

MARCELINO DIOMAR KAIZER

**OTIMIZAÇÃO DO VOLUME E ANÁLISE
ESTRUTURAL DE CAÇAMBA PARA
CAMINHÃO FORA-DE-ESTRADA**

**MESTRADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
PUCPR**

**CURITIBA
2004**

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCELINO DIOMAR KAIZER

“Otimização do Volume e Análise estrutural de Caçamba para Caminhão Fora-de-Estrada”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Presidente: **Prof. Dr. Renato Barbieri** (*Orientador*)
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Prof. Dr. Nilson Barbieri (*Co-orientador*)
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
Departamento de Engenharia Mecânica (UFRGS)

Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Resumo

O transporte de minério, material estéril e rejeitos, representa o custo mais elevado na operação de uma mina. Este transporte, na maioria das vezes, é feito por caminhões fora-de-estrada, com capacidades que variam de 20 a 400 toneladas.

Devido aos altos custos de aquisição e manutenção, bem como aos riscos associados, tem-se procurado, com mais intensidade nos últimos dez anos, otimizar esta operação.

Neste sentido, cerca de uma dezena de empresas especializadas desenvolveram estudos, fabricam e comercializam caçambas leves para estes veículos. Estas caçambas, devido ao seu peso reduzido, permitem um aumento significativo da carga útil, e a conseqüente redução do custo da tonelada transportada.

Raros são os artigos ou trabalhos acadêmicos disponíveis nesta área, e quando existentes, concentram-se em algum aspecto específico, sem focar o problema como um todo.

Neste trabalho, através de uma ampla pesquisa dos novos projetos, utilização de técnicas de otimização e análise por elementos finitos, é proposta uma solução alternativa para a otimização de caçambas de caminhões fora-de-estrada utilizadas no transporte de minério de xisto.

Neste trabalho é dada ênfase para carga de minério de xisto, e é realizada uma nova abordagem para carregamentos estáticos e dinâmicos.

Abstract

The transport of ore and dirty, represents the highest costs component in the mining business. In the majority of cases, this transport is executed by off-road trucks with capacities varying from 20 to 400 tons.

Due to the high acquisition and maintenance costs involved, as well as to the risks associated, great effort have been made during the last ten years aiming to optimizing this operation.

In this sense, about ten specialized companies have developed studies and are making and selling light weight dump bodies for these vehicles. These bodies, owing to their reduced weight, achieve a significant increase in payload capacity and consequent reduction in cost per ton transported.

There are only relative few articles or academic studies available in this area, and where they do exist, they usually focus on specific aspects without analyzing the problems in their wider context.

The present study, based on comprising research of recent designs and making use of optimization techniques and finite elements analysis, proposes an alternative approach for the optimization of off-road truck dump bodies, used in oil shale ore transportation.

In this study, is emphasized the haul of the oil shale, and is performed a new approach to the static and dynamic modeling of loads.

À minha esposa Helena Cristina, e minhas filhas Camila e Luiza, que me acompanharam, sofreram, e cresceram comigo durante esta caminhada.

Agradecimentos

Quero expressar a minha gratidão ao Dr. Renato Barbieri, meu professor e orientador. Seu profundo conhecimento da matéria, aliado à sua disposição e senso prático, foram fundamentais para me dar ânimo, permitindo a execução deste trabalho e tornando-o mais acessível, preciso e aplicável.

Agradeço ao Dr. João Elias Abdala Filho, que soube entender minhas dificuldades de trabalho e saúde, e orientou-me no sentido de viabilizar a conclusão do mestrado.

Agradeço também à companhia onde trabalho, a PETROBRAS, em especial ao Eng. Dorian Luis Bachmann, que me concedeu a oportunidade de realizar este mestrado.

A todos os colegas, amigos e professores, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

Sumário

Aprovação	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Sumário	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Motivação para a Realização do Trabalho	3
1.3 Objetivos e Restrições do Estudo	4
1.4 Revisão da Literatura.....	6
Capítulo 2	
Abordagem (Antecedentes)	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 O que existe no mercado? Os novos projetos.....	11
2.2.1 DURATRAY	11
2.2.2 WESTECH.....	13
2.2.3 TRINITY	14
2.2.4 DTSA – Dicsa Tricon	15
2.2.5 PHILIPPI – HAGENBUCH	16
2.2.6 ATLAS/MAXTER.....	19

2.2.7 Caçamba Original do Komatsu 530M	20
2.3 Desenvolvimentos feitos pela PETROBRAS.....	22
2.3.1 Primeiro Estudo	22
2.3.2 Segundo Estudo	23
2.3.3 Terceiro Estudo.....	24
2.4 Estudo da UFPR	25
2.5 Capacidade Nominal de uma Caçamba – O Problema da Determinação.....	30
2.6 Coleta de Dados.....	32
Capítulo 3	
Otinização do Volume e do Centro de Gravidade	37
3.1 Características do Caminhão Haulpak 120.....	37
3.2 Densidade do Xisto.....	39
3.3 Geometria da Caçamba.....	40
3.4 Definição das Equações.....	41
3.5 Otimização.....	53
3.5.1 Definição do Problema	54
3.5.2 Desenvolvimento	56
Capítulo 4	
Estudo do Perfil da Parede Frontal	58
4.1 Propriedades e Características dos Sólidos a Granel (Minérios).....	58
4.2 Modelamento das Cargas	61
4.2.1 O problema do Modelamento	62
4.2.2 O Modelo Proposto	63
4.3 Critério para as Cargas	69
4.3.1 Cargas Estáticas	69
4.3.2 Cargas Estáticas nas Paredes Laterais.....	70
4.3.3 Cargas Estáticas na Parede Frontal	70
4.3.4 Cargas Dinâmicas	70
4.3.5 Cargas Dinâmicas nas Paredes Laterais (Curvas).....	70
4.3.6 Cargas Dinâmicas na Parede Frontal (Frenagens)	70
4.4 Materiais	70
4.5 Estudo da Parede Frontal por Elementos Finitos.....	70
4.5.1 Perfis para a Parede Frontal	70
4.5.2 Cargas e Condições de Contorno.....	70
4.5.3 Análise do Perfil Original	70
4.5.4 Análise do perfil 1.....	70
4.5.5 Análise do Perfil 2	70
4.5.6 Análise da Parede Lateral	70

4.5.7	Resumo dos Resultados	70
4.6	A Caçamba Completa.....	70
4.7	Redução do Peso da Caçamba.....	70
4.8	Estudo de Viabilidade Econômica.....	70
Capítulo 5		
Resultados e Conclusões		70
5.1	Discussão dos Resultados.....	70
5.2	Conclusões.....	70
Capítulo 6		
Sumário e Orientações para Futuras Pesquisas		70
6.1	As Principais Contribuições Desta Dissertação.....	70
6.2	Lista de Orientações para Pesquisa Futura	70
Referências Bibliográficas		70
Referências Complementares		70
Apêndice A		
Algoritmo Básico do Método de Zoutendijk		70

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Aspecto do xisto após o desmonte.....	5
Figura 1.2 - Caminhão equipado com caçamba reformada no ano 2000.....	5
Figura 2.1 - Komatsu 830E equipado com caçamba Duratray, em Ernest Henry, Austrália.....	12
Figura 2.2 - CAT 785B, equipado com caçamba Duratray, transportando material úmido e aderente, em Lihir Gold Mine, Papua, Nova Guiné.....	12
Figura 2.3 - Komatsu 930E equipado com caçamba Westech.....	13
Figura 2.4 - Caçamba da Westech , na CVRD, em Itabira-MG.....	14
Figura 2.5 - Caminhão Catterpillar equipado com caçamba Trinity.....	15
Figura 2.6 – Caçamba da DTSA na Minera El Abra, Chile.....	16
Figura 2.7 - Komatsu 930E com capacidade para 340 ton.....	18
Figura 2.8 - Caçamba para carvão PHIL HIVOL® num Komatsu 930E. É a maior caçamba existente para caminhão fora-de-estrada, com volume de 430yd ³ (328,7m ³), e 317 ton de capacidade.....	18
Figura 2.9 - Trailer com descarga traseira da Atlas-Maxter.....	19
Figura 2.10 - Tailgate automático da Atlas-Maxter.....	20
Figura 2.11 - Komatsu 530M com caçamba original.....	21
Figura 2.12 - Caminhão Haulpak 120 com caçamba original.....	22
Figura 2.13 - Caminhão Haulpak 120 equipado com a primeira caçamba ampliada.....	23
Figura 2.14 - Caminhão Haulpak 120 equipado com caçamba ampliada (segundo projeto).....	24
Figura 2.15 - Caminhão Haulpak 120 equipado com caçamba ampliada (terceiro projeto).....	25
Figura 2.16 - Tensões para uma carga de 100 toneladas.....	26
Figura 2.17 - Locação dos extensômetros.....	27
Figura 2.18- Extensômetros instalados na parede lateral com os dispositivos de proteção.....	27
Figura 2.19 - Caçamba proposta pelo estudo da UFPR.....	30

Figura 2.20 - Diferença entre a carga real e a carga calculada pela norma SAE Standard J1363.....	31
Figura 2.21 - Vistas diversas do caminhão com capacidade de 100 ton com carga normal	33
Figura 2.22 - Medição do ângulo de atrito entre o xisto e o fundo da caçamba.....	35
Figura 2.23 - Medição do ângulo de repouso do xisto desmontado.....	35
Figura 3.1 – Pesagem de caminhão Haulpak 120.	38
Figura 3.2– Caminhão Haulpak 120.	38
Figura 3.3 - Haulpak 120 carregado com a carga utilizada para avaliação da densidade do xisto.....	39
Figura 3.4 - Vista isométrica superior da caçamba original.....	40
Figura 3.5 - Vista isométrica inferior da caçamba original.....	41
Figura 3.6 - Variáveis existentes nas equações para o Volume e C.G. da caçamba.	42
Figura 3.7 - Perspectiva com os sólidos geométricos que compõem a carga de xisto.	43
Figura 3.8 – Volume V_1	43
Figura 3.9 – Volume V_2	44
Figura 3.10 – Volume V_3	46
Figura 3.11 - Volume V_{Δ}	47
Figura 3.12 – Volume V_4	48
Figura 3.13 – Volume V_5	49
Figura 3.14 – Volume V_6	49
Figura 3.15 – Volume V_7	50
Figura 3.16 – Volume V_8	51
Figura 3.17 – Volume V_F	51
Figura 3.18 – Distribuição de cargas e posição do centro de gravidade em relação aos eixos do caminhão.....	54
Figura 4.1 – Prisma de falha.	64
Figura 4.2 – Empuxo ativo (a) e passivo (b).....	65
Figura 4.3 - Efeito do deslocamento da parede na intensidade do empuxo.	65
Figura 4.4 - Empuxo ativo.	67
Figura 4.5 - Empuxo passivo.	67
Figura 4.6 - Volume sobre o qual atua a força centrífuga durante as curvas. O plano que aparece na figura possui inclinação de 28° com a horizontal, igual ao ângulo de repouso do xisto.	70

Figura 4.7 - Volume sobre o qual atua a força dinâmica durante as frenagens. O plano que aparece na figura possui inclinação de 23° com a horizontal, igual ao ângulo de repouso do xisto após subtraída a inclinação da rampa (5°).	70
Figura 4.8 – Detalhes do Perfil 1.	70
Figura 4.9 – Vista em perspectiva do Perfil 1; raio = 5.510mm.	70
Figura 4.10 - Detalhes do Perfil 2.	70
Figura 4.11 – Vista em perspectiva do Perfil 2; raio = 5.510mm; raio de concordância = 330,6mm.	70
Figura 4.12 - Malha utilizada para análise da parede frontal original.....	70
Figura 4.13 - Tensões atuantes na parede frontal original.	70
Figura 4.14 - Deslocamentos da parede frontal original.	70
Figura 4.15 - Malha utilizada para análise da parede frontal com Perfil 1.	70
Figura 4.16 - Tensões atuantes na parede frontal com Perfil 1.	70
Figura 4.17 - Detalhe das tensões atuantes na parede frontal com Perfil 1.....	70
Figura 4.18 – Deslocamentos da parede frontal com Perfil 1.	70
Figura 4.19 – Representação gráfica do Perfil 1 deformado.....	70
Figura 4.20 - Malha utilizada para análise da parede frontal com Perfil 2.	70
Figura 4.21 - Tensões atuantes na parede frontal com Perfil 2.	70
Figura 4.22 - Detalhe das tensões atuantes na parede frontal de Perfil 2.....	70
Figura 4.23- Deslocamentos da parede frontal de perfil 2.	70
Figura 4.24 - Deslocamentos da parede frontal de Perfil 2 deformado.....	70
Figura 4.25 – Malha utilizada na análise da parede lateral proposta.	70
Figura 4.26 - Tensões atuantes na parede lateral proposta.....	70
Figura 4.27 – Deslocamentos da parede lateral proposta (transversais à parede).	70
Figura 4.28 – Representação gráfica da parede lateral deformada.....	70
Figura 4.29 - Perspectiva com vista inferior da caçamba proposta.....	70
Figura 4.30 - Perspectiva com vista superior da caçamba proposta.....	70
Figura 4.31 – Malha utilizada na análise da caçamba completa.	70
Figura 4.32 – Tensões atuantes na caçamba (vista geral).	70
Figura 4.33 - Deslocamentos para a caçamba completa (vista geral).	70
Figura 4.34 - Fluxo de caixa para a caçamba proposta.	70

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Espessuras, durezas e limites de ruptura e escoamento da caçamba original.....	36
Tabela 4.1 – Resumo dos resultados das análises por elementos finitos.	70
Tabela 4.2 – Comparação dos pesos da caçamba original com a caçamba proposta.....	70
Tabela 4.3 - Comparativo Caçamba Original x Caçamba Proposta.....	70

Lista de Símbolos

C	Altura da parede frontal em relação ao ponto de encontro do fundo com esta
H	Altura das paredes laterais da caçamba em relação ao ponto de encontro do fundo com a parede frontal
L	Comprimento do fundo medido paralelamente a este
V_1	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 1
V_2	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 2
V_3	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 3
V_4	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 4
V_5	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 5
V_6	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 6
V_7	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 7
V_8	Volume parcial da carga referente ao prisma de número 8
V_F	Volume subtraído do volume total da carga referente ao espaço vazio que fica à frente da parede frontal devido à curvatura desta
V_{Δ}	Volume subtraído do volume total da carga referente ao espaço vazio existente junto às laterais e o fundo da caçamba
h	Soma da altura dos prisma V_1 e V_2 , ou altura do prisma V_3
CG_1	Centro de gravidade do prisma V_1
CG_2	Centro de gravidade do prisma V_2
CG_3	Centro de gravidade do prisma V_3
CG_4	Centro de gravidade do prisma V_4
CG_5	Centro de gravidade do prisma V_5
CG_6	Centro de gravidade do prisma V_6

CG_7	Centro de gravidade do prisma V_7
CG_8	Centro de gravidade do prisma V_8
CG_F	Centro de gravidade do prisma V_F
CG_Δ	Centro de gravidade do prisma V_Δ
V_{22}	Paralelepípedo com largura, altura e comprimento iguais aos do volume V_2
V_{21}	Volume relativo à diferença entre os volumes V_{21} e V_2
V_{32}	Paralelepípedo com largura, altura e comprimento iguais aos do volume V_3
V_{31}	Volume relativo à diferença entre os volumes V_{31} e V_3
CG_{21}	Centro de gravidade do prisma V_{21}
CG_{22}	Centro de gravidade do prisma V_{22}
CG_{31}	Centro de gravidade do prisma V_{31}
CG_{32}	Centro de gravidade do prisma V_{32}
V_T	Volume total da carga da caçamba
CG_T	Centro de gravidade total da carga da caçamba
σ_v	Pressão vertical exercida por uma massa semi-infinita de solo numa profundidade z
γ	Peso específico do material transportado
z	Profundidade no solo
σ_h	Pressão horizontal exercida pelo solo sobre um plano vertical imóvel
K_0	Coefficiente de empuxo no repouso
E_a	Empuxo ativo
E_p	Empuxo passivo
τ	Tensão de cisalhamento
Δ	Deslocamento da parede
P	Peso da cunha (solo)
R	Reação do terreno
Φ	Ângulo de atrito interno do material, também igual ao ângulo entre a reação do terreno e a linha de ruptura deste
δ	ângulo de atrito entre o material(solo ou minério) e a parede

α	Ângulo entre a parede e a horizontal
β	Ângulo entre o material em repouso e a horizontal
α_L	Ângulo da parede lateral com a horizontal
β_L	Ângulo de repouso do xisto no encontro com as paredes laterais
K_{aL}	Coefficiente de empuxo ativo para as paredes laterais da caçamba
σ_L	Pressão horizontal resultante da ação de K_{aL} nas paredes laterais da caçamba
γ_{EQUIVL}	Peso específico equivalente do minério, relativo à pressão que atua nas paredes laterais da caçamba
α_F	Ângulo da parede frontal com a horizontal
β_F	Ângulo de repouso do xisto no encontro com a parede frontal
K_{aF}	Coefficiente de empuxo ativo para a parede frontal da caçamba
σ_F	Pressão horizontal resultante da ação de K_{aF} na parede frontal da caçamba
γ_{EQUIVF}	Peso específico equivalente do minério, relativo à pressão que atua na parede frontal da caçamba
V_{1C}	Volume parcial do prisma de número 1 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{2C}	Volume parcial do prisma de número 2 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{3C}	Volume parcial do prisma de número 3 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{4C}	Volume parcial do prisma de número 4 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{5C}	Volume parcial do prisma de número 5 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{6C}	Volume parcial do prisma de número 6 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{7C}	Volume parcial do prisma de número 7 sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
$V_{\Delta C}$	Volume parcial do prisma Δ sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas
V_{FC}	Volume parcial do prisma F sobre o qual atua a força centrífuga nas curvas

V_{TC}	Volume parcial da carga sobre a qual atua a força centrífuga nas curvas, equivalente à soma de V_{1C} a V_{7C} , menos $V_{\Delta C}$ e V_{FC}
F_C	Força centrífuga atuante sobre o volume V_{TC}
m_c	Massa sobre a qual atua a força centrífuga
v_c	Velocidade e curva
P_{DINc}	Pressão exercida pela carga sobre as paredes laterais devido a ação da força centrífuga
A_C	Área da parede lateral da caçamba
h_{CDIN}	Coluna de minério que exerce uma pressão equivalente a P_{DINc}
V_{1F}	Volume parcial do prisma de número 1 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{2F}	Volume parcial do prisma de número 2 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{3F}	Volume parcial do prisma de número 3 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{4F}	Volume parcial do prisma de número 4 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{5F}	Volume parcial do prisma de número 5 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{6F}	Volume parcial do prisma de número 6 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{7F}	Volume parcial do prisma de número 7 sobre o qual atua a força devido à frenagem
V_{TF}	Volume parcial da carga sobre o qual atua a força devido à frenagem, equivalente à soma dos volumes V_{1F} a V_{7F}
F_F	Força devido à frenagem, atuante sobre o volume V_{TF}
P_{DINF}	Pressão exercida pela carga sobre a parede frontal devido à desaceleração (frenagem)
A_F	Área da parede frontal da caçamba
H_{FDIN}	Coluna de minério que exerce uma pressão equivalente a P_{DIN}

Capítulo 1

Introdução

1.1 Antecedentes

Caminhões fora-de-estrada são equipamentos de grande porte e custo elevado, utilizados em minas a céu aberto para remover grandes volumes de material sólido (estéril/minério). O transporte de material sólido pode parecer uma tarefa simples, mas existe um número de questões de projeto e programação que necessitam ser otimizadas para o bom desempenho destes caminhões. Embora sejam projetados para transportar um determinado peso, na prática são utilizados para movimentar um certo volume de material.

Esta diferença de função é inerente à aplicação. Caminhões são máquinas desenhadas para suportar carga mecânica e, portanto, o usuário necessita saber quanto peso o veículo irá carregar. Esta é uma questão muito importante, porque afeta diretamente a vida dos pneus, a confiabilidade, a disponibilidade e a vida útil do caminhão. A utilização de cada caminhão pode ser melhorada pela maximização do volume de material que a caçamba pode transportar sem sobrecarregá-lo. O volume carregado pelo caminhão pode ser inferido por um levantamento volumétrico da mina (dividindo pelo número de cargas), pesagem de cada caminhão (peso dividido pelo peso específico do material a granel) ou uma balança *on line* após a britagem. Nenhuma destas

técnicas é apropriada, pois não levam em conta alterações devido a compactação, expansão ou no perfil que a carga é disposta na caçamba.

Em muitas aplicações, o fundo, as paredes laterais e a parede frontal da caçamba são revestidas com placas de desgaste. Estas placas são instaladas fundamentalmente para prevenir desgaste, particularmente quando materiais abrasivos escorregam das caçambas durante operações de descarregamento. Também reduzem os danos por impacto. Mas infelizmente elas adicionam uma massa significativa às caçambas. O caminhão Haulpak 120, por exemplo, possui aproximadamente 7 toneladas de placas de desgaste, e portanto o decréscimo na capacidade de carga é do mesmo valor. Além disso, estas placas necessitam ser substituídas muitas vezes ao longo da vida útil do caminhão.

Caçambas convencionais requerem grande quantidade de solda na sua construção. Estas soldas invariavelmente introduzem tensões residuais. Isto pode levar ao desenvolvimento de trincas de fadiga que necessitam de reparos periódicos.

A substituição das placas de desgaste e o reparo das trincas são operações caras e que consomem tempo. Assim sendo, há uma grande motivação no sentido de desenvolver um sistema alternativo de caçamba para caminhão fora-de-estrada que:

- Seja significativamente mais leve;
- Possua menor número de juntas soldadas na sua construção, e;
- Possibilite rápida substituição das suas partes.

O projeto de caçambas permaneceu estático por aproximadamente 50 anos, até aproximadamente 1995. Nos últimos anos, vários fabricantes têm desenvolvido caçambas especiais, utilizando materiais de alta resistência e projetos inovadores, de modo a reduzir peso e aumentar o seu volume. Estas caçambas são projetadas considerando as características do material que irão transportar.

1.2 **Motivação para a Realização do Trabalho**

Quando uma empresa mineradora adquire uma frota de caminhões fora-de-estrada, suas caçambas são dimensionadas para transportar um material específico. É comum que ao longo da sua vida útil, estes caminhões venham a transportar materiais muito diferentes daquele para o qual foram originalmente projetados. Isto ocorre devido às necessidades da mina, tais como o transporte do material das camadas que recobrem o minério, ou não raro, o deslocamento da frota para outra mina onde as características do material a ser transportado podem ser completamente diferentes.

Em São Mateus do Sul, Paraná, a PETROBRAS opera uma planta que produz óleo, gás e enxofre, conhecida como SIX – Superintendência da Industrialização do Xisto. A matéria prima é o xisto extraído de uma mina a céu aberto. O xisto é um folhelho pirobetuminoso, rico em matéria orgânica. O transporte do xisto, dos rejeitos (xisto alterado ou xisto fino, inadequados para o processamento, ou xisto retornado, já processado, que retorna para a mina), e do material estéril (material que recobre as camadas de xisto), é executado por uma frota de 14 caminhões fora-de-estrada, modelo Haulpak 120, com capacidade nominal de 120 toneladas curtas (108,864 toneladas métricas).

Estes caminhões foram originalmente projetados para o transporte de minério de ferro, que é consideravelmente mais pesado que o xisto. Conseqüentemente, as caçambas não transportam um volume de xisto que permita o aproveitamento total da capacidade do caminhão. Uma estimativa baseada no balanço de massa feito por pesagem após a britagem, descontando-se a parcela de finos que retorna para a mina, mostrou que a caçamba original transporta aproximadamente 68 toneladas. Estas caçambas foram projetadas na década de 70, provavelmente com um elevado coeficiente de segurança, visto que após quase 20 anos de operação, praticamente não possuem indícios de fadiga estrutural.

Por outro lado, as pesagens feitas pelos fabricantes de pneus, mostraram que apesar do caminhão estar transportando uma carga bastante inferior à sua capacidade, os pneus dianteiros ficam sobrecarregados, o que indica que o centro de gravidade da carga está demasiado à frente. Esta sobrecarga faz com que a vida útil dos pneus dianteiros seja

reduzida, devido a superaquecimento e problemas tais como cortes e deslocamento da banda de rodagem.

Assim sendo, tornou-se imperativo a otimização do transporte de xisto, com o objetivo de aumentar a capacidade das caçambas e corrigir a posição do centro de gravidade da carga.

1.3 Objetivos e Restrições do Estudo

A caçamba de um caminhão Haulpak 120 representa 33% da massa total do veículo, e é o item mais pesado que compõe o caminhão. Ela pesa aproximadamente 30 toneladas. Fica evidente que uma maneira de reduzir a massa do caminhão, e aumentar a sua capacidade de carga, é reduzindo a massa da caçamba. Por outro lado, é importante alterar as dimensões da caçamba de modo a maximizar sua capacidade sem ultrapassar o limite máximo de peso para o conjunto carga-caçamba.

O objetivo deste estudo é obter alternativas de projetos para as caçambas destes caminhões, visando o transporte da maior carga possível.

Estudos recentes [12] têm sido realizados de modo a reduzir o peso do fundo das caçambas e aumentar sua flexibilidade. Uma melhor flexibilidade é necessária nas minas em que após o desmonte, permanecem grandes blocos de minério. Se o material for muito pesado, um grande impacto irá ocorrer durante as operações de carregamento do caminhão. No caso do xisto, não há problemas significativos relacionados com impacto de rochas durante o carregamento.

O xisto é um material lamelar, com baixa densidade e baixa abrasividade. Após o desmonte¹, em geral não permanecem rochas excessivamente grandes (Fig. 1.1).

¹ Desmonte é a operação de desmontagem de blocos de minério com a utilização de explosivos.



Figura 1.1 - Aspecto do xisto após o desmonte.

Conseqüentemente, uma melhora na flexibilidade do fundo da caçamba não é necessária. Isto pode ser visto na Figura 1.2, onde são mostradas as placas de desgaste de uma caçamba em perfeito estado de uso após 3 anos de operação.



Figura 1.2 - Caminhão equipado com caçamba reformada no ano 2000.

Na abordagem para este estudo considerou-se que os custos relacionados a uma modificação do fundo da caçamba seriam muito elevados. Desde que o fundo é a parte mais pesada de uma caçamba, e mais difícil de construir devido à grande quantidade de soldas, junções e detalhes estruturais, uma modificação significaria praticamente a construção de toda uma caçamba nova.

Considerando o acima exposto, foi feita uma opção cujos pontos principais são:

- Manter o fundo intacto, fazendo somente pequenas alterações para adaptá-lo ao perfil da parede frontal e para eventual soldagem de uma extensão traseira de modo a corrigir a posição do centro de gravidade;
- Modificar o perfil das paredes frontal, laterais e aba da caçamba, utilizando chapas de aço de alta resistência e um projeto inovador, de modo a maximizar a carga líquida a ser transportada e obter uma adequada distribuição de carga entre os eixos do caminhão.

1.4 Revisão da Literatura

Existem poucos estudos relacionados com o objeto desta dissertação. Kowalksyk, conforme citado por Poh e outros [30], estudou a distribuição de tensões em uma caçamba convencional sob a ação de cargas estáticas. Sugeriu que uma membrana de aço com dupla curvatura poderia constituir uma estrutura eficiente para uma caçamba.

Alguns estudos são específicos para as características de uma determinada mina, tal como o realizado por Whalen e Obaia [21] da Syncrude Canadá Limited, que analisaram os efeitos da operação com areias oleosas no projeto de caçambas para caminhões fora-de-estrada. Este estudo verifica problemas de trincas por fadiga, ocorridas na ligação entre vigas de reforço do fundo da caçamba, geradas pela flexão do chassi quando operando em pistas com regiões alternadas de solo de alta e baixa capacidade de carga.

Outro estudo, conduzido por Poh e outros [12], foi orientado para o desenvolvimento de um fundo leve e flexível. Desenvolveram um fundo curvado de aço

em forma de membrana, e conduziram uma análise por elementos finitos para três diferentes perfis do fundo e também para um perfil convencional, submetidos ao impacto de uma rocha padrão. Concluíram que uma membrana de curvatura simples proporciona resistência aceitável ao impacto durante um carregamento normal e que pode reduzir a massa da caçamba, permitindo aumentar a sua carga útil.

Outros estudos e pesquisas têm sido conduzidos por fabricantes de caçambas e são considerados propriedade ou segredo industrial, e não estão disponíveis para o público em geral.

Um tópico que mereceu especial atenção neste trabalho foi a modelagem das cargas estáticas e dinâmicas nas paredes laterais e frontal da caçamba. Dos poucos trabalhos encontrados relacionados com o tema desta dissertação, somente os desenvolvidos por Casas e outros, [4] e [14], trazem uma proposta para o modelamento das cargas. No primeiro, para simular as condições de carregamento, aproximaram um equivalente de pressão hidrostática média atuante nas diversas faces da caçamba, onde exploram a idéia de volumes equivalentes para a carga acima da borda útil da caçamba, e também da área equivalente na face lateral da caçamba para determinação da pressão lateral média, utilizando no cálculo a expressão de pressão hidrostática[8]. No segundo, foi apresentado um equacionamento para obter uma equação diferencial da distribuição de pressões numa caçamba[34]. Foi elaborada uma aproximação físico-matemática, que ainda apresenta a necessidade de se obter alguns parâmetros por experiência ou através de experimentos.

Sendo assim, foi feita uma ampla pesquisa para determinar a forma de fazer este modelamento. O primeiro tema estudado foi silos. Porém, os silos geralmente armazenam material de granulometria baixa, quando comparado com a carga de xisto. Além disso, o foco do estudo dos silos, é projetá-los de modo que se garanta fluxo ininterrupto e a análise da distribuição de cargas durante o fluxo. Outra diferença fundamental é de que os silos são equipamentos estáticos, enquanto que a caçamba de um caminhão normalmente está em movimento, sujeita à ação de acelerações, frenagens e força centrífuga durante trajetos em curva.

Outro campo que poderia ser promissor para a execução do modelamento, é o estudo da estabilidade de taludes. Basicamente o material se acomoda na caçamba

conforme seu ângulo de repouso, sendo que o material armazenado acima deste ângulo é que exerceria pressão nas paredes. Do estudo deste assunto, concluiu-se que o seu enfoque é na determinação das condições de equilíbrio do talude, e no estudo das características do comportamento dos diferentes materiais sólidos que normalmente constituem os taludes.

No entanto, o exame dos dois assuntos acima foi de grande valia para elucidar as leis de comportamento de um material sólido e dos sólidos a granel, bem como aprender sobre as suas características e sobre as dificuldades e incertezas dos trabalhos desenvolvidos nesta área.

Um grande passo no sentido de melhor embasar a execução deste modelamento, ocorreu quando do estudo do artigo escrito por Whalen e Obaia [14]. Neste artigo, está citado que o modelamento da carga foi feito por um algoritmo baseado na mecânica dos solos. Embora a carga que analisaram era proveniente do transporte de areias oleosas, material completamente diverso do xisto, esta informação conduziu ao estudo da mecânica dos solos, onde foram encontradas as bases para o modelamento do carregamento nas paredes da caçamba.

Também estudou-se a mecânica das rochas, conhecimento que veio a complementar os demais e permitiu chegar ao modelamento proposto nesta dissertação.

Vale lembrar, que nos sites dedicados à pesquisa acadêmica, as informações encontradas relacionadas ao tema desta dissertação são mínimas.

Capítulo 2

Abordagem (Antecedentes)

2.1 Introdução

Nos últimos anos, algumas companhias têm desenvolvido caçambas especiais, utilizando materiais de alta resistência mecânica, ao impacto e ao desgaste, e utilizando novas geometrias de modo a reduzir o peso e aumentar o volume útil da caçamba. Estas caçambas são projetadas considerando as características do material que irão transportar.

Na Mina de Xisto da Petrobras, em São Mateus do Sul, Paraná, opera uma frota de 14 caminhões Haulpak 120, que possuem caçambas originalmente projetadas para transportar minério de ferro. Como o xisto é um material de menor densidade, estes caminhões estão trabalhando abaixo da sua capacidade nominal. Neste estudo, procura-se realizar a otimização da caçamba do caminhão Haulpak 120, baseada nas seguintes premissas:

- Manter o fundo da caçamba intacto. O fundo tem mostrado boa performance na operação com xisto, e o custo de modificações nesta parte da caçamba seria muito elevado;

- Substituir as paredes laterais e frontais e a aba da caçamba, e se necessário acrescentar uma extensão traseira, de modo a obter a carga desejada (carga nominal ou maior) e posicionar o centro de gravidade (caminhão + caçamba + carga) adequadamente durante o transporte de xisto;
- Analisar diferentes perfis em forma de membrana, para a parede frontal, escolhendo o melhor perfil entre os estudados;
- Utilizar materiais de alta resistência e nova geometria para as partes a serem substituídas de modo a reduzir o seu peso;
- Conduzir análise pelo método dos elementos finitos, para as paredes laterais e frontal, de modo a assegurar a integridade da caçamba e a segurança do operador.

Para aumentar a capacidade de carga e posicionar corretamente o centro de gravidade, técnicas de otimização foram utilizadas, particularmente o método de Método de Zoutendijk [3] .

Considerando o exposto anteriormente, foi escolhida uma abordagem considerada apropriada para obter a solução do problema do modelamento, baseada na experiência, observações e medições de campo, bem como na pesquisa do comportamento das rochas, solos e materiais sólidos a granel. O resultado é o estudo e desenvolvimento dos conceitos que constituem a base do modelamento de carga proposto, que foi utilizado na análise dos perfis para a parede frontal da caçamba e para a análise das paredes laterais.

Em resumo, este estudo apresenta uma nova abordagem, introduzindo um novo conceito, onde o fundo da caçamba é mantido sem alterações, e as laterais, frente e aba são substituídas por partes com nova geometria, construídos com aço de alta resistência. O perfil das laterais é modificado e o comprimento da caçamba é modificado, de modo que o caminhão transporte no mínimo a carga nominal para a qual foi projetado.

Dois perfis em forma de membrana são considerados para a parede frontal. De modo a avaliar a performance destes perfis sob cargas dinâmicas (desaceleração), o comportamento de cada um foi analisado utilizando um software de elementos finitos.

2.2 O que existe no mercado? Os novos projetos

Para desenvolver uma caçamba que seja mais leve, possua um número de juntas soldadas significativamente menor, e possibilite manutenção rápida e simples, algumas companhias tais como Philippi-Hagenbush, DICSА Tricon, Duratray, Trinity, Atlas-Maxter e Westech, têm testado novos projetos de modo a atingir estes objetivos. Apresenta-se a seguir uma breve revisão dos projetos feitos por estas companhias.

2.2.1 DURATRAY

Projeta suas caçambas especificamente para cada mina, e têm obtido em média uma capacidade 16% maior, acompanhada de redução de peso de até 50% [13]. Ao mesmo tempo em que buscam maior durabilidade e menos manutenção, também enfatizam a construção de caçambas mais largas, para abaixar o centro de gravidade.

Em algumas aplicações, têm conseguido 30.000 horas de vida útil da caçamba, e estão perseguindo um novo patamar: quase livre de manutenção e vida útil ainda mais longa. Estes atributos são para a sua caçamba de fundo de borracha suspenso, que proporciona: eliminação da carga morta, utilizando aço com dureza de 500BHN, absorção do impacto de grandes rochas, redução de choques e menos ruído durante o carregamento.

Numa caçamba de fundo suspenso da Duratray, o fundo de aço e as chapas associadas são substituídas por um lençol de borracha, que é suspenso como uma rede acima da estrutura de aço através de cabos de elastômero. O fundo de borracha não se apóia sobre a estrutura de aço

A habilidade do lençol de borracha de flexionar, reduz a quantidade de material aderido à caçamba, e portanto o peso morto é bastante reduzido. Segundo o fabricante, a espessura e a resistência à abrasão do lençol de borracha proporcionam uma vida de duas a três vezes a do revestimento de aço, e até 20% de redução de peso [13].

Além disso, a habilidade de absorver impactos no carregamento, significa aumento da segurança e conforto do operador e redução de danos no chassi e instrumentação do caminhão (Figuras 2.1 e 2.2).



Figura 2.1 - Komatsu 830E equipado com caçamba Duratray, em Ernest Henry, Austrália.



Figura 2.2 - CAT 785B, equipado com caçamba Duratray, transportando material úmido e aderente, em Lihir Gold Mine, Papua, Nova Guiné.

2.2.2 WESTECH

A Westech [20] tem feito algumas experiências com caçambas de caminhão fora-de-estrada, apesar de construir caçambas de escavadeiras *shovel* e *draglines*¹. Forneceu cerca de 7.400 caçambas de caminhão nos últimos 33 anos. Deste total, cerca de 450 eram caçambas leves. Utiliza análise por elementos finitos, com acompanhamento de campo, feito com 6, 12 e 18 meses de frequência, de modo a atender os requisitos dos seus clientes. Têm obtido redução nos custos de operação de 7 a 25% (e acréscimo da carga útil na mesma proporção), redução no peso da caçamba de até 57%, para uma vida projetada de 20.000 horas de operação (Figuras 2.3 e 2.4).



Figura 2.3 - Komatsu 930E equipado com caçamba Westech.

¹ Escavadeira Shovel é um equipamento de mineração que se movimenta sobre esteiras, cuja função é escavar minério e carregar caminhões. Sua caçamba possui uma tampa articulada na face inferior, que se abre descarregando o minério no caminhão. Dragline é uma draga de grande porte, que se movimenta através de duas enormes sapatas, cuja função é fazer a descobertura do minério. Normalmente carrega o material através de um movimento de arraste da caçamba, faz a sua elevação e giro de 180° e descarrega numa pilha.



Figura 2.4 - Caçamba da Westech , na CVRD, em Itabira-MG.

2.2.3 TRINITY

A Trinity [16] era originalmente um fornecedor de fabricantes de equipamentos, incluindo a Komatsu. Tem cerca de 3.000 caçambas operando em minas de cobre, ferro, areias oleosas e ouro. Suas caçambas 55 T-Max, utilizam aço de 475-525 BHN, que possuem de 10 a 30% de resistência a mais, comparado aos aços A-514 utilizados nas caçambas originais. Suas caçambas são bastante reforçadas, como uma caçamba original, para se obter vida útil de 6 a 8 anos.

Ressaltam o incremento de carga obtido de até 24%, a redução do peso bruto do veículo de 14%, e a redução da fadiga e desgaste no caminhão e pneus, e fadiga dos operadores (Fig. 2.5).



Figura 2.5 - Caminhão Catterpillar equipado com caçamba Trinity.

2.2.4 DTSA – Dicsa Tricon

A DTSA [5] está agora no seu projeto Fase VII, tendo construído e entregue várias destas caçambas para, entre outros, a BHP Escondida (Chile) e a Syncrude (Canadá), além de minerações na Austrália. Das mais de quatrocentas unidades que estão no campo, a mais antiga já operou cerca de 45.000 horas. A companhia reviu as dificuldades encontradas na evolução das suas caçambas, particularmente com a ductilidade dos materiais empregados e a dificuldade em obter aços de alta dureza. A DTSA introduziu novos aços de alta resistência, com dureza na faixa de 300-400 BHN para a estrutura, modificando ou incorporando elementos químicos, que têm apresentado ótima performance, em especial em grandes escavadeiras shovel. O fundo, normalmente com uma polegada de espessura, é fabricado com o mesmo aço, porém temperado e com dureza de 450-470BHN, e com as mesmas propriedades estruturais.

A estrutura da caçamba é construída utilizando vigas em forma de T, que conferem as seguintes características: para um caminhão da classe de 200 toneladas, no qual a caçamba representa 30% do peso do veículo vazio, quando equipado com uma caçamba Dicsa Hi Load, a sua carga nominal aumenta em até 15%. Isto proporciona maior produção com os mesmos custos operacionais resultando numa economia direta de 15% por tonelada transportada.

A Dicsa projeta e fabrica cada caçamba, considerando o peso específico do material da mina onde irá trabalhar (Fig. 2.6).



Figura 2.6 – Caçamba da DTSA na Minera El Abra, Chile.

2.2.5 PHILIPPI – HAGENBUCH

A Philippi-Hagenbuch [11] afirma que o segredo para fazer uma caçamba de caminhão transportar a carga pretendida é considerar os ângulos de repouso do material nesta. Estes ângulos são os valores utilizados nas fórmulas de cálculo do volume. A SAE assume uma razão de acomodação do material de 2:1, mas praticamente nenhum material se comporta desta maneira. Portanto, o fabricante do caminhão tem que determinar como o material se acomoda.

Segundo o fabricante, “Se você realmente quer servir o seu cliente, você deve visitar a sua mina. Quando fazemos isto, tiramos um mínimo de 150 fotografias das cargas dos caminhões. De lado, de frente a de trás. Então, analisamos os ângulos de repouso. Pode-se pensar que terá um valor único em toda a caçamba, mas não é assim.

Os ângulos do material raramente são os mesmos. Na frente pode ser de 21 graus, na traseira de 28 a 31 graus e nos lados de 24 a 34 graus [11].”

“Nós fazemos um perfil da carga, e então construímos a caçamba em torno dela. Assim, nós temos uma caçamba perfilada à carga. É específica para uma determinada aplicação [11].”

A Philippi-Hagenbuch oferece também caçambas de dupla função, projetadas para permitir alteração de capacidade quando se transporta minério ou material estéril.

As informações coletadas dos usuários de seus equipamentos permitiram fazer uma série de descobertas, que levaram, à criação do seu processo de projeto Profile Load_{sm}. Utilizando este processo, podem predeterminar o real e atual volume efetivo da caçamba antes desta entrar em serviço.

O processo Profile Load_{sm} permite coletar os dados de campo e criar uma caçamba para caminhão fora-de-estrada específica para cada mina. Começa com uma visita ao local da mina, tirando-se fotografias dos caminhões carregados sob vários ângulos. Analisando estas fotografias, se determinará o ângulo em que o material se acomoda na caçamba, e estes ângulos serão utilizados durante o processo de criação e consolidação do modelo sólido da carga em CAD, que irá conduzir à criação de uma caçamba específica chamada de Load ProfiledTM. Esta constatação levou ao patenteamento deste método. Utilizando a sua abordagem Profile Load_{sm}, criam um perfil da carga desejada, e constroem a caçamba em torno desta carga, criando uma caçamba Load ProfiledTM, que é específica e garante o transporte da carga desejada (Figuras 2.7 e 2.8).



Figura 2.7 - Komatsu 930E com capacidade para 340 ton, equipado com caçamba PHIL Load Profile™.



Figura 2.8 - Caçamba para carvão PHIL HIVOL® num Komatsu 930E. É a maior caçamba existente para caminhão fora-de-estrada, com volume de 430yd³ (328,7m³), e 317 ton de capacidade.

2.2.6 ATLAS/MAXTER

A companhia canadense Atlas/Maxter [1] tem executado projetos inovadores, que têm resolvido problemas de companhias de mineração e construção. Alguns de seus produtos incluem (Fig. 2.9 e 2.10):

- Vagões com descarga pelo fundo;
- Trailers com descarga traseira;
- Transportadores de carvão.



Figura 2.9 - Trailer com descarga traseira da Atlas-Maxter.



Figura 2.10 - Tailgate² automático da Atlas-Maxter.

2.2.7 Caçamba Original do Komatsu 530M

Este caminhão é similar ao Haulpak 120. Na verdade é um aperfeiçoamento deste. Por esta razão, e por ser uma caçamba original fornecida pelo fabricante do caminhão, as suas características são apresentadas aqui. O fundo, a parede frontal, a aba e as laterais são fabricados com chapas de 200.000psi (1.379MPa) de resistência e 400 BHN. Este material tem boa resistência ao impacto, sem acrescentar peso. Possui também características de boa soldabilidade sem necessidade de pré-aquecimento (exceto em ambientes com temperatura muito baixa) [10].

A maior parte das vigas de reforço do fundo, laterais e frente são fabricadas de aço com resistência de 100.000psi (689MPa), que possui boas características de conformação.

A maioria das operações mineiras requer revestimento para assegurar razoável vida útil das caçambas. A KMS – Komatsu Mining System, oferece os seguintes opcionais para instalação nas caçambas de fábrica:

² Tailgate é um dispositivo que consiste de uma tampa para a abertura traseira da caçamba, com suportes articulados nas paredes laterais, que se levanta no descarregamento, e durante o deslocamento do caminhão, fica fechado.

Chapas de desgaste: 19 mm para o fundo
9 mm para a frente e laterais
16 e 12 mm para a transição da aba para a frente
9 mm para a metade traseira da aba

Para mostrar como as modificações da caçamba podem afetar o peso vazio do Komatsu 530M, foi elaborado o seguinte resumo dos pesos (Fig. 2.11):

Caçamba Standard:	19.020 Kgf
Revestimentos da caçamba:	8.420 Kgf
Extensões laterais:	1.120 Kgf
Revestimento das extensões laterais:	310 Kgf
Proteção superior das laterais:	450 Kgf
Extensão traseira:	700 Kgf
Revestimento da extensão traseira:	290 Kgf
Total	30.310 Kgf



Figura 2.11 - Komatsu 530M com caçamba original.

2.3 Desenvolvidos feitos pela PETROBRAS

2.3.1 Primeiro Estudo

Diante da necessidade de aumentar a capacidade de carga da frota de caminhões Haulpak 120, que operam na mina de xisto da Petrobras em São Mateus do Sul, Paraná, no ano de 1998, foram iniciados estudos que conduziram a um projeto, o qual foi implementado com bons resultados no tocante ao aumento da capacidade de carga e correção da distribuição de carga entre os eixos dos caminhões (Fig. 2.12).



Figura 2.12 - Caminhão Haulpak 120 com caçamba original.

O primeiro estudo realizado em 1998, foi executado com o auxílio de fotografias, que foram usadas como referência para obtenção de um padrão do perfil da carga em várias seções ao longo da caçamba.

Foram realizados vários estudos, todos acrescentando uma extensão na parte superior das paredes laterais (sideboard) e uma extensão traseira. Tendo como base o perfil de uma carga padrão, fatias da carga foram desenhadas, calculando-se o seu

volume, e com a densidade do xisto foi obtido o peso de cada fatia e o peso total. O centro de gravidade de cada fatia combinado com o respectivo peso foi utilizado para calcular o centro de gravidade da carga como um todo. Este processo foi repetido para diferentes alturas do sideboard e comprimentos da extensão traseira, até que uma combinação adequada foi obtida, que permitiu chegar à carga e ao centro de gravidade desejados. O objetivo deste trabalho foi obter uma carga útil transportada de 100 toneladas. Este projeto foi implementado em somente um caminhão (Fig. 2.13).



Figura 2.13 - Caminhão Haulpak 120 equipado com a primeira caçamba ampliada.

2.3.2 Segundo Estudo

Após esta primeira experiência, um novo projeto foi desenvolvido com a mesma geometria, mas para reduzir o peso total das partes anexadas à caçamba, a extensão traseira foi modificada. A primeira extensão traseira havia sido construída estendendo-se as vigas laterais e de fundo da caçamba. A segunda foi construída com uma estrutura

mais leve, e com o fundo ampliado somente onde era necessário. Este projeto foi implementado em cinco caminhões (Fig. 2.14).



Figura 2.14 - Caminhão Haulpak 120 equipado com caçamba ampliada (segundo projeto).

O balanço de massa feito no processo de tratamento de minério, revelou que a carga real que estava sendo transportada era de aproximadamente 90 toneladas. Isto ocorreu porque a carga de referência, da qual foram feitas as fotografias, foi obtida a partir de uma série de pesagens feitas por um fornecedor de pneus, que trouxe resultados acima do peso real, e também devido a informações incorretas sobre o peso específico do xisto.

2.3.3 Terceiro Estudo

Em 2001, um novo estudo foi realizado, aumentando-se a altura do sideboard e da extensão traseira, obtendo-se os resultados desejados, ou seja, 100 toneladas de carga útil. Este projeto foi implementado em seis caminhões (Fig. 2.15).



Figura 2.15 - Caminhão Haulpak 120 equipado com caçamba ampliada (terceiro projeto).

Apesar dos bons resultados obtidos com estes estudos, o peso da caçamba aumentou cerca de 3000 Kgf, com os caminhões transportando em torno de 100 toneladas, e embora a distribuição de carga tenha melhorado, não se tem certeza de que esteja adequada. Espera-se que com um novo estudo e um novo projeto, se consiga redução do peso da caçamba e aumento maior da carga útil, talvez acima da carga nominal. A decisão de manter o fundo sem alterações neste novo estudo deve-se aos altos custos relacionados com um novo projeto para toda a caçamba, sendo que as alterações nas laterais e na frente podem ser feitas com custos consideravelmente menores.

2.4 Estudo da UFPR

Em 1999-2001, a PETROBRAS em parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR – Universidade Federal do Paraná, conduziu um estudo para adequar o centro de gravidade e reduzir o peso das caçambas dos caminhões Haulpak 120 [4].

Para atingir estes objetivos, o projeto foi dividido nas seguintes fases:

- a) A caçamba foi modelada utilizando um sistema de desenho auxiliado por computador (CAD) em três dimensões.
- b) Análises cinemáticas e dinâmicas com simulação computacional dos movimentos em três dimensões.
- c) Análise estrutural da caçamba no computador, para uma carga de 100 toneladas (Fig. 2.16).

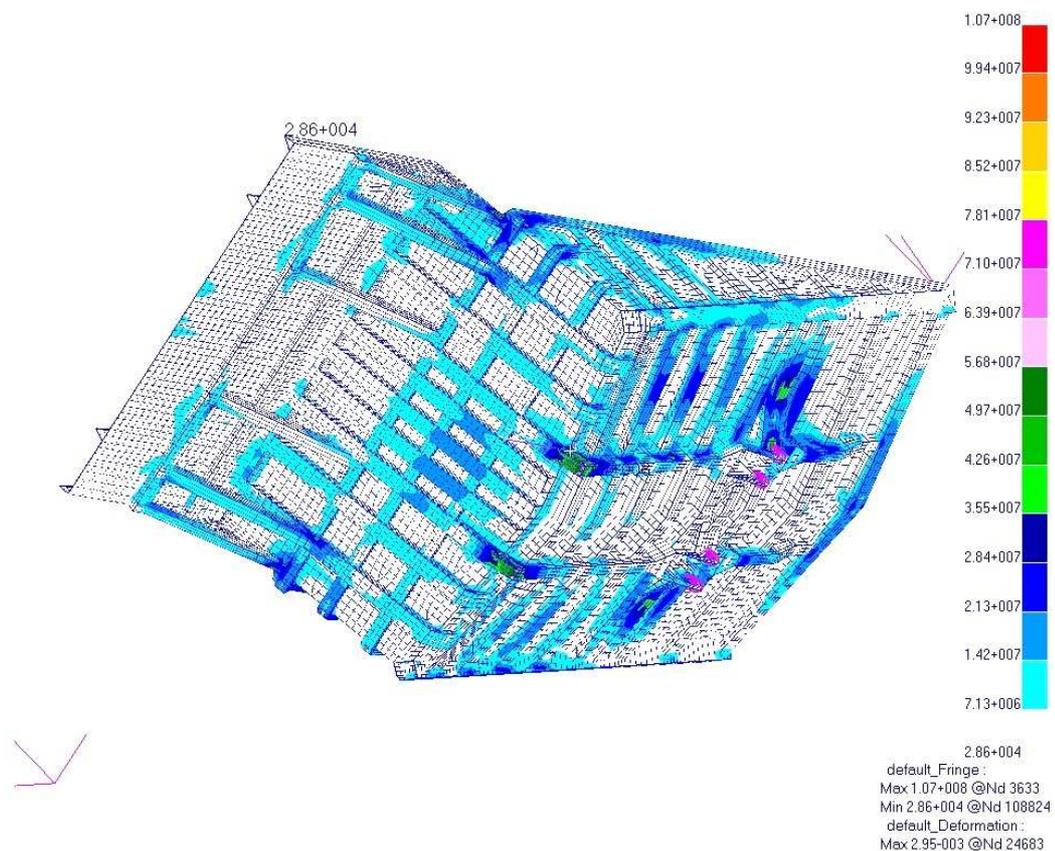


Figura 2.16 - Tensões para uma carga de 100 toneladas.

d) Análise experimental em pontos predeterminados da caçamba (Fig. 2.17 e 2.18).

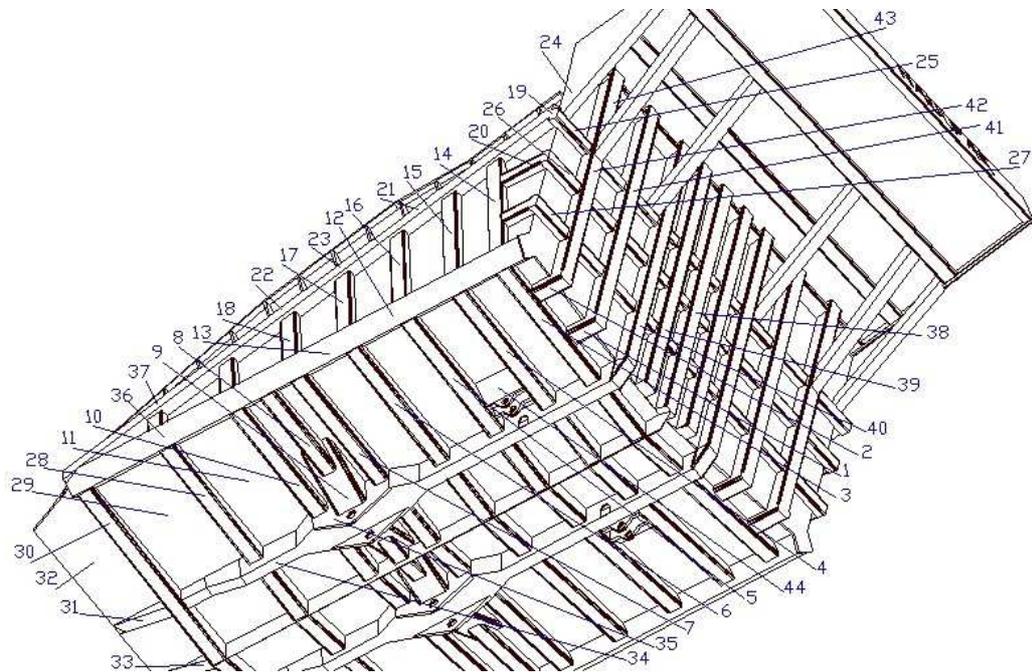


Figura 2.17 - Localização dos extensômetros.



Figura 2.18- Extensômetros instalados na parede lateral com os dispositivos de proteção.

- e) Simulação computacional de modo a encontrar alternativas para o aumento da capacidade, análise do centro de gravidade e redução de peso.
- f) Elaboração e produção de desenhos com as modificações na caçamba.

As conclusões e sugestões resultantes deste estudo são:

- a) A diferença entre o peso da caçamba vazia, que de acordo com a Petrobras/SIX é de 30.530 Kg, e o peso do modelo computacional deve-se à ausência de proteção lateral sobre os pneus e proteção para o motorista sobre a cabine, às soldas, e à alguns elementos internos nas vigas, que não foram considerados no modelo computacional. Foi corrigido o peso para fins de simulação computacional, através da densidade do aço.
- b) O peso devido às alterações implementadas pela PETROBRAS, era de 1.712,21 kg, sem considerar o peso das soldas.
- c) A carga padrão segundo a PETROBRAS é de 68.000 Kg na caçamba original, que representa um volume aproximado de 49,74 m³. Deste número foi derivada uma densidade para o xisto que é igual a 1.367,11 kg/ m³.
- d) A distribuição de peso nos eixos do caminhão, com a caçamba original, é de aproximadamente 650.000N e 880.000N na frente e na traseira respectivamente, o que não atende os requisitos de ótima distribuição de peso.
- e) Na simulação cinemática-dinâmica, foi considerado um peso da caçamba de 33.230 Kg, consistente com o peso da caçamba vazia e com o peso das modificações.
- f) O perfil da carga de xisto na caçamba proposta corresponde a um volume de 68,0935 m³, com um peso de 93.091,31 Kg, para uma densidade de 1.367,11 Kg/m³.
- g) A distribuição de peso no caminhão carregado é de aproximadamente 550.000 N e 1.165.000 N, nos eixos frontal e traseiro respectivamente, próximo da distribuição de pesos ótima.

- h) A força de levantamento no cilindro hidráulico mostrou um valor maior na caçamba original, o que pode estar relacionado com uma distribuição errada de carga.
- i) A força máxima no sistema de articulação teve um incremento de 500.000 N na caçamba original para 800.000 N na caçamba proposta. Este fato necessita análise adicional.
- j) Os valores máximos para as deformações e tensões de Von Mises ocorrem nas vigas ao invés de nas chapas.
- k) Considerando os resultados, algumas vigas verticais poderiam ser removidas na frente da caçamba, entretanto suas funções podem ser mais bem definidas nas desacelerações, mas a redução de peso seria pequena e insuficiente para justificar uma importante alteração da estrutura original da caçamba.
- l) Comparando os valores entre a simulação computacional e a resistência das vigas, pode ser inferido o uso de um fator de segurança próximo de cinco ou mais, para suportar um aumento da carga devido às cargas dinâmicas na unidade caminhão-caçamba.
- m) Podem ser observadas pequenas variações quantitativas nas deformações experimentais, nas diferentes análises realizadas. Deve ser observado que as análises foram orientadas para validar o modelo computacional.
- n) Existem restrições geométricas para se atingir a carga de 108,86 ton de capacidade da caçamba original, essencialmente devido ao ângulo de repouso igual a 30°, combinado com a distância máxima da extremidade da extensão traseira ao chão, durante as operações de descarregamento, limitada a 0,90 m.
- o) Com estas limitações, somente um volume computacional de 68,0935 m³ foi obtido, correspondendo a 93,09 ton.

Baseado neste estudo, foi proposta uma configuração para alterações na caçamba, semelhante à feita pela PETROBRAS, mas com menos elementos padronizados, conforme Figura 2.19.

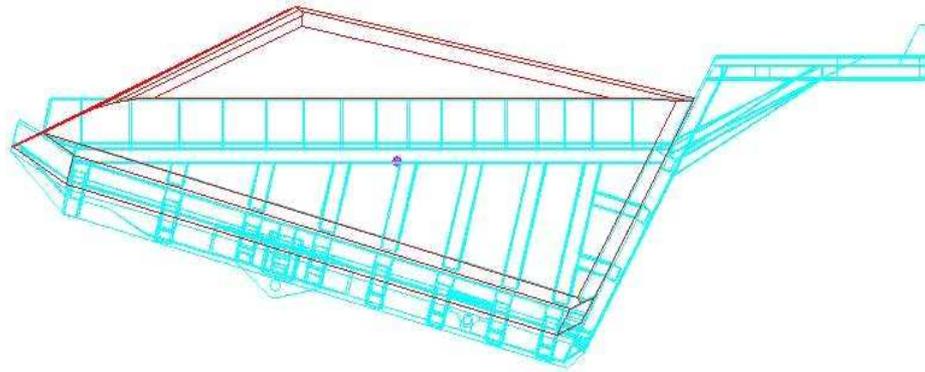


Figura 2.19 - Caçamba proposta pelo estudo da UFPR.

2.5 Capacidade Nominal de uma Caçamba – O Problema da Determinação

De acordo com a SAE Standard J1363 [13], o volume raso (*struck volume*) de uma caçamba deve ser calculado da seguinte forma:

- . A caçamba deve ser posicionada como se estivesse totalmente abaixada com o equipamento numa superfície horizontal, com todos os pneus no seu raio estático carregado.
- . O volume raso deve ser o volume compreendido pelas superfícies interiores do fundo, da frente e das laterais, e o plano superior que passa pelas linhas médias das laterais da caçamba. Linhas médias são linhas horizontais acima das quais, numa vista lateral da caçamba, existe uma área na caçamba igual à área fora da caçamba abaixo destas linhas. Para caçambas com uma extremidade ou lateral aberta, o volume deve ser limitado por um plano que passa através da aresta externa da abertura e os cantos superiores das paredes adjacentes, ou a uma inclinação de 1:1, estendendo-se para o interior e para cima, partindo da aresta externa da abertura, o que resultar na menor capacidade.
- . A capacidade coroada (*heaped capacity*), deve ser a soma do volume raso, e o volume acima deste compreendido entre quatro planos, com uma inclinação de dois na horizontal por um na vertical (2:1), estendendo-se para o interior e para cima, partindo das linhas médias das laterais e ou extensões para contenção da carga. Para caçambas com abertura

traseira ou lateral, a inclinação de 2:1, para a capacidade coroada deve iniciar do topo da inclinação 1:1, que determina o volume raso.

O problema com as normas SAE e ISO, utilizadas pelos fabricantes para estabelecer a capacidade das caçambas dos caminhões, é que elas superestimam o volume em até 15% [22].

O que as normas SAE e ISO definem, é que o volume raso, ou seja, o material no interior da caçamba, deve ser calculado com uma inclinação de 1:1, e a capacidade coroada, o material acima dos lados, deve ser calculado com uma inclinação de 2:1. Estas normas não consideram que diferentes materiais têm diferentes características e, portanto, irão se empilhar de maneira diferente. Não consideram também o método de carga. Material carregado por cima irá formar vazios nos cantos da caçamba (Fig. 2.20).



Figura 2.20 - Diferença entre a carga real e a carga calculada pela norma SAE Standard J1363.

As normas são utilizadas para desenvolver caçambas cujos detalhes estão listados nas planilhas de especificações que um gerente de mina irá ler quando considerar a aquisição de caminhões. Isto tem três conseqüências: primeiro, o gerente da mina provavelmente descobrirá que o caminhão transporta menos que o esperado; segundo,

qualquer combinação de caminhão-escavadeira *shovel* para a capacidade teórica, terá que ser reconsiderada, pois pode levar a uma substancial queda de material da caçamba, devido ao carregamento excessivo; e, terceiro, a distribuição de peso no chassi do caminhão ficará fora de posição, pois o centro de gravidade foi calculado considerando uma carga que na realidade ele não irá transportar. Obviamente, isto sobrecarrega o caminhão, seus componentes e pneus, e aumenta a manutenção, reduzindo a vida útil.

Seria necessário mover a caçamba para atrás, de modo a colocar o centro de gravidade na posição correta, considerando um carregamento teórico com empilhamento conforme a SAE, e é o que freqüentemente as pessoas fazem. É por isso que com freqüência são instaladas comportas traseiras (*tailgates*) para balancear a carga. Esta é uma das razões pelas quais os *tailgates* têm sido tão efetivos. Outra alternativa mais radical, consiste na desmontagem da caçamba, remodelagem das laterais, da frente e da aba, reposicionamento das laterais, e soldar novamente.

Para grandes caminhões também é necessário projetar a caçamba mais larga, para que durante o carregamento feito por uma escavadeira *shovel*, a caçamba desta possa se abrir e descarregar próxima ao fundo, resultando em menor choque para o veículo e para o operador, e fazendo com que o carregamento seja mais simples e rápido. Em se tratando do trecho em que o caminhão trafega carregado, se a carga pode ser transportada tão próxima do solo quanto possível, o momento gerado pela carga devido às irregularidades da pista será reduzido, ficando a operação mais estável e segura, reduzindo também as oscilações do habitáculo do operador.

2.6 Coleta de Dados

Para obter os dados necessários para desenvolver o presente estudo, diversas medições de campo e outras avaliações foram realizadas. Abaixo segue um resumo destes trabalhos:

- Uma série de fotografias foi feita, de um caminhão com caçamba com capacidade estimada de 100 ton, carregado com uma carga normal de xisto (Fig 2.21). Estas

fotografias foram utilizadas para obter graficamente os ângulos médios de repouso da carga em diferentes partes da caçamba do caminhão. Os valores obtidos foram os seguintes:

Ângulo de repouso na traseira = 25°
Ângulo de repouso nas laterais = 25°
Ângulo de repouso na frente = 20°



Figura 2.21 - Vistas diversas do caminhão com capacidade de 100 ton com carga normal

- Para confirmar estes ângulos, uma série de medições utilizando um medidor de ângulos foi realizada. Após estas medições, foram feitos ajustes nos ângulos obtidos pelas fotografias, passando a ser adotado neste trabalho os seguintes ângulos:

Ângulo de repouso na traseira = 26°

Ângulo de repouso nas laterais = 26°

Ângulo de repouso na frente = 18°

- O tempo de frenagem para um caminhão carregado com uma carga estimada de 100 ton, foi medido a partir da velocidade máxima permitida na mina da PETROBRAS, que é de 40 Km/h (11,111m/s), numa rampa em descida com inclinação de 5° (8,7%). Esta rampa foi escolhida porque constitui um trecho de pista onde os caminhões atingem a velocidade máxima, e é segura para realizar um teste de frenagem total. Existem outras descidas nesta mina, até mais inclinadas, mas estão em locais onde a velocidade normal de trajeto é menor. O tempo de frenagem medido nestas condições foi de 9,25s, representando uma desaceleração de $1,201\text{m/s}^2$.
- A velocidade máxima do caminhão em uma curva fechada foi medida, obtendo-se 15Km/h (4,1667m/s) para uma curva de raio 38m.
- Foi medido o ângulo de atrito entre o xisto e as placas de aço que revestem o fundo da caçamba. Para conduzir este experimento, a caçamba foi carregada somente com uma pequena quantidade de xisto, elevando-a gradualmente até o início do deslizamento. Neste ponto foi parado o movimento de basculamento, fazendo-se a medição (Fig. 2.22). O valor medido em campo foi de 21° , o qual foi confirmado por medição gráfica, feita após impressão das fotografias. Para efeito de cálculo das cargas na parede frontal da caçamba, será considerado que o ângulo de atrito entre o xisto e a parede frontal possui este mesmo valor de 21° .



Figura 2.22 - Medição do ângulo de atrito entre o xisto e o fundo da caçamba.

- O ângulo de repouso do xisto desmontado (após detonação) foi medido, fazendo-se uma pilha com escavadeira (Fig. 2.23). Foram feitas 4 medições em posições diferentes, sendo o valor médio obtido de 28° . Como o xisto bruto é um material não coesivo, este ângulo será considerado também como sendo o ângulo de atrito interno.



Figura 2.23 - Medição do ângulo de repouso do xisto desmontado.

Abordagem (Antecedentes)

- A espessura e a dureza de diversos elementos (partes) da caçamba original foram medidos, com o objetivo de se determinar a espessura e a resistência do material das chapas e das vigas que a compõem. O limite de resistência a tração foi obtido utilizando-se tabelas da norma ASTM A 370, e a resistência ao escoamento foi considerada como sendo de 70% do limite de resistência a tração. Segue na Tabela 2.1 resumo das medições e dados obtidos:

Tabela 2.1 – Espessuras, durezas e limites de ruptura e escoamento da caçamba original.

Local	Espessura (mm)	Dureza, (HB)		Tensão, (MPa)	
		Medição	Média	Ruptura	Escoamento
Chapa lateral externa	7,0	233	237	790	553
Chapa frontal externa	11,3	217			
Chapa do fundo externa	11,5	260			
Proteção lateral superior	9,7	226	226	760	532
Chapa frontal interna	12,2	262	262	880	616
Chapa lateral interna	12,3; 15,5	356; 346	364	1220	854
Chapa interna união lateral/fundo	14,4	390			
Viga lateral externa	6,4	186	188	620	434
Viga frontal externa horizontal	8,2	212			
Viga frontal externa vertical	8,2	183			
Viga do fundo transversal	9,6	182			
Viga de apoio no chassi (lateral)	8,7	178			
Viga de apoio no chassi (inferior)	12,4	185			

Capítulo 3

Otimização do Volume e do Centro de Gravidade

3.1 Características do Caminhão Haulpak 120

O caminhão Haulpak 120 (Fig. 3.2) é um caminhão tipo fora-de-estrada, fabricado pela Wabco-Construction and Equipment, em Peoria, Illinois, USA [19]. Abaixo estão listadas suas principais características:

- Potência: 1050 a 1200 HP.
- Transmissão: Elétrica, utilizando gerador e rodas motorizadas GE.
- Pneus: 30.00-51, tipo convencional ou radial, sem câmara.
- Chassi: Fabricado de aço liga com vigas em forma de caixão.
- Caçamba: As chapas do fundo são fabricadas com aço de 150.000psi (1.034MPa) de resistência e as laterais e a frente em aço com 100.000psi (689MPa) de resistência.
- Suspensão: Hidro-pneumática.
- Freios: Possui três sistemas, sendo o primeiro o de retardo elétrico dinâmico, o segundo a tambor, e o terceiro o de emergência.
- Sistema hidráulico: Para elevação da caçamba e direção.

- Sistema de ar-comprimado: Para acionamento dos freios a tambor e partida do motor.

- Peso vazio (média de oito medições feitas pela Goodyear em 2000, Fig. 3.1):

Eixo dianteiro = 43.882 Kgf

Eixo traseiro = 50.857 Kgf



Figura 3.1 – Pesagem de caminhão Haulpak 120.

- Dimensões: Altura = 5,79 m
Largura = 6,27 m
Comprimento = 11,38 m



Figura 3.2– Caminhão Haulpak 120.

3.2 Densidade do Xisto

O peso específico do xisto na bancada (*in situ*) é de aproximadamente 2.100 Kg/m^3 . Estimava-se que o peso específico do xisto após o desmonte (empolado) e, por conseguinte, dentro da caçamba dos caminhões, seria de aproximadamente 1.600 Kg/m^3 .

Porém, a capacidade estimada das caçambas, e o balanço de massa feito no processo de tratamento do minério, não confirmavam este dado. Para se ter uma medida mais precisa desta característica, foi carregado um caminhão com capacidade estimada de 100 toneladas (Fig. 3.3), sendo basculada a carga num pátio próximo ao britador, e posteriormente carregada em caminhões caçamba tipo convencional, fazendo-se a pesagem destes em uma balança certificada pelo INMETRO. O resultado desta pesagem foi de 103.730 Kg .



Figura 3.3 - Haulpak 120 carregado com a carga utilizada para avaliação da densidade do xisto.

Para o cálculo do volume foi utilizada equação semelhante à desenvolvida na seção 3.4, porém específica para a largura interna (5.510mm) e comprimento (6.982mm) da caçamba utilizada. O volume assim calculado foi de $70,85\text{m}^3$, resultando num peso específico para o xisto na caçamba (empolado) de 1.464 Kg/m^3 .

Este é o valor de peso específico utilizado neste trabalho, e representa um valor intermediário entre o calculado no trabalho da UFPR, cujo resultado foi de 1.367,11 Kgf/m³, e o adotado pela Petrobras, que é de 1.600 Kgf/m³.

3.3 Geometria da Caçamba

A caçamba do caminhão Haulpak 120 é uma típica caçamba de caminhão fora-de-estrada desenvolvida na década de setenta. Foi construída com chapas de aço com 150.000psi (1.034MPa) de resistência no fundo e 100.000psi (689MPa) de resistência para as paredes laterais e frontal. Possui um ângulo de 60° da parede frontal com a horizontal e um ângulo de 15° do fundo com a horizontal, sendo que as paredes laterais são verticais (Figuras. 3.4 e 3.5).

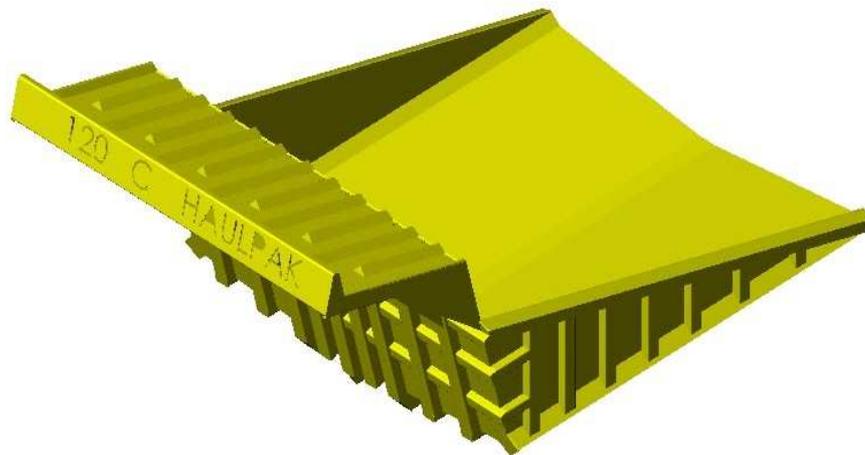


Figura 3.4 - Vista isométrica superior da caçamba original.



Figura 3.5 - Vista isométrica inferior da caçamba original.

3.4 Definição das Equações

Para se obter as equações para o volume da caçamba proposta, e a posição do centro de gravidade, foram definidas três variáveis que são:

- C: Altura da parede frontal em relação ao ponto de encontro do fundo com esta;
- H: Altura das paredes laterais da caçamba em relação ao ponto de encontro do fundo com a parede frontal;
- L: Comprimento do fundo medido paralelamente a este.

A Figura 3.6 mostra um croqui lateral da caçamba com as três variáveis definidas.

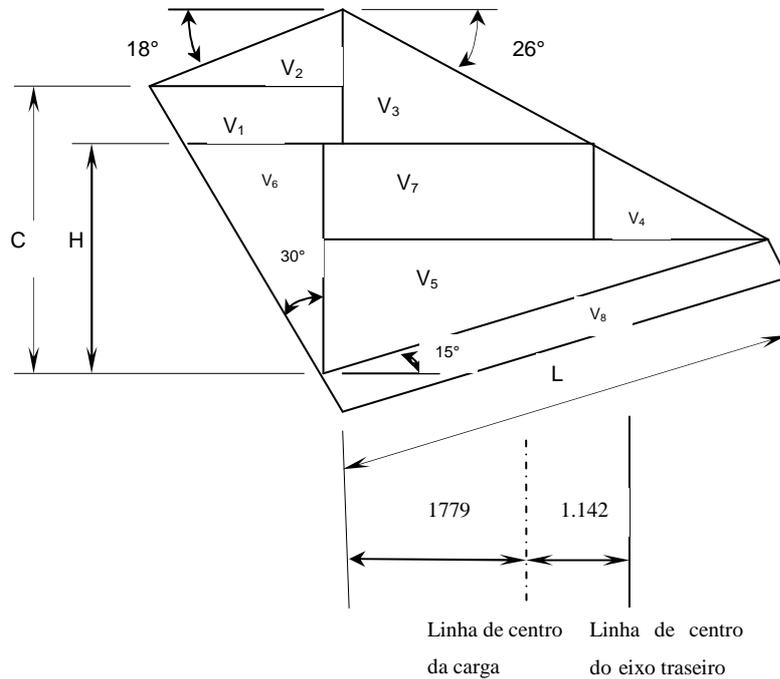


Figura 3.6 - Variáveis existentes nas equações para o Volume e C.G. da caçamba.

Para se estabelecer a relação entre estas variáveis, o volume, e o centro de gravidade, desmembrou-se o volume total em sólidos geométricos, tomando como referência os sólidos propostos pela norma SAE J1363 (Capacity Rating – Dumper Body and Trailer Body), e adaptando-os segundo particularidades da carga de xisto. Foi adotada uma largura de 5.710mm para a nova caçamba, ou seja, 200mm maior que a largura da caçamba original. Esta largura maior não representa dificuldades quando da execução das alterações na caçamba, e também não irá dificultar a manobra de descarga no britador, onde o operador posiciona a caçamba entre as colunas da estrutura para realizar o basculamento, e proporcionará um centro de gravidade mais baixo.

A Figura 3.7 mostra uma perspectiva da caçamba com os sólidos definidos para compor a carga.

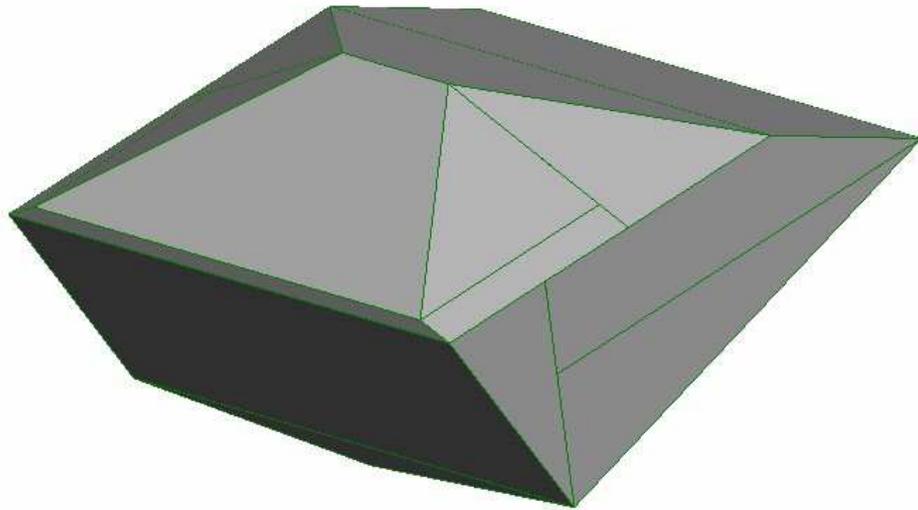


Figura 3.7 - Perspectiva com os sólidos geométricos que compõem a carga de xisto.

Apresenta-se a seguir, um detalhamento de cada sólido geométrico e as equações que definem o respectivo volume e centro de gravidade:

V_1 :

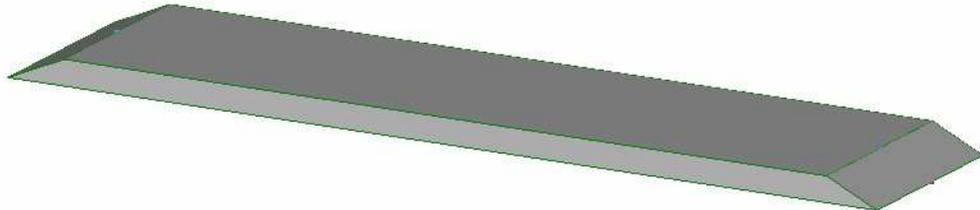


Figura 3.8 – Volume V_1 .

Para a determinação deste e de outros volumes foi definida a variável h , que representa a altura do volume V_3 , e também é igual à soma das alturas dos volumes V_1 e V_2 . Das relações geométricas entre os volumes e as variáveis definidas, obtém-se:

$$h = \left[\left(H \cdot \tan 30^\circ + L \cdot \cos 15^\circ - \frac{(H - L \cdot \sin 15^\circ)}{\tan 26^\circ} \right) \cdot (\tan 18^\circ \cdot \tan 26^\circ) + \tan 26^\circ \cdot (C - H) \right] \cdot \frac{1}{\tan 18^\circ + \tan 26^\circ} \quad (3.1)$$

$$V_1 = (Base\ maior + Base\ menor) * Altura * Largura / 2 \quad (3.2)$$

$$V_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(11420 - \frac{2 \cdot (C - H)}{\operatorname{tg} 26^\circ} \right) \cdot (C - H) \cdot \left(\frac{h - C + H}{\operatorname{tg} 18^\circ} \right) \quad (3.3)$$

$$CG_1 = H \cdot \operatorname{tg} 30^\circ + 1779 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h - C + H}{\operatorname{tg} 18^\circ} \right) \quad (3.4)$$

V_2 :

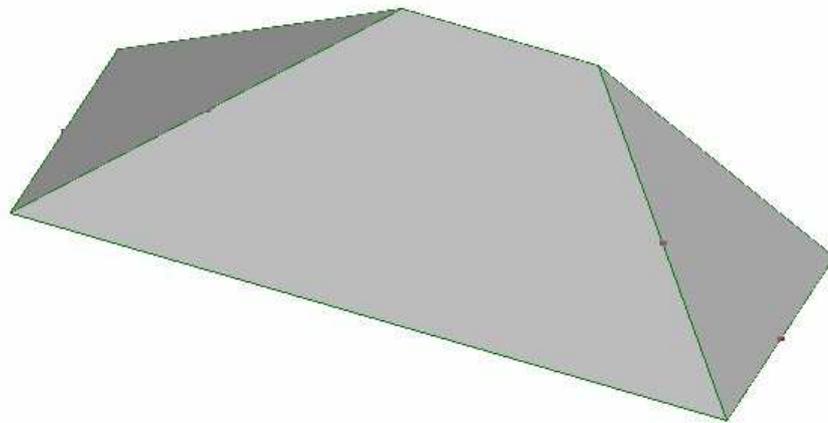
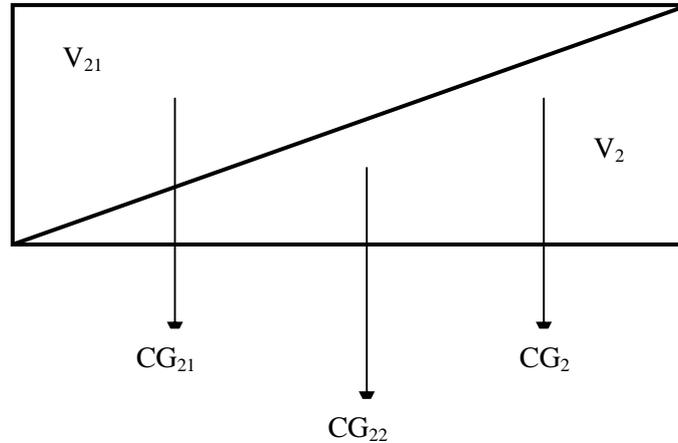


Figura 3.9 – Volume V_2 .

$$V_2 = ((\text{Base maior} + \text{Base menor}) / 2) * \text{Altura} * \text{Largura} * 2 / 3 \quad (3.5)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot \left(11420 - \frac{2 \cdot (h + C - H)}{\operatorname{tg} 26^\circ} \right) \cdot \frac{(h - C + H)^2}{\operatorname{tg} 18^\circ} \quad (3.6)$$

Por tratar-se de um sólido geométrico não usual, para a determinação do centro de gravidade do volume V_2 , foi imaginado um volume em forma de paralelepípedo, com comprimento, largura e altura iguais às do volume V_2 . O volume foi chamado de V_{22} , e a diferença entre o volume V_{22} e V_2 foi chamada de V_{21} .



$$CG_{22} = \frac{CG_2 \cdot V_2 + CG_{21} \cdot V_{21}}{V_{22}} \quad (3.7)$$

$$V_2 + V_{21} = V_{22} \quad (3.8)$$

$$CG_2 = \frac{CG_{22} \cdot (V_2 + V_{21}) - CG_{21} \cdot V_{21}}{V_2} \quad (3.9)$$

$$V_{22} = 3 \cdot V_{21} = \frac{3}{2} \cdot V_2 \Rightarrow V_2 = 2 \cdot V_{21} \quad (3.10)$$

$$CG_2 = \frac{CG_{22} \cdot 3 \cdot V_{21} - CG_{21} \cdot V_{21}}{2 \cdot V_{21}} = \frac{3}{2} \cdot CG_{22} - \frac{1}{2} \cdot CG_{21} \quad (3.11)$$

$$CG_{21} = H \cdot \text{tg}30^\circ + 1779 - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{h - C + H}{\text{tg}18^\circ} \right) \quad (3.12)$$

$$CG_{22} = H \cdot \text{tg}30^\circ + 1779 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h - C + H}{\text{tg}18^\circ} \right) \quad (3.13)$$

$$CG_2 = \frac{3}{2} \cdot \left[H \cdot \text{tg}30^\circ + 1779 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h - C + H}{\text{tg}18^\circ} \right) \right] - \frac{1}{2} \cdot \left[H \cdot \text{tg}30^\circ + 1779 - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{h - C + H}{\text{tg}18^\circ} \right) \right] \quad (3.14)$$

V_3 :

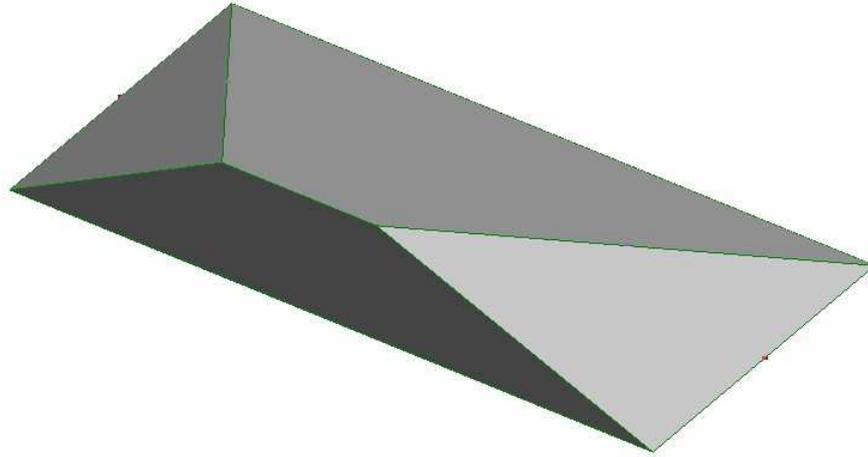
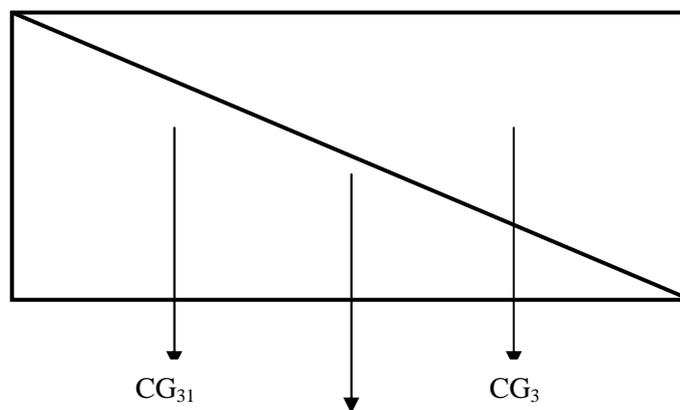


Figura 3.10 – Volume V_3

$$V_3 = ((\text{Base maior} + \text{Base menor}) / 2) * \text{Altura} * \text{Largura} * 2 / 3 \quad (3.15)$$

$$V_3 = \frac{1}{3} \cdot \left(11420 - \frac{2 \cdot h}{\text{tg} 26^\circ} \right) \cdot \frac{h^2}{\text{tg} 26^\circ} \quad (3.16)$$

Da mesma forma que para o volume V_2 , para a determinação do centro de gravidade do volume V_3 , foi imaginado um volume em forma de paralelepípedo, com comprimento, largura e altura iguais às do volume V_3 . O volume foi chamado de V_{32} , e a diferença entre o volume V_{32} e V_3 foi chamada de V_{31} .



CG_{32}

$$CG_{32} = \frac{CG_3 \cdot V_3 + CG_{31} \cdot V_{31}}{V_3 + V_{31}} \quad (3.17)$$

$$V_3 + V_{31} = V_{32} \quad (3.18)$$

$$V_{32} = 3 \cdot V_{31} = \frac{3}{2} \cdot V_3 \Rightarrow V_3 = 2 \cdot V_{31} \quad (3.19)$$

$$CG_3 = \frac{CG_{32} \cdot 3 \cdot V_{31} - CG_{31} \cdot V_{31}}{2 \cdot V_{31}} = \frac{3}{2} \cdot CG_{32} - \frac{1}{2} \cdot CG_{31} \quad (3.20)$$

$$CG_{32} = 1779 - L \cdot \cos 15^\circ + \left(\frac{H - L \cdot \text{sen} 15^\circ}{\text{tg} 26^\circ} \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{\text{tg} 26^\circ} \quad (3.21)$$

$$CG_{31} = 1779 - L \cdot \cos 15^\circ + \left(\frac{H - L \cdot \text{sen} 15^\circ}{\text{tg} 26^\circ} \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{h}{\text{tg} 26^\circ} \quad (3.22)$$

$$CG_3 = \frac{3}{2} \cdot \left[1779 - L \cdot \cos 15^\circ + \frac{(H - L \cdot \cos 15^\circ)}{\text{tg} 26^\circ} + \frac{h}{4 \cdot \text{tg} 26^\circ} \right] - \frac{1}{2} \cdot \left[1779 - L \cdot \cos 15^\circ + \frac{(H - L \cdot \text{sen} 15^\circ)}{\text{tg} 26^\circ} + \frac{h}{4 \cdot \text{tg} 26^\circ} \right] \quad (3.23)$$

V_Δ :

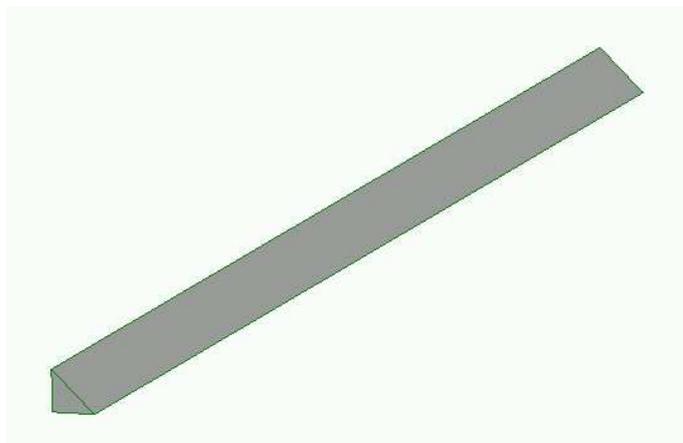


Figura 3.11 - Volume V_Δ

Este volume representa um espaço vazio existente junto às laterais do fundo da caçamba, no qual está instalada uma chapa em toda a extensão posicionada a 45°, e que reduz o volume útil da caçamba. Na equação do volume total, este volume será multiplicado por dois e subtraído.

$$V_{\Delta} = Base * Altura * Largura / 2 \tag{3.24}$$

$$V_{\Delta} = 57800 \cdot \text{sen}^2 45^{\circ} \cdot L \tag{3.25}$$

$$CG_{\Delta} = 1779 - \frac{1}{2} \cdot L \cdot \cos 15^{\circ} \tag{3.26}$$

V₄:

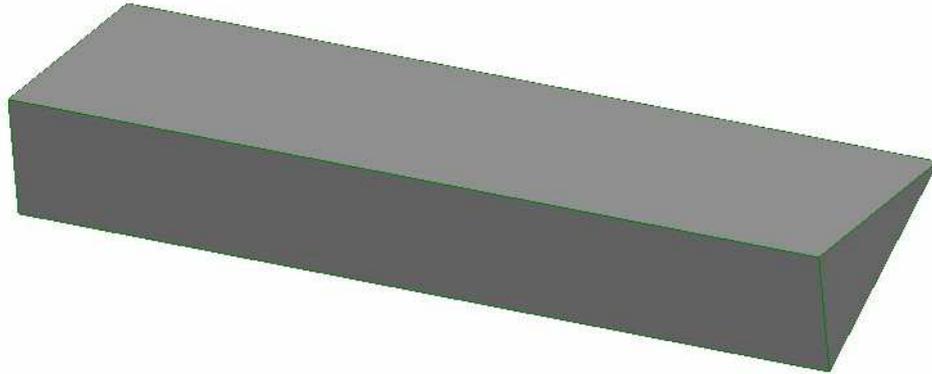


Figura 3.12 – Volume V₄

$$V_4 = Base * Altura * Largura / 2 \tag{3.27}$$

$$V_4 = \frac{1}{2} \cdot 5710 \cdot \frac{(H - L \cdot \text{sen} 15^{\circ})^2}{\text{tg} 26^{\circ}} \tag{3.28}$$

$$CG_4 = 1779 - \left(L \cdot \cos 15^{\circ} - \frac{(H - L \cdot \text{sen} 15^{\circ})}{\text{tg} 26^{\circ}} \right) - \frac{1}{3} \cdot \frac{(H - L \cdot \text{sen} 15^{\circ})}{\text{tg} 26^{\circ}} \tag{3.29}$$

V_5 :

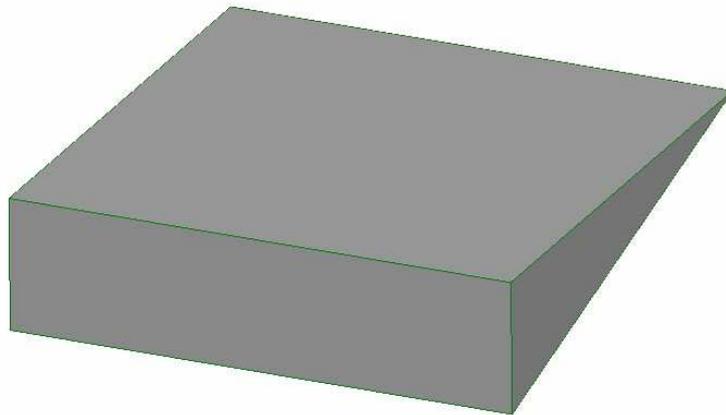


Figura 3.13 – Volume V_5

$$V_5 = Base * Altura * Largura / 2 \tag{3.30}$$

$$V_5 = 2855 \cdot L \cdot \text{sen}15^\circ \cdot L \cdot \text{cos}15^\circ \tag{3.31}$$

$$CG_5 = 1779 - \frac{1}{3} \cdot L \cdot \text{cos}15^\circ \tag{3.32}$$

V_6 :

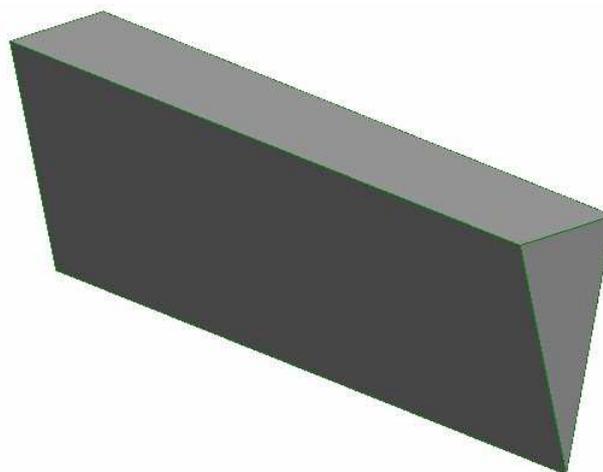


Figura 3.14 – Volume V_6

$$V_6 = \text{Base} \cdot \text{Altura} \cdot \text{Largura} / 2 \quad (3.33)$$

$$V_6 = 2855 \cdot H \cdot \text{tg}30^\circ \cdot H \quad (3.34)$$

$$CG_6 = 1779 + \frac{1}{3} \cdot H \cdot \text{tg}30^\circ \quad (3.35)$$

V_7 :

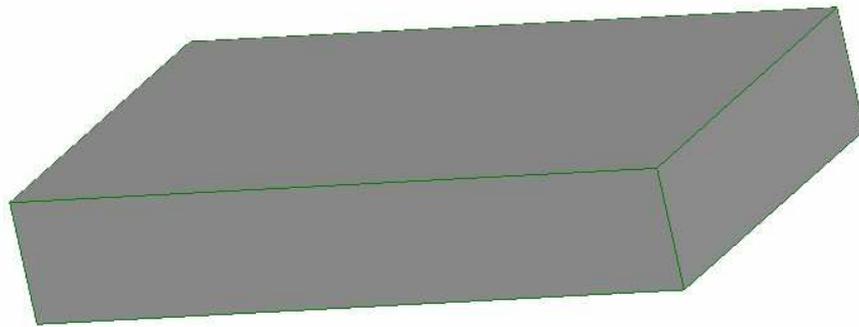


Figura 3.15 – Volume V_7

$$V_7 = \text{Base} \cdot \text{Altura} \cdot \text{Largura} \quad (3.36)$$

$$V_7 = 5710 \cdot (H - L \cdot \text{sen}15^\circ) \cdot \left(L \cdot \text{cos}15^\circ - \frac{(H - L \cdot \text{sen}15^\circ)}{\text{tg}26^\circ} \right) \quad (3.37)$$

$$CG_7 = 1779 - \frac{1}{2} \cdot \left(L \cdot \text{cos}15^\circ - \frac{(H - L \cdot \text{sen}15^\circ)}{\text{tg}26^\circ} \right) \quad (3.38)$$

V_8 :

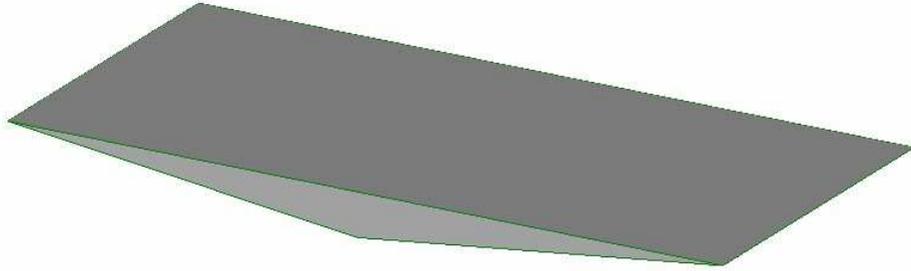


Figura 3.16 – Volume V_8

$$V_8 = Base * Altura * Largura / 2 \quad (3.39)$$

$$V_8 = 2855^2 \cdot tg6,90^\circ \cdot L \quad (3.40)$$

$$CG_8 = 1779 - \frac{1}{2} \cdot L \cdot \cos 15^\circ \quad (3.41)$$

V_F :

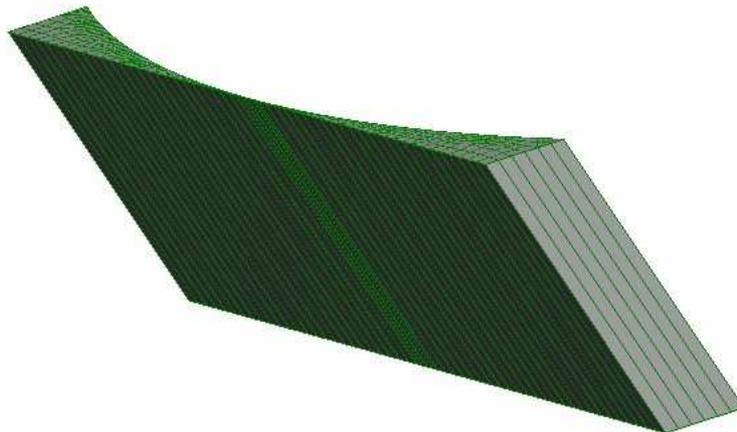


Figura 3.17 – Volume V_F

O Volume frontal V_F , é um volume correspondente ao espaço vazio que fica à frente da parede frontal da caçamba, devido à curvatura desta. Será subtraído do volume total.

Obs.: A opção pela utilização de uma parede frontal em forma de membrana(curva) foi feita em função da escolha do perfil mais adequado, conforme explicitado no capítulo 4.

$$V_F = \text{Área da base} \cdot \text{Altura} \quad (3.42)$$

$$V_F = 1.636.034 \cdot H \quad (3.43)$$

$$CG_F = (H \cdot \text{tg}30^\circ / 2) + 1.594,23 \quad (3.44)$$

Definidos os volumes acima, para obter-se o volume total da caçamba, soma-se os volumes V_1 a V_8 e subtraí-se os volumes V_Δ e V_F . Assim, a equação que define o volume total da caçamba é:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 - 2 \cdot V_\Delta - V_F \quad (3.45)$$

Para a obtenção da equação que define o centro de gravidade, é feita a média ponderada do produto dos volumes pelo centro de gravidade de cada sólido geométrico que compõem a carga, obtendo:

$$CG_T = \frac{\left(V_1 \cdot CG_1 + V_2 \cdot CG_2 + V_3 \cdot CG_3 + V_4 \cdot CG_4 + V_5 \cdot CG_5 + \dots \right)}{V_T} \quad (3.46)$$

3.5 Otimização

Definidas as equações para o volume total da carga e para o centro de gravidade, é necessário fazer a otimização destas duas grandezas, o que significa:

- Posicionar o centro de gravidade da carga, de modo que, combinado com o centro de gravidade da caçamba mais o centro de gravidade do caminhão, haja uma distribuição de $2/3$ do peso total no eixo traseiro e $1/3$ no eixo dianteiro. Esta distribuição é necessária para que cada pneu absorva $1/6$ do peso total do conjunto caminhão + carga;
- Obter o valor máximo para a carga líquida a ser transportada, sem ultrapassar o peso máximo do conjunto caminhão + carga.

A média da pesagem de oito caminhões vazios, feita em novembro de 2.000 pela Goodyear, foi de 94.739Kgf, sendo 43.882Kgf no eixo dianteiro e 50.857Kgf no eixo traseiro.

Assumindo que com a utilização de chapas de aço de alta resistência e um novo *design* para as paredes laterais e frontal da caçamba, haverá uma redução de peso que permitirá transportar uma carga de 110 ton, acima da carga nominal de 108,864 ton, ou seja, o peso do conjunto caminhão + caçamba será reduzido para 93.603Kgf, e assumindo também que a posição do centro de gravidade do conjunto caminhão + caçamba permanecerá inalterada, ocorrerá a seguinte combinação para os centros de gravidade e distribuição de cargas entre os eixos (Fig. 3.18):

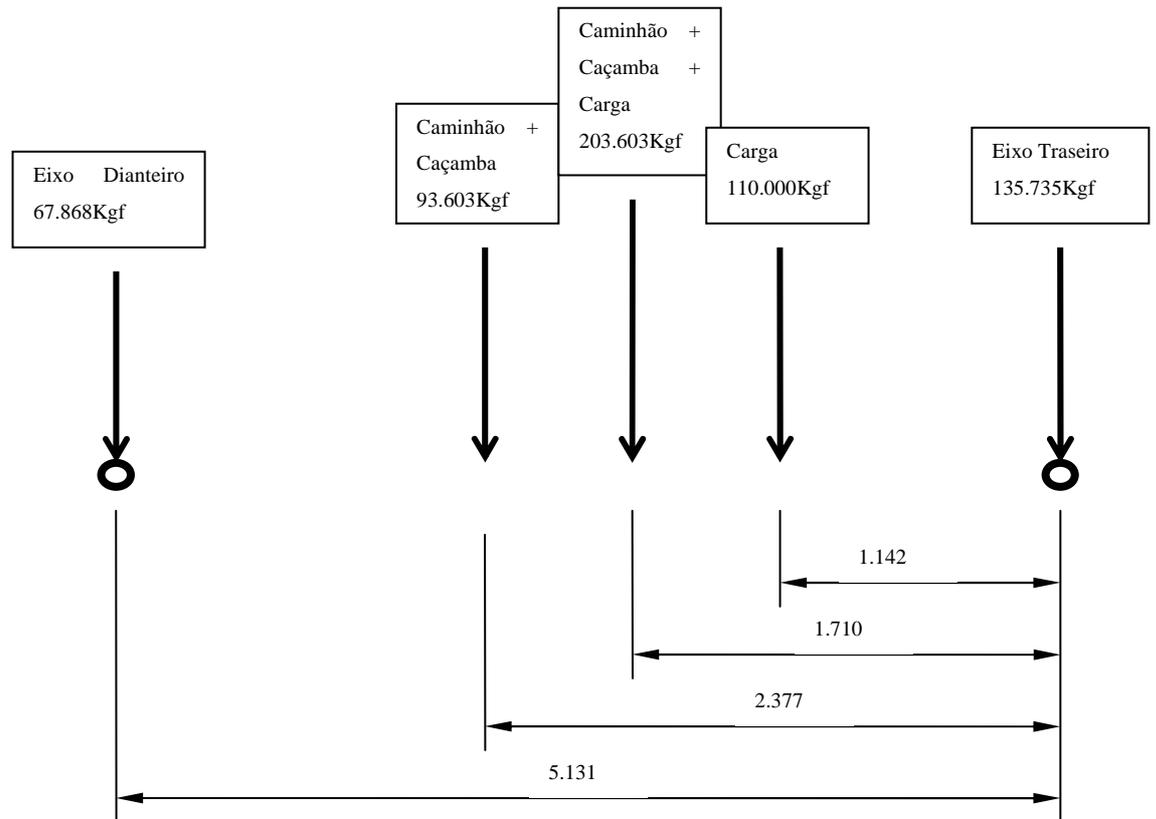


Figura 3.18 – Distribuição de cargas e posição do centro de gravidade em relação aos eixos do caminhão.

3.5.1 Definição do Problema

As grandezas envolvidas no processo de otimização, conforme Figura 3.6 são:

- C: Altura da parede frontal em relação ao ponto de encontro do fundo com esta;
- H: Altura das paredes laterais da caçamba em relação ao ponto de encontro do fundo com a parede frontal;
- L: Comprimento do fundo medido paralelamente a este;
- V: Volume total da carga de xisto;
- CG: Centro de gravidade da carga de xisto.

O volume total da carga de xisto (V_T), é uma função não linear de C, H e L, assim como o centro de gravidade total da carga (CG_T). Os valores limites para as grandezas C, H e L, foram assim definidos:

C: O valor de C na caçamba original é de 2.504m. Para estabelecer o valor limite, foi medida a distância entre a aba da caçamba e o teto da entrada da oficina, obtendo-se o valor aproximado de 800mm. É necessário descontar 300mm de folga operacional e 200mm do acabamento frontal da aba. Portanto podem ser acrescentados à medida original 300mm, ficando o valor máximo de C em 2.804mm.

H: O valor máximo de H foi estabelecido em função de duas exigências, as quais são: primeiro a altura máxima das paredes laterais da caçamba que permita o carregamento por parte das escavadeiras *shovel* sem risco de choque, e segundo uma altura máxima igual à medida C, descontando-se 100mm. Ou seja, a altura das paredes laterais não deve ultrapassar a altura da parede frontal, e para efeito de cálculo o limite máximo de altura será considerado 100mm menor, sendo este valor uma folga operacional, para que a caçamba não fique demasiado carregada, e ocorra queda de material durante o trajeto. Como durante as operações de carregamento atuais, as escavadeiras elevam a caçamba cerca de 2m acima das paredes laterais, a segunda condição foi a determinante para a limitação de H, ficando o seu valor máximo em 2.704mm.

L: O comprimento da caçamba deve possuir um valor máximo que permita o basculamento, sem risco da sua extremidade tocar o chão. Embora o descarregamento do xisto seja feito no britador, o qual fica instalado num poço, não havendo portanto limite para a extremidade traseira da caçamba, os caminhões com frequência são utilizados para transportar material estéril que é descarregado em locais abertos, sendo neste caso importante haver uma folga operacional entre a extremidade da caçamba e o piso da praça de descarga. A medida vertical da extremidade da caçamba original até o chão é de aproximadamente 1.168mm. O ângulo de inclinação do fundo da caçamba quando em posição totalmente elevada é de 45° , o que faz com que a distância da extremidade da caçamba até o chão, medida paralelamente ao fundo desta seja de 1.652mm. Fixando

uma folga operacional de 300mm na posição vertical, haverá uma redução de 425mm nesta medida, ficando o limite da extensão traseira em 1.227mm, que acrescidos ao comprimento original da caçamba de 6.182mm, resultam num valor máximo para L de 7.409mm.

O volume para uma carga de 110ton (110.000Kgf), considerando uma densidade do xisto de 1.464Kg/m^3 , é de $75,14\text{m}^3$. O centro de gravidade da carga deverá ficar 1.142mm à frente do eixo traseiro, conforme Figura 3.19. Como o ponto de encontro entre a parede frontal e o fundo está a 2.921mm à frente do eixo traseiro, resulta que a distância entre o centro de gravidade da carga e este ponto deverá ser de 1.779mm, a qual já foi considerada nas equações do centro de gravidade de cada volume que compõem a carga. Sendo assim, para obter-se a adequada distribuição de carga, deverá haver um CG_T igual a zero. Porém, para o algoritmo de otimização, estabeleceu-se um limite de zero até 5mm para o CG_T .

3.5.2 Desenvolvimento

Com a definição do problema, verificou-se que se trata de um problema de otimização (maximização do volume), submetido a determinadas condições de contorno (restrições), ou seja:

Maximizar o volume $V_T(C,H,L)$, até o limite máximo de $75,14\text{m}^3$,

Condicionado a: $C \leq 2.804\text{mm}$

$H \leq 2.704\text{mm}$

$L \leq 7.409\text{mm}$

$\text{CG}_T(C,H,L) \leq 5\text{mm}$

Portanto, há o vetor coluna $(C, H, L)^T$, com três variáveis reais, $V_T(C, H, L)$ é a função a ser otimizada, e C, H e L são desigualdades (condições de contorno). $\text{CG}_T(C,H,L)$ deveria ser o menor possível, ou seja, igual a zero. Porém para efeito de

distribuição de carga entre os eixos, e considerando que o caminhão trafega em terrenos irregulares, em subidas e descidas, que afetam consideravelmente a distribuição de carga, um pequeno desvio em relação ao ideal não representa problemas para a operação do caminhão, e facilita o processo de otimização.

Para a soma das parcelas de V_T e CG_T foi utilizado o software MathCad, obtendo-se equações mais compactas, para alimentação no algoritmo de otimização.

Em função das características do problema, foi adotado o Método de Zoutendijk, que é apropriado para a solução de problemas com restrições em forma de desigualdades, e é um método robusto e popular. Foi utilizado um algoritmo pronto [3], que foi alimentado com as equações para V_T e CG_T , com os limites descritos anteriormente para as variáveis C, H e L, obtendo-se os seguintes resultados:

$$C = 2.700,65\text{mm}$$

$$H = 2.530,65\text{mm}$$

$$L = 5.760,65\text{mm}$$

Estes valores correspondem a uma carga de $75,2\text{m}^3$ e $110.092,8\text{Kgf}$. O desvio do centro de gravidade em relação à posição ótima ficou em $0,107\text{mm}$.

Capítulo 4

Estudo do Perfil da Parede Frontal

4.1 Propriedades e Características dos Sólidos a Granel (Minérios)

Devido à natureza do material a ser transportado, e considerando a necessidade de desenvolver uma base para entender os princípios que governam o comportamento dos sólidos a granel, é necessário estudar o assunto, e fazer as considerações adequadas, de modo a visualizar e aplicar as cargas corretas nas análises a serem realizadas.

Ângulo de Repouso:

Quando um sólido a granel não consolidado (solto), é depositado numa superfície horizontal para formar uma pilha, e a velocidade da corrente no topo da pilha é desprezível, as partículas deste sólido rolam por esta e as faces da pilha formam um ângulo de repouso com a horizontal. O ângulo de repouso pode assumir valores entre 20 e 60 graus, e não consiste em uma medida da fluência do sólido [8]. Para o xisto britado este ângulo é de 36 graus, e para o xisto desmontado é de 28°. Na verdade o ângulo de repouso serve apenas para determinar o contorno da pilha, porém é muito utilizado entre engenheiros e pesquisadores devido à sua facilidade de medição.

Se um sólido contém uma grande variedade de partículas de tamanhos diferentes, ocorre segregação: os finos se concentram ao longo da trajetória de carga do sólido,

enquanto que as partículas maiores rolam para a periferia da pilha. Quando um sólido cai em uma pilha de uma determinada altura, os finos se compactam ao longo da trajetória sob o impacto das partículas maiores, ganhando resistência e formam um ângulo de inclinação maior que o ângulo de repouso.

Se um pó fino, ou um sólido em forma de flocos cai de uma determinada altura, ele fica aerado e se espalha, formando uma pilha com um ângulo menor que o ângulo de repouso.

O ângulo de repouso é considerado uma propriedade básica dos sólidos a granel e, em princípio possui um valor definido. Porém, em geral, o ângulo de repouso não é uma propriedade inerente de um sólido, mas o resultado de uma interposição de propriedades, parâmetros de projeto do equipamento, e histórico do material. Por este motivo, é natural encontrar-se diferentes ângulos de repouso em diferentes partes da carga [8].

Comparação dos Sólidos com os Líquidos [9]:

A palavra fluxo é mais frequentemente associada com fluidos do que com sólidos, e quando o “fluxo de sólidos” é mencionado tende-se a assumir que o sólido irá se comportar de forma semelhante à de um líquido. Essa suposição no presente contexto é incorreta. As propriedades dos sólidos e dos líquidos diferem tanto que os mecanismos de fluxo destes estados são completamente diferentes. Primeiro, os sólidos podem transferir esforços de cisalhamento sob condições estáticas, ou seja, eles têm um ângulo de atrito estático maior que zero, enquanto que os líquidos não. É por isso que os sólidos formam pilhas enquanto que os líquidos formam superfícies niveladas. Segundo, muitos sólidos quando consolidados, isto é, após a aplicação de uma pressão, possuem resistência coesiva e conservam sua forma sob a ação de uma carga. Terceiro, os esforços de cisalhamento que ocorrem em um sólido a granel em deformação lenta, isto é, fluindo, podem ser considerados independentes da taxa de cisalhamento e dependentes da pressão média atuando dentro do sólido. Em um líquido a situação é contrária, os esforços de cisalhamento são dependentes da taxa de cisalhamento e independentes da pressão média.

Portanto, um sólido a granel deve ser visto como um material plástico e não como um material visco-elástico.

Um sólido não consolidado não possui resistência ao escoamento, na verdade, um sólido aerado tende a se comportar como um líquido. Mas, se este sólido for colocado em um canal, as pressões aumentam devido ao peso da massa superposta e, na presença de líquido nos poros, também devido à tensão superficial. Então, parte do ar é forçada para fora, as partículas se aproximam e forças moleculares aparecem; o sólido se consolida e ganha resistência. Quanto maior a pressão, maior a resistência de um determinado sólido.

Nem todos os sólidos ganham a mesma resistência sob uma determinada pressão. Cascalho e areia seca são não-coesivos; eles praticamente não ganham resistência com o nível de pressão a que normalmente são submetidos. Para cisalhar estes sólidos, é suficiente superar o seu ângulo de atrito interno.

A Mecânica dos Solos [3] [17] [18]:

As considerações a seguir serão feitas para solos, mas são perfeitamente aplicáveis ao minério na caçamba de um caminhão.

Sob a ação de cargas externas, as tensões efetivas em determinados pontos podem suplantar as forças que enlaçam as partículas, de modo que pode ocorrer o escorregamento de partículas ou aglomerados e poderá haver um distúrbio na continuidade do solo, isto é, a resistência do solo poderá ser ultrapassada.

A resistência interna que atua contra o deslocamento (cisalhamento) das partículas num solo solto (sem coesão) é devido somente à fricção dos pontos de contato das partículas. Entretanto, num solo perfeitamente coesivo, o deslocamento das partículas terá como resistência somente o enlaçamento e a tensão superficial devido à água contida nas partículas.

Até que o enlaçamento interno não seja suplantado pela tensão atuante, um solo coesivo irá se comportar como um corpo quase sólido, possuindo somente as forças elásticas de coesão.

As forças de coesão podem ser entendidas como a resistência de enlaçamento estrutural a qualquer deslocamento das partículas que elas unem, independente da magnitude da pressão externa.

Conforme tem sido demonstrado por numerosos experimentos, a resistência de partículas minerais não coesivas ao cisalhamento, é somente a sua resistência à fricção. Porém, a resistência de agregados de partículas com tensão superficial, é uma combinação de resistência viscosa ao deslizamento, cuja magnitude depende da razão de crescimento das forças de cisalhamento e das forças de coesão, que por sua vez dependem da magnitude das pressões de compactação que surgem nos pontos e superfícies de contato das partículas.

A resistência ao cisalhamento, que é a principal forma de resistência dos corpos a forças externas, no caso dos solos tem uma peculiaridade: ela é variável, isto é, depende da pressão e das condições existentes nos pontos de contato das partículas que resistem ao deslizamento [18].

4.2 Modelamento das Cargas

O modelamento das cargas nas paredes da caçamba de um caminhão fora-de-estrada é um assunto pouco estudado, e raras são as referências encontradas na literatura. Como um dos objetivos deste trabalho é reduzir o peso deste componente, a determinação do carregamento nas paredes é fundamental para a análise estrutural que se seguirá para determinar o melhor dentre os perfis estudados.

Os trabalhos desenvolvidos por Casas e outros [4] e [14], apresentam propostas para o modelamento das cargas. No primeiro, para simular as condições de carregamento, aproximaram um equivalente de pressão hidrostática média atuante nas diversas faces da caçamba, onde exploram a idéia de volumes equivalentes para a carga acima da borda útil da caçamba, e também da área equivalente na face lateral da caçamba para determinação da pressão lateral média, utilizando no cálculo a expressão de pressão hidrostática [4]. No segundo, foi apresentado um equacionamento para obter uma equação diferencial da distribuição de pressões numa caçamba [14]. Foi elaborada uma aproximação físico-matemática, que ainda apresenta a necessidade de se obter alguns parâmetros por experiência ou através de experimentos.

Neste trabalho é proposto e utilizado um modelamento de cargas baseado na mecânica dos solos conforme descrito nas seções que seguem.

4.2.1 O problema do Modelamento

Para se determinar como é a distribuição de cargas nas paredes da caçamba, diversos assuntos, todos relacionados com minerais sólidos, foram estudados.

Primeiramente, a resposta para esta questão foi procurada no estudo dos “Silos”. Silos são estruturas destinadas ao armazenamento e movimentação de sólidos a granel, utilizados na indústria mineral, alimentícia, de construção, e outras. Normalmente procura-se dimensionar um silo para suportar as pressões e cargas impostas pelo produto armazenado nas paredes, e para que não ocorra obstrução durante o fluxo do produto. Os produtos armazenados são, em geral, de baixa granulometria, ficam confinados e se movimentam de tal maneira, que isto confere um comportamento particular às pressões aplicadas sobre as paredes. Portanto, as características do produto e da forma de contenção diferem bastante das de um minério bruto na caçamba de um caminhão. Porém, o estudo dos silos foi bastante útil no sentido de conhecer o comportamento dos sólidos a granel, e prever o comportamento do minério no interior da caçamba.

Na seqüência, o tema estudado foi “Estabilidade de Taludes”. A migração para o estudo deste tema deveu-se ao fato de que a porção da massa de minério que exerce pressão sobre as paredes da caçamba, pode ser considerada como aquela que se localiza acima do ângulo de repouso do mesmo. Porém, esta ciência dedica-se ao estudo das condições em que pode ocorrer um deslizamento devido às forças atuantes no interior de um maciço suplantarem a resistência ao cisalhamento. O que ocorre na seqüência com esta massa ou as pressões que pode exercer sobre uma parede não é analisado.

O terceiro tema estudado foi “Mecânica dos Solos”. Aqui existe um tópico que estuda o empuxo que o solo exerce sobre um paramento (muro). São estudadas as teorias clássicas de Rankine e Coulomb, para os chamados empuxo ativo e empuxo passivo. O modelamento proposto neste trabalho baseia-se na teoria de Coulomb, e é descrito na seção seguinte.

Também foi estudada a “Mecânica das Rochas”. Esta ciência trata mais especificamente do estudo dos maciços rochosos. Apesar do xisto ser uma rocha, o fato de estar fragmentado antes do carregamento faz com que se comporte mais como um solo do que como um maciço, fato que fez com que o modelamento das cargas fosse feito através das teorias aplicadas à mecânica dos solos.

4.2.2 O Modelo Proposto

O modelamento proposto para as cargas baseia-se na teoria da Mecânica dos Solos, sendo descrito abaixo os aspectos relevantes para este trabalho.

Os problemas de pressão do solo em muros de contenção têm sido tratados em um grande número de trabalhos individuais cuja discussão e análise poderia ocupar centenas de páginas. Seguem abaixo os conceitos básicos para a compreensão do assunto [6].

Entende-se como empuxo da terra a ação produzida por um maciço terroso sobre as superfícies com ele em contato. É um assunto complexo na Mecânica dos Solos e até hoje não há nenhuma teoria geral e precisa, apesar do grande número de estudos já realizados. Todas as teorias propostas admitem hipóteses simplificadoras, que diferem em maior ou menor grau, conforme as condições reais.

As teorias clássicas sobre empuxo de terra foram formuladas por Coulomb (1773) e Rankine (1856), tendo sido desenvolvidas posteriormente por diversos pesquisadores.

Num solo que tem um peso específico γ , a pressão vertical exercida por uma massa semi-infinita numa profundidade z será [3]:

$$\sigma_v = \gamma z \quad (4.1)$$

Eliminando-se uma parte do maciço semi-infinito e substituindo-se por um plano imóvel, indeformável e sem atrito, haverá uma pressão sobre o plano que será horizontal, e crescerá linearmente com a profundidade, sendo de [3]:

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v = K_0 \cdot \gamma z \quad (4.2)$$

Estas pressões são chamadas de pressões no repouso e K_0 coeficiente de empuxo no repouso. Os seus valores, para alguns materiais, obtidos experimentalmente são da seguinte ordem [3]:

Solo	K_0
Argila	0,70 a 0,75
Areia solta	0,45 a 0,50
Areia compactada.....	0,40 a 0,45

Assim como tem sido demonstrado pelos experimentos, a pressão do solo em muros de contenção depende não somente das propriedades do solo, mas também das suas variações com o tempo (compactação, relaxamento), e também de possíveis deslocamentos do muro.

O deslocamento do solo em última instância ocorre ao longo de uma superfície chamada de superfície de escorregamento, com a forma de um prisma chamado de “prisma de falha” (Fig. 4.1). Se a parede neste processo gira na direção contrária à do solo, este irá exercer uma pressão ativa sobre a parede. Porém, se a parede gira na direção do solo, este irá se deslocar para cima. Neste caso, a ação da parede suplanta o peso do prisma, o que requer uma força considerável, resultando na chamada pressão ativa do solo contra a parede.

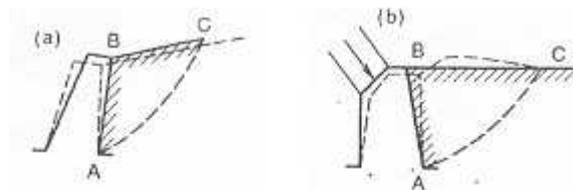


Figura 4.1 – Prisma de falha.

Admitindo-se agora, que a parede sofra um pequeno deslocamento Δ , em direção contrária ao terrapleno (maciço que está sendo suportado). Em conseqüência, o terrapleno se deforma e surgem tensões de cisalhamento, que conduzem a uma diminuição do empuxo (Fig. 4.2.a).

Se ao contrário, a parede se desloca em direção ao terrapleno, também se produzem tensões de cisalhamento, que fazem aumentar o empuxo sobre a parede (Fig.

4.2.b). Quanto maior o deslocamento, maior será o empuxo.

Estes são estados limites de equilíbrio ou estados plásticos, o primeiro chamado de estado de equilíbrio inferior, e o segundo estado de equilíbrio superior.

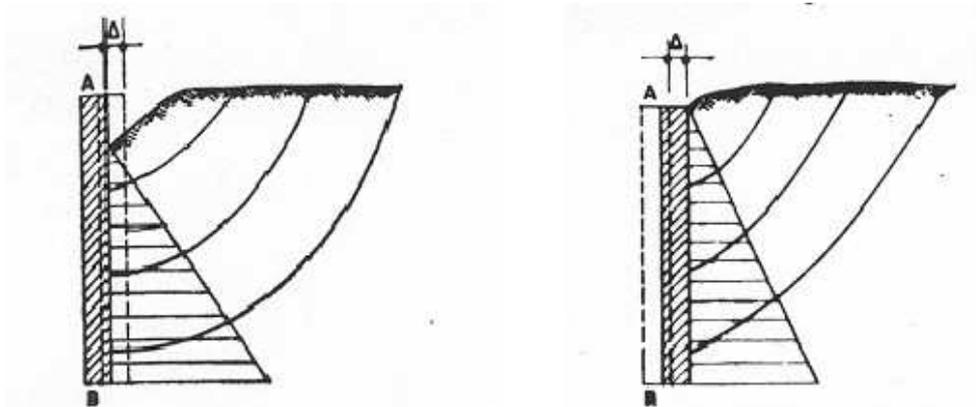


Figura 4.2 – Empuxo ativo (a) e passivo (b).

O empuxo que é exercido sobre um suporte que resiste, porém que cede um certo valor, é chamado de empuxo ativo (E_a), enquanto que se é a parede que avança contra o terrapleno, tem-se o chamado empuxo passivo (E_p). As pressões correspondentes chamam-se ativa e passiva, e os coeficiente, ativo (K_a) e passivo (K_p).

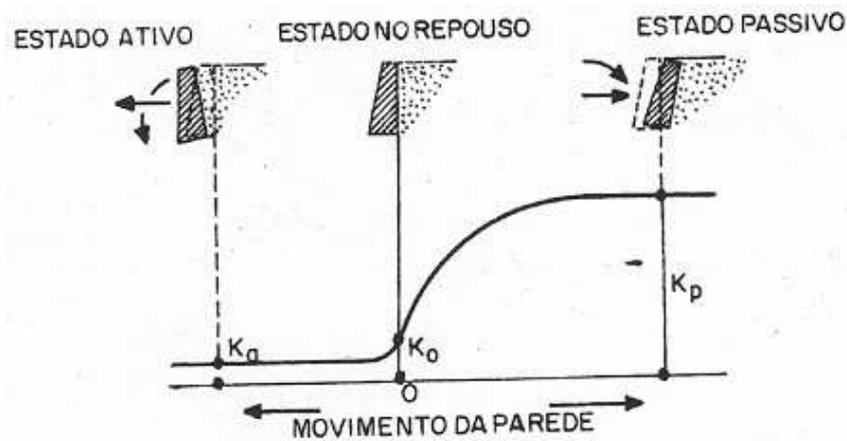


Figura 4.3 - Efeito do deslocamento da parede na intensidade do empuxo.

A mobilização progressiva da resistência ao cisalhamento ao longo da curva de ruptura do terrapleno, permite a redução do empuxo ativo e o aumento do empuxo passivo. A partir de um determinado valor de Δ , E_a não decresce mais, e E_p não aumenta mais, pois τ atingiu seu valor máximo.

A teoria de Rankine admite que não haja atrito entre o terrapleno e a parede. Os resultados assim obtidos, embora em geral a favor da segurança, não correspondem à realidade, quanto ao empuxo ativo.

Na teoria de Coulomb o terrapleno é considerado como um maciço indeformável, mas que se rompe segundo superfícies curvas, consideradas planas por conveniência. Considerando, conforme Figura 4.4, uma possível cunha de ruptura ABC, em equilíbrio sob a ação de :

P – Peso da cunha;

R – reação do terreno, formando um ângulo ϕ com a normal à linha de ruptura BC;

E_a – empuxo resistivo exercido pela parede, cuja direção é determinada pelo ângulo de atrito δ entre a superfície AB e o solo.

Vamos admitir agora, que a parede sofra um pequeno deslocamento Δ , em direção contrária ao terrapleno (maciço que está sendo suportado). Em conseqüência, o terrapleno se deforma e surgem tensões de cisalhamento, que conduzem a uma diminuição do empuxo (Fig. 4.2.a).

Se ao contrário, a parede se desloca em direção ao terrapleno, também se produzem tensões de cisalhamento, que fazem aumentar o empuxo sobre a parede (Fig. 4.2.b). Quanto maior o deslocamento, maior será o empuxo.

Estes são estados limites de equilíbrio ou estados plásticos, o primeiro chamado de estado de equilíbrio inferior, e o segundo estado de equilíbrio superior.

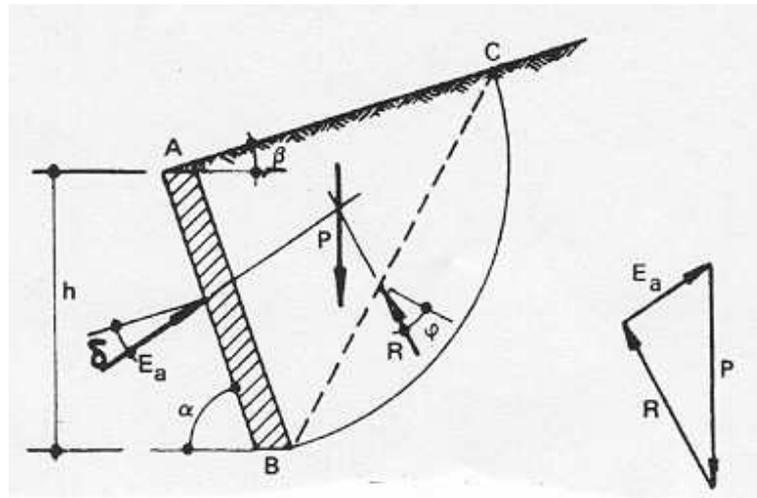


Figura 4.4 - Empuxo ativo.

Determina-se E_a , traçando-se o polígono das forças, como na Figura 4.4. Admitem-se inicialmente vários planos de escorregamento, sendo considerada como superfície de ruptura aquela que corresponder ao maior valor de E_a .

Partindo-se das condições de equilíbrio das três forças P , R e E_a , deduz-se analiticamente as equações gerais para os empuxos ativo e passivo, as quais aparecem a seguir, este último correspondendo à superfície de deslizamento, também suposta plana, que produz o prisma de empuxo mínimo. A curvatura da superfície de ruptura, tem no caso passivo uma importância maior que no caso ativo, e aumenta a curvatura quanto maior for δ em relação a φ , o que torna admissível a aplicação da teoria de Coulomb para o cálculo do empuxo passivo, somente para solos não coesivos quando $\delta \leq \varphi/3$.

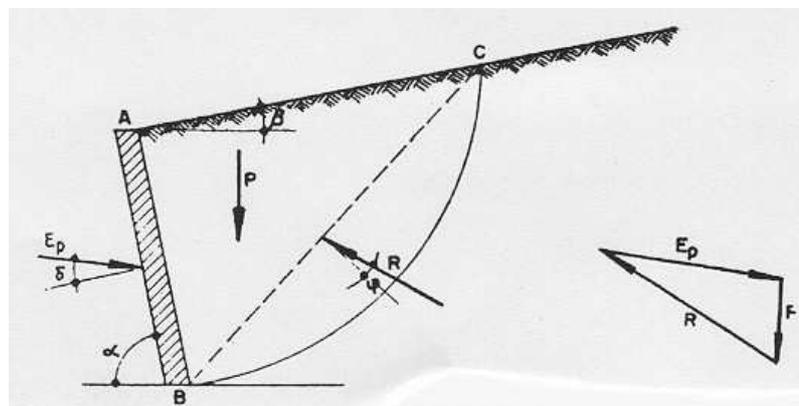


Figura 4.5 - Empuxo passivo.

Assim, conforme as Figuras 4.4 e 4.5 [3], tem-se:

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot K_a \quad (4.3)$$

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\alpha + \varphi)}{\text{sen}^2\alpha \cdot \text{sen}(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi + \delta) \cdot \text{sen}(\varphi - \beta)}{\text{sen}(\alpha - \delta) \cdot \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.4)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot K_p \quad (4.5)$$

$$K_p = \frac{\text{sen}^2(\alpha + \varphi)}{\text{sen}^2\alpha \cdot \text{sen}(\alpha - \delta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi + \delta) \cdot \text{sen}(\varphi - \beta)}{\text{sen}(\alpha - \delta) \cdot \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.6)$$

Sendo:

α = ângulo da parede com a horizontal.

β = ângulo de inclinação do material com a horizontal.

δ = ângulo de atrito do material com a parede.

φ = ângulo de atrito interno do material.

A teoria de Coulomb, ao contrário da teoria de Rankine, leva em conta o atrito do terraplano com a superfície sobre a qual se apóia.

Deve-se observar que a determinação precisa da configuração das linhas de escorregamento atrás de paredes de contenção é um problema complicado. Envolve dificuldades matemáticas e adicionalmente outras dificuldades associadas às considerações do efeito do atrito do solo na parede.

O cálculo teórico da pressão ativa assumindo que as superfícies de escorregamento do solo atrás da parede são retas, produz resultados muito próximos da solução exata para superfícies lisas da parede de contenção no caso em que o maciço possui uma superfície horizontal, ou com um erro de 2-3% para outros tipos de paredes

de contenção (rugosas). Entretanto, esta teoria é considerada inaplicável para a determinação da pressão passiva de solos que possuem uma apreciável resistência à fricção, pois resulta em valores excessivamente elevados. Como exemplo, aumenta em 17% o empuxo passivo para um ângulo de atrito interno $\varphi = 16^\circ$ ou sete vezes para $\varphi = 40^\circ$.

Por outro lado, a inclinação da face de contato da parede com o solo pode ter um efeito apreciável na pressão ativa. Comparando com a pressão do solo em uma parede de face vertical, a pressão ativa será maior para o caso em que a parede se inclina em direção contrária à do maciço e menor para o caso contrário.

4.3 Critério para as Cargas

4.3.1 Cargas Estáticas

A distribuição das pressões laterais correspondentes às Equações 4.3 a 4.6 é hidrostática, e o diagrama de empuxos possui a forma triangular. Esta situação é fisicamente possível quando o muro gira sobre a sua base, visto que o deslizamento de cada plano sucessivo mobiliza a resistência ao cisalhamento internamente no solo por igual, que é uma das hipóteses básicas das teorias clássicas da mecânica dos solos. Esta situação também se aproxima da condição real das paredes de uma caçamba de caminhão fora-de-estrada, visto que por estarem soldadas ao fundo e às paredes laterais, e livres na aresta superior, seu movimento se aproximará de uma rotação em torno da aresta inferior.

Dos estudos e discussões, concluiu-se que o empuxo ativo é o que melhor representa os esforços estáticos exercidos pela carga sobre as paredes laterais e frontal de uma caçamba. O movimento destas paredes em direção contrária à da carga, possível devido à flexibilidade destas, aciona a resistência interna ao cisalhamento na carga, mobilizando forças que permitem um carregamento no máximo igual ao empuxo ativo nas paredes da caçamba.

4.3.2 Cargas Estáticas nas Paredes Laterais

Para as paredes laterais são os seguintes os dados:

$$\alpha_L = 90^\circ \text{ (ângulo da parede lateral em relação à horizontal)}$$

$$\beta_L = 26^\circ \text{ (ângulo de repouso do xisto no encontro com as paredes laterais)}$$

$$\delta = 21^\circ \text{ (ângulo de atrito xisto-aço)}$$

$$\varphi = 28^\circ \text{ (ângulo de atrito interno do xisto)}$$

Aplicando os dados acima na Equação 4.4, obtém-se:

$$Ka_L = 0,6026$$

A pressão horizontal resultante da aplicação deste empuxo nas paredes laterais da caçamba é igual ao produto do coeficiente de empuxo ativo, peso específico do minério, coseno do ângulo de atrito do minério com a parede e altura da coluna de minério:

$$\sigma_L = Ka_L \cdot \gamma \cdot \cos \delta \cdot h = 823,61 \cdot h \quad (4.7)$$

A multiplicação pelo $\cos \delta$, se deve ao fato de que devido ao atrito, o empuxo ativo é aplicado formando um ângulo igual a δ com as paredes laterais da caçamba. Portanto, o efeito do empuxo ativo, combinado com seu ângulo de aplicação nas paredes laterais da caçamba, provoca um carregamento semelhante ao de um material que possuísse uma massa específica equivalente a:

$$\gamma_{EQUIV} = 823,61 \text{ Kg/m}^3 = 8,07965 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$$

4.3.3 Cargas Estáticas na Parede Frontal

Para a parede frontal são os seguintes os dados:

$$\alpha_F = 60^\circ - 5^\circ = 55^\circ \text{ (ângulo da parede frontal em relação à horizontal)}^1$$

$$\beta_F = 18^\circ + 5^\circ = 23^\circ \text{ (ângulo de repouso do xisto no encontro com a parede frontal)}$$

$$\delta = 21^\circ \text{ (ângulo de atrito xisto-aço)}$$

$$\varphi = 28^\circ \text{ (ângulo de atrito interno do xisto)}$$

Aplicando os dados acima na Equação 4.4, obtém-se:

$$Ka_F = 1,4475$$

Este é um valor muito elevado para o coeficiente do empuxo ativo, que normalmente é menor que a unidade. A explicação está no fato de que a parede frontal possui um ângulo de inclinação muito elevado, que associado ao ângulo de repouso do xisto, faz com que o carregamento na parede aumente, resultando no coeficiente calculado.

A pressão horizontal resultante da aplicação deste empuxo na parede frontal da caçamba é igual a:

$$\sigma_F = Ka_F \cdot \gamma \cdot \cos \delta \cdot h = 1978,39 \cdot h \quad (4.8)$$

A multiplicação pelo $\cos \delta_F$, se deve ao mesmo motivo explicado anteriormente para o caso das paredes laterais. Portanto, o efeito do empuxo ativo, combinado com seu

¹ A subtração de 5° do ângulo da parede frontal e o acréscimo de 5° ao ângulo de repouso do xisto, se devem ao fato de que os testes de frenagem foram feitos numa rampa (descida) com inclinação de 5°, o que aumenta o valor do empuxo ativo utilizado no cálculo das cargas estáticas, e que será somado à carga dinâmica devido à desaceleração (frenagem), cuja medição foi feita na mesma rampa.

ângulo de aplicação na parede frontal da caçamba, provoca um carregamento semelhante ao de um material que possuísse uma massa específica equivalente a:

$$\gamma_{EQUIVF} = 1.978,39 \text{Kg/m}^3 = 1,9408 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$$

4.3.4 Cargas Dinâmicas

Para o modelamento das cargas dinâmicas foram aventadas duas possibilidades (critérios):

- A adoção do empuxo ativo (utilizado para o modelamento das cargas estáticas) acrescido dos esforços dinâmicos exercidos pela carga sobre as paredes da caçamba, quando das frenagens e curvas.
- Adoção do empuxo passivo, que seria o carregamento máximo que a carga poderia exercer sobre as paredes da caçamba, depois de superada a resistência interna ao cisalhamento do material que está sendo transportado.

Segundo Tschebotarioff [17], o atrito do muro e a sua direção afetam só ligeiramente o empuxo ativo, porém afetam de maneira considerável na resistência passiva dos solos. Por este motivo, e na impossibilidade de se calcular mais precisamente o empuxo passivo, foi adotado o primeiro critério para o carregamento dinâmico.

Deve-se esclarecer que a adoção do empuxo passivo seria para uma situação limite, em que tanto o carregamento estático quanto o dinâmico seriam representados por este empuxo. Das análises qualitativas realizadas, concluiu-se que esta situação poderia ocorrer numa desaceleração brusca do caminhão, tal como numa colisão, em que quase que instantaneamente se passaria da velocidade de trajeto para a parada total. Porém, não se tem certeza se toda a resistência ao cisalhamento seria mobilizada, atingindo o valor máximo do empuxo passivo.

Portanto, para o carregamento dinâmico sobre as paredes da caçamba, será acrescido ao empuxo ativo que representa o carregamento estático, os esforços dinâmicos. O efeito dinâmico sobre as cargas será modelado, considerando-se o efeito da desaceleração nas frenagens, ou da força centrífuga nas curvas, sobre uma cunha de material, situada acima do ângulo de repouso deste, considerando esta cunha como um bloco rígido e sua pressão uniformemente distribuída sobre as paredes laterais ou frontal, conforme o caso.

4.3.5 Cargas Dinâmicas nas Paredes Laterais (Curvas)

Para a avaliação das cargas dinâmicas nas curvas, foi selecionada a curva com menor raio em toda a mina da PETROBRAS, cujo raio é de 38m. Foi estimada uma velocidade máxima de 15Km/h (4,167m/s) para esta curva, visto que a velocidade normal de trajeto no local é de 12Km/h(3,333m/s). A massa situada acima do ângulo de repouso, conforme Figura 4.6 foi calculada, obtendo-se um volume de 31,126m³, conforme composição abaixo:

$$V_{1C} = 2,187\text{m}^3$$

$$V_{2C} = 5,085\text{m}^3$$

$$V_{3C} = 4,942\text{m}^3$$

$$V_{4C} = 1,514\text{m}^3$$

$$V_{5C} = 3,876\text{m}^3$$

$$V_{6C} = 4,396\text{m}^3$$

$$V_{7C} = 10,403\text{m}^3$$

$$V_{\Delta C} = 0,166\text{m}^3$$

$$V_{FC} = 1,111\text{m}^3$$

$$V_{TC} = V_{1C} + V_{2C} + V_{3C} + V_{4C} + V_{5C} + V_{6C} + V_{7C} + V_{\Delta C} + V_{FC}$$

$$V_{TC} = 31,126\text{m}^3$$

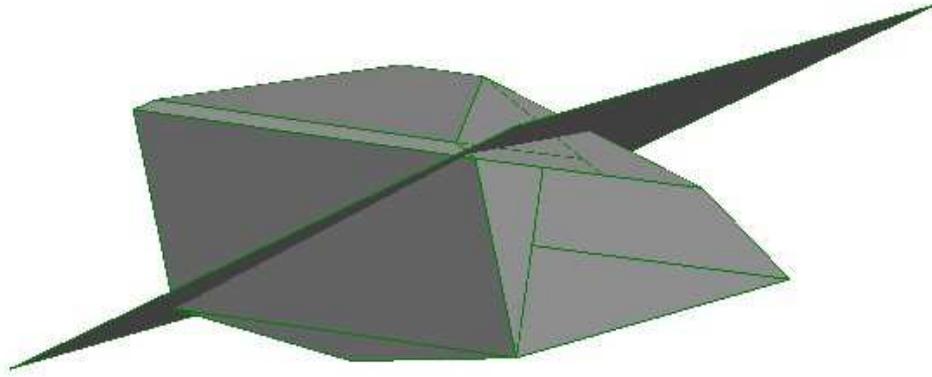


Figura 4.6 - Volume sobre o qual atua a força centrífuga durante as curvas. O plano que aparece na figura possui inclinação de 28° com a horizontal, igual ao ângulo de repouso do xisto.

Com um peso específico de 1.464Kg/m³, este volume corresponde a uma massa de 45.568,46Kg. Portanto, considerando os dados acima, a força centrífuga aplicada sobre as paredes laterais durante as curvas, possui um valor total de 20.819,25N, que distribuída pela área da parede lateral da caçamba que é de 10,669m², exerce uma pressão uniforme de 1,95127 x 10⁻³MPa, conforme cálculos indicados na seqüência:

$$F_C = \frac{m_C \cdot v_C^2}{r} = 20819,25N \quad (4.9)$$

$$P_{DINc} = \frac{F_C}{A_C} = 1,95127 \times 10^{-3} MPa \quad (4.10)$$

Para efeito do carregamento quando da modelagem por elementos finitos, esta pressão dinâmica foi convertida em coluna de material (pressão hidrostática), correspondendo a:

$$h_{CDIN} = \frac{P_{DINc}}{\gamma_{EQUIVL}} = 241,5mm \quad (4.11)$$

Outra situação operacional que poderia causar carregamento dinâmico de valor elevado nas paredes laterais da caçamba, ocorre quando da passagem do caminhão por

depressões na pista, fazendo com que somente um lado do caminhão desça, e imediatamente em seguida suba. Este movimento na vertical, causa um movimento horizontal das paredes laterais, cuja aceleração foi calculada como mostrado na sequência:

Foi localizada no trajeto dos caminhões uma depressão de grande tamanho, com comprimento de 10m e profundidade de 0,70m. O tempo de passagem do caminhão por esta depressão foi cronometrado em 6,03s, resultando numa velocidade média de 1,658m/s. Considerando que um rodado do caminhão sobe e desce 0,70m ao passar por esta depressão, em um quarto deste tempo (1,5075s), desceria ou subiria 0,35m. Partindo de uma velocidade vertical nula, seria necessário uma aceleração de $0,308\text{m/s}^2$, para percorrer esta distância. Como o caminhão possui largura média de 4040mm no rodado traseiro, e uma altura máxima de 5.213mm nas paredes laterais, multiplicando a razão entre estas duas dimensões pela aceleração calculada anteriormente, obtém-se uma aceleração de $0,3974\text{m/s}^2$, cuja ação sobre a massa de 45.568,46Kg, gera uma força de 18.108,9N, que é menor do que a força gerada devido à ação da força centrífuga que atua nas curvas.

4.3.6 Cargas Dinâmicas na Parede Frontal (Frenagens)

Para o caso das frenagens (desaceleração), foi considerado também o material acima do ângulo de repouso (28°), porém subtraindo deste o ângulo correspondente à inclinação da rampa onde foram efetuados os testes de frenagem (5°) na mina da PETROBRAS, em São Mateus do Sul – PR. Isto permite que o montante real de massa de material transportado seja contabilizado quando das frenagens em descidas.

A desaceleração máxima medida em descida, conforme citado anteriormente, foi de $-1,201\text{m/s}^2$. A massa situada acima do ângulo de repouso, conforme Figura 4.7 foi calculada, obtendo-se um volume de $62,507\text{m}^3$, conforme composição abaixo:

$$V_{1F} = 2,486\text{m}^3$$

$$V_{2F} = 5,151\text{m}^3$$

$$V_{3F} = 5,406\text{m}^3$$

$$V_{4F} = 3,594\text{m}^3$$

$$V_{5F} = 14,948\text{m}^3$$

$$V_{6F} = 10,551\text{m}^3$$

$$V_{7F} = 20,371\text{m}^3$$

$$V_{TC} = V_{1F} + V_{2F} + V_{3F} + V_{4F} + V_{5F} + V_{6F} + V_{7F}$$

$$V_{TC} = 62,507\text{m}^3$$

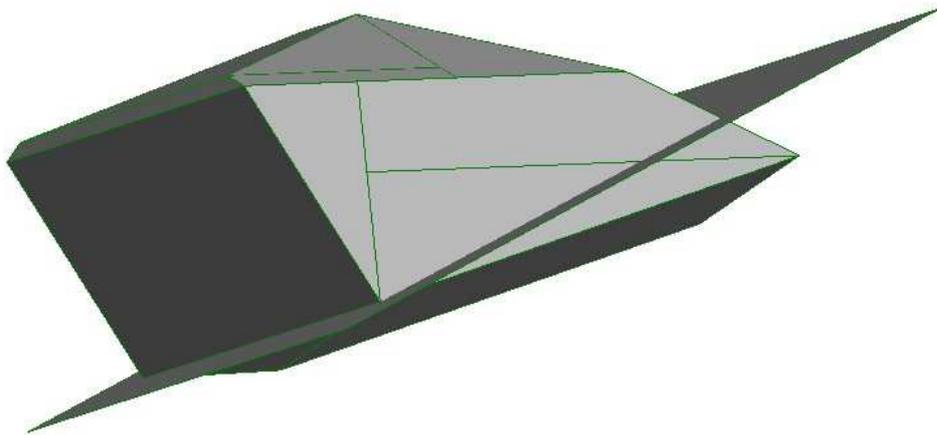


Figura 4.7 - Volume sobre o qual atua a força dinâmica durante as frenagens. O plano que aparece na figura possui inclinação de 23° com a horizontal, igual ao ângulo de repouso do xisto após subtraída a inclinação da rampa (5°).

Com um peso específico de $1.464\text{Kg}/\text{m}^3$, este volume corresponde a uma massa de $91.510,25\text{Kg}$. Portanto, considerando os dados acima, a força devida à desaceleração aplicada sobre a parede frontal, possui um valor total de 109.904N , que distribuída pela área de $16.995.658\text{mm}^2$, exerce uma pressão uniforme de $6,466 \times 10^{-3}\text{MPa}$, conforme cálculos abaixo:

$$F_F = m.a = 109.904\text{N} \tag{4.12}$$

$$P_{DINF} = \frac{F_F}{A_F} = 6,466 \times 10^{-3} \text{ MPa} \quad (4.13)$$

Para efeito do carregamento quando da modelagem por elementos finitos, esta pressão dinâmica foi convertida em coluna de material (pressão hidrostática), correspondendo a:

$$h_{FDIN} = \frac{P_{DINF}}{\gamma_{EQUIVF}} = 333,2 \text{ mm} \quad (4.14)$$

4.4 Materiais

Para se atingir os objetivos pretendidos neste trabalho, faz-se necessário selecionar um material com propriedades adequadas, ou seja:

- Resistência mecânica elevada;
- Resistência à abrasão elevada;
- Trabalhabilidade boa (soldabilidade e conformabilidade), e;
- Preço acessível.

Foi feito um levantamento dos materiais com estas características, disponíveis no mercado nacional. Abaixo segue um resumo dos materiais identificados:

ASTM A-514: Há uma série de aços pertencentes a esta classificação, fabricados pela Usiminas. Possuem elevada resistência mecânica e à abrasão e uma distribuição de dureza com baixo índice de dispersão, o que garante um decréscimo de dureza da superfície ao núcleo muito pequeno, permitindo uma constância no desgaste. Estes aços foram desenvolvidos visando a uma boa soldabilidade, obtida através de um baixo teor de carbono com uma adequada combinação de elementos de liga e tratamento térmico, resultando num baixo carbono equivalente, permitindo utilizar procedimentos de soldagem aplicáveis a aços estruturais [35].

Os aços da família SS-400-AR possuem dureza mínima de 360HB, podendo ultrapassar 470HB. O valor mínimo para o limite de resistência mínimo e para o limite de escoamento é de 785MPa e 687MPa, respectivamente.

Creusabro: São aços de origem francesa, fabricados pela Industrial Arcelor Group, disponíveis no mercado nacional. São muito utilizados em aplicações na indústria de construção e mineração. São obtidos através da combinação de composição química e procedimentos específicos de tratamento térmico, resultando em elevada resistência ao desgaste devido a uma fina distribuição de microcarbonetos de cromo e molibdênio e elevada capacidade em adquirir dureza em serviço, resultado de um efeito metalúrgico chamado TRIP (transformação induzida pela plasticidade). Possuem boa trabalhabilidade quando comparados aos aços tradicionais com dureza na faixa de 500H.

O aço Creusabro 8000SS possui dureza de 470HB, limite de escoamento de 1.250MPa, limite de resistência de 1.630MPa, alongamento de 12% e resistência ao impacto a -20°C mínima de 40J/cm². Quando em serviço, a dureza aumenta cerca de 70HB devido ao efeito TRIP, tornando-o mais resistente ao desgaste por abrasão e impacto [15].

Considerando as características destas famílias de aços, foi selecionado o aço Creusabro 8000SS para a construção das paredes laterais e frontal, e também da aba da caçamba em estudo.

4.5 Estudo da Parede Frontal por Elementos Finitos

4.5.1 Perfis para a Parede Frontal

Com o objetivo de selecionar o perfil mais adequado para a parede frontal da caçamba, foram analisados dois perfis, cuja resistência estrutural foi comparada com a do perfil original.

De modo a se obter uma redução significativa da massa da caçamba, a parede frontal deve ser construída em forma de membrana, utilizando chapas de aço de menor

espessura que a da parede frontal original. Esta membrana pode não proporcionar uma vida tão longa quanto à das placas de desgaste numa caçamba convencional, mas sua reposição deve ser rápida e a um custo moderado.

As chapas de aço utilizadas devem ter alta resistência, boa formabilidade e soldabilidade, e custo adequado.

Para estabelecer perfis com bom desempenho (resistência) aos esforços impostos pela carga de xisto, procurou-se perfis que reconhecidamente sejam adequados ao trabalho sob ação de pressões internas, visto que o empuxo aplicado sobre a parede somado às cargas dinâmicas se aproxima muito ao de uma pressão distribuída (hidrostática).

Para a determinação destes perfis utilizou-se a norma ASME, Seção VIII, Divisão I, 2001, utilizada para o projeto de vasos de pressão. Os perfis constantes desta norma são para tampos circulares. Para a sua aplicação à parede frontal da caçamba, utilizar-se-á a sua curvatura, que será aplicada para gerar uma parede em forma de membrana (segmento de cilindro). Foram selecionados dois perfis conforme segue:

Perfil 1: Foi derivado do perfil de uma calota esférica, ou seja, é um perfil de simples curvatura com raio igual à distância entre as paredes laterais da caçamba.

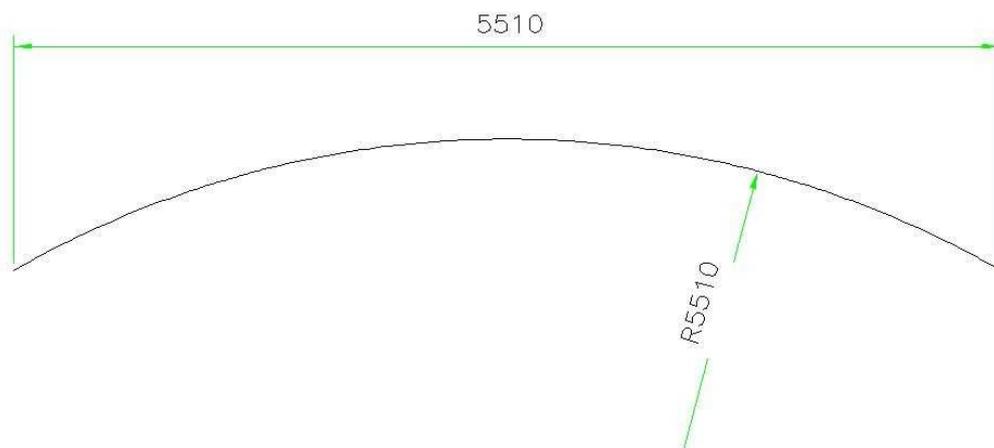


Figura 4.8 – Detalhes do Perfil 1.



Figura 4.9 – Vista em perspectiva do Perfil 1; raio = 5.510mm.

Perfil 2: É um perfil derivado de uma calota central esférica de seção toroidal de concordância, sendo que o raio da calota deve ser menor que diâmetro externo do vaso, e o raio de concordância não deve ser inferior a 6% do diâmetro. Neste caso, o diâmetro externo do vaso equivale à distância entre as paredes laterais da caçamba.

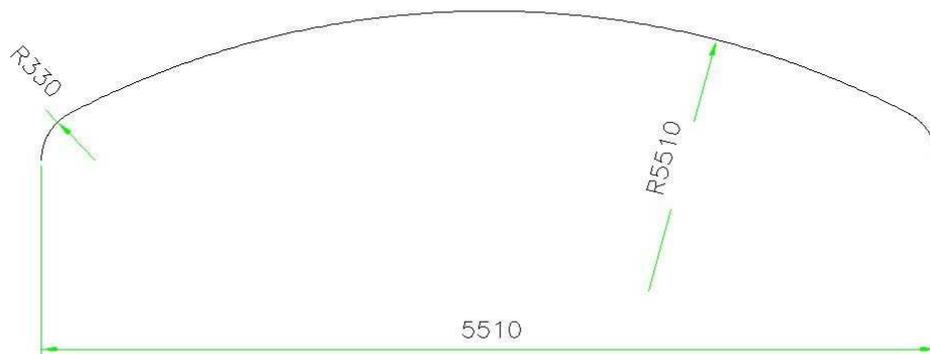


Figura 4.10 - Detalhes do Perfil 2.



Figura 4.11 – Vista em perspectiva do Perfil 2; raio = 5.510mm; raio de concordância = 330,6mm.

A comparação do desempenho dos perfis propostos com o perfil original tem os seguintes objetivos:

- Verificar o desempenho do perfil original sob a ação do carregamento proposto, de modo a validar este carregamento;
- Garantir a integridade dos perfis propostos, que deverão trabalhar com coeficientes de segurança iguais ou maiores que o perfil original.

4.5.2 Cargas e Condições de Contorno

Conforme definido anteriormente, o carregamento gerado pela ação do empuxo ativo, que representa as cargas estáticas, tem formato triangular, enquanto que a ação das cargas dinâmicas é representada por uma pressão distribuída.

Para a simulação do carregamento na parede frontal, foi considerado para as cargas estáticas, um carregamento hidrostático equivalente com o material no nível da aresta superior desta parede, e com peso específico equivalente de $1,9408 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$. Para as cargas dinâmicas, a pressão distribuída corresponde a um acréscimo de 333,2mm na altura da coluna hidrostática. Portanto, para efeito da análise por elementos finitos, a

altura do nível do minério será considerada como estando 333,2mm acima da aresta superior da parede frontal da caçamba.

Para as paredes laterais, foi considerado para as cargas estáticas, um carregamento hidrostático equivalente com o material no nível da aresta superior destas paredes, e com peso específico equivalente de $8,07965 \times 10^{-6} \text{N/mm}^3$. Para as cargas dinâmicas, a pressão distribuída corresponde a um acréscimo de 241,5mm na altura da coluna hidrostática. Portanto, para efeito da análise por elementos finitos, a altura do nível do minério será considerada como estando 241,5mm acima da aresta superior da parede lateral da caçamba.

Foi utilizado um coeficiente de segurança mínimo igual a cinco para as paredes frontal e igual a 4 para as paredes laterais. Fenton [7] sugere coeficientes de segurança da ordem de 4 a 5, enquanto que Whalen e Obaia [14] afirmam que as cargas dinâmicas no fundo de uma caçamba podem atingir valores da ordem de até três vezes o valor das cargas estáticas. O coeficiente de segurança maior para a parede frontal destina-se a garantir a segurança do operador. Assim, quando das análises por elementos finitos dos perfis 1 e 2 e das paredes laterais, procurou-se chegar a uma espessura comercial das chapas utilizadas, que limite a tensão máxima a 1/4 ou 1/5 da tensão de escoamento, para as paredes laterais e frontal respectivamente.

Quanto às condições de contorno, para a parede frontal da caçamba foram restringido os deslocamentos e rotações das arestas inferior e laterais, deixando livre a aresta superior. Isto se deve ao fato de que a parede frontal da caçamba fica solidamente soldada ao fundo e às laterais, e embora seja soldada à aba na aresta superior, esta possui rigidez sensivelmente menor.

Para as paredes laterais foram restringidos os deslocamentos e rotações das arestas inferior e lateral, deixando livre a aresta superior. Também aqui, a parede lateral é solidamente soldada ao fundo e à parede frontal, e fica livre na aresta superior.

Estas cargas e condições de contorno foram utilizadas para as análises dos perfis por elementos finitos, utilizando um software comercial (ALGOR FEMPRO, versão 13.38 – WIN, 27-jun-2003), conforme segue.

4.5.3 Análise do Perfil Original

A performance da parede frontal original, do tipo convencional, foi investigada, de modo a servir como elemento de comparação com os perfis propostos. O material das vigas possui limite de escoamento de 434MPa e limite de ruptura de 620MPa, com espessura de 9,525mm(3/8”). O material das chapas possui limite de escoamento de 553MPa e limite de ruptura de 790MPa, com espessura de 12,7mm(1/2”). Foram restringidas as rotações e translações ao longo das arestas laterais e inferior. A Figura 4.12 apresenta o modelo com a malha utilizado nas análises, elaborado com 125.611 elementos tipo placa, quadrangulares, e nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos, incluindo as tensões de Von Mises e os deslocamentos.

Vê-se que as tensões máximas ficaram em torno de 122MPa, resultando num coeficiente de segurança da ordem de 3,5 para a parede frontal original, quando carregada conforme o modelo de carregamento proposto.

Este resultado confirma que o modelo de carregamento proposto aproxima-se do carregamento real. É importante salientar que o desempenho da parede frontal original tem sido satisfatório, considerando que as caçambas possuem mais de 50.000 horas de operação e poucos reparos têm sido necessários.

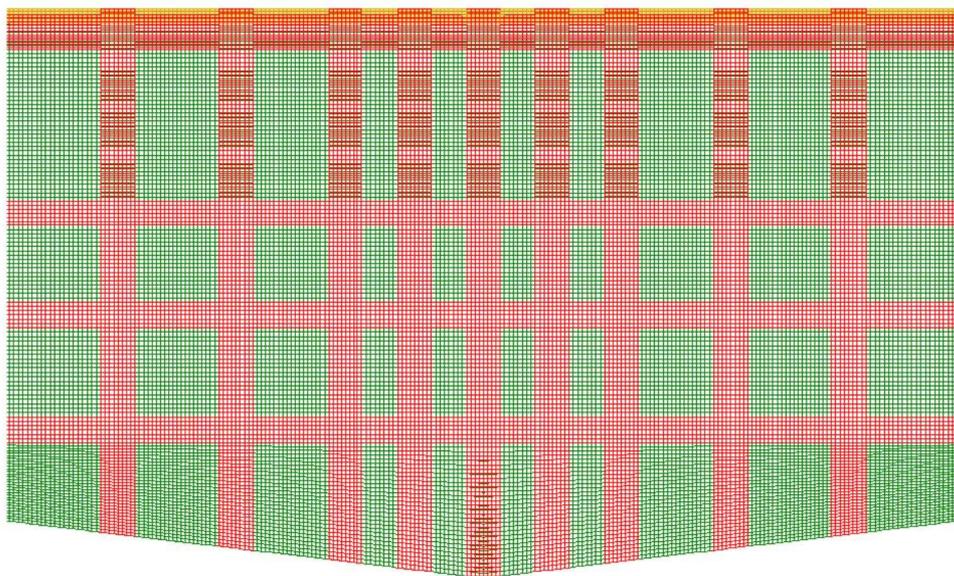


Figura 4.12 - Malha utilizada para análise da parede frontal original.

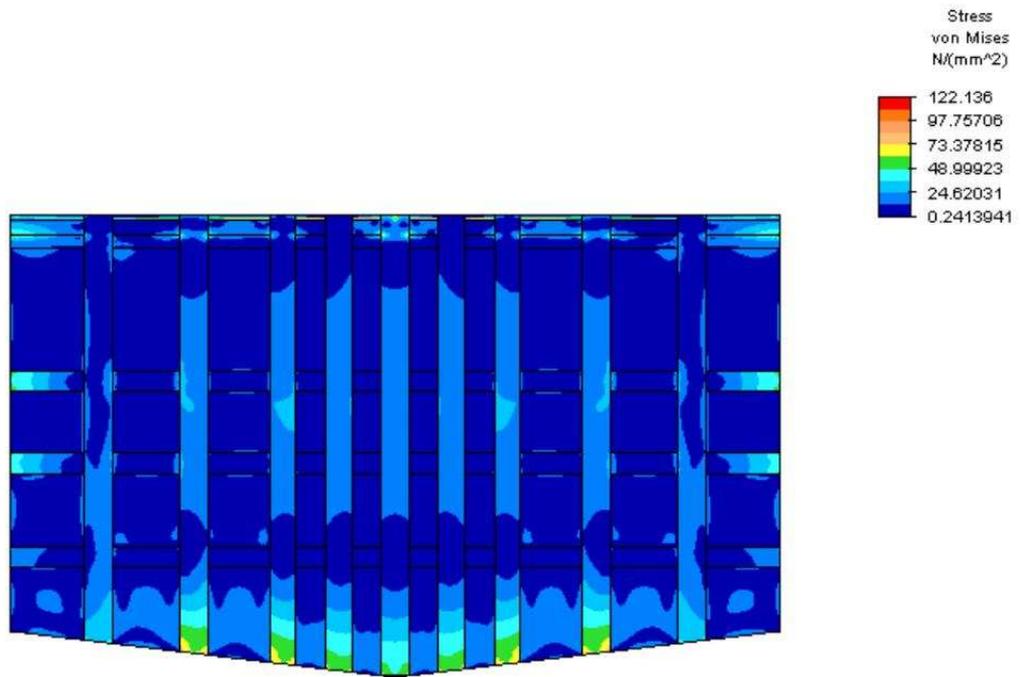


Figura 4.13 - Tensões atuantes na parede frontal original.

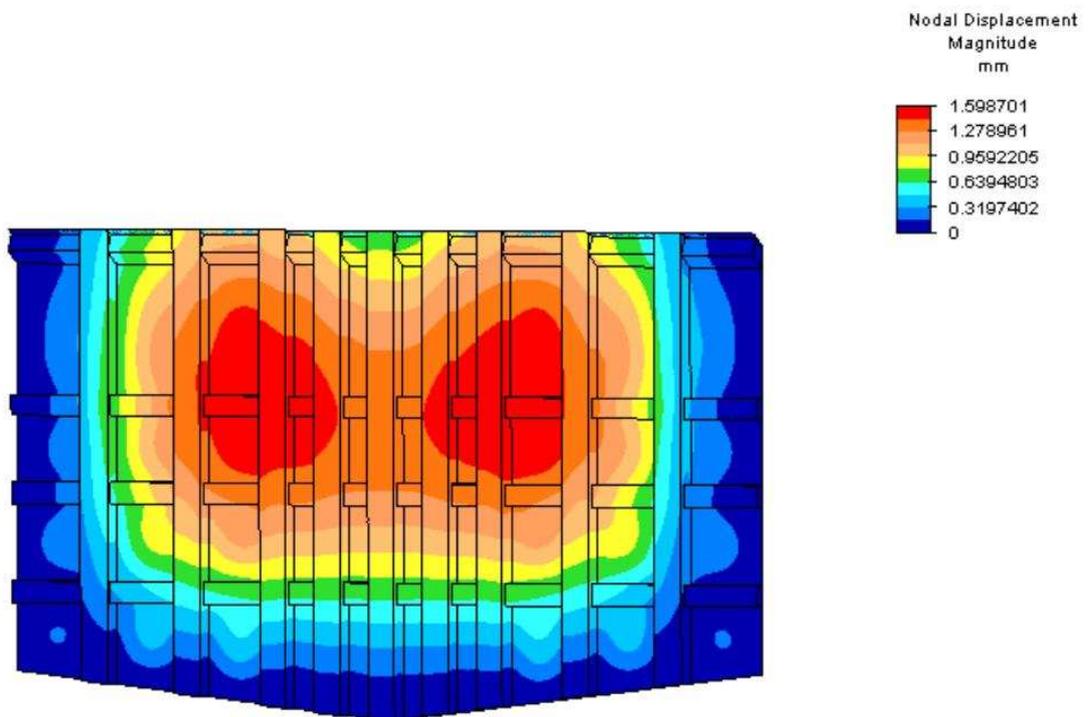


Figura 4.14 - Deslocamentos da parede frontal original.

4.5.4 Análise do perfil 1

Este é um perfil com curvatura simples, com raio de 5.710mm e sem vigas de reforço. O material utilizado é o aço Creusabro 8000SS, que possui limite de escoamento de 1.250MPa e limite de ruptura de 1.630MPa, com espessura de 4,7625mm(3/16”). Foram também restringidas as rotações e translações ao longo das arestas laterais e inferior. A Figura 4.15 apresenta o modelo com a malha utilizado nas análises, elaborado com 13.464 elementos tipo placa, quadrangulares e triangulares, e nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos, incluindo as tensões de Von Mises e os deslocamentos.

As tensões máximas ficaram em torno de 128MPa, o que demonstra que apesar da baixa espessura do material utilizado, se obteve um coeficiente de segurança da ordem de 9 para este perfil.

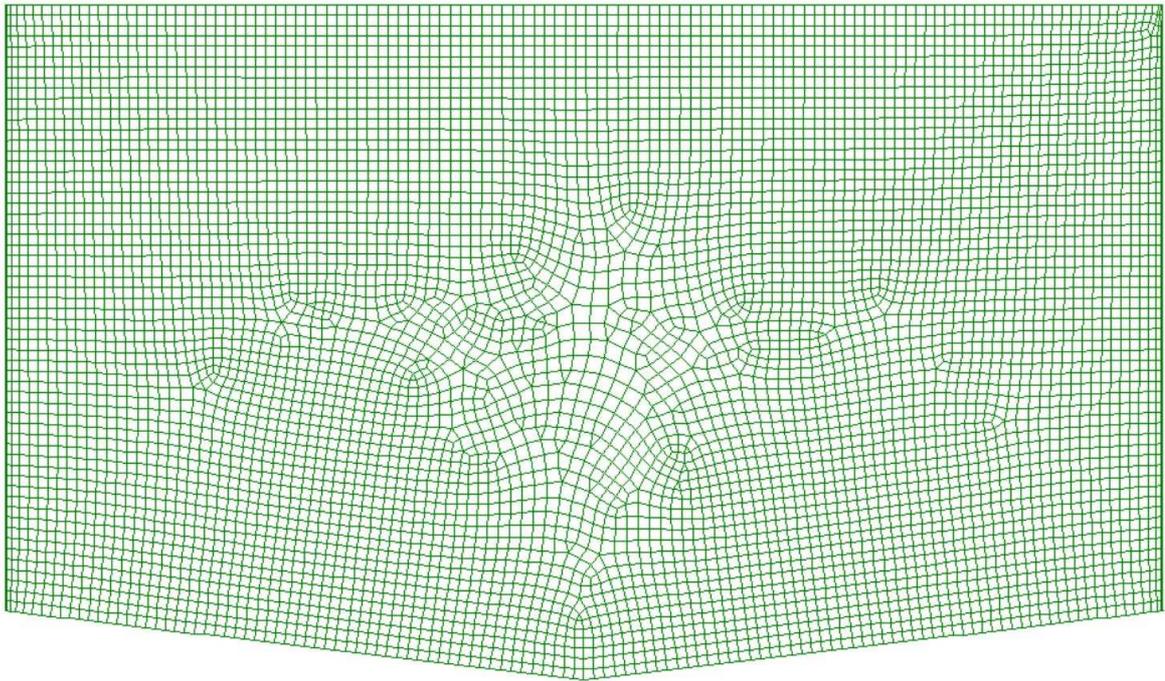


Figura 4.15 - Malha utilizada para análise da parede frontal com Perfil 1.

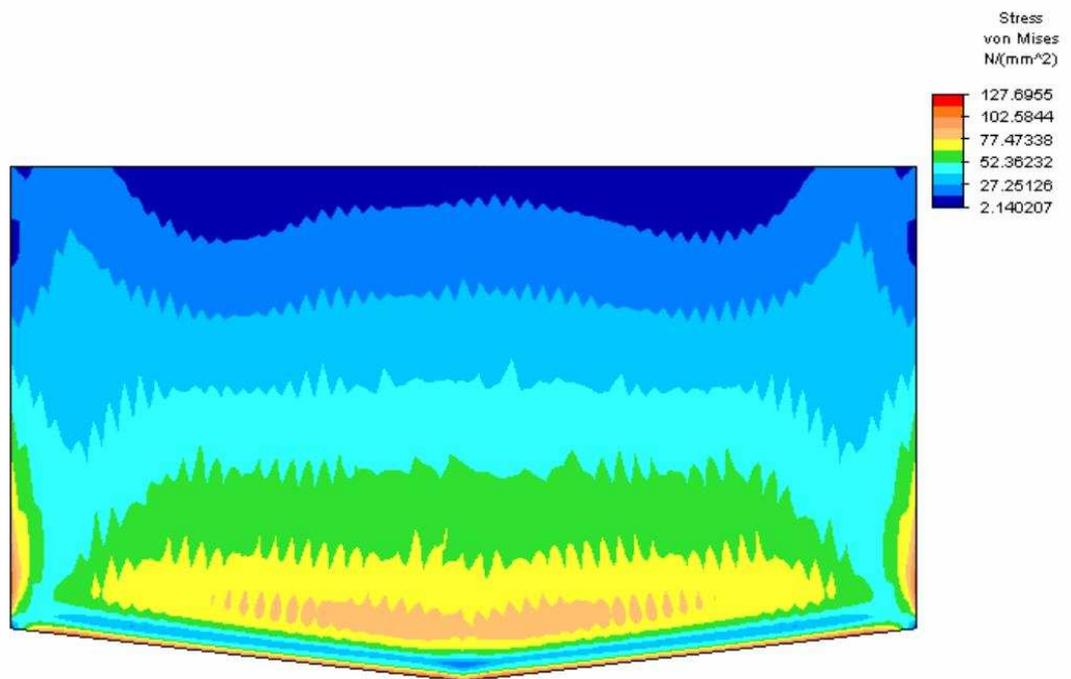


Figura 4.16 - Tensões atuantes na parede frontal com Perfil 1.

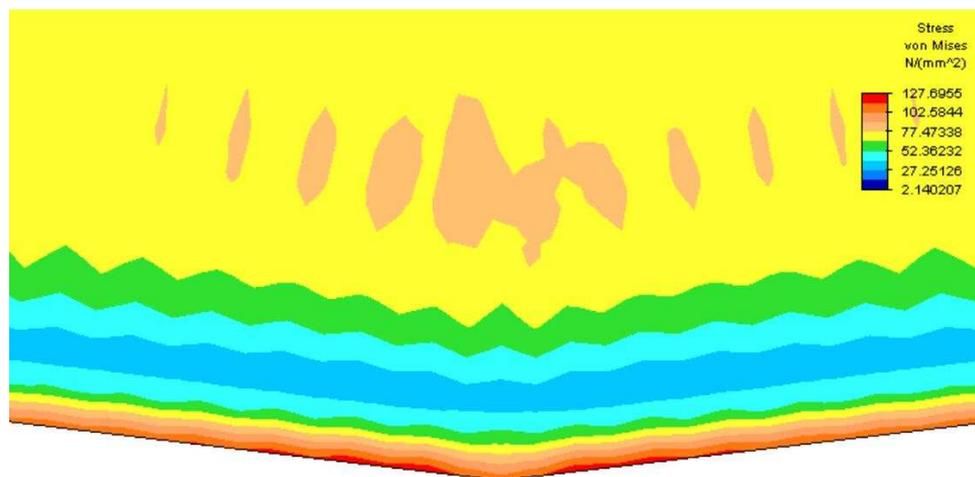


Figura 4.17 - Detalhe das tensões atuantes na parede frontal com Perfil 1.

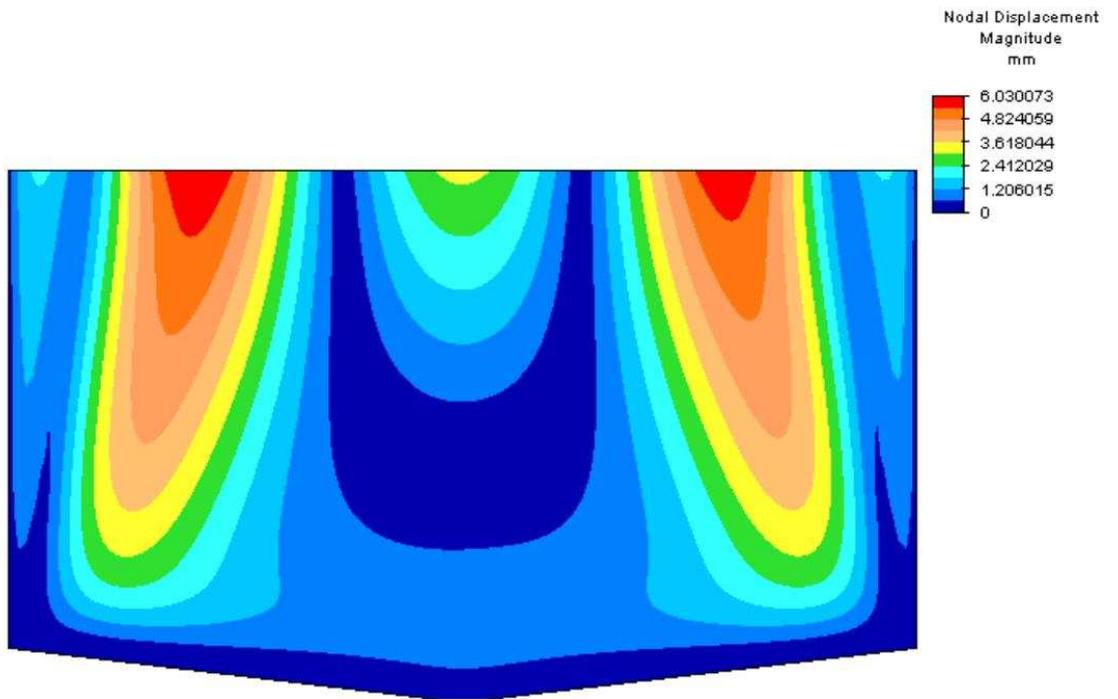


Figura 4.18 – Deslocamentos da parede frontal com Perfil 1.

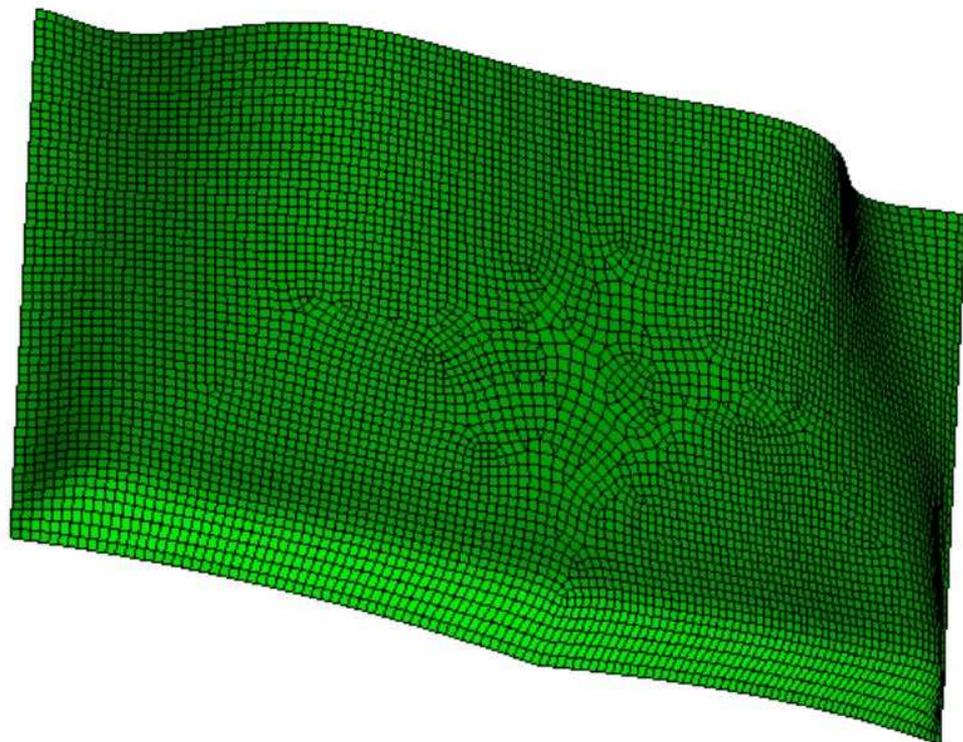


Figura 4.19 – Representação gráfica do Perfil 1 deformado

4.5.5 Análise do Perfil 2

Este é um perfil com curvatura semelhante à de uma calota esférica de seção toroidal, com raio maior de 5.710mm e raio menor (de concordância) de 342,6mm, sem vigas de reforço. Aqui também foi utilizado o aço Creusabro 8000SS, com espessura de 9,525mm(3/8"). Foram restringidas as rotações e translações ao longo das arestas laterais e inferior. A Figura 4.20 apresenta o modelo com a malha utilizado nas análises, elaborado com 14.162 elementos tipo placa, quadrangulares e triangulares, e nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos, incluindo as tensões de Von Mises e os deslocamentos.

Devido ao raio de concordância com as paredes laterais, e à carga aplicada, surgem tensões de tração nas arestas de ligação com as paredes laterais, o que fez com que fosse necessário utilizar uma espessura maior que a do Perfil 1, para manter o coeficiente de segurança dentro do limite proposto. As tensões máximas ficaram em torno de 240MPa, resultando num coeficiente de segurança da ordem de 5 para este perfil.

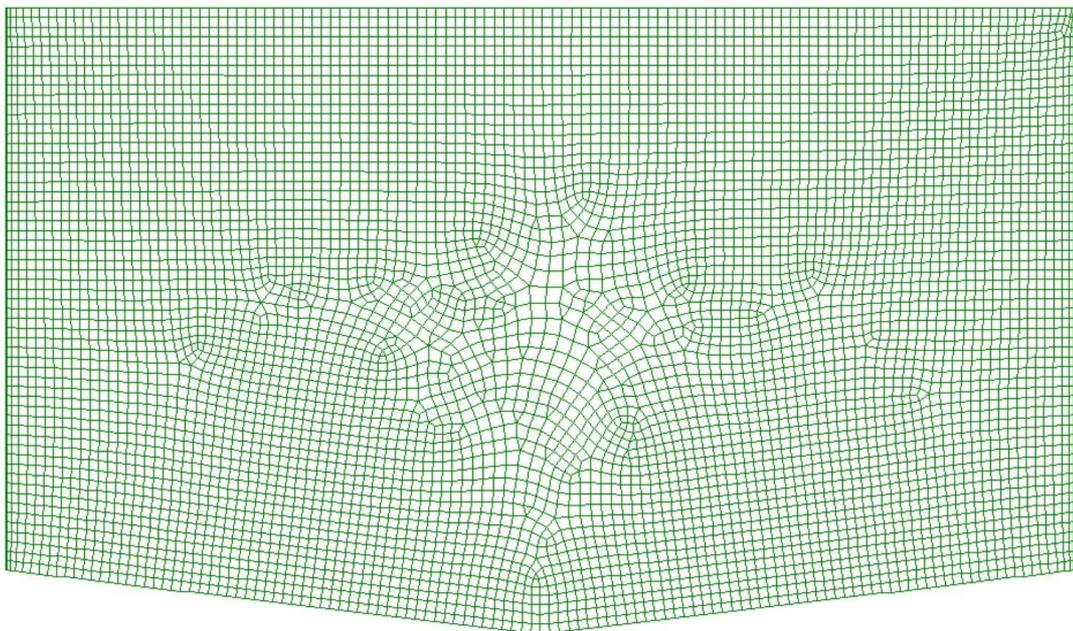


Figura 4.20 - Malha utilizada para análise da parede frontal com Perfil 2.

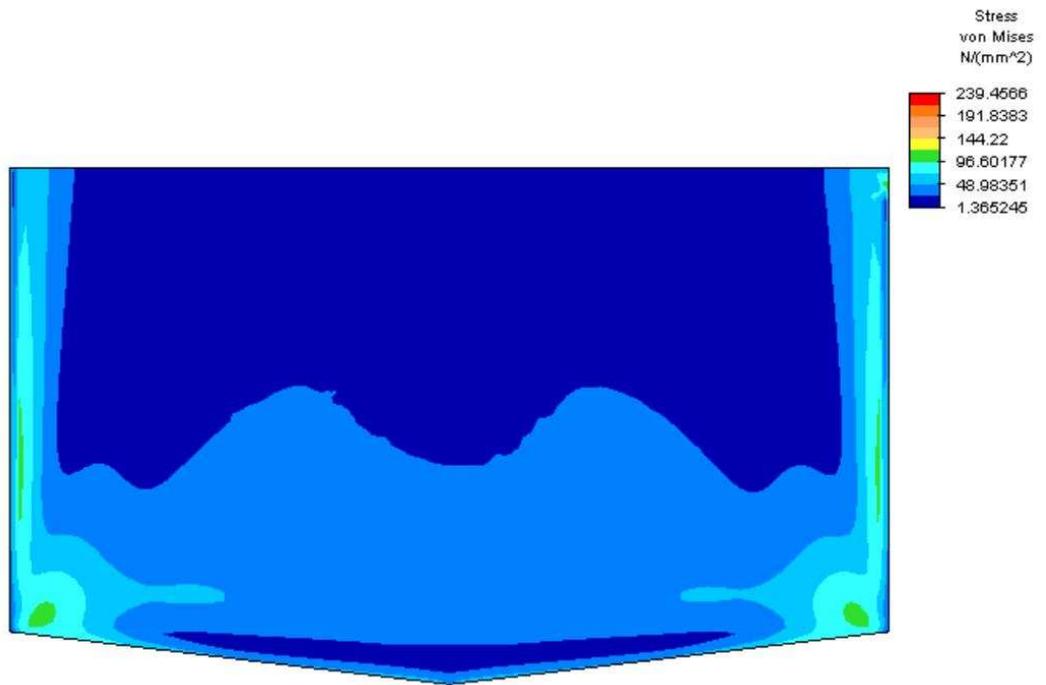


Figura 4.21 - Tensões atuantes na parede frontal com Perfil 2.

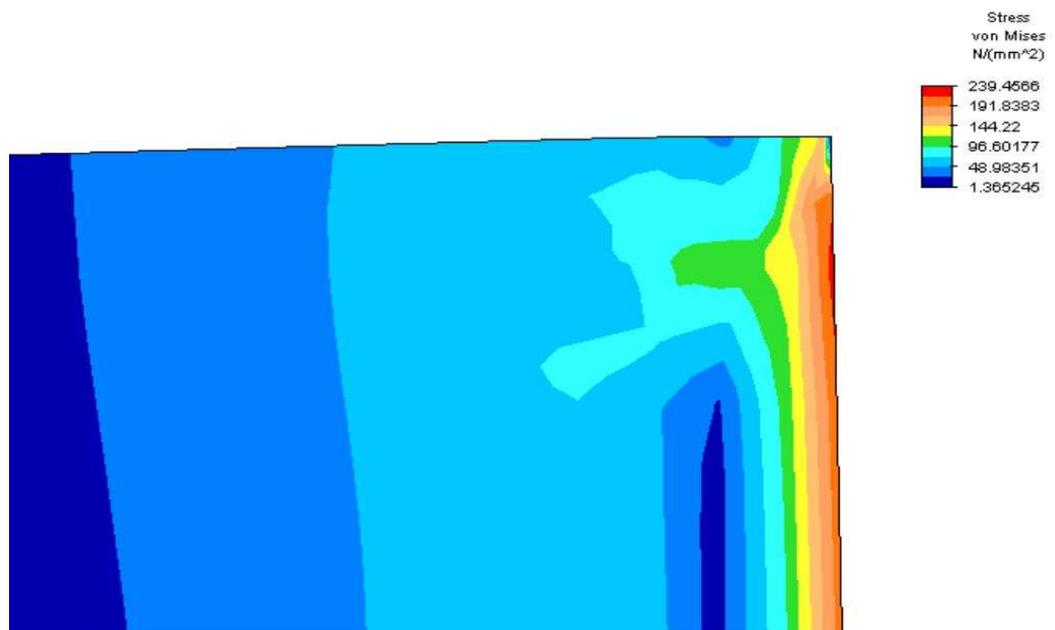


Figura 4.22 - Detalhe das tensões atuantes na parede frontal de Perfil 2.

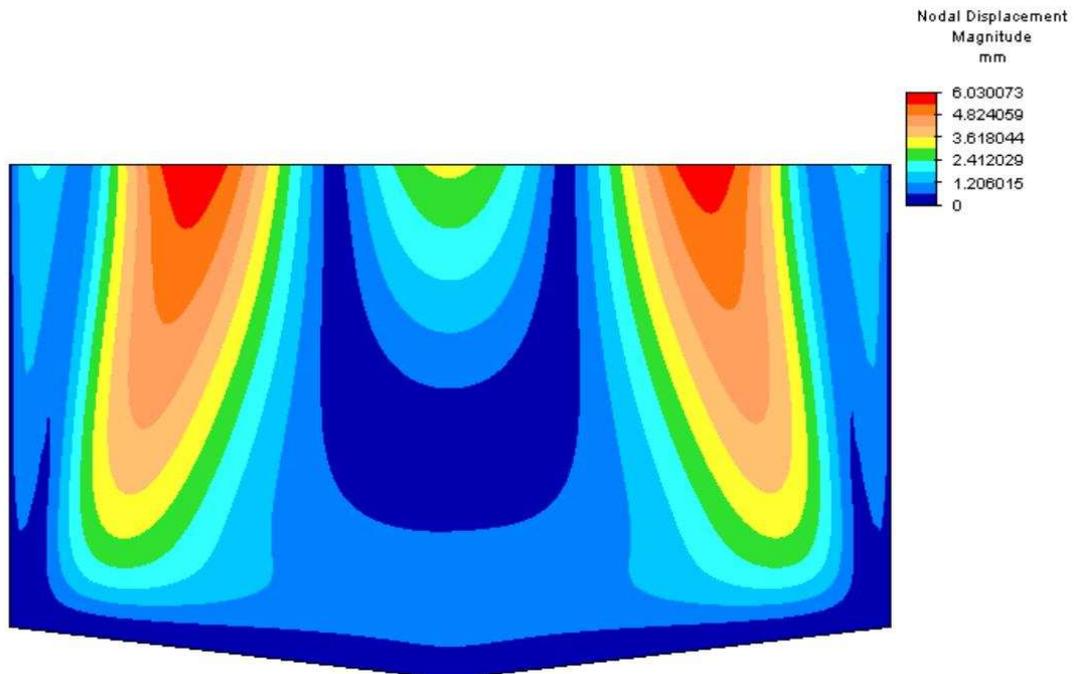


Figura 4.23- Deslocamentos da parede frontal de perfil 2.

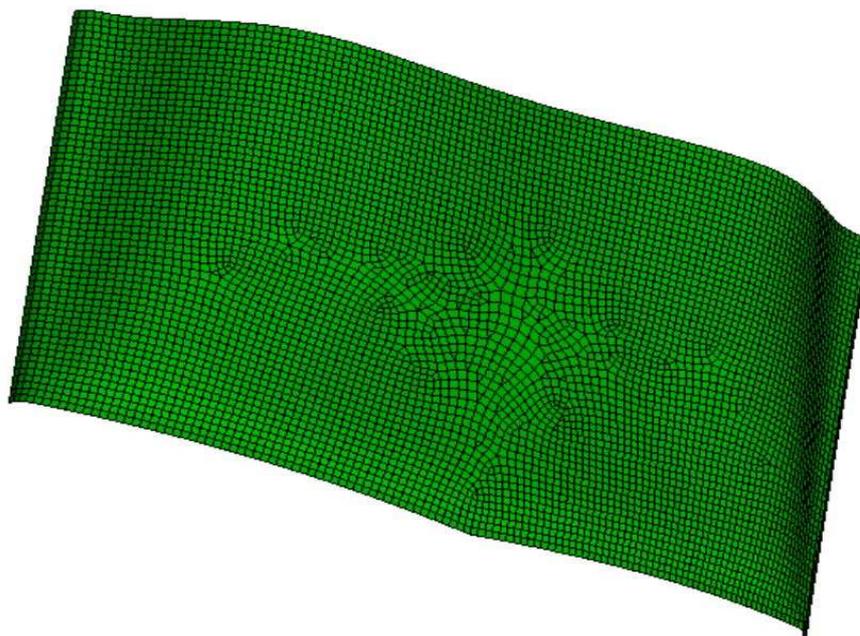


Figura 4.24 - Deslocamentos da parede frontal de Perfil 2 deformado.

4.5.6 Análise da Parede Lateral

O perfil da parede lateral é plano, sem vigas de reforço transversais, possuindo somente uma viga que contorna a aresta superior, sendo solidamente soldado à parede frontal e ao fundo. O material utilizado também é o aço Creusabro 8000SS, com espessura de 7,9375mm(5/16”). Foram restringidas as rotações e translações ao longo da aresta lateral, onde fica ligada à parede frontal, e na aresta inferior. A Figura 4.25 apresenta o modelo com a malha utilizado nas análises, elaborado com 148.864 elementos tipo placa, quadrangulares, e nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos, incluindo as tensões de Von Mises e os deslocamentos.

As tensões máximas ficaram em 226MPa, resultando num coeficiente de segurança da ordem de 5,5 para a parede lateral.

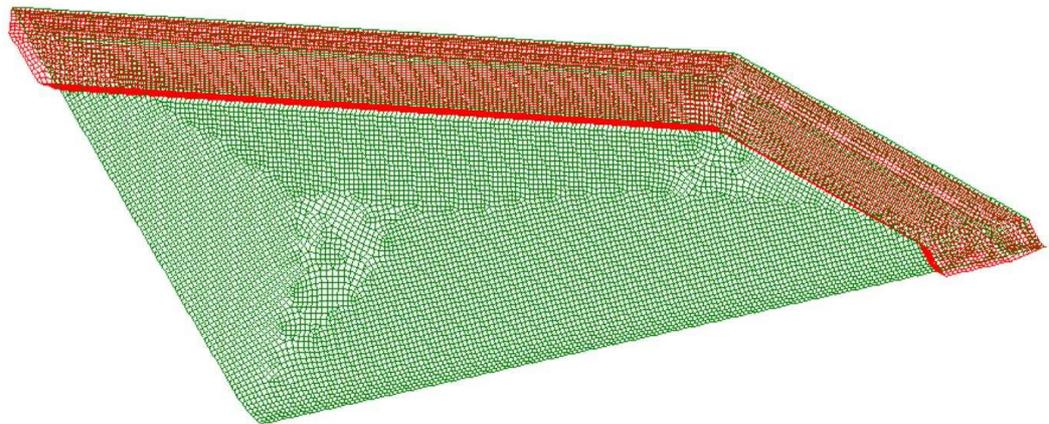


Figura 4.25 – Malha utilizada na análise da parede lateral proposta.

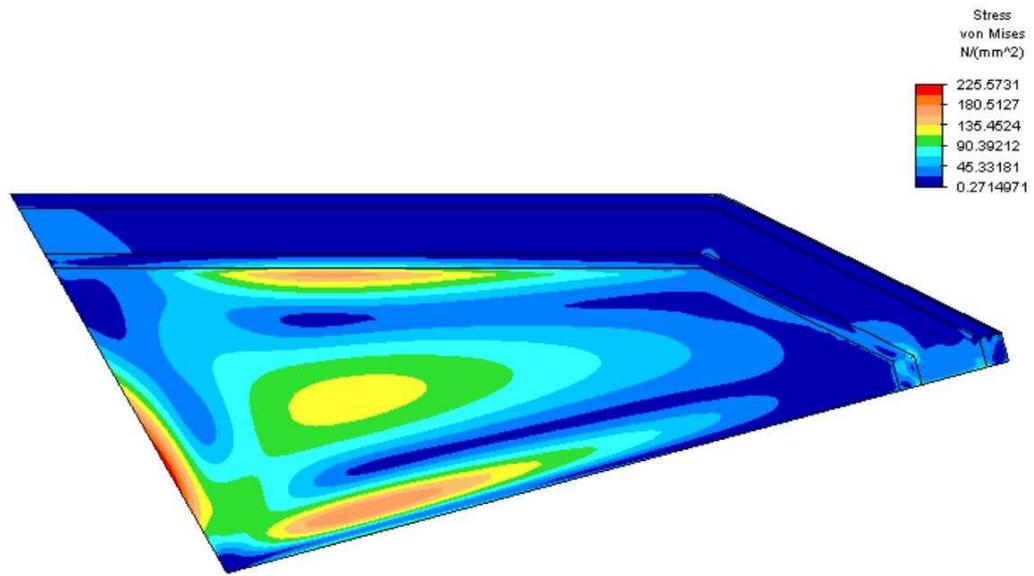


Figura 4.26 - Tensões atuantes na parede lateral proposta.

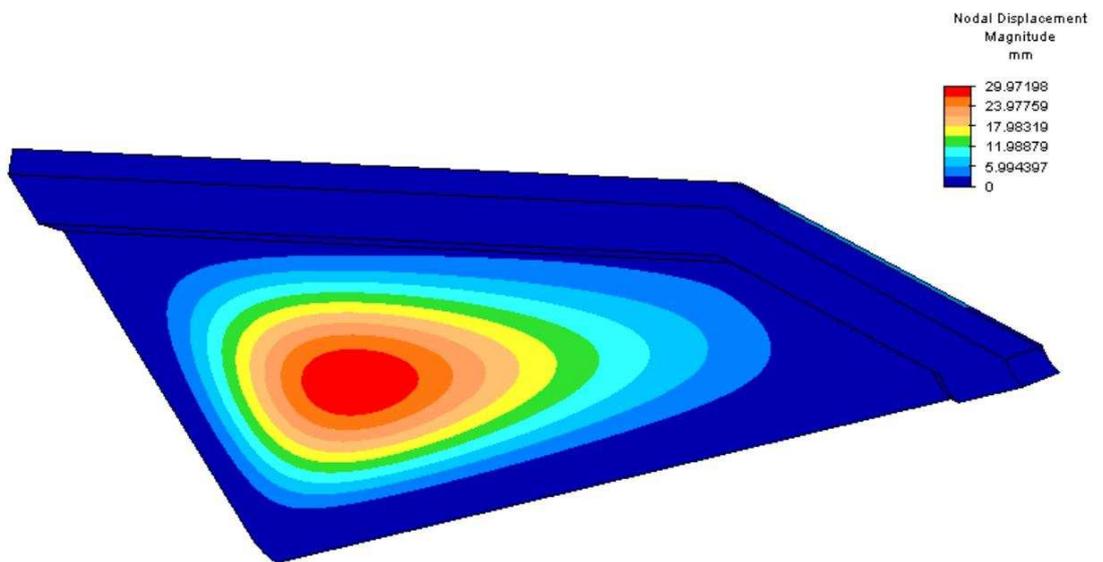


Figura 4.27 – Deslocamentos da parede lateral proposta (transversais à parede).

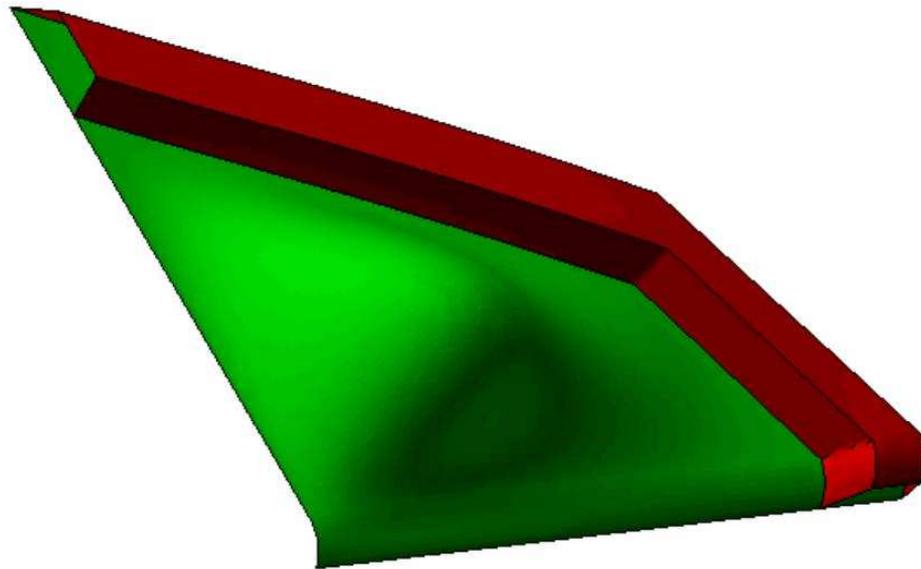


Figura 4.28 – Representação gráfica da parede lateral deformada.

4.5.7 Resumo dos Resultados

Os pontos principais das análises dos vários perfis estão resumidos na Tabela 4.1. Neste estudo, a tensão máxima linearizada em relação ao limite de escoamento foi utilizada como critério para a avaliação da integridade e desempenho dos perfis.

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados das análises por elementos finitos.

Perfil	Tensão Máx. (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Tensão/ Lim. Escoam. (%)	Deformação Máx. (mm)
Original	122,13	434	28,14%	1,59
Perfil 1	131,75	1.250	10,54%	2,39
Perfil 2	245,76	1.250	19,66%	5,99
Lateral	226,23	1.250	18,09%	29,86

Da análise dos resultados, conclui-se que o perfil 1 é o que apresenta melhor desempenho, sendo este o perfil selecionado para a construção da parede frontal da caçamba proposta a seguir.

4.6 A Caçamba Completa

Após a definição do perfil frontal e lateral a ser utilizado, foi desenhada a caçamba completa, com uma aba em forma de membrana invertida.

A viga em forma de caixão que contorna as paredes laterais, se estende pela lateral da aba, pela frente, contornando a caçamba, e será ligada a uma viga existente na extremidade do fundo desta. As Figuras 4.29 e 4.30 mostram uma representação gráfica da caçamba completa.

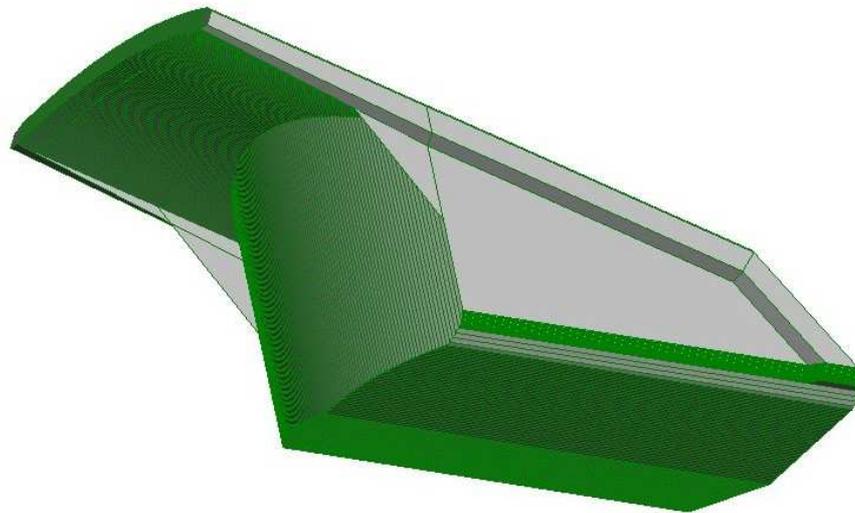


Figura 4.29 - Perspectiva com vista inferior da caçamba proposta.

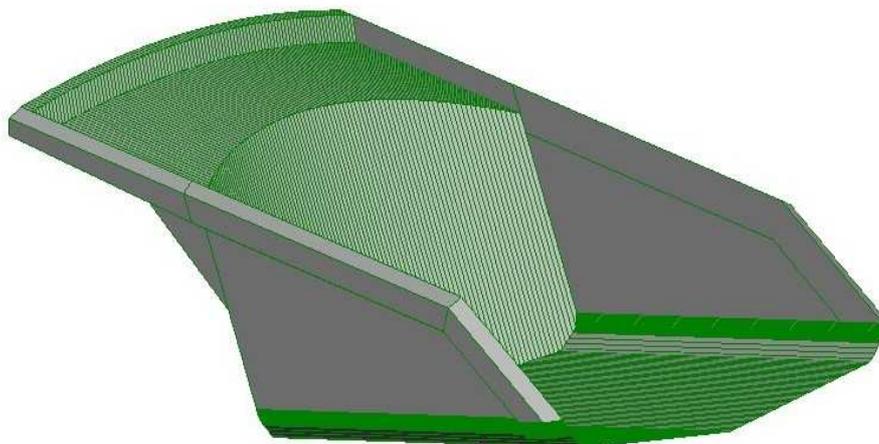


Figura 4.30 - Perspectiva com vista superior da caçamba proposta.

Como a ação do carregamento proposto na parede frontal induz cargas de tração nas paredes laterais e vice-versa, e como a existência da aba confere certa rigidez à aresta superior da parede frontal, foi elaborado modelo de meia caçamba completa em elementos finitos, incluindo o fundo, para análise e verificação da interação dos diversos carregamentos sobre a caçamba proposta como um todo.

Para a verificação da integridade da aba, foi considerada sobre esta uma pressão distribuída de $4,378 \times 10^{-3}$ MPa, que confere uma carga total de 5.000Kgf. Esta consideração é necessária, pois embora a aba não se destine ao carregamento de material, é comum acontecer que alguma carga seja depositada sobre ela durante as operações de carregamento. Para as demais paredes foi considerado o carregamento proposto anteriormente.

Nesta análise verificou-se que a espessura da parede frontal deveria ser aumentada, face aos esforços impostos pelas paredes laterais, passando de 4,7625mm(3/16”) para 6,35mm(1/4”). A espessura utilizada nas chapas da aba foi de 4,7625mm(3/16”), e nas vigas que a contornam de 9,525mm(3/8”).

A Figura 4.31 apresenta o modelo com a malha utilizado nas análises, elaborado com 601.657 elementos tipo placa, quadrangulares e triangulares, e nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos, incluindo as tensões de Von Mises e os deslocamentos.

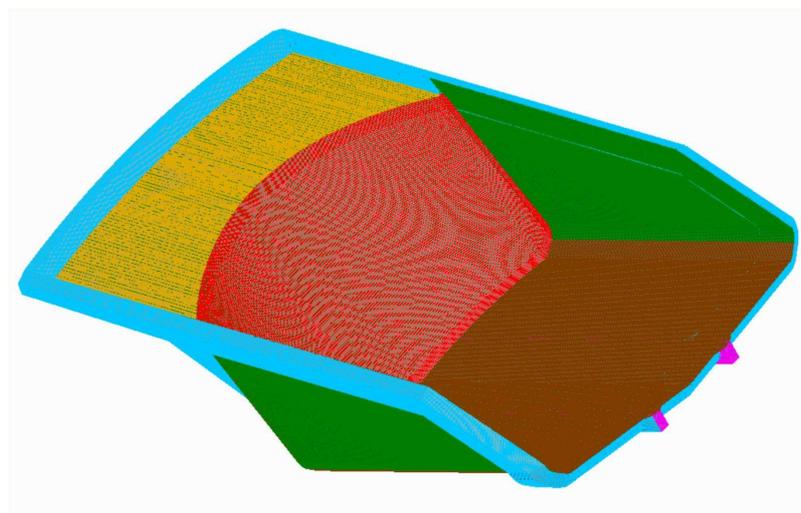


Figura 4.31 – Malha utilizada na análise da caçamba completa.

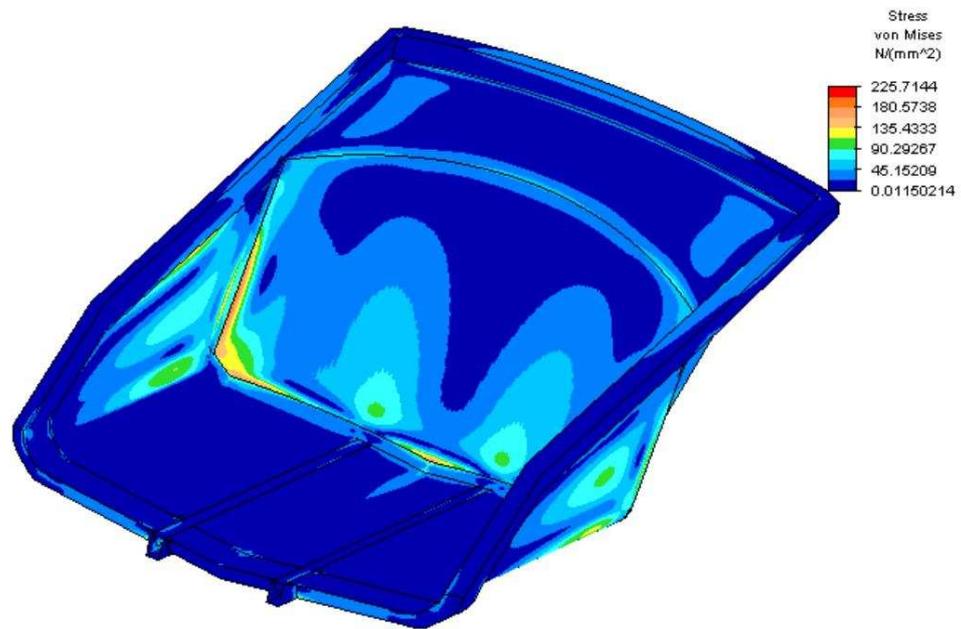


Figura 4.32 – Tensões atuantes na caçamba (vista geral).

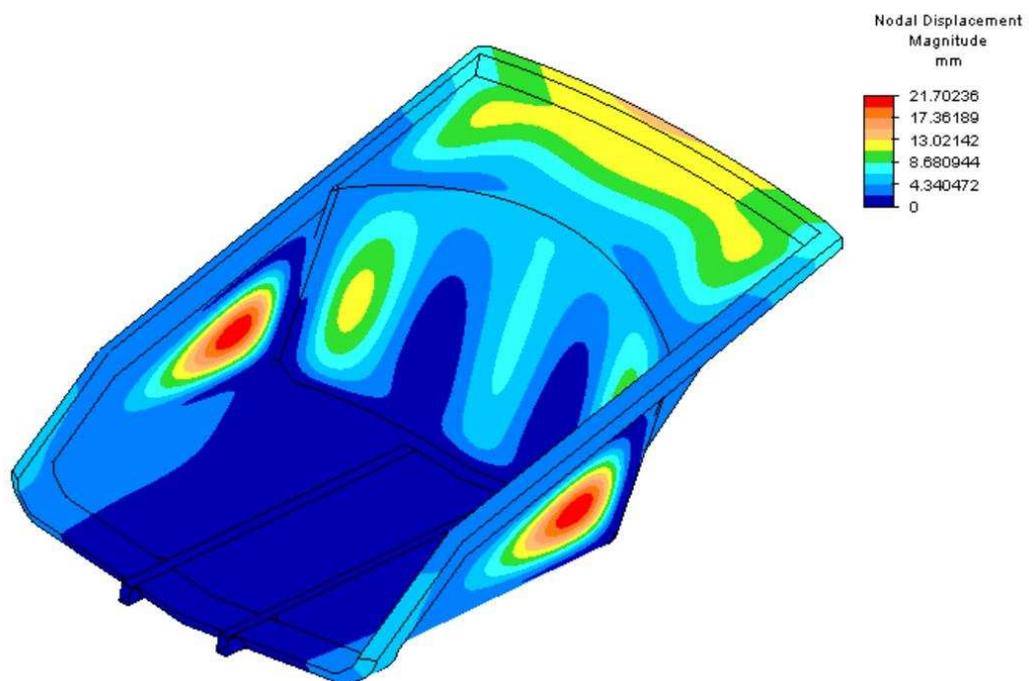


Figura 4.33 - Deslocamentos para a caçamba completa (vista geral).

Durante as análises verificou-se que havia pontos de concentração de tensões, os quais foram sucessivamente sendo eliminados através da introdução de elementos tais como reforços e nervuras, ou da alteração da espessura no local.

Após a introdução das alterações citadas acima, a tensão máxima ficou em 226MPa, o que garante um coeficiente de segurança mínimo de 4,55. Esta tensão ocorreu no centro da caçamba, na aresta de ligação entre a aba e a parede frontal. Para a aba, as tensões máximas ficaram abaixo de 100MPa, obtendo-se um coeficiente de segurança maior que 10, o que garante a segurança do operador.

4.7 Redução do Peso da Caçamba

O peso da caçamba original sem o fundo é de 8.638Kgf, enquanto que para o modelo proposto de caçamba é de 4.853Kgf. Estes pesos foram obtidos dos desenhos em CAD para a caçamba original e do modelo para análise em elementos finitos (ALGOR) para a caçamba proposta, e não consideram as soldas e chapas de desgaste.

Verifica-se portanto uma redução de 3.785Kgf no peso da caçamba, do que se conclui que se poderia obter uma carga transportada maior que a proposta inicialmente, que foi de 110ton.

Assim, considerando-se o acréscimo na carga de 1.136Kgf, que passou de 108.864Kgf para 110.000Kgf, e a redução de 3.785Kgf no peso da caçamba, concluí-se que o caminhão trabalhará com uma folga operacional de 2.649Kgf.

Como o volume de soldas na caçamba proposta é significativamente menor que o da caçamba original, esta redução na prática é maior ainda. A Tabela 4.2 apresenta um resumo destes pesos:

Tabela 4.2 – Comparação dos pesos da caçamba original com a caçamba proposta.

ELEMENTO	PESO(Kgf)	OBSERVAÇÕES
Caçamba completa original	22.359	Obtido no CAD, sem soldas e chapas de desgaste
Fundo da caçamba original	13.721	Obtido no CAD, sem soldas e chapas de desgaste
Laterais + Frente + Aba da caçamba original	8.638	
Laterais + Frente + Aba da caçamba proposta	4.853	Obtido no ALGOR, sem soldas e chapas de desgaste
Redução de peso da caçamba	3.785	
Carga nominal original	108.864	Dado do fabricante
Carga proposta	110.000	
Acréscimo de carga	1.136	
Redução no peso do conjunto caçamba + carga	2.649	

4.8 Estudo de Viabilidade Econômica

O estudo de viabilidade econômica foi feito utilizando a metodologia de Substituição de Equipamentos.

Para este estudo foram utilizadas as seguintes informações e premissas:

- O caminhão é o HAULPAK 120, com capacidade de carga de 120 toneladas curtas, o que equivale a 108,864 toneladas métricas, que atualmente transporta em média 100ton de xisto, e passará a transportar com a nova caçamba 110ton;
- A vida útil projetada para a caçamba proposta é de 10 anos, considerando-se aqui a taxa de desgaste no material de revestimento da caçamba atual;

- Os custos operacionais médios do caminhão Haulpak 120, durante o ano de 2003, foram de R\$323,52/h operada.
- O número médio de horas trabalhadas de cada caminhão da frota no ano de 2003, foi de 2.929 horas;
- O número médio de toneladas transportadas por caminhão em 2003 foi de 437.312ton, equivalendo a uma produtividade horária média de 149,304 ton/h;
- Com o aumento de capacidade 10%, a produtividade horária também aumentaria em 10%, passando para 164,234ton/h, sendo necessário operar 2.663h, ou seja haveria uma redução de 266h trabalhadas, o que equivale a uma redução no custo operacional de R\$ 86.056,32/ano por caminhão.
- Para a execução das modificações na caçamba, ou seja, construção e montagem de novas paredes laterais, parede frontal e aba, será necessário adquirir cerca de 5.500Kg de chapa, devido às perdas no corte, que ao preço unitário médio de R\$ 14,70/Kg, perfaz um total de R\$ 80.850,00. Também será necessário adquirir 300Kg de eletrodo AWS E-11018M, de alta resistência, ao preço de R\$ 11,33/Kg, num total de R\$ 3.399,00, enquanto que os serviços de fabricação e montagem custarão cerca de R\$50.000,00 por caçamba. Assim o custo total das modificações em uma caçamba será de aproximadamente R\$ 134.249,00.

Considerando os dados informados acima, o fluxo de caixa para a caçamba proposta ficou conforme abaixo:

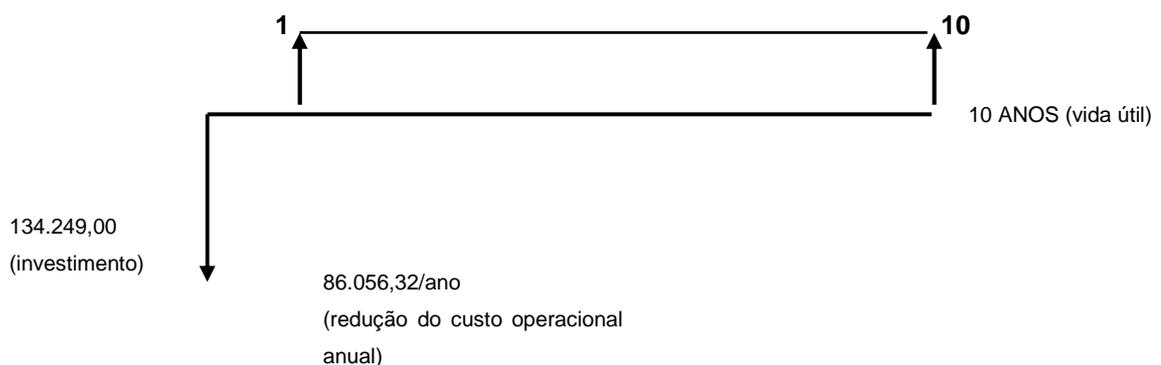


Figura 4.34 - Fluxo de caixa para a caçamba proposta.

Obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 4.3 - Comparativo Caçamba Original x Caçamba Proposta

	PROPOSTA	ORIGINAL
Chapas	80.850,00	
Eletrodos	3.399,00	
Serviços	50.000,00	
Investimento Total	134.249,00	
Custo Operacional Anual	861.533,76	947.590,08
Vida Econômica (anos)	10	10
Taxa Mín. Atratividade	12%	12%
Custo Médio Anual	885.293,71	947.590,08
Economia em 10 anos	622.963,73	

Obs.: Para o estudo de viabilidade econômica foram utilizados os dados acima e a função PGTO do Excel (Planilha eletrônica do Windows), que reduz o fluxo de receitas e despesas a uma série uniforme de pagamentos anuais com o uso da taxa mínima de atratividade, ou seja, obtém-se o Custo Médio Anual Equivalente para o fluxo de caixa considerado. A sintaxe desta função é PGTO (taxa;nper;vp;vf;tipo).

Considerações a favor da caçamba proposta que não puderam ser quantificadas neste estudo:

- O volume de solda é bastante reduzido , o que permite uma redução maior de peso do que a calculada;
- Como não haverá chapas de desgaste, e sim as chapas que têm contato com o material terão sua espessura aumentada, e por serem de material mais resistente ao desgaste que o atualmente utilizado, haverá uma redução de peso adicional;
- Com o aumento de produtividade seria possível reduzir um caminhão da frota;

Capítulo 5

Resultados e Conclusões

5.1 Discussão dos Resultados

Da análise dos perfis verificou-se que o Perfil 1, que é um perfil de simples curvatura, é o que apresentou melhor desempenho quando aplicado o carregamento proposto. Este mesmo carregamento quando aplicado ao Perfil 2, devido à curvatura de concordância com as paredes laterais, gerou tensões de tração no plano destas, sendo necessário um aumento substancial da espessura para manter o coeficiente de segurança dentro do valor proposto.

Porém, em face de dificuldades na utilização do software de elementos finitos, o desempenho deste perfil não foi mais bem explorado, visto que seria necessário decrescer o carregamento gradualmente através da curvatura de concordância, para que houvesse uma transição entre o carregamento na parede frontal que apresenta pressões maiores, para o carregamento nas paredes laterais, com pressões menores.

Também seria necessário explorar o comportamento do Perfil 2 quando ligado às paredes laterais e à aba da caçamba.

Por outro lado, o Perfil 1, é de fabricação e instalação mais simples, fato que é muito importante quando considerados os aspectos de custo e manutenção, visto que o período de troca da parede frontal será menor com a utilização deste perfil.

5.2 Conclusões

O desenvolvimento de um novo tipo de caçamba para caminhões fora-de-estrada de grande porte, projetado utilizando chapas de aço de alta resistência e componentes em forma de membrana, foi apresentado neste estudo. A sua performance foi avaliada através da análise das paredes laterais e frontal, quando cargas estáticas e dinâmicas são aplicadas.

Deste estudo conclui-se que:

I. Quanto a Abordagem:

- i. Existem diversas empresas especializadas em caçambas de caminhões fora-de-estrada, que têm desenvolvido projetos inovadores;
- ii. A maioria dos novos projetos utiliza chapas de aço de alta resistência e paredes curvas (em forma de membrana);
- iii. Estudos e projetos anteriores demonstraram que é possível aumentar a carga de xisto transportada por um caminhão Haulpak 120, e melhorar a distribuição de carga entre os eixos;
- iv. Caçambas com projetos tradicionais, desenvolvidos há mais de 10 anos, possuem em geral grande quantidade de componentes estruturais e chapas de desgaste, resultando num peso excessivo;
- v. As chapas de desgaste podem representar mais de 30% do peso de uma caçamba;
- vi. Os ângulos de repouso do material são diferentes em diferentes partes da carga;
- vii. A norma SAE Standard J1363, superestima o volume de material a ser transportado numa caçamba de caminhão fora-de-estrada, resultando no transporte de carga abaixo da nominal, e posicionamento inadequado do centro de gravidade da carga.

II. Quanto a Otimização do Volume e do Centro de Gravidade:

- i. O peso específico do xisto dentro da caçamba de uma caminhão fora-de-estrada é da ordem de 1.464 Kgf/m^3 , menor do que se supunha;
- ii. É possível desenvolver um conjunto de equações, com três variáveis, que represente adequadamente o volume e o centro de gravidade da carga dentro da caçamba de um caminhão fora-de-estrada;
- iii. Aplicando técnicas de otimização é possível encontrar-se uma combinação adequada para os valores destas variáveis, que maximiza a carga a ser transportada e posiciona adequadamente o seu centro de gravidade;

III. Quanto ao Estudo do Perfil da Parede Frontal:

- i. O modelamento das cargas nas paredes da caçamba de um caminhão fora-de-estrada é um assunto pouco estudado, e raras são as referências encontradas na literatura.
- ii. O modelamento de carga proposto, baseado na teoria da Mecânica dos Solos, acrescido dos esforços dinâmicos, representa adequadamente o carregamento existente nas paredes de uma caçamba.
- iii. A parede original da caçamba, quando submetida à ação do carregamento proposto, apresenta coeficiente de segurança da ordem de 3,5;
- iv. Uma parede frontal tipo membrana de curvatura simples e com espessura de $6,35\text{mm}(1/4'')$, proporciona aceitável resistência durante a frenagem do caminhão. Quando submetida à ação do carregamento proposto, apresenta coeficiente de segurança da ordem de 9;
- v. Uma parede frontal tipo membrana com curvatura semelhante à de uma calota esférica de seção toroidal, e com espessura de $9,525\text{mm}(3/8'')$, proporciona aceitável resistência durante a frenagem do caminhão. Quando submetida à ação do carregamento proposto, apresenta coeficiente de segurança da ordem de 5;

- vi. Uma parede lateral plana, com somente uma viga contornando sua aresta superior, proporciona aceitável resistência nos trajetos em curva. Quando submetida à ação do carregamento proposto, apresenta coeficiente de segurança da ordem de 5,5;
- vii. Em termos gerais, o perfil em forma de membrana de simples curvatura é o mais promissor entre os perfis considerados.
- viii. A ação dos diversos carregamentos sobre a caçamba proposta como um todo, produz tensões que combinadas, permitem que se trabalhe com um coeficiente de segurança da ordem de 4,5;
- ix. Um perfil da parede frontal em forma de membrana, combinado com um novo projeto das paredes laterais e da aba, pode reduzir o peso da caçamba de um caminhão fora-de-estrada, permitindo que a capacidade nominal seja ampliada sem sobrecarregar qualquer componente do caminhão;
- x. A caçamba proposta permite que o caminhão opere com uma folga operacional de 2.649 Kgf, transportando uma carga de 110.000Kgf, ou seja, uma carga 10.000Kgf acima da transportada atualmente;
- xi. O estudo de viabilidade econômica mostrou que o retorno do investimento após a execução das alterações propostas, se dará em 2,15 anos.

Adicionalmente, o projeto desta caçamba também oferece outras vantagens sobre as caçambas convencionais:

- i. Elimina o uso de chapas de desgaste adicionais nas paredes laterais e frontal;
- ii. Reduz os problemas associados com trincas de fadiga devido à significativa redução do número de soldas na sua construção;
- iii. Oferece a possibilidade de rápida substituição das suas partes, que vão ligadas ao fundo da caçamba e entre si somente pelas arestas.

Capítulo 6

Sumário e Orientações para Futuras Pesquisas

6.1 As Principais Contribuições Desta Dissertação

Este trabalho apresentou uma nova proposta para o modelamento do carregamento nas paredes laterais de caçambas que equipam caminhões fora-de-estrada, bem como uma nova proposta de projeto, onde paredes em forma de membrana são utilizadas em substituição às tradicionais, que são planas e reforçadas com vigas.

Também foram desenvolvidas equações para o cálculo da carga e do centro de gravidade, e com a aplicação de técnicas de otimização foi possível chegar a um valor ótimo para estas duas grandezas.

Os conceitos desenvolvidos foram aplicados a um projeto de caçamba para o caminhão Haulpak 120, que opera na mina de xisto da PETROBRAS em São Mateus do Sul, Paraná. Os resultados obtidos indicam ser economicamente viável as modificações propostas, bem como foi possível chegar-se a uma carga transportada acima da carga nominal estabelecida pelo fabricante do caminhão.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, muitas foram as constatações que poderão contribuir para a elucidar aspectos relacionados ao carregamento nas paredes de

uma caçamba de caminhão fora-de-estrada, e também quanto à distribuição da carga na caçamba. Porém, algumas propostas que aqui foram desenvolvidas representam inovações que sem dúvida representam contribuições para o desenvolvimento desta área de conhecimento, as quais são:

- i. Proposição de modelamento para o carregamento nas paredes da caçamba de um caminhão fora-de-estrada;
- ii. Proposição de uma metodologia para otimização da carga e do centro de gravidade de um caminhão fora-de-estrada.

6.2 Lista de Orientações para Pesquisa Futura

O estudo do modelamento do carregamento nas paredes da caçamba de um caminhão fora-de-estrada, é uma área que merece ser mais bem explorada, face às possibilidades de ganho devido ao aumento da carga transportada e redução dos custos de fabricação e manutenção. Aspectos que poderão ser mais bem explorados no futuro são:

- i. Analisar mais detalhadamente o Perfil 2, perfil com curvatura simples e raio de concordância com as paredes laterais, através da aplicação de carregamento que reduza gradualmente as pressões, quando da transição da parte frontal para as laterais, e explorar o seu comportamento quando aplicado na caçamba como um todo;
- ii. Verificar as tensões reais, através de medição de campo utilizando técnicas de extensometria, de modo a comparar com os resultados obtidos nas análises por elementos finitos;
- iii. Medir as pressões aplicadas sobre as paredes da caçamba, através da utilização de placas livres, alinhadas com as superfícies internas da caçamba, e suportadas por dispositivos capazes de medir força, tais como cilindros hidráulicos ou cristais piezelétricos, e comparar os resultados com os do modelo de carregamento proposto.

- iv. Aplicar a Dinâmica Veicular para modelamento das cargas dinâmicas.
- v. Aprimorar o estudo de viabilidade econômica.

Referências Bibliográficas

- [1] ATLAS/MAXTER products Catalog.
- [2] Belegundu, A. D., Chandrupatla, T. R., “Optimization Concepts and Applications in Engineering”, Prentice Hall, New Jersey, (1999).
- [3] Caputo, H. P., “Mecânica dos Solos e Suas Aplicações”, 6ª Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora (2000).
- [4] Casas, W. J. P., “Aumento da Capacidade, Deslocamento do Centro de Gravidade e Redução do Peso das Caçambas do Caminhão Fora de Estrada Modelo Haulpak 120C da Mina de Xisto,” Universidade Federal do Paraná (1999).
- [5] DICSА HI-LOAD – Light Weight Bodies Catalog (July 2000).
- [6] Duratray International, www.duratray.com, em 20/07/2003.
- [7] Fenton, J., Handbook of Vehicle Design Analysis, SAE – Society of Automotive Engineers, Inc., ISBN ().
- [8] Jenike, A. W., Elsey, P. J., Wooley, R. H., “Flow Properties of Bulk Solids” (1960).
- [9] Jenike, A. W., “Storage and Flow of Solids”, Bulletin No. 123 of the Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA (April 1986).
- [10] KOMATSU Mining Systems, INC. – 530M Bodies Bulletin (July 2000).

- [11] Philippi – Hagenbuch Inc., Correspondence from November 13, 1996.
- [12] Poh, K. W., Dayansa, P. H., Dickerson, A. W., Thomas, I. R., “Steel membrane floors for bodies of large rear-dump mining trucks”, *Finite Elements in Analysis and Design* 32 141-161 (1999).
- [13] SAE J1363, Capacity Rating – Dumper Body and Trailer Body (November 1995).
- [14] Silva, T. D. N., Casas, W. J. P., “Modelagem da Distribuição de Pressões em Uma Caçamba”, UFPR, (2001).
- [15] Soldering Comércio e Indústria Ltda.: www.soldering.com.br , em 18/10/2003.
- [16] Trinity Industries, www.trinitybridge.com, em 26/06/2003.
- [17] Tschebotarioff, G. P., “Fundações, estruturas de Arrimo e Obras de Terra”, McGraw-Hill, São Paulo (1978).
- [18] Tsytoovich, M., “Soil Mechanics”, second edition, Mir Publishers, Moscow (1983).
- [19] WABCO – CONSTRUCTION AND MINING EQUIPMENT, Specifications of the Model 120C Electric Haulpak Truck.
- [20] Westech Custom Bodies, www.wstch.com, em 18/06/2003.
- [21] Whalen, D., Obaia, K., “Effect of Oil Sand Operations on Haul Truck Dump Body Design”, Mine Industry Conference & Exhibition, Montreal (2003).
- [22] World Mining Equipment – Body of evidence, Leroy Hagenbuch, Metal Buletin Inc, (March 2000, pgs. 26/27).

Referências Complementares

- [23] Aquaro, M., “Stability Analysis of Partially Filled Tanker Trucks Using a Finite Modeling Approach,” West Virginia University (1999).
- [24] Bowles, J. E., “Physical and Geotechnical Properties of Soils”, McGraw-Hill, first edition, Tokio, Japan (1979).
- [25] Bucyrus Erie – Specifications of the 150-B Shovel Excavator.
- [26] Carson, J. W., Marinelli, J., “Preventing Solids Flow Problems”, Powder/Bulk Solids Magazine (January 1986).
- [27] Colijn, H., Hanson, P. D., “Practical Applications of Hopper and Bin Design”, CIM Transactions, Vol. LXXIII, pp.180-187 (1970).
- [28] Dalledone Machado, R., Professor de Elasticidade e Dinâmica das Estruturas, PUC-PR, contato pessoal.
- [29] Duff, E., “Automated Volume estimation of haul-Truck Loads,” CSIRO Manufacturing and Technology Science and Technology of Queensland Centre for Advanced Technologies(1999).
- [30] Fiori, A. P., Carmignani, L., “Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas – Aplicações na Estabilidade dos Taludes”, Editora da UFPR, Curitiba (2001).

- [31] Harr, M. E., “Foundations of Theoretical Soil Mechanics”, McGraw-Hill, Tokyo, Japan (1966).
- [32] Jenike, A. W., Johanson, J. R., Carson, J. W., “Bins Loads – Part 2: Concepts”, Journal of Engineering for Industry (1972).
- [33] Jenike, A. W., “How to Keep Solids Flowing In Bins and Hoppers”, Engineering and Mining Journal, Mid-March (1955).
- [34] Jenike, A. W., “Bulk Solids Must Flow”, Western Industry, (August 1955).
- [35] Johanson, J. R. “Know your material – how to predict and use the properties of bulk solids”, Chemical Engineering/Deskbook Issue (October 30, 1978).
- [36] Lins, P. G. C., Professor de Mecânica das Rochas da UFBA/DTCM, contato pessoal.
- [37] Lohmann, W. E., Fotsch, P. D., “Flexible Body Dynamic Simulation of a Large Mining Truck”, SAE International - 45th Annual Earthmoving Industry Conference Peoria, Illinois, USA (April 1994).
- [38] Naberhaus, E. P., “Structural design of Bins”, Chemical Engineering (February, 1965).
- [39] Nascimento, N. A., Professor Titular de Geotecnia Do Departamento de Construção Cível da UFPR, contato pessoal.
- [40] Oszter, Z. F., “Características do escoamento de Sólidos a Granel em Silos e Cálculos Associados ao seu Projeto básico”, III Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (1975).
- [41] Reimbert, M. L., Reimbert, A. M., “Silos Theory and Practice”, Trans Tech Publications”, First Edition, Clausthal, Germany (1976).
- [42] SAE J 1116, Construction and Industrial Equipment (June 1986).

- [43] World Mining Equipment - Report from Haulage 2002, Tucson, by Richard W. Phelps, Contributor (June 2002).
- [44] World Mining Equipment – Lighten up, (February 2000).
- [45] Xu, Hong, “Computer and Simulation in Truck Design”, SAE International (1998).

Apêndice A

Algoritmo Básico do Método de Zoutendijk

A maioria dos problemas de engenharia, possuem restrições, e envolvem a aplicação de técnicas de minimização. Isto é, o trabalho consiste em minimizar uma função, submetida a determinadas condições de contorno. Um problema freqüente de otimização com restrições, consiste em procurar o peso mínimo para o projeto de uma estrutura submetida a determinadas condições de tensão e deformação. Problemas com restrições podem ser expressos para programação linear, da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll} \text{minimizar} & f(\mathbf{x}) \\ \text{submetida a} & g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ \text{e} & h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, l \end{array}$$

onde $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ é o vetor coluna com n variáveis reais de projeto. Nas equações acima, f é a função objetiva ou a função de custo, os g 's são desigualdades restritivas, e os h 's são igualdades restritivas.

O algoritmo básico do método de Zoutendijk das direções viáveis, procura determinar uma direção que seja viável e decrescente ao mesmo tempo. Para a situação em que o ponto atual é um ponto interior, toma-se como direção o negativo do gradiente da função: $d = -\nabla f(x_k)$, e se alguma restrição encontra-se ativa, procura-se uma direção decrescente viável, que satisfaça as equações acima. O algoritmo é apresentado abaixo:

Algoritmo

1. $i = 1$;

Defina um ponto inicial viável: \mathbf{x}_i e parâmetros ϵ , ϵ_1 , ϵ_2 , e ϵ_3 ;

Calcule $f(\mathbf{x}_i)$ e $\mathbf{g}_j(\mathbf{x}_i)$, $j = 1, \dots, m$.

2. Se $\mathbf{g}_j(\mathbf{x}_i) < 0$, $j = 1, \dots, m$, então:

$$\mathbf{d} = -\nabla f(\mathbf{x}_i)$$

Normalize \mathbf{d} , vá para **5**.

Se existir $\mathbf{g}_j(\mathbf{x}_i) = 0$, vá para **3**.

3. Encontre uma direção viável \mathbf{d} , resolvendo o problema da busca de direção:

$$\begin{aligned} & \min -\beta \\ & \text{sujeito a } \nabla f^T \mathbf{s} + \beta \leq \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \\ & \nabla g_j^T \mathbf{s} + \theta_j \beta \leq \sum_{i=1}^n \frac{\partial g_j}{\partial x_i}, \text{ para cada } j \in I \\ & s_i \leq 2, i = 1, \dots, n \\ & s_i \geq 0, \beta \geq 0 \end{aligned}$$

4. Se $\beta \leq \epsilon_1$, $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_i$. Fim.

Se $\beta > \epsilon_1$, faça $\mathbf{d} = \mathbf{s}$, vá para **5**.

5. Determine um tamanho de intervalo α , ao longo da direção \mathbf{d} e faça:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \alpha \mathbf{d}$$

6. Calcule a função objetivo $f(\mathbf{x}_{i+1})$.

7. Verifique a convergência:

$$\text{Se: } \left\| \frac{f(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_{i+1})}{f(\mathbf{x}_i)} \right\| \leq \epsilon_2 \text{ e } \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1}\| \leq \epsilon_3, \text{ faça } \mathbf{x}^* = \mathbf{x}_{i+1}. \text{ Fim.}$$

Caso contrário vá para **8**.

8. Faça $i = i + 1$. Vá para **2**.