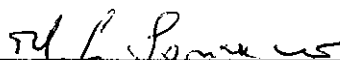


**PROJETO DE UM VAGÃO GONDOLA EM ALUMÍNIO PARA O TRANSPORTE  
DE MINÉRIO .**

**MURILO VASQUES THIBAU DE ALMEIDA**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA CIVIL.

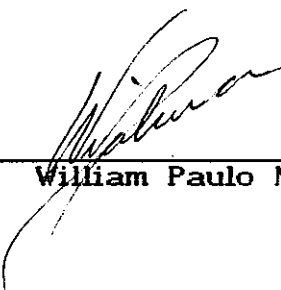
Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Humberto Lima Soriano, D.Sc.

( Presidente )

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Paulo Alcântara Gomes, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sergio Fernandes Villaça, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. William Paulo Maciel, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1989

ALMEIDA, MURILO VASQUES THIBAU DE

Projeto de um vagão gôndola em alumínio para o transporte de minério [ Rio de Janeiro ] 1989.

XIII, 168 p. 29,7 cm ( COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1989 ).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Vagão Gôndola em alumínio I. COPPE/UFRJ

II. Título ( série ).

Aos meus pais,  
MAURO e YEDA.

Aos meus irmãos e irmãs,  
Myrza, Milton, Martha,  
Marcelo, Múcio e Márcio.

À minha avó e primeira mestra,

EDLA, in memoriam.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Humberto Lima Soriano, pelo inestimável incentivo e preciosa orientação na condução deste trabalho.

Aos colegas Eng. Sílvio de Souza Lima e Eng. Raimundo Calixto de Mello Neto, pelo apoio, amizade e brilhantes sugestões durante a elaboração deste projeto.

Ao Prof. William Paulo Maciel e a equipe do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia da UFRJ pelo estímulo recebido.

Às minhas tias Glaura Vasques de Miranda, Maria das Mérces Vasques Bittencourt e Antonina Silva Granville, pelo carinho e incentivo constantes.

Ao CNPq, à CAPES, à COPPE/UFRJ e à EE/UFRJ, pelo apoio financeiro e pelas condições oferecidas para a execução desta obra.

Aos colegas, professores e amigos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

**PROJETO DE UM VAGÃO GONDOLA EM ALUMÍNIO PARA O TRANSPORTE DE MINÉRIO.**

*MURILO VASQUES THIBAU DE ALMEIDA*

Fevereiro / 1989

Orientador: Prof. Humberto Lima Soriano

Programa: Engenharia Civil

Este texto descreve a análise estrutural de um vagão gôndola em alumínio utilizando-se de modernos recursos computacionais. Este vagão destina-se ao transporte de minério de ferro e utiliza ligas de alumínio capazes de proporcionar menor peso em sua estrutura comparativamente a um vagão similar em aço. Encontra-se neste trabalho uma descrição geral dos tipos de vagões de carga, os critérios usados na modelação tridimensional do vagão gôndola, as considerações sobre as cargas aplicadas nos elementos durante a análise estrutural e a verificação dos níveis de tensões nas seções transversais de cada perfil.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

**DESIGN OF A GONDOLA CAR IN ALUMINUM FOR ORE TRANSPORTATION**

*MURILO VASQUES THIBAU DE ALMEIDA*

February, 1989

Thesis Supervisor: Prof. Humberto Lima Soriano

Department: Civil Engineering

This text describes the design of a gondola car in aluminum using modern computer technics. This wagon aims to the transportation of ore and uses aluminum alloys capable to obtain less weight in its structure comparatively to a similar wagon in steel. There are in this work a general description of freight car types, the criterion used in the three-dimensional modelling for the gondola car, the considerations about the applied loads on the elements during the structural analyses, and the checking of tension levels over the cross-section of each member.



Résumé de la thèse présentée à COPPE/UFRJ d'après les demandes pour obtenir le degré de Maîtrise en Sciences ( M.Sc. ).

**PROJET D'UN WAGON GONDOLA EN ALUMINIUM POUR LE TRANSPORT DE MINERAL.**

*MURILO VASQUES THIBAU DE ALMEIDA*

Février, 1989

Conseiller: Prof. Humberto Lima Soriano

Programme: Génie Civil

Ce texte décrit l'analyse structurale d'un wagon gondola en aluminium utilisant les techniques modernes de l'ordinateur. Ce wagon se destine au transport de minerai de fer et utilise les alliages d'aluminium capables de proportionner moins de poids dans sa structure comparativement à un wagon similaire en acier. Dans ce travail se trouve une description générale des types de wagon de charge, les critères usités dans le modèle tridimensionnel du wagon gondola, les considérations sur les charges appliquées aux éléments pendant l'analyse structurale et la vérification des niveaux de tensions dans les sections transversales de chaque profil.

## ÍNDICE

Item	Página
I. - Introdução	1
II. - Tipos de vagão e terminologia	7
II.1 - Introdução	7
II.2 - Tipos de vagões de carga	8
II.2.1 - Vagão Fechado	10
II.2.2 - Vagão Frigorífico	11
II.2.3 - Vagão Plataforma	12
II.2.4 - Vagão Gondola	14
II.2.5 - Vagão Hoper ou Tremonha	16
II.2.6 - Vagão Tanque	17
II.2.7 - Vagão Cabuse	19
II.3 - Terminologia de partes constituintes do vagão	19
II.4 - O uso do alumínio na construção de vagões	23
II.5 - Propriedades das ligas de alumínio	31
III.- Vagão gondola com concepção de "caixa reforçada" e sistemas computacionais adotados neste projeto	36
III.1- Concepção de um vagão em alumínio	36
III.2- Sistema computacional adotado para a análise estrutural	55
III.3- Sistema computacional para o cálculo de propriedades geométricas	60

III.4-	Sistema computacional de verificação de níveis de tensões	61
III.4.1-	Coeficiente de segurança e tensão equivalente	62
III.4.2-	Critério da energia de distorção	64
IV. -	Ações em vagões gôndola	68
IV.1 -	Introdução	68
IV.2 -	Casos de carregamento	69
IV.2.1 -	Peso próprio	69
IV.2.2 -	Carga útil	70
IV.2.3 -	Carga de tração / compressão longitudinal	72
IV.2.4 -	Carga de compressão crítica	73
IV.2.5 -	Pressão lateral	73
IV.2.6 -	Carga de levantamento	74
IV.2.7 -	Inclinação da carga	74
IV.2.8 -	Descarregamento	74
IV.3 -	Casos de combinação e margem de segurança	75
V. -	Modelação estrutural adotada	81
V.1 -	Introdução	81
V.2 -	Considerações a cerca da modelação tridimensional	81
V.3 -	Critérios usados na numeração dos elementos estruturais e pontos nodais	86
V.4 -	Referência local	89
V.5 -	Materials	100
V.6 -	Considerações quanto ao cálculo das propriedades geométricas	101

V.7	- Liberação de esforços em extremidades de elementos	107
V.8	- Condições de contorno	111
V.8.1	- Condições de contorno nos apoios do vagão como um todo	111
V.8.2	- Condições de contorno no modelo de meio vagão ao considerar-se o eixo de simetria transversal	114
V.8.3	- Condições de contorno para o levantamento	118
V.8.4	- Condições de contorno no virador	119
VI.	- Evolução da concepção do vagão ao longo do projeto	125
VI.1	- Análise inicial dos primeiros resultados	125
VI.2	- Verificação estrutural da chapa de revestimento interno	127
VI.2.1	- Dimensionamento da chapa de revestimento interno em alumínio	128
VI.2.2	- Estudo da chapa de fundo	129
VI.2.3	- Estudo da chapa lateral	132
VI.3	- Modificações na concepção inicial	133
VI.3.1	- Análise do comportamento estrutural	133
VI.3.2	- Considerações quanto à ligação aço-alumínio	137
VI.3.3	- Seções transversais finais	141
VI.4	- Metodologia de verificação das seções transversais	154

VI.4.1	-	Avaliação dos fatores de segurança	157
VI.4.2	-	Fator de segurança dos elementos de contraventamento internos	159
VII.		Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	160
		Referências bibliográficas	166

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O presente trabalho apoia-se no projeto de um vagão gôndola em alumínio encomendado pela Rede Ferroviária Federal S/A ( RFFSA ) à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e no qual o autor desta tese de M.Sc. foi um dos pesquisadores. Este novo vagão poderá vir a servir no transporte de minério de ferro de Belo Horizonte, MG, até o terminal de Sepetiba, RJ. Ao encomendar o projeto de um vagão mais leve que o tradicional de aço, a RFFSA deseja modernizar a sua frota introduzindo as vantagens oferecidas pelas ligas de alumínio.

No desenvolvimento do projeto, o center-sill e as travessas principais foram inicialmente considerados em aço para prevenir grandes deformações no conjunto estrutural. As demais peças foram todas concebidas em alumínio. Projetos desenvolvidos em outros países já utilizaram esta estrutura mista com bons resultados.

No decorrer do projeto entretanto, todos os

elementos estruturais da caixa do vagão vieram a ser analisados em aço, inclusive o center-sill e as travessas, de modo a eliminar todas as ligações entre ligas de aço e alumínio.

As economias em peso e ainda em manutenção nos vagões confeccionados em alumínio começaram a ser atraentes a partir de 1916 quando a companhia inglesa " Lancashire and Yorkshire Railway " montou 66 destes vagões com o propósito de servir ao seu sistema ferroviário. Ao serem removidos de circulação após 45 anos de operação, os vagões em alumínio apresentaram condições de conservação superiores aos vagões em aço que haviam servido por apenas 16 anos [1]. Por algumas décadas, contudo, o Reino Unido limitou-se a desenvolver vagões em alumínio para suprir o metrô de Londres onde 75% da frota se constitui deste metal e só mais recentemente é que a British Railways resolveu investir na mudança do " Advanced Passenger Train " ( Trem Avançado de Passageiro ) para alumínio num esforço de economizar energia ao reduzir o peso.

Nos Estados Unidos, o alumínio surgiu na superestrutura dos carros de passageiros da Pennsylvania Railroad reduzindo em aproximadamente 6000 kgf o peso por vagão. Logo em seguida, a Cleveland Railway Company encomendou um bonde composto todo em alumínio, inclusive os truques, economizando com isso também em torno de 6000 kgf no peso comparado a outro veículo similar em aço.

Na Alemanha encontram-se até hoje em circulação os vagões fabricados em alumínio há mais de 50 anos atrás,

o vagão " Hydroalum " e o trem " TEE " da rede ferroviária alemã do final dos anos 50.

Há mais de 35 anos também iniciou-se a introdução e operação de material rodante em alumínio na Suíça.

O mais pesado sistema suburbano do mundo, o Teiko de Tóquio no Japão, avaliou durante 10 anos o material adequado a suas necessidades até concluir ser este o alumínio. A substituição de todas as estruturas em aço para as ligas de alumínio foi feita então progressivamente.

O desenvolvimento dos vagões em alumínio pode ser observado em vários países e a economia obtida em peso tem sido aplicada não somente nos carros de passageiros mas também nos vagões de carga. Neste texto, o capítulo II descreve os tipos básicos de vagões de carga existentes na atualidade, apresentando uma noção geral sobre o assunto. As diferentes funções a que estes vagões se destinam podem modificar a própria concepção do vagão, o que afeta diretamente o seu cálculo estrutural. A terminologia das partes constituintes de um vagão encontra-se naquele capítulo. Ele contém ainda uma avaliação sobre o uso do alumínio na construção de vagões, levando-se em consideração as vantagens de suas propriedades mecânicas bem como as restrições em sua utilização. O alumínio sempre é confrontado com o aço pelo fato deste último ser o material usado há décadas na fabricação de vagões. As propriedades das ligas de alumínio foram também descritas sumariamente com o intuito



de fornecer ligeiras informações.

O capítulo III introduz a concepção de " caixa reforçada " para o vagão gôndola em estudo e descreve os sistemas computacionais adotados neste projeto. Nele são justificadas as necessárias criações e remodelações de diversos elementos estruturais e definidas as ligas apropriadas para cada componente da estrutura. Os sistemas computacionais adotados para a análise estrutural, para o cálculo de propriedades geométricas e para a verificação de níveis de tensões encontram-se justificados neste capítulo, que termina com a apresentação de um breve estudo sobre tensão equivalente e o critério de ruptura da energia de distorção.

As especificações das cargas atuantes no vagão gôndola encontram-se no capítulo IV. Todos os casos de carregamento são avaliados e resumidos em um quadro de carregamentos básicos. Estes casos são combinados entre si, recebendo coeficientes de majoração de cargas conforme a norma da " Association of American Railroads " sendo ainda condensados numa tabela. São introduzidos neste capítulo os conceitos de margem de segurança, tensão de referência e tensão atuante.

No capítulo V são feitas as considerações a cerca da modelação tridimensional adotada para a estrutura. Os critérios usados na numeração dos elementos estruturais e pontos nodais, bem como o referencial local são definidos ali. Os módulos de elasticidade longitudinal e transversal e os pesos específicos, tanto para o aço quanto para as ligas de alumínio utilizadas, são

apresentados neste capítulo que contém inclusive um pequeno estudo sobre as considerações quanto ao cálculo das propriedades geométricas levando em conta a utilização de dois materiais distintos constituintes de uma mesma seção transversal.

As liberações de esforços nas extremidades de alguns elementos são também descritas de maneira a facilitar o detalhamento e execução das ligações nos perfis. Completando o capítulo, descreve-se as condições de contorno no vagão como um todo, no modelo de meio vagão com eixo de simetria transversal e as condições de contorno quando este encontra-se no virador.

As primeiras avaliações sobre os resultados encontrados nas análises computacionais são efetuadas no capítulo VI. As conclusões iniciais sobre os deslocamentos nodais encontrados já indicavam a necessidade de modificações no sistema estrutural adequando este às propriedades mecânicas próprias do material empregado, o alumínio, e não baseado em projetos anteriores em aço. Providências imediatas foram então tomadas evoluindo-se a concepção do vagão à medida que novas modificações tornaram-se necessárias. Foram criados novos reforços e aumentadas as seções transversais de alguns perfis até serem obtidos resultados satisfatórios. Implantou-se uma liga mais resistente em alumínio e os elementos componentes em aço foram substituídos por ligas em alumínio eliminando-se todas as ligações existentes entre aço e alumínio. O capítulo aborda ainda o cálculo da chapa de revestimento interno, apresenta a metodologia de

verificação das seções transversais e faz uma avaliação dos fatores de segurança de todos os perfis.

Finalizando, o capítulo VII apresenta as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros. Este ressalta a importância da análise estrutural tridimensional ser efetuada com carregamentos mais próximos aos reais e apoia o emprego do alumínio na confecção de vagões seguindo uma concepção própria que aproveite as propriedades mecânicas deste material. Para tanto, um novo vagão com formas curvas é sugerido como próximo estudo.

## CAPÍTULO II

### TIPOS DE VAGÃO E TERMINOLOGIA

#### II.1 - Introdução

Devido à expansão comercial, o transporte de passageiros deixou de ser um monopólio nas estradas de ferro mundiais para ceder lugar ao escoamento de produtos industriais, agrícolas e matérias primas em geral. Desde então, o transporte de cargas evoluiu gradualmente com o intuito de satisfazer, cada vez melhor, às necessidades dos diversos setores produtivos.

Competindo principalmente com a indústria de caminhões, o tráfego ferroviário somente nos Estados Unidos contava em estimativas de 1977 com um total de 310.000 milhas ( 496.000 km ) de linhas de ferro. Aproximadamente metade das mercadorias despachadas entre as cidades norte americanas, mesmo as mais remotas, viajam por ferrovias. Ao carregarem matérias-primas ou produtos acabados, os comboios tornaram-se indispensáveis para

ligar principalmente os portos com as regiões de produção. A extensão das linhas no Brasil era até 1983 de 22.457 Km.

Notáveis progressos na construção de vagões têm sido observados no exterior, tanto na capacidade de carga quanto na variedade de tipos. Todos procuram atender à demanda do transporte para as novas mercadorias surgidas com o desenvolvimento da tecnologia nas diferentes áreas da atividade industrial.

À medida que os produtos diversificam-se sobre as ferrovias, surge a necessidade de condicioná-los em recipientes apropriados para locomoção. Vagões abertos ou fechados; vagões para gases, líquidos e sólidos; vagões de rápida carga ou descarga; enfim, vagões adequados aos vários pesos e volumes para facilitar inclusive a manipulação de seus conteúdos, o que certamente contribui na agilidade do tráfego.

Dinamizado o sistema ferroviário, aumenta a solicitação por este transporte; o que amplia mais o mercado para tal serviço.

## II.2 - Tipos de Vagões de Carga

A descrição dos tipos de vagões neste capítulo baseia-se fortemente na enciclopédia ferroviária norte-americana "Car and Locomotive Cyclopedia" [2] e objetiva somente fornecer uma noção geral dos diversos vagões existentes na atualidade.

Os vagões de carga podem ser classificados em oito tipos principais, cada qual apresentando variações

importantes de projeto, conforme requisições necessárias aos diferentes tipos de carga. Acrescentar uma porta, fazer uma nova divisão interna, ou mesmo mudar o processo de carregamento e descarregamento, introduz equipamentos e concepções que chegam, dependendo do caso, a alterar a classificação de determinado veículo. Construtores, empresas ferroviárias e toda a indústria em geral mostram grande interesse na melhoria destes vagões, no sentido de encontrar soluções sempre mais viáveis ao transporte das mercadorias.

A Divisão Mecânica da Associação das Estradas de Ferro da America ( Association of American Railroads - AAR ) identifica os tipos básicos de vagões de carga por uma série de letras. As oito classes são revisadas esporadicamente e sujeitas a alterações capazes de, por exemplo, modificar equipamentos ou introduzir um novo modelo.

A classificação dos tipos de vagões de carga, segundo a designação da AAR, é a seguinte:

Classe " X " - Vagão Fechado

Classe " R " - Vagão Frigorífico

Classe " F " - Vagão Plataforma

Classe " G " - Vagão Gôndola

Classe " H " - Vagão Hoper ou Tremonha

Classe " T " - Vagão Tanque

Classe " L " - Vagão Especial

Classe " N " - Vagão Cabuse

## II.2.1 - Vagão Fechado

O vagão fechado é um vagão composto basicamente pelo piso, paredes nas laterais e nas extremidades e o teto na cobertura sugerindo, como o próprio nome indica, uma caixa fechada. O seu emprego ocorre principalmente no transporte de mercadorias que necessitem proteção contra as intempéries ou contra as quedas induzidas pelo movimento e frenagens. Estes vagões procuram acomodar produtos peculiares tais como peças automotivas, conservas e enlatados, e um grande volume de outros materiais.

Além do seu modelo mais convencional, projetado simplesmente para transportar uma generalidade de cargas, existem vagões equipados especialmente para atender certos setores industriais. Alguns veículos recebem isolamento térmico nas paredes para permitir o transporte de alimentos e bebidas perecíveis que há algum tempo atrás somente poderiam ser despachados em refrigerador. Esta proteção auxilia ainda a viagem de mercadorias sensíveis à condensação.

A fragilidade de muitas das cargas que circulam nos vagões fechados tem exigido que um número crescente destes seja equipado com amortecedores capazes de absorver melhor os impactos nas longarinas e extremidades do veículo. Alguns procuram ter o seu interior equipado com contentores de carga e protetores para prevenir danos na viagem. Tais equipamentos incluem cabeceiras móveis, divisores de cargas, bolsas de ar, etc.

Os diversos modelos de portas nos vagões fechados refletem a variedade de métodos usados para manipular o seu carregamento. Veículos longos e de grande capacidade de carga tendem a receber portas mais largas de forma a facilitar o acesso de uma carregadeira ou um guincho mecânico no seu interior ou mesmo um outro equipamento que agilize o processo de carregamento e descarregamento. Muitos construtores combinam uma porta de correr junto a uma porta dobradiça em cada lado do vagão procurando com tal arranjo a mesma abertura obtida para duas portas de correr. Outros entretanto preferem distribuir portas pelas laterais para permitir carregar o veículo diretamente nas extremidades ou no meio, enquanto alguns fazem de toda a lateral uma porta inteira.

### II.2.2 - Vagões Frigoríficos

Os vagões frigoríficos são projetados com o objetivo de proteger todos os tipos de produtos alimentícios perecíveis. Criado por volta de 1945 para exportar o suco de laranja concentrado da Flórida, USA, este vagão teve fácil aceitação para o transporte também de outros sucos congelados, frutas, legumes e vegetais. Em pouco tempo alguns veículos receberam a adaptação de um equipamento eletro-mecânico de refrigeração após tornar-se evidente que as baixas temperaturas internas necessárias para preservar a qualidade dos produtos congelados não seria mantida apenas pelo precário armazenamento de gelo e sal no compartimento original.



Este vagão compõe-se basicamente de um sistema motopropulsor, geralmente uma unidade diesel-elétrica, um compressor e um condensador refrigerantes, um evaporador, e ventiladores para distribuir apropriadamente o ar em torno da carga. O descongelamento pode ser feito por bobinas elétricas contornando o evaporador que, controladas por um termostato, funcionam como aquecedor. Todo este equipamento é montado numa extremidade do vagão e permite variar a sua temperatura interna de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+20^{\circ}\text{C}$ . Deste modo, o vagão frigorífico protege todo tipo de carga com o frio ou o calor dependendo do clima exterior.

A AAR especifica que o isolamento térmico nas paredes laterais e extremidades dos vagões tenham no mínimo 7,5 cm de espessura. Para o piso e teto, exige-se 9,0 cm. Todo o compartimento deve receber uma espuma isolante de poliuretano que substitui os materiais em fibra de vidro anteriormente padronizados pela indústria e que apresenta 50% a mais de eficiência. Com o progresso das técnicas de isolamento, mesmo sem operar o equipamento térmico, a carga poderá se manter protegida de temperaturas extremas.

### II.2.3 - Vagão Plataforma

A versatilidade para carregar ou descarregar os vagões plataforma contribue significativamente para a aceitação deste tipo de vagão no transporte ferroviário. Estes são vagões abertos contendo apenas o assoalho ou

ainda as cabeceiras. Podem ser do tipo TOFC ( trailer-on-flat car ) para o transporte de mercadorias condicionadas dentro de " trailers " ( reboques ) ou do tipo COFC ( container-on-flat car ) para o transporte de mercadorias dentro de " containers " ( recipientes ).

Os vagões com cabeceiras oferecem apoio às cargas contra esforços longitudinais capazes de derrubar itens longos como tubos e postes além de outros produtos que normalmente necessitam estar bem firmes para não escorregarem. Toras e compensados de madeira são transportados em veículos com cabeceira, assim como tábuas e caixotes. A colocação e retirada destes materiais é facilmente efetuada com o auxílio de um pequeno guindaste.

As cabeceiras protetoras e os dispositivos para amortecimento muito têm simplificado o condicionamento e proteção de determinados produtos industriais. Quando equipados com soleira móvel ( sliding-sill ) ou amortecedores nas cabeceiras ( end-of-car cushioning ), estes vagões reduzem imensamente os impactos sobre as cargas. Vagões plataforma contendo amortecedores de proteção são, por isso, usados no transporte de equipamentos de alta precisão como máquinas de moagem, prensas tipográficas e mesmo equipamentos aeroespaciais.

A melhor acomodação facilita nas atividades de carga e descarga e introduz instalações práticas tais como prendedores para maquinário, cavaletes para chassis de automóveis e estantes para peças mecânicas diversas.

A adaptação de coberturas removíveis e protetoras das intempéries permitem eliminar as embalagens

caras de certos produtos da indústria pesada, como as bobinas de aço por exemplo, sem contudo dificultar em nada o descarregamento.

Muitos compartimentos especiais podem ser projetados para levar um único tipo de produto. Produtos químicos e minerais podem ser embarcados em recipientes em aço, caixas de borracha ou outros tipos de compartimentos específicos que diferem-se dos padronizados internacionalmente.

Certos recursos são levados em consideração em projetos para o transporte de cargas elevadas. O rebaixamento central e a divisão do vagão em partes desmontáveis tornam mais simples o carregamento e descarregamento de equipamentos muito grandes. A introdução de orifícios estratégicos nos elementos estruturais reduz o peso desnecessário. Todo o peso pode ser distribuído sobre múltiplos truques e outros dispositivos mecânicos combinados de várias maneiras. Vagões especiais chegam a receber cargas de até 350 ton.

#### II.2.4 - Vagão Gôndola

Os vagões gôndola servem ao transporte de grandes volumes de materiais; principalmente carvão, minério, produtos florestais, em aço e maquinaria. Uma porção significativa, que é estimada pela indústria ferroviária a aumentar cada vez mais, tem capacidade para levar 100 t.

O tipo básico de vagão gôndola apresenta as

laterais e o piso fixos, podendo existir modelos especiais conforme seja o carregamento. Cargas muito longas, como toras de madeira por exemplo, podem ser levadas em vagões de cabeceira removível, enquanto cargas volumosas e granulares, como o minério, em vagões de piso movediço ( várias portas no piso para o escoamento instantâneo ). Alguns, podem ainda ter suas paredes mais elevadas a fim de evitar desperdícios no carregamento e conter os produtos que derramariam mais facilmente se transportados por paredes baixas. Sempre existe, entretanto, o inconveniente destes vagões não limparem-se completamente ao descarregar, exigindo um trabalho adicional na manutenção.

O virador de vagão, ou " car-dumper ", é um mecanismo empregado na descarga rápida de vagões gôndola. Após ser fixado a um equipamento giratório, o veículo é basculado lateralmente até despejar toda a sua carga sob a ação da gravidade.

Algumas coberturas removíveis são projetadas para os vagões gôndola procurando não interferir nos mecanismos de carga e descarga. Tais capas protegem as cargas contra as intempéries, evitando a absorção de água pluvial, por exemplo. Existem drenos nestes vagões, mas a água acumulada temporariamente já representa um acréscimo de peso sobre os trilhos. Certos produtos como as chapas de aço em bobinas ou rolo exigem a proteção de cobertura removível.

Começa a surgir atualmente no exterior um novo tipo de vagão gôndola caracterizado pelo fundo curvo ou

parabólico. Calcula-se ser possível aumentar com esta nova concepção a capacidade do vagão em até 5 ton reduzindo a sua tara sem todavia alterar o limite total de carga do veículo.

## II.2.5 - Vagão Hoper ou Tremonha

Os vagões hoper ou tremonha são vagões cujo piso apresenta inclinações de forma a descarregar todo o seu conteúdo apenas pela ação da gravidade. Classificam-se em dois tipos: " open-top " ( topo aberto ) ou " covered " ( coberto ).

Os vagões de topo aberto são mais comumente usados no transporte de carvão e outras mercadorias de alta densidade como o cascalho e o minério. A descarga rápida e a economia no tempo e trabalho de limpeza são fatores fundamentais na sua utilização. Portas bem projetadas ( algumas completamente automáticas ) permitem inclusive que o veículo despeje sua carga ainda em movimento.

Os vagões cobertos surgiram na década de 20 para servir ao transporte de cimento. Atualmente este veículo torna possível o transporte de cargas granulares e volumes antes somente despachados em pacotes e barris ou que eram manipulados inadequadamente em antigos vagões fechados adaptados com portas para grãos. Os mais modernos têm sido equipados com controladores de humidade a fim de proteger produtos químicos ou alimentícios e podem até mesmo receber isolamento térmica e refrigeração para

conservar os produtos perecíveis.

Uma grande quantidade de vagões hopper cobertos transporta grãos de polietileno ou outros produtos petroquímicos que constituem a matéria-prima dos produtos plásticos. Uma camada de proteção anti-corrosiva se faz necessária no interior do veículo e qualquer contaminação deve ser sempre prevenida através de limpeza após os descarregamentos. É possível que um determinado elemento químico num carregamento anterior ataque uma diferente carga petroquímica no carregamento seguinte.

A própria corrosão do vagão deve ser prevenida quando em contacto com certas cargas. O transporte de sal, por exemplo, ou outros elementos corrosivos podem ser evitados em vagões construídos com ligas de alumínio.

#### II.2.6 - Vagão Tanque

Originalmente usados no transporte de óleo bruto e derivados de petróleo há um século atrás, os vagões tanque expandiram-se e conquistaram grande parte do crescente mercado das indústrias químicas. A sua carga compõe-se basicamente de líquidos e semi-líquidos variando desde sucos de frutas, álcool e xaropes até polímeros, gases petrolíferos e liquefeitos.

Regras de segurança foram criadas para os vagões tanques devido à natureza perigosa de alguns dos produtos por eles transportados. O Departamento de Transporte dos Estados Unidos ( Department of Transportation - DOT ) regulamenta o transporte em tanques

de materiais inflamáveis, explosivos, oxidantes, ácidos e outros líquidos corrosivos, gases comprimidos e artigos venenosos. As especificações da AAR cobrem os detalhes estruturais dos vagões e tanques para os materiais que não são classificados como perigosos pelo DOT. Equipamentos de segurança devem também obedecer certos padrões.

A densidade do líquido deve ser observada na utilização do vagão tanque, respeitando sempre os seus limites de capacidade volumétrica e de peso. A capacidade nominal de 100 tons e volume de 130.000 litros têm sido muito usados. A resistência estrutural do próprio tanque tem sido aplicada em determinados projetos para transmitir os esforços de tração e compressão, eliminando com isso a necessidade de uma longarina central na base. Alguns tanques apoiam-se sobre pares de truques de seis rodas ou em travessas sobre pares de truques de quatro rodas em cada extremidade, aumentando com isso a capacidade volumétrica para até 227.000 litros.

Um revestimento interno especial ou anti-corrosivo torna-se necessário para transportar mercadorias sujeitas a corrosão e contaminações. Os recipientes podem ser em alumínio, madeira ou aço-níquel, de maneira a evitar danos provenientes da ação corrosiva de certas cargas. Borracha, fibra de vidro e mesmo chumbo podem ser úteis para forrar o tanque.

Gases liquefeitos como o oxigênio e hidrogênio são transportados em temperaturas muito baixas. No caso do hidrogênio em que a temperatura chega a  $-270^{\circ}\text{C}$  existem vagões fabricados com "thermo bottles", ou seja, dois

compartimentos separados por vácuo ou isolamento especial. O transporte de certos gases comprimidos sobre alta pressão é feito em múltiplos cilindros de diâmetros relativamente pequenos. Existem, também, tanques com sistemas de aquecimento para líquidos que necessitem ser mantidos em temperaturas elevadas.

#### II.2.7 - Vagão Cabuse

O vagão cabuse é um vagão especial ocupado pela equipe ferroviária do trem de carga. Neste são feitos os registros de viagem bem como contatos através do rádio com outros trens e estações. O rádio ainda permite a comunicação com a tripulação na locomotiva que puxa o comboio. Suprimentos, materiais de sinalização e ferramentas de emergência são também levados ali.

Existem dois tipos básicos de vagão cabuse. O primeiro apresenta janelas salientes nas laterais para uma visão mais direta da engrenagem do comboio em movimento enquanto o segundo contém uma pequena guarita na cúpula do carro.

As paredes isoladas térmica e acusticamente são importantes para o conforto humano, enquanto geradores fornecem energia para o rádio, luz e refrigeração.

#### II.4 - Terminologia de Partes Constituintes do Vagão.

Os vagões de carga formam-se basicamente por dois truques móveis suportando um estrado e uma caixa.



Existem, é claro, diversos elementos estruturais que, variando em dimensões ou quantidades, formam os diferentes tipos de vagões.

Os truques recebem todo o carregamento sobre um sistema de suspensão com o propósito de transmiti-lo para as suas rodas. O truque convencional tem quatro rodas e possibilita a estrutura ser mais baixa que os antigos de apenas duas; além de distribuir melhor as reações de contato com a linha. Truques com seis ou maior número de rodas são utilizados em vagões de alta capacidade de carga.

A parte inferior do estrado contém um pequeno pino ( pião ) que encaixa-se na face superior do truque onde existe um disco metálico contendo um orifício no centro ( prato de pião ). Este mecanismo, aparentemente frágil, liberta o truque para movimentos giratórios que acompanham as curvas do trajeto sem perturbar o apoio da estrutura. Por não ser fixo, ele impede somente os deslocamentos laterais deixando o vagão vulnerável para ser lançado fora da linha no caso de um acidente.

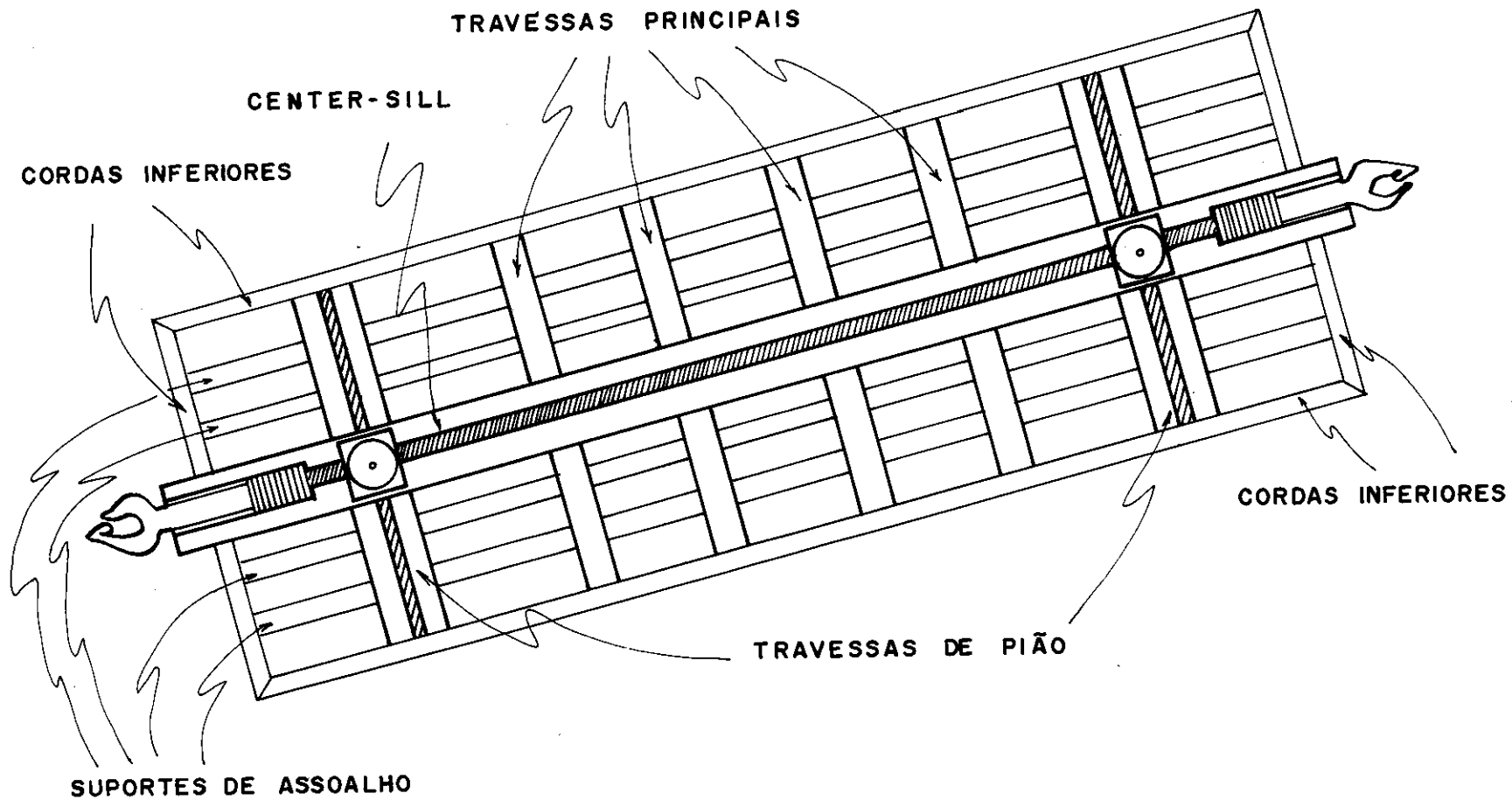
O estrado e a caixa do vagão de carga formam um recipiente de acordo com a finalidade do veículo. Os diferentes tipos de vagão, entretando, têm em comum no estrado um eixo longitudinal designado " center-sill " ou viga central e duas travessas de pião. O center-sill, numa idealização simplista, pode ser considerado como uma viga bi-apoiada nos truques e suportando todo o peso e cargas transmitidas pelos elementos componentes da estrutura global. As travessas de pião, como o próprio nome indica,

são transversinas alinhadas ao piso de apoio ( pião ) que cruzam o center-sill acima de cada truque. A figura ( II.1 ) mostra onde estas peças ficam posicionadas no estrado.

No caso do vagão gôndola, o estrado é composto ainda por outras travessas e elementos. Por entre as duas travessas de pião distribuem-se travessas ao longo do center-sill, denominadas " travessas de apoio " e mencionadas neste texto como " travessas principais " , que variam em quantidade dependendo do projeto e do comprimento do vagão. Longarinas secundárias, aqui chamadas " cordas inferiores ", posicionam-se paralelamente ao center-sill e interceptam as travessas na extremidade junto à borda do estrado. A introdução ainda de elementos semelhantes nos outros extremos do estrado e paralelos às travessas completam o perímetro do assoalho, reforçando-o dentro da concepção de " caixa " para o vagão gôndola. Outras longarinas com menor seção transversal, conhecidas por " suportes de assoalho ", são dispostas ao longo deste com a finalidade de apoiar a chapa de fundo e aumentar a sua resistência.

Nos vagões fechados lateralmente, elevam-se sobre a extremidade de cada travessa os " montantes principais " e, entre estes, os " montantes secundários ". O próprio nome já indica a prioridade de um sobre o outro na contribuição que exercem sobre o conjunto estrutural. Outros montantes podem ser acrescentados nas quinas do vagão de maneira a compor uma " caixa ", sendo que aqui eles foram designados como " cordas de canto ". Nas duas

Figura ( II.1 ) - Planta do estrado.



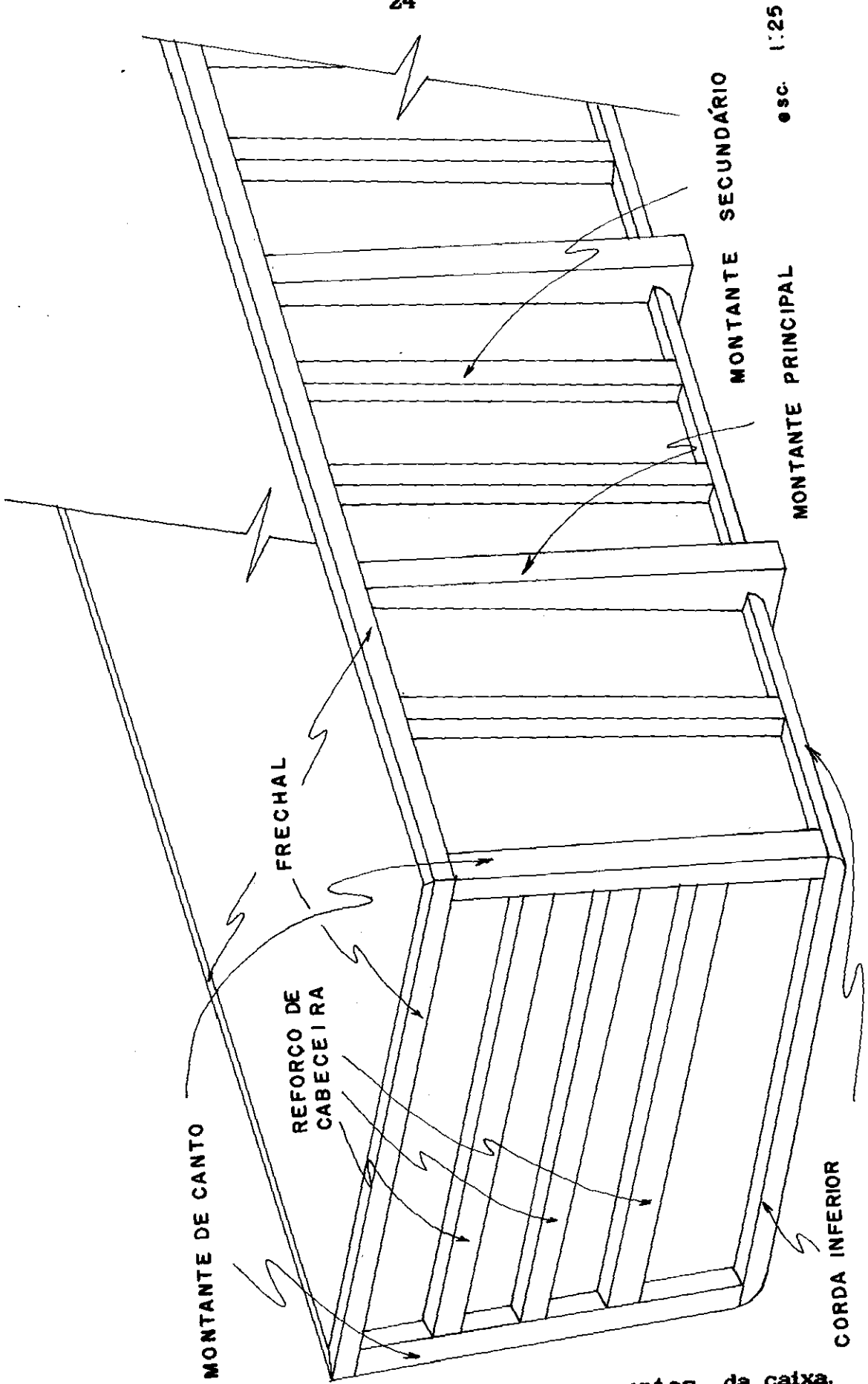
cabeceiras, podem ser acrescentados " reforços de cabeceira " ligando as cordas de canto de forma a contraventar os dois lados da estrutura. Circundando todo o conjunto no seu bordo superior encontra-se a " corda superior " ou " frechal ". As chapas laterais passam assim a descarregar o carregamento nas cordas superior e inferior, nos montantes principais e secundários, e com vãos pequenos evita que se tenha efeito de flexão preponderante.

O posicionamento das peças descritas anteriormente, na caixa, pode ser observado na figura ( II.2 ).

## II.5 - O Uso do Alumínio na Construção de Vagões

Os constantes e elevados aumentos nos preços mundiais de combustível, principalmente no que se refere ao óleo diesel, além da não modernização da frota ferroviária têm colocado o setor ferroviário nacional em condição desprivilegiada perante à concorrência com outros sistemas de transportes, sejam estes de cargas ou passageiros. A operação dos pesados trens torna-se, ano após ano, cada vez mais dispendiosa exigindo portanto uma urgente reestruturação na ferrovia a fim de reconquistar o mercado perdido e expandir com novas perspectivas para o futuro.

A concepção e a construção de um vagão ou carro ferroviário, seja qual for o seu material constituinte, deve essencialmente procurar dispor da menor massa



esc. 1:25

Figura ( II.2 ) - Elementos componentes da caixa.

possível sem com isso perder as suas propriedades de resistência mecânica. O consumo de energia é certamente reduzido na condução de trens confeccionados em material mais leve e a potência de uma locomotiva pode ser melhor utilizada ao levar comboios mais longos em menor número de viagens.

O alumínio, por apresentar densidade correspondente a um terço da do aço, vem a ser um valioso material na fabricação de estruturas onde o peso próprio assume uma parcela significativa na carga total suportada. A sua condição de metal leve facilita inclusive o seu transporte, manipulação e montagem em regiões de difícil acesso. As ligas de alumínio mais resistentes chegam a fornecer taxas de resistência por peso entre as mais altas disponíveis entre os metais comerciais, o que torna possível economias consideráveis no peso de uma estrutura.

O baixo peso das ligas em alumínio e a alta taxa de resistência por peso podem reduzir em cerca de 20 % o peso de um vagão em alumínio comparado com um projeto similar em aço desconsiderando-se o peso dos truques. Ao diminuir a tara do vagão permite-se levar uma quantidade adicional de carga em um mesmo vagão, mantendo-se constante a carga bruta total, ou aumentar o número de vagões puxados pela mesma locomotiva. Em outras palavras, um determinado comboio composto por vagões em alumínio poderá excluir alguns de seus vagões para transportar a mesma carga que um comboio equivalente em aço, ou ainda, empregar o mesmo número de vagões mas poupar a quantidade de suas viagens. Seja como for, parte do

consumo de combustível da locomotiva é eliminado e a vida útil de certos equipamentos é aumentada.

Uma composição levando 100 vagões em aço durante 100 viagens anuais pode efetuar o mesmo serviço com apenas 83 viagens no caso de os mesmos 100 vagões serem em alumínio com capacidade de carga aumentada em 20 % . Ao final de um contrato de 20 anos, 340 viagens terão sido poupadas preservando locomotiva, trilhos, maquinista e operários para outros serviços e agilizando a carga e descarga apenas dos vagões realmente necessários; além, é claro, de cortar despesas de combustível e manutenção.

Na fabricação de vagões, sejam estes em aço ou alumínio, outros fatores importantes além da redução da massa devem ser respeitados. Na escolha da liga metálica adequada é fundamental que se obtenham resistências mecânicas compatíveis com os esforços solicitantes nos diversos componentes da estrutura, esforços estes resultantes das forças de operação ( tração, compressão, cargas verticais ) e cargas acidentais ( choques e colisões ). A diminuição do efeito de fadiga nas peças vem a ser influenciada pela absorção dos impactos e melhor comportamento da estrutura em função das vibrações.

As principais propriedades físicas do aço e alumínio encontram-se na tabela ( II.1 ).

O baixo módulo de elasticidade do alumínio, que equivale a  $1/3$  do de aço, exige uma avaliação mais realística da rigidez e estabilidade elástica do conjunto estrutural para prevenir-se quanto a deslocamentos

Tabela ( II.1 ) - Propriedades físicas dos materiais aço e alumínio.

Propriedades físicas	alumínio 7000	aço carbono
Módulo de elasticidade Longitudinal - E (MPa)	72.000	210.000
Módulo de elasticidade transversal - G (MPa)	26.000	78.000
Coefficiente de Poisson - $\mu$	0,33	0,28
Peso Específico $\rho$ ( KN/m <sup>3</sup> )	27	79
Coefficiente de dilatação térmica $\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	0,000024	0,000012
Limite elástico -(MPa)	235	255

Obs: 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>  $\approx$  10 kgf/cm<sup>2</sup>

elevados na estrutura deformada em operação. Este módulo, entretanto, induz tensões devidas ao impacto e deformações impostas de caráter localizado. Geralmente, os danos



provocados por choques sobre a estrutura em alumínio concentram-se em uma região em torno do ponto de contato que deforma-se instantaneamente pela baixa elasticidade deste material, sem com isso propagarem-se às outras áreas. O seu reparo pode resumir-se muitas vezes na simples reposição do componente danificado.

Apesar do coeficiente de expansão térmica do alumínio ser o dobro do de aço, as tensões térmicas deste são mais baixas em consequência do seu baixo módulo de elasticidade. Isto ocorre principalmente no aquecimento localizado, quando a alta condutibilidade térmica do alumínio reduz os gradientes de temperatura. A expansão térmica do alumínio exige um exame mais cuidadoso das tensões nas juntas e articulações entre componentes estruturais.

A resistência mecânica e o módulo de elasticidade das ligas de alumínio aumentam em baixas temperaturas e decrescem acima da temperatura ambiente. Contudo, para temperaturas abaixo de  $100^{\circ}\text{C}$  as perdas não chegam a ser significativas.

A resistência ao fogo e ao arco elétrico é um fator condicionante para a ligação de metais. A diferença nas temperaturas de fusão entre o aço e alumínio traz um problema grave na soldagem. Para se alcançar os  $1500^{\circ}\text{C}$  do ponto de fusão do aço a fusão do alumínio seria atingida próxima a  $600^{\circ}\text{C}$  tornando praticamente impossível soldá-los. Além do mais, existe uma diferença catódica entre estes dois materiais o que impede que os mesmos trabalhem em conjunto, sob pena de ocorrer corrosão

catódica.

Em se tratando de resistência à corrosão, o alumínio é um material recomendado até no transporte de alimentos e produtos químicos. A camada protetora por ele formada permite que os projetos estruturais desconsiderem uma espessura adicional de prevenção anti-corrosiva. Esta proteção natural elimina a necessidade de pintura regular das peças, dispensando a manutenção que certamente deixaria os vagões fora de circulação por alguns dias.

Devido a esta boa resistência à corrosão, os vagões em alumínio têm a sua vida útil prolongada. No transporte de carvão, por exemplo, os vagões gôndola podem apresentar vida útil de 30 anos ou mais, sem necessitar uma proteção adicional; o que nos vagões em aço torna-se um problema frequente. Além disto, existe a possibilidade de reciclagem de suas ligas que, como sucata, podem encontrar um bom valor comercial.

Uma camada adicional, entretanto, deve ser considerada para compensar a abrasão. Por ser um material mais facilmente deformável o alumínio necessita uma proteção que impeça que as ranhuras reduzam as seções transversais além das determinadas no dimensionamento dos diversos componentes para efeito estrutural.

A utilização de peças de alumínio extrudadas pode facilitar em muito a montagem da estrutura. Moldando-se perfis com encaixes estratégicos para apoio de chapa de revestimento interno e recebimento do cordão de solda tem-se uma construção mais rápida e perfeita, ao mesmo tempo que se reduz a mão-de-obra. As técnicas

construtivas podem resultar em economia significativa nos custos de montagem. O comprimento dos cordões de solda, por exemplo, podem ser diminuídos para economizar material, tempo e mão-de-obra. A maior precisão na fabricação, entretanto, exige ferramentas e modelos de confecção melhor elaborados, implicando com isso na mecanização da montagem. Estas, acarretam no aumento de despesas para implantação, que contudo são amortizadas à medida que cresce a quantidade de produção.

A modernização do sistema de transporte ferroviário vem a ser portanto uma consequência direta das medidas de otimização no desempenho dos vagões, carros e locomotivas. Consequências estas que acarretam na redução de custos de transporte e aumento na eficiência do tráfego ferroviário. Resumem-se, portanto, as seguintes providências :

- a) Maior redução possível da tara dos vagões e aumento da capacidade útil,
- b) menor custo de manutenção,
- c) menor consumo de combustível,
- d) menor desgaste das rodas e trilhos,
- e) maior vida útil, e
- f) maior valor residual.

As propriedades encontradas no alumínio portanto, implicam em benefícios muito adequados para a quase totalidade destes propósitos, que são:

Características	Benefícios
1) Baixo peso específico	maior leveza
2) Elevadas propriedades mecânicas	boa resistência
3) Baixo módulo de elasticidade	maior absorção de impactos
4) Alta resistência à corrosão	maior vida útil

A utilização do alumínio em substituição ao aço na confecção de vagões apresenta vantagens que não podem ser desprezadas. A sua aplicação estrutural não só traz preciosos benefícios para a ferrovia, como ainda expande a indústria nacional de matéria-prima ( lingotes de alumínio ). Esta tecnologia significa o desenvolvimento de diversos setores industriais, podendo inclusive avançar para o mercado internacional.

## II.7 - Propriedades das Ligas de Alumínio

O alumínio comercialmente puro é obtido de um processo eletrolítico da bauxita. Nesta forma, o seu limite de resistência à tração apresenta-se em torno de 90 MPa que pode ser aumentado pela adição de outros metais por tratamento térmico ( heat-treatment ) ou por beneficiamento a frio ( cold working ). Desta maneira, é possível elevar a resistência à tração para aproximadamente 165 MPa pelo beneficiamento a frio ou até 550 MPa por tratamento térmico.

O peso específico das ligas de alumínio fica perto de  $0,00277 \text{ kgf/cm}^3$  ou quase  $1/3$  do peso do aço. Seu módulo de elasticidade também está próximo a  $1/3$  do valor do módulo do aço, enquanto que o coeficiente de dilatação térmica equivale ao dobro.

O limite elástico para as ligas de alumínio é convencionalmente nas curvas de tensão-deformação como sendo a tensão que corresponde a uma deformação permanente de 0,2% na dimensão inicial da amostra. Este encontra-se normalmente entre 65 e 90 % da tensão última de ruptura para as ligas de alumínio usadas em aplicações estruturais.

Os elementos estruturais em alumínio podem ser laminados ou extrudados. O processo de extrusão molda uma peça ao forçar a passagem do metal incandescente através de um orifício na forma da seção transversal desejada. Este torna viável a fabricação de perfis impossíveis de serem obtidos por laminação.

As ligas de alumínio são designadas por um sistema indicativo de quatro dígitos. O primeiro serve para indicar o grupo da liga mostrado na tabela ( II.2 ). Os dois últimos identificam a liga de alumínio ou sua pureza. Assim, 1XXX significa no mínimo 99,00 % de alumínio, 2XXX indica uma liga de alumínio predominando o cobre como elemento de combinação, 3XXX predomina o manganês, etc.

No grupo 1XXX das ligas compostas por 99,00 % ou mais de alumínio, os dois últimos dígitos representam os dois algarismos posicionados à direita do ponto decimal

Tabela ( II.2 )- Designação para os grupos de ligas

	Alumínio - 99,00% mínimo	1XXX
	Principal elemento da liga :	
Ligas de alumínio agrupadas pelos principais elementos de combinação	Cobre	2XXX
	Manganês	3XXX
	Silício	4XXX
	Magnésio	5XXX
	Magnésio e Silício	6XXX
	Zinco	7XXX
	Outros elementos	8XXX
	Séries não utilizadas	9XXX

na porcentagem mínima do metal, enquanto que o segundo dígito indica modificações nos limites de impureza. Se o segundo dígito for zero, quer dizer que não existe nenhum controle especial nas impurezas individuais, ao passo que inteiros de 1 a 9 indicam controles especiais de uma ou mais impurezas individuais. Desta forma, o número 1040 serve para indicar um mínimo de 99,40 % de alumínio sem qualquer controle especial de impurezas enquanto que as impurezas individuais são verificadas distintamente em 1140, 1240, 1340, etc.

O alumínio na forma comercialmente pura recebe o número de liga 1100. Por apresentar alta resistência à corrosão é largamente utilizado em revestimentos que não

requerem alta resistência à tração.

Nos grupos de ligas de 2XXX a 8XXX os dois últimos dígitos identificam as diferentes ligas no grupo sendo geralmente os mesmos utilizados no sistema de designações mais antigo. Deste modo, 2014 era anteriormente representado por 14S, 3003 por 3S, e 7075 por 75S e agora passaram a ser contados consecutivamente a partir de XX01 nas novas ligas. O segundo dígito da liga serve para indicar suas modificações, sendo o zero para dizer que esta é a liga original, enquanto inteiros de 1 a 9 acompanham modificações posteriores ocorridas nesta.

As ligas de alumínio classificam-se em ligas de tratamento térmico ( heat-treatable ) e ligas de tratamento não térmico ( non-heat-treatable ). Estas últimas abrangem uma série de baixa a intermediária resistência e são compostas principalmente por manganês ( ligas dos grupos 3000 e 5000 ). São muito utilizadas na confecção de placas, chapas corrugadas de forro ou na fabricação de vasos de pressão e tanques de depósito.

As ligas de tratamento térmico fornecem os perfis extrudados e fazem parte dos grupos 6000 e 7000. A excessão é feita para a liga 6061, que é disponível comercialmente tanto em forma de chapa quanto extrudado.

Nos Estados Unidos, a " American Society of Civil Engineers " estabelece normas de projeto e procedimentos de fabricação das ligas de alumínio, designadas por exemplo como a 6061-T6. Esta liga tem especificadas a tensão de escoamento máxima de 240 MPa e resistência à tração de 260 MPa, sendo composta de

pequenas porcentagens de magnésio, silício, cobre, cromo e outros metais. É altamente anti-corrosiva e utilizada como elemento de média resistência mecânica.

As ligas da série 7000 são as que fornecem as mais elevadas resistências aos perfis extrudados. Apesar de sofrer considerável redução em suas propriedades mecânicas durante o processo de soldagem, esta se mantém mais resistente que a liga 5083, a mais resistente das ligas de tratamento não-térmico. São mesmo recomendadas para a utilização na confecção de vagões ferroviários.

O sistema de designação de tempera usado pela "Aluminium Company of America" indica o tipo de tratamento sofrido pela liga. Estes podem ser:

F - como fabricado

O - recozido

H - enrijecido ( strain hardened )

W - solução com tratamento térmico - tempera instável (solution heat-treated - unstable temper )

T - tratada para produzir temperas estáveis outras que F, O ou H ( treated to produce stable tempers other than F, O, or H ).

Por razões de espaço e como este texto tem por objetivo primeiro direcionar o projeto estrutural de vagões em alumínio, não se entra em maiores considerações quanto a características de ligas de alumínio. Para maiores informações vide referências [3].



## CAPÍTULO III

VAGÃO GONDOLA COM CONCEPÇÃO DE "CAIXA REFORÇADA"  
E SISTEMAS COMPUTACIONAIS ADOTADOS NESTE PROJETO

## III.1 - Concepção de um Vagão em Alumínio

A elaboração de um anteprojeto do vagão gôndola procurou simplesmente substituir os componentes estruturais de um vagão originalmente em aço para outro em alumínio. No desenvolvimento do projeto, os truques, center-sill e travessas de pião, foram inicialmente mantidos em aço para prevenir grandes deformações no conjunto estrutural. As demais peças foram todas concebidas em alumínio em substituição às anteriores em aço. Os esforços internos atuando nos elementos desta estrutura foram calculados desmembrando-se todo o vagão e aplicando-lhe os devidos carregamentos isoladamente. Técnicas mais avançadas de computação, entretanto, tornaram possível fazer uma análise estrutural de todo o vagão como uma estrutura única, obtendo portanto, uma simulação bem mais próxima da estrutura real. Optou-se, assim, por adotar um modelo reticulado espacial e fazer

análises estáticas lineares para o vagão em operação sobre os trilhos e em diversas posições ao ser basculado.

Desta maneira, idealizou-se uma estrutura na forma de " caixa reforçada " para chegar-se a uma melhor distribuição dos esforços internos. O anteprojeto, que apresentava nos bordos do estrado e nos cantos da caixa apenas frágeis cantoneiras ( resistentes quando feitas em aço mas sem função estrutural definida em se tratando de alumínio ), teve estas substituídas por novos perfis como reforço. Os elementos denominados cordas inferiores e montantes de canto foram assim introduzidos para aumentar a amarração dos elementos estruturais. Suas seções transversais tiveram de ser cuidadosamente repensadas bem como a inclusão de qualquer outro elemento. Nesta etapa, verificou-se também a necessidade de acrescentar mais um reforço nas cabeceiras de maneira a enrijecer as chapas nas duas extremidades do vagão e firmar ainda mais os montantes de canto. Os elementos de seção transversal considerados com altura excessiva em relação a espessura foram modificados para não provocar à instabilidade localizada em parede fina. A utilização do virador de vagões e a bitola de 1,60 m dos trilhos impediu que as dimensões externas, tais como altura e comprimento do veículo, fossem alteradas.

O pré-dimensionamento geométrico dos diversos elementos estruturais foi feito procurando-se conceber ao mesmo tempo o maior número possível em perfis extrudados. Como a fôrma de extrusão, disponível no mercado brasileiro é confeccionada com raio máximo externo de 20 cm, torna-se

indispensável que o perfil tenha seção transversal constante com dimensões adequadas a este padrão. O " tarugo ", ou seja, o cilindro em alumínio pronto para ser extrudado, deve pesar 80 kgf no máximo para que não haja o rompimento pela ação do peso próprio durante o processo de extrusão. Os elementos fora desta condição foram concebidos em chapa dobrada ou perfil composto por ligações soldadas.

Inicialmente, os perfis extrudados foram concebidos com a liga AA 6351-T6, devido às suas boas propriedades mecânicas e facilidade de extrusão segundo recomendações de representantes da ALCAN do Brasil S.A. Em alguns casos, estes receberam ressaltos para apoio e soldagem da chapa interior de revestimento. Os ressaltos tiveram sua espessura aumentada a fim de compensar a perda de propriedades mecânicas provocadas pelo aquecimento da liga durante o processo de soldagem. O aquecimento da têmpera " T " reduz suas propriedades para os níveis da têmpera " O " .

Para as chapas dobradas e perfis compostos foi escolhida a liga AA 5083 e tempêra " O " devido à sua boa soldabilidade, resistência a corrosão e por esta já se apresentar no menor patamar de propriedades mecânicas não susceptível portanto de novas alterações devida a solda.

A tabela ( III.1 ) de materiais apresenta o tipo de componente estrutural dos elementos do vagão e a correspondente liga escolhida.

Tabela ( III.1 )- Materiais

Elemento	Mat.	Tipo	Liga
Montante secundário	al.	extrudado	AA 6351-T6
Reforço de cabeceira	"	"	"
Frechal	"	"	"
Gorda inferior	"	"	"
Montante de canto	"	"	"
Suporte de assoalho	"	"	"
Montante principal	"	chapa dobrada	AA 5083- O
Travessa principal	"	perf.composto	"
Travessa de pião	aço	estrutural	ASTM-A-588
Center-sill	"	"	"
Chapa revest. interno	al.	-	AA 5083- O

As figuras ( III.1 ) a ( III.15 ) ilustram o vagão analisado e seus elementos estruturais.

VISTA SUPERIOR  
escala 1:30

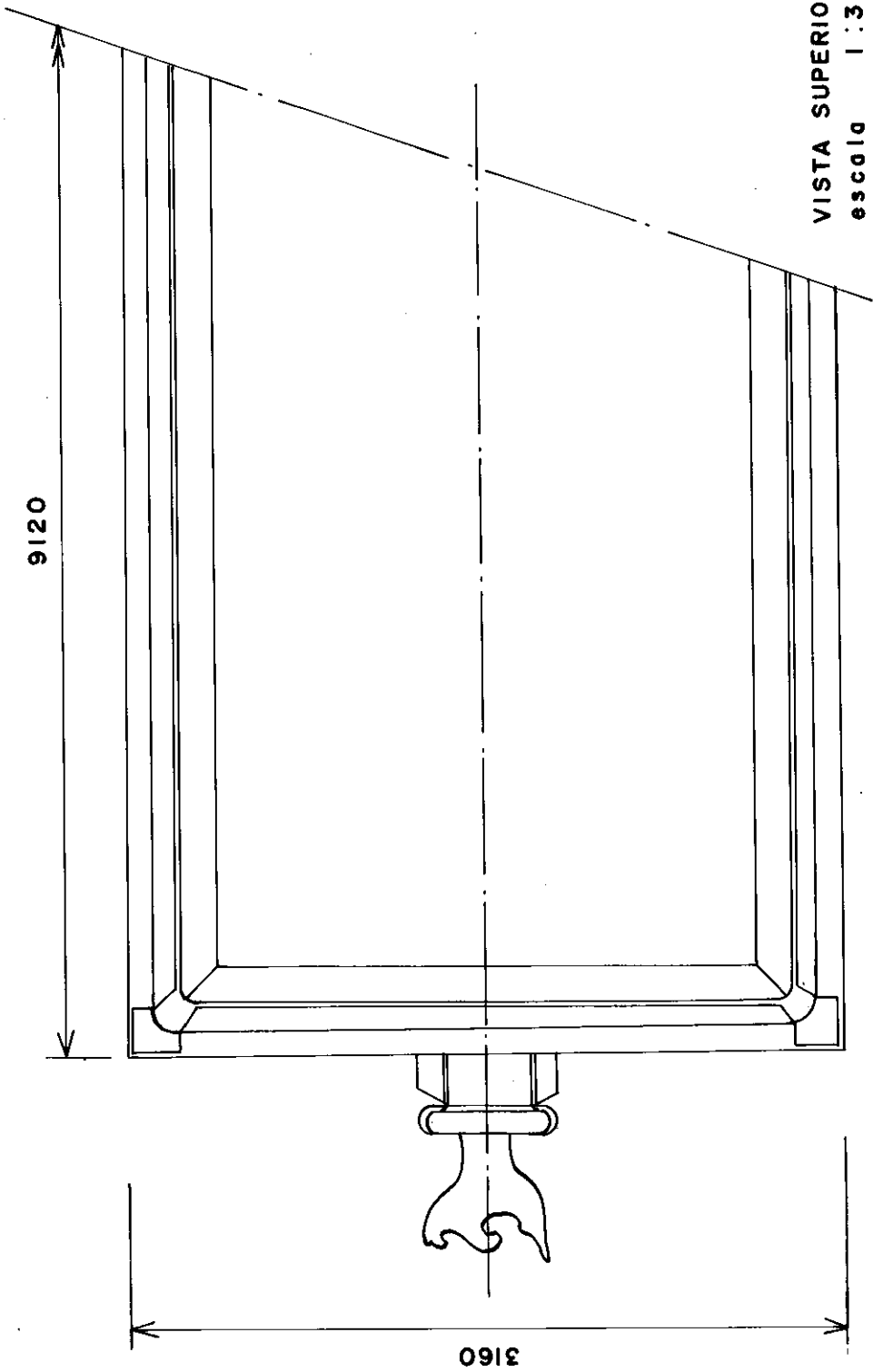


Figura ( III.1 ) - Vista superior

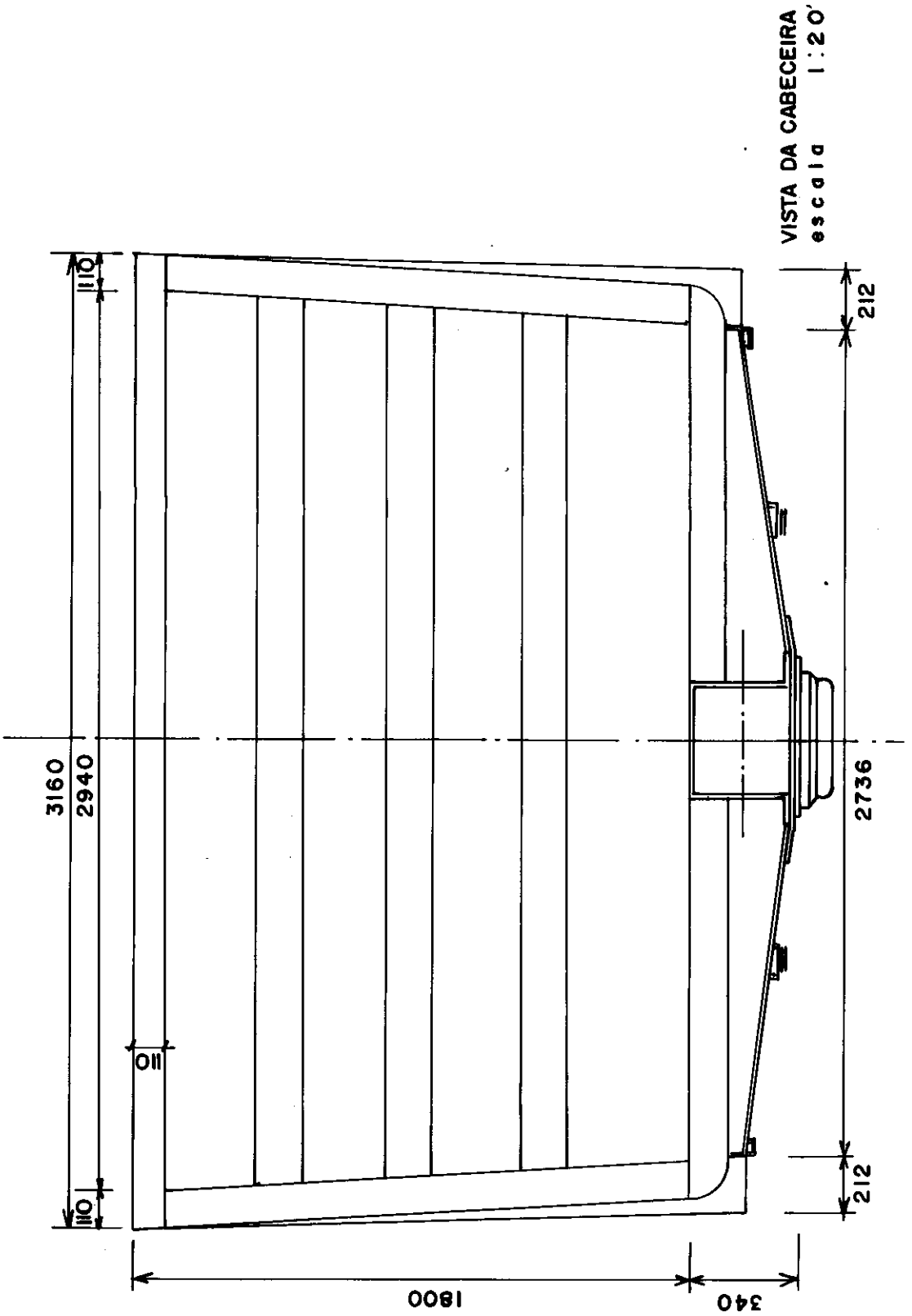


Figura ( III.2 ) - Vista da cabeceira.

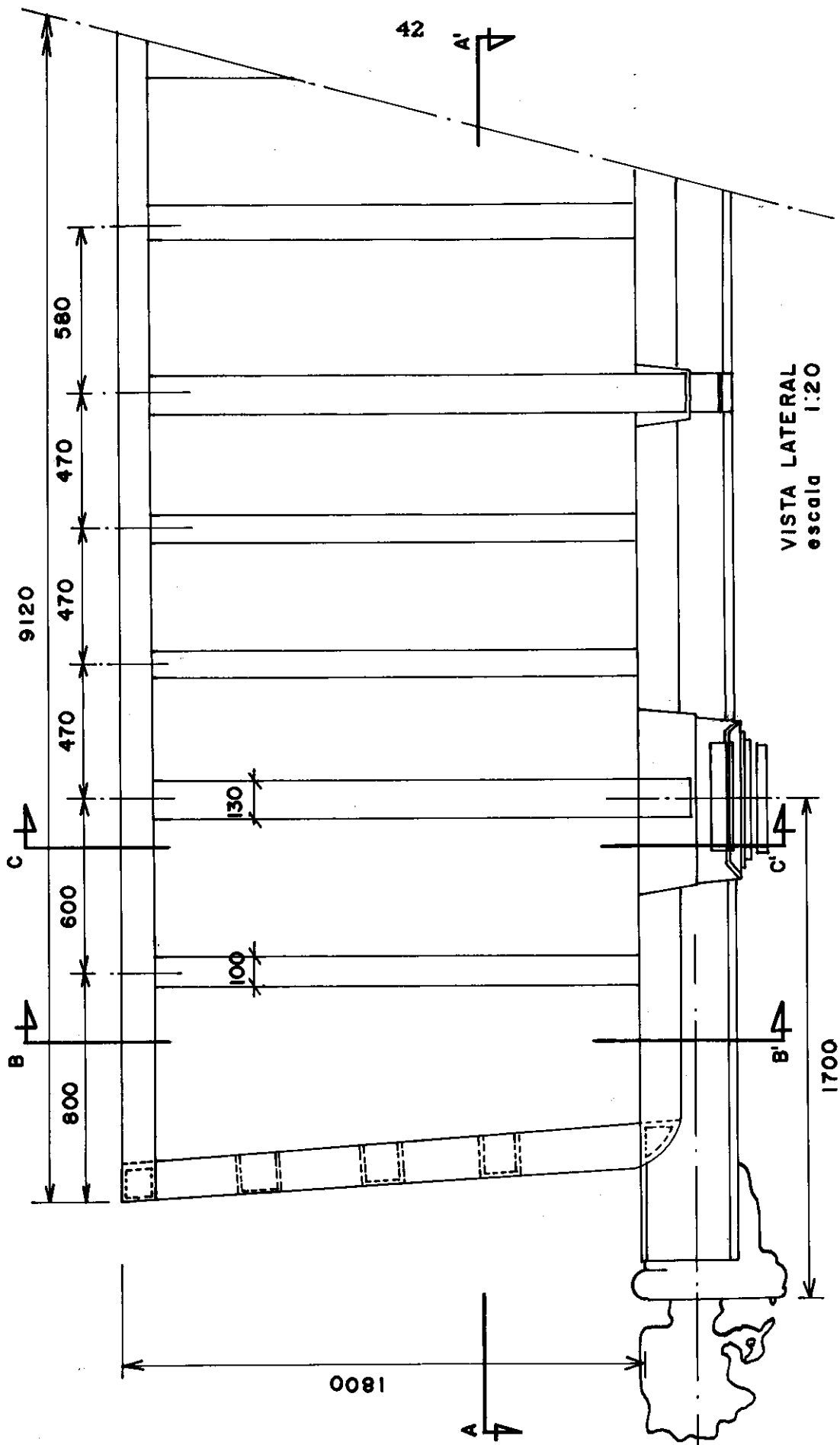


Figura ( III.3 ) - Vista lateral.

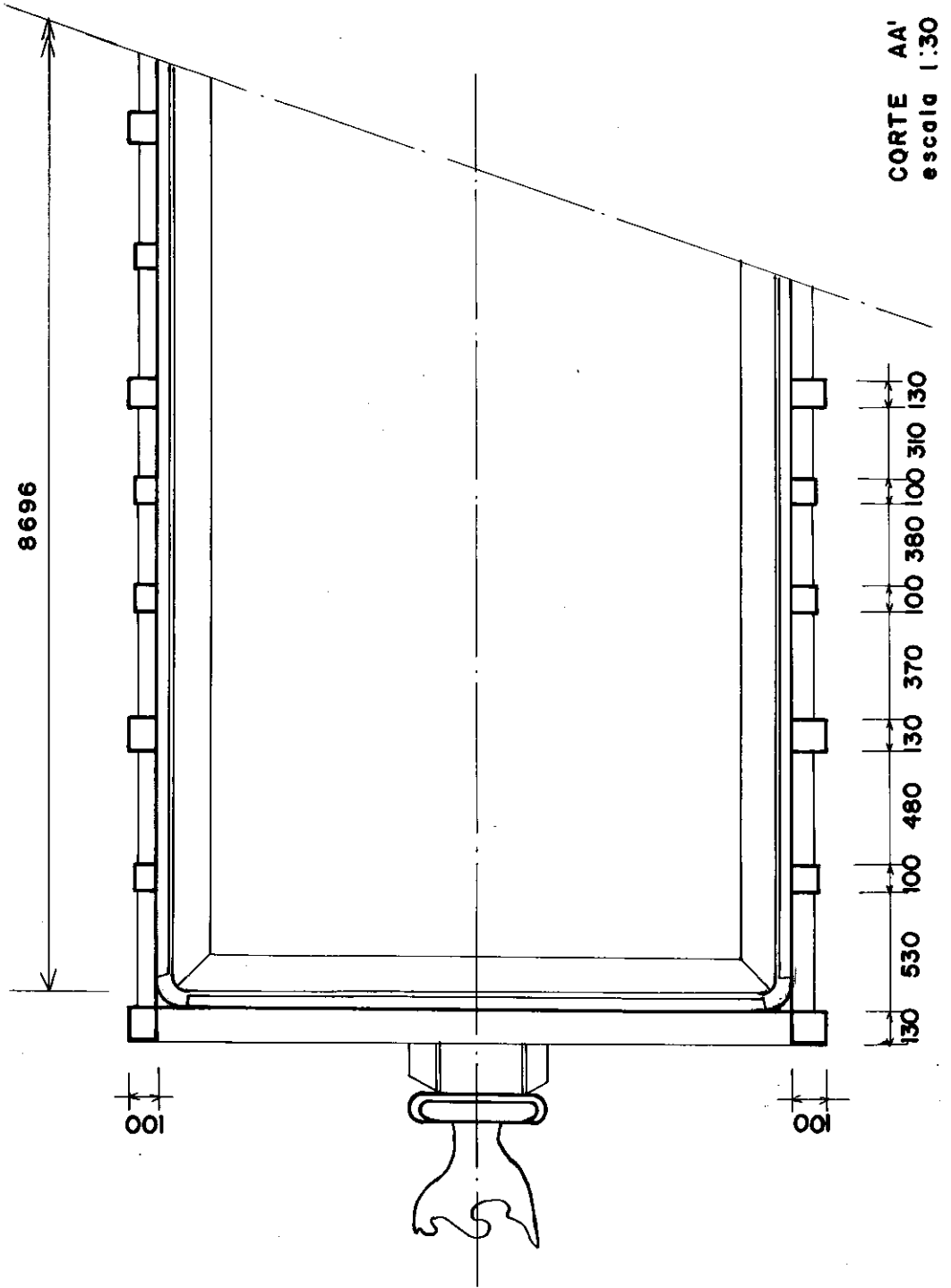


Figura ( III.4 ) - Corte AA'



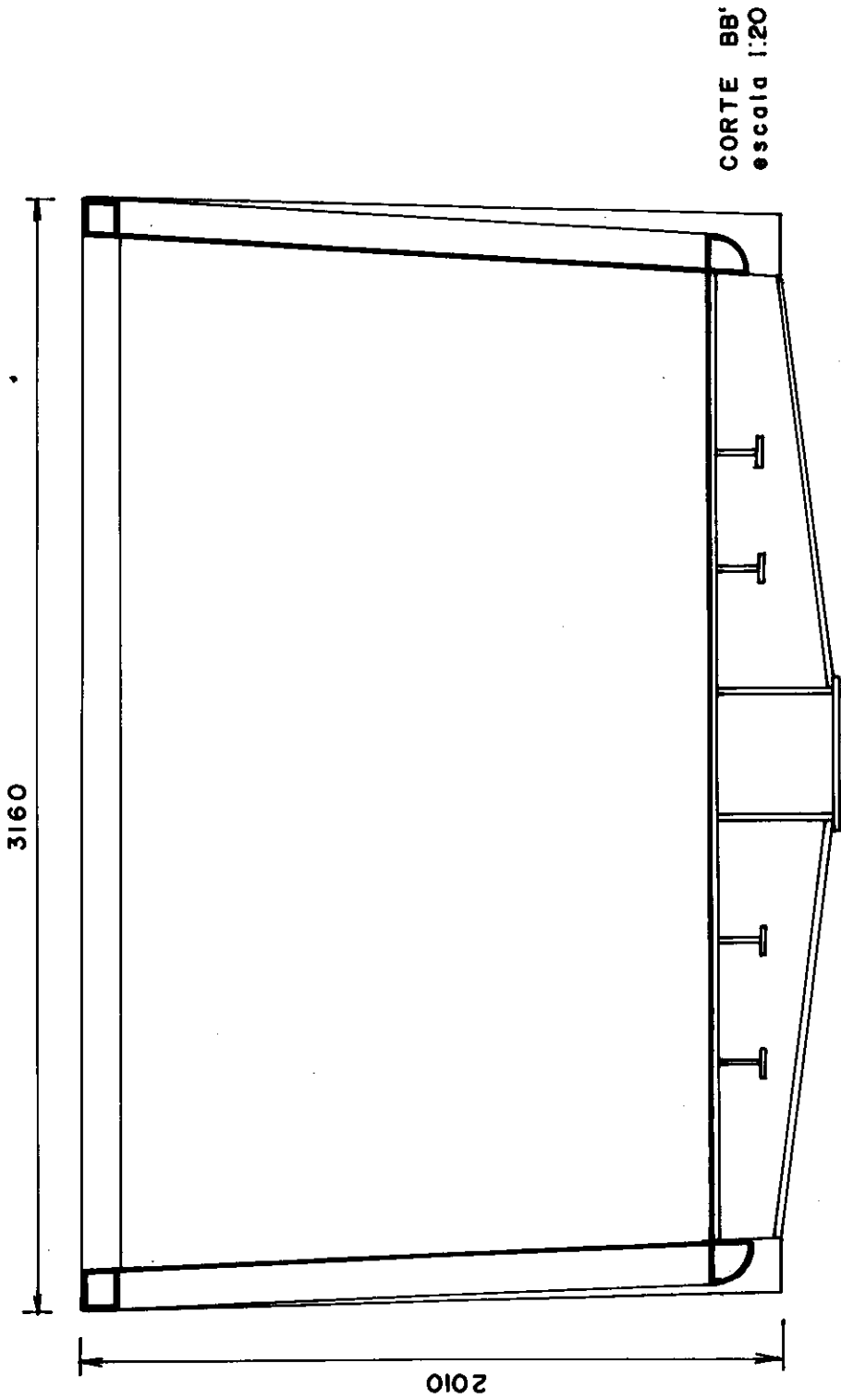


Figura ( III.5 ) - Corte BB'

CORTE CC'  
escala 1:20

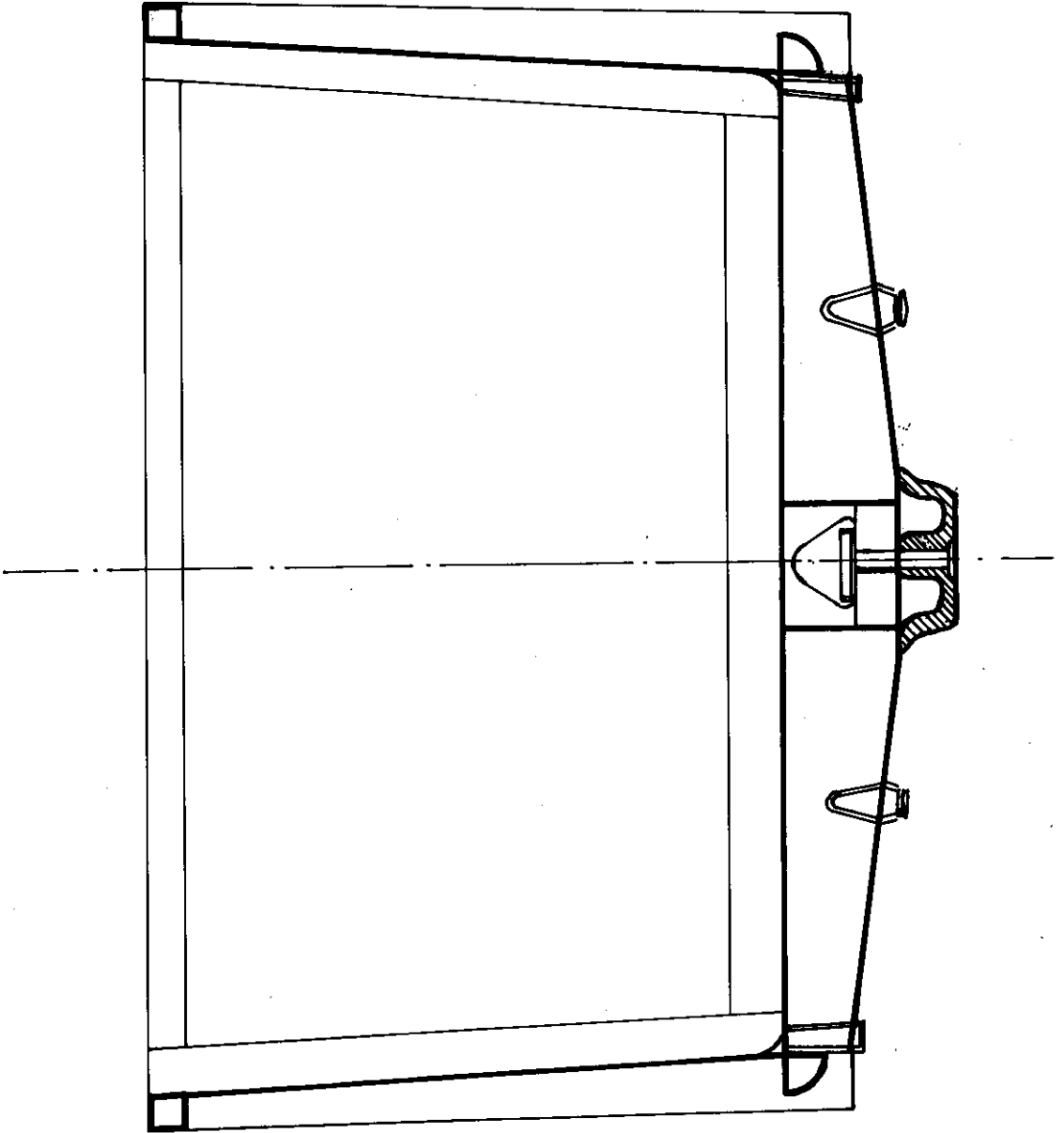
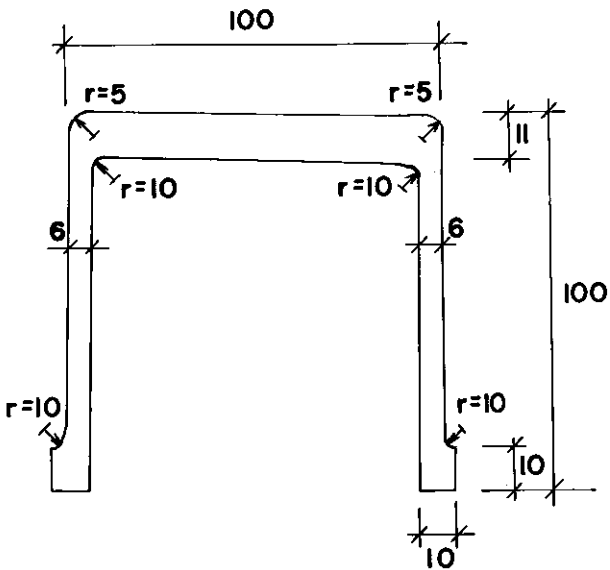
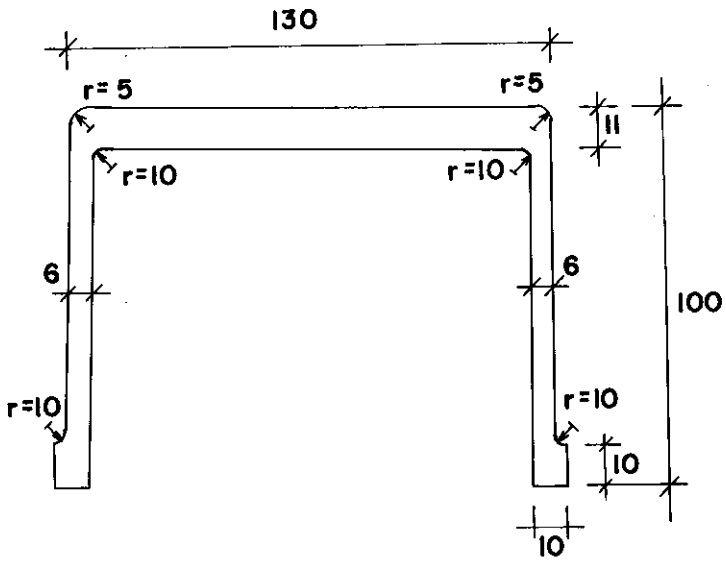


Figura ( III.6 ) - Corte CC'.



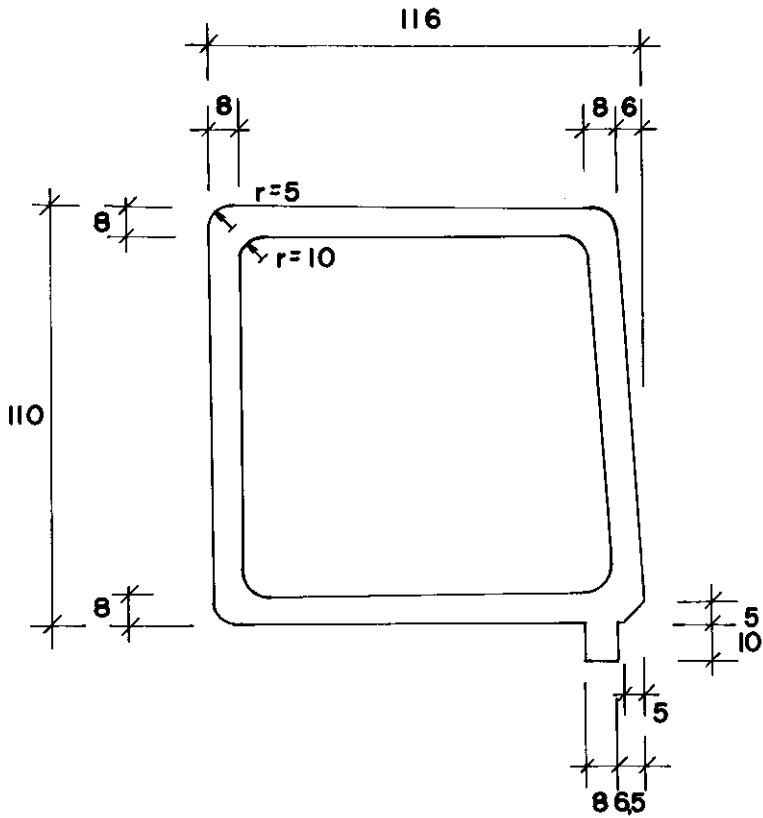
**MONTANTE SECUNDÁRIO**  
 escala 1:20  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máximo = 1,70m

Figura ( III,7 ) - Montante secundário.



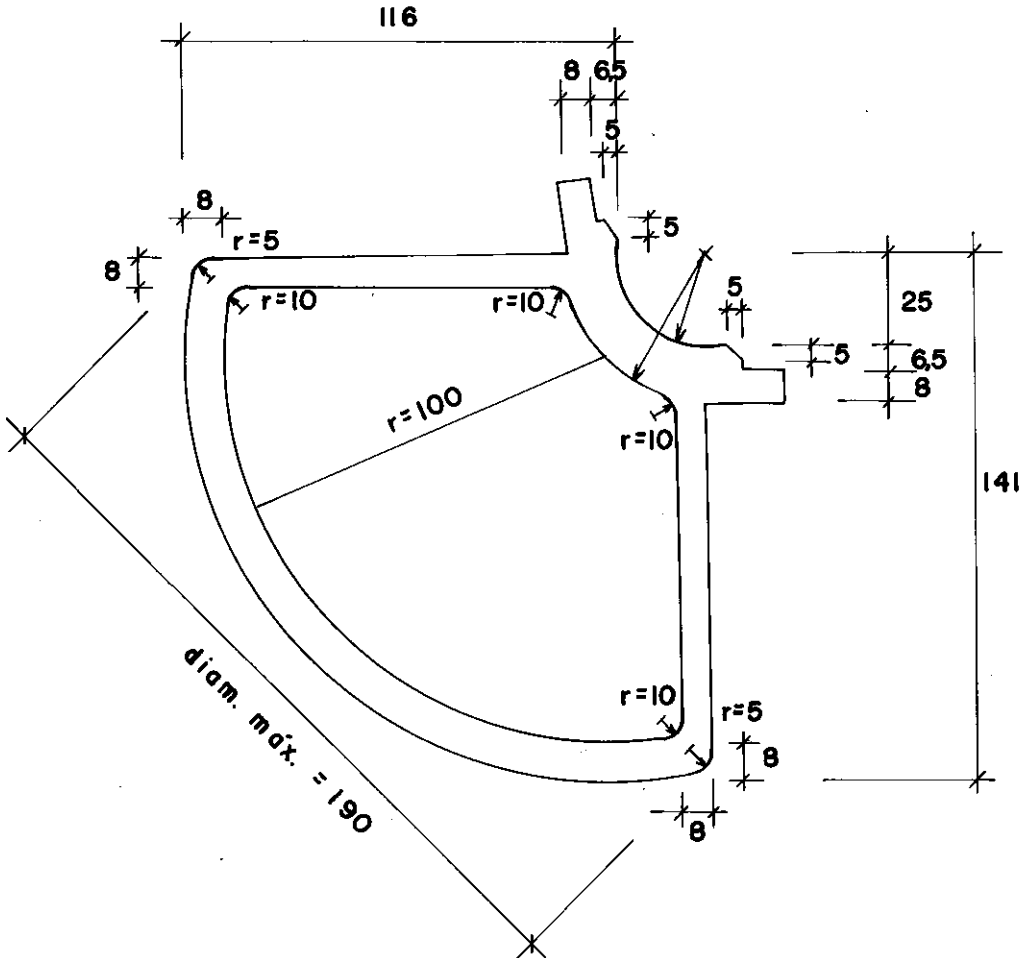
REFORÇO DE CABECEIRA  
 escala 1:20  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máximo = 2,94 m

Figura ( III.8 ) - Reforço de cabeceira.



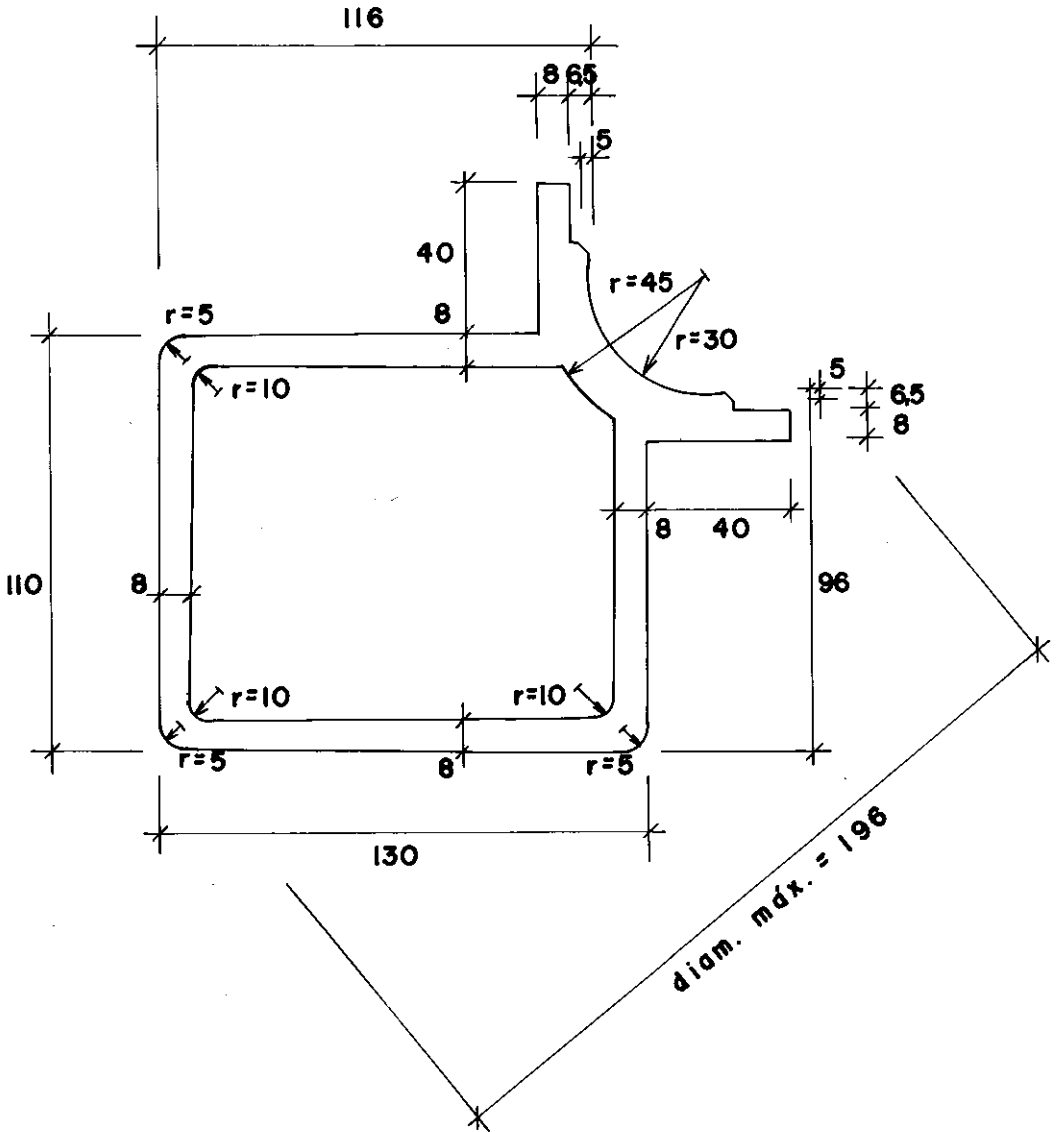
FRECHAL  
 escala 1:20  
 cotas em mm.  
 perfil extrudado  
 comp. máx. = 9,12m

Figura ( III.9 ) - Frechal.



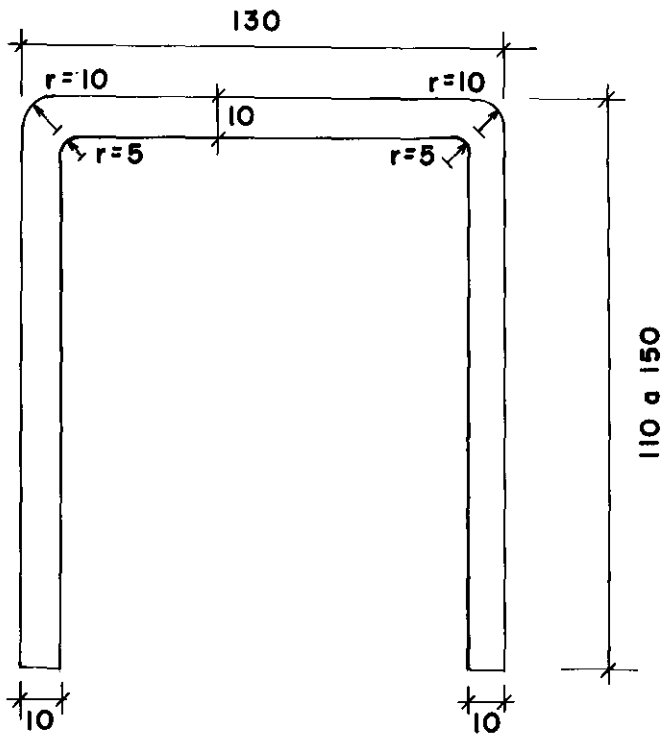
CORDA INFERIOR  
 escala 1:20  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máx = 1,27m

Figura ( III.10 ) - Corda inferior.



MONTANTE DE CANTO  
 escala 1:20  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máximo = 1,69 m

Figura ( III.11 ) - Montante de canto.



MONTANTE PRINCIPAL  
escala 1:20  
cotas em milímetros  
perfil de chapa dobrada  
comp. máximo = 1,90m

Figura ( III.12 ) - Montante principal.



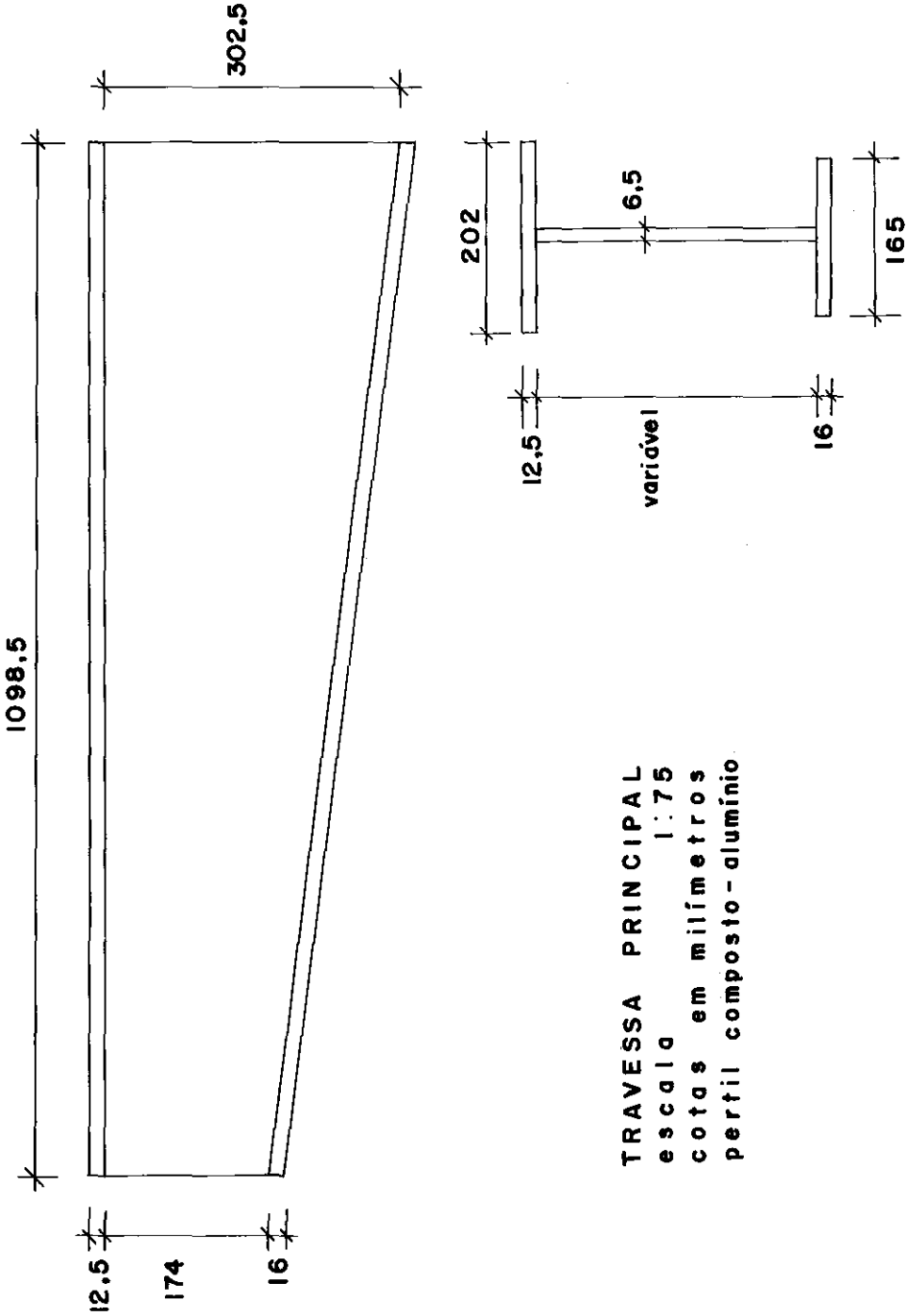


Figura ( III.13 ) - Travessa principal.

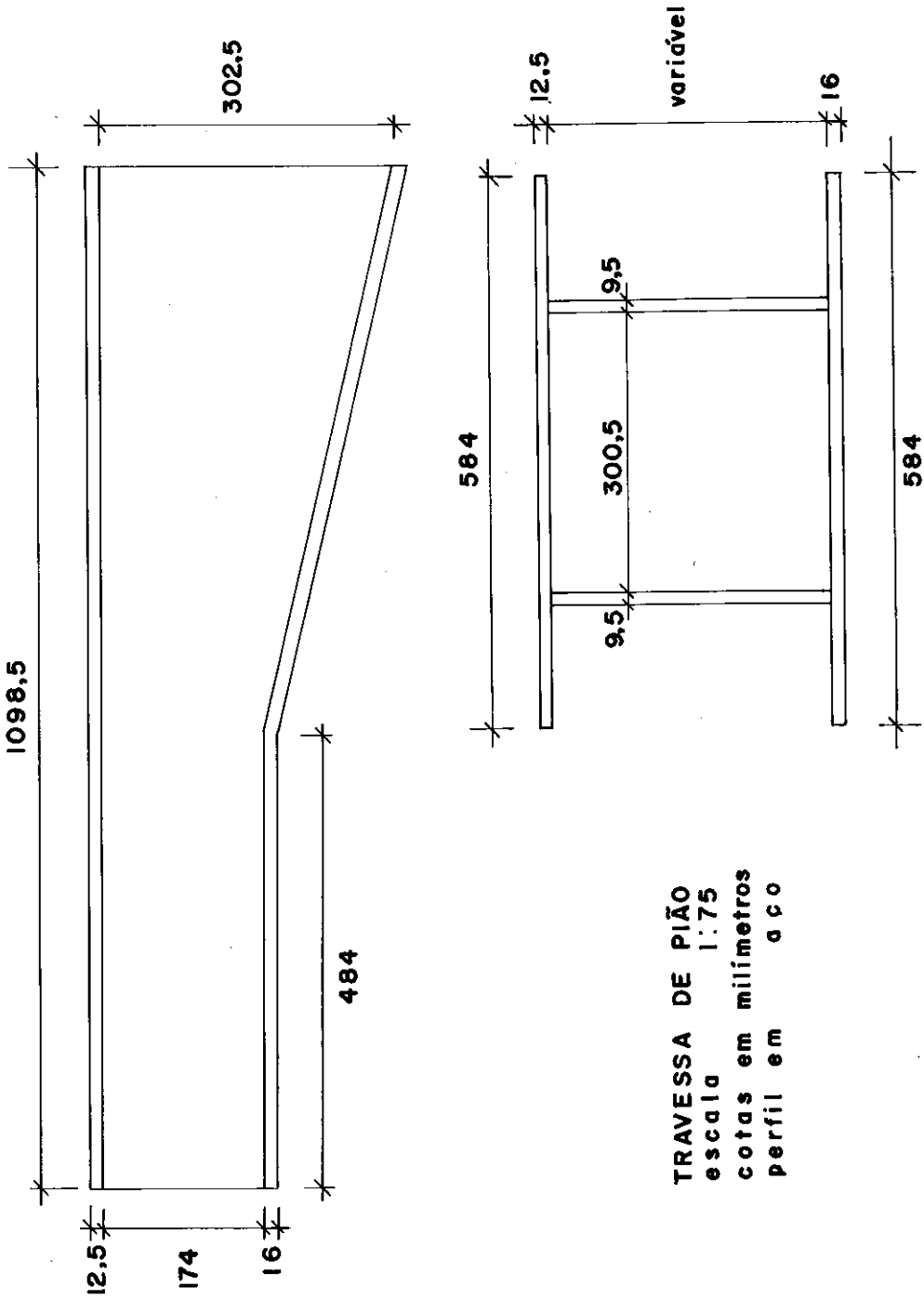
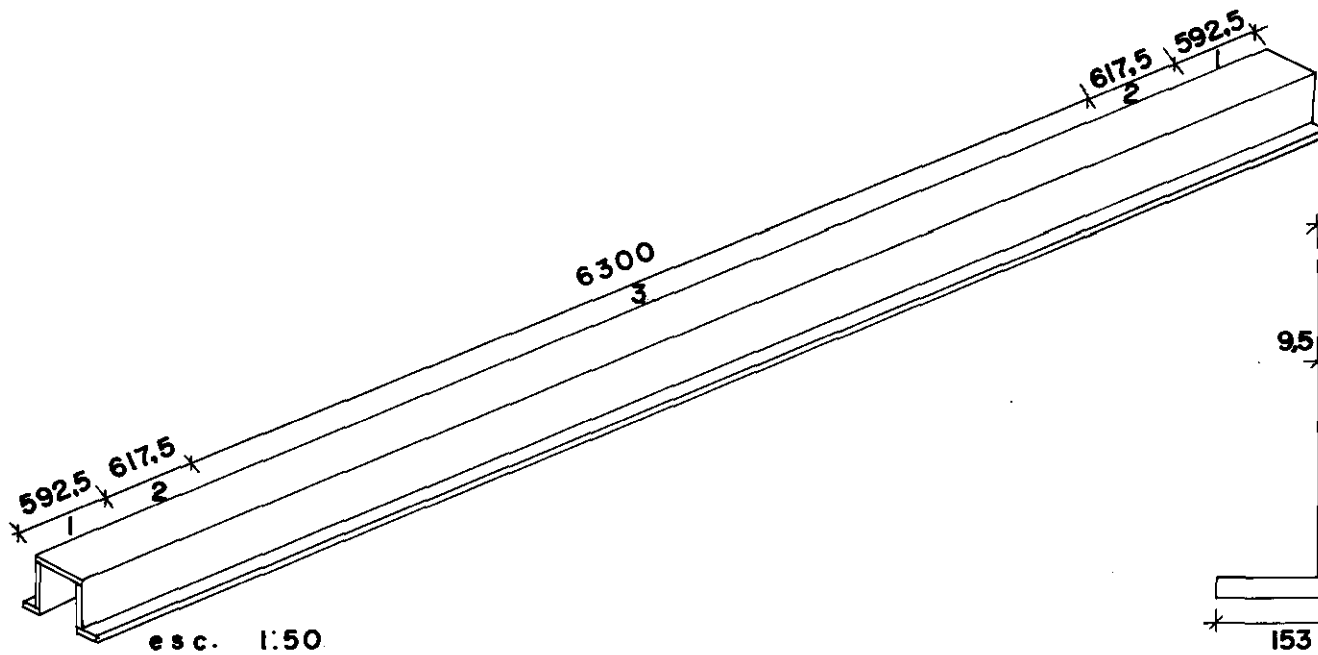
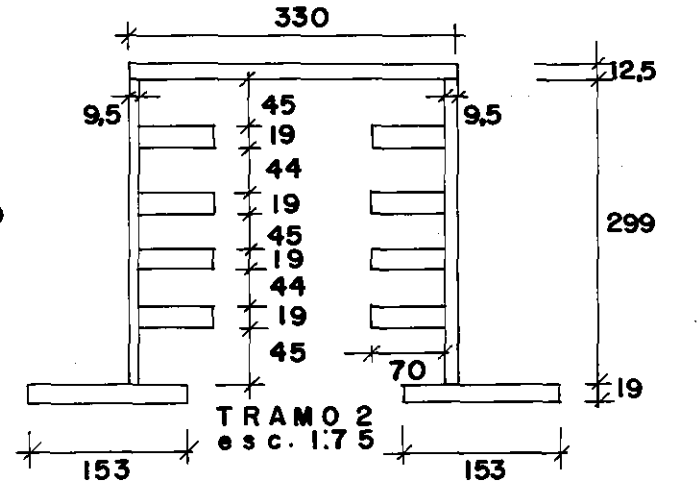
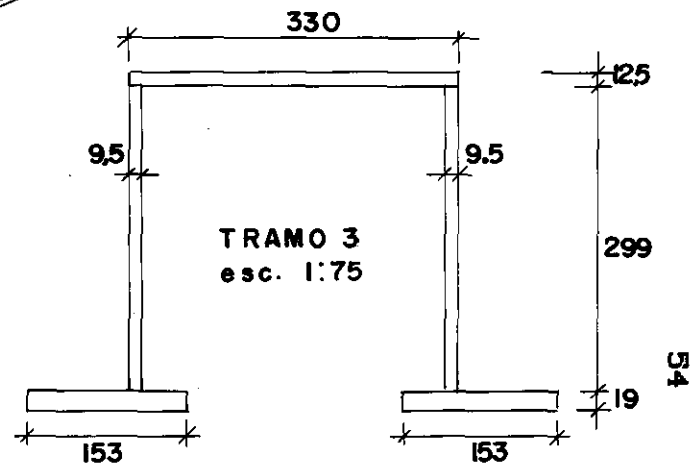
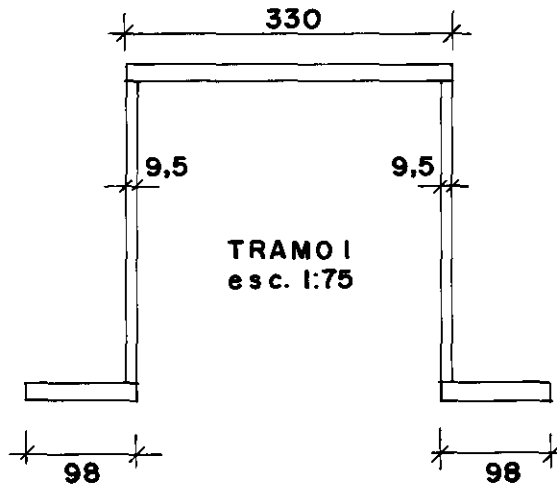


Figura ( III.14 ) - Travessa de pião.

Figura ( III.15 ) - Center-sill.



CENTER-SILL  
cotas em mm  
perfil em aço



### III.2 - Sistema Computacional Adotado para a Análise Estrutural

Adotando-se a idealização do vagão como um conjunto tridimensional de elementos reticulados foi necessário utilizar alguns sistemas computacionais que permitissem obter rapidamente um grande número de dados e/ou resultados de análise estrutural. Partindo-se, portanto, da concepção de pórtico espacial foi possível determinar os esforços solicitantes nas ligações entre o center-sill, as travessas, os montantes, as cordas, reforços, suportes e o frechal e a partir destes esforços verificar os níveis de tensões máximas atuando em cada tipo de componente. Além de possibilitar a introdução de várias modificações que se fizeram necessárias, a curto prazo, ao longo do projeto; a automação dos cálculos tornou-se extremamente importante ao reduzir a possibilidade de erros humanos durante a sua execução, bem como proporcionou resultados de análise mais próximos ao da estrutura real e melhores do que aqueles obtidos por processos simplificados e manuais de análise estrutural.

As análises de deslocamentos e esforços internos no modelo tridimensional, pórtico espacial, foram efetuadas por um programa que utiliza o método dos deslocamentos em comportamento linear. No presente caso, o programa utilizado foi o desenvolvido na COPPE-UFRJ como tese de mestrado da referência [4]. Trata-se de um programa altamente interativo com o usuário que pede a este para que sejam fornecidas as condições topológicas da

estrutura, os dados geométricos das seções transversais, os dados referentes às características elásticas e propriedades dos materiais utilizados, as suas vinculações externas e ainda os tipos de carregamento. Todos os dados de entrada são armazenados em arquivos separados. No momento ou mesmo após a introdução destes valores, estes podem ser alterados ou mesmo removidos conforme a necessidade do usuário, sem acarretar com isso qualquer dano aos dados já digitados.

Os dados topológicos referem-se aos pontos nodais segundo suas coordenadas globais nos eixos X, Y e Z e à incidência dos elementos estruturais de acordo com os seus nós inicial e final. Por meio de uma tabela de tipos de seções transversais, as características geométricas dos diversos elementos estruturais são fornecidas economizando memória interna no microcomputador, já que muitas destas seções repetem-se nos perfis. Os dados geométricos são a área da seção, as áreas efetivas em y e z para efeito do cortante, e os momentos de inércia segundo os eixos locais y e z ( eixos principais de inércia ) e o momento de inércia à torção.

As características elásticas e propriedades dos materiais utilizados também são codificadas numa tabela para economizar memória. Estas são os módulos de elasticidade E e G e o peso específico do material. As vinculações externas são representadas através de um código numérico identificando se o deslocamento em determinado nó vem a ser restringido externamente ou não.

A entrada dos dados de carregamento tanto

pode ser fornecida com as cargas atuando sobre o elemento estrutural ( no referencial local ou global ), como também diretamente sobre o ponto nodal em relação ao referencial global. Casos distintos de carregamentos podem ser agrupados numa mesma análise, para em seguida serem feitas as combinações dos resultados conforme as requisições da norma de cálculo. Além disto, o peso próprio pode ser considerado automaticamente.

Durante o processamento da análise computacional, a montagem da matriz de rigidez global foi feita através da técnica do armazenamento em perfil, considerando-se as alturas efetivas de coluna segundo SORIANO [5]. Pela necessidade de manipulação de extensa quantidade de dados, tornou-se necessário efetuar o particionamento do perfil em grupos de colunas, denominados " blocos ", que tiveram ainda de ter suas dimensões ajustadas de modo a não provocar demasiada transferência entre a memória central ( RAM ) e a memória auxiliar do tipo disco rígido ( Winchester ). Para a resolução do sistema de equações na análise automática da estrutura, o método empregado foi o de Cholesky ainda conforme SORIANO [5].

Na consideração das condições de contorno, quando são introduzidos deslocamentos prescritos , a técnica empregada foi a do número muito grande em SORIANO [6]. Esta é considerada atualmente a técnica mais eficiente na consideração de vinculações externas e corresponde à introdução de um apoio elástico de grande rigidez para o caso de um deslocamento prescrito vir a ser

nulo. Esta técnica é ainda utilizada no cálculo das reações de apoio.

Este programa foi utilizado em um micro-computador do tipo PC-XT de 640 Kbytes de memória, contendo um disco rígido ( Winchester ) de 20 Mbytes e 2 unidades de " floppy disc " de 5 1/4". Visualizações gráficas adequadas ao projeto foram possíveis através de um monitor de vídeo monocromático equipado com uma placa gráfica " Hércules " para aumento de resolução em tela.

Durante as análises computacionais dos esforços e deslocamentos, o programa recebeu aprimoramentos de modo a atender às necessidades surgidas na fase de projeto, a saber:

a. Acrescentaram-se comandos capazes de reconhecer e utilizar os recursos da placa Hércules, de maneira que se possibilitasse a representação gráfica do pórtico espacial em tela.

b. Introduziram-se rotinas considerando as ligações excêntricas ou de nó finito, para melhor representar as ligações da estrutura real.

c. Possibilitaram-se liberações em extremidade de elemento estrutural, para permitir a idealização de rótulas.

d. Finalmente, adaptou-se uma pesquisa de valores máximos de esforços entre os diversos casos e combinações de carregamentos, avaliando cada tipo de seção transversal utilizada, o que veio a simplificar imensamente a manipulação dos resultados encontrados e facilitou a fase de verificação de dimensionamento.

Deve-se observar que apenas a modificação do item b, referente às ligações excêntricas, foram desconsideradas ao longo do projeto. Levando-se em conta o comprimento deformável, de ponto a ponto nodal nas extremidades de elemento estrutural chega-se a elementos com rigidez menor do que a real, acarretando portanto resultados mais conservativos em termos de deformação da estrutura.

Após serem executadas as análises dos diversos carregamentos desejados, os resultados fornecem além dos deslocamentos globais em X, Y e Z, todos os esforços normal, cortantes e os momentos de torção e fletores nas extremidades de cada elemento, além das reações de apoio na estrutura. Uma vez obtidos estes resultados, várias combinações podem ser feitas considerando parcelas de determinados carregamentos segundo as prescrições de norma de cálculo utilizada.

Finalmente, os resultados das várias combinações analisadas são selecionados de forma a identificar os valores máximos atuando nos nós, auxiliando em grande parte a etapa seguinte de verificação dos níveis de tensões nos perfis.

Para este tipo de análise estrutural encontram-se atualmente no mercado uma crescente oferta de "softwares". Os de características mais gerais e mais largamente utilizados no Brasil em microcomputadores são o SAP80 e o SUPERSAP.



### III.3 - Sistema Computacional para o Cálculo de Propriedades Geométricas

Para a análise de esforços e deslocamentos referida anteriormente é necessário que se conheça de partida as propriedades geométricas de cada seção transversal. Elas são a princípio a área transversal, os momentos de inércia segundo os eixos principais e o momento de inércia à torção, podendo acrescentar-se ainda as duas áreas efetivas para efeito dos cortantes segundo os eixos principais da seção, caso em que, a deformação proveniente destes esforços pode ser levada em consideração. Esta deformação é importante nos elementos estruturais de grande altura relativamente ao comprimento longitudinal, que é o caso da maior parte dos componentes estruturais do vagão em questão.

Na fase inicial deste projeto, as referidas seis propriedades geométricas foram determinadas manualmente. Prevendo-se que ocorreriam inúmeras modificações no dimensionamento geométrico de seções ao longo do projeto, seções estas que na sua maioria não possuem 2 eixos de simetria, preferiu-se empregar um programa automático capaz de determinar tais propriedades. Utilizou-se, então, um sistema específico para o cálculo das propriedades geométricas que concebe os elementos como sendo de paredes finas e adota a moderna " teoria do fluxo de tensão cisalhante " de MEGSON [7] para determinar as áreas efetivas quanto à deformação pelo efeito cortante. Este sistema foi elaborado por TROYMAN e

CONCEIÇÃO [8] e determina a área da seção transversal, as áreas efetivas ao cisalhamento, o centro de cisalhamento, a constante de torção de St. Venant, os momentos principais de inércia e a direção dos eixos principais.

#### III.4 - Sistema Computacional de Verificação de Níveis de Tensões

Uma vez obtidos os esforços solicitantes máximos em todas as seções transversais da estrutura, seguiu-se o estudo com a determinação do nível de tensões atuando sobre as áreas mais desfavoráveis. Desenvolveu-se para tanto um programa automático capaz de verificar estes níveis em torno de qualquer ponto numa seção transversal. Com isso, o grande número de esforços resultantes dos vários casos de carregamento e combinações de carga necessários na simulação da estrutura e atuando sobre as diversas seções transversais puderam ser avaliados sem apresentar trabalho dispendioso.

Para cada ponto de seção transversal mais desfavorável dos elementos estruturais de parede fina considerou-se um estado plano de tensões definido por uma tensão máxima normal segundo  $x$  ( local ) e outra máxima cisalhante. Esta tensão máxima normal é encontrada somando-se os efeitos das ações do esforço normal com as dos momentos fletores, enquanto que a tensão máxima cisalhante é computado através da ação do momento de torção somada às ações dos esforços cortantes.

Neste programa foi implementado ainda o cálculo

automático da tensão equivalente através do critério da energia de distorção ou critério de Von Mises [9], já que este vem a ser o mais adequado para metais. O cálculo do fator de segurança das peças estruturais é efetuado logo em seguida, complementando a análise dos resultados.

### III.4.1 - Coeficiente de Segurança e Tensão Equivalente

O coeficiente de segurança de um estado tensional corresponde ao número de vezes que se pode aumentar simultaneamente todas as componentes de tensão para se atingir o seu estado limite último.

No caso do estado uniaxial este conceito é simples de ser interpretado pela figura ( III.16 ) e é determinado pelo valor  $n = \frac{\sigma_e}{\sigma_1}$ .

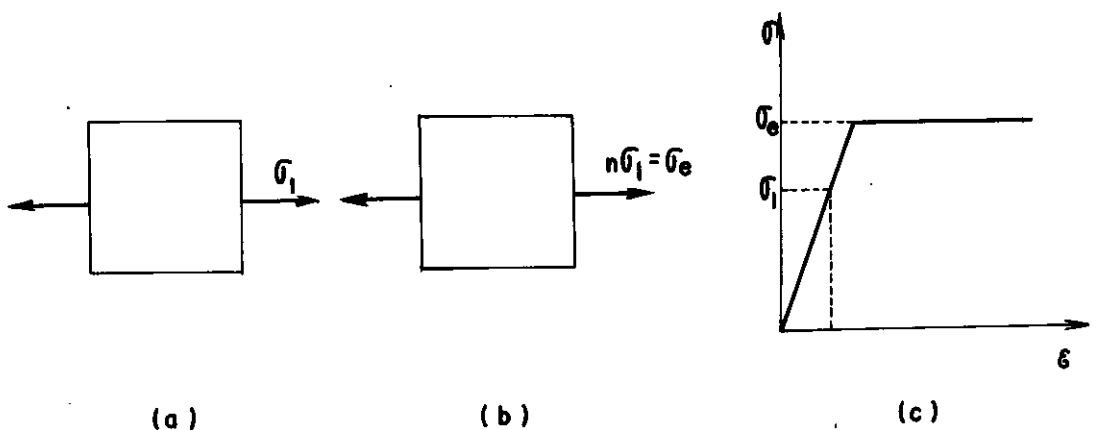


Figura (III.16) - a. Tensão uniaxial

b. Coeficiente de segurança do estado uniaxial

c. Estado limite último.

Para o estado múltiplo, entretanto, tornou-se necessário utilizar o conceito de tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) de modo a abranger os diversos estados tensionais.

Todo estado tensional pode ser representado por tensões principais como ilustra a figura ( III.17 ).

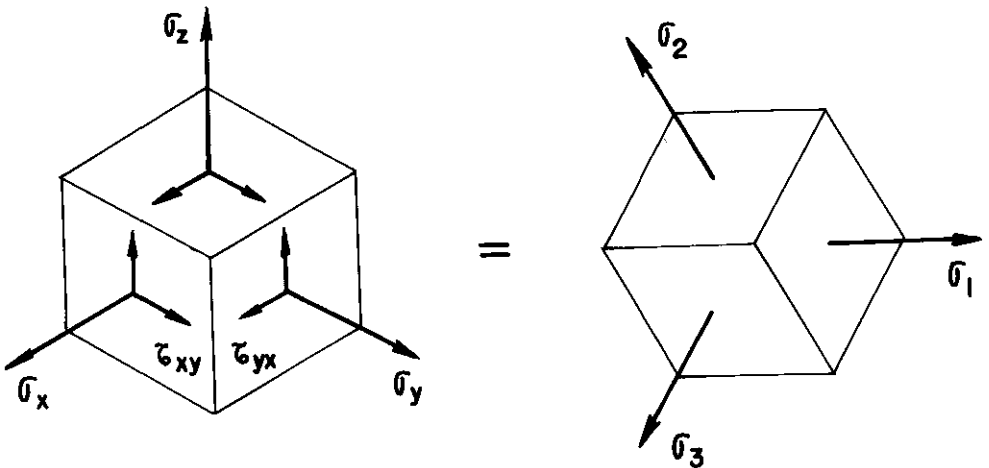


Figura ( III.17 ) - Estado correspondente de tensões principais.

A tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) vem a ser a tensão num estado uniaxial cujo coeficiente de segurança corresponda ao mesmo do estado múltiplo equivalente. A figura ( III.18 ) mostra esta relação e o coeficiente de segurança fica  $n = \frac{\sigma_e}{\sigma_{eq}}$ .

O coeficiente de segurança equivale portanto a  $n = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_{eq}}$ , sendo este aproximativo pela possibilidade da ocorrência de comportamentos diversos em ambos os casos.

A determinação de  $\sigma_{eq}$  é importante na obtenção do grau de segurança de qualquer estado tensional e segue

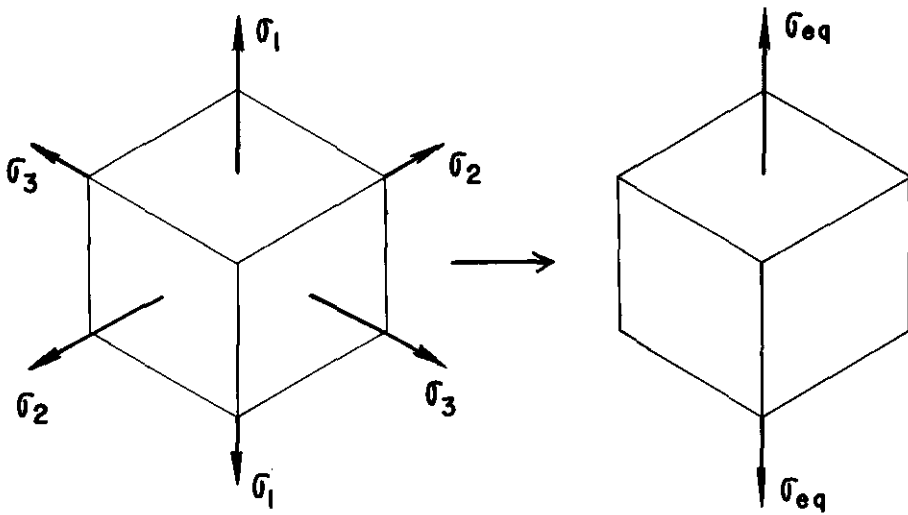


Figura ( III.18 ) - Tensão equivalente.

critérios de resistência que, comparados a resultados experimentais, determinam a sua validade.

#### III.4.2 - Critério da Energia de Distorção.

A determinação da deterioração ou estado limite de um elemento submetido a carregamento biaxial ou triaxial é feita através de critérios de resistência ( ou critérios de falha ). A execução de ensaios experimentais considerando uma infinidade de combinações das solicitações para os estados múltiplos em que  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  torna-se impraticável. Certas hipóteses são então estabelecidas para a elaboração destes critérios, de modo a viabilizar a comparação experimental com os resultados analíticos. Para os materiais dúcteis; ou seja, aqueles onde ocorrem grandes deformações permanentes ( escoamento ), o critério de Von Mises é o mais

recomendado.

A teoria da energia de distorção máxima, ou ainda hipótese de Huber-Hencky-Von Mises [10], utiliza do artifício de em um estado tensional múltiplo decompor a energia de deformação linear máxima em uma porção considerando o estado homogêneo (v) e outra parte levando em conta somente a distorção (d), e admite que esta última venha a ser a responsável pela deterioração do material. Segundo observações experimentais, os materiais homogêneos são capazes de suportar tensões hidrostáticas muito elevadas produzindo alterações no volume sem contudo sofrer o escoamento. A porção da energia que causa a distorção e portanto produz a alteração de forma no elemento é a causadora do escoamento. A figura ( III.19 ) representa a referida decomposição do estado de tensões.

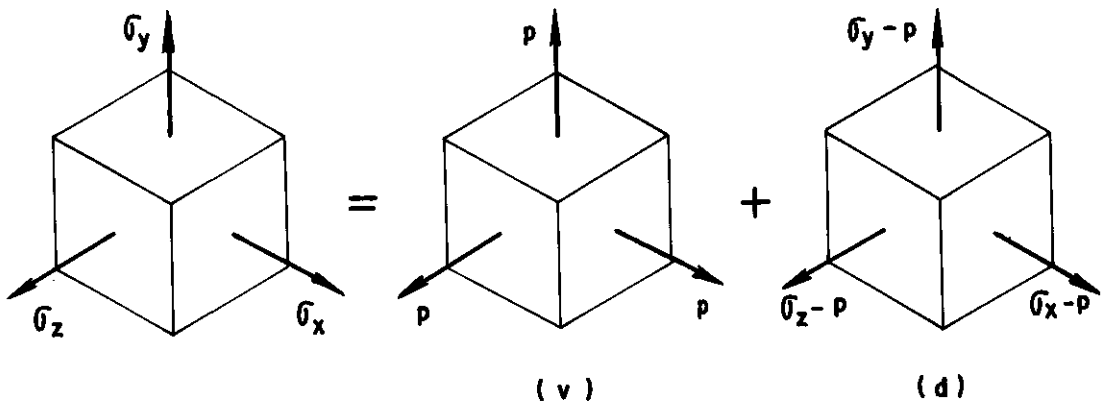


Figura ( III.19 ) -Decomposição do estado de tensões.

Assim, a energia total de deformação do material tensionado equivale à soma da energia de deformação correspondente à variação de volume ( v ) com a energia de deformação da distorção ( d ) com a notação:

$$u = u_v + u_d$$

Esta equação expressa em termos das tensões principais se escreve:

$$u = \frac{1}{2E} [ (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3) ]$$

Sabendo-se que no estado hidrostático ( v ) a tensão atuante é  $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ , o valor de  $u_v$  pode ser escrito sob a forma,

$$u_v = \frac{1}{2E} [ 3p^2 - 2\nu ( 3p^2 ) ] = \frac{3p^2 ( 1 - 2\nu )}{2E}$$

$$u_v = \frac{1 - 2\nu}{6E} ( \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 )^2$$

Como  $u_d = u - u_v$ , obtém-se,

$$u_d = \frac{1 + \nu}{6E} [ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 ]$$

Acredita-se que o estado limite seja atingido assim que a energia de distorção por unidade de volume equipara-se à de um ensaio uniaxial.

$$\bar{u}_d = \frac{1 + \nu}{6E} (\sigma_e^2 + \sigma_e^2) = \frac{(1 + \nu) \sigma_e^2}{3E}$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} [ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 ]$$



## CAPÍTULO IV

## AÇÕES EM VAGÃO GONDOLA

## IV.1 - Introdução

As especificações para projeto, fabricação e construção de vagões de carga utilizadas neste trabalho foram retiradas do " Manual of Standards and Recommended Practices - Specifications for Design, Fabrication and Construction of Freight Cars " publicado pela Association of American Railroads - AAR [11]. Tais normas descrevem as recomendações a serem respeitadas nos projetos estruturais, sem pretender, contudo, excluir outras regras capazes de auxiliar na elaboração destes.

O manual da AAR prescreve quais devem ser as ações a serem aplicadas separadamente ou em combinações à estrutura. Algumas destas prescrições foram utilizadas justamente como orienta a referida norma americana. Para determinados carregamentos, entretanto, optou-se por fazer adaptações de acordo com as condições do presente estudo. A referida norma não estabelece os limites máximos de deformação da estrutura, tornando-se em parte inadequada

para o caso do alumínio, já que a grande deformabilidade deste material é um dos principais estados limites de sua utilização. O fato ainda desta norma apresentar carregamentos para modelos simplificados de cálculo e não para modelações estruturais mais realísticas faz com que as cargas apresentadas sejam conservativas, e podem inclusive inviabilizar o projeto em alumínio.

Os casos de carregamento encontram-se relacionados a seguir:

## IV.2 - Casos de Carregamento

### IV.2.1 - Peso Próprio

A norma AAR, no item 4.1.2, especifica que o peso próprio dos elementos estruturais seja sobreposto proporcionalmente aos respectivos elementos ou distribuído uniformemente sobre a área do assoalho. Para os veículos de carga, este pode ainda ser adicionado à carga útil e considerado como parte dela.

No programa de microcomputador utilizado, o peso próprio foi considerado de forma automática incidindo sobre os devidos elementos estruturais. Como o peso da chapa de alumínio de revestimento interno do vagão ficaria excluído nesta consideração automática de carregamento, procurou-se através de um artifício de cálculo considerar o peso próprio total do vagão. Primeiramente, calculou-se pelo programa o peso próprio total dos elementos estruturais do vagão. O peso próprio da chapa foi

calculado manualmente para que somado com o valor encontrado anteriormente fosse obtido o peso total do vagão e a relação de acréscimo deste peso.

$$\text{Relação de acréscimo no peso estrutura} = \frac{\text{Peso est. s/ chapa + peso est. c/ chapa}}{\text{Peso da est. s/ chapa}}$$

Aumentando-se os pesos específicos dos materiais constituintes do modelo tridimensional nesta relação foi possível considerar-se o peso da chapa de alumínio automaticamente na análise do modelo estrutural.

Neste modelo, foram excluídos os truques pois os apoios foram considerados como sendo os piões.

#### IV.2.2 - Carga Útil ( Live Load )

Para a consideração do carregamento acidental do minério, a norma especifica percentuais de carga aplicados ao longo do vagão de acordo com o item 4.1.3.3, de forma a cobrir possíveis situações mais desfavoráveis.

Das cinco hipóteses especificadas para o vagão gôndola, apenas três foram consideradas no presente estudo visto que as duas restantes não eram as mais desfavoráveis e nem prováveis de ocorrer na estrutura real em análise. A figura ( IV.1 ) refere-se às hipóteses utilizadas para a carga útil de minério e a tabela ( IV.1 ) apresenta as cargas aplicadas nas barras segundo os códigos LB2A, LB2B e LB2C designados para as diferentes hipóteses.

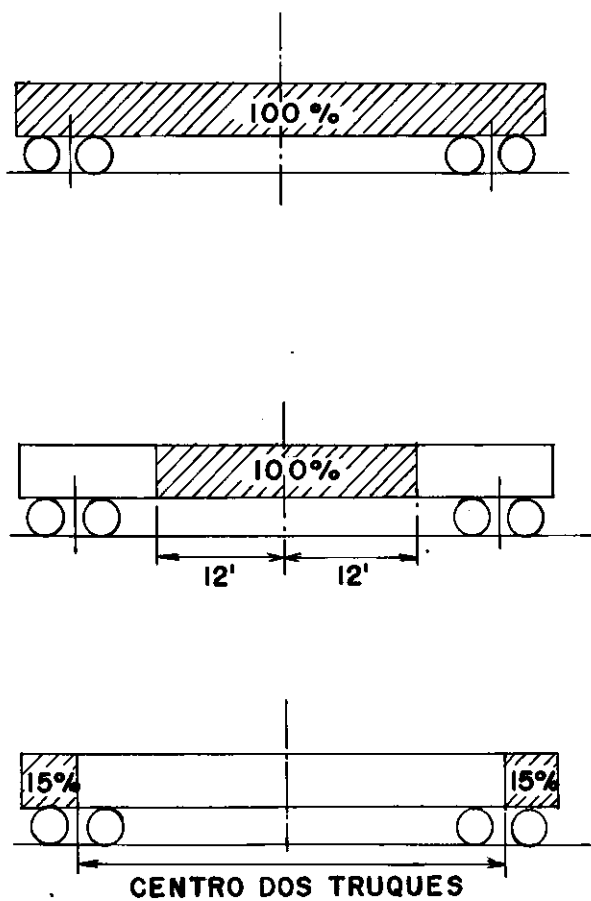
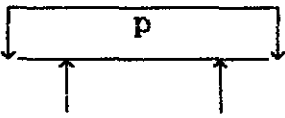
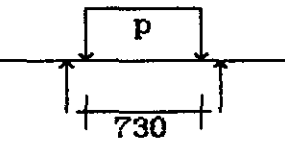
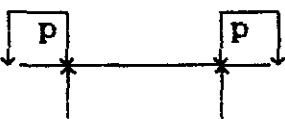


Figura ( IV.1 ) - Hipóteses utilizadas para a carga útil de minério ( item C.II.41.1 da AAR ).

Tabela ( IV.1 ) - Distribuição da Carga Útil  
( Item 4.1.3.3 da AAR )

Capacidade do vagão: 95.000 kgf

Hipótese		p/ carga útil (%)	p kgf ( $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ )	área de dis- tribuição de carga (cm <sup>2</sup> )
LB2A		100	0,368	292,7×882,6 = 258337
LB2B		100	0,445	292,7×730 = 213671
LB2C		30	0,360	292,7×270,4 = 79146

IV.2.3 - Carga de Tração/Compressão Longitudinal  
( Draft/Buf Load )

A estrutura deve ser capaz de sustentar uma carga de tração ou compressão de 158.760 kgf, aplicada nas extremidades do center-sill, correspondente às forças para "aparar" ou "puxar" o engate durante as operações do vagão, conforme definido no item 4.1.8 da AAR.

Valor da força normal aplicada no center-sill:

LB3A → + 158.760 kgf

LB3B → - 158.760 kgf

#### IV.2.4 - Carga de Compressão Crítica ( Compressive End Load )

Pelo item 4.1.9, uma carga compressiva crítica de 453.390 kgf deve ser aplicada nas extremidades do center-sill sem que as tensões induzidas resultantes excedam as tensões de referência descritas no item IV.3 adiante.

#### IV.2.5 - Pressão Lateral ( Lateral Forces )

A pressão lateral provocada pela carga de minério nas paredes do vagão gôndola é especificada no item 4.1.14.1 e distribui-se verticalmente de maneira a ser máxima na linha do assoalho e decresce uniformemente até se anular na superfície do carregamento. Para o caso de vagões abertos no topo, a AAR apresenta a fórmula

$$P = \frac{1}{2} W ( h + 1 )^2 \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi}$$

onde: P = força lateral (lbs/foot of length)

W = peso do carregamento ( lbs/cu ft )

h = altura de carga ( ft ),

$\phi$  = ângulo estático de repouso ( 25° ).

Assim, utilizando esta fórmula foi calculada a pressão lateral e, considerando o efeito da chapa lateral, descarregada esta ação nos montantes e cordas de canto.

#### IV.2.6 - Carga de Levantamento ( Jacking Load )

O item 4.1.6 da AAR prescreve que 40 % da carga bruta do vagão seja aplicado em cada macaco ( jacking pad ) sem que as tensões excedam a resistência de escoamento. Os macacos devem ser posicionados preferencialmente sob os extremos das travessas de pião.

#### IV.2.7 - Inclinação da Carga ( Leaning Loads )

Os efeitos de inclinação de carga estão descritos no item 4.1.14.2 da AAR e foram calculados tomando-se 75 % da carga limite uniformemente distribuída.

#### IV.2.8 - Descarregamento

As ações e condições de contorno adotadas no modelo de descarregamento do vagão simula condições próximas das reais apresentadas no car-dumper. Consideram-se rotações de  $90^{\circ}$  e  $180^{\circ}$  do modelo como as situações mais desfavoráveis de ocorrer na prática.

Para o giro de  $90^{\circ}$  considerou-se metade do carregamento de minério atuando numa das laterais do veículo, acrescido do peso próprio da estrutura na mesma

direção. Soma-se a estes uma carga nodal equivalendo à metade do peso do truque posicionada em cada pião, isto porque o truque acompanha o giro, quando então metade de seu peso se descarrega no car-dumper e a outra metade no próprio vagão através do pino de pião.

Para o giro a  $180^{\circ}$  considera-se somente o peso dos truques mais o peso próprio do vagão descarregado.

As outras especificações da norma que não foram mencionadas aqui puderam ser desprezadas na análise por não representarem situação mais desfavorável de cálculo ou ainda pela necessidade de uma comprovação experimental. Este é o caso, por exemplo, da carga de impacto onde optou-se por analisar em um dos extremos do protótipo a ser construído.

A tabela ( IV.2 ) apresenta os códigos utilizados para os carregamentos básicos.

#### IV.3 - Casos de combinação e margem de segurança

Cada elemento estrutural do vagão gôndola deve ser investigado para a sua condição de carregamento mais crítica que tanto pode resultar de cargas isoladas quanto de combinações que possam ocorrer na realidade.

Na combinação dos casos de carregamento estes recebem coeficientes de majoração de cargas fixados na norma. Os fatores devem ser multiplicados às cargas de projeto que atuarão na estrutura. Pelos critérios da AAR estes variam de 1,0 a 2,25 e encontram-se resumidos no quadro J-4-1001 e transcritos aqui na tabela ( IV.3 ) das



combinações dos casos.

Tabela ( IV.2 ) - Carregamentos Básicos

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	OBS
LB1	peso próprio	gerado automaticamente
LB2	minério	LB2A LB2B LB2C
LB3	tração/comp. longitudinal	LB3A - tração LB3B - compressão
LB4	compressão crítica	----
LB5	pressão lateral	----
LB6	levantamento	considerado em modelo especial
LB7	descarregamento	LB7A LB7B
LB8	inclinação da carga	----

TABELA ( IV.3 ) - Fator de Carga

COMBINAÇÃO	CARREGAMENTO	BÁSICOS	FATOR DE CARGA
	NOME	CÓDIGOS	
1	PESO PRÓPRIO + MINÉRIO + TRAÇÃO LONG.	LB1 LB2A LB3A	1,8
2	PESO PRÓPRIO + MINÉRIO + TRAÇÃO LONG.	LB1 LB2B LB3A	1,8
3	PESO PRÓPRIO + MINÉRIO + TRAÇÃO LONG.	LB1 LB2C LB3A	1,8
4	PESO PRÓPRIO + MINÉRIO + COMP. LONG.	LB1 LB2A LB3B	1,8
5	PESO PRÓPRIO + MINÉRIO + COMP. LONG.	LB1 LB2B LB3B	1,8

COMBINAÇÃO	CARREGAMENTO	BÁSICOS	FATOR DE CARGA
	NOME	CÓDIGOS	
6	PESO PRÓPRIO + MINERIO + COMP. LONG.	LB1 LB2C LB3B	1,8
7	PESO PRÓPRIO + MINERIO	LB1 LB2B	2,25
8	PESO PRÓPRIO + MINERIO	LB1 LB2C	2,25
9	PESO PRÓPRIO + MINERIO + COMP. CRITICA	LB1 LB2B LB4	1,0
10	PESO PRÓPRIO + MINERIO + COMP. CRITICA	LB1 LB2C LB4	1,0

COMBINAÇÃO	CARREGAMENTO	BÁSICOS	FATOR DE
	NOME	CÓDIGOS	CARGA
11	PESO PRÓPRIO	LB1	1,8
	+ MINERIO	LB2B	1,8
	+ TRAÇÃO LONG.	LB3A	1,8
	+ PRESSÃO LAT.	LB5	1,5
12	PESO PRÓPRIO	LB1	1,8
	+ MINERIO	LB2C	1,8
	+ TRAÇÃO LONG.	LB3A	1,8
	+ PRESSÃO LAT.	LB5	1,5
13	PESO PRÓPRIO	LB1	1,8
	+ MINERIO	LB2B	1,8
	+ COMP. LONG.	LB3B	1,8
	+ PRESSÃO LAT.	LB5	1,5
14	PESO PRÓPRIO	LB1	1,8
	+ MINERIO	LB2C	1,8
	+ COMP. LONG	LB3B	1,8
	+ PRESSÃO LAT.	LB5	1,5

Os carregamentos correspondentes ao giro de 90° e 180°, bem como o carregamento de levantamento ( jacking load ), foram processados isoladamente e separados dos demais carregamentos pelo fato de suas condições de contorno diferirem das dos demais.

Por ser excessivamente conservativo, o carregamento de inclinação de carga ( leaning load ) também foi processado isoladamente.

Segundo a AAR, a margem de segurança se calcula pela fórmula

$$\text{Margem de Segurança} = \frac{\text{Tensão de Referência}}{\text{Tensão Atuante}} - 1$$

A tensão de referência no projeto assume o valor da tensão de escoamento do material ou 80 % da tensão de ruptura, considerando-se o menor dos dois valores, ou também a tensão crítica de flambagem de acordo com a combinação de carregamento conforme apresentado na tabela ( IV.3 ). A tensão atuante, tem a conotação de tensão de cisalhamento ou normal equivalente e o quociente tensão de referência pela tensão atuante fornece o fator de segurança que deve ser igual ou maior do que 1 para se ter segurança no dimensionamento de determinado elemento.

## CAPÍTULO V

### MODELAÇÃO ESTRUTURAL ADOTADA

#### V.1 - Introdução

Após serem introduzidos os montantes de canto, as cordas inferiores e um maior número de reforços de cabeceira no anteprojeto do vagão gôndola, partiu-se para uma modelação tridimensional capaz de bem representar matematicamente o comportamento da estrutura real. Discretizou-se inicialmente todo o vagão em elementos estruturais com pontos nodais referenciados a um sistema de coordenadas globais de modo a permitir a utilização de um programa automático na fase de análise de esforços e tensões. Para isto foi necessário obter para cada elemento todas as suas propriedades geométricas de seção transversal.

#### V.2 - Considerações a cerca da Modelação Tridimensional

Uma vez obtido o centro de gravidade para cada seção transversal, construiu-se o modelo esquematizado nas figuras ( V.1 ) e ( V.2 ), fazendo-se

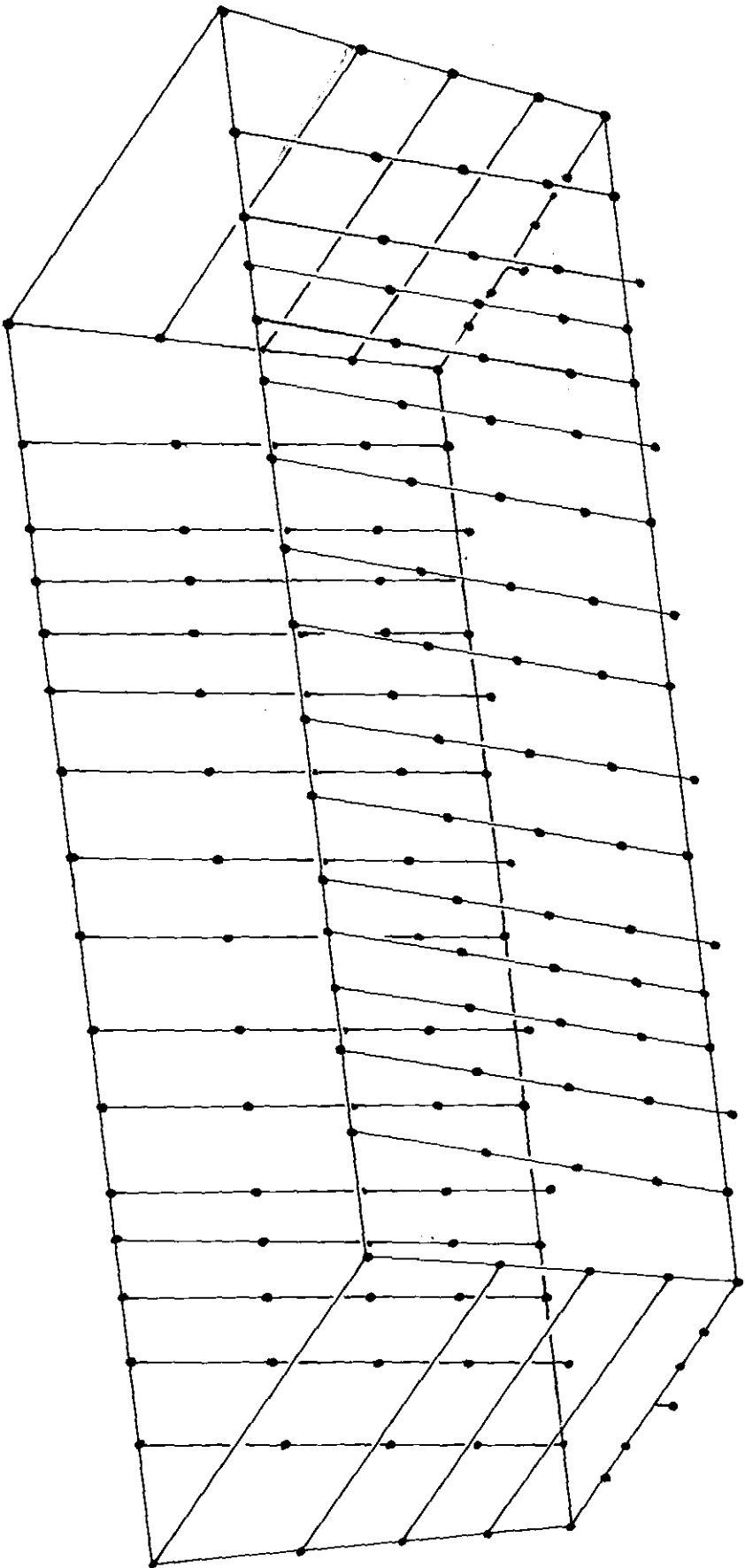


Figura ( V.1 ) - Discretização da caixa do vagão.

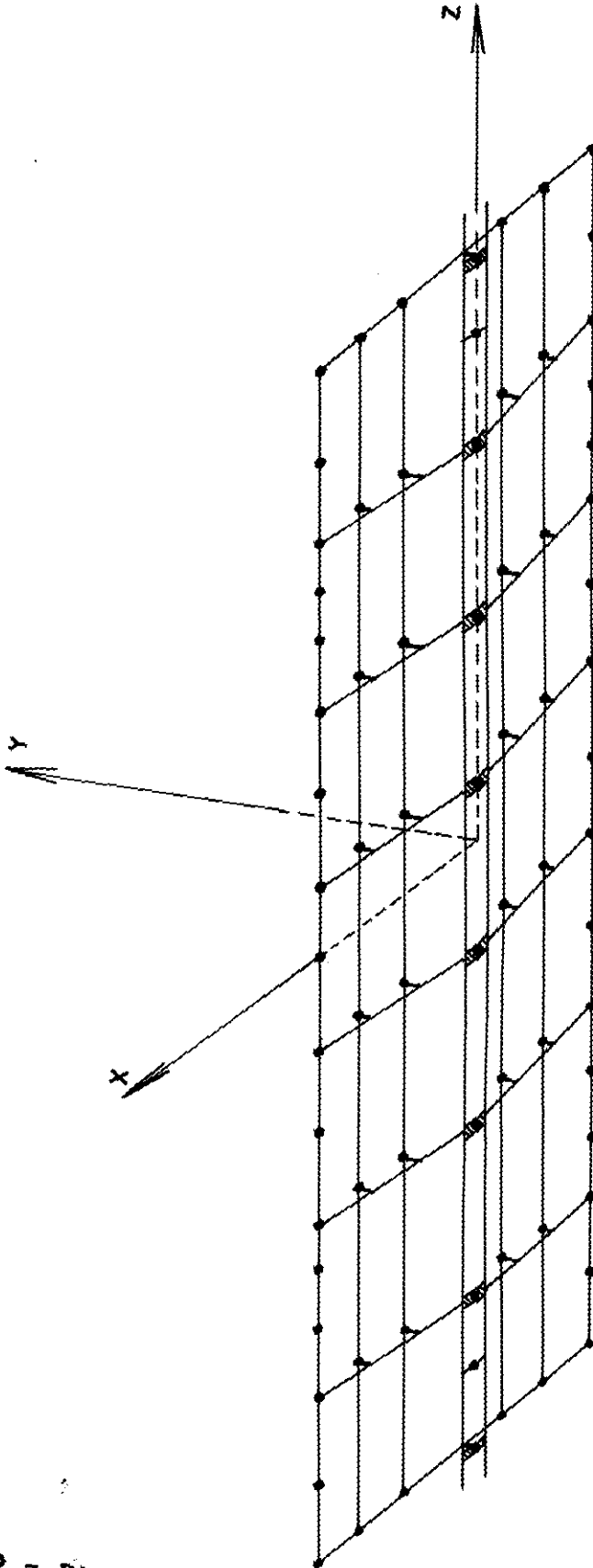


Figura ( V.2 ) - Discretização do estrado do vagão.



as seguintes considerações :

a) Os pontos nodais surgem nas interseções das linhas neutras.

b) Por imposição do programa de somente analisar seções transversais constantes, os elementos de seção transversal variável foram considerados como formados por um conjunto de tramos de seção constante ligados através de pontos nodais. Tais elementos são os montantes principais, travessas principais e de pião.

c) Já que os reforços de cabeceira requerem nós nos montantes de canto, os tramos dos montantes principais terão seus nós alinhados a estes.

d) As travessas foram subdivididas nas interseções com os suportes de assoalho.

e) As análises com os carregamentos LB1, LB2, LB3, LB4, LB5, LB6 especificados pela norma e indicados na tabela ( IV.2 ) poderiam ser feitas apenas com um dos quadrantes do modelo considerando condições de simetria existentes no vagão, como ilustrado nas figuras ( V.3 ). Para os casos de descarregamento entretanto, verifica-se a necessidade de se considerar metade do vagão com simetria no eixo X, já que este recebe forças aplicadas lateralmente como indicado nas figuras ( V.4 ).

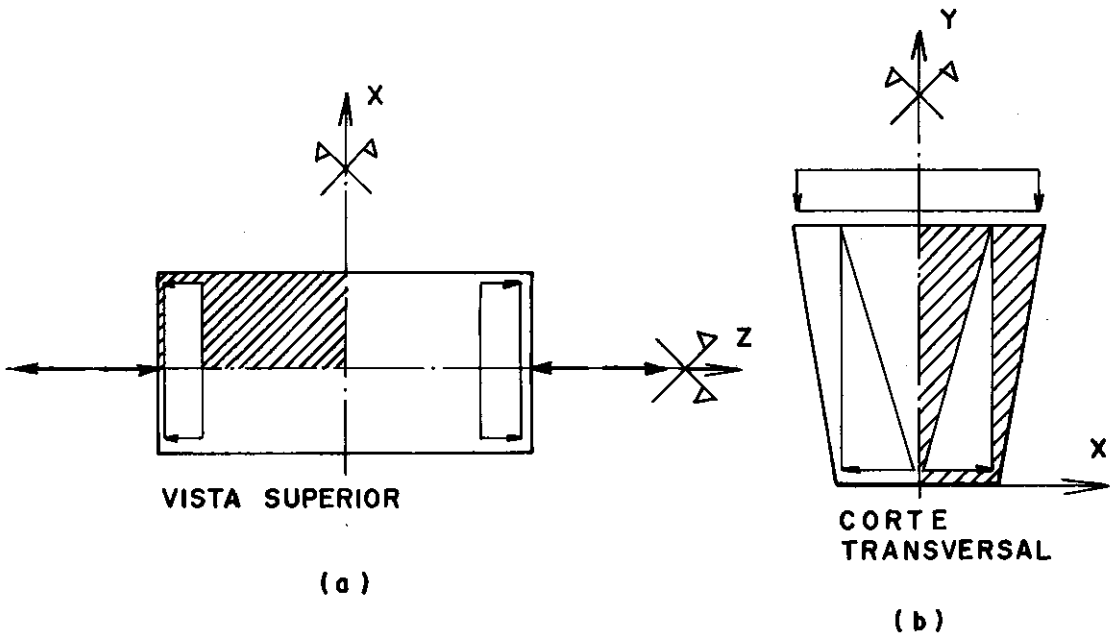


Figura ( V.3 ) - Consideração das simetrias do vagão para efeito do carregamento em apenas um dos quadrantes.

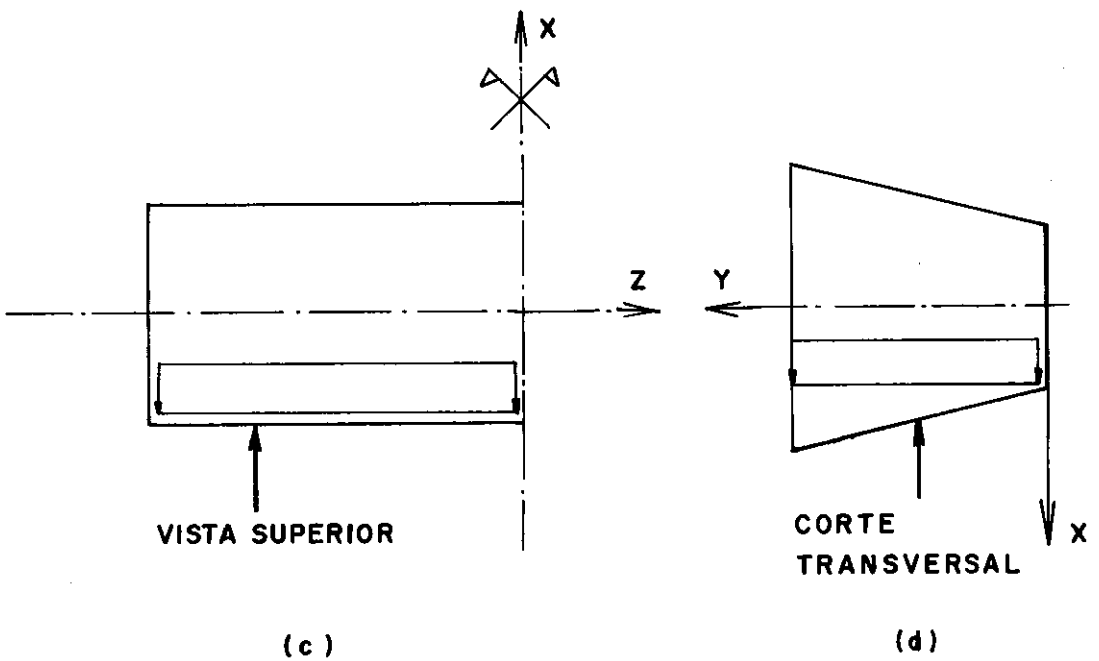


Figura ( V.4 ) - Consideração da simetria no eixo transversal do vagão para efeito do seu descarregamento.

Uma primeira análise foi realizada com o modelo do vagão inteiro e seus resultados comparados com os do modelo de meio vagão a fim de testar a exatidão do referido programa automático. Após verificado que os resultados no modelo integral eram coerentes com os do meio vagão, passou-se a trabalhar somente com este último. Preferiu-se discretizar-se meio vagão com o eixo de simetria na direção transversal para que este pudesse ser utilizado tanto para a simulação de operação em linha como em situação de descarregamento. A discretização de metade do vagão gôndola pode ser vista na figura (V.5).

### V.3 - Critérios Usados na Numeração dos Elementos Estruturais e Pontos Nodais

A numeração dos pontos nodais está ligada a dois aspectos a saber: distribuição dos coeficientes não nulos de matriz de rigidez global e condicionamento desta matriz. Mantendo-se pequenas diferenças entre as numerações dos pontos nodais extremos dos elementos estruturais, os coeficientes não nulos da referida matriz espalham-se ao longo de sua diagonal principal e tornam eficientes as técnicas de armazenamento por banda e por altura efetiva de coluna. Esta última é a utilizada no presente programa dentro da concepção de operar estas alturas efetivas em blocos com uma sistemática de manter em cada instante e em memória RAM apenas o número de blocos que esta memória comportasse, sendo os demais

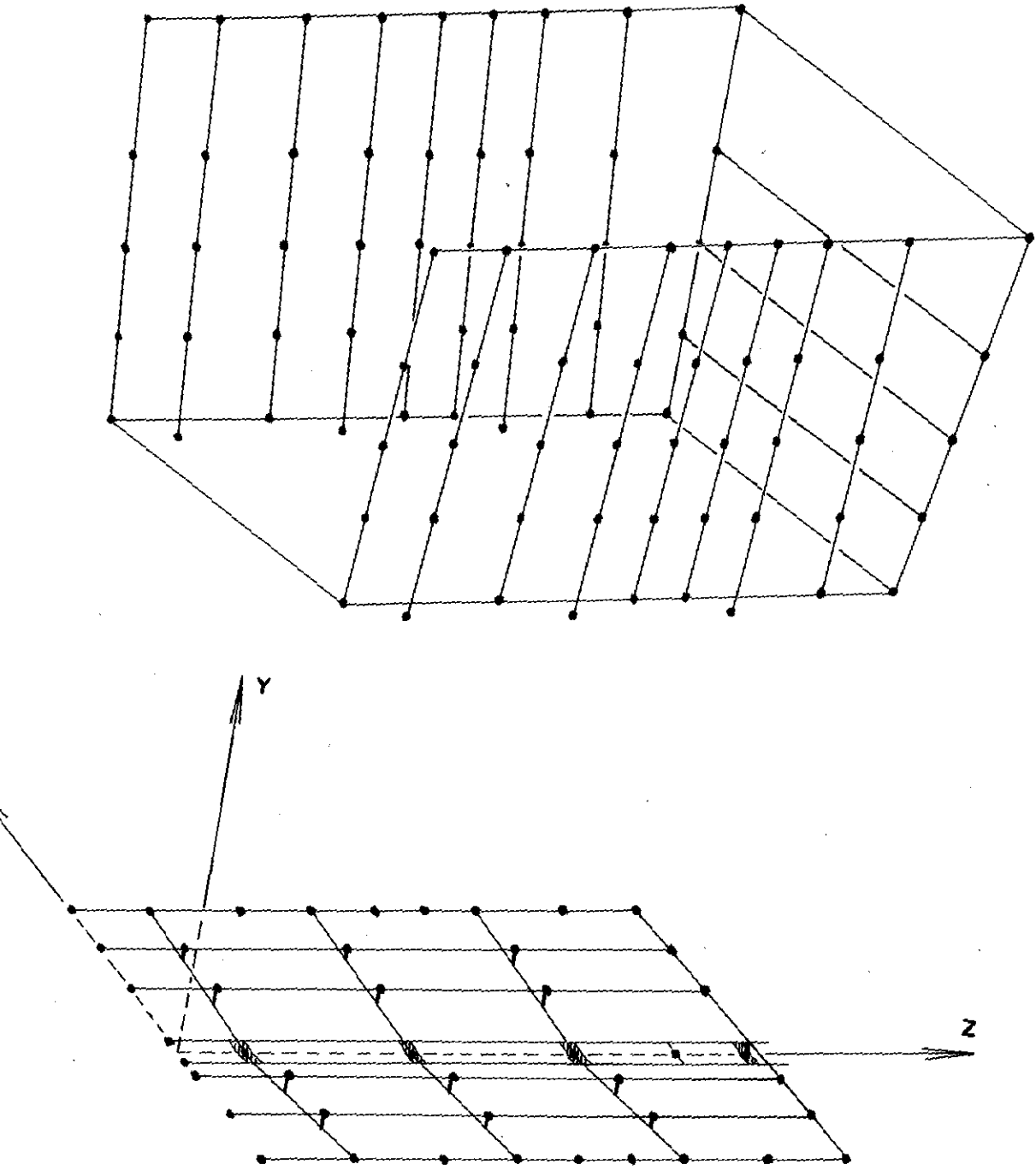


Figura ( V.5 ) - Discretização de meio vagão  
com simetria transversal no  
eixo X.

alocados na memória auxiliar em disco rígido. Procurando-se numerar inicialmente a parte mais flexível da estrutura seguida da parte mais rígida, tem-se um melhor condicionamento de matriz de rigidez, isto é, uma matriz na qual o efeito do erro de truncamento dos computadores digitais nesta matriz é menos significativo.

Na numeração adotada procurou-se, à medida do possível, atender a estas duas idéias básicas. Numeraram-se, então, os pontos nodais da seguinte forma:

a) Os nós e elementos ( tramos ) dos montantes principais receberam numeração crescente no sentido do frechal para a base e de modo a manter uniforme a diferença entre os nós dos elementos ao redor do vagão.

b) A numeração dos pontos nodais e elementos no frechal circula o topo do vagão num único sentido; anti-horário no caso.

c) As numerações nas laterais de todo o vagão procuram acompanhar o mesmo raciocínio dos montantes principais e frechal aumentando à medida que aproximam-se do assoalho ou afastam-se no sentido anti-horário para o observador colocado acima do vagão.

A figura ( V.6.a ) ilustra o sentido crescente da numeração nas laterais.

d) Como o center-sill é a peça mais rígida na infraestrutura, as numerações dos pontos nodais e elementos das travessas aumentam próximas a ele e reduzem nas extremidades junto as laterais.

e) As numerações dos nós e elementos

componentes dos suportes de assoalho e cordas inferiores também seguem o raciocínio das travessas.

A figura ( V.6.b ) ilustra o sentido crescente da numeração no assoalho.

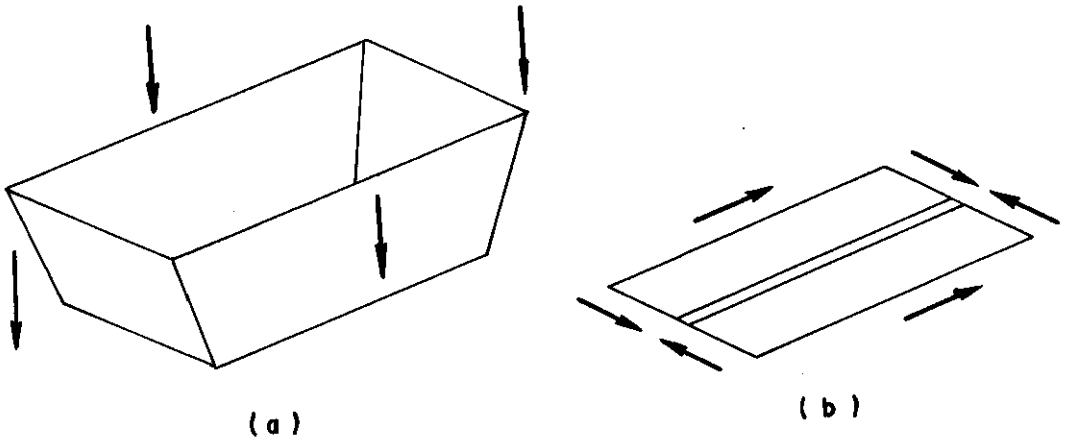


Figura ( V.6 ) - a. Sentido do aumento da rigidez nas laterais  
b. Sentido do aumento da rigidez no assoalho.

#### V.4 - Referencial Local

O sistema de referência local (  $xyz$  ) serve para definir grandezas ao nível de elemento estrutural. O ponto nodal inicial "  $j$  " fixa a origem do sistema numa das extremidades do elemento unidimensional e direciona o eixo  $x$  passando pelo ponto nodal final "  $k$  " localizado na outra extremidade. Os outros dois eixos ortogonais "  $y$  " e "  $z$  " são posicionados coincidentes com os eixos principais de inércia da seção transversal do elemento. Para o caso de pórticos espaciais, onde cada ponto nodal apresenta até seis deslocamentos nodais, os esforços solicitantes são:

esforço normal, dois momentos fletores nas direções  $y$  e  $z$  ( $M_y$  e  $M_z$ ), esforços cortantes nas direções  $y$  e  $z$  ( $Q_y$  e  $Q_z$ ) e um momento de torção ( $T$ ). A figura ( V.7 ) mostra estes esforços.

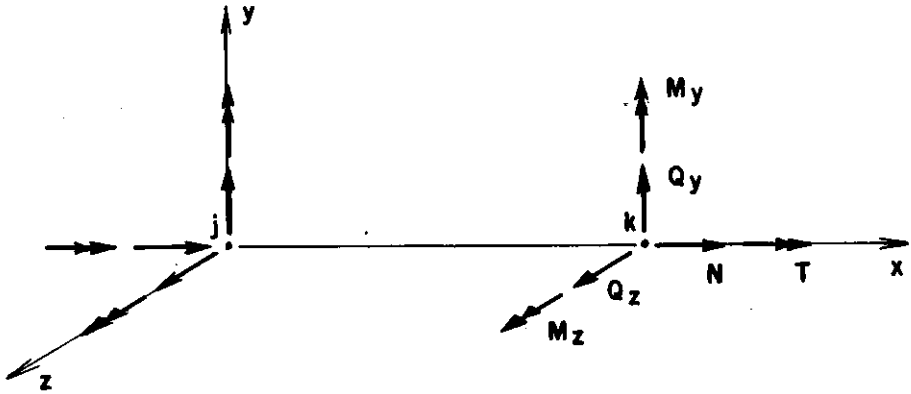


Figura ( V.7 )- Direção dos esforços solicitantes na barra.

No programa automático, as componentes de uma grandeza vetorial no sistema de referência global podem ser transformadas para um sistema local e vice-versa através de matrizes de rotação. O vetor representativo desta grandeza pode ser decomposto nos dois sistemas XYZ e xyz fornecendo uma relação entre as suas componentes como ilustrado na figura ( V.8 ) - rotação de eixos.

Tratando-se de eixos tri-ortogonais; conhecendo-se a incidência do elemento e as coordenadas de seus pontos nodais extremos no referencial global; e uma vez arbitrado que a orientação do eixo local "x" sempre parte do nó inicial para o nó final, as equações matemáticas formuladas para calcular a matriz de rotação do elemento de pórtico espacial necessitam apenas que





seja fornecido o ângulo formado pelo eixo "y" e a direção "Yγ" do referencial global. Este ângulo pode ser obtido através de três rotações sucessivas do referencial local xyz e é identificado como sendo o ângulo beta. O sentido anti-horário define o valor positivo de beta.

Quando o elemento de pórtico espacial coincidir o seu eixo geométrico x local com o eixo Y global, o ângulo alfa ( ou seja, o ângulo formado pelo eixo de referência global X com a projeção do eixo x no plano XZ ) deixará de existir como pode ser observado na figura ( V.9 ). Nestes casos define-se o ângulo beta igual a  $90^{\circ}$  ou  $270^{\circ}$  conforme o sentido positivo do eixo " x " coincida com o sentido positivo ou negativo do eixo " Y " respectivamente.

Em dois elementos estruturais simétricos, tomou-se o cuidado de escolher os eixos locais posicionados de tal forma que os esforços normais tivessem o mesmo sinal, os cortantes em y idem, e os cortantes em z sinais contrários. Tal medida objetivou definir uma regra geral que facilitasse a interpretação dos muitos resultados fornecidos em diversas análises do vagão em questão. Assim, os eixos de referência local ficariam como representado na figura ( V.10 ).

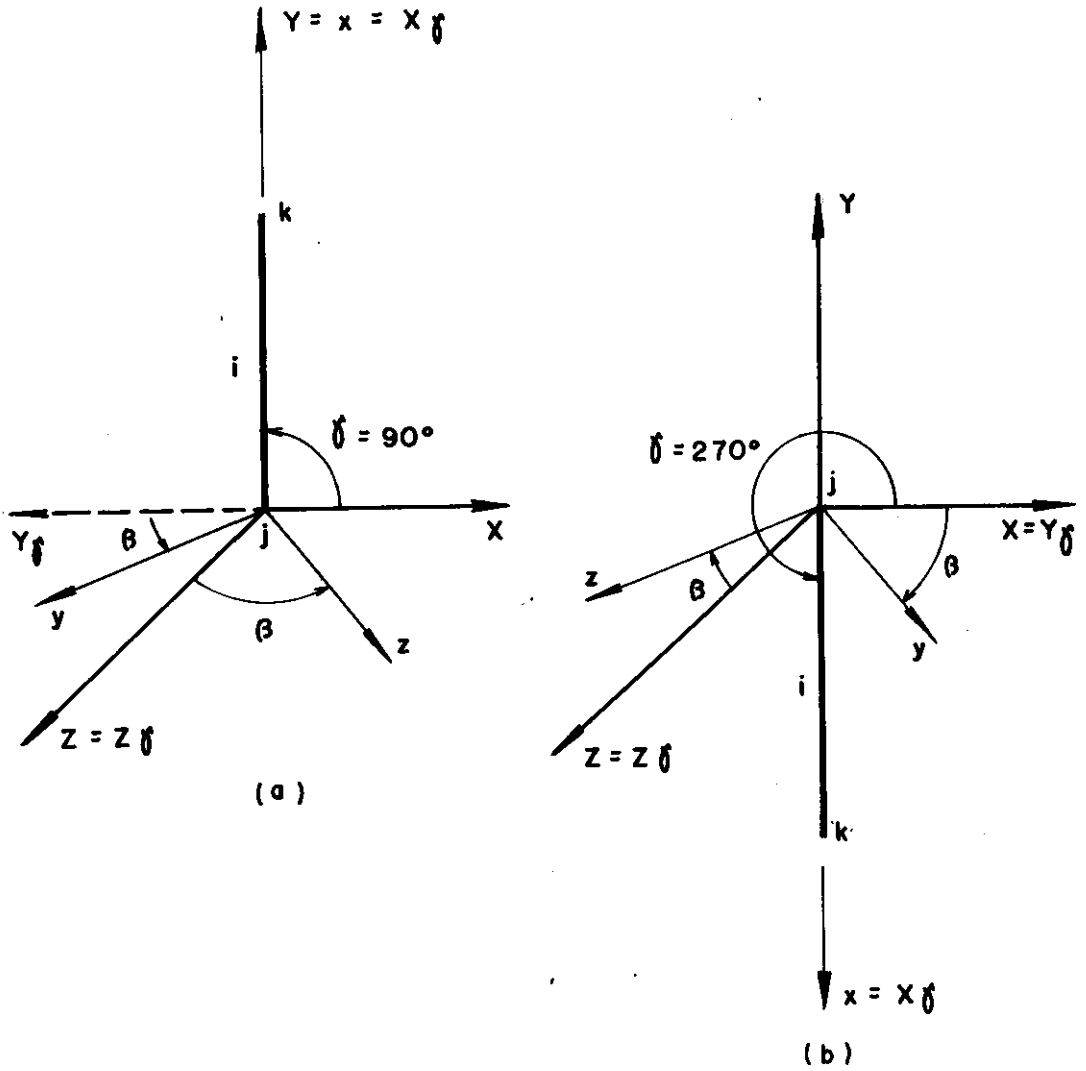


Figura ( V.9 ) - Rotação de eixos para o elemento de pórtico espacial coincidente com o eixo Y global.  
a. rotação do eixo à  $90^{\circ}$ , b. rotação do eixo à  $270^{\circ}$ .

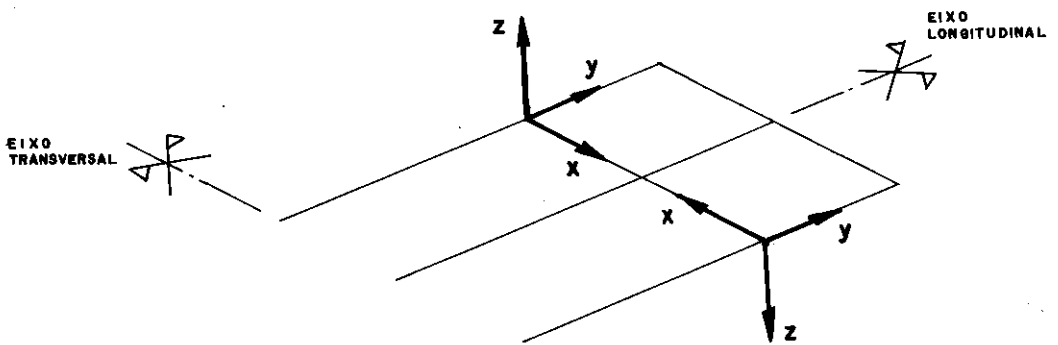


Figura ( V.10 ) - Posicionamento dos referenciais locais nas travessas.

Definido o referencial local de um elemento em um dos lados do eixo longitudinal do vagão, para se definir o referencial para o elemento que lhe é simétrico, basta acrescentar  $90^\circ$  ao ângulo beta e permutar os momentos de inércia nas direções y e z, conforme ilustra a figura ( V.11 ).

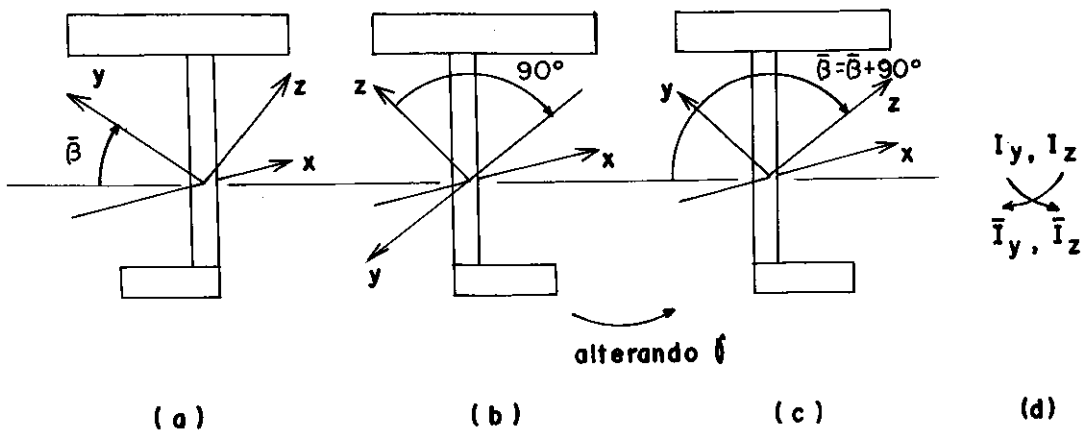


Figura ( V.11 ) - Definição do referencial local para um elemento simétrico.

As direções " x " nos referenciais locais ficam esquematizados segundo o modelo representado na figura ( V.12 ).

Após calculadas as propriedades geométricas das seções transversais e localizadas as direções dos eixos principais de inércia, encontraram-se os correspondentes ângulos beta e organizaram-se os elementos estruturais segundo os referenciais locais mostrados nas figuras ( V.13 ) a ( V.22 ).

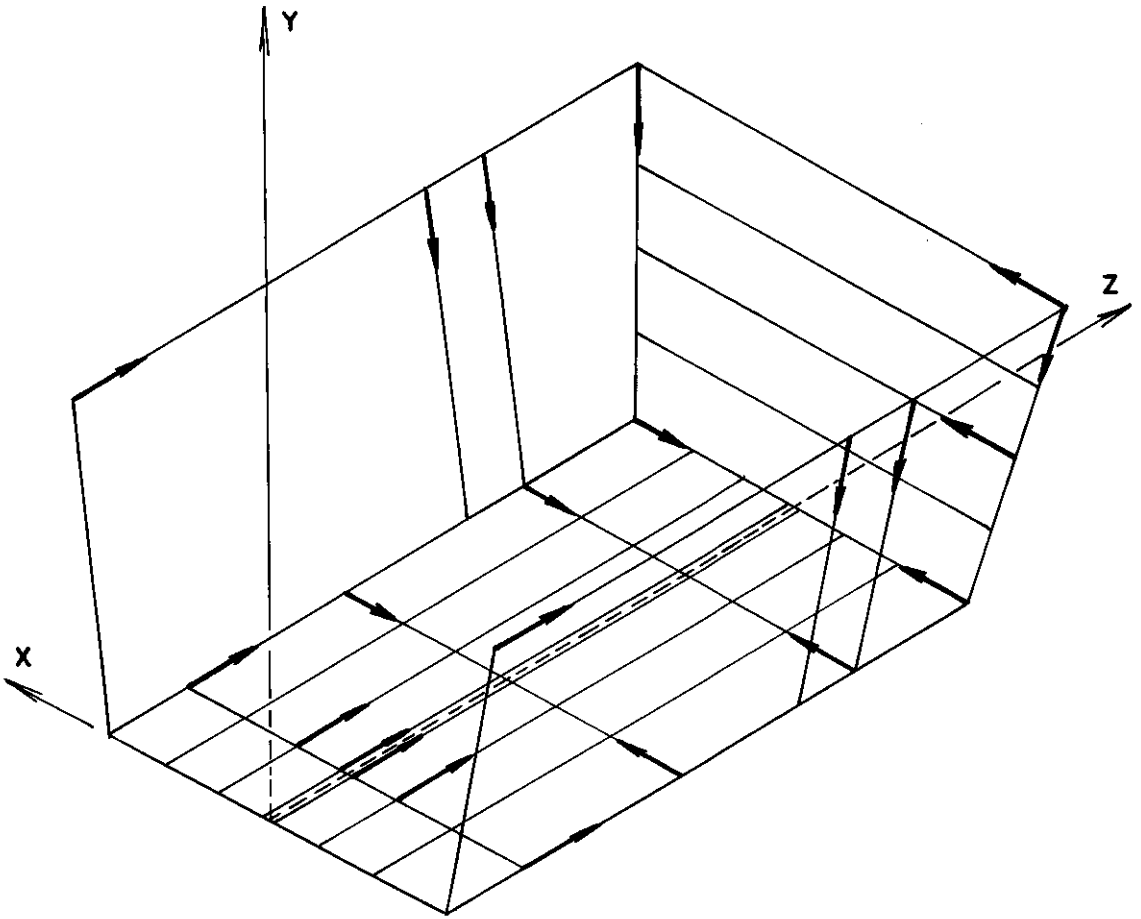


Figura ( V.12 ) - Direções x nos referenciais locais.

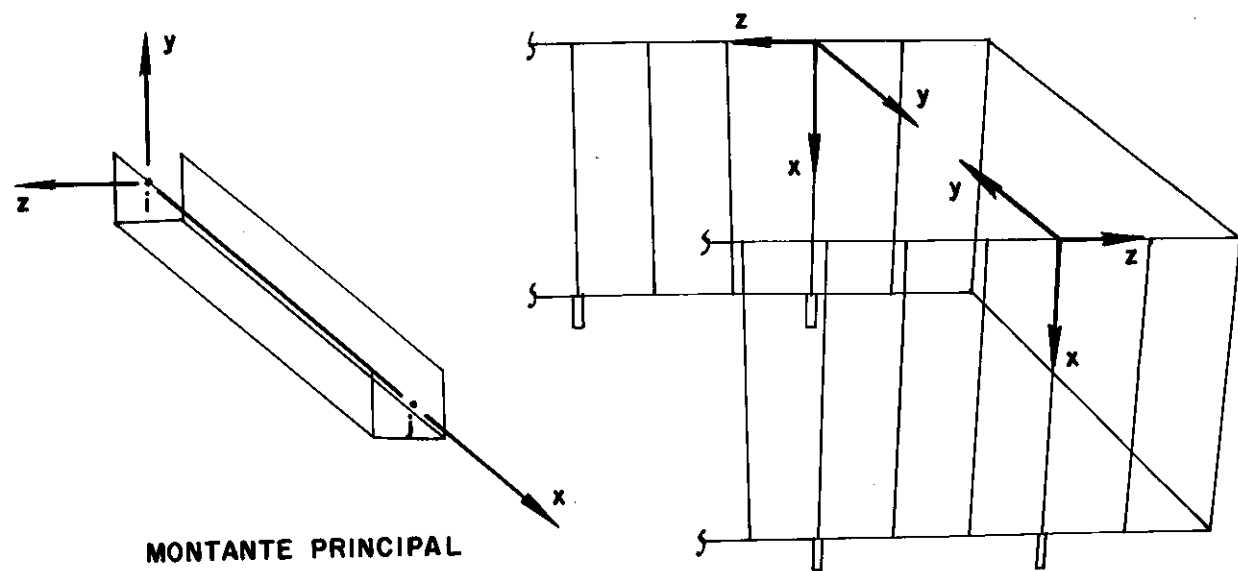


Figura ( V.13 ) - Referencial local no montante principal.

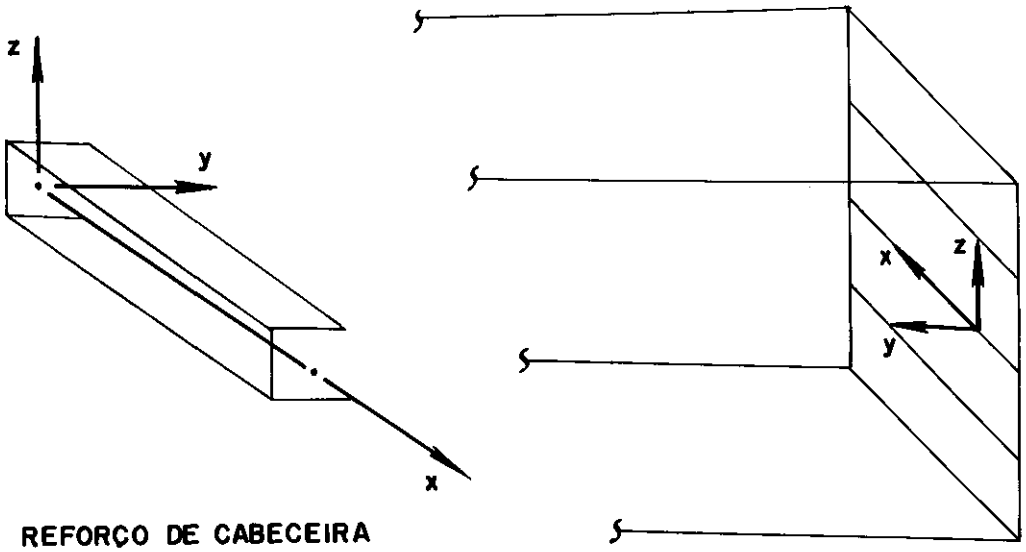


Figura ( V.14 ) - Referencial local no reforço de cabeceira.

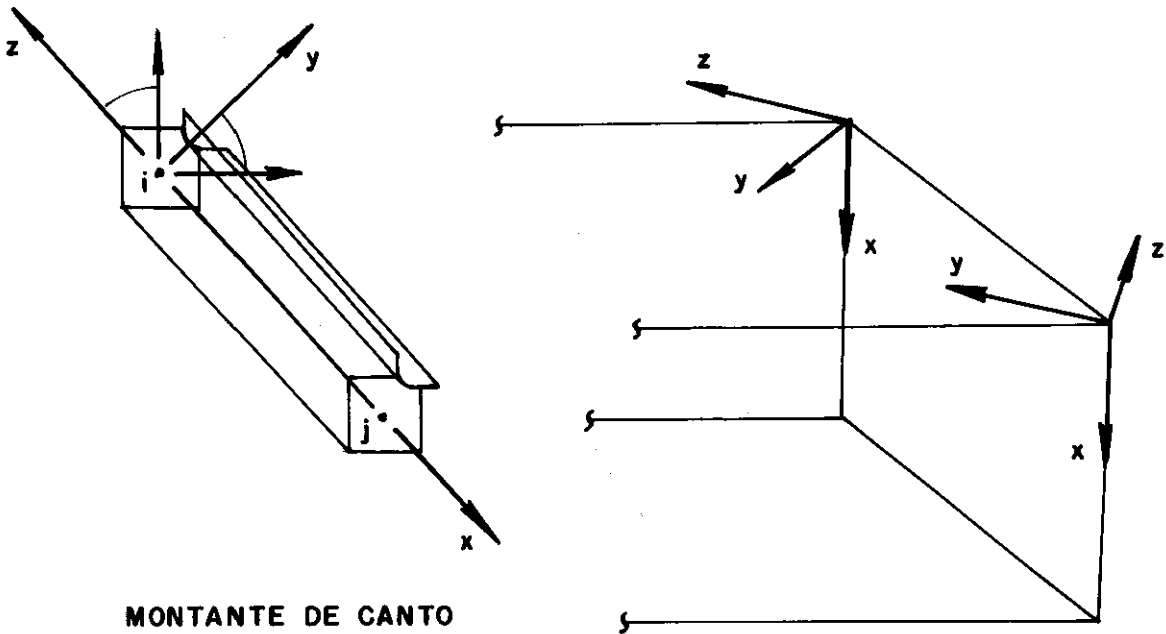


Figura ( V.15 ) - Referencial local no montante de canto.

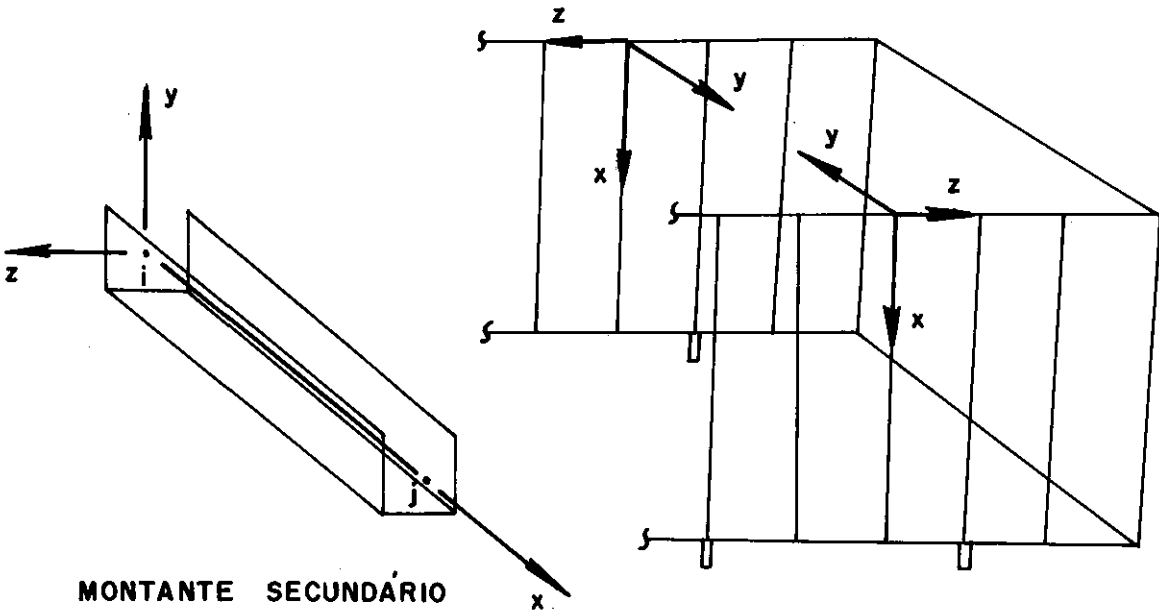


Figura ( V.16 ) - Referencial local no montante secundário.

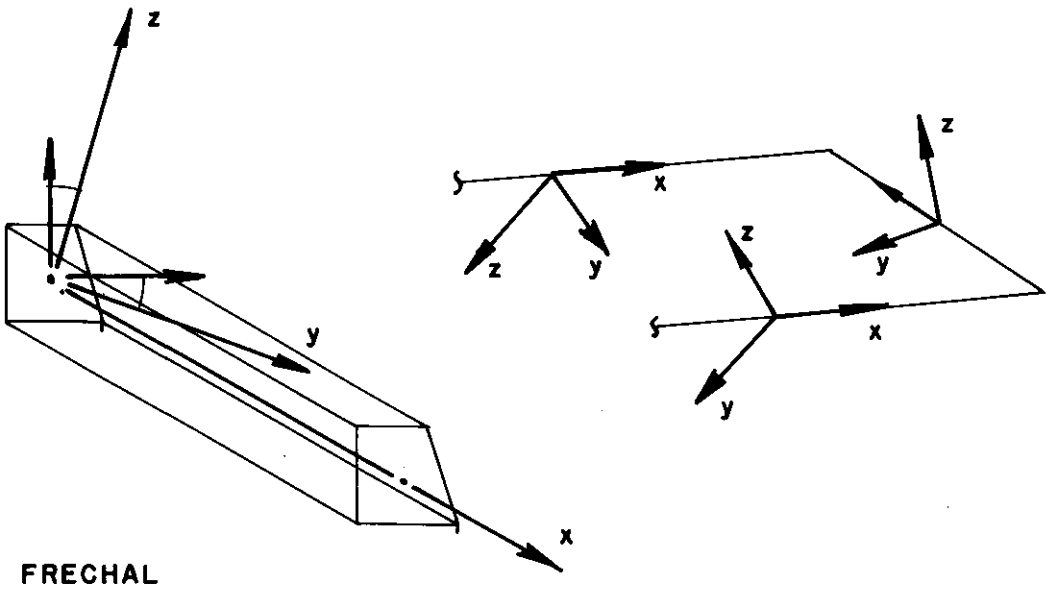


Figura ( V.17 ) - Referencial local no frechal.

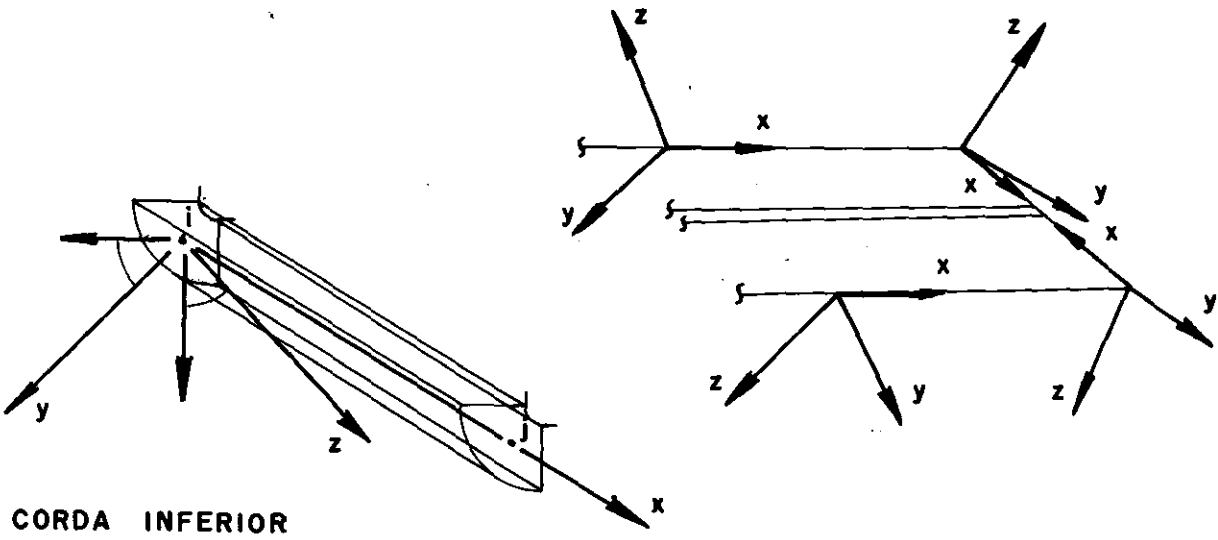


Figura ( V.18 ) - Referencial local na corda inferior.

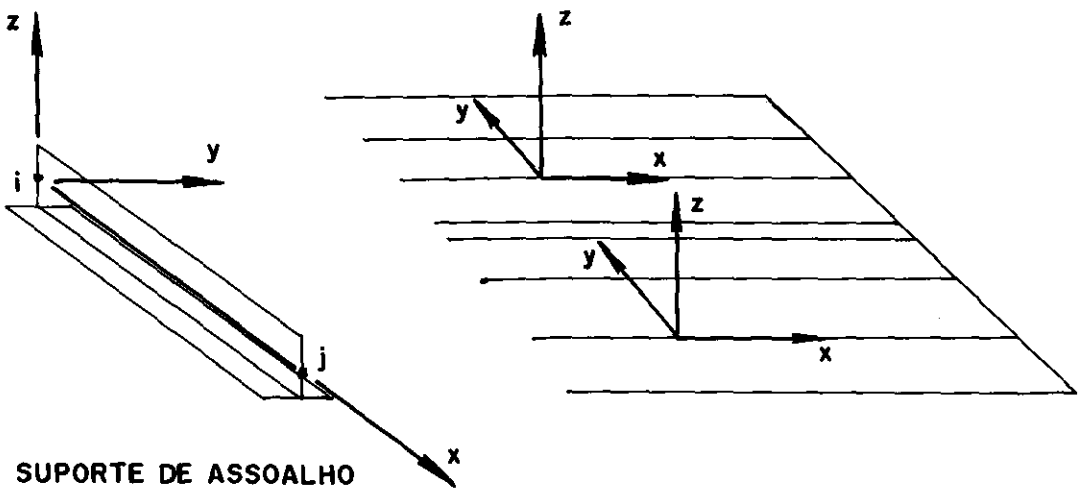
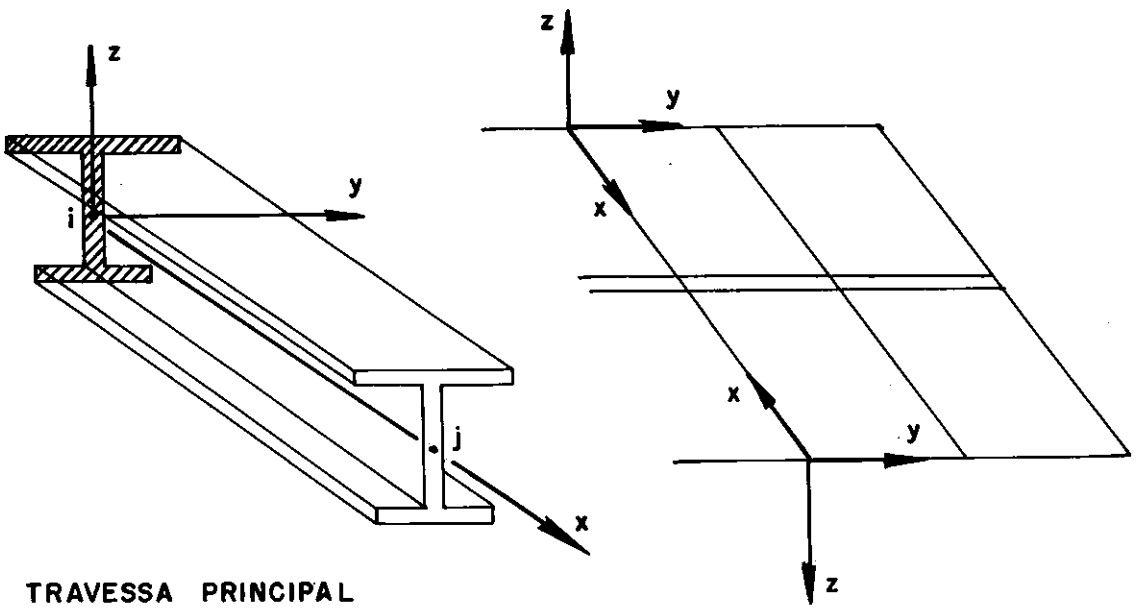
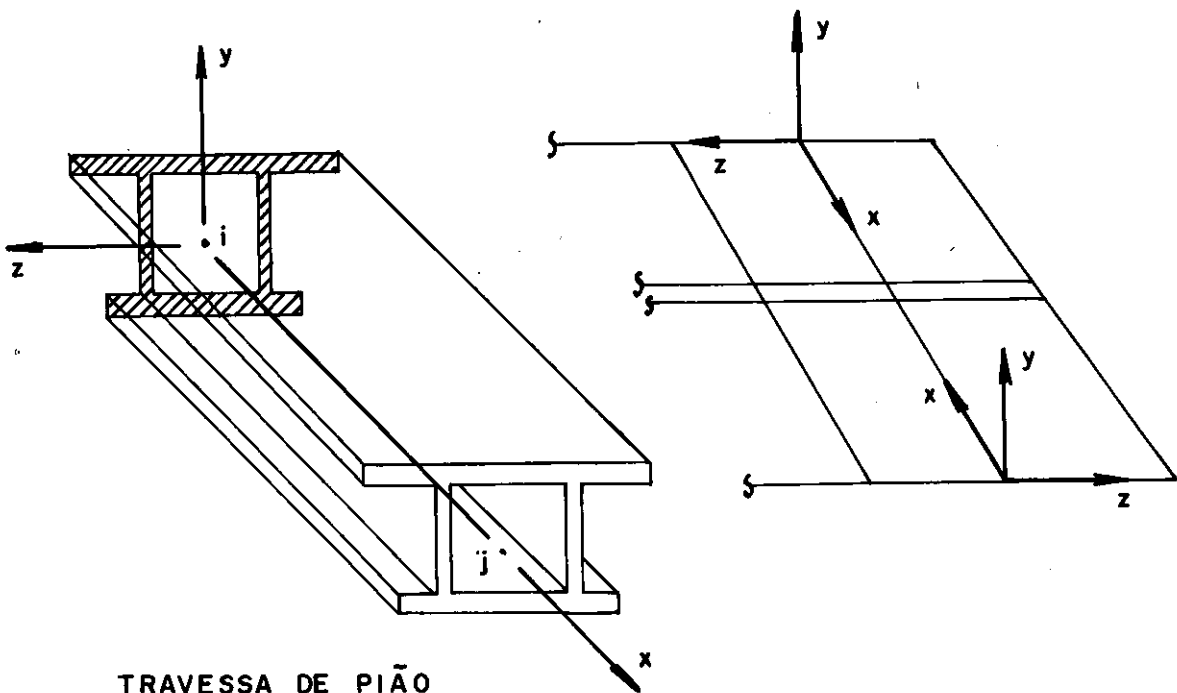


Figura ( V.19 ) - Referencial local no suporte de assoalho.



TRAVESSA PRINCIPAL

Figura ( V.20 ) - Referencial local na travessa principal.



TRAVESSA DE PIÃO

Figura ( V.21 ) - Referencial local na travessa de pião.



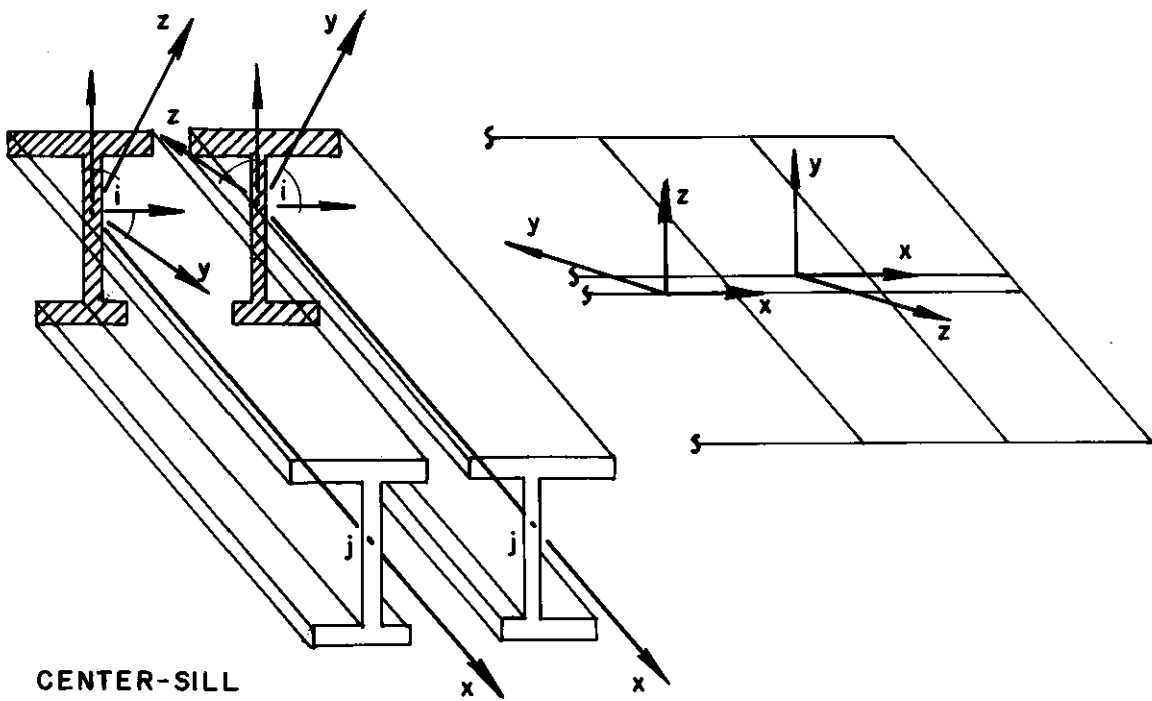


Figura ( V.22 ) - Referencial local no center-sill.

#### V.5 - Materiais

O center-sill e as travessas de pião do vagão foram em uma primeira etapa mantidos em aço pensando-se inclusive no aproveitamento de peças dos veículos mais antigos. Todos os outros elementos estruturais foram concebidos em alumínio, podendo ser extrudado, em chapa dobrada ou perfil composto.

Por razões técnicas da ALCAN do Brasil S.A., os perfis extrudados devem ter diâmetro máximo de seção transversal não superior a 20 cm e o tarugo de confecção de peso não superior a 80 kgf. A liga usada é a AA 6351 devido às suas boas propriedades mecânicas e facilidade de extrusão.

Perfis compostos ou em chapa dobrada serão em liga AA 5083 tempêra " O " devido à sua boa soldabilidade, resistência à corrosão e por esta já se apresentar no menor patamar de propriedades mecânicas.

A relação dos materiais utilizados encontra-se na tabela de materiais ( III.1 ) do capítulo III. Os valores do módulo de elasticidade longitudinal ( E ), módulo de elasticidade transversal ( G ) e peso específico são os seguintes :

1 - Aço estrutural

$$E = 2050000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$G = 788462 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\rho = 0,0077 \text{ kgf/cm}^3$$

2 - Liga de alumínio AA 5083

$$E = 720000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$G = 270000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\rho = 0,00265 \text{ kgf/cm}^3$$

3 - Liga de alumínio AA 6351

$$E = 700000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$G = 265000 \text{ kgf/cm}^2$$

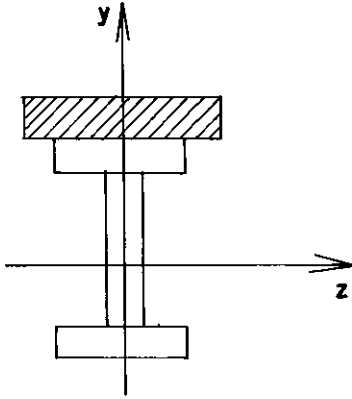
$$\rho = 0,00271 \text{ kgf/cm}^3$$

## V.6 - Considerações Quanto ao Cálculo das Propriedades Geométricas

Para o caso de seções transversais formadas

por dois tipos diferentes de material, aço e alumínio por exemplo, pode-se fazer as seguintes considerações segundo TIMOSHENKO [12]:

1 - Tem-se a energia de deformação elástica linear escrita sob a forma:



$$U = 1/2 \int ( M_z^2 / EI_z ) dx + \dots$$

$$\text{onde, } EI_z = E_{\text{aço}} I_{z\text{aço}} + E_{\text{al}} I_{z\text{al}}$$

Figura ( V.23 ) - Seção heterogênea

Sabendo-se ainda que o módulo de elasticidade do aço é igual a três vezes o do alumínio, pode-se considerar uma seção toda homogênea em aço reduzindo-se proporcionalmente o momento de inércia da parte de alumínio; ou seja,

$$EI_z = E_{\text{aço}} ( I_{z\text{aço}} + 1/3 I_{z\text{al}} )$$

2 - Supondo-se válida a hipótese das seções planas, em uma viga submetida à flexão, a deformação longitudinal ao longo de sua altura varia linearmente como mostra a figura ( V.24.a ).

Não se pode à priori precisar a localização do eixo neutro nesta seção, a menos do caso da seção simétrica e com flexão no plano normal a este eixo de

simetria, quando então o eixo neutro coincide com o eixo de simetria.

Obtendo-se as tensões normais através da multiplicação da deformação ao longo da seção pelo seu correspondente módulo de elasticidade (lei de Hooke), pode-se fazer o diagrama da figura (V.24.b), onde supõe-se  $E_2 > E_1$  no caso dos índices 1 e 2 corresponderem às seções em alumínio e aço, respectivamente. Tem-se, assim:

$$\sigma_{x1} = E_1 \varepsilon_1 = k E_1 y$$

$$\sigma_{x2} = E_2 \varepsilon_2 = k E_2 y$$

com  $y$  sendo a distância medida a partir do eixo neutro e  $k$  a curvatura.

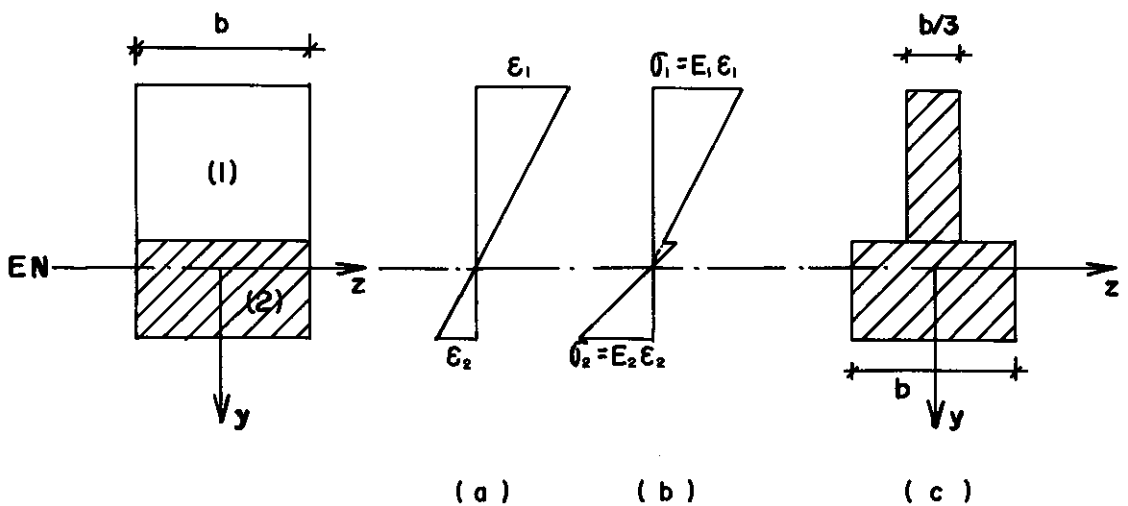


Figura (V.24) - Diagramas de tensão/deformação p/ a seção com diferentes materiais e seção homogênea correspondente.

Observando-se que a resultante da força normal na seção deve ser nula quando o elemento está sujeito à flexão simples, tem-se,

$$\int_1 \sigma_{x1} dA + \int_2 \sigma_{x2} dA = 0$$

$$E_{aço} \int_{aço} y dA + E_{al} \int_{al} y dA = 0$$

$$E_{aço} \left( \int_{aço} y dA + 1/3 \int_{al} y dA \right) = 0$$

Por definição, a posição do centro de gravidade é

$$\hat{y} = \frac{\int y dA}{\int dA}$$

Pode-se então, idealizar uma nova seção tal que mantendo as distâncias  $y$  até o eixo neutro, se

substitua uma das áreas por uma equivalente do outro material, sem modificar o centro de gravidade da seção como indica a figura ( V.24.c ). Neste caso, pode-se encontrar o eixo neutro simplesmente considerando a seção homogênea, no material aço,

$$\hat{y} = \frac{\int_{\text{aço}} y \, dA + 1/3 \int_{\text{al}} y \, dA}{A_{\text{total}}}$$

$$\hat{y} = \frac{\sum_i ( A_{\text{aço}} y_i ) + \sum_i [ ( A_{\text{al}} / 3 ) y_i ]}{\sum_i [ A_{\text{aço}} + ( A_{\text{al}} / 3 ) ]}$$

3 - A rigidez à torção,  $GI_x$ , também pode ser adaptada para a presença de dois tipos de materiais, analogamente ao caso da flexão simples. Conhecendo-se a proporção de  $G_{\text{aço}} = 3 G_{\text{al}}$  pode-se escrever:

$$U = 1/2 \int ( M_t^2 / GI_x ) \, dx$$

onde,

$$GI_x = G_{\text{aço}} [ I_{x\text{aço}} + ( I_{x\text{al}} / 3 ) ]$$

Observando-se, ainda, que o momento de inércia à torção  $I_x$  independe da posição da linha neutra, pode-se desta vez reduzir o comprimento da parte em alumínio à proporção necessária para que a seção em parede fina aberta corresponda a uma seção homogeneizada no material em aço. Isto feito, o fluxo das tensões cisalhantes relativas à torção não será interrompido, figura ( V.25 ).

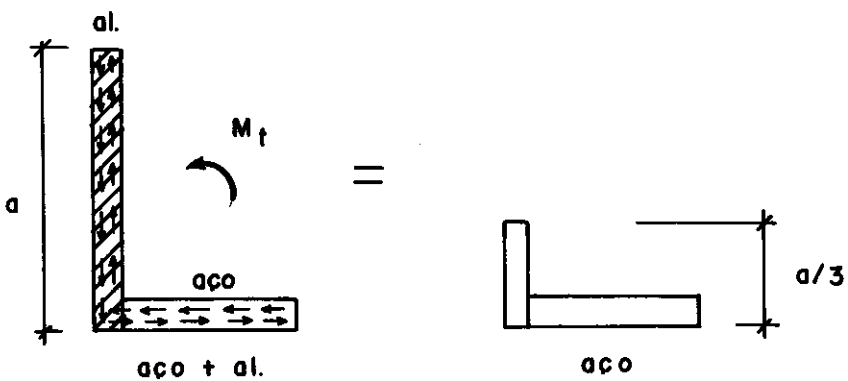


Figura (V.25) - Fluxo das tensões cisalhantes relativas à torção e correspondente seção homogeneizada.

Durante todo o desenvolvimento do projeto estrutural do vagão gôndola, as propriedades geométricas foram calculadas com as considerações aqui descritas. Primeiramente, estas propriedades foram calculadas manualmente e em seguida, ao implementar-se o programa de computador conforme descrito no item III.3, o valor das seções puderam ser introduzidas já homogeneizadas. Uma largura colaborante da chapa de revestimento interno equivalente a 16 vezes a sua espessura foi considerada como fazendo parte dos perfis com que tem contato uma vez que esta também acrescenta rigidez aos elementos da estrutura.

#### V.7 - Liberação de Esforços em Extremidades de Elementos

A liberação de esforços nas extremidades de alguns elementos estruturais foi feita com o objetivo de facilitar o detalhamento e execução de ligações e sem prejudicar o comportamento estrutural do conjunto. Os montantes secundários, reforços de cabeceira, suportes de assoalho e a corda inferior sob a chapa na base foram concebidos com os momentos fletores em y e z nas suas extremidades bem como o momento de torção nulos. O mesmo foi adotado no extremo superior dos montantes principais. O comportamento destes elementos é o de vigas bi-apoiadas onde o momento é nulo nas extremidades.

Na ligação dos montantes principais junto



às travessas, a continuidade de rotações em  $y$  e  $z$  mantém o comportamento de conjunto adequado ao transporte do minério. Nestes pontos tem-se momentos fletores oriundos pelo "efeito de alavanca" sobre os montantes principais que serão equilibrados pela contra-parte nas travessas. A torção, entretanto, não sofre restrição.

As figuras ( V.26 ) a ( V.30 ) esquematizam as liberações consideradas, enquanto a figura ( V.31 ) as resume.

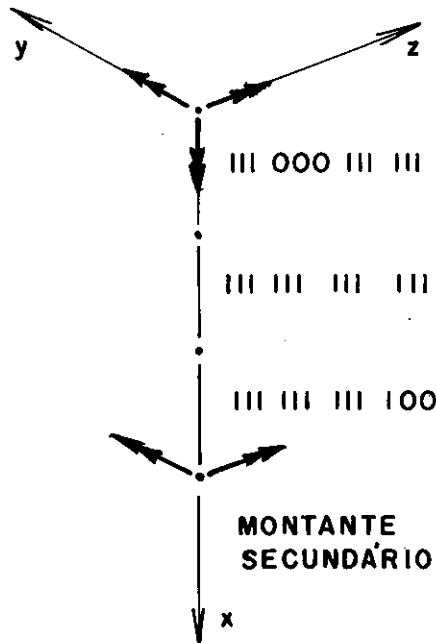


Figura ( V.26 ) - Liberação de extremidade no montante secundário

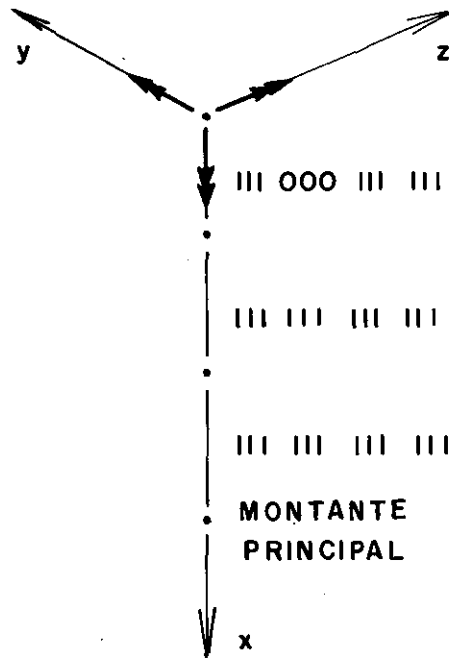


Figura ( V.27 ) - Liberação de extremidade no montante principal.

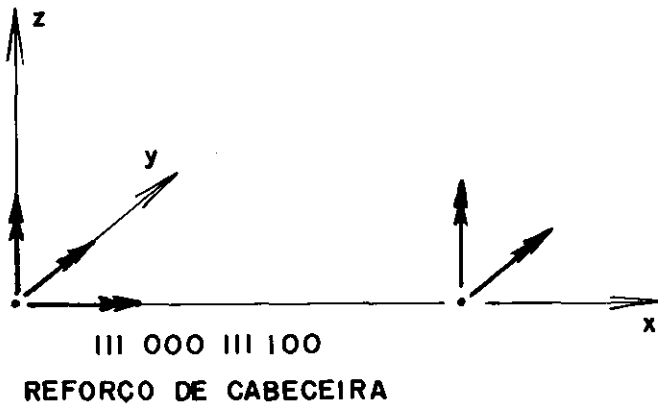


Figura ( V.28 ) - Liberação de extremidade no reforço de cabeceira.

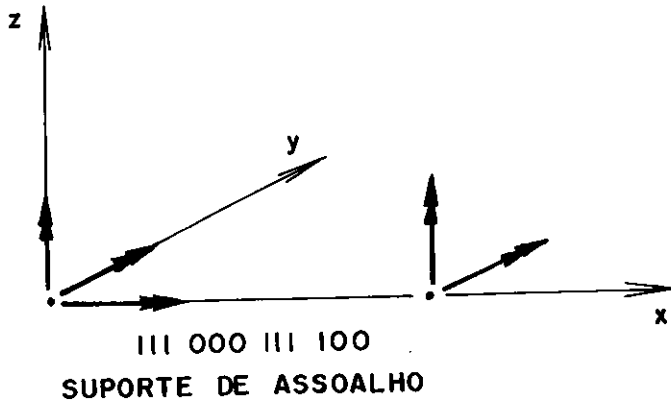


Figura ( V.29 ) - Liberação de extremidade no suporte de assoalho.

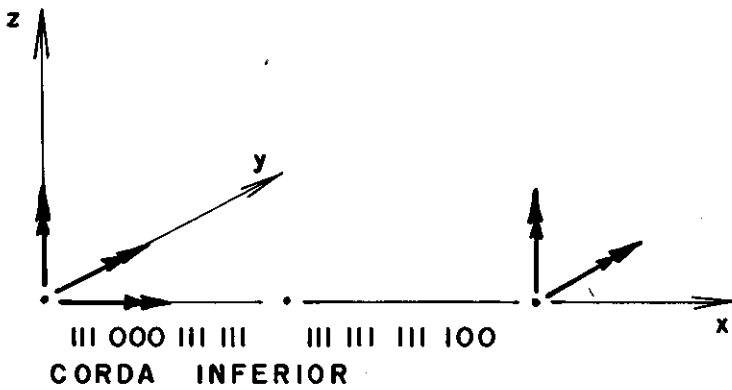


Figura ( V.30 ) - Liberação de extremidade na corda inferior.

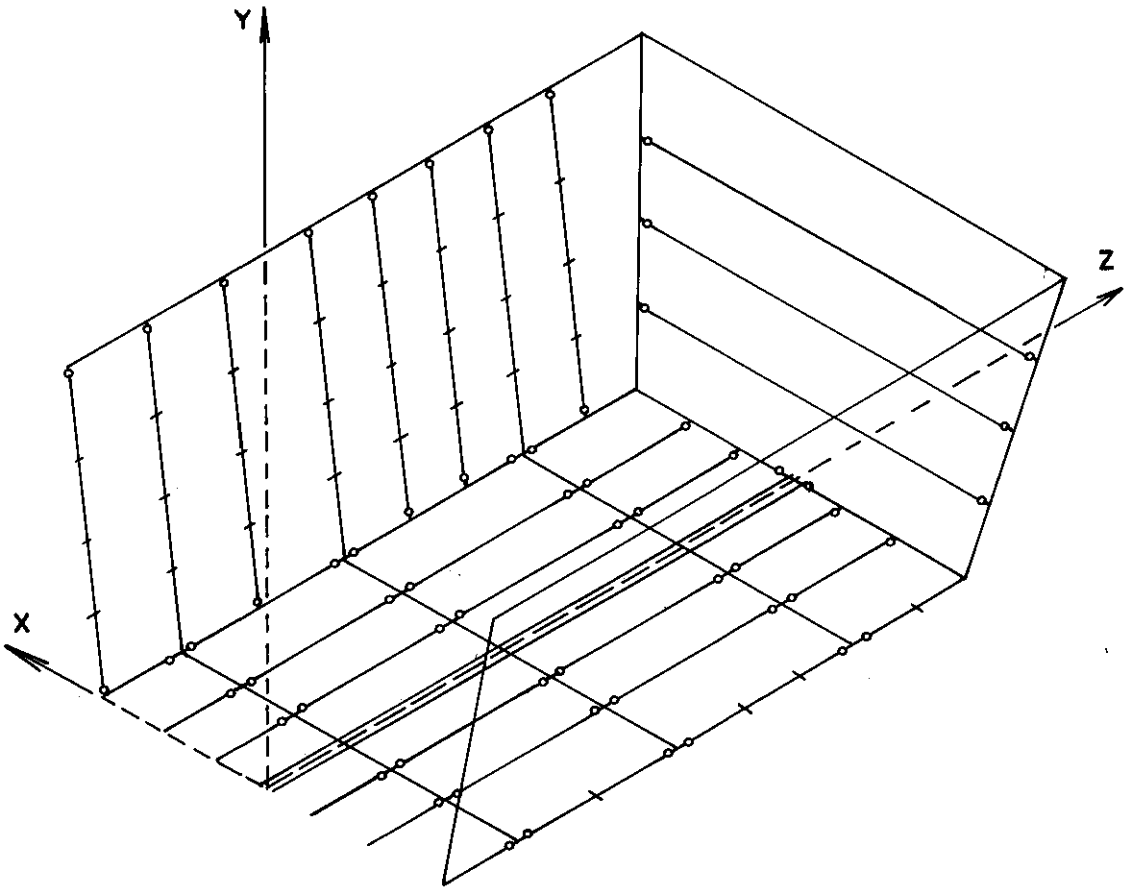


Figura ( V.31 ) - Liberação de extremidade nos elementos do meio vagão.

## V.8 - Condições de Contorno

### V.8.1 - Condições de Contorno nos Apoios do Vagão como um Todo.

Analisando-se o comportamento dos nós  $i$  e  $j$  nos centros das travessas de pião pode-se considerar:

a) A restrição dos deslocamentos lineares relativos à direção Y nos dois apoios, uma vez que o truque ao suportar o carregamento vertical transmite as reações  $D_y$  aos piões.

b) A direção X tem também seus deslocamentos lineares impedidos apresentando então as reações  $D_x$ .

c) Para a direção Z, entretanto, a deformação longitudinal, devida à aplicação de uma força axial no center-sill, exige a liberação de um dos dois extremos de forma a permitir-lhe o deslocamento linear. Para que o sistema de equações não se torne hipostático, o outro nó deve ser mantido restringido surgindo a reação  $D_z$ .

d) A rotação em Z é permitida parcialmente por amortecedores localizados nas travessas de pião. Impedindo-se um extremo do center-sill e liberando o outro evita-se que a peça se comporte hipostaticamente e se avalla o momento de torção  $R_z$ .

e) Já que as restrições até então consideradas não permitem o mecanismo com rotações em X e Y, pode-se ter estas liberadas tornando nulo o momento fletor nos apoios.

A figura ( V.32 ) ilustra as direções à serem impedidas.

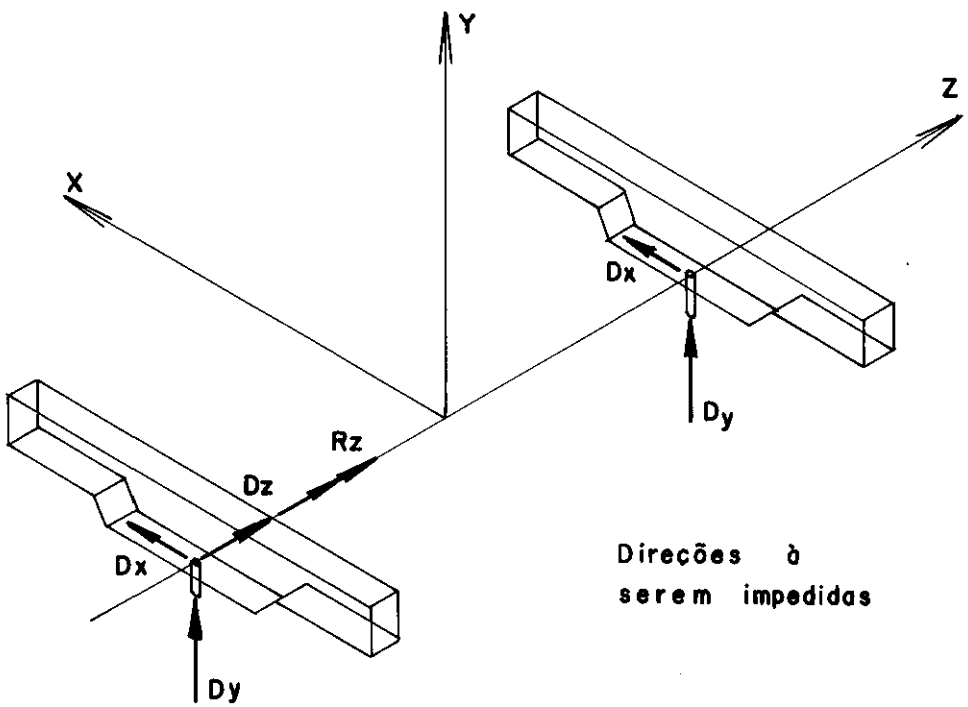
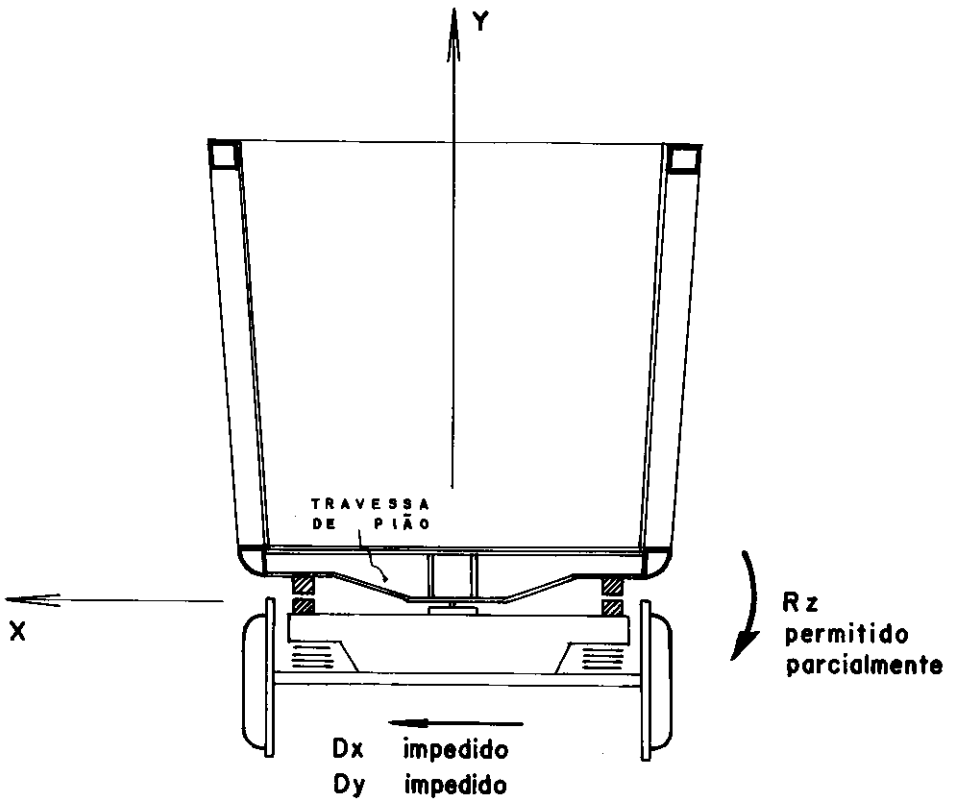


Figura ( V.32 )- Condições de contorno nos apoios do vagão.

V.8.2 - Condições de Contorno no Modelo de Meio Vagão ao Considerar-se o Eixo de Simetria Transversal.

Aproveitando a simetria da estrutura pode-se analisar metade do vagão desde que as condições de contorno simulem deslocamentos e reações compatíveis com as que surgem no vagão inteiro. Para tanto, os deslocamentos em X e Y dos pontos nodais nesta seção devem permitir as deformadas das figuras ( V.33 ) liberando-se os cortantes  $Q_y$  e  $Q_z$ .

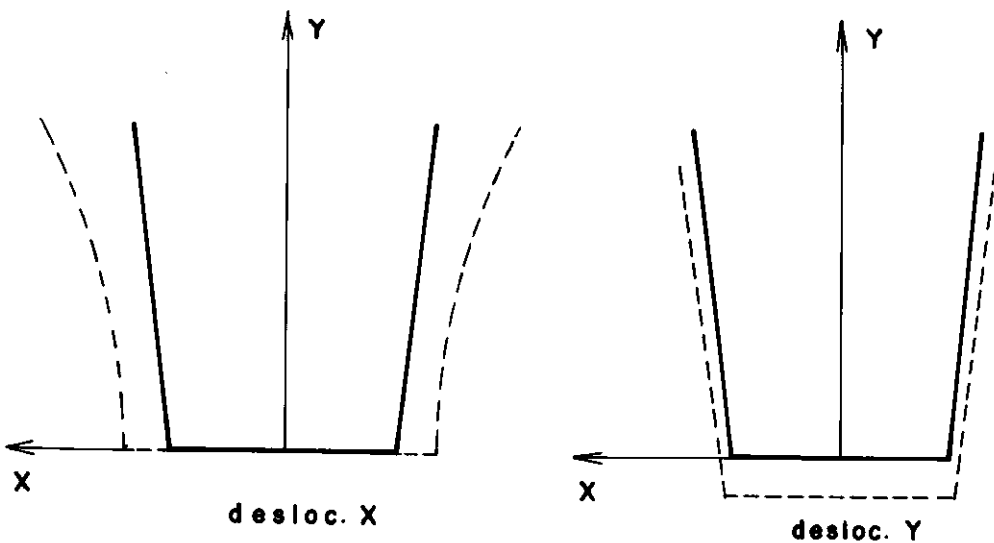


Figura ( V.33 ) - Deslocamentos devidos ao carregamento nas direções X e Y.

Os dois pontos nodais representados na interseção do center-sill com o plano de simetria transversal têm a translação em X anulada naturalmente pela simetria existente no plano XY. É portanto desnecessário restringi-los, uma vez que os resultados da análise estrutural devem comprovar esta observação.

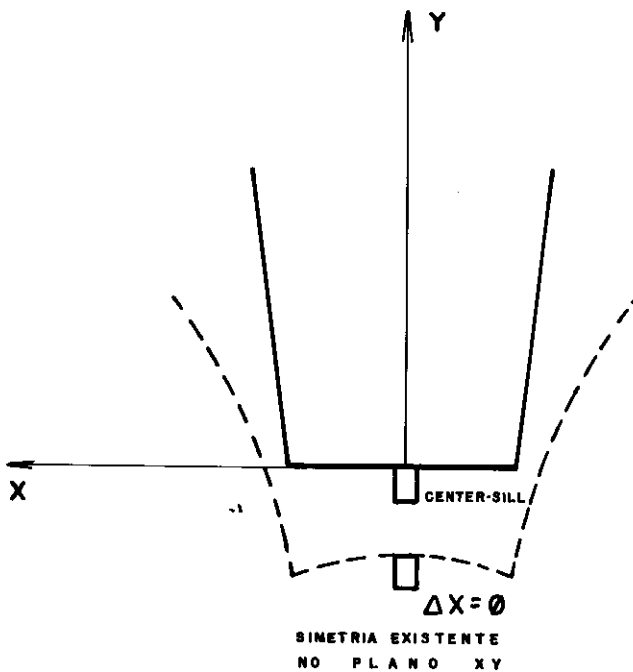


Figura ( V.34 ) - Translação do center-sill na direção X igual a zero.



O deslocamento  $Z$ , entretanto, será restringido no centro do vagoão onde este deve ser nulo, mas liberado no apoio de piço de modo a manter um conjunto isostático ( fig V.35 ).

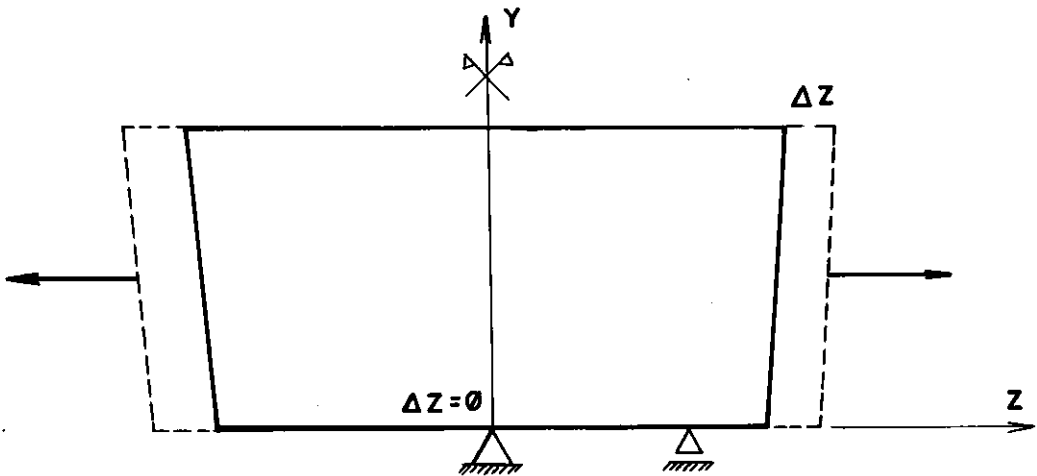


Figura ( V.35 ) - Translação em Z.

Todos os nós no plano de simetria devem ainda inibir as rotações em X e em Y, caracterizando o comportamento de vigas bi-apoiadas carregadas uniformemente, onde o momento máximo surge no meio do vão com balanço e anula-se nos apoios onde as rotações são liberadas. A figura ( V.36 ) ilustra este comentário.

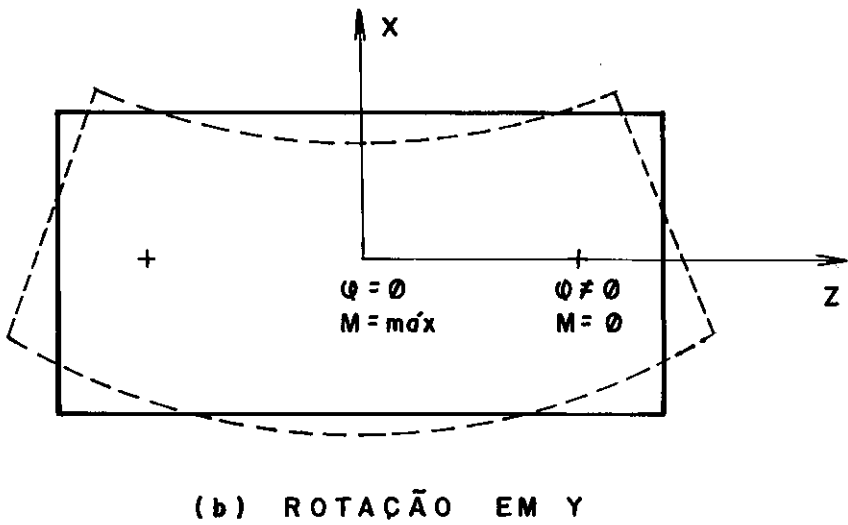
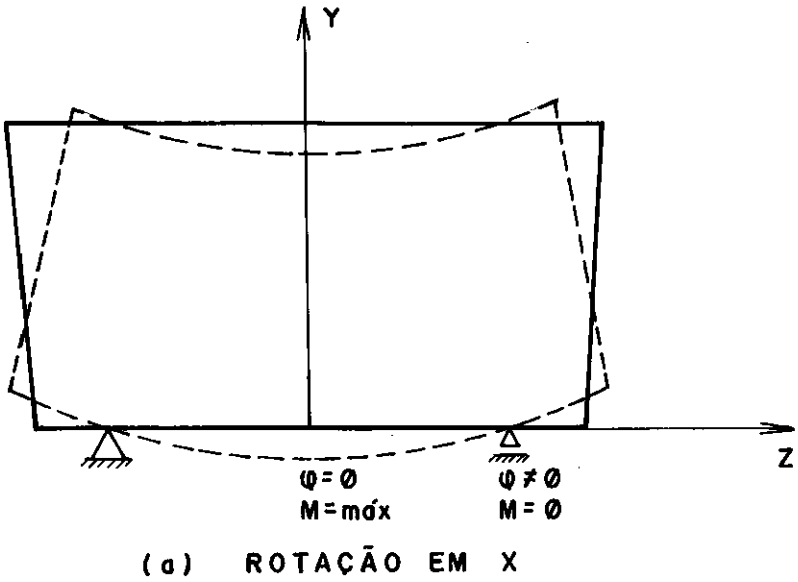


Figura ( V.36 ) - Rotações em X e Y.

Finalmente, é bom observar que estas condições de contorno são compatíveis apenas com os carregamentos que têm o eixo X como eixo de simetria. A figura ( V.37 ) resume as direções a serem restringidas no modelo de meio vagão.

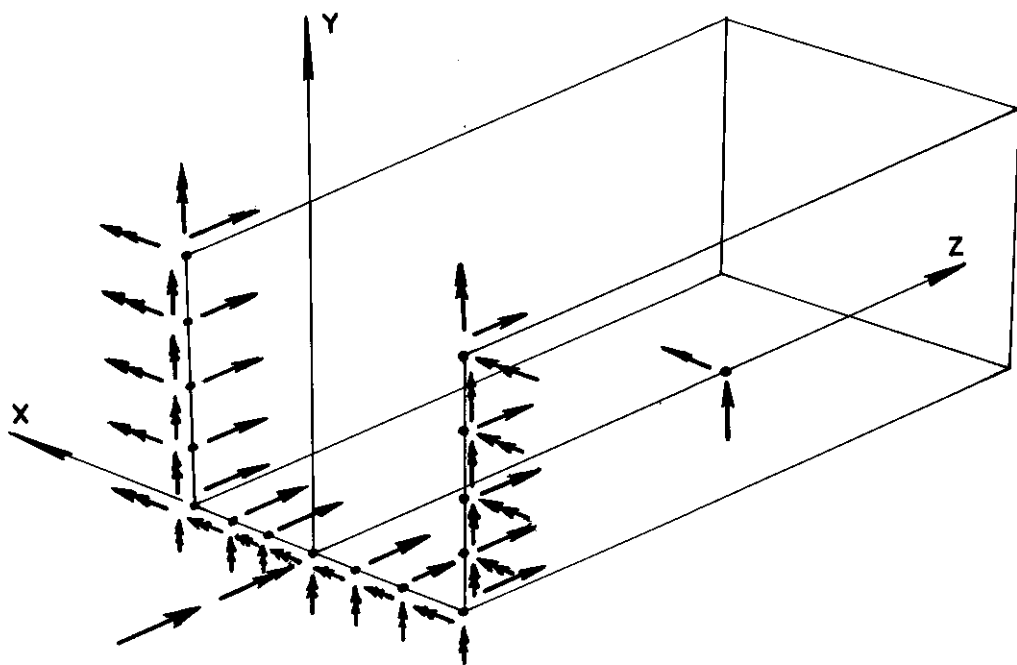


Figura ( V.37 ) - Condições de contorno para o meio vagão.

### V.8.3 - Condições de Contorno para o Levantamento (Jacking Load)

Para levantar o vagão deverão ser posicionados macacos sob os extremos das travessas de pião acarretando as restrições no contorno de acordo com a figura ( V.38 ).

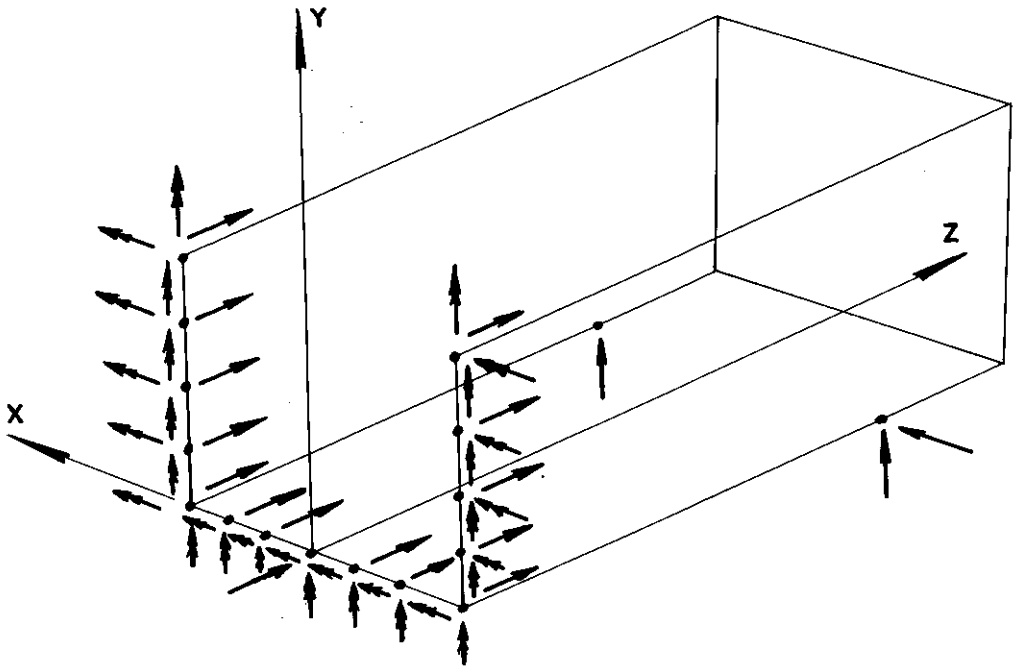


Figura ( V.38 ) - Condições de contorno para o levantamento.

#### V.8.4 - Condições de Contorno no Virador

As condições de apoio do virador foram avaliadas " in situ " no terminal de Sepetiba, RJ. Após anotadas a localização dos encaixes no virador, vistas aqui esquematicamente na figura ( V.39 ), foram estudadas duas condições de contorno diferentes correspondendo às situações mais desfavoráveis, a saber:

##### a) 1a. Condição :

Com um giro de  $90^{\circ}$  no car-dumper, apenas parte do minério permanece no interior do vagão.

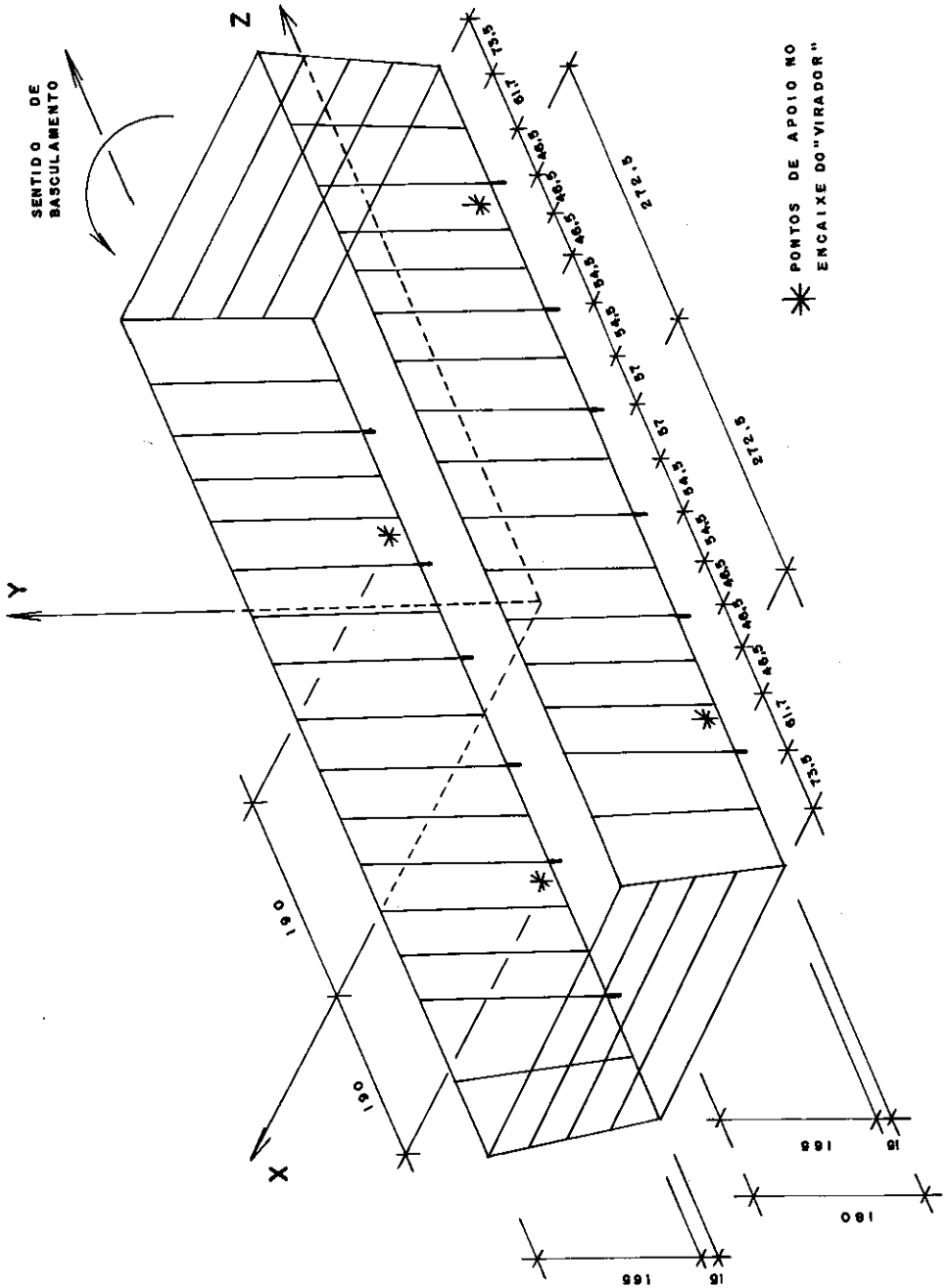


Figura ( V.39 )- Condições de apoio do virador.

De forma conservativa, este minério restante pode ser considerado como uma carga uniforme atuando sobre a lateral do vagão virado e equivalendo à metade do volume de minério transportado. Desta forma, procura-se compensar a inclinação da carga por outra uniformemente distribuída numa situação mais desfavorável como na figura ( V.40 ).

b) 2a. Condição :

Durante a operação real do car-dumper, o vagão gôndola sofre uma rotação de até aproximadamente  $170^{\circ}$ . Para efeito de cálculo, este giro será considerado como sendo de  $180^{\circ}$ , já que esta é uma situação mais desfavorável aos apoios e também possível de ocorrer extemporaneamente na prática. Assim sendo, o peso total do truque passa a ser sustentado pela estrutura do vagão, juntamente com o peso próprio deste. Os nós dos apoios aparecem na figura ( V.41 ).

As condições de contorno no plano de simetria XY são as mesmas para o modelo de meio vagão, já que estas simulam a continuidade do conjunto.

No vagão a  $90^{\circ}$ , a lateral inferior apoia-se pelos nós do frechal no virador, sendo portanto restringido o deslocamento vertical destes nós. Os outros dois nós de apoio têm as direções indicadas na figura ( V.42.a ) restringidas por um mecanismo de encaixe. A figura ( V.42.b ) mostra as condições de restrição para o vagão descarregado a  $180^{\circ}$ .

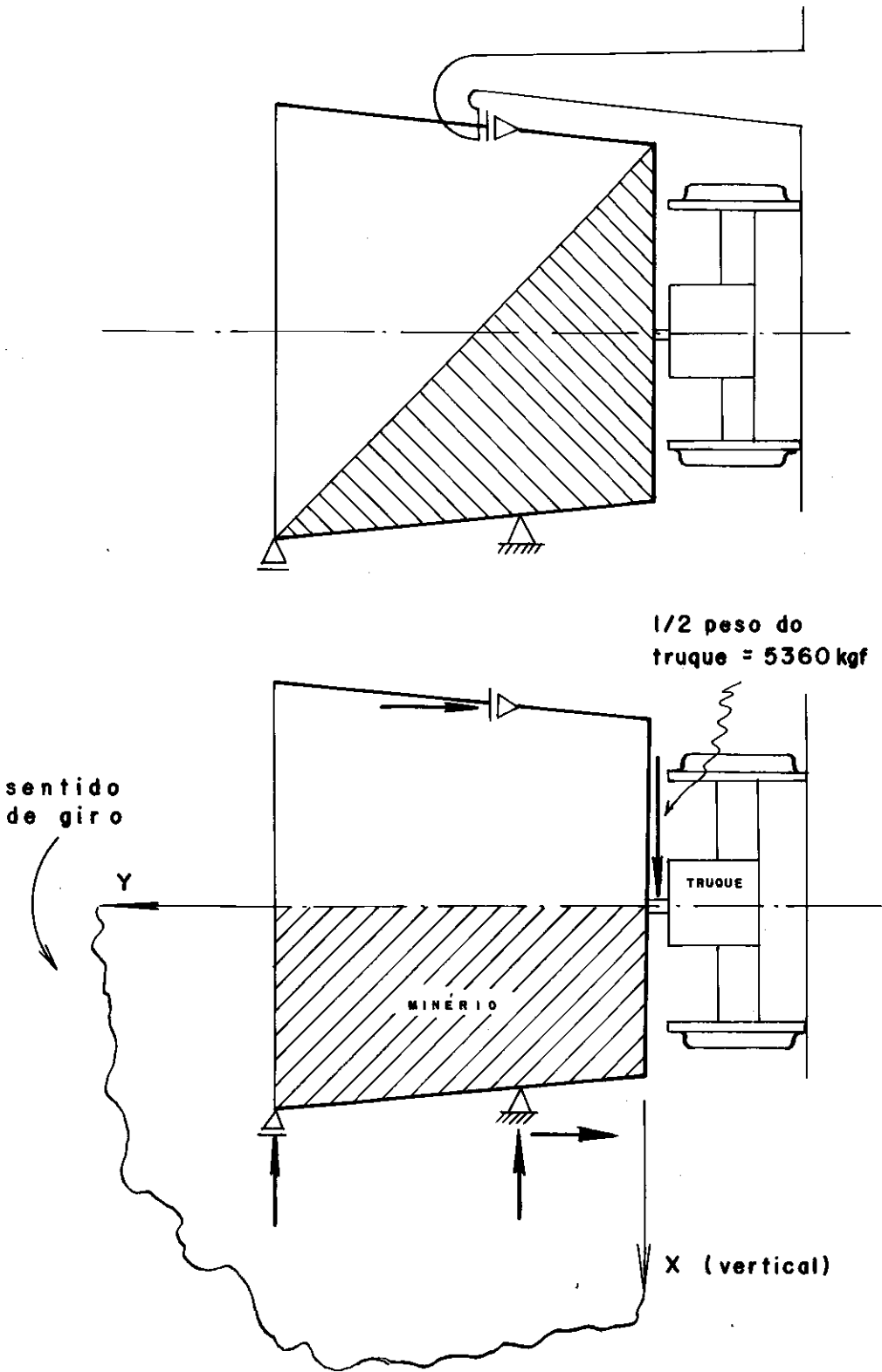


Figura ( V.40 ) - Condições de apoio no virador a 90°.

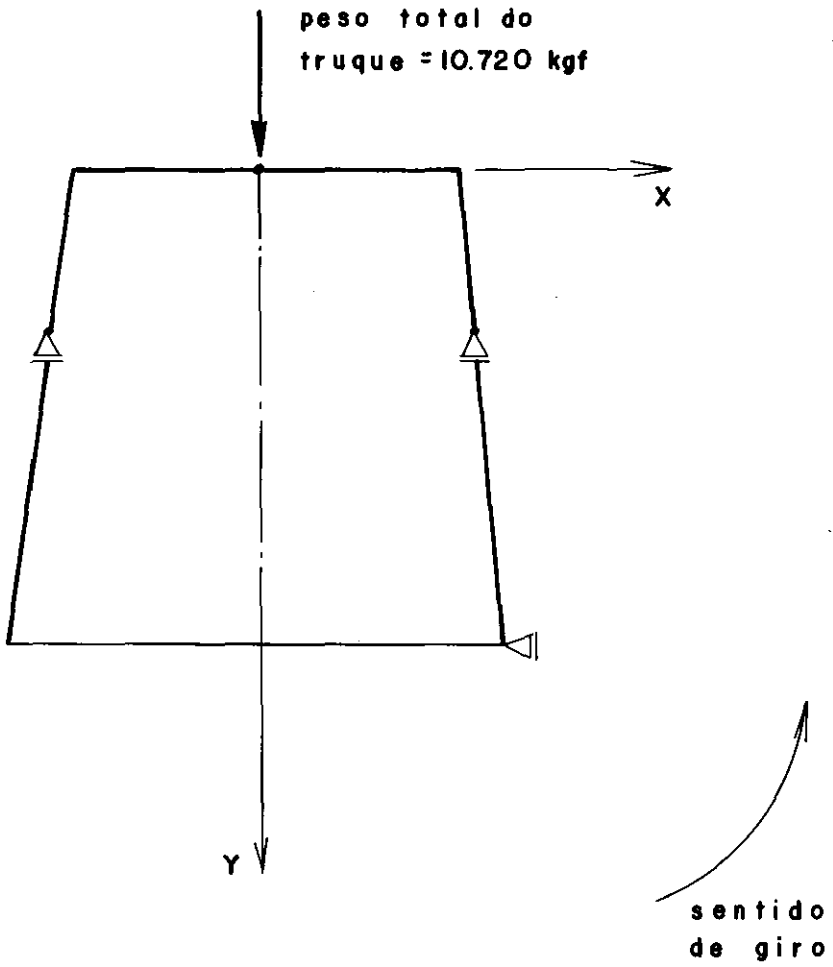


Figura ( V.41 ) - Condições de apoio no virador a  $180^\circ$ .



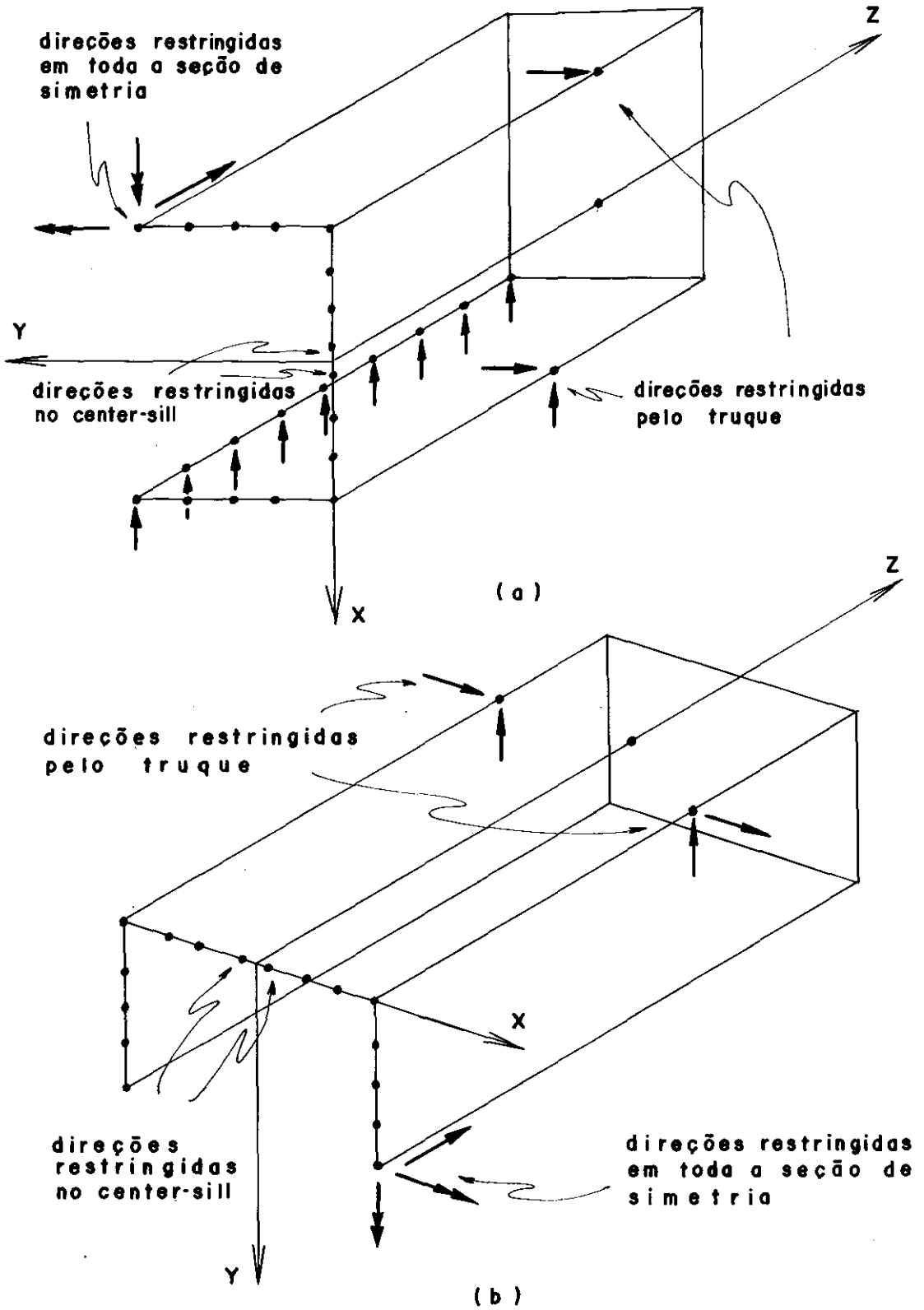


Figura ( V.42 ) - Condições de contorno no virador.

## CAPÍTULO VI

### EVOLUÇÃO DA CONCEPÇÃO DO VAGÃO AO LONGO DO PROJETO

#### VI.1 - Análise Inicial dos Primeiros Resultados

Ao serem efetuadas as primeiras análises no vagão com a concepção até aqui apresentada, pode-se concluir que o nível elevado de deslocamentos encontrado em algumas peças tornava inaceitável o comportamento do vagão. Pequenas modificações foram então introduzidas na espessura das chapas componentes do center-sill e das travessas com o propósito de, aumentando as suas inércias transversais mas mantendo as mesmas dimensões externas destas peças ( altura e largura ), reduzir deslocamentos verticais em toda a estrutura. Como a redução não veio a ser significativa, decidiu-se por modificações mais abrangentes.

O carregamento de minério, sem serem considerados os fatores de majoração de carga recomendados pela norma da AAR, provocou no center-sill, frechal e montante de canto deslocamentos verticais máximos de

1,5 cm, 2,3 cm e 1,3 cm, respectivamente. O vão central do frechal atingiu deslocamentos horizontais próximos a 20 cm sob a ação do carregamento do tipo inclinação de carga ( leaning load ). Deslocamentos obviamente excessivos e que comprometem o comportamento da estrutura.

Verificando-se os níveis de esforços nas seções transversais, observou-se que o carregamento lateral devido ao minério conduzia a elevados momentos fletores no frechal e nos montantes principais, indicando uma vez mais a necessidade de modificações no sistema estrutural.

Assim, chegou-se à importante conclusão de que o emprego do alumínio no projeto de um vagão de carga exige uma concepção estrutural própria; ou seja, diferente daquela empregada para o aço. Para um vagão totalmente em aço, a estrutura comporta-se semelhantemente a uma viga caixa apoiada nos piões. Entretanto, mantendo-se apenas o center-sill e as travessas de pião em aço e substituindo-se o resto do conjunto para alumínio percebe-se que o center-sill passa a assumir o comportamento de uma viga simplesmente apoiada absorvendo quase todo o carregamento vertical, já que o módulo de elasticidade do alumínio é bem menor do que o do aço. Isso justifica o fato do center-sill em aço necessitar reforços adicionais na adaptação do vagão para alumínio na mesma concepção em caixa. Conclui-se, portanto, que o vagão em alumínio não poderia ser projetado baseando-se apenas num projeto anterior em aço, mas essencialmente em suas próprias propriedades mecânicas.

## VI.2 - Verificação estrutural da chapa de revestimento interno

O efeito estrutural da chapa de alumínio de revestimento interno foi introduzido indiretamente no cálculo de esforços através do acréscimo de larguras colaborantes junto às seções transversais em todos os perfis. Aumentando-se as propriedades geométricas destes procurou-se computar a maior rigidez proporcionada à estrutura após a união com a chapa.

Nos perfis em aço; ou seja, center-sill e travessas de pião, as seções foram homogeneizadas para serem feitas as mesmas considerações. Todo o revestimento interno foi especificado inicialmente na liga AA 5083 tempêra "H" com a espessura de 6,5 mm. Entretanto, na determinação dos níveis de tensões e verificação das margens de segurança dos elementos estruturais, as larguras colaborantes de chapa foram reduzidas para os perfis de seções transversais abertos e mesmo desconsideradas nos perfis de seções fechadas como fica melhor esclarecido no item ( VI.4 ) adiante. Distribuindo-se os esforços encontrados na fase de análise em seções menores implica em maiores tensões e, portanto, fica-se do lado da segurança.

## VI.2.1 - Dimensionamento da chapa de revestimento interno em alumínio.

A chapa em alumínio é dimensionada para transmitir o carregamento de minério para os elementos estruturais. Neste estudo são levados em consideração tanto o efeito local do peso do minério sobre a chapa em questão, quanto o efeito global do vagão deformado como um todo, efeitos estes que ao serem avaliados fornecem tensões apropriadas para a verificação do dimensionamento da chapa.

Para a análise do efeito localizado, imaginou-se uma placa de bordos simplesmente apoiados recebendo a carga devida ao peso do minério uniformemente distribuída sobre a chapa de fundo ou trapezoidal sobre as chapas laterais. Tal suposição vem do fato de que durante o processo de soldagem o aquecimento do alumínio próximo à região de solda reduz as propriedades mecânicas duma liga de tempêra "H" para outra de tempêra "O"; ou seja, existe uma perda de aproximadamente 20% no limite de resistência a tração e 50 % no limite de escoamento. Assumiu-se então, que no contorno destes painéis este efeito corresponderia a apoios simples e desprezou-se a baixa resistência ali apresentada. No centro da placa, entretanto, os esforços máximos irão surgir numa região onde o material não é afetado pela solda e que por isso mesmo mantém a resistência inicial da tempêra "H".

Na verificação do efeito global, os

deslocamentos nodais obtidos pelo processamento da estrutura como um todo foram aplicados numa malha de elementos finitos representativa da chapa de alumínio. Assim, para obterem-se os esforços na placa provenientes das deformações na estrutura, utilizaram-se os deslocamentos lineares no plano da mesma ( estado plano de tensões ), correspondentes ao peso do minério atuando nos nós de contorno.

#### VI.2.2 - Estudo da chapa de fundo:

##### a) Efeito da deformação do vagão como um todo

A figura ( VI.1 ) ilustra as dimensões do painel mais solicitado mecanicamente no assoalho e por isso indicado para representar a chapa de fundo. Os deslocamentos lineares obtidos pelo programa de análise estrutural foram aplicados nos seus nós de canto e ainda interpolados para se ter estimativas de deslocamentos a serem aplicados nos nós intermediários. Após a análise da malha por um programa de elementos finitos foram encontrados os valores máximos de  $34,1 \text{ kgf/cm}^2$  e  $-462,1 \text{ kgf/cm}^2$  para as tensões de tração e compressão respectivamente. Uma vez que o limite de resistência a tração nesta liga é igual a  $2350 \text{ kgf/cm}^2$ .

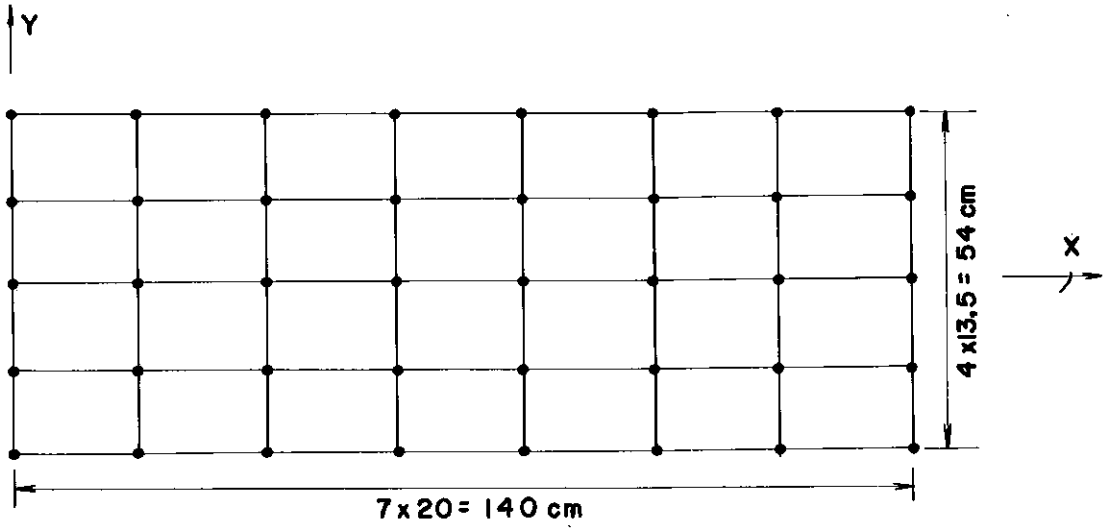


Figura ( VI.1 ) - Malha utilizada para o estudo da chapa de fundo.

b) Efeito local do carregamento do minério diretamente na chapa

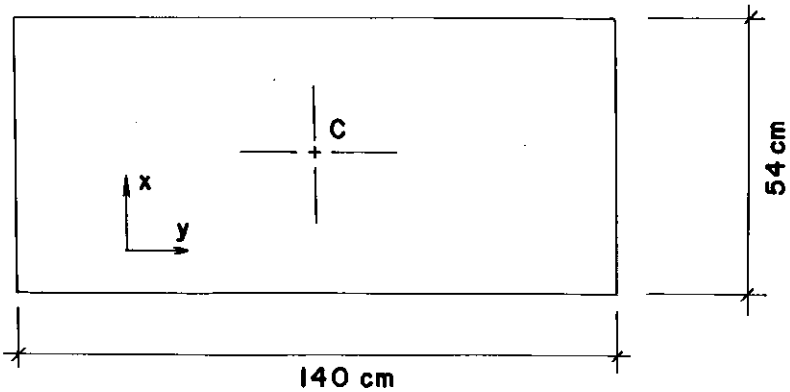


Figura ( VI.2 ) - Chapa utilizada para o efeito local no fundo.

Segundo o carregamento LB2A correspondente ao vagão inteiramente carregado, a carga referente ao peso de minério e distribuída sobre o assoalho é de  $0,368 \text{ kgf/cm}^2$ . O peso próprio da chapa pode ser desprezado em presença desta carga. Utilizando-se a referência [13] encontram-se os momentos fletores atuando na placa segundo as seguintes relações:

$$a = 54 \text{ cm}$$

$$b = 140 \text{ cm}$$

$$b = 140$$

$$- = \frac{\quad}{54} = 2,6 \text{ cm}$$

$$a = 54$$

Pela tabela 6 de [13], onde  $b/a = 2,5$  tem-se:

$$M_x = 0,1119 \times 0,368 \times 54^2 = 121,2 \text{ kgf cm / cm}$$

$$M_y = 0,0430 \times 0,368 \times 54^2 = 46,1 \text{ kgf cm / cm}$$

#### c) Cálculo da espessura da chapa

Sabendo-se que para a liga AA 5083 a tensão de referência é igual a  $2350 \text{ kgf/cm}^2$  e utilizando-se uma margem de segurança de 1,8, obtém-se a espessura através da superposição dos efeitos local e global,



$$\sigma = \frac{1,8 \times 6 \times 121,2}{t^2} + \frac{259,6 \times 0,95}{t} \leq 2350$$

$$\Rightarrow t \gtrsim 0,80 \text{ cm}$$

onde 259,6 se refere à tensão  $\sigma_x$  obtida em uma análise de chapa de espessura 9,5 mm.

Considerando-se aspectos de fabricação, adota-se o valor de 9,5 mm para a espessura da chapa de fundo.

### VI.2.3 - Estudo da chapa lateral

O peso do minério deve ser aplicado sobre a chapa lateral na sua condição mais desfavorável de descarregamento; ou seja, no giro a  $90^\circ$  conforme a figura ( V.40 ) do capítulo V. Admitindo-se que a altura deste minério seja a metade do comprimento máximo da cabeceira e próxima a 180 cm ( altura do carregamento considerado sobre a chapa do assoalho ), o carregamento ficará em situação semelhante ao estudado para a chapa de fundo. Isto permite adotar aqui as conclusões anteriores.

O estudo da influência exercida pela deformação do vagão como um todo, para efeito de dimensionamento, será desconsiderado, visto que este não foi expressivo na chapa de fundo.

Considerando-se apenas a metade da carga, para a condição de carregamento a  $90^\circ$  tem-se:

$$\text{Press\~{a}o equivalente } q = \frac{47500}{912 \times 180} = 0,289 \text{ kgf/cm}^2$$

$$M = \frac{0,289 \times 54^2}{8} = 105,3 \text{ kgf} \times \text{cm/cm}$$

Como este momento está abaixo daquele utilizado no dimensionamento da chapa de fundo, a chapa lateral poderá adotar a mesma espessura, ou seja, 9,5 mm..

### VI.3 - Modificaes na concepo inicial

#### VI.3.1 - Análise do comportamento estrutural

Uma vez identificados grandes deslocamentos horizontais no frechal, fez-se necessário utilizar algum recurso para reduzi-los. Optou-se, então, por acrescentar dois contraventamentos internos do tipo " side brace " ligando o center-sill ao frechal. A figura ( VI.3 ) ilustra este reforço das laterais e a figura ( VI.4 ) mostra a sua dimensão.

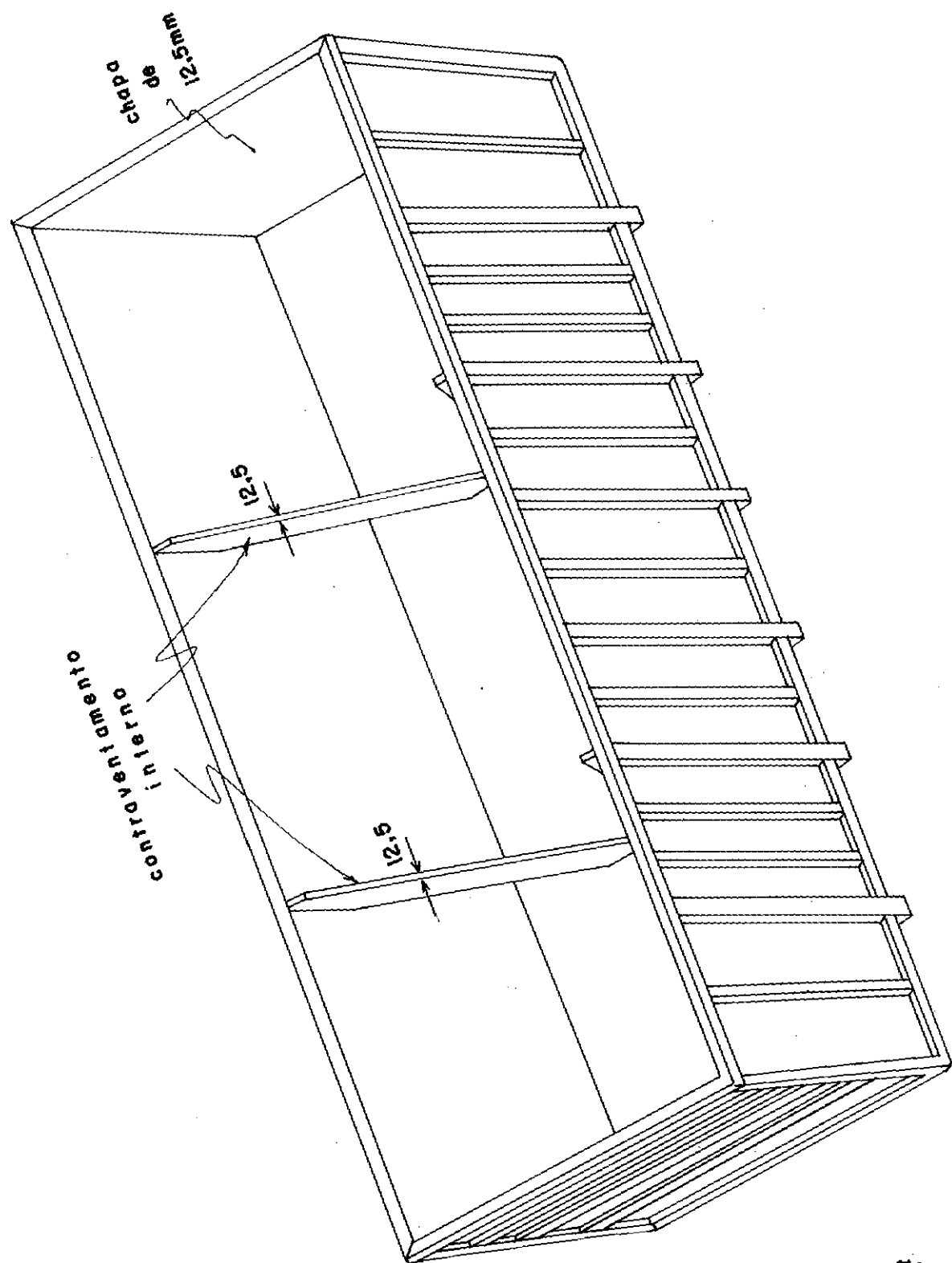


Figura ( VI.3 ) - Concepção do vagão com elementos de contraventamento interno.

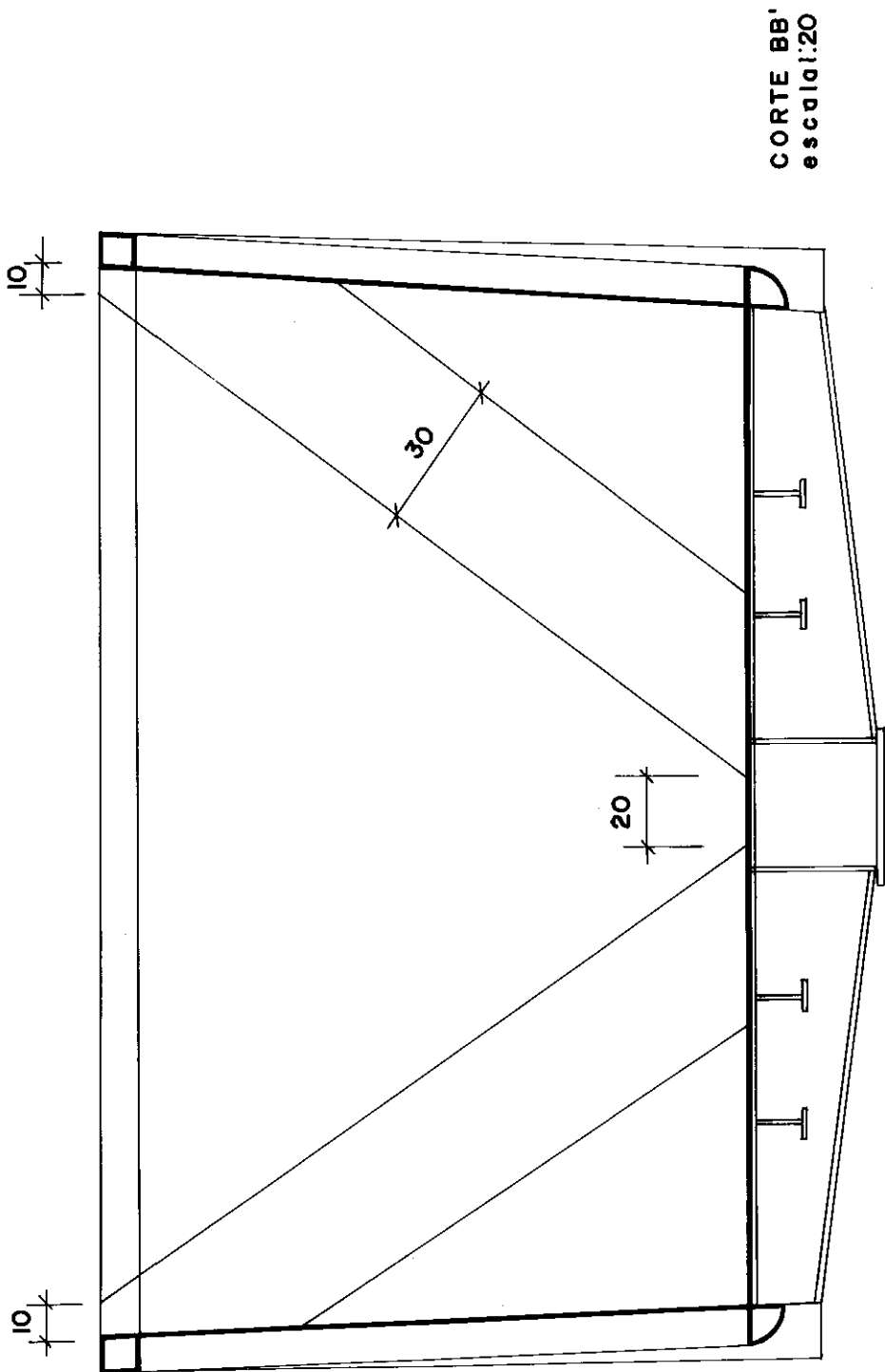


Figura ( VI.4 ) - Contraventamento interno.

Para que o center-sill e as travessas de pião também não apresentassem grandes deslocamentos, no caso verticais, as suas seções transversais foram aumentadas gradualmente. Sendo assim, procurou-se incrementar o momento de inércia da seção até se conseguir um reforço satisfatório.

Novamente, as propriedades de seções transversais foram calculadas levando-se em conta agora a espessura de 9,5 mm para a chapa de revestimento interno.

Processou-se em seguida a análise estrutural do vagão sem qualquer carga para se obter o seu novo peso próprio. Feitas as alterações nos pesos específicos dos materiais, a análise estrutural foi reprocessada.

Os resultados, entretanto, mantiveram-se desfavoráveis ao frechal. Como os deslocamentos horizontais permaneceram elevados, resolveu-se introduzir mais contraventamentos internos no modelo como mostra a discretização de metade do vagão na figura ( VI.5 ). Outros dois " side braces ", idênticos aos considerados anteriormente, foram posicionados de modo a coincidir suas projeções sobre as travessas principais e contraventar não só o deslocamento horizontal do frechal mas também os deslocamentos verticais do center-sill e da travessa.

Observando-se que os extremos inferiores dos montantes de canto também apresentavam grandes deslocamentos verticais, decidiu-se substituir toda a espessura da chapa de revestimento nas cabeceiras para 12,5 mm e simular contraventamentos embutidos nestas

chapas com as mesmas dimensões dos contraventamentos internos anteriores.

Reforçou-se mais uma vez o center-sill e as travessas com o objetivo de reduzir seus deslocamentos verticais. Nova análise então, foi reprocessada após as referidas alterações das propriedades de seção e pesos específicos.

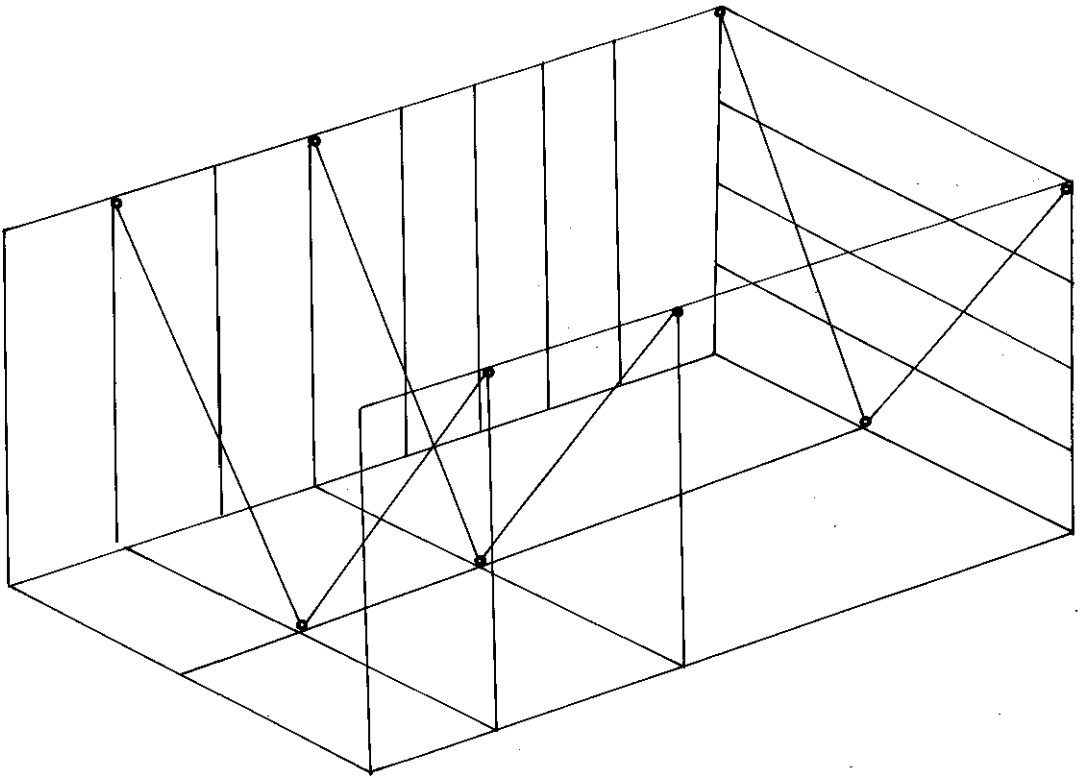


Figura ( VI.5 ) - Discretização do vagão com contraventamentos internos.

### VI.3.2 - Considerações quanto à Ligação Aço-alumínio

Para a união das partes em aço com as de alumínio evitou-se desde o início a ligação por meio de solda. Esta é muito problemática podendo danificar a

estrutura molecular do alumínio ou fundi-lo completamente.

Para as ligações aço-alumínio existentes entre os montantes principais e as travessas de pião ( fig. VI.6 ) como ainda entre as travessas principais e o center-sill ( fig. VI.7 ), pensou-se revestir as extremidades de contato com cádmio para em seguida conectá-los com parafusos igualmente revestidos. Tal proposta, entretanto, foi rejeitada pelo fato de no Brasil não haver comprovada experiência de ligações deste tipo.

Como as regiões que necessitam a ligação são pontos de transmissão de altos esforços mecânicos, decidiu-se por pesquisar outra solução para o problema.

A nova alternativa encontrada foi a de substituir as partes ainda restantes em aço para alumínio e utilizar também uma liga mais resistente nos perfis extrudados. Para a concepção do center-sill e das travessas de pião em alumínio, optou-se por compô-los com a mesma liga das chapas de revestimento interno; ou seja, AA 5083-H. Para os perfis extrudados entretanto, introduziu-se uma liga de alumínio da série 7000 portadora de altas propriedades mecânicas, apesar desta ser uma série ainda em fase de implantação no país. A liga utilizada foi a 7004-T4 da ALCAN que apresenta boas qualidades anti-corrosivas quando submetida a tensão.

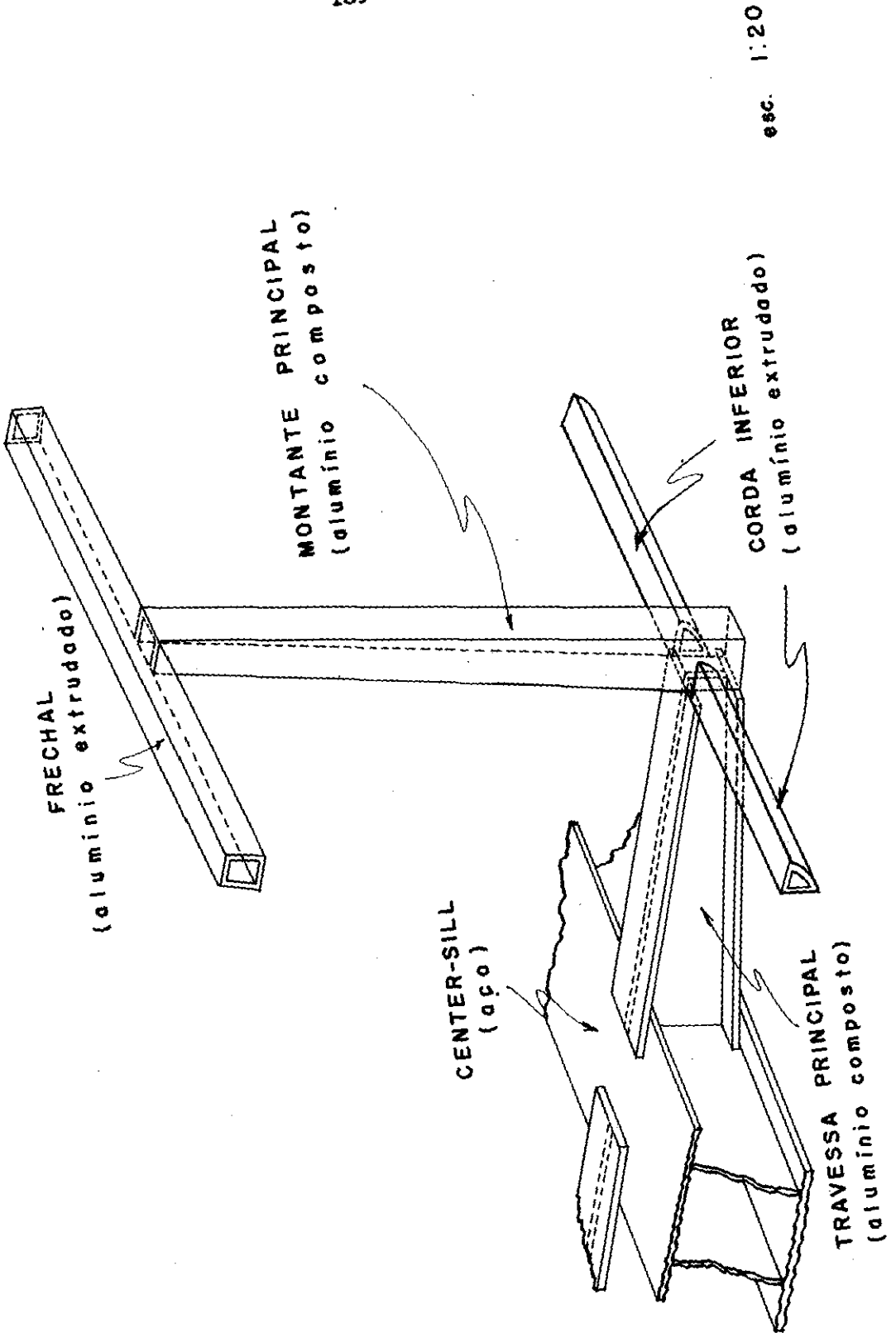


Figura ( VI.6 ) - Vista da ligação do montante principal com a travessa principal.



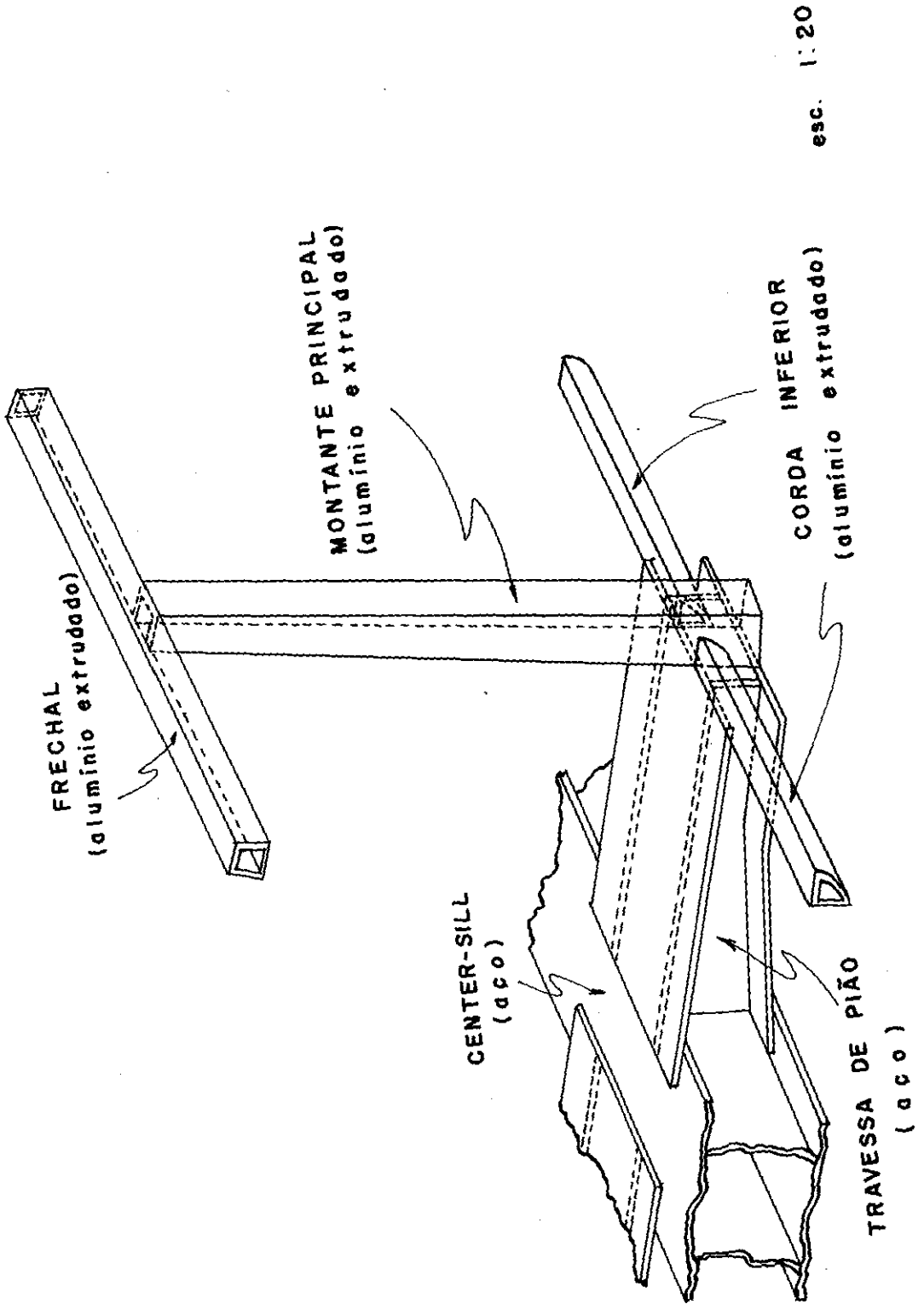


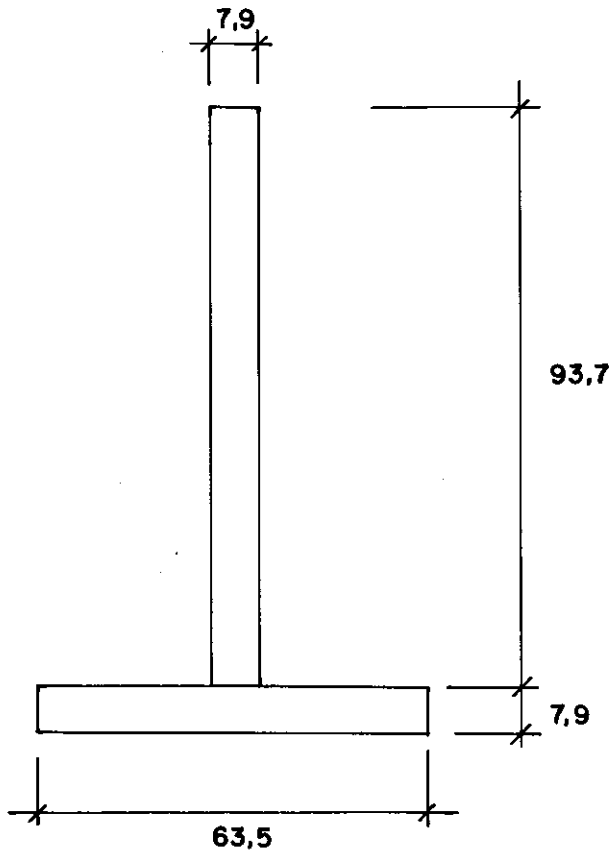
Figura ( VI.7 ) - Vista da ligação do montante principal com a travessa de pião.

### VI.3.3 - Seções Transversais Finais

Pela análise dos deslocamentos, tornou-se necessário aumentar as seções transversais do center-sill e travessas principais até impedir as excessivas flechas no modelo estrutural. Nestas, as espessuras da mesa e alma atingiram 60 mm e não se preocupou com a viabilidade de sua construção, mas apenas enrijecer a estrutura com maior momento de inércia nestas seções. As figuras ( VI.8 ) a ( VI.19 ) apresentam as seções transversais finais.

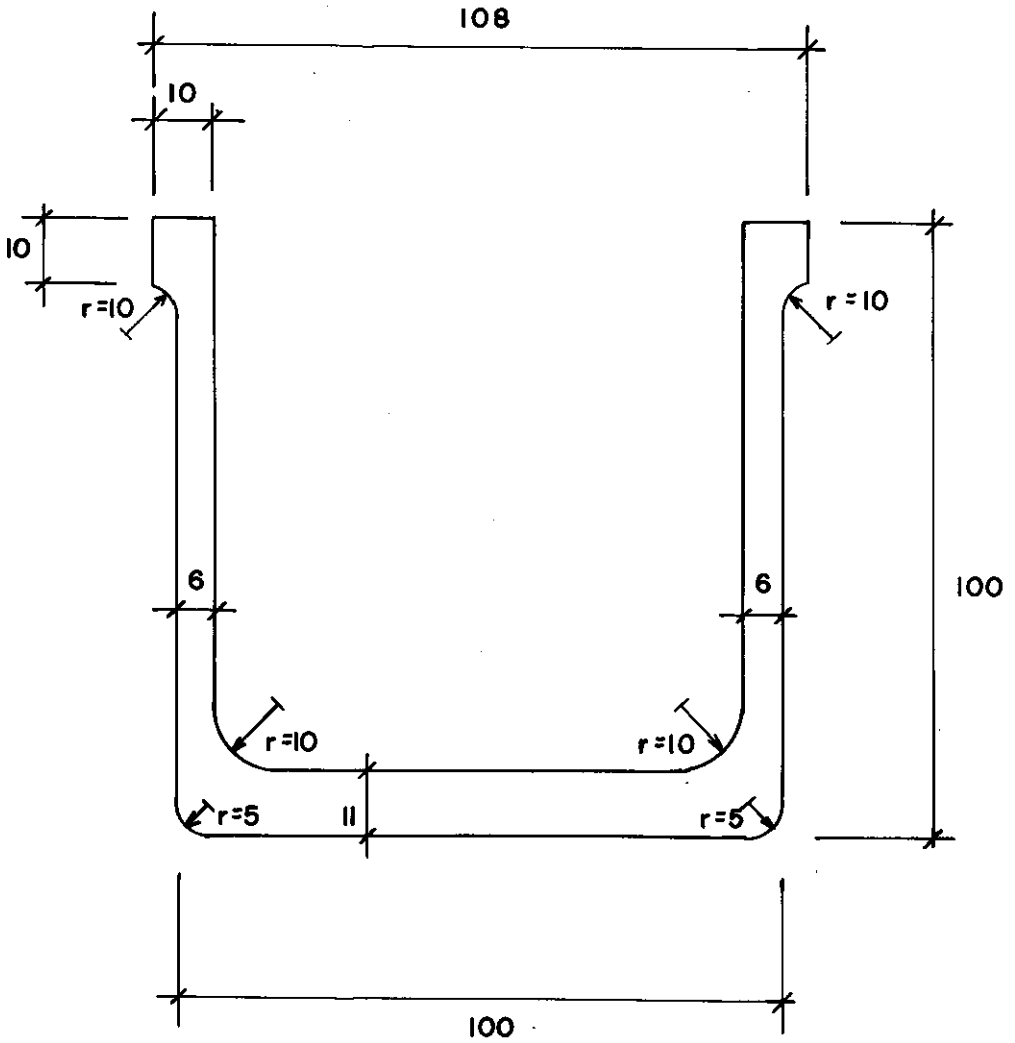
Utilizando-se o critério da energia de distorção, calculou-se a tensão equivalente, normal e cisalhante, nos pontos mais solicitados de cada seção transversal. Tal procedimento foi automatizado em microcomputador a partir dos dados: características geométricas da seção transversal, coordenadas do ponto onde se calcula a tensão equivalente, além dos esforços normal, momentos fletores em y e em z e da tensão cisalhante atuando neste ponto.

Uma vez que os fluxos de tensão cisalhante para cortantes unitários e momentos de torção unitários são fornecidos diretamente pelo programa de cálculo de propriedades geométricas de seção, decidiu-se por aplicá-los diretamente no cálculo manual da tensão cisalhante ao invés de empregar os esforços cortantes em y e z e o momento de torção no cálculo automático da tensão equivalente.



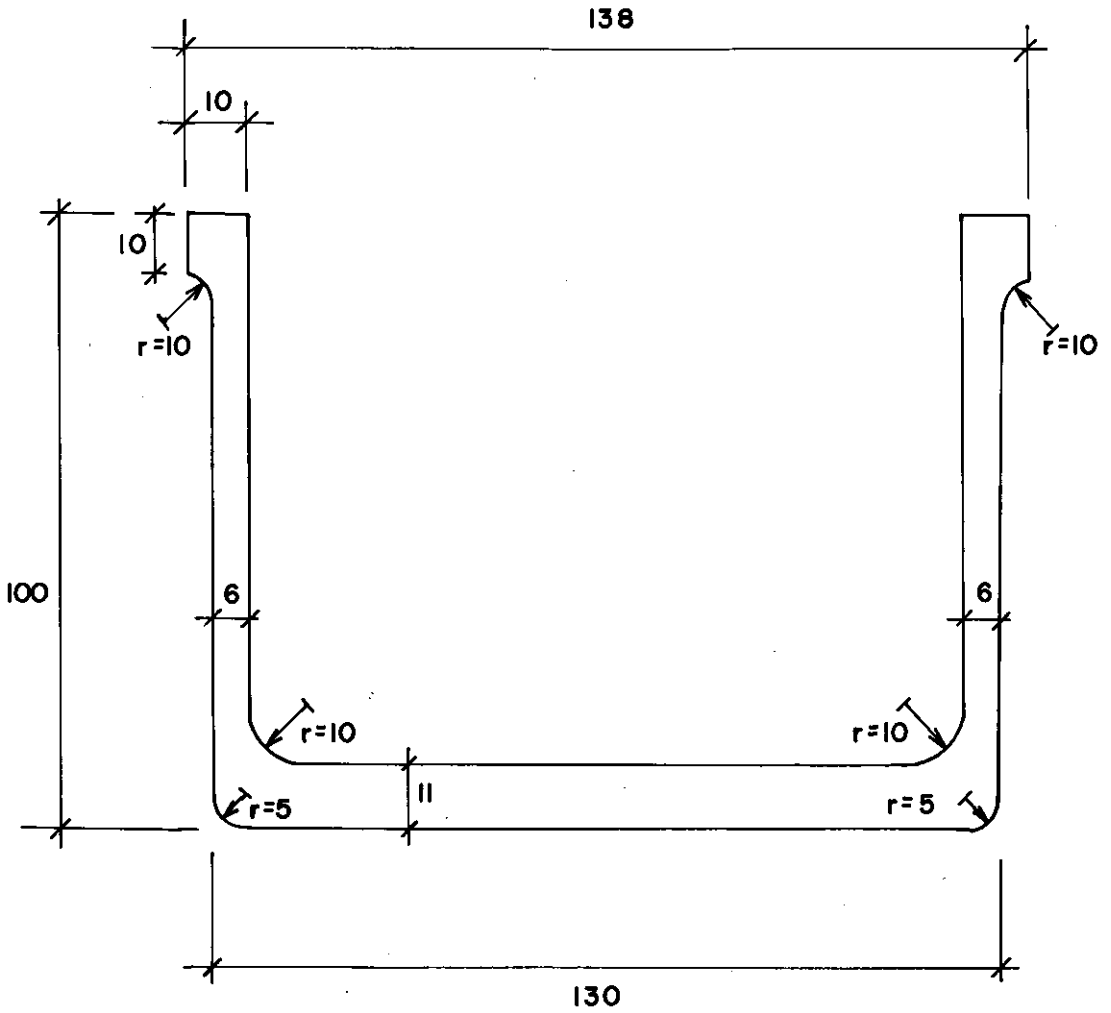
SUPORTE DE ASSOALHO  
escala 1:125  
cotas em milímetros  
perfil extrudado

Figura ( VI.8 ) - Suporte de assoalho



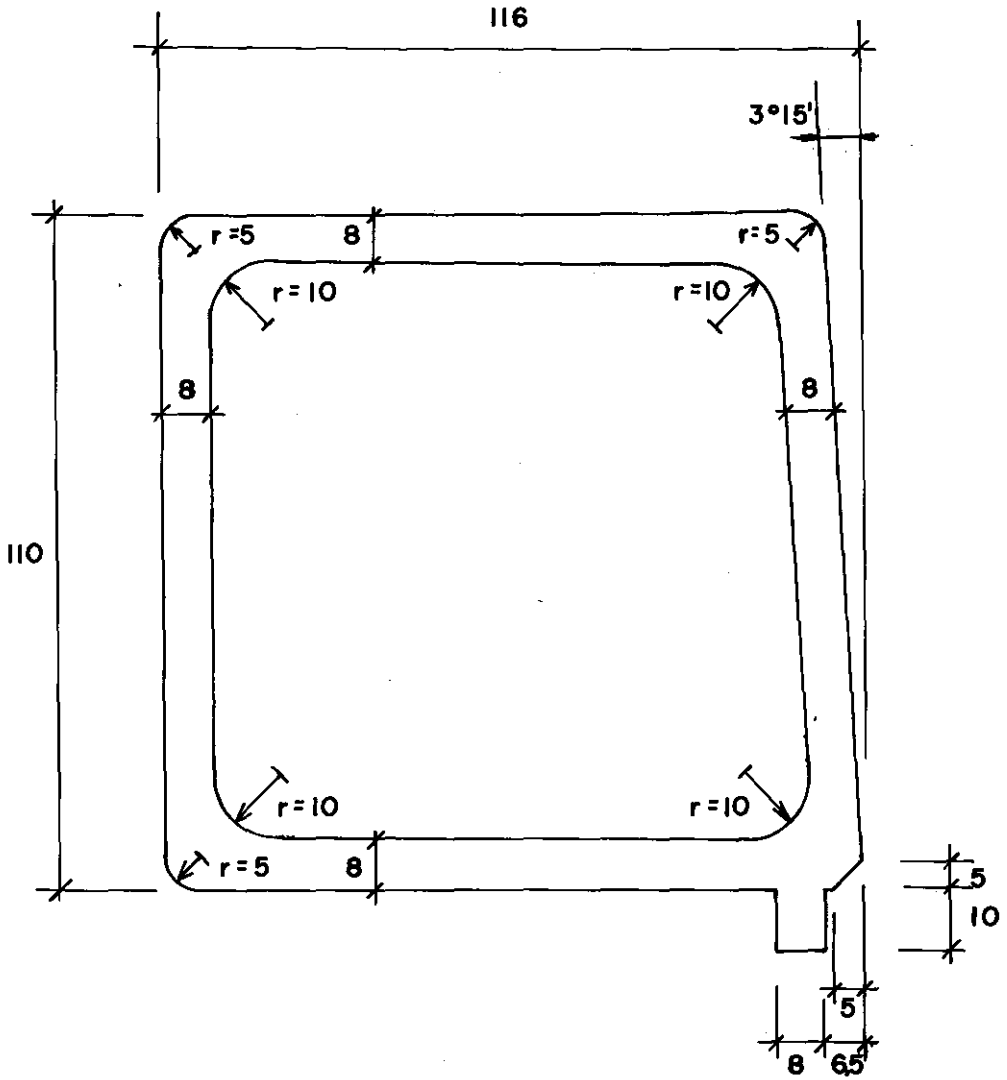
**MONTANTE SECUNDÁRIO**  
 escala 1:125  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máx = 1,70 m

Figura ( VI.9 ) - Montante secundário



REFORÇO DE CABECEIRA  
 escala 1:125  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máx. = 2,94 m

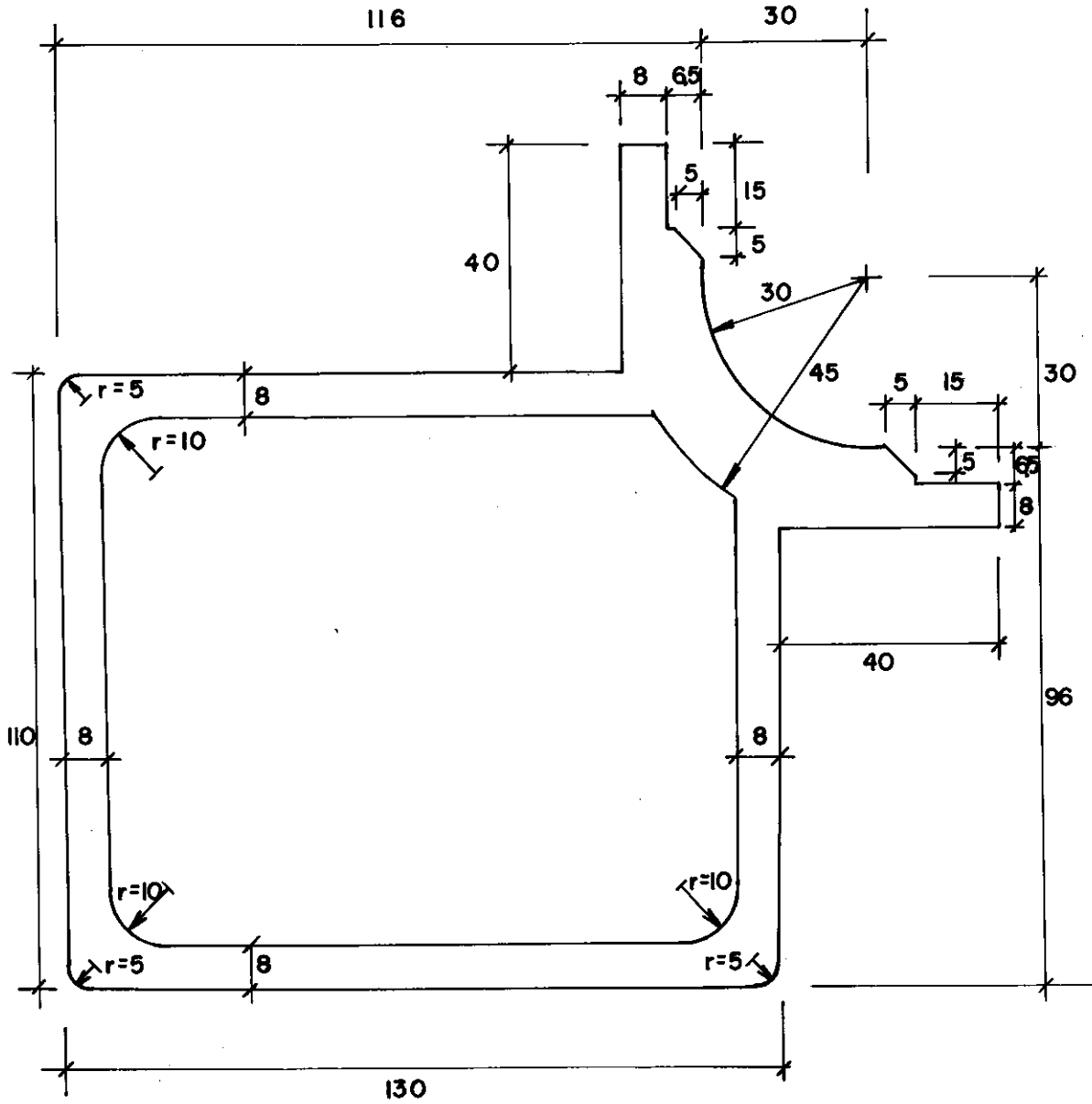
Figura ( VI.10 ) - Reforço de cabeceira



**FRECHAL**  
 escala 1:125  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máx.=9,12 m

Figura ( VI.11 ) - Frechal

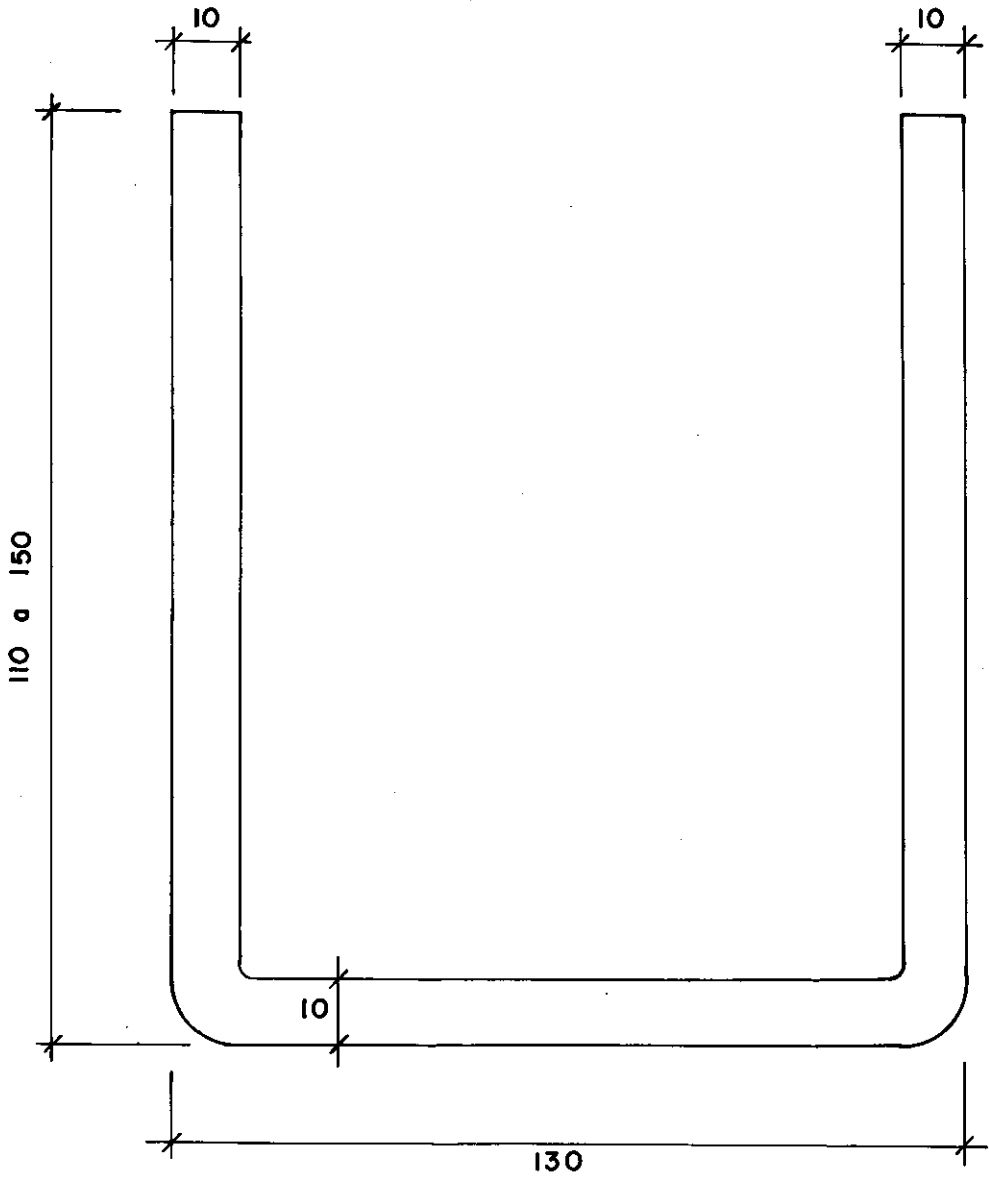




**MONTANTE DE CANTO**  
 escala 1:125  
 cotas em milímetros  
 perfil extrudado  
 comp. máx. = 1,80 m

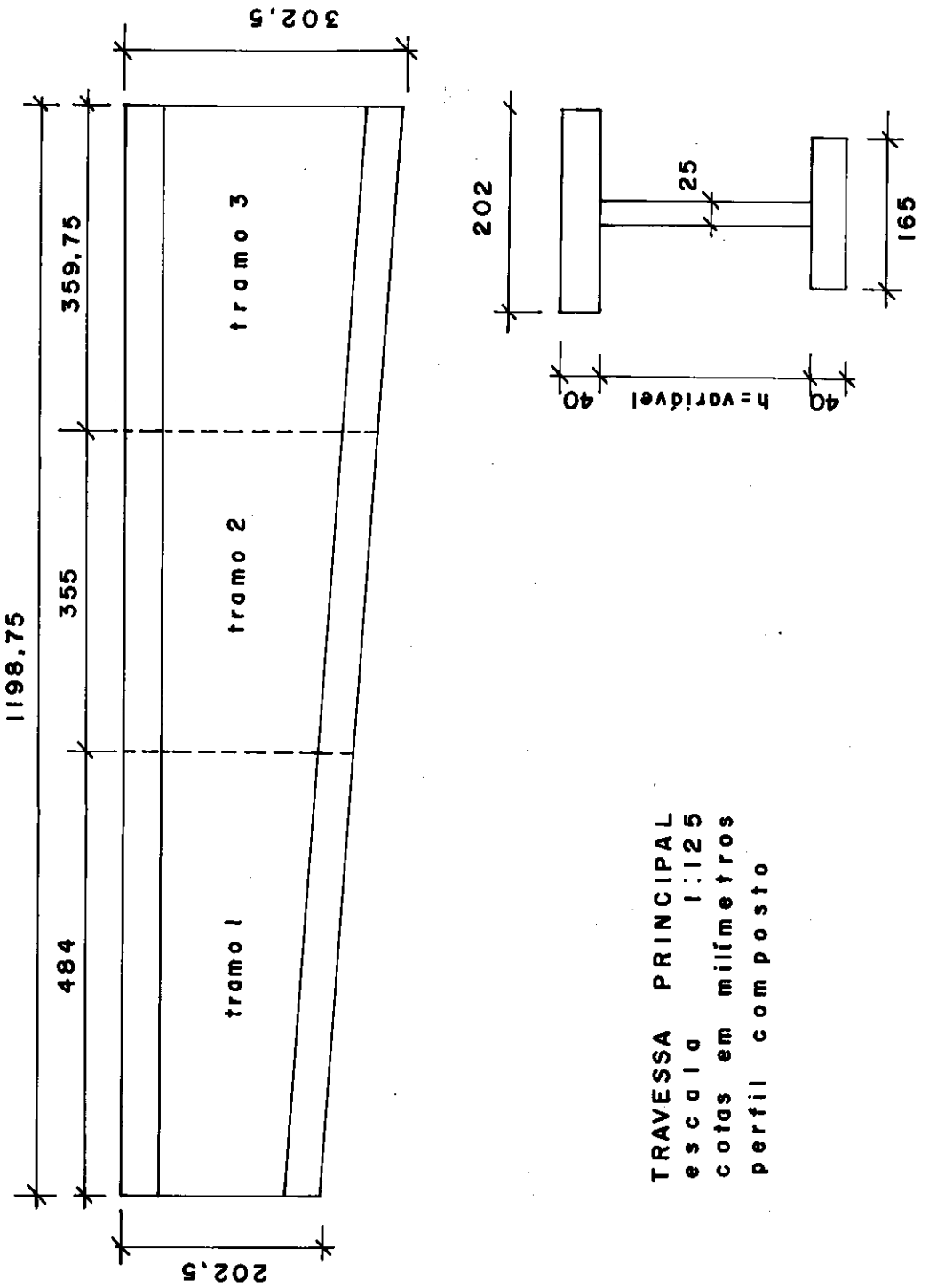
Figura ( VI.13 ) - Montante de Canto





MONTANTE PRINCIPAL  
escala 1:125  
cotas em milímetros  
perfil de chapa dobrada  
comp. máx. = 1,90m

Figura ( VI.14 ) - Montante principal



TRAVESSA PRINCIPAL  
 escala 1:125  
 cotas em milímetros  
 perfil composto

Figura ( VI.15 ) - Travessa principal

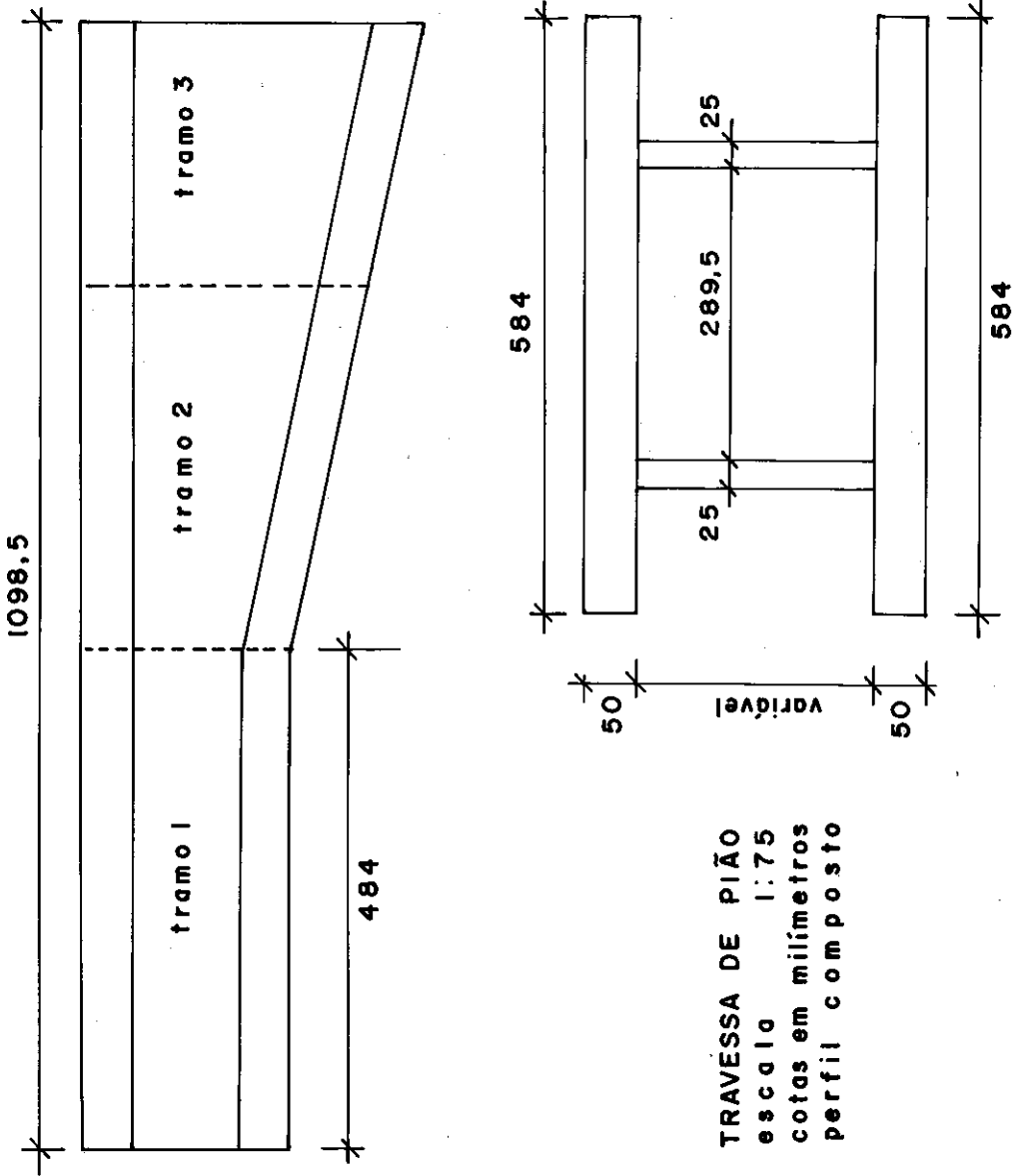
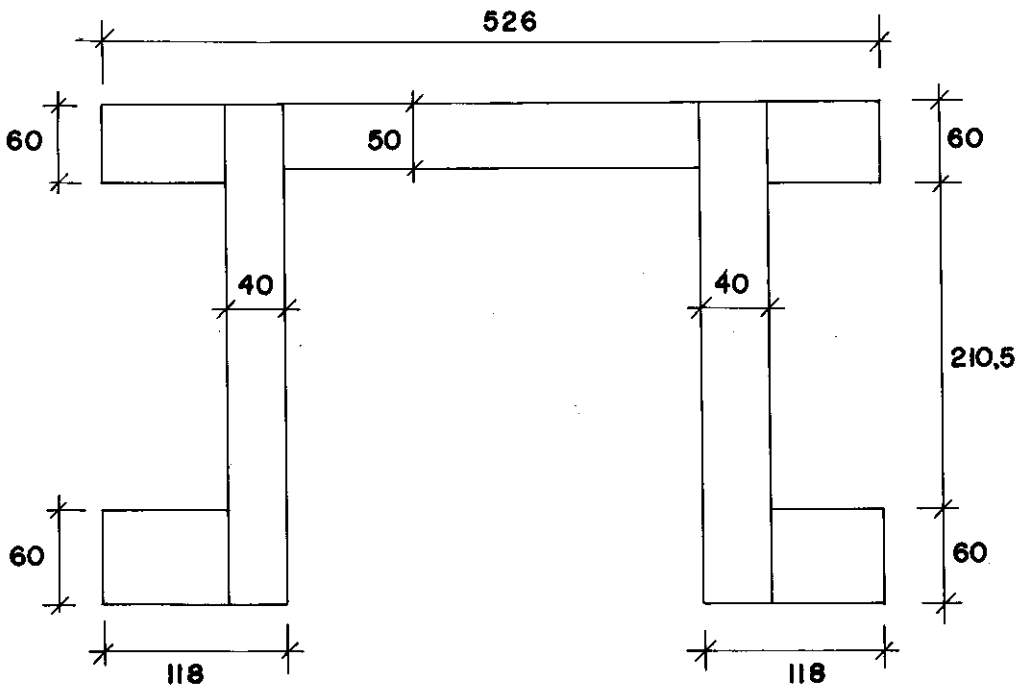
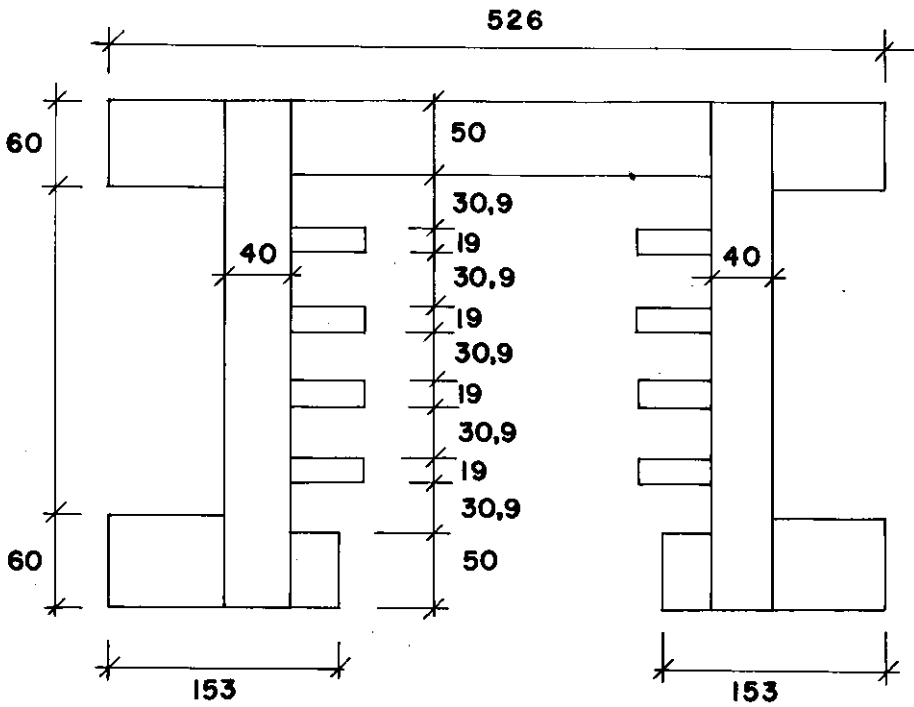


Figura ( VI.16 ) - Travessa de pião



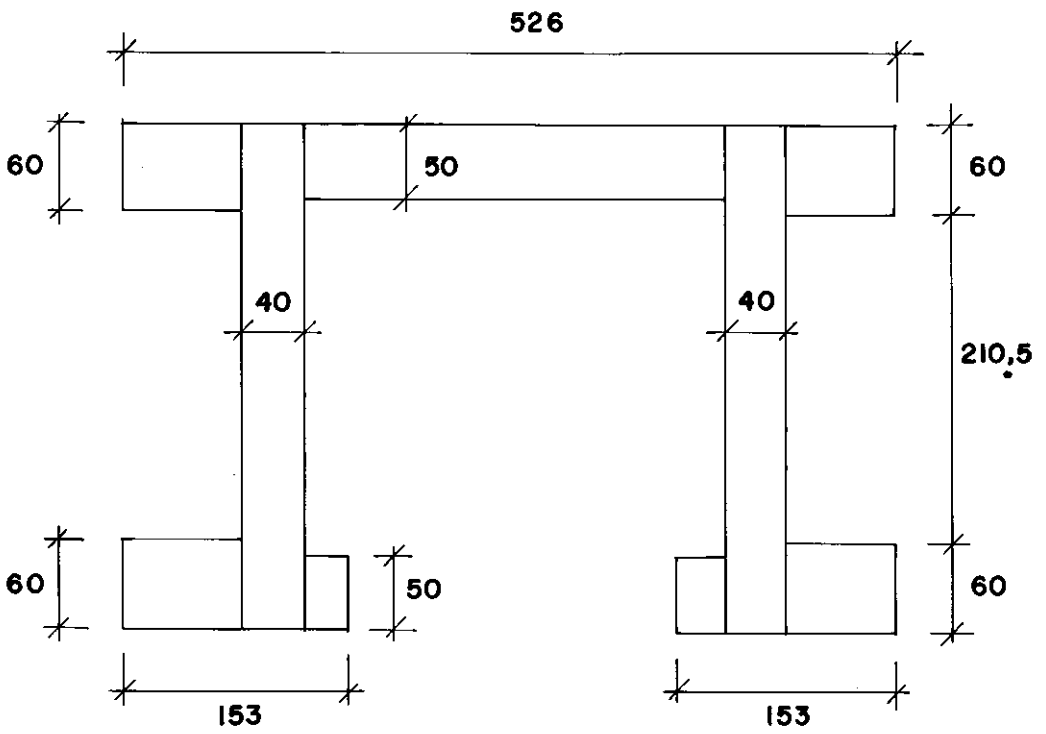
**CENTER-SILL - TRAMO I**  
escala 1:50  
cotas em mm  
perfil aluminio

**Figura ( VI.17 ) - Center-sill tramo 1**



CENTER-SILL - TRAMO 2  
 escala 1:50  
 cotas em mm  
 perfil alumínio

Figura ( VI.18 ) - Center-sill tramo 2



**CENTER-SILL - TRAMO 3**  
**escala 1:50**  
**cotas em mm**  
**perfil alumínio**

**Figura ( VI.19 ) - Center-sill tramo 3**

#### VI.4 - Metodologia de Verificação das Seções Transversais

Através da avaliação dos esforços solicitantes máximos obtidos para cada um dos tipos de elemento estrutural do vagão, foi possível selecionar os elementos nas situações mais desfavoráveis, para a verificação dos níveis de tensões atuantes em suas seções transversais. Estes esforços extremos; ou seja, normal, cortante em y, cortante em z, momento de torção, momento em y e momento em z são responsáveis pelo surgimento das tensões máximas normal e cisalhante em um dos quadrantes dos eixos de coordenadas principais. Os valores máximos selecionados pelo programa encontram-se em [15].

Para a avaliação das tensões, a contribuição de chapa adotada passou a ser de  $8t$  nas extremidades dos perfis de seção transversal aberta em substituição à contribuição de  $16t$  mencionada anteriormente no item V.6 e utilizada na análise de esforços. Para os perfis onde a chapa de revestimento interno completa uma seção fechada, como o montante principal por exemplo, optou-se por não considerar a área de  $8t$  como contribuinte na área total, mas somente a parte complementar da chapa de revestimento interno fechando a seção. Nos perfis de seção fechada, como o frechal, desprezou-se inteiramente esta contribuição de chapa. Tais considerações procuram aumentar a segurança no dimensionamento dos perfis uma vez que os esforços máximos obtidos na análise estrutural passam a atuar em áreas menores e fornecem portanto maiores tensões.

O programa desenvolvido para a tensão normal equivalente calcula ainda o fator de segurança necessário na avaliação final das tensões. Este é o resultado da divisão da tensão de referência definida na norma levando em conta o tipo de liga usada pela tensão equivalente encontrada, como foi definido no capítulo III. Assim sendo, os fatores de segurança para a tensão normal ficam resumidos na tabela ( VI.1 ).

Tabela (VI.1) - Fatores de Segurança  
Mínimos Encontrados para as Tensões  
Normais.

ELEMENTO ESTRUTURAL	F.S.
Frechal	1,0
Montante de canto	0,8 ( 1,1 )
Montante secundário	4,0
Montante principal	0,3 ( 1,0 )
Gorda inferior	2,0
Travessa principal	1,1
Travessa de pião	2,7
Center-sill	0,5 ( 1,1 )



Apesar da tensão normal equivalente fornecida no Critério de Von Mises já ter em conta o efeito de tensão cisalhante, o fator de segurança em termos desta tensão cisalhante foi calculado de maneira que a tensão cisalhante equivalente correspondesse à metade da tensão normal equivalente. Tal argumento é admissível visto que a tensão cisalhante equivalente é definida como a tensão em ensaio uniaxial de tensões que corresponde em termos de estado limite ao estado múltiplo de tensões em análise. Os fatores de segurança mínimos devido aos esforços cortantes encontra-se resumidos na tabela ( VI.2 ).

Tabela ( VI.2 ) - Fatores de Segurança Mínimos Encontrados para os Esforços Cortantes.

ELEMENTO ESTRUTURAL	F.S.
Frechal	10,7
Montante de canto	4,8
Montante secundário	7,6
Montante principal	4,0
Corda inferior	7,6
Travessa principal	3,0
Travessa de pião	2,7
Center-sill	7,2

#### VI.4.1 - Avaliação dos Fatores de Segurança

O fator de segurança foi definido como a relação entre a tensão de referência e a tensão equivalente, seja esta normal ou de cisalhamento. Ele procura indicar qual a condição de segurança que se tem em determinado elemento e em determinado carregamento e deve ser igual ou maior do que 1. A condição ideal de dimensionamento é que se obtenha este fator igual a 1. Os principais agentes que influenciam este fator são os fatores de majoração de cargas introduzidos no cálculo dos esforços e que afeta diretamente a tensão equivalente, como também o tipo de liga usada que vem a definir o valor da tensão de referência.

Para as tensões cisalhantes, a tabela ( VI.2 ) lista os fatores de segurança mínimos encontrados, que são maiores do que 1 para todos os elementos estruturais.

Para as tensões normais, entretanto, tanto o center-sill quanto os montantes principal e de canto tiveram fatores de segurança abaixo de 1, como se observa na tabela ( VI.1 ). Reavaliando-se estes resultados, verifica-se que na listagem dos esforços solicitantes, o carregamento LB2B é o que induz o fator de segurança de 0,5 no center-sill. Neste, o peso total do minério é considerado distribuído em um comprimento central de 24' no vagão tendo ainda os seus resultados majorados para efeito de consideração de carregamento. Observa-se também, que a norma aqui utilizada objetiva

projetos de vagões em aço. Entretanto, em se tratando de alumínio ou outro material mais deformável, esta consideração, ao invés de contribuir com uma simulação real de carregamento, passa a prejudicar a avaliação do comportamento estrutural. Já que este tipo de carregamento é praticamente impossível de ocorrer na realidade, ele foi ignorado no presente projeto. O novo fator passa então a ser decorrente da combinação 4 que é igual a 1,1 como apresentado entre parentesis na tabela ( VI.1 ). Este fator leva em conta o carregamento LB2A que distribui o minério por todo o vagão.

O mesmo critério foi considerado para o montante de canto. O carregamento LB2B referido anteriormente produz esforços e deslocamentos que podem ser desprezados nas mesmas condições em que os foram para o center-sill. A combinação 11 é assim substituída pela combinação 16 correspondendo agora ao carregamento LB2A que produz o fator de segurança igual a 1,1; como mostrado entre parentesis na tabela ( VI.1 ).

O carregamento LB2B interfere ainda nos tramos 3 e 4 do montante principal. Fatores de segurança irreais são fornecidos pelas combinações 7 e 11 que devem por isso ser trocadas pelas combinações 15 e 17 respectivamente, que consideram o carregamento LB2A do minério distribuído por todo o vagão. Apesar desta mudança, o novo fator de segurança no montante principal ainda não chega a ser satisfatório. Fez-se necessário que a liga AA 5083-0 neste elemento fosse substituída pela liga AA 7004-T5, a fim de se obter o fator de segurança no

valor de 1,0; também apresentado entre parentesis na tabela Y.

#### VI.5.2 - Fator de Segurança dos Elementos de Contraventamento Internos

Os cálculos para a determinação do fator de segurança dos elementos de contraventamento interno encontram-se em [14].

A compressão que nestes elementos ocorre durante o basculamento é o esforço mais desfavorável, em consequência do pequeno raio de giração na seção transversal original. Após ter sido encontrado um baixo fator de segurança, verificou-se a necessidade de alterar a forma desta seção transversal para se obter um fator maior do que 1,0. Modificando-se então, a seção e adotando-se mais uma vez a liga 7004, foi possível conseguir um fator de segurança igual a 1,30 suficiente para a aprovação da peça estrutural.

## CAPÍTULO VII

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Após serem majorados os carregamentos pelos fatores de carga e avaliadas as tensões de referência e equivalente segundo as normas de cálculo descritas no item IV.3, chegou-se aos fatores de segurança iguais ou maiores do que 1,0 para todos os elementos estruturais. Sabendo-se que a condição ótima de dimensionamento é o fator de segurança igual a 1,0, pode-se afirmar que estas seções transversais são adequadas no que diz respeito à resistência mecânica.

O método de cálculo apresentado pela norma baseia-se num modelo simplista que reparte a estrutura em um conjunto de elementos estruturais e lhes aplica isoladamente as combinações de carregamento. Tal concepção acarreta diferenças de resultados em relação à estrutura real, diferenças estas que são minimizadas com a adoção do modelo tridimensional. Ao considerar-se o vagão como um pórtico espacial tem-se um comportamento muito mais realístico do que aquele obtido a partir da concepção em

que se separa a caixa em infraestrutura ( estrado ) e paredes laterais. Entretanto, a utilização das cargas especificadas para o modelo simplista no modelo tridimensional induz à utilização de carregamentos muito conservativos. Um exemplo deste fato, pode ser observado quando a norma arbitra no item 4.1.3.3 a distribuição do peso total de minério sobre um comprimento central de 24'. Este carregamento é completamente irreal e conduz a resultados muito desfavoráveis, que além disso são majorados quando da combinação de carregamentos para a pesquisa de esforços solicitantes máximos para a verificação de dimensionamento de seções. Tal consideração não chega a inviabilizar um projeto de vagão em aço pelo fato de produzir flechas satisfatórias no center-sill e travessas, mas em se tratando de projeto em alumínio a maior deformabilidade deste material resulta em flechas excessivamente grandes. Além disto, a norma da AAR não fixa limites máximos de deslocamentos para a estrutura, o que não chega a ser um fator muito preponderante em um material rígido como o aço, mas que é fundamental num projeto em alumínio cuja deformabilidade da estrutura é um dos principais estados limites de utilização. A consideração de cargas elevadas buscando assegurar a resistência mecânica do material rígido parece não se preocupar com as pequenas deformações provocadas neste. Sendo muito conservativas entretanto, as cargas utilizadas para um material rígido como o aço implicam em seções transversais com dimensões muito maiores que as necessárias quando aplicadas num material mais deformável.

Todavia, um elemento em alumínio pode ser tanto ou mais resistente aos esforços solicitantes do que um elemento em aço, bastando que seja dimensionado conforme as condições reais da estrutura. Ao considerar-se a modelação tri-dimensional do vagão a simulação dos seus carregamentos aproxima-se da realidade e apresenta resultados mais precisos do que os métodos tradicionais com conjuntos de elementos carregados isoladamente. Desta forma a não consideração neste projeto de carregamentos tais como o " leaning-load " e o LB2B que considera o peso total do minério concentrado numa pequena região central do vagão, não prejudica a avaliação do comportamento estrutural.

Os deslocamentos verticais no center-sill tiveram de ser reduzidos por um reforço na sua seção transversal até atingir flechas não superiores a  $1/600$  ( estima-se que o ideal situa-se em torno de  $1/800$  e  $1/1000$  ) do vão central na seção média do vagão. As flechas nos extremos das travessas principais também exigiram reforço semelhante. Esta necessidade de se reduzirem os deslocamentos verticais, em elementos de seções transversais grandes, implicou em relevante acréscimo no peso total da estrutura em alumínio. Assim sendo, a diferença então encontrada na análise para o vagão totalmente em alumínio em relação a um similar em aço passou a ser menor do que para o caso do vagão misto. A relação entre os pesos obtidos pode ser observada na tabela quadro ( VII.1 ) abaixo para os três tipos de vagão.

Tabela ( VII.1 )

	Caixa totalmente em aço	Caixa em alumínio c/ center-sill e trav.pião em aço	Caixa total- mente em alumínio
Peso da caixa (kgf)	11.499	5.599	8.020
Freios em aço ( " )	716	716	716
Engates " " ( " )	1.465	1.465	1.465
Truques " " ( " )	10.720	10.720	10.720
Tara (kgf)	24.400	18.500	20.921

O fato da concepção adotada para o projeto de vagão em alumínio basear-se na concepção de vagão gôndola em aço limitou a redução no peso do vagão totalmente em alumínio em apenas 14 %. Duas medidas devem ser tomadas para se aproveitar mais as qualidades da liga em alumínio e se obterem melhores resultados em termos de peso total. São elas:

a) Para que o center-sill trabalhe mais adequadamente vê-se necessário alterar a altura da sua seção transversal e concentrar o material adotado nas suas



faces superior e inferior, de maneira que possam ser obtidos maiores momentos de inércia. O center-sill poderia ser ainda desmembrado em três longarinas na infraestrutura do vagão.

b) A forma da caixa do vagão deve ser modificada para que se aproveite o comportamento de membrana da chapa de revestimento interno de alumínio. Como já vem sendo usado atualmente no Canadá, esta teria uma certa curvatura de forma a trabalhar com a concepção de casca com reforços nas cabeceiras ou regiões julgadas necessárias. A figura ( VII.1 ) sugere uma nova concepção de vagão em alumínio.

Observa-se ainda que o peso dos truques em aço são muito significativos no peso total da estrutura. Estes, portanto, deveriam ser também estudados em alumínio para obter-se a redução no seu peso.

Durante a descarga do vagão gôndola no car-dumper, a caixa recebe lateralmente sucessivos impactos de um martelo, para que o minério de ferro não permaneça aderido junto à chapa de revestimento interno. Recomenda-se também que seja feita uma análise dinâmica do comportamento estrutural do modelo nesta condição, para que sejam verificados os valores numéricos do efeito deste martelo. Caso seja possível, aconselha-se a substituição deste mecanismo de impacto por outro de vibração mais suave.

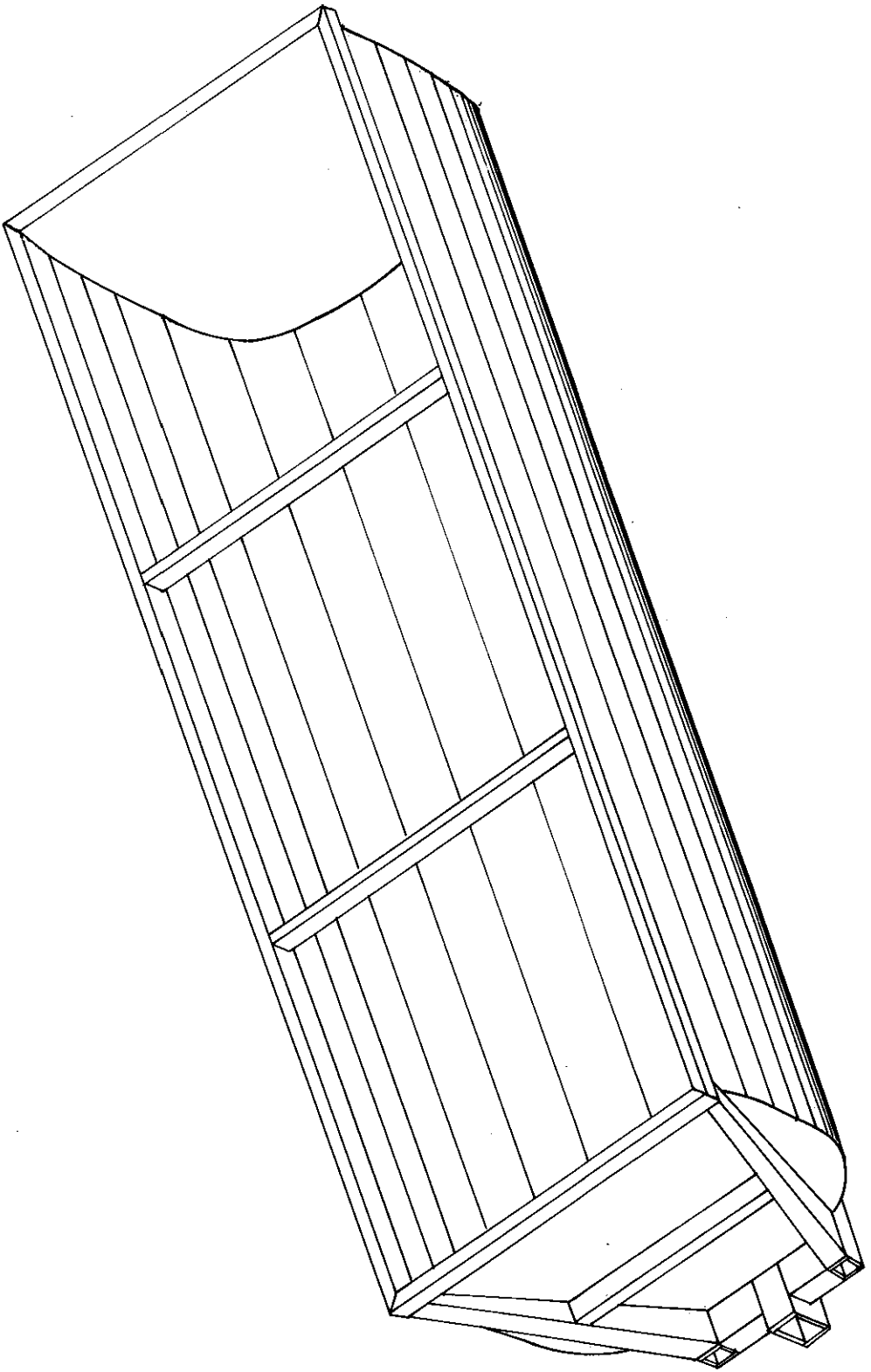


Figura ( VII.1 ) - Nova concepção sugerida para  
estudo de vagão em alumínio

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. THE ALUMINUM ASSOCIATION, " Aluminum for More Efficient Railroad Cars ", First Edition, January, 1980.
- [2]. THE ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, " Car and Locomotive Cyclopedia ", New York, Simmons-Boardman Publishing Corporation, 1970.
- [3]. WILLIAMS, G.D., HARRIS, E.C., " Structural Design in Metals ", New York, The Ronald Press Company, Second Edition, 1957.
- [4]. CARVALHO, S. R. F., " Novas Técnicas de Projeto de Sistemas para Análise Estrutural ", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Março de 1988.
- [5]. SORIANO, H.L., " Análise de Estruturas Reticuladas em Computadores de Pequeno Porte ", Apostila, Escola de Engenharia da UFRJ, 1983
- [6]. SORIANO, H.L., " Sistemas de Equações Algébricas Lineares em Problemas Estruturais ", Apostila, Laboratório Nacional de Engenharia Civil , Lisboa ,

1981.

- [7]. MEGSON, T.H.G., " Linear Analysis of Thin Walled Elastic Structures ", Surrey University Press, 1974.
- [8]. TROYMAN, A.C.R., CONCEIÇÃO, C.A.L., " Área Efetiva ao Cisalhamento e Centro de Cisalhamento de Seções Transversais de Navios ", Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Engenharia Naval, Vol. 4, Número 1, págs. 35 a 63, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval ( SOBENA ), Rio de Janeiro, agosto, 1987.
- [9]. SILVA Jr, J.F., " Resistência dos Materiais ", Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico S.A., 1962.
- [10]. SEELY, F.B., SMITH, F.O., " Advanced Mechanics of Materials ", New York, John Wiley and Sons, Inc., 1952.
- [11]. THE ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, " Manual of Standards and Recommended Practices - Specifications for Design, Fabrication and Construction of Freight Cars ", USA, 1986.
- [12]. TIMOSHENKO, S.P., GERE, J.M., " Mechanics of Materials ", D. Van Nostrand Company, New York, 1972.

- [13]. TIMOSHENKO, S.P., WAINAWSKY-REIGER, S., " Theory of Plates and Shells ", Mac-Graw-Hill Book Company, Inc., 1959.
- [14]. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES, " Estudos Técnicos e Projeto para a Fabricação de um Vagão a ser Construído de Alumínio para Transporte de Minério ", Relatório, Abril de 1988.