Uma ferramenta mais simples e comumente encontrada nas mineradoras são as caçambas dos caminhões com marcas pintadas que apontam o centro de gravidade do equipamento, usados como um guia para melhorar o posicionamento das cargas, conforme imagem 23. Porém, ainda assim, é comum acontecerem cargas descentralizadas, como por exemplo na mina da Vale em Itabira, que registrou cargas descentralizadas entre 0,9 a 1,6%/mês entre os meses de junho e outubro de 2015 (TEIXEIRA, 2016).

Imagem 23 - Marca do centro de gravidade na caçamba para guiar o carregamento



Fonte: (TEIXEIRA, 2016)

Como já dito anteriormente, os caminhões, quando em operação, enfrentam cargas cíclicas com diferentes amplitudes e frequências. Porém, segundo Joseph & Chamanara (2012), quando comparamos um caminhão com carregamento desbalanceado e um carregamento homogêneo, o carregamento desequilibrado cria na estrutura picos de tensão na direção oposta, como sendo forças de reação, de modo a tentar deixar a estrutura estável. Estes picos, embora aconteçam por curtos períodos de tempo, são prejudiciais do ponto de vista de fadiga, já que precisam ser de grande amplitude para compensar o alto carregamento na direção oposta.

2.6.3 Carregamento em praça irregular

As condições das praças de carregamento são muito importantes para que se execute uma manobra adequada, segura e produtiva. Além de parâmetros fundamentais como largura, as praças de carregamento devem ter boas condições de piso, que devem ser secos, nivelados, firmes e com drenagem eficiente para que não se forme lamas e erosões (COUTINHO, 2017). Porém, é comum haver frentes de lavra onde as escavações são realizadas em pisos com ângulos mais agressivos, e, neste caso, o encosto dos caminhões fica prejudicado e o carregamento acaba sendo realizado em um piso não nivelado. Nestes casos, é indispensável um alinhamento entre os operadores do caminhão e da escavadeira para que a manobra seja feita a mais próxima do plano possível e o carregamento entre passes possa ser compensado pelo operador da carregadeira, buscando a distribuição homogênea do material na caçamba. Entretanto, a dificuldade de realizar o carregamento correto aumenta, e carregamentos desbalanceados podem ocorrer mais facilmente, criando os fenômenos de *pitch*, *roll* e *rack* já citados (TEIXEIRA, 2016).

Imagem 24 - Praça de carregamento com piso irregular



Fonte: (TEIXEIRA, 2016)

Os passes despejados pelas escavadeiras podem chegar a pesar até 100 toneladas de material e, quando são despejados na caçamba de uma altura de até 10m, sob condições de aceleração da gravidade, provocam grandes forças de impacto no chassi do caminhão fora-de-estrada, gerando ondas de choque de alta frequência que precisam ser absorvidas pelos pneus, suspensões e estrutura (ALI; FRIMPONG, 2018).

Porém, segundo Gandra (GANDRA, 2017), ao analisar o espectro gerado pela leitura de extensômetros instalados no chassi de um caminhão fora de estrada durante um ciclo operacional completo, é evidente que a etapa de carregamento cria tensões cíclicas de amplitudes e frequências muito menores do que nas etapas de viagem carregado e descarregado. Sendo assim, esta variável operacional não será abordada na metodologia deste trabalho, devido à sua baixa contribuição no fenômeno de falha estrutural por fadiga.

2.6.4 Falhas na suspensão

O sistema de suspensão de um veículo é responsável pela sustentação da carroceria e isolamento dos choques e vibrações causados pelo desnível das estradas de rodagem. A suspensão, além de garantir a segurança e conforto na condução, também desempenha um papel importante na preservação da integridade estrutural do chassi do veículo, já que ela atenua as forças externas para que não provoque cargas de amplitude alta na estrutura do veículo (LIU et al., 2018).

As operações com caminhões fora-de-estrada, por ocorrerem em ambiente de trabalho precário com condições operacionais complexas, está mais susceptível a ocorrerem falhas na suspensão, impactando a eficiência e confiabilidade das operações da frota (LI et al., 2012).

As falhas nas suspensões de caminhões fora de estrada normalmente se iniciam por uma descalibragem, usualmente pela perda de óleo/gás, alterando a altura da suspensão. Estas alterações de altura podem acabar provocando os fenômenos de *pitch*, *roll* e *rack* já mencionados. Como as pressões nas suspensões são sensorizadas por sistemas *wireless* e monitorados por uma sala de controle, a intervenção da manutenção pode ocorrer rapidamente, antes que cause problemas à estrutura do caminhão. Além disso, a periodicidade de inspeção/manutenção segundo o OEM é relativamente curta (500h ou 3 meses), facilitando a detecção de qualquer falha (CATERPILLAR, 2016). Portanto, esta variável operacional não

será abordada na metodologia deste trabalho, devido ao seu constante controle pela equipe de manutenção e logo, sua baixa contribuição no fenômeno de falha estrutural por fadiga.

2.6.5 Configuração da mina

O estágio (vida útil) de extração de uma jazida mineral também influencia na vida útil do chassi dos caminhões fora de estrada quando a fase de transporte é realizada por estes equipamentos. Isto acontece porque, em fases iniciais de extração, os minerais costumam ser extraídos em frente de lavras situados em regiões elevadas, fazendo com que o trajeto do caminhão carregado até o britador ocorra em declive ou em piso plano, e o trajeto descarregado em subida. Com o passar dos anos, as cavas vão sendo aprofundadas e as extrações passam a ser feitas em frentes de lavras em profundidade negativa. Como os caminhões normalmente não podem subir trechos com inclinação acima de 10%, os trechos de subida precisam ser alongados. Deste modo, o caminhão passa a percorrer, carregado, trajetos de subida mais longos, até chegar ao britador, e em seguida, retornar descendo descarregado em trajetos também longos (BORGES, 2013). Este fato, além de consumir mais combustível e influenciar nos custos produtivos da extração do mineral, também aumentam diretamente as cargas cíclicas que levam o chassi do caminhão à fadiga.

2.6.6 Design, manutenção e operação nas pistas

As pistas por onde trafegam os caminhões, embora sejam apenas de apoio para as atividades de mineração, tem papel importante na fase de transporte em lavras a céu aberto, e diferença significativa quando se fala na otimização de design e manutenção destas pistas (REIS et al., 2014; THOMPSON, 2011).

Mi et. al (2012) afirma que os caminhões fora de estrada transitam em pistas em péssimas condições que exigem das suas estruturas maiores resistências mecânicas quando comparados à outros veículos de carga. Reis et al. (2014) reconhece que as pistas de mineradoras nacionais possuem qualidade e eficiência inferiores aos padrões internacionais. Ele complementa que a importância das pistas é reconhecida pelas mineradoras, mas existe uma certa dificuldade em associar boas condições de pistas ao lucro efetivo e de incluir a manutenção de pistas na agenda do gerenciamento geral de uma mina.

Segundo Thompson (2011), a qualidade de uma pista terá impacto imediato na produtividade e nos custos da mina, e aspectos como a segurança das operações e longevidade dos

equipamentos são todos dependentes de pistas bem projetadas, construídas e conservadas. São vários os aspectos levados em conta na avaliação da qualidade de uma pista, como dimensões, materiais que compõem as camadas do solo, sistemas de drenagem, sistemas de segurança lateral (*berms*), periodicidade de manutenção, dentre outros. Neste trabalho, abordaremos as principais variáveis de pista que afetam a dinâmica veicular do caminhão, promovendo variações importantes nas cargas cíclicas e, por consequência, na fadiga do chassi.

- *Grade* de subida/descida

Os caminhões fora de estrada, ao transitarem em vias principais de cavas, inevitavelmente trafegam por trechos com inclinação vertical (subidas e descidas) que tem sua geometria definida em função de diversos parâmetros como torque do motor, peso bruto transportado, resistência ao rolamento, consumo de combustível, dentre outros (HOLMAN, 2006). É importante construir a via com um ângulo de inclinação ótimo capaz de reduzir o comprimento da estrada, o que reduziria o ciclo operacional do caminhão, equilibrando as outras variáveis de velocidade de tráfego, consumo de combustível e danos à estrutura do caminhão (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013, p.; THOMPSON, 2011).

Um ponto crítico é a regularidade destas inclinações que precisam ter *grades* suaves e constantes, reduzindo as mudanças de marcha, mantendo a velocidade média mais alta e, principalmente, reduzindo o surgimento de picos de tensão na estrutura, aumentando a vida útil do equipamento sob fadiga (HOLMAN, 2006; REIS et al., 2014). Os *grades* variáveis, mesmo sendo um problema-alvo a ser resolvido pelas mineradoras, muitas vezes não é solucionado, como mostrado nas imagens 25 e 26.

Imagem 25 - Uso correto de *grade* em trechos verticais



Fonte: Adaptado de (HOLMAN, 2006)

Imagem 26 - Irregularidade de *grade* em uma via principal

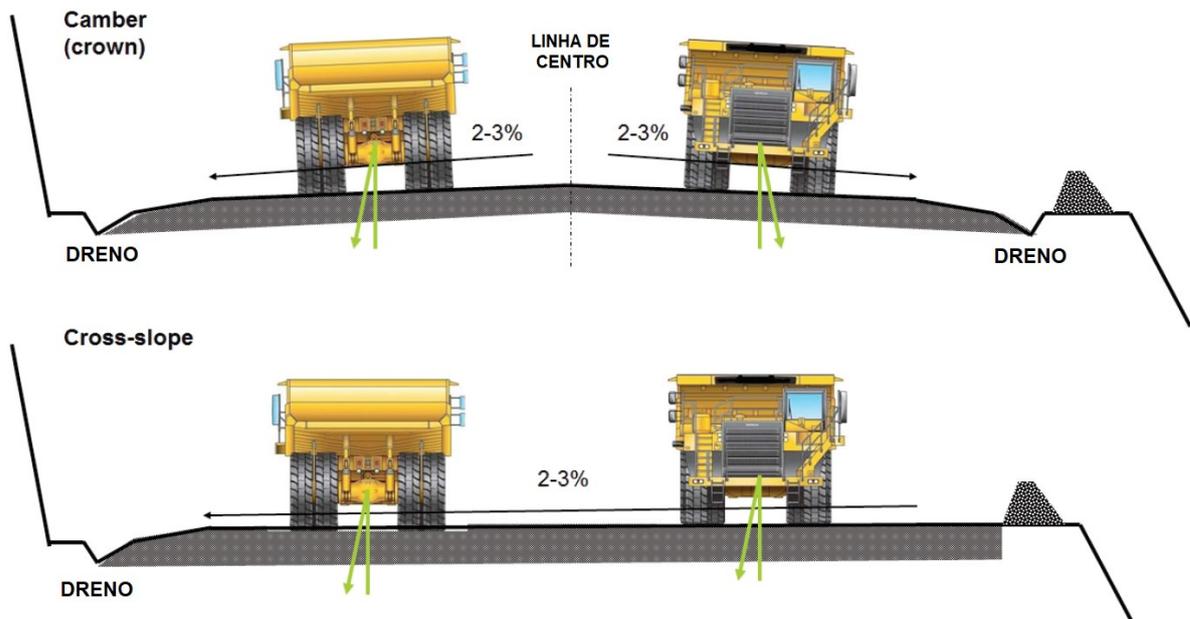


Fonte: Elaborado pelo autor

- *Camber ou cross-fall*

O *camber*, ou também chamado de *cross-fall*, são inclinações laterais aplicadas na pista para promover o rápido escoamento da água, evitando o seu acúmulo e penetração na superfície da estrada, o que pode induzir a formação de erosões e deslizamentos dos caminhões. A inclinação do *camber* deve ser constante entre 2 a 3%, partindo de uma linha central ou (*crown*) ou cruzando toda a pista (*cross-slope*) (THOMPSON, 2011).

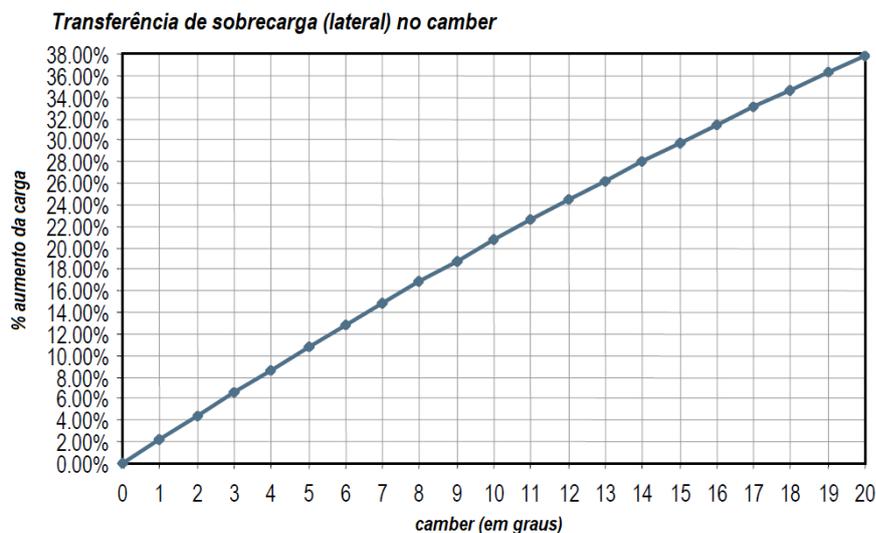
Imagem 27 - Camber (crown e cross-slope) em uma pista de mineração



Fonte: Adaptado de (THOMPSON, 2011)

O camber, quando em ângulo excessivo, provoca o surgimento de forças laterais na estrutura, que pode ser muito prejudicial à vida útil dos pneus, do chassi e de outros componentes. Esta sobrecarga lateral tem um comportamento aproximadamente diretamente proporcional ao ângulo do camber, como mostrado na imagem 28 e, portanto, como as massas transportadas são muito elevadas, pequenas variações no ângulo de cambagem da pista significam grandes forças laterais (HOLMAN, 2006).

Imagem 28 - Transferência de sobrecarga (lateral) no camber



Fonte: Adaptado de (HOLMAN, 2006)

- Raio de curvatura

O trânsito em curvas em uma mina à céu aberto são inevitáveis, devido à geometria que se cria com a formação da cava. Uma curva de maior raio permite uma velocidade de rodagem mais segura e maior estabilidade no tráfego do caminhão. Já as curvas mais agudas aumentarão os tempos do ciclo operacional do caminhão, já que será necessário reduzir sua velocidade, aumentando também o custo de transporte devido ao maior desgaste dos pneus e aumento dos esforços nos chassis (HOLMAN, 2006; REIS et al., 2014; THOMPSON, 2011).

Segundo Thompson (2011), as curvas ou ziguezagues em uma pista de mineração devem ser projetadas com um raio mínimo possível ideal de 200m e ter uma geometria suave e constante. Porém, este limite é muito conservador comparado ao trabalho de Reis et. al. (2014), que diz que o raio mínimo deve ser de 30m, e que ainda afirma que nas mineração é possível encontrar raios ainda menores devido à limitações físicas. Estes fortes raios de curvatura causam ainda

maiores danos à estrutura quando em planos inclinados, como mostra a imagem 29, já que existe uma sobrecarga longitudinal provocada pelos carregamentos que podem se somar ao desbalanceamento lateral provocado pelas curvas (TEIXEIRA, 2016).

Curvas com raios variáveis (curvas compostas) devem ser evitadas, assim como a coincidência de curvas horizontais e verticais (em subida ou descida), o que provocam torções no chassi (REIS et al., 2014; THOMPSON, 2011).

Imagem 29 - Estrada de mina à céu aberto com raios de curvatura aguda em rampas

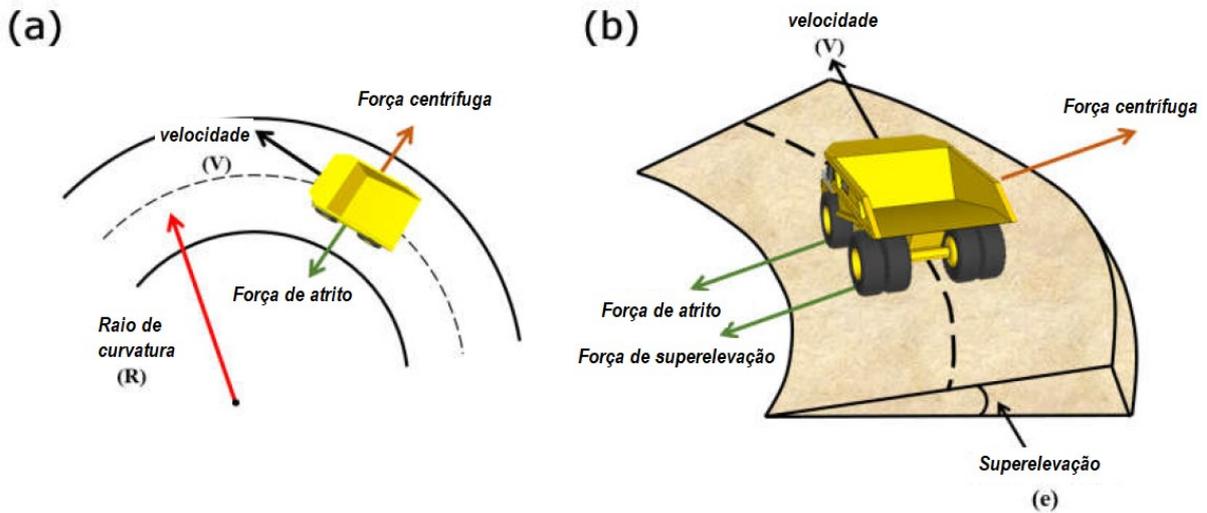


Fonte: (TEIXEIRA, 2016)

- Superelevação (*banking*)

A superelevação ou *banking* é um aterramento que se faz na face externa de uma curva, de modo à deixá-la com uma inclinação transversal, diminuindo a intensidade da força centrífuga e melhorando o balanceamento entre ela e a força de atrito entre pneu e solo, mantendo o caminhão mais estável e permitindo que ele trafegue com velocidades maiores nas curvas (JIEUN BAEK; YOSOON CHOI, 2017).

Imagem 30 - Desenho esquemático mostrando a geometria de raio de curvatura (a) e as forças que são geradas quando há uma superelevação (b)



Fonte: Adaptado de (JIEUN BAEK; YOSOON CHOI, 2017)

As superelevações não devem exceder 5-7% (3° a 4°) e devem ser utilizadas em curvas onde a velocidade exceda 15 Km/h (HOLMAN, 2006; HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013; THOMPSON, 2011). Para isto, sua inclinação deve ser calculada de acordo com a velocidade de tráfego na curva, conforme tabela abaixo:

Tabela 3 - Dimensões da superelevação de acordo com a velocidade e raio da curva

RAIO DA CURVA (m)	Velocidade (Km/h) e superelevação (m/m de largura da pista)									
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
50	0.035	0.060	0.090							
75	0.025	0.045	0.070	0.090						
100	0.020	0.035	0.050	0.075	0.090					
150	0.020	0.025	0.035	0.050	0.065	0.085				
200	0.020	0.020	0.025	0.035	0.050	0.065	0.080			
300	0.020	0.020	0.020	0.025	0.035	0.045	0.055	0.065	0.080	
400	0.020	0.020	0.020	0.020	0.025	0.035	0.040	0.050	0.060	
500	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.025	0.030	0.040	0.050	

Fonte: Adaptado de (THOMPSON, 2011)

- Buracos ou corrugações

Como dito anteriormente, o acúmulo de água na pista pode provocar erosões, que podem aparecer em formatos de buracos ou corrugações, como mostrados na imagem 31. Outros defeitos de superfície como afundamentos provocados pelas rodas, chamados de trilhas de rodas, também podem acontecer quando há acúmulo de água ou quando as subcamadas da pista não são dimensionadas de forma adequada.

Como estes defeitos alteram a geometria da superfície, quando o caminhão trafega sob eles, esforços são induzidos aos pneus e suspensões, podendo ser transferidos ao chassi do caminhão. Porém, atualmente, equipes de manutenção de pista das mineradoras fazem um monitoramento constante do surgimento destes defeitos, atuando com patrolas e compactadores, eliminando-os de forma rápida e eficaz. Além disso, estes defeitos, mesmo gerando cargas de média frequência (buracos) ou alta frequência (corrugações) na estrutura, não são comuns de existirem em todo o percurso do caminhão. Por esta razão, estas variáveis não serão abordadas na metodologia deste trabalho, devido ao seu constante controle, baixa incidência e sua pequena contribuição no fenômeno de falha estrutural por fadiga.

Imagem 31 - Buraco formado por acúmulo de água



Fonte: (THOMPSON, 2011)

- Velocidade de tráfego

A velocidade de um caminhão fora de estrada varia em função do seu modelo, potência do motor, sistema de transmissão, pneu utilizado, dentre outros fatores. O modelo usado neste trabalho pode atingir velocidades de até 54,3 km/h, graças à um motor de 2300 cv e um sistema de transmissão com 6 marchas à frente e 1 reversa, como mostrado na tabela abaixo.

Tabela 4 - Velocidade máxima de tráfego do caminhão fora de estrada

Máxima velocidade de tráfego (com pneus 40.00R57)			
Marcha		km/h	Rotação do motor (rpm)
Frente	1	11,80	1960
	2	15,90	1960
	3	21,50	1960
	4	29,00	1960
	5	39,40	1960
	6	54,30	2000
Reversa		10,90	1960

Fonte: Elaborado pelo autor

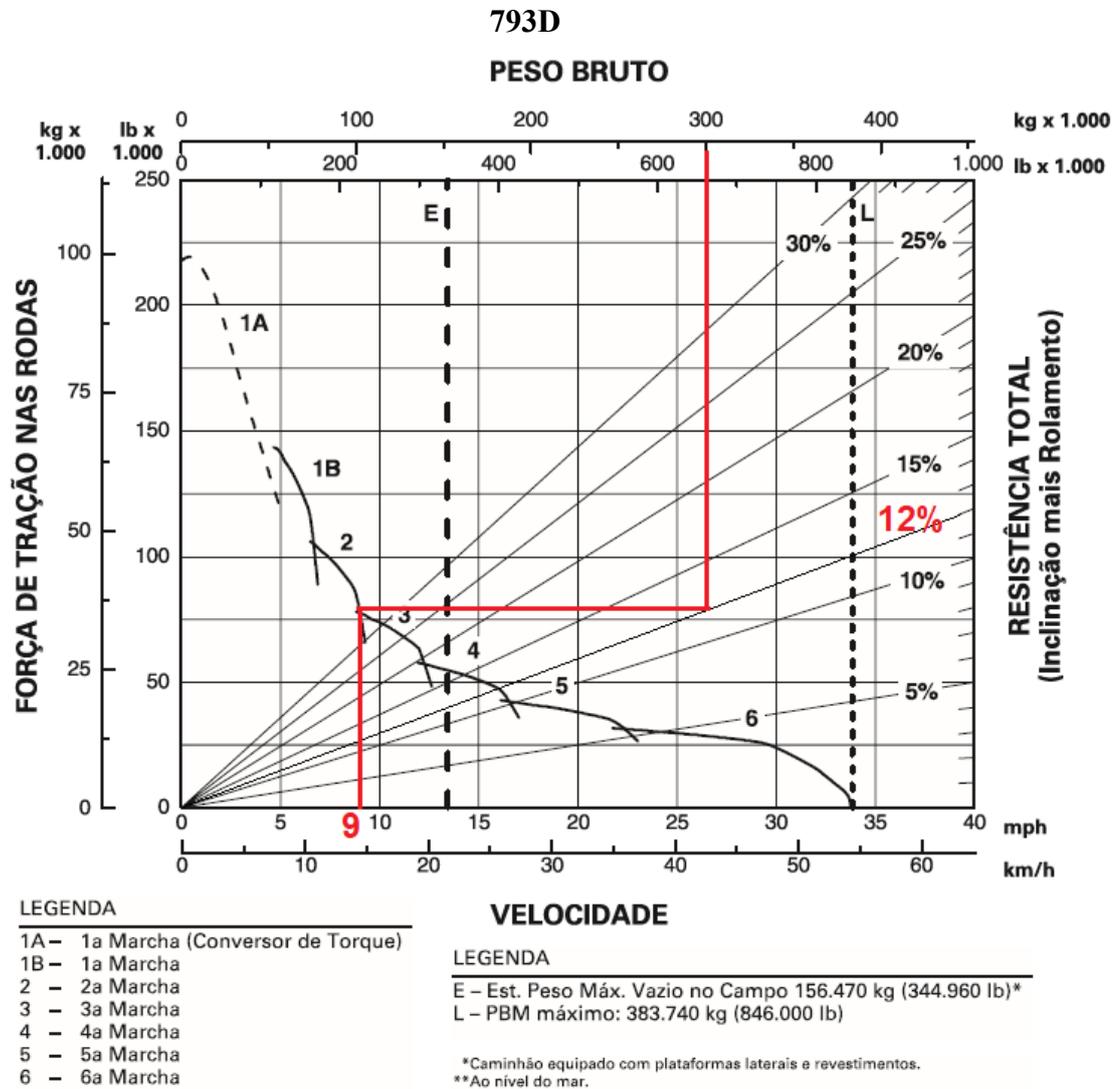
Mesmo sabendo a velocidade máxima que o caminhão atinge, raramente ele trafega nestas velocidades. Normalmente a velocidade é limitada pelas condições de carregamento, design da pista ou performance dos freios. Os OEM's disponibilizam ábacos onde é possível escolher para uma determinada inclinação da pista (subida e descida), peso transportado, qual será a marcha ideal de uso e por consequência a velocidade de transporte, como mostrado abaixo.

A imagem 32 mostra um ábaco para escolha da velocidade correta em trechos de subida. A partir do peso bruto transportado, é traçado uma linha vertical até que toque a linha relacionado à resistência total em % (inclinação da pista somada à resistência ao rolamento). Em seguida uma linha vertical é traçada até tocar a curva de transmissão, indicando a marcha correta de uso. A partir deste ponto, basta traçar uma linha vertical para baixo, e se encontrará a velocidade correta de tráfego.

Como exemplo, considerando um caminhão com peso bruto de 300 ton., em uma pista de inclinação máxima de 10% somado à resistência de rolamento de 2% (valor comumente

usado, segundo Reis (2014)), totalizando uma resistência total de 12%, a velocidade de tráfego ideal seria aproximadamente 9 km/h em 2ª marcha.

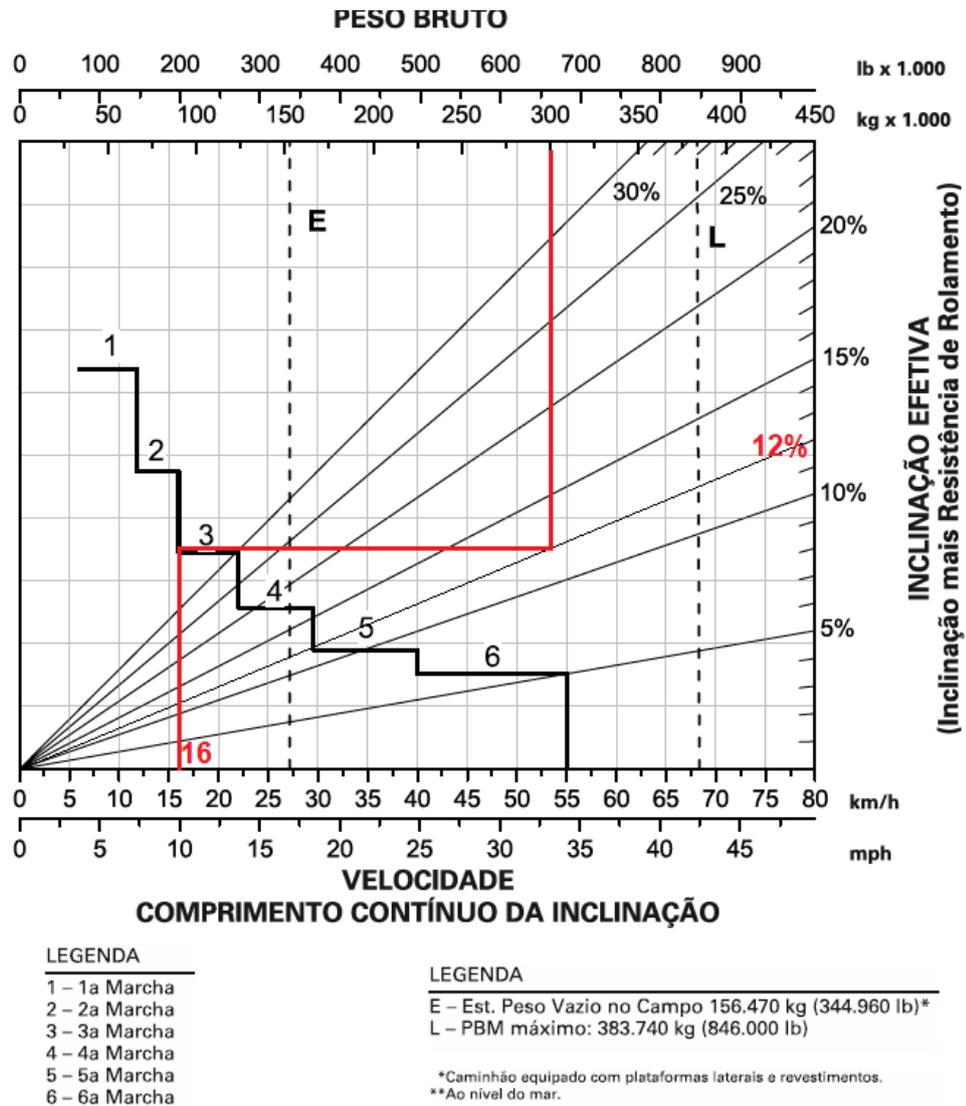
Imagem 32 - Ábaco de performance em inclinações de pista positiva para o caminhão



Fonte: Adaptado de (CATERPILLAR INC., 2011)

Em trechos de descida, o limitador da velocidade passa a ser o desempenho dos freios. O OEM's também disponibiliza ábacos para esta avaliação, como mostrado na imagem 33. Usando o mesmo exemplo da imagem anterior, em um trecho com descida de 10% somado à resistência ao rolamento de 2%, totalizando uma resistência total de 12%, a velocidade de tráfego ideal seria aproximadamente 16 km/h em 2ª marcha (velocidade máxima da 2ª marcha).

Imagem 33 - Ábaco de performance de freio em descidas para o caminhão 793D



Fonte: Adaptado de (CATERPILLAR INC., 2011)

Outro limitador de velocidades são as curvas, pois como já foi mostrado anteriormente, a força de atrito precisa contrapor a força centrípeta (diretamente proporcional à velocidade) para que o caminhão se mantenha estável em curva. Thompson et. al. (2011) cita uma forma de calcular a velocidade (V_0) quando a curva possui camber, conforme citado à seguir:

$$R = \frac{V_0^2 + U_{min} * e}{127 * e} \quad (21)$$

$$V_0 = \sqrt{e * (127 * R - U_{min})} \quad (22)$$

Onde:

V_0 = Velocidade do caminhão (km/h)

R = Raio de curvatura (m)

U_{min} = coeficiente de fricção lateral pneu-solo, normalmente assumido de 0 (piso molhado, macio ou lamacento) à 0,20 (piso seco, compactado e cascalhado).

Neste trabalho, em qualquer momento que se utilize esta fórmula, toma-se um coeficiente médio de 0,10.

e = superelevação da curva (em m/m de largura da pista).

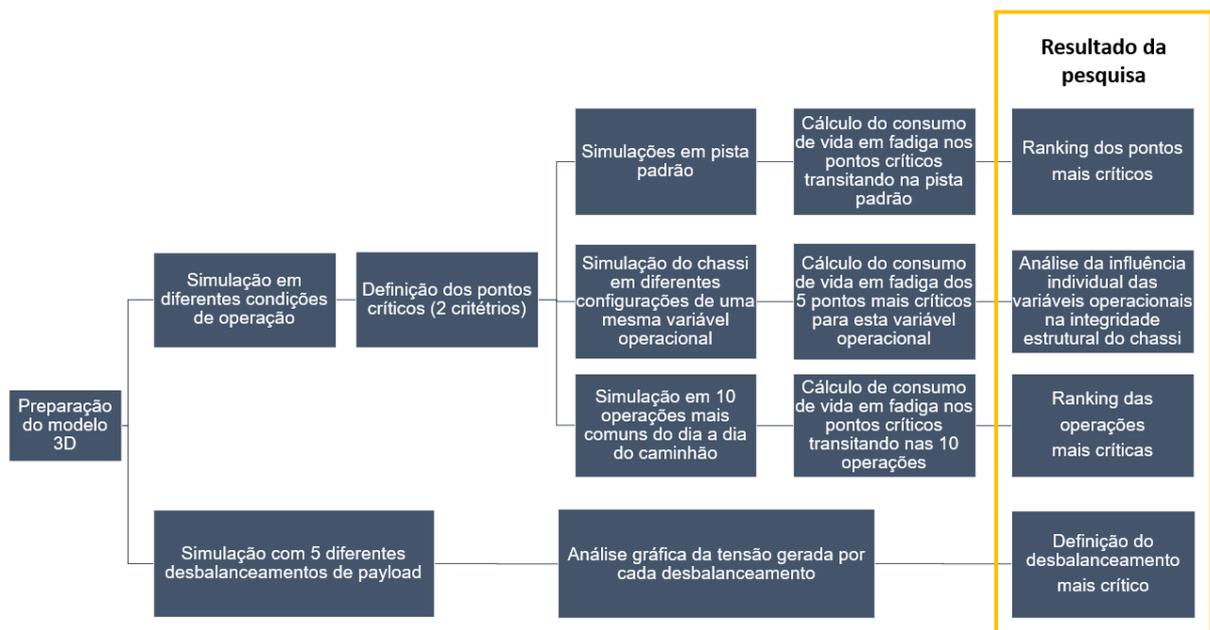
3 METODOLOGIA

Para analisar a influência que cada condição operacional tem na geração de tensões cíclicas no chassi de um caminhão fora de estrada, primeiramente é necessário ter um entendimento teórico e funcional das principais variáveis envolvidas neste processo, como características técnicas do caminhão, distribuição de payload, velocidade, geometria de pista, dentre outras informações que já foram apresentadas no referencial teórico deste trabalho.

De posse destas informações, a próxima etapa compreende ver como estas diversas variáveis geram tensões de carregamento no chassi do equipamento, o que poderia ser feito em âmbito real (através de instrumentação com extensômetros e acelerômetros de um caminhão real em operação) ou em âmbito virtual (simulações computacionais). A primeira opção, embora traga valores absolutamente reais, não permite saber a influência individual de uma certa variável na geração destas tensões, pois todas elas atuam em conjunto em uma operação real. Além disso, a instrumentação de um grande equipamento como este demandaria um alto investimento em equipamento/mão de obra, além de causar intervenções ou paradas na produção. Sendo assim, o estudo em meio virtual através de simulações computacionais se mostra mais adequado para este trabalho, e o fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho estão apresentadas a seguir.

3.1 Fluxograma de atividades

Imagem 34 - Fluxograma das atividades deste trabalho



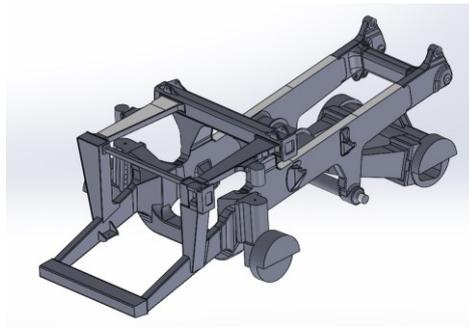
Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 34 apresenta o fluxograma da metodologia adotada nesta pesquisa, que possui 4 principais resultados, sendo eles: Criação de um ranking dos pontos mais críticos do chassi; Análise da influência individual de algumas variáveis operacionais na integridade do chassi do caminhão; Criação de um ranking das operações mais críticas (do ponto de vista de falha por fadiga); Definição de qual distribuição de payload na caçamba é mais crítica à integridade estrutural do chassi.

3.2 Preparação do modelo 3D e configuração das simulações estruturais

Todas as análises estruturais presentes neste trabalho foram conduzidas em ambiente computacional. Sendo assim, foi utilizado um modelo 3D do chassi de um caminhão fora de estrada comercial com capacidade de payload de aproximadamente 232 ton. Segundo Gandra (2017), este modelo possui alta precisão de detalhamento do chassi, já que foi gerado à partir de um escaneamento à laser de um chassi real, onde foi gerado uma nuvem de pontos, convertida em seguida em um modelo computacional sólido. Foram conduzidas algumas simplificações no modelo original, como eliminação de flanges e suportes, em prol de reduzir o tempo de processamento computacional nas simulações. Estas simplificações não tem alteração significativa na rigidez do chassi e foram realizadas utilizando o software Solidworks, licenciado pela PUC Minas. O modelo 3D simplificado está apresentado na imagem 35.

Imagem 35 - Modelo 3D do chassi do caminhão fora de estrada



Fonte: Adaptado de (GANDRA, 2017)

As análises estruturais utilizadas neste trabalho foram realizadas utilizando o software Simsolid, que, como descrito anteriormente, tem a tecnologia mesh-free, trazendo maior confiabilidade em simulações complexas de montagens muito grandes e reduzindo o tempo de processamento computacional (ALTAIR ENGINEERING, INC., 2020).

No setup do modelo 3D para as análises estruturais, são inseridas as propriedades mecânicas dos materiais, as condições de restrição e de amortecimento (suspensões). Além disso, cargas estáticas foram incluídas, que são os carregamentos sempre aplicados na estrutura do caminhão, como o seu peso próprio e o peso de outros componentes mecânicos como o motor, radiador, tanques de combustível e óleo, transmissões, dentre outros. Além das cargas estáticas, cargas variáveis também foram inseridas, que são cargas provenientes do peso do payload e seu posicionamento na caçamba. Todas estas informações acima, chamadas de condições de contorno, estão descritas a seguir.

3.2.1 Cargas estáticas e variáveis

O caminhão é composto por diversos componentes como motor, radiador, tanque de combustível, dentre outros, que estão instalados sob o chassi e tem influência significativa de peso. Estes componentes foram modelados como carregamentos estáticos, com suas amplitudes listadas na tabela 5 e locais de aplicação demonstrados na imagem 36

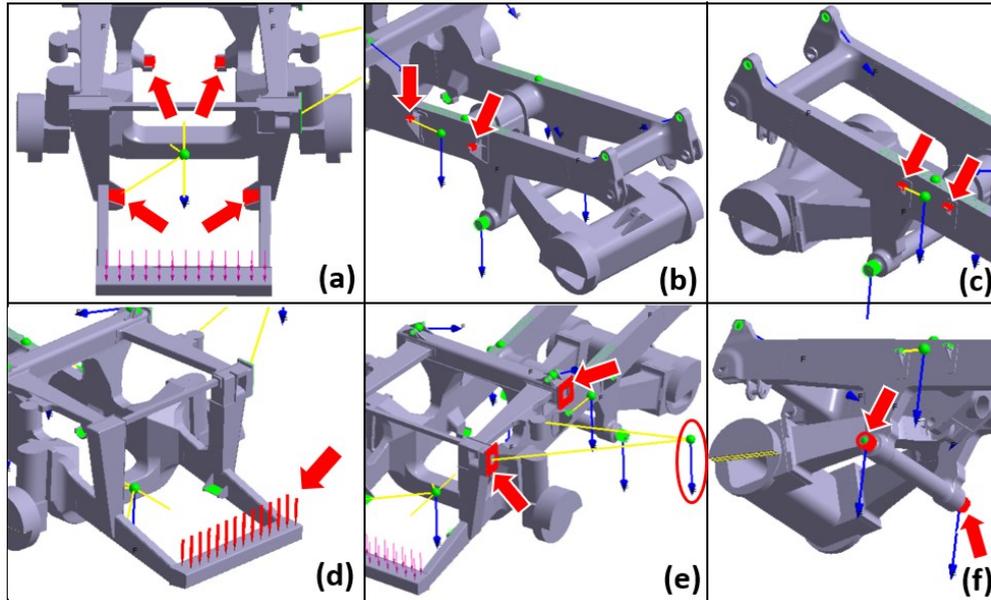
Tabela 5 - Cargas estáticas do caminhão, suas amplitudes e pontos de aplicação

Fonte	Valor	Pontos de aplicação
Motor e cárter	8721 Kgf	Imagem 35a
Tanque de combustível cheio	6128 Kgf	Imagem 35b
Tanque de elevação e freio	1436,5 Kgf	Imagem 35c
Sistema de arrefecimento	1889 Kgf	Imagem 35d
Conversor de torque e cárter	1046 Kgf	Imagem 35a
Cabine de operação	1814 Kgf	Imagem 35e
Cilindro de elevação	1150 Kgf (cada)	Imagem 35f
Força da gravidade (peso próprio do chassi)	1 G	-

Fonte: Adaptado de (GANDRA, 2017)

Outra carga aplicada nestas análises são as provenientes dos carregamentos vindos do peso da balança somada ao material carregado sobre ela. Estas cargas são variáveis, pois são diferentes quando o caminhão está carregado ou descarregado, e também pelo posicionamento do material na caçamba. É necessário saber como o peso do material carregado na caçamba é transferido ao chassi, pois ele está distribuído na caçamba, que por consequência está apoiada ao chassi. Porém, este apoio não é em todo o chassi, e, portanto, o peso não é transferido de forma homogênea, mas pontual e desigual.

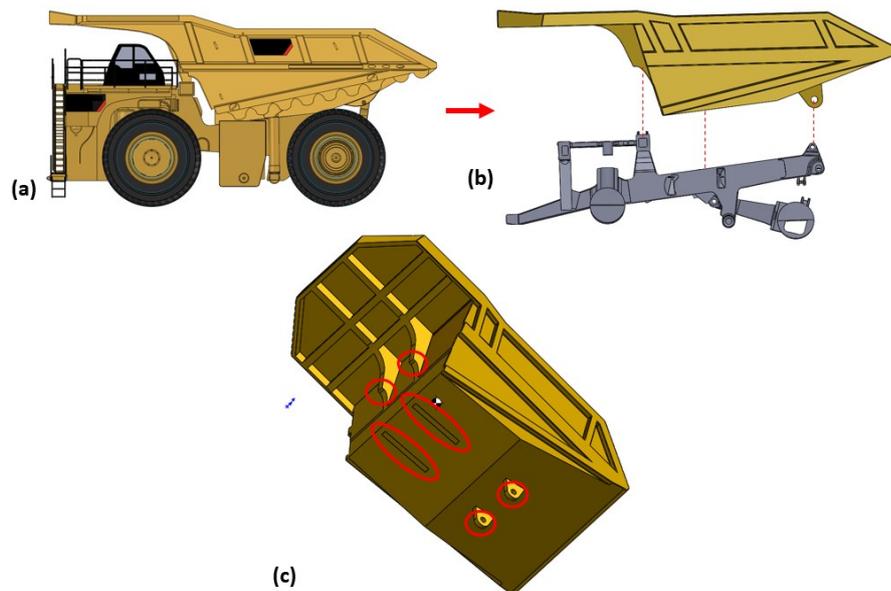
Imagem 36 - Regiões de aplicação das cargas estáticas



Fonte: Elaborado pelo autor

A caçamba do caminhão, também conhecida como balsa, transfere seu peso ao chassi através de 6 pontos, como mostrado na imagem 37. Estes pontos, portanto, recebem o peso da caçamba vazia (33.189 Kgf) somado ao peso do material transportado, que, no caso do caminhão modelo, atinge até 232.711 Kgf, totalizando 265.900 Kgf.

Imagem 37 - Caminhão (a) simplificado em chassi e caçamba e seus locais de acoplamento (b), totalizando 6 pontos, sendo os dois centrais apoiados em longarinas (c)

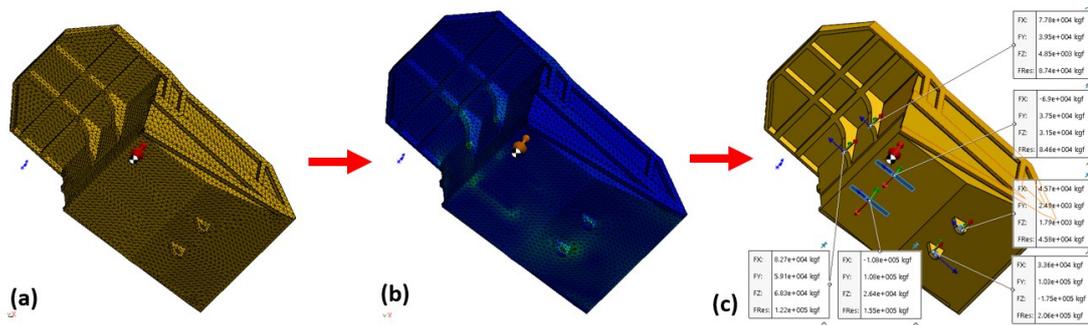


Fonte: Elaborado pelo autor

Para saber como o peso do material é transferido ao chassi, análises estruturais estáticas são conduzidas em um modelo 3D simplificado da caçamba, aplicando restrição total nos 6 pontos onde ela apoia no chassi, descritos na imagem 37c. A caçamba é configurada como de material ASTM A36 e seu peso próprio de 33.189Kgf é igualmente distribuído em acordo com o centro de massa. Além do peso próprio, é incluído um carregamento referente à capacidade máxima de carregamento de material. Estas simulações foram realizadas utilizando o software Solidworks, aplicando malha sólida, com elementos triangulares de arestas com dimensões de 10 a 210mm, totalizando 66.134 nós e 35.014 elementos.

O objetivo destas simulações não é encontrar tensões e deformações na caçamba, mas calcular as forças de apoio nos 6 pontos onde a caçamba toca no chassi, onde é possível encontrar os vetores de força em X, Y e Z em cada ponto, conforme mostrado na imagem 38. Estes vetores de força se referem aos esforços que a caçamba somada ao *payload* (balanceado ou não) fazem no chassi, e serão posteriormente usados nas suas análises estruturais.

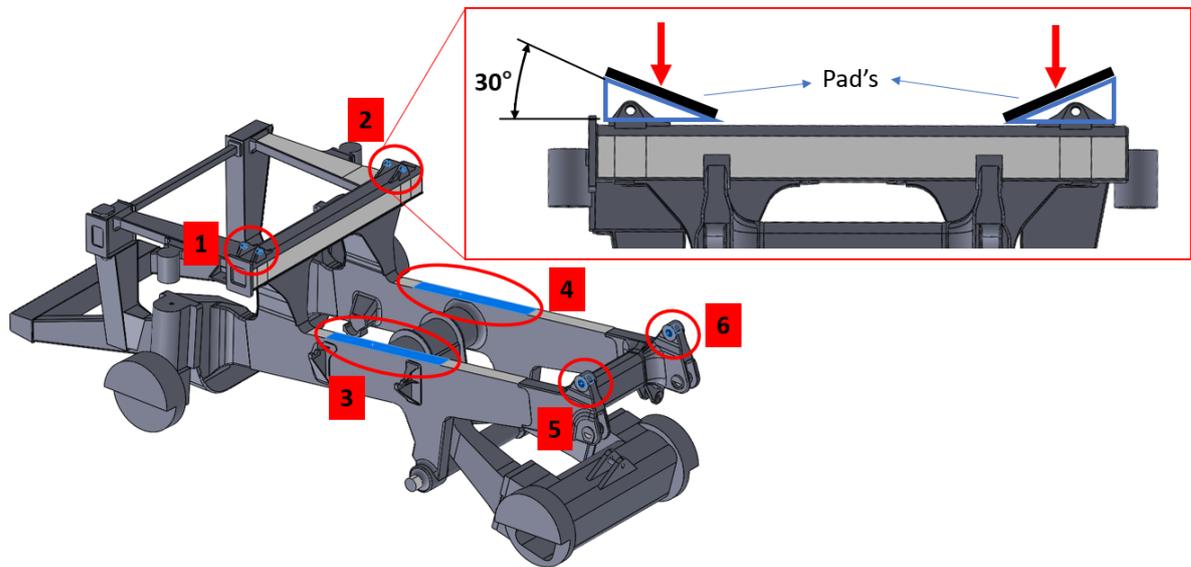
Imagem 38 - Malha utilizada na análise estática da caçamba (a); resultados de tensão encontrados (b); vetores de força de reação nos 6 pontos de apoio do chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

Os vetores de força coletados no passo anterior são aplicados em 6 pontos no chassi, representados na imagem 39. Nos dois pontos dianteiros, a caçamba não toca diretamente no chassi, mas sim em pad's de amortecimento, que são cunhas inclinadas à 30 graus, revestidas com borracha, para diminuir o carregamento vertical e atenuar as cargas de choque no fechamento da báscula. Os pad's não são incluídos no modelo 3D, mas as forças, quando aplicadas nos pontos 1 e 2, são decompostas (matriz de rotação) simulando a existência deste componente.

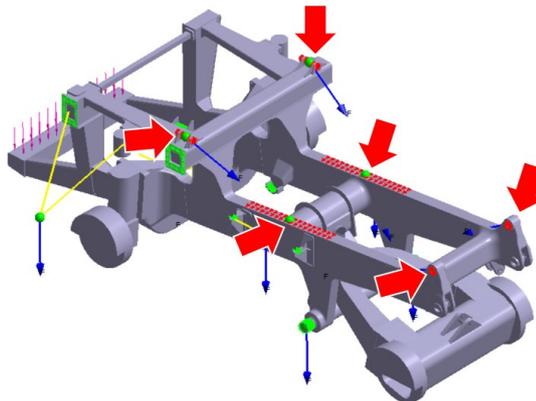
Imagem 39 - 6 locais do chassi onde são carregados os esforços vindos da caçamba, com enfoque para os pontos 1 e 2 onde existem os pad's de amortecimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma são coletados os esforços provenientes da báscula carregada ou descarregada, e aplicados ao chassi nos respectivos 6 pontos de apoio, como mostrado na imagem 40, input fundamental para a execuo das outras simulaes deste estudo.

Imagem 40 - Aplicaes de cargas estáticas vindas do conjunto camba/payload



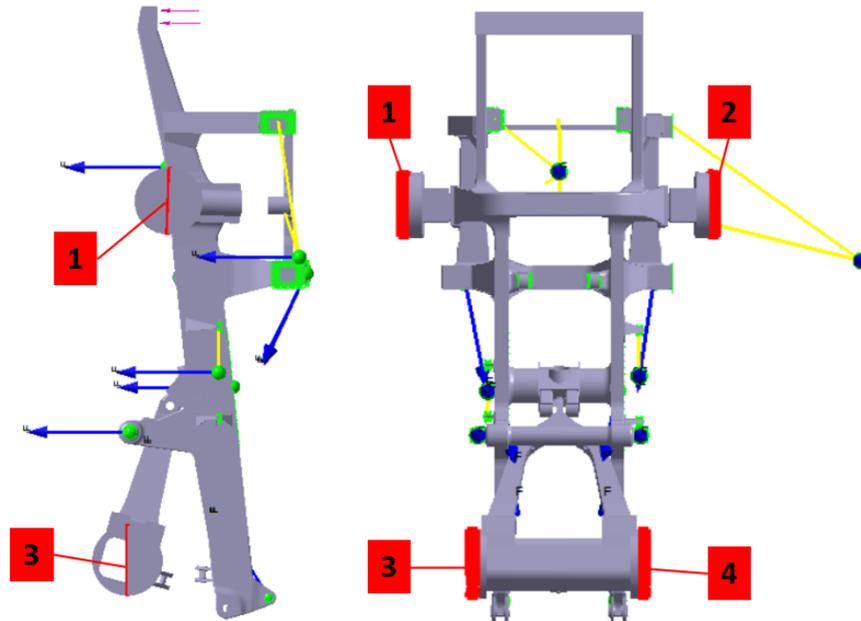
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Condies de restrio

Nas 4 faces onde so encaixados os cubos de roda do caminho, foram aplicadas restries imveis, bloqueando todos os graus de liberdade, como representado na imagem 41. Deste

modo, simulamos o caminhão como estando com as rodas travadas ao solo, porém, desconsiderando o efeito da rigidez dos pneus (não modelados).

Imagem 41 - Condições de restrição do chassi

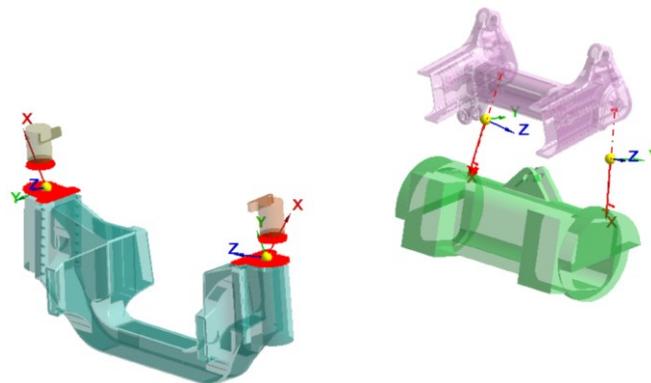


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Condições de amortecimento

Os amortecedores do chassi foram modelados como conectores virtuais criados entre duas faces, com uma rigidez direcional definida. Para o caminhão analisado, 4 amortecedores estão presentes no modelo, todos com rigidez axial de 2069,83 Kgf/cm, conforme ilustrados na imagem 42.

Imagem 42 - Condições de amortecimento do modelo do chassi



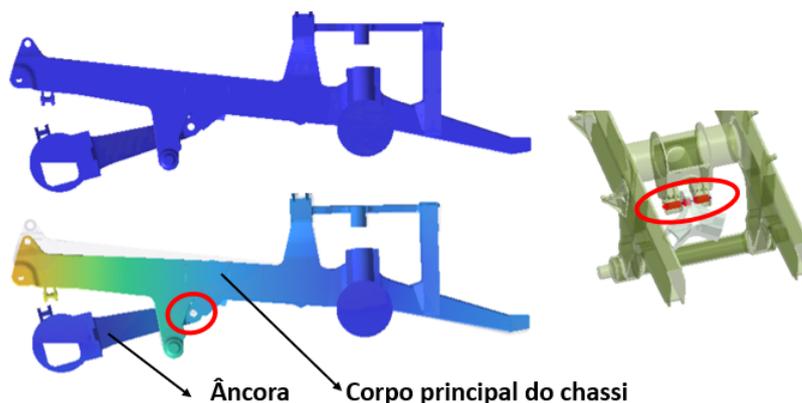
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.4 Conectores

Em um caminhão real, as uniões entre as peças que compõem seu chassi são soldadas, mas nestas simulações elas não são abordadas desta forma, visto que o comportamento estrutural da junta soldada não é objetivo deste trabalho, mas sim do conjunto todo. Neste caso, a união entre as peças do chassi é feita por *bonded connections*, ou seja, toda face em contato com a outra é tratada como integralmente ligadas, sem deslocamentos entre as mesmas.

Como mostrado na imagem 43, no mancal de ligação entre o corpo principal do chassi e a âncora (peça traseira onde são encaixados os eixos traseiros das rodas do caminhão) existe um conector do tipo pino, que permite o deslocamento rotacional no seu eixo axial, permanecendo restrito nos outros graus de liberdade. Este conector permite que o modelo 3D se comporte da mesma forma que o chassi real, que também possui um eixo neste mancal, permitindo o mesmo giro.

Imagem 43 - Conector pino entre o corpo principal do chassi e a âncora



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.5 Definição das fontes excitadoras

Segundo Spinelli (2017) um veículo é um sistema dinâmico que experimenta um espectro de vibrações muito amplo, com inúmeras fontes excitadoras. Para os caminhões fora de estrada, algumas destas fontes são:

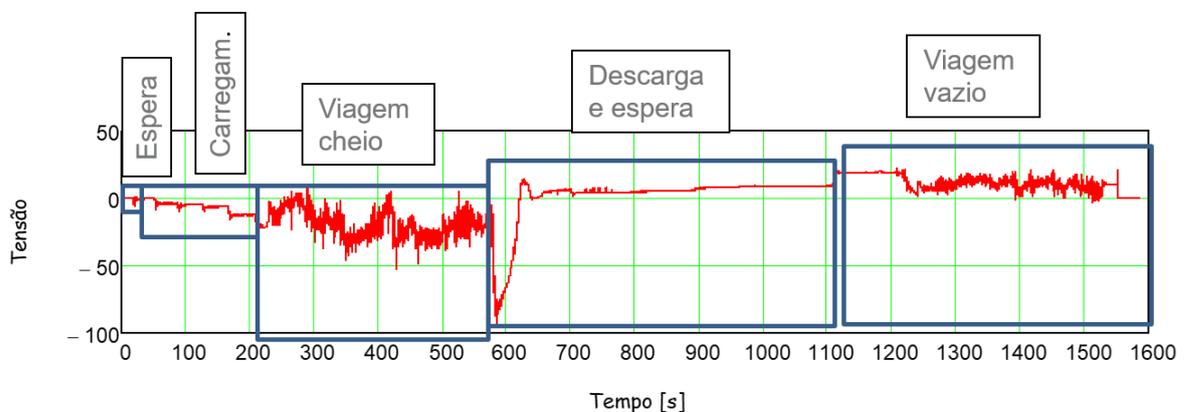
- Irregularidades das pistas (vibrações de alta ou média frequência); ex. buracos, corrugações, trilhas de rodas, etc.

- Geometria das pistas (vibrações de baixa frequência); ex. subidas, descidas, curvas, inclinações laterais (camber), etc.
- Componentes mecânicos (vibrações de alta ou média frequência); motor, transmissão, bombas, componentes giratórios (rodas/pneus, eixos, etc.).
- Carregamento e descarregamento (vibrações de baixa frequência); ex. despejo de material sobre a caçamba pela escavadeira e posterior descarregamento do material por elevação da caçamba.

As vibrações provocadas pelas irregularidades da pista, embora de alta/média frequência, normalmente apresentam baixa amplitude, sendo amplamente absorvidas pela deformação elástica dos pneus, gerando menores esforços no chassi. As vibrações causadas pelos componentes mecânicos também são de alta/média frequência e baixa amplitude, sendo também, significativamente absorvidas pelos dispositivos isoladores de vibração (coxins hidráulicos e elastoméricos).

As excitações geradas nas etapas de carregamento e basculamento, conforme citado anteriormente, apresentam uma amplitude muito inferior em relação às etapas de viagem cheio e vazio, como mostrado na imagem 44, obtida através da instrumentação de um caminhão real em operação. No descarregamento, pode ocorrer um pico de tensão, provocado pela elevação da caçamba (concentração dos esforços na parte traseira), porém, como ocorre uma vez a cada ciclo operacional do caminhão, tem pouca influência de fadiga sob o chassi. As etapas de viagem, como mostra o gráfico, além de apresentar maiores amplitudes de cargas, ocorrem maiores variações das tensões geradas, sendo mais danoso em relação à fadiga estrutural do chassi, e, portanto, são as operações que tem enfoque neste trabalho.

Imagem 44 - Dados coletados de operação real com caminhão fora de estrada



Fonte: (VIEIRA; TORRES, 2017)

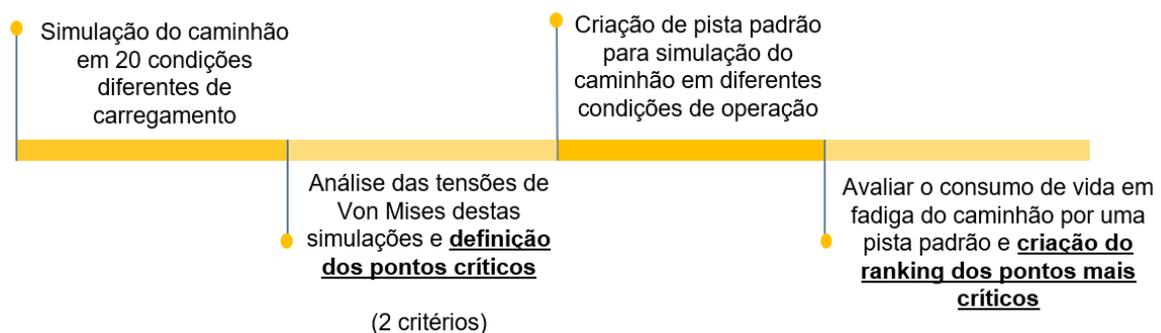
As vibrações causadas pela geometria da pista, ou seja, variações entre os trechos de subida, descida, inclinações laterais, curvas, etc., acontecem em baixa frequência, porém com amplitude bem maior que as outras fontes excitadoras. Isto porque, como há inclinação do caminhão, forças de inércia que mudam o centro de massa e velocidades/acelerações envolvidas, há uma tendência para o surgimento de esforços concentrados, superando a capacidade de isolamento destes esforços pelos pneus e suspensões, gerando elevadas tensões no chassi. Acrescido a estas vibrações, esforços provenientes do desbalanceamento de payload podem amplificar estas tensões, diminuindo a vida útil do equipamento.

Sendo assim, este trabalho terá enfoque no estudo da influência das condições operacionais que envolvem desbalanceamento de payload, velocidade de tráfego e geometria de pista (desconsiderando as suas irregularidades), por serem variáveis com maior contribuição na formação de cargas de elevada amplitude, e, portanto, mais prejudiciais em relação à fadiga. As outras fontes de vibração não serão abordadas neste trabalho.

3.3 Metodologia de criação do ranking dos pontos mais críticos do chassi

A primeira análise abordada por este trabalho busca descobrir quais são os pontos mais críticos do chassi de um caminhão fora de estrada, organizando-os em um ranking de criticidade, conforme fluxograma apresentado na imagem 45 abaixo:

Imagem 45 - Fluxograma de criação do ranking dos pontos mais críticos do chassi do caminhão fora de estrada



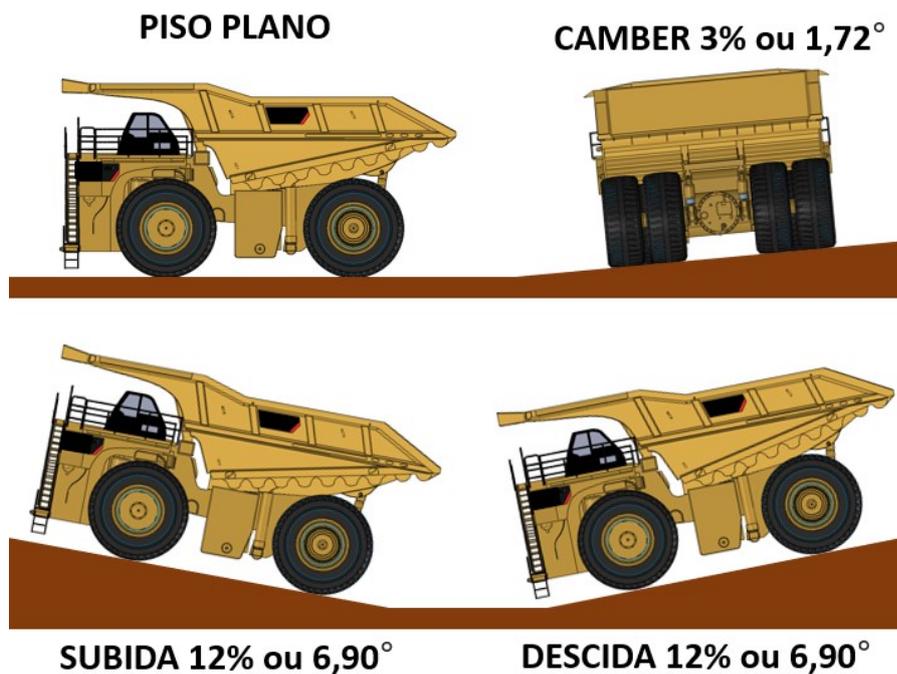
Fonte: Elaborado pelo autor

Para definir quais pontos do chassi são críticos, é necessário realizar simulações de análise estrutural do chassi submetido a diferentes operações, avaliar as tensões de Von Mises geradas no chassi por estas operações e, baseado em um critério específico, definir quais serão estes

pontos. Estas análises podem ser feitas de forma estática, sem a necessidade de realizar uma análise dinâmica pois, a diferença entre os resultados obtidos entre os estudos estático e dinâmico é apenas a amplitude das tensões, mas os locais onde estas tensões surgem tendem a permanecer os mesmos. Deste modo, realizando este estudo de forma estática é possível economizar tempo de processamento computacional e custos operacionais.

Como as tensões no chassi variam muito em função da operação do equipamento, busca-se realizar simulações estáticas em uma grande variedade de condições operacionais, de modo a encontrar uma maior dispersão dos locais de surgimento destas tensões elevadas entre os estudos, elegendo mais pontos críticos. Sendo assim, as simulações estáticas são conduzidas com o chassi posicionado em 4 inclinações de piso diferentes, conforme imagem 46: Caminhão em um piso plano; em uma descida acentuada; em uma subida acentuada; em um piso com camber.

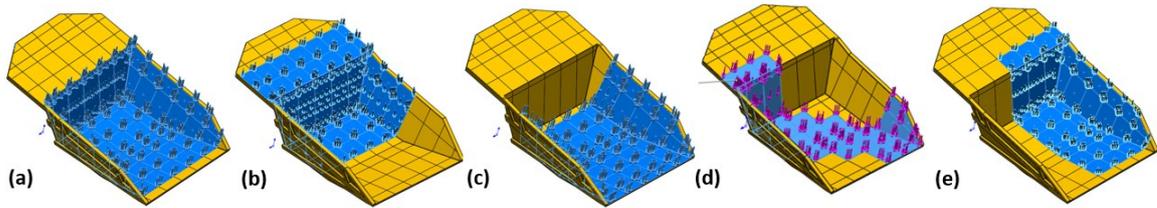
Imagem 46 - Inclinações do caminhão para simulação estática



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, para cada uma dessas 4 condições de inclinação do solo, foram simuladas 5 condições de posicionamento de payload, conforme imagem 47 (payload igualmente distribuído, com desbalanceamento diagonal, lateral, dianteiro e traseiro).

Imagem 47 - Posicionamentos de payload, sendo eles o posicionamento balanceado(a), e os desbalanceamentos diagonal (b), lateral (c), frontal (d) e traseiro(e)



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo assim, no total, são realizados 20 estudos estáticos, como sumarizados na tabela 6.

Tabela 6 - Simulações estáticas conduzidas no chassi

Simulação	Posicionamento de payload	Inclinação do piso
S1	Igualmente distribuído	Piso plano (0% ou 0°)
S2	Desbalanceamento diagonal	Piso plano (0% ou 0°)
S3	Desbalanceamento lateral	Piso plano (0% ou 0°)
S4	Desbalanceamento dianteiro	Piso plano (0% ou 0°)
S5	Desbalanceamento traseiro	Piso plano (0% ou 0°)
S6	Igualmente distribuído	Camber (3% ou 1,72°)
S7	Desbalanceamento diagonal	Camber (3% ou 1,72°)
S8	Desbalanceamento lateral	Camber (3% ou 1,72°)
S9	Desbalanceamento dianteiro	Camber (3% ou 1,72°)
S10	Desbalanceamento traseiro	Camber (3% ou 1,72°)
S11	Igualmente distribuído	Subida (12% ou 6,90°)
S12	Desbalanceamento diagonal	Subida (12% ou 6,90°)
S13	Desbalanceamento lateral	Subida (12% ou 6,90°)
S14	Desbalanceamento dianteiro	Subida (12% ou 6,90°)
S15	Desbalanceamento traseiro	Subida (12% ou 6,90°)
S16	Igualmente distribuído	Descida (12% ou 6,90°)
S17	Desbalanceamento diagonal	Descida (12% ou 6,90°)
S18	Desbalanceamento lateral	Descida (12% ou 6,90°)
S19	Desbalanceamento dianteiro	Descida (12% ou 6,90°)
S20	Desbalanceamento traseiro	Descida (12% ou 6,90°)

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Critério para definição de um ponto crítico

A partir dos resultados encontrados nas 20 simulações estáticas listadas na tabela 6, é abordada uma análise visual das tensões de Von Mises geradas da estrutura, em busca de identificar as regiões onde os valores das tensões geradas pelos carregamentos se apresentam

elevadas. A partir destes valores os pontos críticos são definidos baseado em dois critérios, um numérico e outro visual. Para ser definido como ponto crítico, a região analisada precisa atender um ou ambos os critérios descritos abaixo:

- **Critério numérico**

O critério numérico de seleção de uma região como sendo ponto crítico segue a formulação abaixo:

$$\sigma_{PC} \geq \frac{(0,5 * \sigma_{esc})}{1,5} = \frac{(0,5 * 331)}{1,5} = 110,33 \text{ MPa} \quad (23)$$

σ_{PC} = Tensão de um ponto crítico

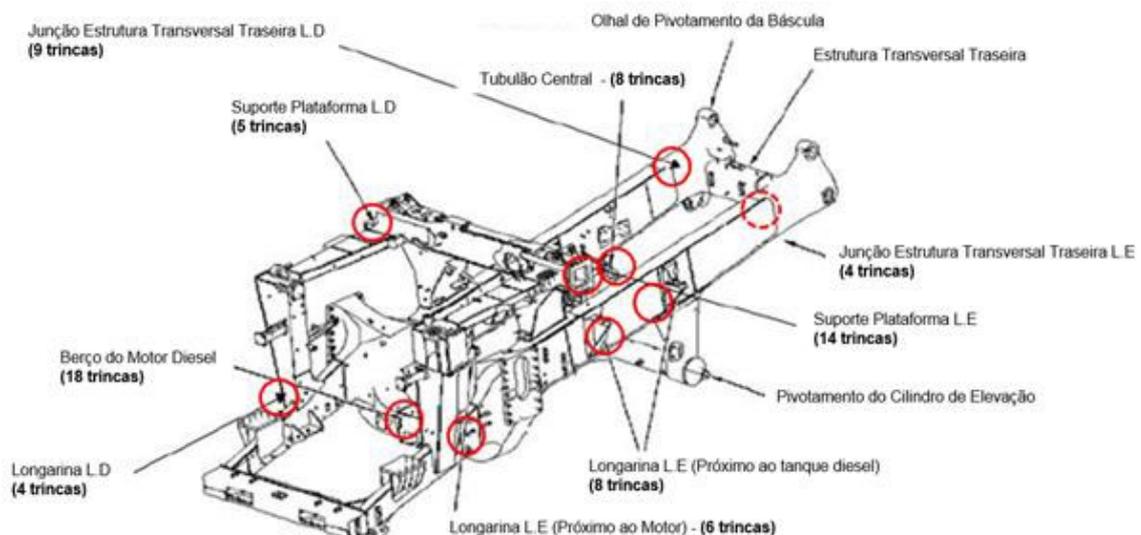
σ_{esc} = Tensão de escoamento do material (Neste caso, dentre os dois materiais que compõem o chassi, utilizou-se a menor tensão de escoamento, 331 MPa).

Deste modo, nas 20 simulações estáticas, as regiões onde a tensão ultrapassa 110,33 MPa, são tratadas como pontos críticos.

- **Critério visual**

O critério visual se baseia na avaliação das regiões de um chassi real usado que apresentaram trincas, mapeadas por ensaio por líquido penetrante, conforme apresentado na imagem 48, abordado no trabalho de Gandra (2017). A inclusão destes pontos como críticos é importante pois é um forte indício de locais com concentrações de tensões e pontos frágeis sujeitos à fadiga.

Imagem 48 - Mapeamento de trincas em um chassi real coletados pela técnica de ensaio por líquido penetrante



Fonte: (GANDRA, 2017)

Após definidos os pontos críticos, para criar o ranking de criticidade entre eles, é necessário conhecer o comportamento estrutural do chassi quando o caminhão está em operação, submetido as fontes excitadoras descritas na seção 3.2.5 deste trabalho. Para fazer isto em ambiente de simulação computacional, é criada uma pista padrão, e o chassi é simulado como se trafegasse por esta pista, simulando o trajeto em uma mina, conforme descrito a seguir.

3.3.2 Pista padrão

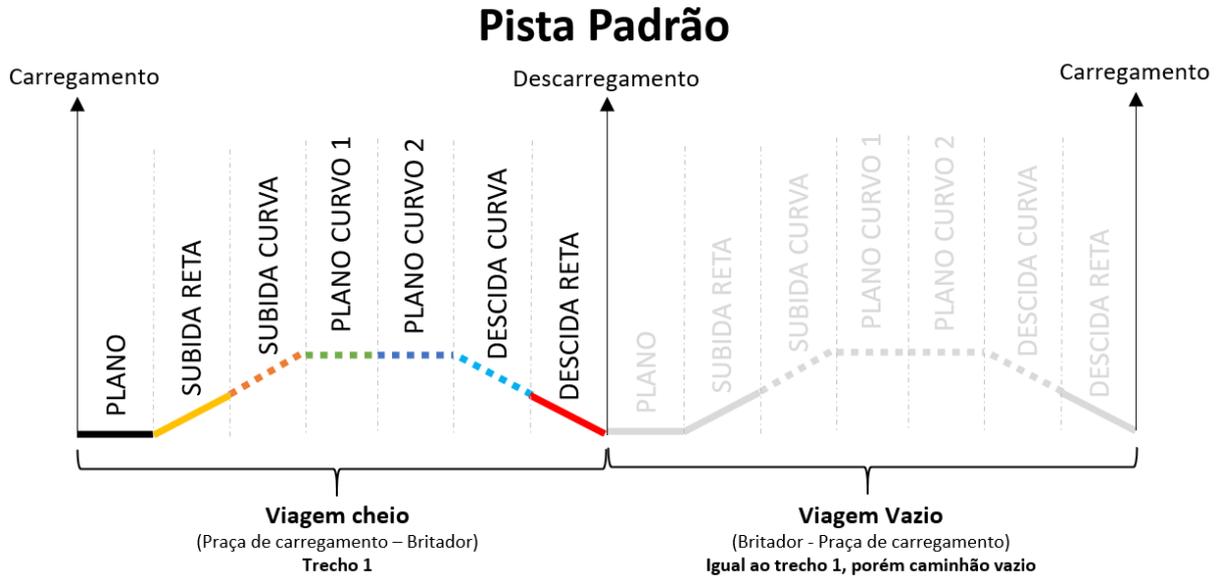
A pista padrão é criada de modo a permitir avaliar o comportamento estrutural do chassi quando submetido a diferentes variáveis operacionais, além de viabilizar uma análise comparativa entre a criticidade dos pontos do chassi e entre os trechos que compõem esta pista. Esta pista abrange as principais geometrias de pista de uma mina, composta pelos trechos citados abaixo:

- Trecho plano reto
- Trecho em subida reta
- Trecho em subida curva (com ou sem superelevação)
- Trecho plano curvo (com ou sem superelevação)
- Trecho em descida reta
- Trecho em descida curva (com ou sem superelevação)

A geometria da pista e as variáveis operacionais como velocidades, raios de curva, inclinação de subidas e descidas e ângulos de superelevação seguem os valores sugeridos por um fabricante do caminhão (CATERPILLAR, 2016) e por um manual de pistas de mineração (THOMPSON, 2011). A inclinação adotada nas subidas foi a máxima permitida por estas bibliografias (10%) e nas descidas foi adotado o mesmo valor pois, em muitas ocasiões, o caminhão transita na mesma pista no trajeto de ida e retorno e, portando, a inclinação de subida se torna o parâmetro de limitação de construção da via.

A pista padrão definida para este trabalho está representada na imagem 49.

Imagem 49 - Pista padrão para tráfego do caminhão fora de estrada



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da pista padrão, são criados 03 modelos de pista, onde a pista 01 é dimensionada para ter uma severidade leve, a pista 02 uma severidade média e a pista 03 uma severidade alta. Para variar as severidades entre os trechos de cada pista, são alteradas variáveis operacionais como velocidade, inclinação longitudinal e transversal da pista, raio das curvas, uso de superelevação nas curvas, etc. A tabela 7 apresenta os 03 modelos de pista criados a partir da pista padrão e suas variáveis operacionais.

Tabela 7 - Variáveis operacionais de cada pista padrão

Pista	Plano		Subida reta		Subida curva			Plano curvo 1			Plano curvo 2			Descida curva			Descida reta			
	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Cross-slope (%)	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Grade (%)	Grade (%)	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Raio de curvatura (m)	Superelevação (%)	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Raio de curvatura (m)	Superelevação (%)	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Raio de curvatura (m)	Superelevação (%)	Grade (%)	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Raio de curvatura (m)	Superelevação (%)	Velocidade (Km/h) Carregado e Descarregado	Grade (%)
1	40	0	8	10	10	8	200	7	42,16	200	7	16,33	30	7	10	16	200	7	16	10
	54,3		17	(const.)	(const.)	17			42,16			16,33			(const.)	40			40	(const.)
2	40	3	8	8 a 12	10	8	200	0	42,16	200	0	16,33	30	0	10	16	200	0	16	8 a 12
	54,3		17	(variável)	(const.)	17			42,16			16,33			(const.)	40			40	(variável)
3	54,3	3	14,4	8 a 12	10	14,4	200	0	54,3	200	0	29,39	30	0	10	28,8	200	0	28,8	8 a 12
	54,3		30,6	(variável)	(const.)	30,6			54,3			29,39			(const.)	54,3			54,3	(variável)

Fonte: Elaborado pelo autor

Abaixo estão listadas as considerações tomadas na escolha das variáveis operacionais. Para definição das velocidades foram utilizados os ábacos de um fabricante de caminhões fora de estrada, conforme mostrado nas imagens 32 e 33:

- Trecho plano
 - Na pista 01, quando carregado, o caminhão trafega com a velocidade 25% menor que a indicada pelo fabricante. Quando descarregado, trafega com a velocidade indicada pelo fabricante (que coincide com a máxima velocidade do equipamento, 54,3 km/h, conforme tabela 4). Não há presença de cross-slope.
 - Na pista 02, o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém com a presença de cross-slope.
 - Na pista 03, também existe cross-slope e a velocidade de tráfego é a máxima do equipamento (valor sugerido pelo fabricante) para ele carregado e descarregado.
- Trecho subida reta
 - Na pista 01, a velocidade é escolhida conforme ábaco do fabricante mostrado na imagem 32, considerando uma inclinação de subida de 10% somado à 2% de resistência ao rolamento. Para o caminhão carregado, a velocidade indicada é de 8 km/h, enquanto que para descarregado, a velocidade é de 17 km/h. Na pista 01 o *grade* de subida é constante, com inclinação de 10%.
 - Na pista 02, o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém o *grade* de subida é variável, primeiramente em uma inclinação de 8% seguido de uma de 12%, condição danosa segundo o fabricante.
 - Na pista 03, o *grade* de subida permanece variável (8 e 12%), porém a velocidade é aumentada em 80%, tanto para o caminhão carregado como para ele descarregado (14,4 e 30,6 km/h, respectivamente). Deste modo, simula-se uma forma imprudente de condução.
- Trecho subida curva
 - Pelo fato de não existir uma fórmula/ábaco específico para velocidades sugeridas em trechos em subida curva, primeiramente é calculado a velocidade indicada para o *grade* de subida, conforme ábaco da imagem 32. Em seguida, é calculada a velocidade indicada para o trecho em curva, conforme equação 22. A velocidade escolhida é a menor entre os dois resultados, que é a calculada em função do *grade* de subida.

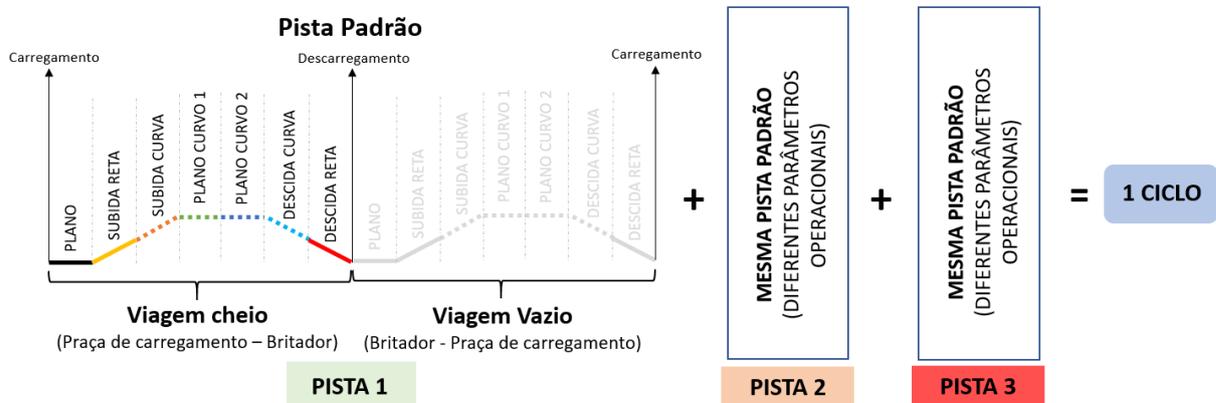
- Para as 3 pistas foi considerado um *grade* de subida homogêneo de 10% + 2% de resistência ao rolamento, e um raio de curvatura de 200m (sugerido como raio mínimo para estradas de caminhão fora de estrada por Thompson (2011))
- A pista 01 possui uma superelevação de 7%, que atenua os efeitos do deslocamento lateral da carga. A velocidade definida é a sugerida pelo fabricante (8 km/h para deslocamento carregado e 17 km/h para deslocamento descarregado)
- Na pista 02 o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém ela não possui superelevação, condição que torna a pista mais danosa.
- Na pista 03 o caminhão trafega em uma curva também sem superelevação, porém em uma velocidade 80% acima que a sugerida pelo fabricante tanto para o caminhão carregado como para ele descarregado (14,4 e 30,6 km/h, respectivamente).
- Trecho plano curvo 1
 - Para as 3 pistas foi considerado um raio de curvatura de 200m (sugerido como raio mínimo para estradas de caminhão fora de estrada por Thompson (2011)) e uma velocidade igual para o caminhão carregado e descarregado.
 - A pista 01 possui uma superelevação de 7%, que atenua os efeitos do deslocamento lateral da carga. A velocidade é de 42,16 km/h, calculada pela equação 22.
 - Na pista 02 o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém ela não possui superelevação, condição que torna a pista mais danosa.
 - Na pista 03 o caminhão trafega em uma curva também sem superelevação, porém, na velocidade máxima do caminhão (54,3 km/h), configurando uma condução imprudente.
- Trecho plano curvo 2
 - Para as 3 pistas foi considerado um raio de curvatura de 30m (sugerido como raio mínimo para estradas de caminhão fora de estrada por Reis et. al. (2014)) e uma velocidade igual para o caminhão carregado e descarregado.
 - A pista 01 possui uma superelevação de 7%, que atenua os efeitos do deslocamento lateral da carga. A velocidade é de 16,33 km/h, calculada pela equação 22.

- Na pista 02 o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém ela não possui superelevação, condição que torna a pista mais danosa.
- Na pista 03 o caminhão trafega em uma curva também sem superelevação, porém, com uma velocidade 80% maior que a calculada para as pistas 01 e 02 (29,39 km/h), configurando uma condução imprudente.
- Trecho descida curva
 - Assim como foi feito do trecho de subida curva, a velocidade é calculada conforme o ábaco de frenagem disponibilizado pelo fabricante, conforme imagem 33.
 - Para as 3 pistas foi considerado um *grade* de subida homogêneo de 10% + 2% de resistência ao rolamento, e um raio de curvatura de 200m (sugerido como raio mínimo para estradas de caminhão fora de estrada por Thompson (2011))
 - A pista 01 possui uma superelevação de 7%, que atenua os efeitos do deslocamento lateral da carga. A velocidade definida é a sugerida pelo fabricante (16 km/h para deslocamento carregado e 40 km/h para deslocamento descarregado)
 - Na pista 02 o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém ela não possui superelevação, condição que torna a pista mais danosa.
 - Na pista 03 o caminhão trafega em uma curva também sem superelevação, porém a velocidade é aumentada em 80% para o caminhão carregado (28,8 km/h) e levada à máxima velocidade para ele descarregado (54,3 km/h). Deste modo, simula-se uma forma imprudente de condução.
- Trecho descida reta
 - Na pista 01, a velocidade é escolhida conforme ábaco de frenagem disponibilizado pelo fabricante, mostrado na imagem 33, considerando uma inclinação de descida de 10% somado à 2% de resistência ao rolamento. Para o caminhão carregado, a velocidade indicada é de 16 km/h, enquanto que para descarregado, a velocidade é de 40 km/h. Na pista 01 o *grade* de descida é constante, com inclinação de 10%.
 - Na pista 02, o caminhão trafega com a mesma velocidade da pista 01, porém o *grade* de descida é variável, primeiramente em uma inclinação de 8% seguido de uma de 12%, condição danosa segundo o fabricante.

- Na pista 03, o *grade* de descida permanece variável (8 e 12%), porém a velocidade é aumentada em 80% para o caminhão carregado (28,8 km/h) e levada à máxima velocidade para ele descarregado (54,3 km/h). Deste modo, simula-se uma forma imprudente de condução.

Para as três pistas, o caminhão percorrerá cada uma delas com a caçamba totalmente carregada e em seguida descarregada, em sequência. Sendo assim, o percurso pelas 3 pistas carregado e descarregado é nomeado como sendo 1 ciclo, e servirá como parâmetro para a criação do ranking dos pontos críticos, conforme apresentado na imagem 50.

Imagem 50 - Pista padrão, seus trechos e suas variações (pistas 1, 2 e 3), criando um ciclo completo



Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada trecho da pista padrão, é realizado uma simulação estrutural estática com aspecto dinâmico, ou seja, de forma analítica, são calculados os ângulos de pitch e roll induzidas pelas variáveis operacionais em cada trecho, e reposicionadas as cargas com a inclinação corrigida, e, em seguida, realizado a simulação de forma estática. Deste modo, é possível obter o histórico dinâmico de tensões de cada ponto crítico que, embora seja resultante de simulações estruturais estáticas, retrata uma condição dinâmica de operação.

Para os trechos de subida e descidas retas, adota-se o *grade* como o ângulo pitch. Já para os trechos de curvas retas, onde há um desbalanceamento lateral da carroceria, calcula-se o ângulo de rolagem da estrutura de acordo com a formulação de Gillespie (GILLESPIE, 1992), conforme apresentado na seção 2.2 deste trabalho, que define o ângulo de rolagem em função da massa aplicada ao veículo, velocidade, raio de curvatura, geometria dos eixos/suspensões do caminhão e rigidez vertical e de rolagem da suspensão. Os deslocamentos laterais do pneu são desconsiderados. Nos trechos de subida e descida com curvas, é calculada uma inclinação

resultante entre o ângulo de pitch e roll. As inclinações laterais de trechos retos ou curvos provenientes de ângulo de camber ou superelevação de curvas também são considerados na inclinação resultante da carroceria.

3.3.3 Análise estrutural e método de avaliação dos resultados

No total, são realizadas 50 análises estruturais no software Simsolid, cada uma representando um trecho da pista padrão com suas respectivas variáveis operacionais e com os carregamentos corrigidos em função dos ângulos de pitch e roll calculados analiticamente. Estas análises estáticas com aspecto dinâmico são conduzidas utilizando o mesmo modelo 3D e condições de contorno descritos na sessão 3.2 deste trabalho. Sendo assim, a tabela 8 apresenta uma listagem de todas estas simulações, de onde serão analisados os valores de tensão de Von Mises gerados nos pontos críticos definidos segundo os critérios descritos anteriormente.

Tabela 8 - Simulações estáticas com aspecto dinâmico e as variáveis operacionais

Simulação	Pista	Trecho	Grade longitudinal do piso (%)	Inclinação lateral do piso (%)	Velocidade (km/h)	Raio de curvatura (m)	Caminhão Carregado	Caminhão Descarregado
S21	1	1	0	0	40	0	x	
S22		2	10	0	8	0	x	
S23		3	10	7	8	200	x	
S24		4	0	7	42,16	200	x	
S25		5	0	7	16,33	30	x	
S26		6	-10	7	16	200	x	
S27		7	-10	0	16	0	x	
S28		8	0	0	54,3	0		x
S29		9	10	0	17	0		x
S30		10	10	7	17	200		x
S31		11	0	7	42,16	200		x
S32		12	0	7	16,33	30		x
S33		13	-10	7	40	200		x
S34		14	-10	0	40	0		x
S35	2	1	0	3	40	0	x	
S36		2	8	0	8	0	x	
S37		3	12	0	8	0	x	
S38		4	10	0	8	200	x	
S39		5	0	0	42,16	200	x	
S40		6	0	0	16,33	30	x	
S41		7	-10	0	16	200	x	

S42	2	8	-8	0	16	0	x	
S43		9	-12	0	16	0	x	
S44		10	0	3	54,3	0		x
S45		11	8	0	17	0		x
S46		12	12	0	17	0		x
S47		13	10	0	17	200		x
S48		14	0	0	42,16	200		x
S49		15	0	0	16,33	30		x
S50		16	-10	0	40	200		x
S51		17	-8	0	40	0		x
S52		18	-12	0	40	0		x
S53	3	1	0	3	54,3	0	x	
S54		2	8	0	14,4	0	x	
S55		3	12	0	14,4	0	x	
S56		4	10	0	14,4	200	x	
S57		5	0	0	54,3	200	x	
S58		6	0	0	29,39	30	x	
S59		7	-10	0	28,8	200	x	
S60		8	-8	0	28,8	0	x	
S61		9	-12	0	28,8	0	x	
S62		10	0	3	54,3	0		x
S63		11	8	0	30,6	0		x
S64		12	12	0	30,6	0		x
S65		13	10	0	30,6	200		x
S66		14	0	0	54,3	200		x
S67		15	0	0	29,39	30		x
S68		16	-10	0	54,3	200		x
S69		17	-8	0	54,3	0		x
S70		18	-12	0	54,3	0		x

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores de tensão de Von Mises de cada um dos pontos críticos são coletados, criando um histórico de tensões ao longo do tráfego pela pista padrão (1 ciclo).

3.3.4 Contagem de ciclos de fadiga (Rainflow) e dano acumulativo

Utilizando os valores de tensões de Von Mises das análises estruturais e o método de contagem de ciclos de fadiga de Rainflow ((MATSUISHI; ENDO, 1968), são calculados quantos carregamentos indutores de fadiga existem ao longo do trajeto pela pista padrão. Como output desta contagem de ciclos, obtém-se os ciclos de tensão indutores de fadiga e seus valores

de tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e tensão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$), de onde se calculam as tensões média (σ_m) e alternada (σ_a) pelas equações 1 e 2. Em seguida, para cada um desses ciclos indutores de fadiga, calcula-se a tensão limite de fadiga para vida finita (S_f) segundo o critério de Soderberg (BUDYNAS; NISBETT, 2011), como mostrado na equação 10.

No cálculo segundo o critério de fadiga de Soderberg é necessário conhecer também a tensão de escoamento do material (S_y) e a tensão de limite à fadiga (S_e). A tensão de escoamento adotada neste estudo é de 331 MPa (menor tensão dentre os dois materiais do chassi), sem impactos significativos nos cálculos, pois as tensões de escoamento dos dois materiais são muito próximas, conforme tabela 2. Já a tensão limite de fadiga adotada é de 260 MPa (S_e do aço fundido), pois foi o único material ensaiado em fadiga por Gandra (2017). Como os dois materiais que compõem o chassi apresentam similaridades nos valores de tensão de escoamento, alongamento e limite de resistência, espera-se que seus valores de tensão limite de fadiga (S_e) também sejam similares, e, portanto, a unificação deste valor é aceitável. Além disso, como a tensão limite de fadiga é obtida através de ensaios de um corpo de prova padrão em laboratório, é pertinente esperar que nos componentes do chassi do caminhão fora de estrada, o S_e tenha um valor diferente do ensaiado, devido às diferenças de tamanho/forma, método de manufatura, ambiente de operação, etc. Para compensar estas diferenças, existem fatores modificadores do S_e , que quantificam estas variações entre a aplicação real e o corpo de prova, e corrigem o valor de S_e . Porém, para definir estes fatores modificadores é importante um conhecimento aprofundado sobre aspectos de fabricação, geometria e operação de cada componente, informações que demandam uma análise mais complexa do equipamento e que podem ser executadas em trabalhos futuros. Para a metodologia deste trabalho, como se trata de uma abordagem primária ao tema, o valor de S_e aplicado será o medido em laboratório (260 MPa), sem correções. Além disso, não serão adotados fatores de segurança (F.S.) para determinação da curva limite de Soderberg pelo fato dele já ser um método conservador.

Após o cálculo do S_f , através das equações 4, 5 e 6, encontra-se o número de ciclos até a fadiga (N) provocado por cada ciclo indutor de fadiga, em cada ponto analisado do chassi. Porém, como cada ponto possui diversos ciclos indutores de fadiga durante o trajeto pela pista padrão, é necessário aplicar os conceitos de dano acumulativo, através da formulação de Palmgren-Miner (PALMGREN, 1924), encontrando o dano equivalente acumulado em um ciclo de trajeto pela pista padrão em cada ponto crítico, induzido pelos vários ciclos de fadiga obtidos na contagem por *Rainflow*. Desta forma, calculando o inverso do dano equivalente,

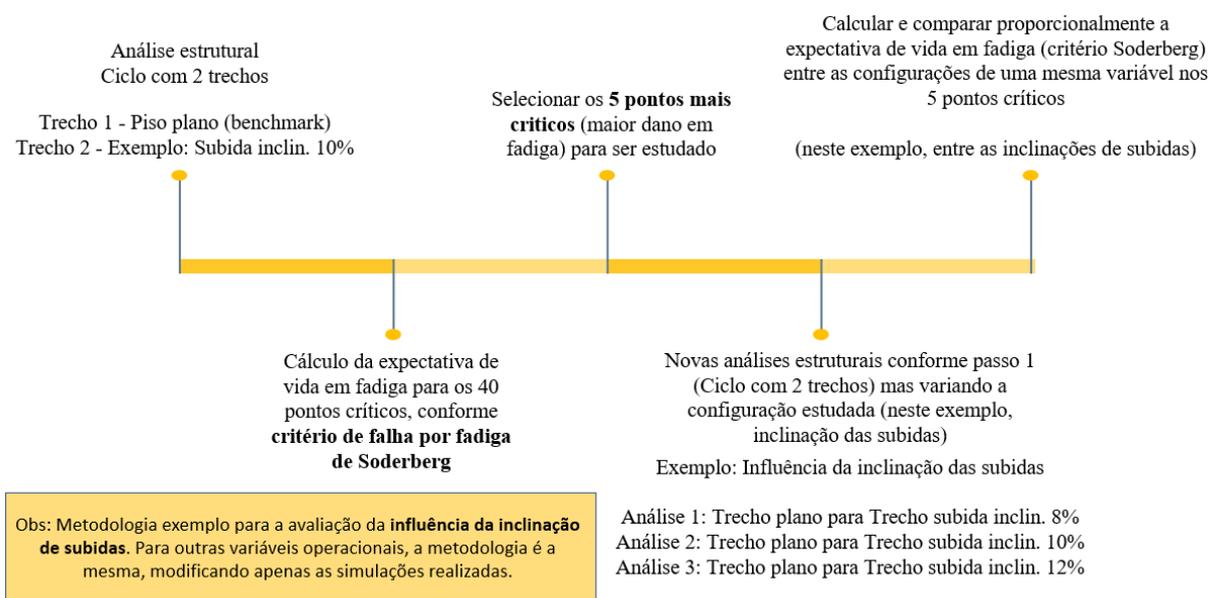
obtém-se ao final o número de ciclos que cada ponto crítico consegue desempenhar até a falha, ou seja, a expectativa de vida (mensurada em número de tráfegos pela pista padrão).

Organizando estas expectativas de vida em ordem crescente de dano, cria-se um ranking dos pontos críticos, mostrando quais pontos tem mais sensibilidade à falha por fadiga, apresentados na sessão resultados deste trabalho.

3.4 Metodologia de avaliação da influência individual das variáveis operacionais no comportamento estrutural do chassi

Esta metodologia busca estudar qual a influência individual de algumas variáveis operacionais na integridade estrutural do chassi do caminhão, conduzida conforme fluxograma abaixo. O fluxograma abaixo (imagem 51) apresenta como exemplo a metodologia adotada para a avaliação da influência da inclinação de subidas no comportamento estrutural do chassi, porém, para outras variáveis operacionais, a metodologia será a mesma, modificando apenas as análises estruturais adotadas no estudo.

Imagem 51 - Fluxograma de estudo da influência individual das operações na integridade estrutural do chassi do caminhão



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta metodologia consiste em uma análise comparativa e, portanto, é necessário que aborde condições iguais para a simulação nos trechos analisados. Neste caso, é criada uma condição de tráfego padrão (composta por 2 trechos), onde o caminhão sempre parte de um trecho plano reto, que seria a condição mais estável do chassi (benchmark), para um trecho que contenha a

variável operacional a ser analisada. Em seguida, são coletados os valores de tensão de Von Mises, criando um histórico de tensão de dois carregamentos em sequência (trecho plano para trecho de estudo), mas sempre o caminhão partindo do mesmo benchmark (trecho plano reto), viabilizando uma análise comparativa de fadiga.

Em seguida, utilizando o critério de falha de fadiga de Soderberg (BUDYNAS; NISBETT, 2011), calcula-se a expectativa de vida nos pontos críticos definidos na sessão 5.3 deste trabalho, e selecionam-se os 5 pontos mais críticos dentre eles (os que apresentam menor expectativa de vida), para serem estudados no próximo passo.

A etapa seguinte consiste em realizar novas análises estruturais, do mesmo modo que no passo 1 (dois trechos, sendo um benchmark e um contendo a variável a ser estudada), porém para mais configurações desta variável estudada. Por exemplo, para o estudo da influência da inclinação das subidas no comportamento estrutural do chassi, nesta etapa são feitas 3 análises estruturais, todas elas compostas por dois trechos, sendo o primeiro o benchmark (piso plano) e o segundo uma subida com inclinação de 8, 10 e 12%, respectivamente para cada estudo.

Por fim, calcula-se a expectativa de vida segundo o critério de falha por fadiga de Soderberg em cada análise estrutural para os 5 pontos mais críticos, e realiza uma análise comparativa destes resultados. Deste modo, obtêm-se resultados do comportamento estrutural do chassi para várias configurações de uma mesma variável operacional, permitindo a análise individual da mesma.

As variáveis operacionais estudadas individualmente nesta etapa estão apresentadas a seguir:

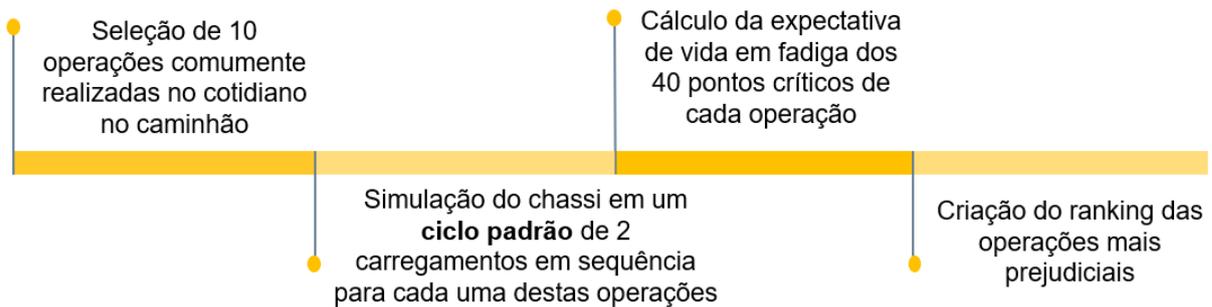
- Inclinação das subidas
- Inclinação das descidas
- Uso de superelevação nas curvas
- Velocidade em curvas planas
- Raios de curvas
- Subida reta vs. Subida curva
- Descida reta vs. Descida curva

As avaliações propostas por esta metodologia estão apresentadas na sessão de resultados deste trabalho.

3.5 Metodologia de criação do ranking de operações mais críticas

Outra análise abordada por este trabalho busca descobrir quais são as operações desempenhadas pelo caminhão são mais prejudiciais à integridade estrutural do seu chassi, organizando-as em um ranking de operações críticas, conforme fluxograma apresentado na imagem 52 abaixo:

Imagem 52 - Fluxograma de criação do ranking de operações mais críticas ao chassi do caminhão fora de estrada



Fonte: Elaborado pelo autor

Além de conhecer quais os pontos do chassi são mais críticos à fadiga, este trabalho busca avaliar também quais operações executadas durante o trajeto do caminhão pelas pistas das minas causam mais danos à fadiga no chassi. Para isso, são selecionadas 10 condições de operação comumente realizadas no dia a dia do caminhão, sumarizadas na tabela 9 e avaliado o dano em fadiga causado por cada uma delas, sintetizadas em forma de um ranking das operações mais críticas ao caminhão

Tabela 9 - Dez operações comumente desempenhadas pelo caminhão fora de estrada

Trecho	Tipo	Inclinação longitudinal (%)	Velocidade (km/h)	Raio da curva (m)	Superelevação (%)
1	Subida reta	8	8	-	-
2	Subida reta	10	8	-	-
3	Subida curva	10	8	200	-
4	Descida reta	-8	16	-	-
5	Descida reta	-10	16	-	-

6	Descida curva	-10	16	200	-
7	Curva plana	-	16,33	30	-
8	Curva plana	-	16,33	200	-
9	Curva plana	-	42,16	200	-
10	Curva plana	-	42,16	200	7

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como na metodologia do ranking dos pontos críticos, as variáveis operacionais usadas nesta etapa como velocidades, raios de curva, inclinação de subidas e descidas e ângulos de superelevação são embasadas em valores sugeridos por um fabricante de caminhões fora de estrada (CATERPILLAR, 2016) e por um manual de pistas de mineração (THOMPSON, 2011). Avaliando o dano causado por cada um dos trechos, será possível avaliar a influência destas variáveis operacionais no comportamento estrutural do chassi do caminhão.

Para realizar esta análise comparativa é necessário criar uma metodologia igual para a simulação de todos os trechos. Neste caso, foi criada uma condição de tráfego padrão, onde o caminhão parte sempre de um trecho plano reto, que seria a condição mais estável do chassi, para os trechos representados na tabela 9. Em seguida, são coletados os valores de tensão de Von Mises, criando um histórico de tensão de dois carregamentos em sequência (trecho plano para trecho de estudo), mas sempre o caminhão partindo do mesmo benchmark (trecho plano reto), viabilizando uma análise comparativa de fadiga.

Em seguida, calcula-se a expectativa de vida de cada um dos 40 pontos críticos, ou seja, o número de vezes que cada ponto suporta até a falha induzida por esta operação, utilizando o critério de falha por fadiga de Soderberg (BUDYNAS; NISBETT, 2011). Existem diversos critérios de análise de falha por fadiga, com diferentes considerações e precisões, porém, a escolha do critério de Soderberg é devido a ele ser um dos mais conservadores. Como o tipo de carregamento (compressivo, trativo, torcional, etc.) não é exatamente conhecido e os valores de tensão média e alternada são calculados a partir de simulações computacionais e não de instrumentação real do caminhão fora de estrada, opta-se pela utilização de um critério mais conservador, que compense os erros de simplificação que podem existir nas considerações e arredondamentos adotados.

O ranking das operações mais críticas é obtido através da média da expectativa de vida em fadiga dos 10 pontos que resistem menos ciclos, pois, deste modo, ele se embasa nos pontos

que tem mais chances de fraturar, aumentando a sua confiabilidade. O ranking das operações mais críticas é apresentado na sessão de resultados deste trabalho.

3.6 Metodologia de definição do posicionamento de payload mais crítico

Neste trabalho também são realizadas análises estruturais comparativas do chassi do caminhão quando carregado em piso plano com cinco tipos diferentes de posicionamento de payload, de modo a definir qual posicionamento de payload é mais crítico à integridade estrutural do chassi, conforme fluxograma apresentado na imagem 53 abaixo:

Imagem 53 - Fluxograma de avaliação do posicionamento de payload mais crítico



Fonte: Elaborado pelo autor

Estas análises são conduzidas de forma estática, considerando os 5 posicionamentos de payload descritos na imagem 47, e a partir disso se avalia, de forma gráfica, as tensões de Von Mises geradas por cada carregamento. Em seguida, destacam-se os pontos onde foram geradas sobretensões e a partir disso define-se qual posicionamento de payload foi mais crítico à integridade estrutural do chassi, ou seja, qual apresentou mais sobretensões.

Estas avaliações de cada análise estrutural de posicionamento de payload estão apresentadas na sessão de resultados deste trabalho.

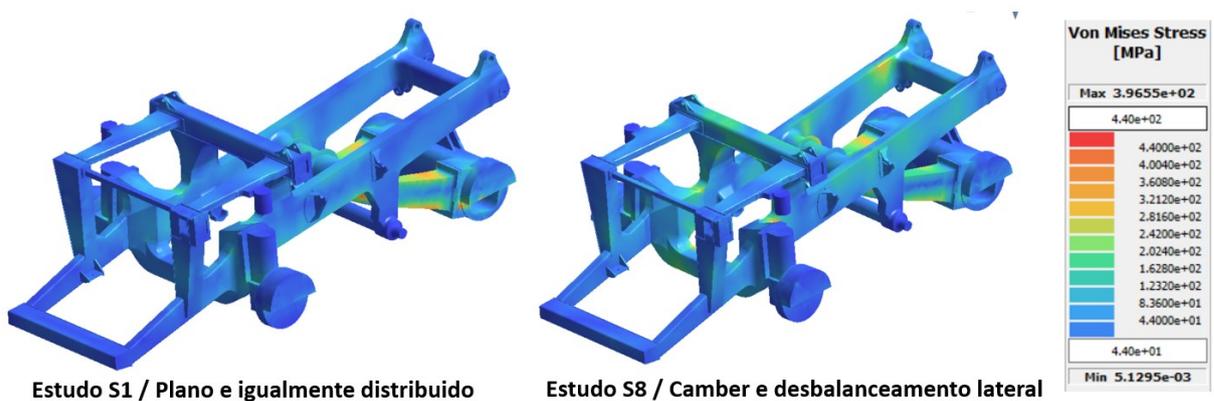
4 RESULTADOS

Nesta sessão são apresentados os resultados para cada uma das metodologias de análise citadas anteriormente, e suas respectivas conclusões.

4.1 Ranking dos pontos críticos do chassi

As 20 análises estáticas listadas na tabela 6, pelo fato de retratarem operações do caminhão totalmente diferentes, revelam valores de tensões de Von Mises também muito diferentes entre uma simulação e outra, como pode ser visto na imagem 54, que apresenta os resultados para uma análise do caminhão em um piso plano com o material igualmente distribuído na caçamba e do mesmo caminhão em um piso com camber de 3% de inclinação e com o material desbalanceado lateralmente na caçamba. Este amplo espectro de tensões entre as análises é benéfico ao estudo, pois deixa o ranking de pontos críticos mais assertivo, por abordar diferentes condições de operação.

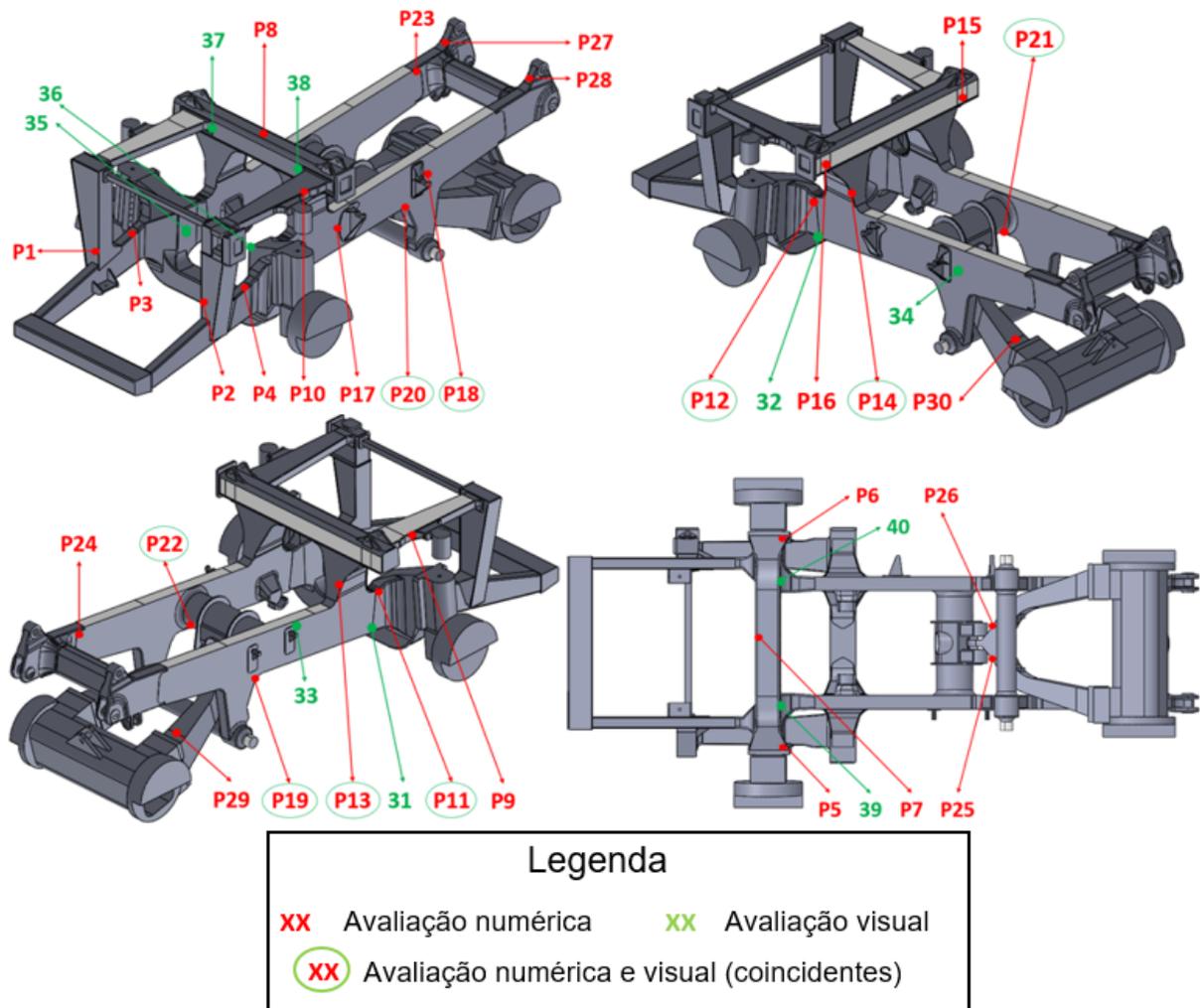
Imagem 54 - Resultado da análise estática S1 (piso plano e carregamento igualmente distribuído na caçamba) e da análise estática S8 (piso com camber 3% e carregamento desbalanceado lateralmente na caçamba)



Fonte: Elaborado pelo autor

Seguindo os critérios de definição dos pontos críticos descritos na metodologia, foram obtidos 40 pontos críticos, sendo que 22 atenderam somente ao critério numérico, 10 somente ao critério visual e 8 pontos atenderam ambos os critérios, conforme descrito na imagem 55.

Imagem 55 - Pontos críticos do chassi do caminhão fora de estrada e seus critérios



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que os pontos críticos estão bem espalhados por toda a estrutura do chassi, em ambos os lados do equipamento, garantindo uma análise completa da estrutura. A imagem 56 abaixo apresenta o ranking dos pontos críticos e seus respectivos números de ciclos até a falha, construído conforme a metodologia deste trabalho. Este gráfico traz um ranking de criticidade dos pontos críticos, ou seja, no eixo horizontal estão cada um dos 40 pontos críticos do estudo e no eixo vertical o número de vezes (número de ciclos) que cada um desses pontos suporta até a falha.

Imagem 56 - Ranking dos pontos críticos do chassi do caminhão fora de estrada



Fonte: Elaborado pelo autor

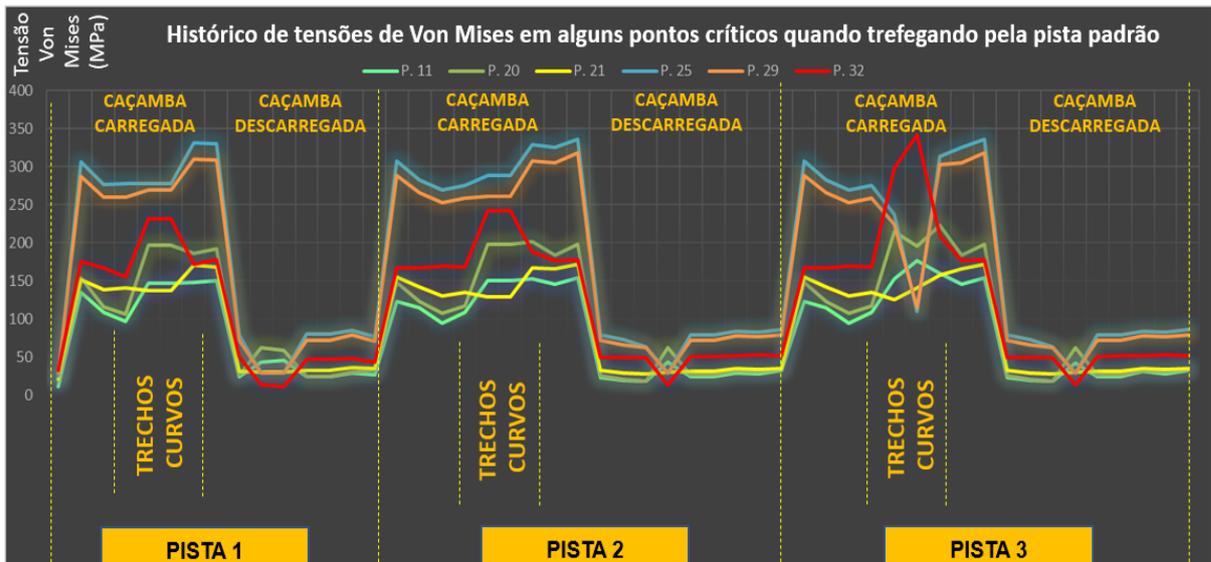
Os pontos marcados com setas amarelas representam aqueles que apresentaram trincas no chassi real analisado por líquido penetrante (critério visual), e é possível observar uma concordância entre estas regiões e os pontos mais críticos deste ranking, demonstrando uma confiabilidade dos resultados. Os pontos 25, 30, 26 e 29, que pertencem ao componente âncora (*A-frame*), não possuem as setas pois a âncora não foi analisada por líquido penetrante, somente o chassi. Porém, é sabido que a âncora também apresenta trincas recorrentes nos modelos reais.

No ranking, marcados em vermelho, estão os 5 pontos mais críticos, com capacidade de suportar entre 10.000 e 100.000 ciclos de rodamem pela pista padrão até a falha. Dentre estes 5 pontos, 4 estão concentrados na região traseira do caminhão (pontos 25, 30, 26 e 29), no acoplamento e na base da âncora (*A-frame*), já considerada uma peça crítica nas operações reais. Esta vida reduzida se dá principalmente porque quando carregado, o caminhão induz esforços muito elevados nestes locais, mesmo quando em condições “estáveis” de operação, devido ao peso no material transportado que fica muito concentrado nesta região. Além disso, quando descarregado, existe uma redução muito grande destas tensões, elevando a tensão alternada no carregamento histórico, acelerando a falha por fadiga nestes pontos.

Por outro lado, em verde, estão marcados os 5 pontos menos críticos do chassi (pontos 02, 05, 13, 28 e 35). Porém, é importante observar que os pontos simétricos destes pontos, localizados exatamente no lado oposto do chassi (pontos 01, 06, 14, 27 e 36) apresentam criticidade bem superior e o motivo para esta diferença é pelo fato das curvas da pista padrão serem sempre para o mesmo lado, sobrecarregando um lado mais que o outro. Como nas pistas reais as curvas acontecem para ambos os lados, os pontos em verde do ranking, embora menos críticos, não podem ter seu monitoramento de fadiga negligenciados.

O ponto 32, embora não esteja na região traseira, é o segundo ponto mais crítico e merece atenção, assim como os pontos 11, 20 e 21. Isto porque, conforme mostrado na figura 57, as tensões geradas nestas regiões são fortemente influenciadas por operações em trechos curvos, causando um desbalanceamento lateral das cargas e aumentando a amplitude das tensões. Além disso, a figura 57 também mostra o histórico de tensões nestes pontos mais críticos do chassi quando trafegando por toda a pista padrão e, é possível observar uma grande variação da amplitude das tensões quando o caminhão está carregado e quando descarregado. Isto prova a teoria da fadiga que afirma que os pontos mais susceptíveis à fadiga serão aqueles que, além de apresentarem tensões elevadas (tensão média elevada), apresentam muita variação da amplitude das tensões (tensão alternada elevada).

Imagem 57 - Histórico de tensões de Von Mises em alguns pontos críticos quando trafegando pela pista padrão

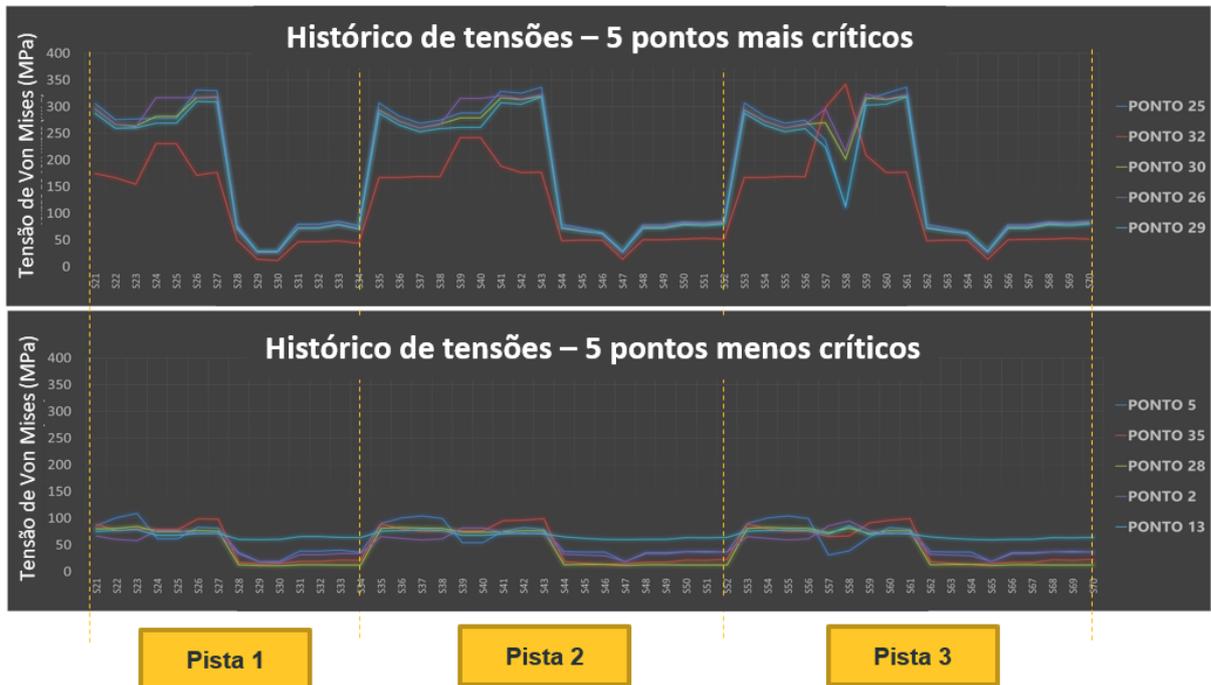


Fonte: Elaborado pelo autor

A afirmação de que a fadiga é acentuada quando a tensão média e alternada são elevadas fica ainda mais comprovada quando comparamos o histórico de tensões dos 5 pontos mais críticos e dos 5 pontos menos críticos, como mostrado na figura 58.

Os pontos mais críticos apresentam tensões muito elevadas e elas variam muito quando o caminhão está carregado para quando está descarregado e, por outro lado, os pontos menos críticos apresentam tensões com amplitude baixa, além de praticamente nenhuma variação de tensão entre os trechos ou entre as condições carregado/d Descarregado.

Imagem 58 - Comparativo do histórico de tensões dos 5 pontos mais críticos vs. 5 pontos menos críticos quando em tráfego pela pista padrão



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Avaliação da influência individual das variáveis operacionais no comportamento estrutural do chassi

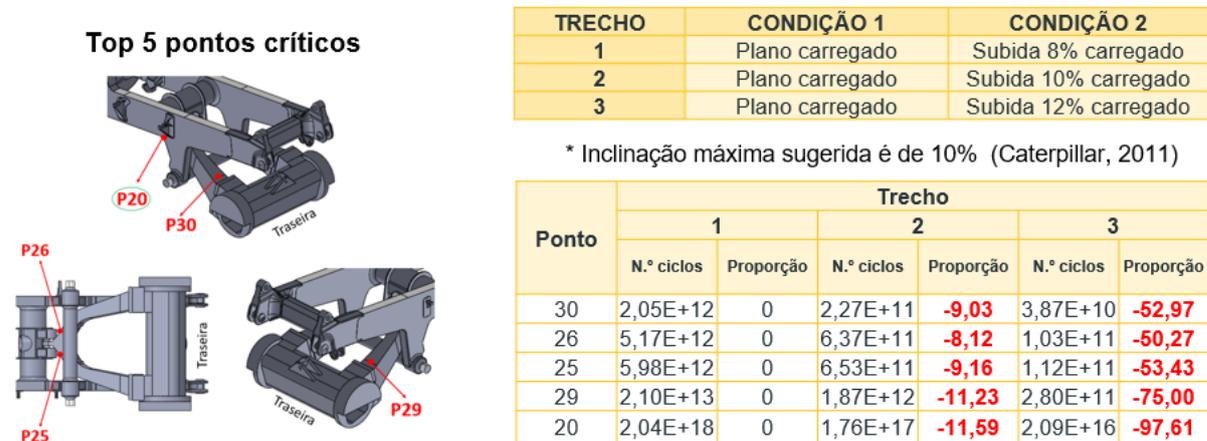
Conforme apresentado na metodologia da seção 3.4 deste trabalho, esta análise tem como objetivo descobrir a influência individual de algumas variáveis operacionais no comportamento estrutural do chassi. As figuras a seguir apresentam estas avaliações propostas para 7 variáveis operacionais.

A imagem 59 apresenta o estudo referente à influência das inclinações de subidas no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em subida são os pontos 20, 25, 26, 29 e 30, todos localizados na traseira do caminhão, sendo 4 deles na âncora (*A-frame*), exceto o ponto 20, localizado na longarina principal do chassi.

O chassi é simulado trafegando por uma subida com rampa de 8, 10 e 12%, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 59 pelos trechos 1, 2 e 3, respectivamente. Importante dizer que 10% é a subida máxima indicada por um fabricante de caminhões e, neste caso, simula-se uma condição branda, uma máxima e uma exagerada.

Imagem 59 - Influência individual da inclinação da subida no comportamento estrutural do chassi

INCLINAÇÃO DA SUBIDA Carregado (Cap. Máxima)



Fonte: Elaborado pelo autor

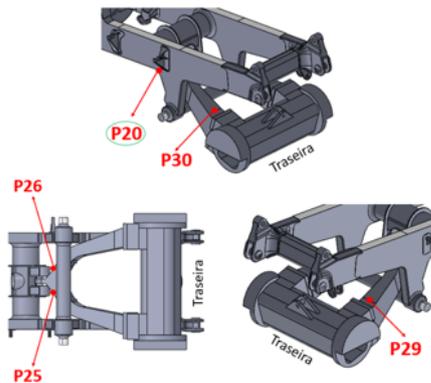
A tabela inferior da imagem 59 apresenta a expectativa de vida em fadiga para cada um dos 3 trechos em cada ponto crítico (coluna N.º ciclos), e uma proporção entre as vidas consumidas em relação ao trecho 1 para permitir a análise comparativa (coluna proporção). A partir destes resultados podemos concluir:

- 1) O consumo de vida aumenta conforme aumentamos a inclinação da subida
- 2) Uma subida com inclinação de 10% consome de 8,12 a 11,59 vezes mais vida em fadiga do que uma subida com inclinação de 8% (para os 5 pontos analisados, seguindo a metodologia proposta)
- 3) Uma subida com inclinação de 12% consome de 50,27 a 97,61 vezes mais vida do que uma subida com inclinação de 8% (para os 5 pontos analisados, seguindo a metodologia proposta)
- 4) Embora o ponto 20 seja crítico, ele apresenta uma expectativa de vida bem maior comparado aos outros 4 pontos críticos, mas, por outro lado, seu consumo de vida em fadiga é bem mais sensível proporcionalmente às inclinações da subida.

Imagem 60 - Influência individual da inclinação da descida no comportamento estrutural do chassi

INCLINAÇÃO DA DESCIDA Carregado (Cap. Máxima)

Top 5 pontos críticos



TRECHO	CONDIÇÃO 1	CONDIÇÃO 2
1	Plano carregado	Descida 8% carregado
2	Plano carregado	Descida 10% carregado
3	Plano carregado	Descida 12% carregado

* Inclinação máxima sugerida é de 10% (Caterpillar, 2011)

Ponto	Trecho					
	1		2		3	
	N.º ciclos	Proporção	N.º ciclos	Proporção	N.º ciclos	Proporção
30	3,70E+10	0	8,47E+08	-43,68	2,41E+08	-153,75
26	7,38E+10	0	2,38E+09	-31,01	1,69E+08	-436,84
25	1,68E+11	0	5,64E+09	-29,75	1,52E+08	-1104,08
29	3,79E+11	0	5,14E+10	-7,37	2,97E+08	-1276,70
20	3,82E+17	0	1,51E+16	-25,35	1,60E+15	-238,74

Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 60 apresenta o estudo referente à influência das inclinações de descidas no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em descida são os pontos 20, 25, 26, 29 e 30, todos localizados na traseira do caminhão, sendo 4 deles na âncora (*A-frame*), exceto o ponto 20, localizado na longarina principal do chassi.

O chassi foi simulado trafegando por uma descida com rampa de 8, 10 e 12%, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 60 pelos trechos 1, 2 e 3, respectivamente. A inclinação de 10% é a subida máxima indicada por um fabricante de caminhões e, neste caso, como as pistas de minas costumam ser vias de mão dupla, a limitação da inclinação da descida se baseia na inclinação da subida. Neste caso, simula-se uma condição branda, uma máxima e uma exagerada.

Similar à análise da tabela inferior da imagem 59, na imagem 60 pode-se observar:

- 1) Assim como para inclinações de subidas, a expectativa de vida também apresenta uma redução proporcional ao aumento da inclinação das descidas, porém em uma proporção muito maior que nas subidas
- 2) Uma descida com inclinação de 10% reduz de 7,37 a 46,68 vezes mais a expectativa de vida em fadiga do que uma descida com inclinação de 8%
- 3) Uma descida com inclinação de 12% reduz de 153,75 a 1276,70 vezes mais vida do que uma descida com inclinação de 8%.

- 4) O ponto 20 continua apresentando uma expectativa de vida bem maior comparado aos outros 4 pontos críticos.

Imagem 61 - Influência individual da inclinação da superelevação no comportamento estrutural do chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 61 apresenta o estudo referente à influência da superelevação em curvas no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em uma curva com superelevação são os pontos 24, 25, 26, 29 e 32.

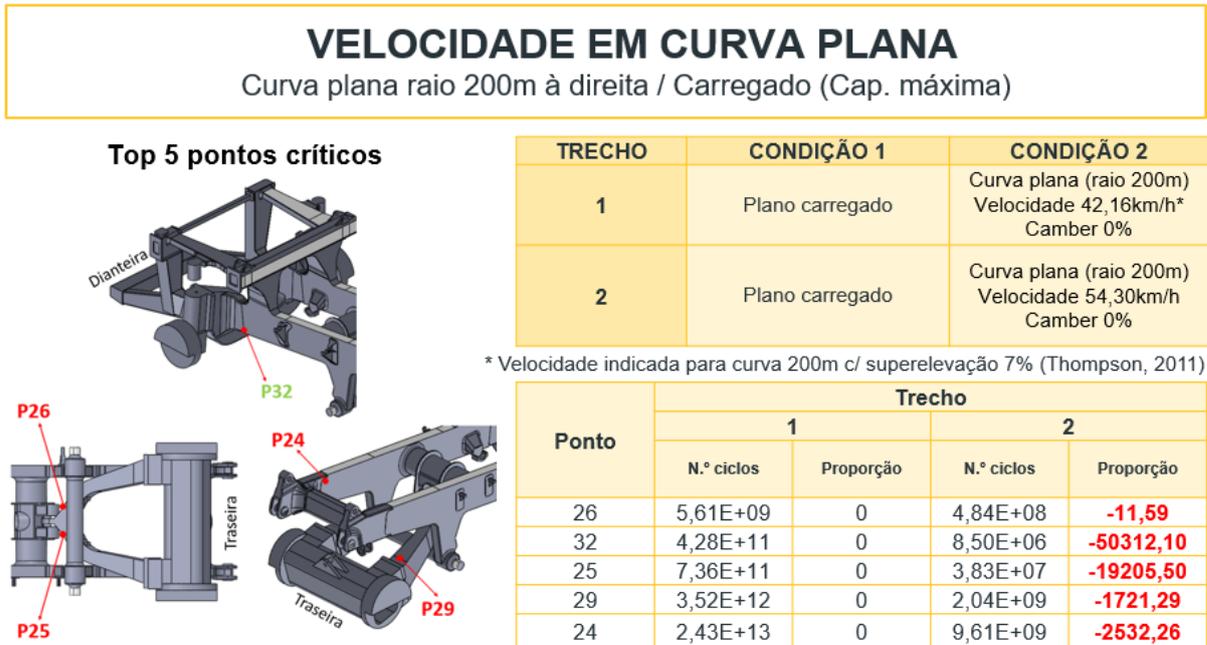
O chassi foi simulado trafegando por um trecho com superelevação (camber) de 7% e sem superelevação, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 61 pelos trechos 1 e 2, respectivamente. Em ambos os trechos as curvas são com raio de 200m e velocidade de 42,16 km/h (velocidade indicada por um manual de pista de minas como adequada para esta curva com superelevação de 7%).

Analisando a tabela inferior da imagem 61, pode-se observar:

- 1) O camber tem pouca influência no consumo de vida dos pontos 25 e 26, localizados no acoplamento da âncora (proporção próxima de 1), embora sejam os pontos que falham mais rápido (menor número de ciclos até a falha).
- 2) O camber pode aumentar a expectativa de vida em fadiga de 17,07 até 39,74 vezes (para os pontos analisados, seguindo a metodologia proposta)

3) Destaque para o surgimento dos pontos 32 e 24 como sendo críticos. Estão localizados no chassi no lado oposto ao que acontece à curva, ou seja, a curva acontece pra direita e a carga se movimenta pra esquerda, onde estão localizados estes dois pontos.

Imagem 62 - Influência individual da velocidade em curvas planas no comportamento estrutural do chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 62 apresenta o estudo referente à influência da velocidade em curvas no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em uma curva são os pontos 24, 25, 26, 29 e 32.

O chassi foi simulado trafegando por uma curva com raio de 200m sem superelevação com velocidades de 42,16 km/h e 54,30 km/h, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 62 pelos trechos 1 e 2, respectivamente. Neste estudo sugere-se a operação com uma velocidade máxima (trecho 1) e uma exagerada (trecho 2).

Analisando a tabela inferior da imagem 62, pode-se observar:

- 1) O aumento da velocidade de 42,16 para 54,3 km/h na curva de raio 200m diminuiu muito a expectativa de vida em fadiga dos pontos analisados, chegando à uma redução de até 50.000 vezes. Isto porque, a velocidade de 54,3 km/h é muito elevada para esta curva, criando um ângulo de rolagem muito grande.
- 2) O ponto 32 apresenta uma sensibilidade muito elevada a operações em curvas, isto porque ele está no acoplamento de uma estrutura esbelta (longarina principal) com uma

estrutura mais rígida (viga fundida das suspensões dianteiras) e nas curvas, quando acontece a rolagem da carroceria e a torção da estrutura, este ponto passa a ser muito solicitado.

Imagem 63 - Influência individual do raio de curvatura no comportamento estrutural do chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 63 apresenta o estudo referente à influência do raio das curvas planas no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em uma curva são os pontos 24, 25, 26, 29 e 32.

O chassi foi simulado trafegando com velocidades de 16,33 km/h por curvas com raios de 200m e 30m, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 63 pelos trechos 1 e 2, respectivamente. Neste estudo sugere-se a operação com uma velocidade máxima para o raio de 30m (16,33 km/h) e a mesma velocidade em uma curva com raio maior, permitindo avaliar a influência da curva.

Analisando a tabela inferior da imagem 63, pode-se observar que as proporções de redução da expectativa de vida entre os trechos 1 e 2 ficaram muito altas. Isto acontece pois, no trecho 1, trafegar em uma curva de raio 200m à 16,33Km/h gera deslocamentos laterais muito baixos, gerando um carregamento muito similar ao do trecho plano reto (benchmark). Deste modo, a expectativa de vida neste trecho 1 fica muito alto (10^{19} a 10^{25} ciclos). Por outro lado, quando ele trafega na curva de raio 30m na velocidade de 16,33 km/h (que é a máxima indicada para este raio segundo o manual de pistas de Thompson (2011)), o deslocamento lateral fica muito

elevado, reduzindo drasticamente a expectativa de vida em relação ao trecho 1. Sendo assim, o comparativo de consumo de vida em fadiga entre estes dois trechos fica muito discrepante, mas confirma a característica de que a redução do raio de curvatura de um trajeto, para uma mesma velocidade, reduz também a vida útil do chassi em relação à resistência à fadiga.

Imagem 64 - Influência individual da subida reta vs. subida curva no comportamento estrutural do chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 64 apresenta uma análise comparativa da influência de uma subida reta e uma subida com curva no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em uma subida são os pontos 20, 25, 26, 29 e 30.

O chassi foi simulado trafegando por uma subida reta com inclinação de 10% e com velocidade de 8 km/h, e por uma mesma subida, porém com uma curva com raio de 200m sem superelevação, com a mesma velocidade, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 64 pelos trechos 1 e 2, respectivamente. Neste estudo a velocidade é máxima sugerida em função da inclinação da subida, conforme ábaco de um fabricante de caminhões.

Analisando a tabela inferior da imagem 64, pode-se observar que o fato da subida ser curva ou reta não tem grandes influências na redução da expectativa de vida em fadiga (proporção próximo à 1), visto que as velocidades são muito baixas, praticamente anulando os

deslocamentos laterais (ângulo de rolagem) quando ele está em curva, mantendo as duas condições (reta e curva) muito parecidas.

Imagem 65 - Influência individual da descida reta vs. descida curva no comportamento estrutural do chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

A imagem 65 apresenta uma análise comparativa da influência de uma descida reta e uma descida com curva no comportamento estrutural do chassi. Seguindo a metodologia proposta, os 5 pontos críticos do chassi quando em uma subida são os pontos 20, 25, 26, 29 e 30.

O chassi foi simulado trafegando por uma descida reta com inclinação de 10% e com velocidade de 16 km/h, e por uma mesma descida, porém com uma curva com raio de 200m sem superelevação, com a mesma velocidade, sempre partindo do mesmo benchmark (piso plano), representados na imagem 65 pelos trechos 1 e 2, respectivamente. Neste estudo a velocidade é a máxima sugerida em função da inclinação da descida, conforme ábaco de um fabricante de caminhões.

Analisando a tabela inferior da imagem 65, pode-se observar que o fato da descida ser curva ou reta não tem grandes influências na redução da expectativa de vida em fadiga nos pontos 25, 26, 29 e 30 (proporção próximo à 1). Por outro lado, o ponto 20 apresenta uma redução da expectativa de vida em fadiga de 24,23 vezes quando trafegando por uma descida curva. Isto acontece pois na descida curva existe o ângulo de rolagem da carroceria, promovendo um desbalanceamento das cargas e sobrecarregando o ponto 20. Porém, comparativamente às

curvas planas, esta redução de expectativa de vida em fadiga não é muito elevada, pois a velocidade de 16 km/h nas descidas ainda é considerada baixa em comparação às velocidades aplicadas nas curvas planas.

4.3 Ranking das operações mais críticas ao chassi

Seguindo a metodologia descrita na sessão 3.5 deste trabalho, abaixo na imagem 66 está apresentado o ranking das operações mais críticas à integridade estrutural do chassi. Na esquerda do ranking estão as operações mais críticas e ao lado direito, as menos críticas. O dano à fadiga é representado em números de ciclos até a falha, e o gráfico está em escala logarítmica para melhorar a visualização. Além de permitir uma comparação entre o dano à fadiga entre operações diferentes, este ranking também permite a comparação do dano entre operações semelhantes, como apresentado a seguir.

Imagem 66 - Ranking das operações mais críticas à fadiga do chassi do caminhão



Fonte: Elaborado pelo autor

A interpretação do ranking está descrita nos tópicos a seguir:

- As 3 operações mais críticas (7, 9 e 10) são curvas planas. Nestes trechos a carroceria é submetida à um grande ângulo de rolagem devido à velocidade ser mais alta (trecho

plano), criando um forte desbalanceamento das cargas, e, portanto, uma concentração de esforços unilateral no chassi.

- Se observamos as duas operações mais críticas (7 e 9), elas têm danos iguais. Isto porque, embora sejam curvas planas com raios diferentes, as velocidades de cada uma delas é compatível ao raio da curva, conforme sugerido por Thompson (THOMPSON, 2011) na equação 22 deste trabalho. Neste caso, a curva de raio menor possui uma velocidade menor, enquanto a curva de raio maior possui uma velocidade maior. Deste modo, os ângulos de rolagem destas duas operações ficaram praticamente iguais, gerando o mesmo dano em fadiga. Entende-se, portanto, que a fórmula da velocidade em curvas sugerida por Thompson (THOMPSON, 2011) possui relação direta ao ângulo de rolagem máximo permitido.
- Ao compararmos as operações 9 e 10, elas são curvas com os mesmos raios e velocidade de tráfego, porém a operação 10 possui uma superelevação de 7% na curva, enquanto na operação 9 não há superelevação (0%). Neste caso, a presença da superelevação significou um aumento de vida em fadiga de aproximadamente 30 vezes, indicando que ela é uma boa prática que deve ser adotado nos trechos curvos, principalmente aqueles com alta velocidade de tráfego (curvas planas).
- A descida curva (operação 6) apresenta um consumo de vida aprox. 70% maior que uma subida curva (operação 3). Este dano maior ocorre, pois, nas descidas a velocidade empregada é maior, e, quando em curva, cria-se um ângulo de rolagem maior, e, portanto, um desbalanceamento de cargas mais significativo.
- Observa-se uma relação diretamente proporcional entre o dano em fadiga e à inclinação das subidas e descidas, conforme abaixo:
 - A descida com inclinação de 10% (operação 5) apresenta uma redução em 2 vezes da expectativa de vida comparado à uma descida com inclinação 8% (operação 4).
 - A subida com inclinação de 10% (operação 2) apresenta uma redução em 11 vezes da expectativa de vida em comparação à uma subida com inclinação 8% (operação 1).
- Fica evidente também que descidas e subidas curvas tem sua expectativa de vida reduzida em relação a descidas e subidas retas, conforme abaixo:
 - Uma descida curva com raio de 200m, velocidade de 16 km/h e inclinação de 10% (operação 6) apresentou uma redução em 4,6 vezes da sua expectativa de

vida em comparação à uma descida reta com mesma inclinação e velocidade (operação 5).

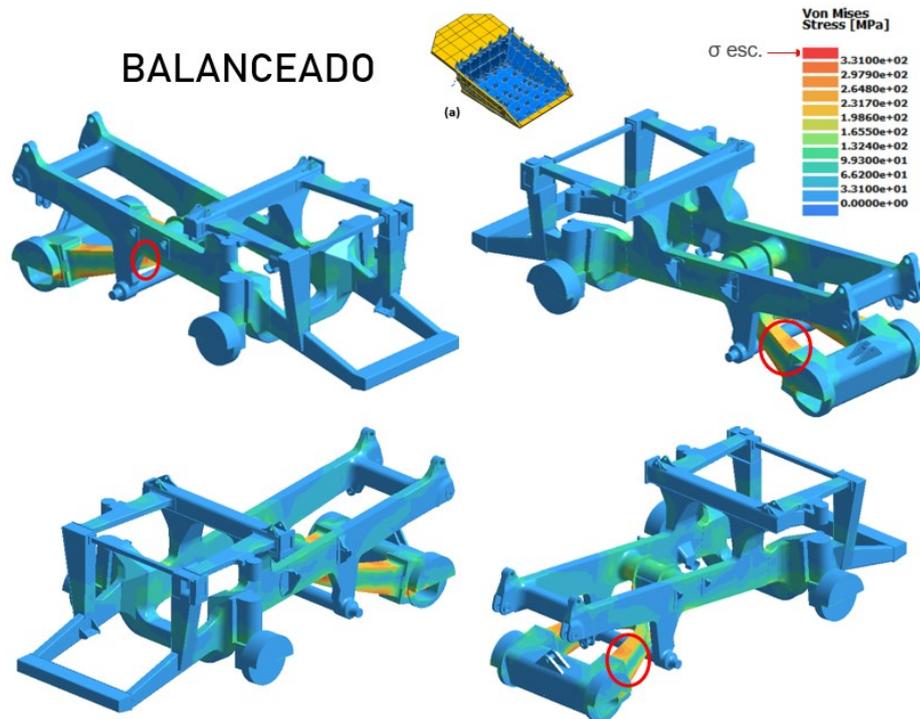
- Uma subida curva com raio de 200m, velocidade de 8 km/h e inclinação de 10% (operação 3) apresentou uma redução em 1,68 vezes da sua expectativa de vida em comparação à uma subida reta com mesma inclinação e velocidade (operação 2).
- A operação menos crítica do ranking foi uma curva plana com raio 200m e velocidade de 16 km/h (operação 8), porém, isto está em contrassenso às operações mais críticas que também são curvas planas. A explicação é que, a velocidade de 16 km/h é muito baixa para o raio de curva de 200m, criando um ângulo de rolagem muito pequeno, tornando esta operação muito parecida com o trecho plano reto (benchmark). Como neste caso, a fadiga é medida entre o trecho plano reto e a curva, as tensões permanecem muito parecidas, causando um dano muito baixo em comparação à outras curvas com maiores ângulos de rolagem.

4.4 Definição do posicionamento de payload mais crítico ao chassi

Conforme a metodologia apresentada anteriormente, esta última análise objetiva descobrir qual desbalanceamento de payload é mais prejudicial à integridade estrutural do chassi, a partir de uma interpretação gráfica de tensões de Von Mises obtidas em análises estruturais destes carregamentos. As figuras 67 a 71 a seguir apresentam a comparação destas tensões no chassi em cada tipo de posicionamento de payload, e os destaques para as regiões mais sobrecarregadas.

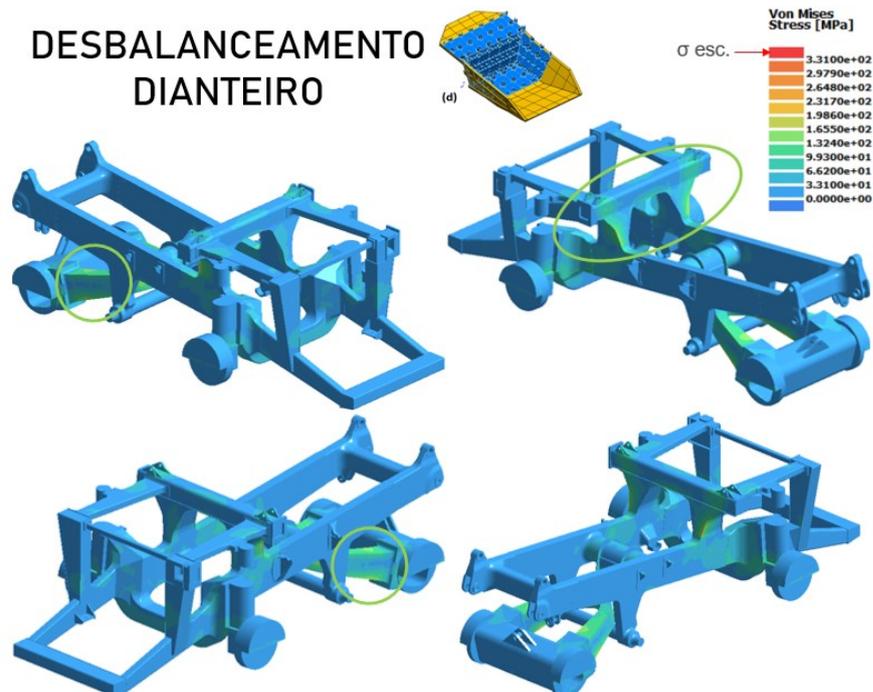
Quando o caminhão está com o material uniformemente distribuído na caçamba, ou seja, balanceado, percebemos que não existem muito pontos sobrecarregados na estrutura, exceto a base e o acoplamento da âncora.

Imagem 67 - Tensões geradas no chassi por um payload balanceado



Fonte: Elaborado pelo autor

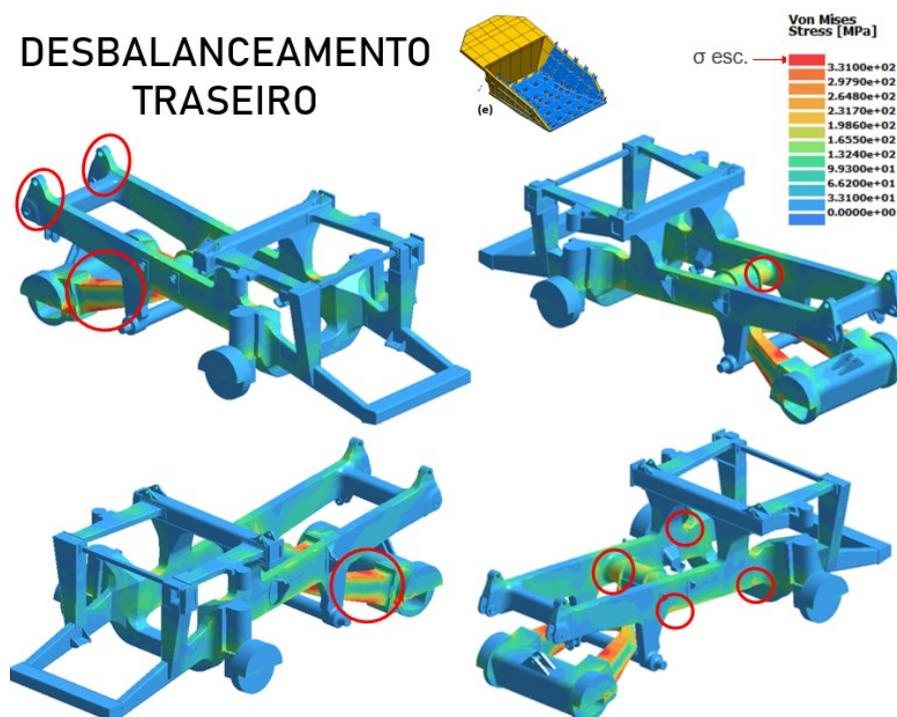
Imagem 68 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento dianteiro



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando acontece um desbalanceamento dianteiro, não há evidências de sobretensões, isto porque, a dianteira do chassi é uma região de elevada rigidez, devido à sua estrutura reticulada quase que em formato de um “cubo” de arestas tubulares, criando uma melhor distribuição do peso. É possível notar um aumento de tensões nos suportes verticais da estrutura superior frontal do chassi, mas ela é pequena (aprox. 50% da tensão de escoamento). Nota-se também uma redução de tensões na região traseira (âncora e cauda) quando comparado à operação balanceada, já que o sobrepeso na região traseira é transferido para frente.

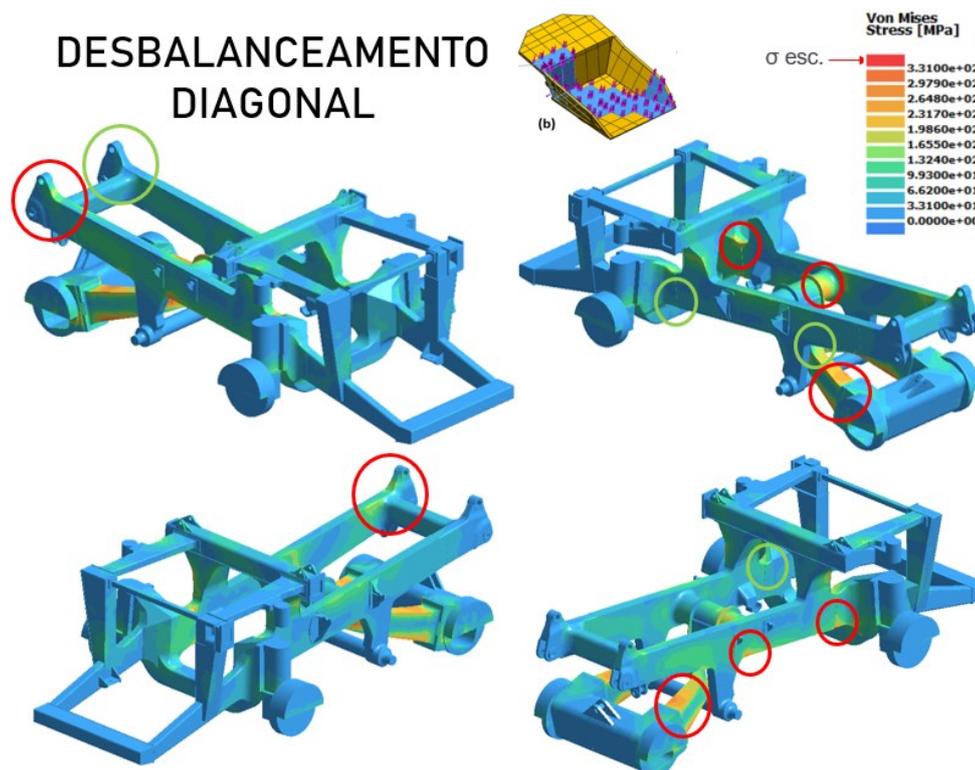
Imagem 69 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento traseiro



Fonte: Elaborado pelo autor

Já quando o desbalanceamento é traseiro, este sobrepeso na região traseira do chassi se intensifica ainda mais, criando sobretensões em quase toda a âncora, em ambos os lados do tubulão central e da cauda (apoio traseiro da balança). Além disso, é possível também observar algumas pequenas áreas com sobretensão na região próxima ao encontro da longarina principal do chassi com a viga de apoio do cilindro de elevação da balança e também na emenda da longarina principal do chassi com a viga fundida de acoplamento da suspensão dianteira. Estes dois pontos apresentam sobretensão pelo fato de, quando o carregamento se concentra na traseira, a coluna do chassi tende a fazer um movimento de flexão, comprimindo ou tracionando estas regiões.

Imagem 70 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento diagonal



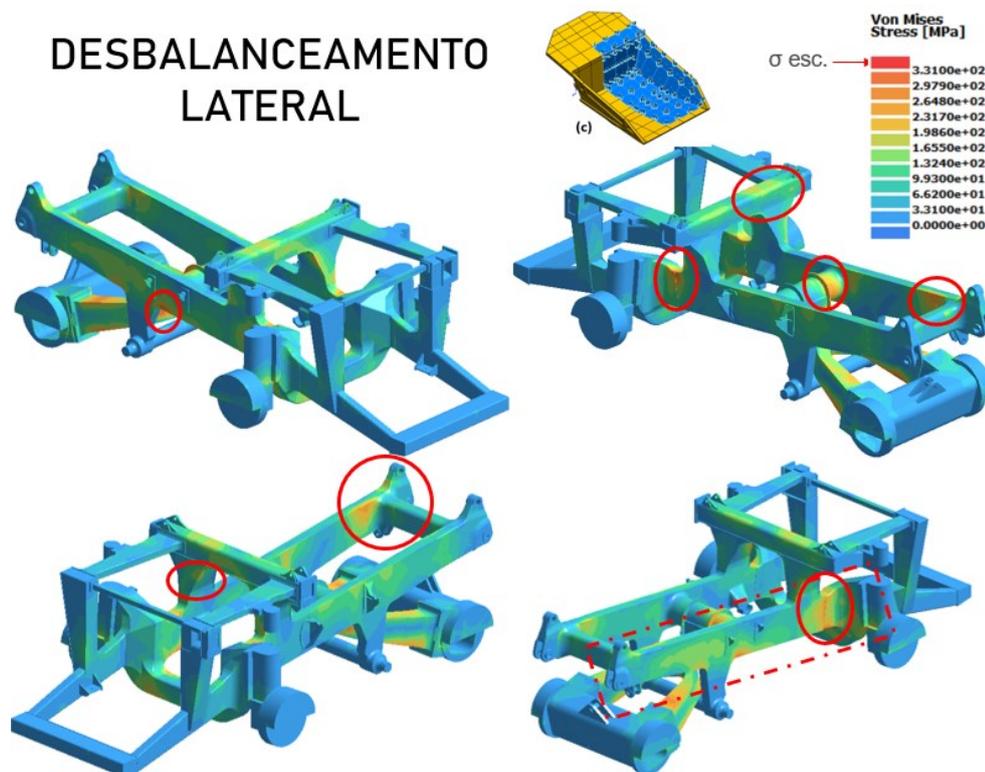
Fonte: Elaborado pelo autor

Já quando o material está desbalanceado diagonalmente, percebemos algumas sobretensões surgindo na cauda fundida (ponto apoio da báscula na traseira) e também na lateral do chassi, nos pontos de encontro da longarina principal do chassi com a viga de apoio do cilindro de elevao da báscula, na juno da longarina principal do chassi com a viga fundida de acoplamento da suspensão dianteira e no tubulão central. Embora a carga esteja desbalanceada diagonalmente, as tensões se apresentam mais elevadas em uma das laterais, neste caso, na lateral direita onde há peso localizado na parte traseira.

Já no caso de um desbalanceamento lateral, verificamos que ele  o mais prejudicial dentre todos os tipos de desbalanceamento pois, ele causa uma toro severa no chassi, criando diversos pontos de sobretensões. Este desbalanceamento cria sobretensões na base da âncora e o acoplamento dela (como em quase todos os carregamentos), na cauda (próximo ao olhal de acoplamento da báscula) e também na região interna do acoplamento da cauda com a longarina principal do chassi.  possível verificar sobretensões em toda a extensão da longarina principal do chassi do lado para o qual ocorre o desbalanceamento, assim como em toda a juno da longarina com a viga fundida de acoplamento da suspensão dianteira, em ambos os lados, porém também mais elevado para o lado em que o desbalanceamento ocorre. As tensões também ficam

elevadas nos dois lados da união da longarina principal do chassi com a viga de apoio do cilindro de elevação da báscula e também na coluna traseira da estrutura superior dianteira do chassi.

Imagem 71 - Tensões geradas no chassi por um payload com desbalanceamento lateral



Fonte: Elaborado pelo autor

Conclui-se, portanto, que o desbalanceamento lateral é o mais prejudicial à integridade estrutural do chassi dentre todos os tipos de posicionamento de payload. Isto porque ele causa uma torção severa no chassi para um dos lados, criando diversos pontos de sobretensões ao longo de todo o chassi, principalmente na longarina principal. Além disso, como explicado no referencial teórico deste trabalho, o desbalanceamento lateral é o tipo de desbalanceamento mais comum de acontecer, devido à assertividade dos passes de carregamento com a carregadeira ser dificultada por diversos fatores como a posição final da manobra do caminhão, a área de giro da carregadeira, o campo de visão do operador da carregadeira e a acomodação do material a cada passe depositado na caçamba.

5 CONCLUSÕES

Primeiramente, a metodologia empregada neste trabalho e os resultados obtidos permitem avaliar quais os pontos mais críticos à falha por fadiga do chassi de um caminhão fora de estrada comercialmente utilizado em minas à céu aberto, apresentando-os em forma de ranking de criticidade. Conclui-se que os pontos mais críticos estão mais concentrados na região traseira (âncora/*A-frame*), que é uma região normalmente muito sobrecarregada pelo peso do payload transportado, mesmo em condições estáveis de operação. Além disso, existem alguns outros pontos específicos do caminhão, como os pontos 11, 20, 21 e 32 (e seus pontos simétricos) que têm alta sensibilidade quando em operações com trechos em curvas. Uma característica comum entre os pontos mais críticos do ranking é que as tensões enquanto o caminhão está carregado e quando está descarregado são muito discrepantes, induzindo ciclos de fadiga mais intensos no chassi, devido ao aumento das tensões alternadas dos carregamentos.

Este trabalho também aborda um estudo comparativo entre as principais operações do caminhão, demonstrando quais são mais críticas ao consumo de vida em fadiga do chassi, ordenando-as em forma de ranking de criticidade. Conclui-se que as operações mais críticas são aquelas que geram maior ângulo de rolagem na estrutura, ou seja, trechos em curva com velocidade muito alta (ex. curvas planas), ou trechos com raios de curva muito pequenos. Além disso, observa-se que a velocidade máxima compatível com o raio da curva indicada pelo fabricante e/ou manuais de pistas deve ser respeitada pois, existe uma relação diretamente proporcional entre a velocidade adotada e a rolagem da carroceria, influenciando também de forma diretamente proporcional na expectativa de vida do chassi. Nestes trechos curvos, o uso de superelevação é benéfico, aumentando a expectativa de vida em até 30 vezes, pois reduz o ângulo de rolagem da carroceria.

Conclui-se também que subidas e descidas com curvas são mais críticas do que as descidas e subidas retas, visto que nas primeiras a carroceria sofre rolagem, desbalanceando os esforços na estrutura. Além disso, o ângulo de inclinação destas subidas e descidas é diretamente proporcional ao dano em fadiga, pois, quanto maior o ângulo, mais concentrado ficam as cargas em algumas regiões do chassi, elevando as tensões. Por outro lado, em comparação às curvas planas, as descidas e subidas curvas apresentam um dano bem inferior, pois a velocidade nestes trechos é mais baixa, assim como ângulo de rolagem e por consequência os danos por fadiga. Deste modo, pode-se afirmar que é mais vantajoso colocar curvas nos trechos onde a velocidade é menor, seguindo a ordem a seguir: 1º Subidas; 2º Descidas; 3º Planos.

Uma última análise abordada por este trabalho é um estudo comparativo da influência de diferentes tipos de posicionamento de payload na integridade estrutural do chassi, onde conclui-se que o desbalanceamento lateral é o tipo de desbalanceamento mais prejudicial pois causa uma torção unilateral severa no chassi, criando diversos pontos de sobretensões ao longo da estrutura, principalmente na longarina lateral principal e nos seus acoplamentos com outras partes do chassi. Além disso, a incidência do desbalanceamento lateral é maior em relação aos outros desbalanceamentos, pois ele é mais comum de acontecer devido a alguns fatores dificultadores no carregamento da caçamba pela carregadeira, como a posição de manobra do caminhão, área de giro da carregadeira, campo de visão do operador da carregadeira e acomodação do material a cada passe depositado.

De modo geral, esta pesquisa aborda informações importantes sobre como é o comportamento estrutural do chassi de um caminhão fora de estrada em operação nas pistas de minas, e estes resultados são úteis para que usuários e fabricantes destes caminhões possam avaliar de forma mais eficaz a prejudicialidade de diferentes pistas, criando soluções de engenharia e manuais de boas práticas capazes de mitigar os efeitos das operações mais críticas, prolongando a vida útil do equipamento, melhorando a previsibilidade das falhas e a confiabilidade estrutural do equipamento.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta-se como uma pesquisa inicial em um tema bastante amplo e complexo que é a integridade estrutural do chassi de caminhões fora de estrada e como as variáveis operacionais podem influenciar neste comportamento estrutural. Sendo assim, existem várias vertentes a serem seguidas como trabalhos futuros, permitindo um entendimento ainda mais aprofundado do tema e precisão dos resultados.

Como sugestão de trabalhos futuros, é indicado o estudo aprofundado das operações mais críticas elucidadas por este trabalho, que foram as que causam maiores ângulos de rolagem na carroceria (curvas planas em alta velocidade ou com raio muito pequenos). Neste caso, pode-se avaliar outras combinações de raio/velocidade, de modo a encontrar uma relação ótima que correlacione preservação à integridade estrutural do chassi e produtividade do caminhão.

Em relação às técnicas de simulação computacional, os trabalhos futuros podem abordar estudos dinâmicos com múltiplos corpos e corpos flexíveis, aumentando a precisão e confiabilidade dos resultados, embora aumente o tempo de processamento computacional. Neste caso, a pista padrão pode ser criada também de forma virtual (percurso do caminhão) e, inclusive, pode ser exatamente igual a uma pista real de alguma mina, permitindo o estudo do comportamento estrutural do caminhão àquela mina.

Em relação às condições de contorno, fatores como rigidez vertical e lateral dos pneus podem ser abordados, assim, como a rigidez do solo, conferindo uma precisão ainda maior aos resultados.

Por fim, em relação à estrutura do chassi, conceitos de falha em juntas soldadas podem ser incluídos nos estudos futuros, visto que as falhas tendem a acontecer nestes locais, onde há maior probabilidade de eclosão das trincas.

De modo geral, a metodologia deste estudo pode ser extrapolada para a análise estrutural sob outras variáveis operacionais do caminhão, como buracos, lombadas, corrugações, acelerações e frenagens, carregamento e descarregamento de material na caçamba, operação de basculamento, dentre outros.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Anuário Mineral Brasileiro 2019 : Principais Substâncias Metálicas**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/AMB2019_anobase2018_FINAL.pdf>
- ALI, D.; FRIMPONG, S. Impulse force reductions and their effects on WBV exposures in high impact shovel loading operations. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 28, n. 3, p. 423–435, maio 2018.
- ALTAIR ENGINEERING, INC. **Altair Simsolid - Structural Analysis for Rapid Design Iterations**. Disponível em: <<https://www.altair.com/simsolid/#>>. Acesso em: 10 out. 2020.
- BAPTISTA, C. Fadiga dos Materiais Metálicos. In: [s.l.: s.n.].
- BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. [s.l.] Mc Graw Hill, 2011.
- CARLI, C. D. **Análise de projetos limite: Lavra a céu aberto vs. lavra subterrânea**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)—[s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- CATERPILLAR. **793C Mining Truck**, 2000.
- CATERPILLAR. **770G Caminhão Fora-de-Estrada**, 2012.
- CATERPILLAR. **Operação e Manutenção 793D Caminhão Fora-de-estrada**, 2016.
- CATERPILLAR. **General Welding Procedure 994F**, 2017.
- CATERPILLAR INC. **Caterpillar Performance Handbook**. 41. ed. Illinois, USA: [s.n.].
- ÇETIN, N. **Open-pit truck/shovel haulage system simulation**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas)—[s.l.] THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSTITY, 2004.
- CHAMANARA, A. **Enhancing mine haul truck KPIs via payload balance**. Tese de Doutorado em Engenharia de Minas—Edmonton, Alberta: University of Alberta, 2013.
- CHEN, J.-S.; HILLMAN, M.; CHI, S.-W. Meshfree Methods: Progress Made after 20 Years. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 143, n. 4, p. 04017001, abr. 2017.
- COUTINHO, H. L. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina à céu aberto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

DATTAKUMAR, S. S.; GANESHAN, V. **Converting dynamic impact events to equivalent static loads in vehicle chassis**. Dissertação (Mestrado em Mecânica Aplicada)—Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2017.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**. 4. ed. [s.l: s.n.].

FRICKE, W. Fatigue and Fracture of Ship Structures. In: CARLTON, J.; JUKES, P.; CHOO, Y. S. (Eds.). . **Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. p. 1–12.

FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I.; SAUNDERS, H. **Metal Fatigue in Engineering**. 2. ed. [s.l: s.n.].

GANDRA, H. V. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E ESTUDO DAS TENSÕES NO CHASSI DO CAMINHÃO FORA DE VIA. p. 107, 2017.

GARG, S.; PANT, M. Meshfree Methods: A Comprehensive Review of Applications. **International Journal of Computational Methods**, v. 15, n. 04, p. 1830001, jun. 2018.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1. ed. Warrendale, Pennsylvania - USA: [s.n.].

GRANDT, A. F. JR. **Fundamentals of structural integrity - Damage tolerant design and nondestructive evaluation**. [s.l: s.n.].

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. 2. ed. [s.l.] Wiley, 2002.

HENZE, J. C. et al. Haul Truck Body Payload Placement Modeling. v. 7, p. 15, 2017.

HERTZBERG, R. W. **DEFORMATION AND FRACTURE MECHANICS OF ENGINEERING MATERIALS**. 4. ed. [s.l: s.n.].

HOLMAN, P. **Caterpillar® Haul Road Design and Management** CAT Big Iron University - St. Charles / Illinois, 2006.

HUSTRULID, M.; KUCHTA, K.; MARTIN, R. **Open Pit Mine - Planning and Design**. 3. ed. Londres: [s.n.]. v. 1

IBRAM. **Relatório Anual de Atividades - Junho 2018 a Julho 2019**. [s.l.] Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2019. . Acesso em: 26 out. 2019.

INDEX MUNDI. **Taxa de crescimento real do PIB da China**. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/g/g.aspx?c=ch&v=66&l=pt>>. Acesso em: 3 maio. 2020.

JIEUN BAEK; YOSOON CHOI. A New Method for Haul Road Design in Open-Pit Mines to Support Efficient Truck Haulage Operations. **Applied Sciences**, v. 7, n. 7, p. 747, 23 jul. 2017.

JOSEPH, T. G.; CHAMANARA, A. Hauler body payload balance. 2012.

LAGES, A. R. **ESTUDO PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DO PORTE DE VEÍCULOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE NOS CUSTOS OPERACIONAIS DE MINAS A CÉU ABERTO**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas)—[s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

LEE, J. et al. Real-Time Longitudinal Location Estimation of Vehicle Center of Gravity. **International Journal of Automotive Technology**, v. 19, n. 4, p. 651–658, ago. 2018.

LI, H. et al. Reliable Fuzzy Control for Active Suspension Systems With Actuator Delay and Fault. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 20, n. 2, p. 342–357, abr. 2012.

LI, Y.; TIAN, Y.-A.; FRIMPONG, S. A reliable analysis method for estimating large excavator structural strength. In: **Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 243–258.

LISOWSKI, F.; LISOWSKI, E. Testing and Fatigue Life Assessment of Timber Truck Stanchions. **Applied Sciences**, v. 10, n. 17, p. 6134, 3 set. 2020.

LIU, B. et al. Failure Identification of Dump Truck Suspension Based on an Average Correlation Stochastic Subspace Identification Algorithm. **Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1795, 1 out. 2018.

MACEDO, A. J. B. DE; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **Rev. Esc. Minas**, p. 221–225, 2001.

MARTINS, A. F. P. M. **Análise de fadiga em juntas de tensão em estruturas offshore**. Porto, 2013. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69457/2/27082.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2020.

MATSUISHI, M.; ENDO, T. **Fatigue of metals subjected to varying stress**. . In: JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Fukuoka, Japan: 1968.

MI, C. et al. Frame fatigue life assessment of a mining dump truck based on finite element method and multibody dynamic analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 23, p. 18–26, jul. 2012.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. USA: [s.n.].

MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. p. A159–A164, 1945.

NEGRÃO, G. Q. **Implementação e avaliação da metodologia deformação-vida em componentes entalhados**. Master—[s.l.] Universidade de Brasília, 2014.

PALMGREN, A. Die lebensdauer von kugellagern. p. 339–341, 1924.

PORTO, F. S. DE A. et al. Telemetria aplicada a manutenção de caminhões: Um estudo sobre seus efeitos no setor de manutenção de uma empresa mineradora. 16 out. 2015.

REIS, M. DOS S. et al. Diagnosis about iron ore mine haul roads in the Quadrilátero Ferrífero: Itabira Complex case. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 67, n. 4, p. 421–429, dez. 2014.

RODRIGUES, A. F. A. et al. **Static and Dynamic Analysis of a Chassis of a Prototype Car**. SAE Technical Paper Series. **Anais...** In: 24TH SAE BRASIL INTERNATIONAL CONGRESS AND DISPLAY. São Paulo, Brasil: 2015. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2015-36-0353/>>. Acesso em: 11 out. 2020

SAE INTERNACIONAL. **SAE Technical Standards - Surface Vehicle Recommended Practice - J610/2008**, 2008.

SKRUCANY, T. et al. **Detection of road vehicle's centre of gravity**. 2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety. **Anais...** In: 2018 XI INTERNATIONAL SCIENCE-TECHNICAL CONFERENCE AUTOMOTIVE SAFETY. Častá, Slovakia: IEEE, abr. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8373334/>>. Acesso em: 18 out. 2020

SOARES, F. S. et al. **DESENVOLVIMENTO DE UM CHASSIS AUTOMOTIVO PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO DE PEQUENO PORTE**. n. 10, p. 12, 2012.

SPINELLI, D. M. **Simulação e análise no auxílio do desenvolvimento de veículos**. Mestrado em Engenharia Mecânica—São Carlos: Universidade de São Paulo, 11 abr. 2017.

SRILATHA, J. Design and analysis of heavy duty vehicle truck chassis. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. V, n. IX, p. 100–107, 30 set. 2017.

TEIXEIRA, L. A. C. **Caracterização de payloads via telemetria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

TEIXEIRA, L. A. C.; MUNARETTI, E.; FERNANDES, V. **Payloads analysis using telemetry**. . In: WORLD MINING CONGRESS. Rio de Janeiro: 2016.

THE WORLD BANK. **Índice de preços mundial do minério de ferro em US\$/ton seca**. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=min%C3%A9rio-de-ferro&meses=120>>. Acesso em: 3 maio. 2020.

THOMPSON, R. **Mining Roads - Mine Haul Road Design, Construction & Maintenance Management**. África do Sul: [s.n.], v. 1

VALE. **Plano de Revisão 793C 1000hs**, 2015.

VALER. **Curso de mineração - Básico**. [s.l: s.n.]. v. Módulo II: Geologia de Mina e Operações de Lavra

VIEIRA, C. S.; TORRES, H. M. **Análise estrutural de equipamentos de Mina - 793D (Itabira)**, 2017.