



Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

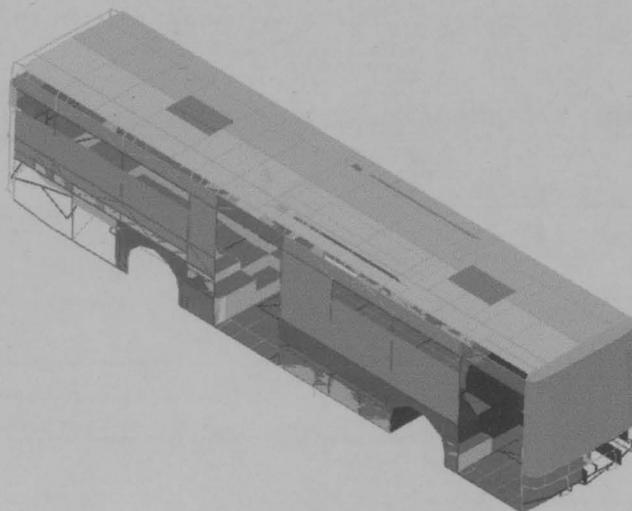
**FEUP**



**CaetanoBus**

**- PROJECTO DE FIM DE CURSO -**

**OPTIMIZAÇÃO DO PROJECTO DA ESTRUTURA DE  
AUTOCARROS COM SOFTWARE DE "COMPUTER EDITING  
ENGINEERING"**



*António Domingos Araújo Moraes*

*Orientador:*

Mário Filipe Dias Fernandes

*Supervisores:*

Carlos Reis Gomes

Paulo Tavares de Castro

**Licenciatura em Engenharia Mecânica  
Opção Projecto de Máquinas**

2004-07-21

621(047.3)  
LEM 2003/MORa

Castanhus



PROJECTO DE FIM DE CURSO

OPTIMIZAÇÃO DO PROJECTO DA ESTRUTURA DE AUTOCARROS COM SOFTWARE DE "COMPUTER EDITING ENGINEERING"



Mário Domingos Azeiteiro

Quantador

Mário Filipe Dias Fernandes

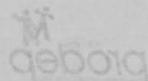
Supervisores

Carlos Reis Gomes

Paulo Tavares de Castro

Engenharia Mecânica 621(047.3)/UM 2003/MORA

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	91289
CDU	621(047.3)
Data	17/07/2007



## **Resumo**

Este relatório apresenta o estudo de optimização de estruturas de autocarros, desenvolvido durante estágio curricular na empresa CaetanoBus.

O estudo desenvolvido foi auxiliado pelo recurso a uma ferramenta informática de cálculo estrutural, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), tendo sido, para esse efeito, construído um modelo em elementos finitos de relevância estrutural tão próxima quanto possível da do autocarro urbano real, em estudo.

Com base nos resultados do cálculo pelo MEF, para uma situação de solicitação estática bem definida e considerada crítica para o dimensionamento de estruturas de autocarros, procederam-se a acções de melhoria da resistência estrutural.

Prevê-se que, o trabalho realizado, para além de ter permitido a melhoria da qualidade do produto facilite a execução de futuros estudos nos mesmos ou noutros horizontes de estudo.

## **Agradecimentos**

Agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à empresa CaetanoBus que, por mútuo acordo, criaram a possibilidade de realizar este estágio.

Manifesto o maior apreço às personalidades de papel fundatório e de acompanhamento neste projecto, daí o meu grande agradecimento aos engenheiros supervisores, Paulo Tavares de Castro e Carlos Reis Gomes, e aos engenheiros orientadores, Mário Dias Filipe Fernandes e Argemiro Walgode.

Agradeço o acolhimento hospitaleiro de todo o pessoal da CaetanoBus, em particular do pessoal do Departamento de Projecto, no qual as actividades do estágio se enquadraram.

Agradeço em especial, ao orientador do projecto Eng<sup>o</sup> Mário Dias Filipe Fernandes, pelo seu apoio, dedicação e contribuição para o sucesso do mesmo.

Resta-me agradecer ao programa PRODEPIII pelo financiamento deste estágio curricular.

## **Índice de Conteúdos**

1. Introdução .....	5
2. Apresentação da empresa .....	6
3. Fluxo de informação da Concepção e Desenvolvimento .....	8
3.1 Especificação descritiva do produto .....	8
3.2 Concepção e Desenvolvimento .....	9
4. Análise pelo Método dos Elementos Finitos.....	12
4.1 Finalidades da análise pelo Método dos Elementos Finitos.....	12
4.2. O Software MEF StressLab .....	12
4.2.1 Definição do modelo .....	13
4.2.2 Aplicação de cargas e ligações ao exterior.....	19
4.2.3 Cálculo e Pós Processamento .....	20
4.3 Abordagem do problema .....	22
4.3.1 Modelação do Chassis.....	23
4.3.2 Modelação dos grupos estruturais da carroçaria .....	28
4.3.3 Validação do modelo geral.....	47
4.4 Solicitações e restrições sobre o modelo estrutural.....	48
4.5 Análise e discussão de resultados .....	51
4.5.1 Metodologia aplicada.....	51
4.5.2 Considerações complementares sobre o cálculo.....	52
4.5.3 Acções de melhoria .....	53
4.6 Outros estudos possíveis.....	64
5 Conclusões.....	65
Lista de Acrónimos e Conceitos.....	66
Lista de Referencias.....	67
ANEXO A: Lista de Tensões instaladas antes das acções de melhoria.....	68
ANEXO B: Lista de Tensões instaladas depois das acções de melhoria .....	69

## **1. Introdução**

Este relatório diz respeito às actividades desenvolvidas no Departamento de Projecto da empresa CaetanoBus – Fabricação de Carroçarias S.A., no âmbito da disciplina Projecto de Fim de Curso integrada no 5º ano da Licenciatura em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

As actividades aqui descritas visam atingir os objectivos que haviam sido, previamente, estipulados por acordo entre a empresa CaetanoBus e a faculdade FEUP. Estas foram desenvolvidas sob supervisão dos engenheiros: Carlos Reis Gomes e Paulo Tavares de Castro, por parte da FEUP, bem como com a orientação do engenheiro Mário Filipe Dias Fernandes da empresa CaetanoBus.

A realização de um estágio curricular visa uma formação dual quer pela realização de um projecto de interesse académico, quer pela experiência de vivência num meio profissional.

Entende-se como objectivos deste estágio o conhecimento da realidade organizacional de uma empresa e da estrutura de trabalho de um gabinete de projecto e o envolvimento funcional nos trabalhos de projecto em curso. O projecto proposto a ser desenvolvido visa a realização de um estudo de optimização da estrutura de um autocarro urbano em produção na CaetanoBus.

Foi minha preocupação aplicar, de uma maneira adequada, os conhecimentos apreendidos na Universidade, mas também com o cuidado de não realizar um estudo demasiado teórico, e sim um estudo concreto inserido na realidade da empresa que fosse ao encontro das suas verdadeiras necessidades.

## 2. Apresentação da empresa

A empresa CaetanoBus - Fabricação de Carroçarias SA, é uma empresa dedicada ao fabrico de carroçarias de autocarros, fundada em Janeiro de 2002, fruto duma parceria entre o Grupo SALVADOR CAETANO e o Grupo DAIMLER CHRYSLER, que nela participam através das suas representadas SALTANO SGPS e EVOBUS PORTUGAL com 74% e 26% respectivamente do capital social de 6 milhões de euros.

A CaetanoBus sendo uma empresa nova, é contudo uma empresa experiente com um “know-how” importante, adquirido ao longo de mais 50 anos de actividade desenvolvida na Divisão Fabril Gaia, do Grupo SALVADOR CAETANO.



Figura. Instalações da empresa CaetanoBus

A Área ocupada pela fábrica é de 150.000 m<sup>2</sup> sendo 50.000 m<sup>2</sup> cobertos, os quais na sua maioria dizem respeito à área de montagem. Esta área dispõe-se em 5 naves principais, sendo duas de Montagem, uma de Pintura, uma de Acabamentos e finalmente uma de Retoques Finais para entrega aos Clientes. Existem ainda os armazéns de peças, materiais, tintas e dos comerciais pós-venda e kit's de componentes para Marrocos.

Neste momento a CAETANOBUS produz carroçarias de autocarros (urbanos, suburbanos, de turismo e de aeroporto). A área de produção compreende três linhas de montagem. Numa delas são montadas as carroçarias para serviço de aeroporto e nas outras duas são montados os outros tipos de autocarros. As carroçarias são montadas sobre chassis de diversas marcas que são escolhidas pelos clientes. Essas carroçarias são realizadas com peças executadas quase na totalidade por fornecedores externos.

As actividades desenvolvidas no âmbito deste estágio enquadram-se, no Departamento de Projecto (DGE). O Sector Técnico de Projecto para além de desenvolver toda a definição das carroçarias produzidas internamente projecta também carroçarias para

mini-autocarros sobre o chassis Toyota, sendo estas produzidas na Divisão Fabril de Ovar da empresa Salvador Caetano.

A estrutura organizacional e hierárquica da empresa pode ser reconstituída de acordo com o seguinte esquema:

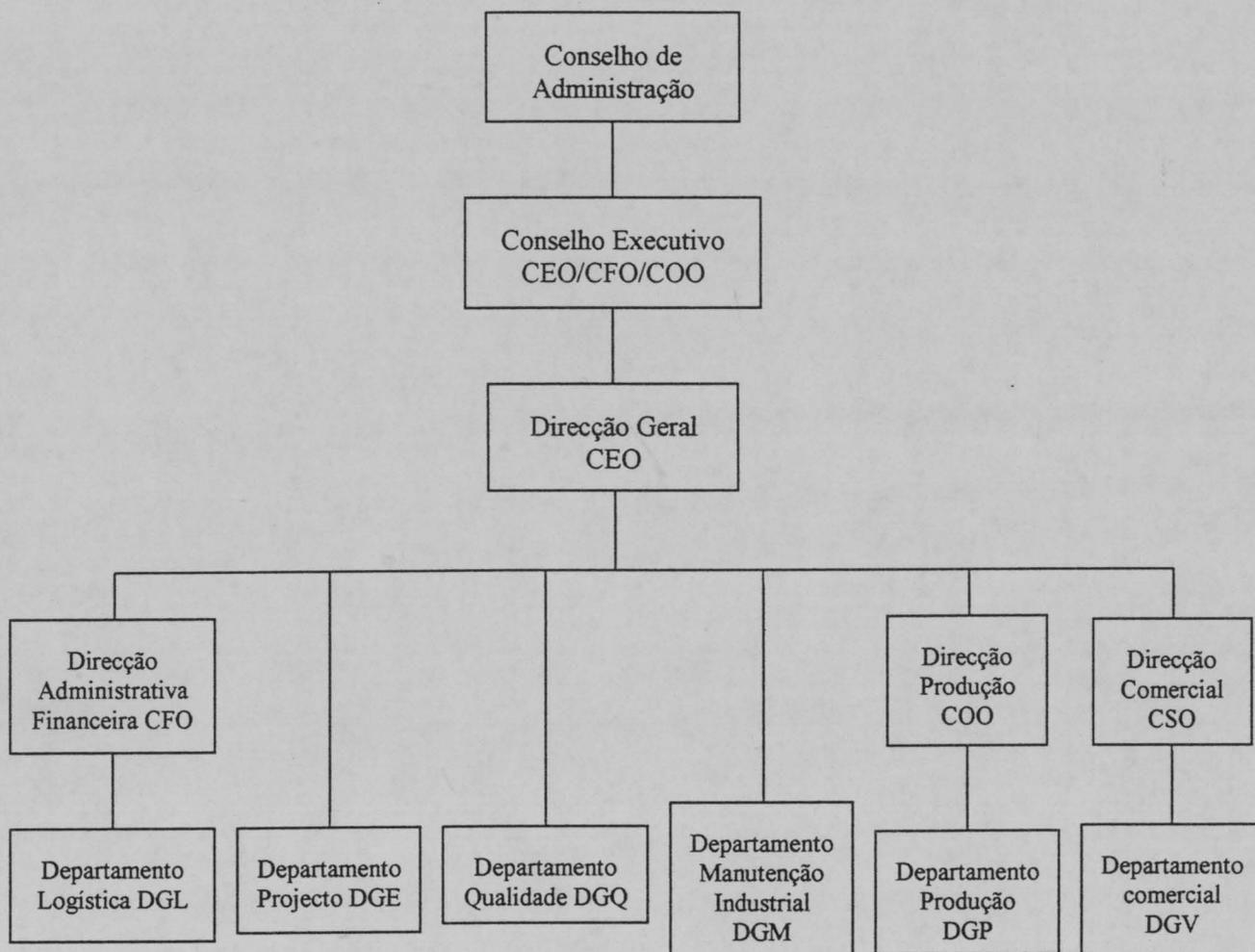


Figura. Estrutura organizativa e hierárquica da empresa CaetanoBus

### 3. Fluxo de informação da Concepção e Desenvolvimento

#### 3.1 Especificação descritiva do produto

A especificação descritiva do produto é um documento de texto, no qual se encontra definido, de um modo discriminativo, os componentes e particularidades do produto.

Da parte do cliente, são definidos requisitos gerais do produto, como por exemplo: o autocarro deve possuir um pavimento da cor *xpto*, feito no material *ypto*, ou então, pode mesmo definir com maior rigor certas particularidades do autocarro, como por exemplo: o autocarro deve possuir uma lotação de *n* lugares, em que *ns* são lugares sentados e os restantes são pé.

A outra parte que intervém, ao par dos requisitos definidos pelo cliente, é a área comercial. A área comercial, tendo por base critérios comerciais (que compreendem fins lucrativos, aceitação do produto, jogos de mercados, etc), define requisitos que são incorporados na especificação descritiva do produto.

Estes requisitos definidos por parte do cliente e da área comercial são a primeira achega para a constituição da chamada especificação descritiva do produto. Existem características diversas não discriminadas, que serão definidas aquando da Concepção. Essa complementação da especificação descritiva do produto é susceptível de aceitação quer por parte do Cliente, quer pela Área Comercial.

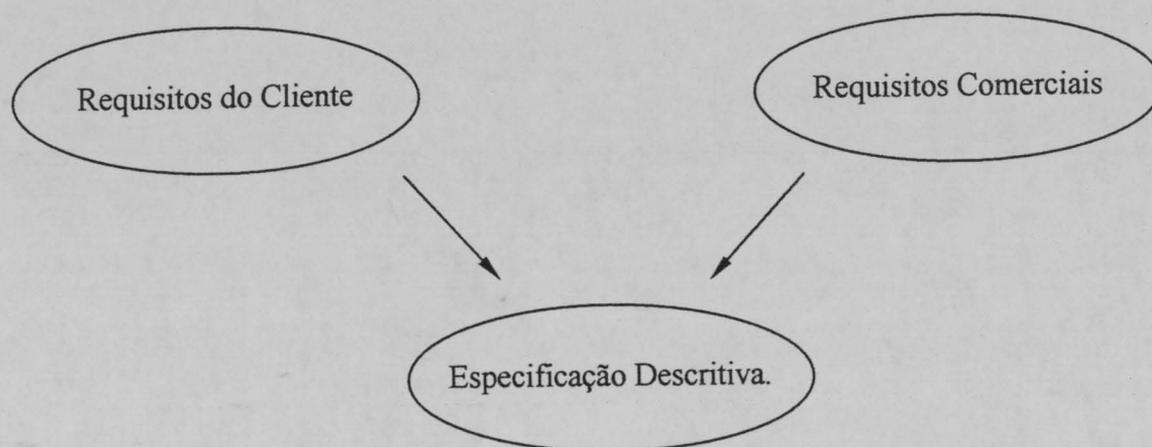


Figura. Definição do produto através da especificação descritiva

Uma vez constituída, a especificação descritiva do produto tem múltiplas utilidades:

- Serve de linha de orientação para as actividades de Concepção e Desenvolvimento.
- Permite identificar os equipamentos de elevados prazos de entrega, cuja encomenda não pode esperar pelo seu lançamento em lista (a incorporação na lista técnica poderia ocorrer após a data conveniente para a encomenda).
- Serve de referência para o controlo da conformidade da concepção, do fabrico e do produto final.

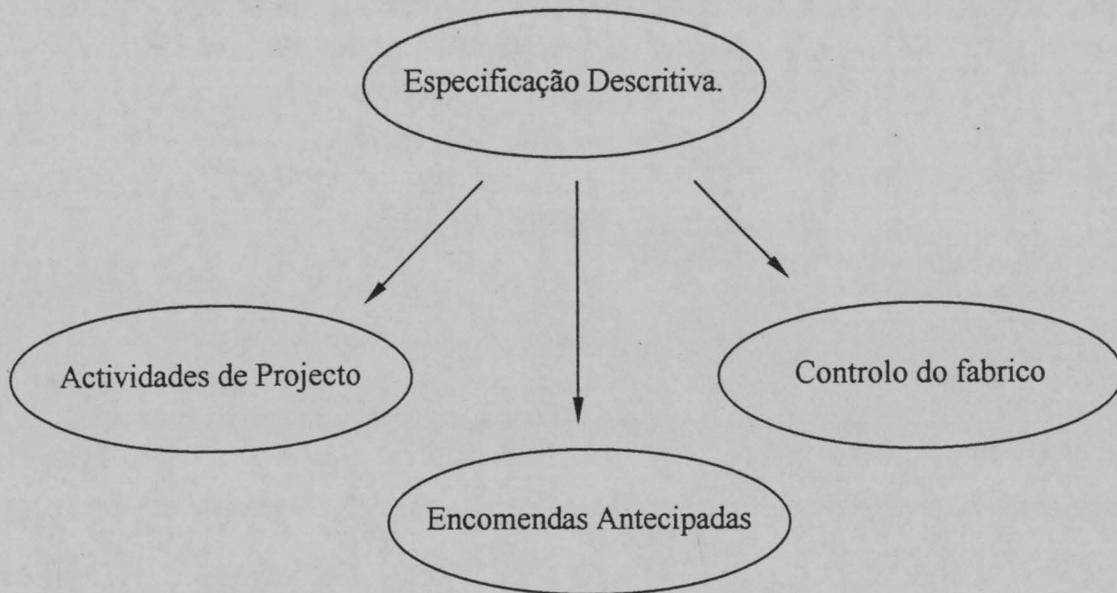


Figura. Áreas de influência da Especificação Descritiva do produto

### 3.2 Concepção e Desenvolvimento

A Concepção é o acto de idealizar soluções que satisfaçam todos requisitos. A Concepção pode passar pelo recurso a tecnologia de desenvolvimento do produto CAD3D, ou mesmo software de cálculo estrutural.

O acto de Desenvolvimento corresponde à transformação da Concepção em informação de suporte à concretização do projecto (desenhos, listas técnicas e instruções técnicas).

Para além dos requisitos definidos na especificação descritiva, existem outros, igualmente relevantes para as acções de Concepção e Desenvolvimento:

- Instruções técnicas dos fornecedores de equipamentos (é necessário obedecer aos requisitos dos componentes incorporados).
- Normas técnicas e legislação aplicável.
- Pareceres externos (os outros departamentos, ou mesmo entidades externas contribuem com informação que pode ser do tipo limitativa, ou então sugestões de melhorias).
- Ficheiro de melhorias (registo de melhorias possíveis associadas a produtos anteriores).
- Limitações de Fabricação (a área de produção influencia directa e indirectamente a Concepção, dado que esta deve ser idealizada tendo em conta a sua exequibilidade de acordo com os meios existentes na área de produção).

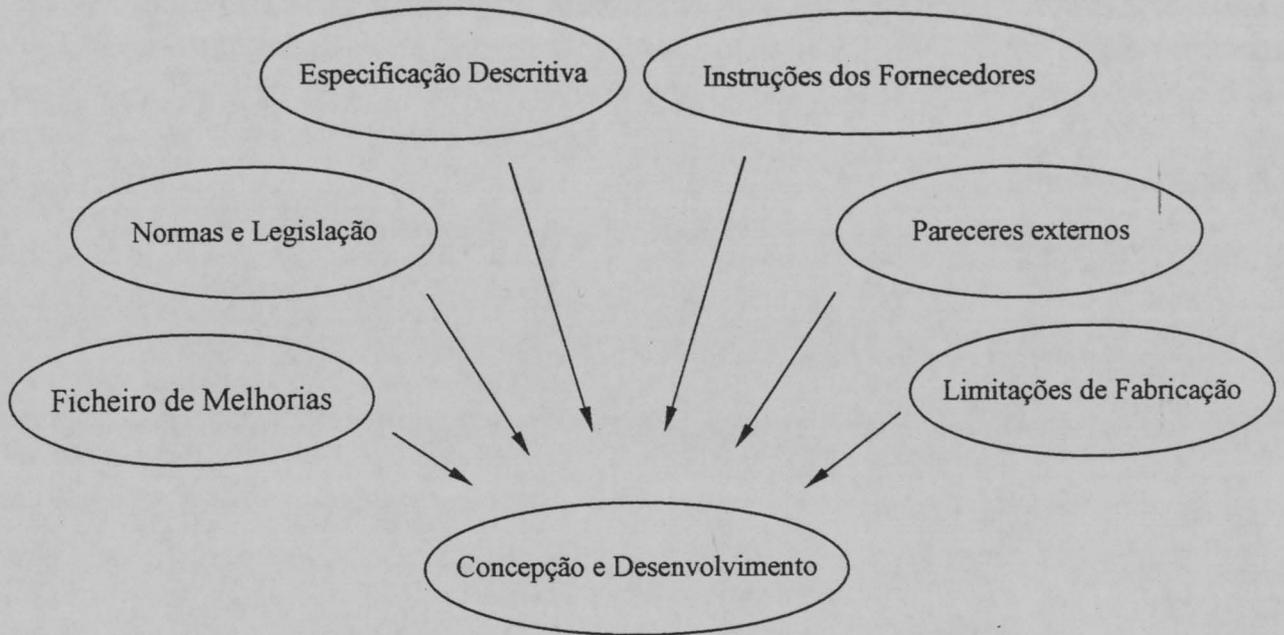


Figura. Entidades intervenientes com informação relevante para a Concepção e Desenvolvimento

As acções de Concepção e Desenvolvimento, levadas a cabo no Departamento de projecto visam a criação de um suporte à concretização do projecto. Essas acções passam pela:

- ✧ Selecção de equipamentos, a sua incorporação em listas técnicas, e em desenhos que não os de definição, e complementação da especificação descritiva do produto.
- ✧ Definição funcional e geométrica de peças. Esta acção pressupõem a elaboração de desenhos, listas técnicas e instruções de fabrico.

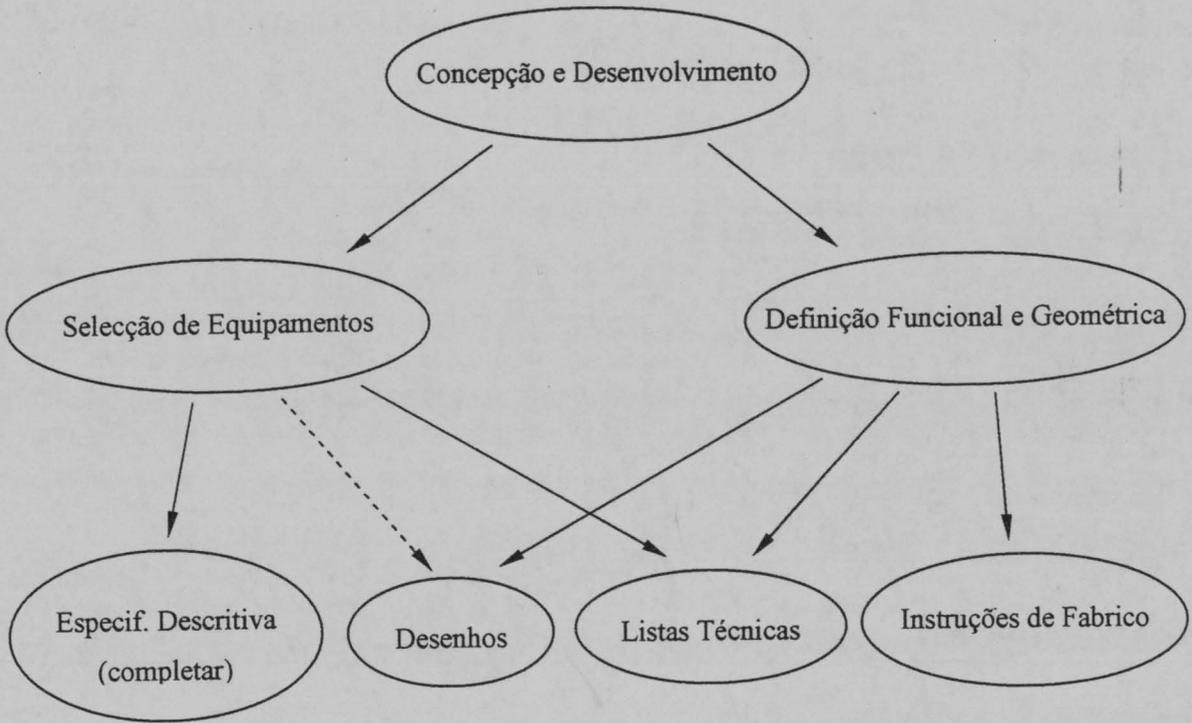


Figura. Principais acções levadas a cabo no Departamento de Projecto

## **4. Análise pelo Método dos Elementos Finitos**

A análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma actividade de auxílio à definição dos componentes. O recurso a este tipo de análise é feito para estudar a aplicação de soluções de projecto não experimentadas.

Foi sobre o estudo da estrutura de um autocarro, por este método, que incidiu, essencialmente, o âmbito do estágio.

### **4.1 Finalidades da análise pelo Método dos Elementos Finitos**

O Departamento de Projecto da CaetanoBus possui um grande “know-how”, na Concepção e Desenvolvimento de carroçarias de autocarros, fruto de longos anos de experiência nesta actividade. Deste modo a concepção de um novo autocarro, a nível de projecto, é conseguido pela evolução de projectos de produtos similares.

O cálculo estrutural pelo MEF torna-se relevante quando aparecem novas soluções de projecto (não experimentadas) e para a comprovação pontual de projectos com histórico de ocorrências, como é o caso dos autocarros urbanos para o mercado nacional.

Pela análise, pelo MEF, pretende-se identificar os elementos mais solicitados, não só com vista à realização de acções de melhoria e manutenção, como também para enriquecer o “know-how” de projecto, podendo influenciar a execução de futuros projectos. A análise pelo MEF permite também fazer estudos de redução de peso na estrutura do autocarro, pela identificação dos elementos menos solicitados susceptíveis de reduções de secção.

### **4.2. O Software MEF StressLab**

A ferramenta informática StressLab é um programa de aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) em regime elástico, e que usa como plataforma o software de computação gráfica Cadds5.

Este programa possui uma evoluída interface gráfica, que facilita esforço de introdução de dados e parâmetros, essenciais ao cálculo MEF. Isto trás vantagens também pela espectacularidade, porém leva a um estado de cegueira nomeadamente, na percepção do correcto tratamento de variáveis e da concordância entre os valores efectivos e a sua visualização gráfica. Na aplicação do programa foi por isso adoptada uma atitude cautelosa, importante não só para eliminar erros e identificar insuficiências, como também para estudar potencialidades.

O StressLab efectua uma aplicação do MEF abrangendo as diversas áreas de interesse:

- ✧ Modelação de estruturas 2D;
- ✧ Modelação de estruturas 3D;
- ✧ Modelação de corpos sólidos;

Para isso o StressLab dispõe de diversos tipos de elementos finitos:

- ◇ Elementos Barra (tração e compressão simples);
- ◇ Elementos Viga (6 graus de liberdade em cada nó);
- ◇ Elementos Mola;
- ◇ Elementos para estados planos de tensão ou de deformação;
- ◇ Elementos de Volume hexaédricos ou tetraédricos;
- ◇ Elementos de Volume axissimétricos;
- ◇ Elementos para flexão de placas (thin shell);

Paralelamente ao cálculo pelo MEF, para determinação dos deslocamentos dos nós, o StressLab permite ainda a execução do cálculo aproximado das frequências e formas naturais de vibração.

O StressLab possui diferentes menus correspondentes às diferentes fases da análise. Assim, existe um menu destinado à definição do modelo (“Model Prep”), outro à definição das cargas e restrições que actuam sobre o modelo (“Loads & Const”), e um terceiro destinado ao cálculo e à visualização dos resultados (“Results”).

De seguida é apresentado o modo de definir os principais parâmetros necessários para a resolução de um problema recorrendo ao MEF.

#### *4.2.1 Definição do modelo*

##### *4.2.1.1 Definição dos materiais*

Na definição das propriedades do material deve ser especificado o nome do material, a massa volúmica, o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o módulo de Young ( $E$ ). O módulo ao corte ( $G$ ) é automaticamente calculado, atendendo à seguinte relação:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad [1]$$

Também é possível definir o coeficiente de expansão térmica do material, necessário aquando da resolução de problemas de índole térmica.



Figura. Definição das propriedades de um material no menu MODEL PREP do StressLab

#### 4.2.1.2 Definição de propriedades físicas

Outros parâmetros necessários na fase de pré-processamento são os relativos às propriedades físicas dos elementos. Estas propriedades dependem do tipo de elemento finito em causa e derivam da geometria da secção.

Esta fase de definição de propriedades físicas, traduz-se, em termos práticos, no preenchimento de tabelas onde, por tipo de elemento, se registam as características técnicas dos diferentes componentes resistentes.



Figura. Primeiro passo na definição das propriedades físicas de um elemento viga

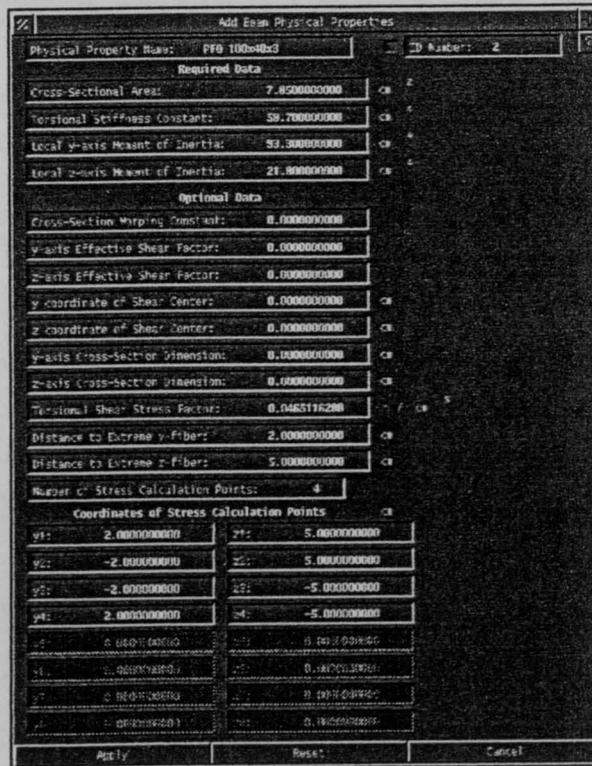


Figura. Segundo passo na definição das propriedades físicas de um elemento viga

Uma vez que um dos esforços predominantes, na solicitação dos elementos viga, é a flexão combinada torna-se necessário definir os pontos da secção da viga para os quais devem ser obtidos resultados. Para este efeito optou-se por seleccionar os pontos mais afastados da fibra neutra, situados em cada um dos quadrantes.

Outro esforço eventualmente relevante é o de torção. Os pontos correspondentes aos valores máximos das tensões de corte devidas à torção, não coincidem normalmente com os anteriores. No entanto, para evitar uma superabundância de resultados, optou-se por considerar serem coincidentes. Na eventualidade das tensões devidas à torção serem elevadas poder-se-á sempre acrescentar pontos de cálculo suplementares.

As coordenadas dos pontos de cálculo das tensões são relativas ao referencial ortogonal local, que apresenta as seguintes características:

- ◇ O eixo dos  $x$  é coincidente com o vector que une o primeiro ao segundo nó do elemento de viga;
- ◇ A orientação dos eixos  $y$  e  $z$ , que definem o plano da secção resistente, é identificada graficamente pela presença da letra  $z$  junto ao semi-eixo positivo do eixo dos  $z$  (ver figura).

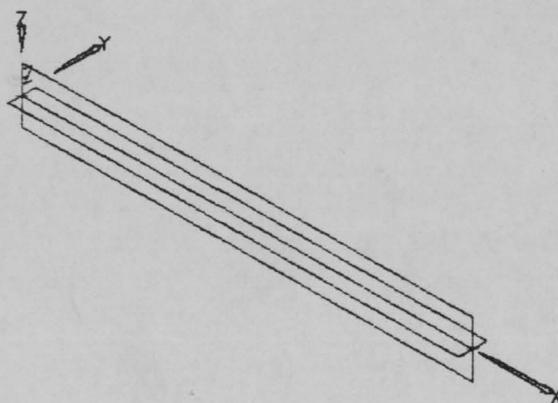


Figura. Referencial local de um elemento viga

#### 4.2.1.3 Construção do modelo

A definição da geometria global da estrutura corresponde à representação das linhas neutras, dos elementos viga, e aos contornos, dos elementos placa, unindo os nós de intersecção respectivos.

As ligações entre dois perfis resistentes, que se cruzam, é concebida, no modelo, por ligações ao nível das fibras neutras. Isto leva à construção de um modelo com a ligação entre elementos num único nó, o que raramente é verdade. Leva também à consideração de um pequeno comprimento de elemento inexistente.

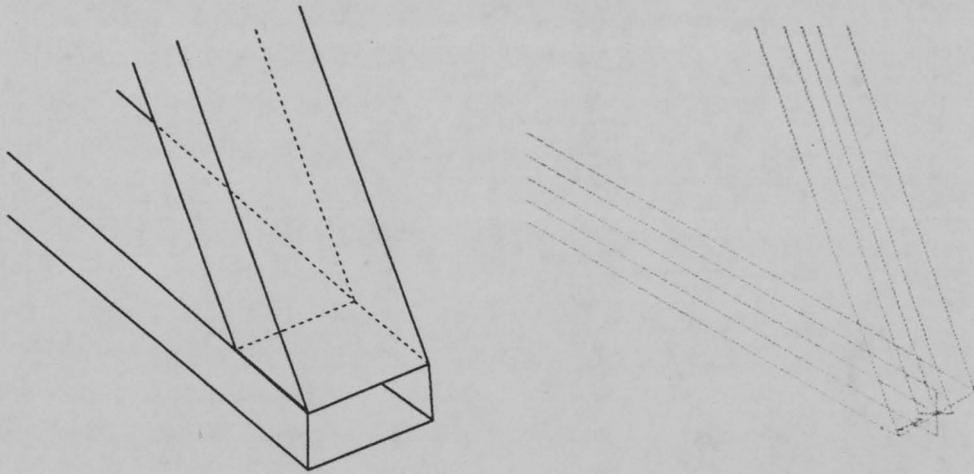


Figura. Representação pelo MEF de uma ligação entre dois perfis tubulares num único nó

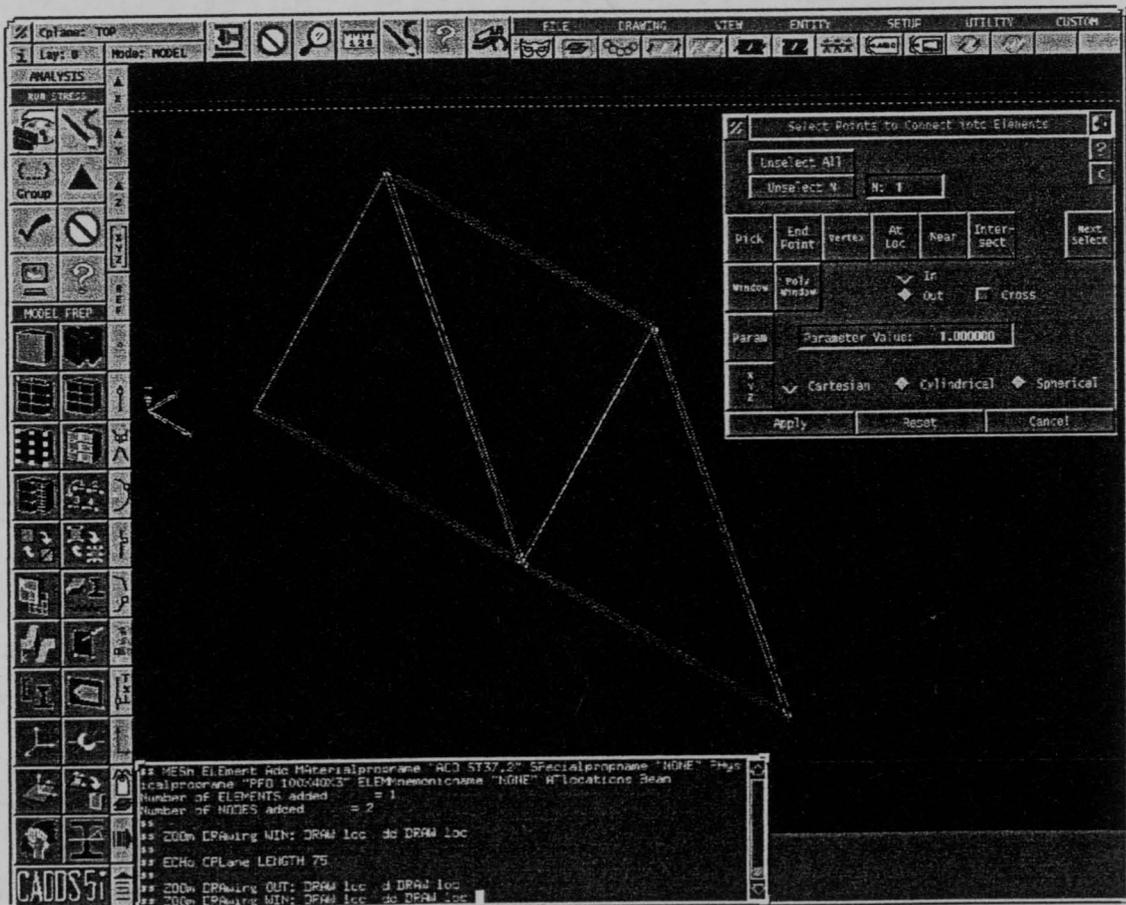


Figura. Estrutura exemplo, constituída por elementos de viga lineares (de dois nós), de secção resistente PFO100x40x3, e em aço St37.2.

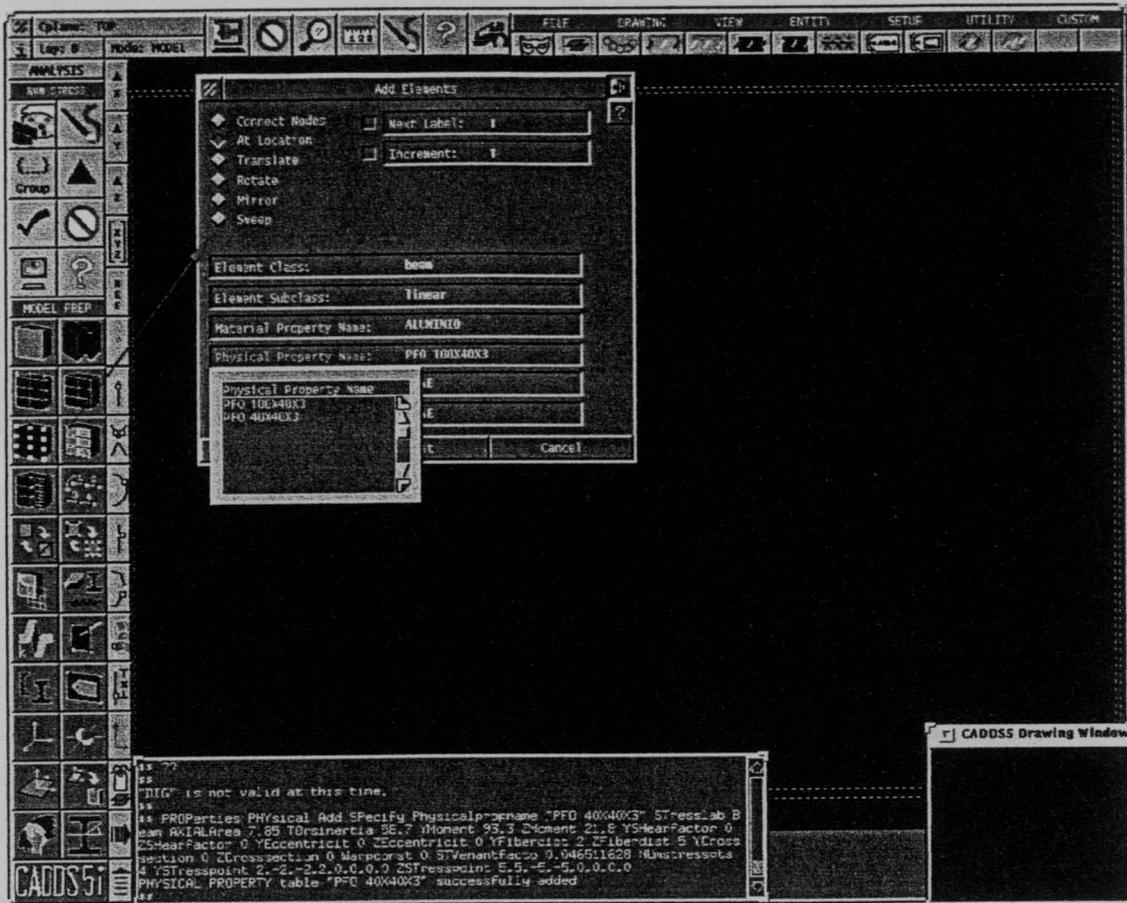


Figura. Atribuição das propriedades a cada elemento

A cada elemento definido são atribuídas, no acto da criação, as propriedades materiais e as propriedades físicas já definidas.

Como as propriedades físicas da secção resistente estão associadas aos eixos referencial local, a orientação destes, que o programa atribui por defeito, poderá ter de ser corrigida (ver figura seguinte).

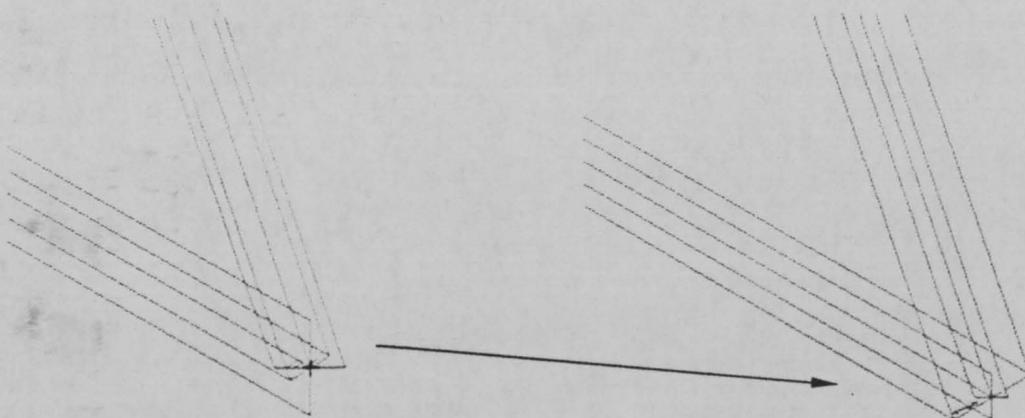


Figura. Alteração da orientação dos referenciais locais dos elementos de viga, provocando uma rotação de 90°

Antes de se poder considerar o trabalho de modelação definido é necessário proceder a uma série de verificações de conformidade relativa nomeadamente à coincidência de elementos ou nós, e anomalias de forma de elementos placa.

#### 4.2.2 Aplicação de cargas e ligações ao exterior

No menu “Loads & Const” existe a possibilidade de definir diversos tipos de cargas e restrições actuantes sobre o modelo.

As cargas relevantes, que actuam sobre a estrutura de um autocarro, são as cargas distribuídas por acção do peso próprio das vigas mais as cargas concentradas relativas aos pesos dos componentes não estruturais, como o relativo aos bancos elementos de revestimento e ainda os passageiros.

A simulação da carga, devida ao peso próprio das vigas consegue-se, pela aplicação de uma aceleração positiva na direcção vertical.

As ligações ao exterior são definidas pela aplicação de restrições aos graus de liberdade de alguns nós da estrutura. Deve-se ter o cuidado de definir uma estrutura com um grau de hiperstaticidade igual ou superior a zero, caso contrário o cálculo não é efectuado.

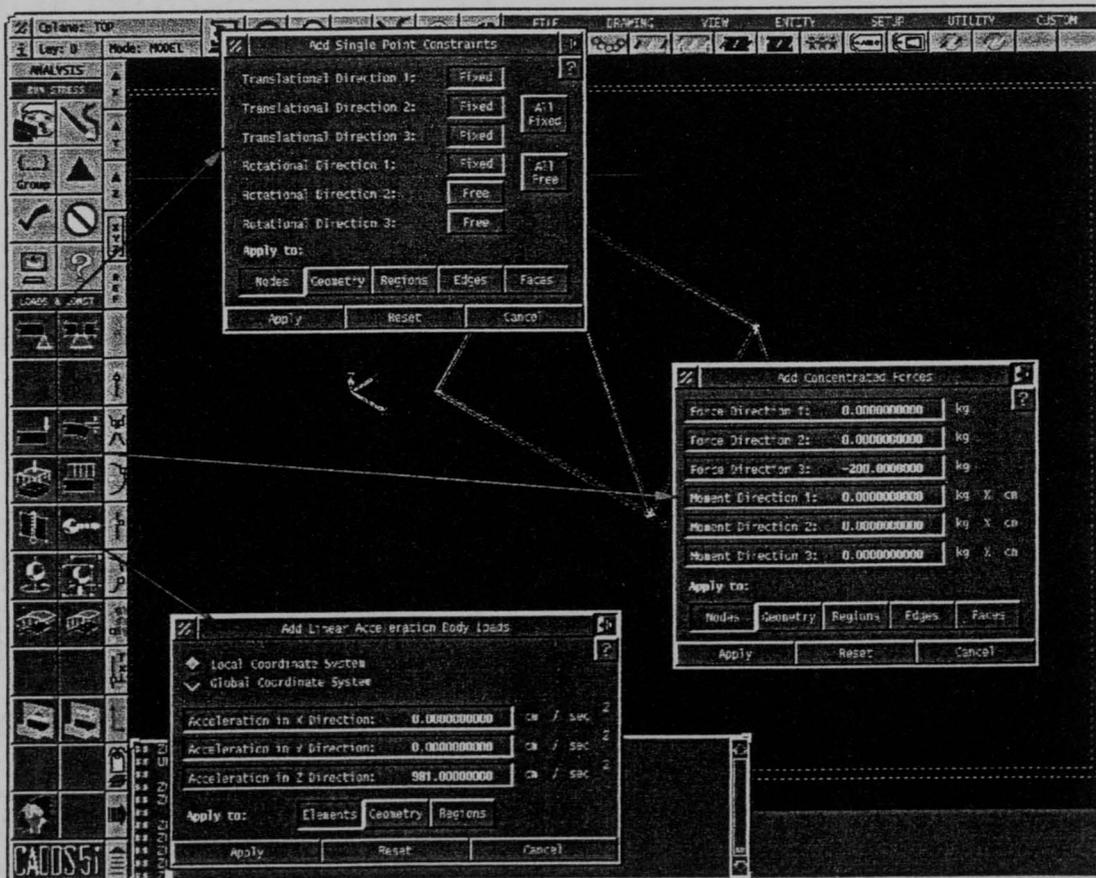


Figura. Menu geral de definição de cargas e de restrições, com exemplo de definição de uma carga concentrada, aplicação de aceleração sobre a estrutura e definição de uma ligação ao exterior.

Após a definição das cargas e das ligações ao exterior a que o modelo está sujeito, este apresenta o seguinte grafismo:

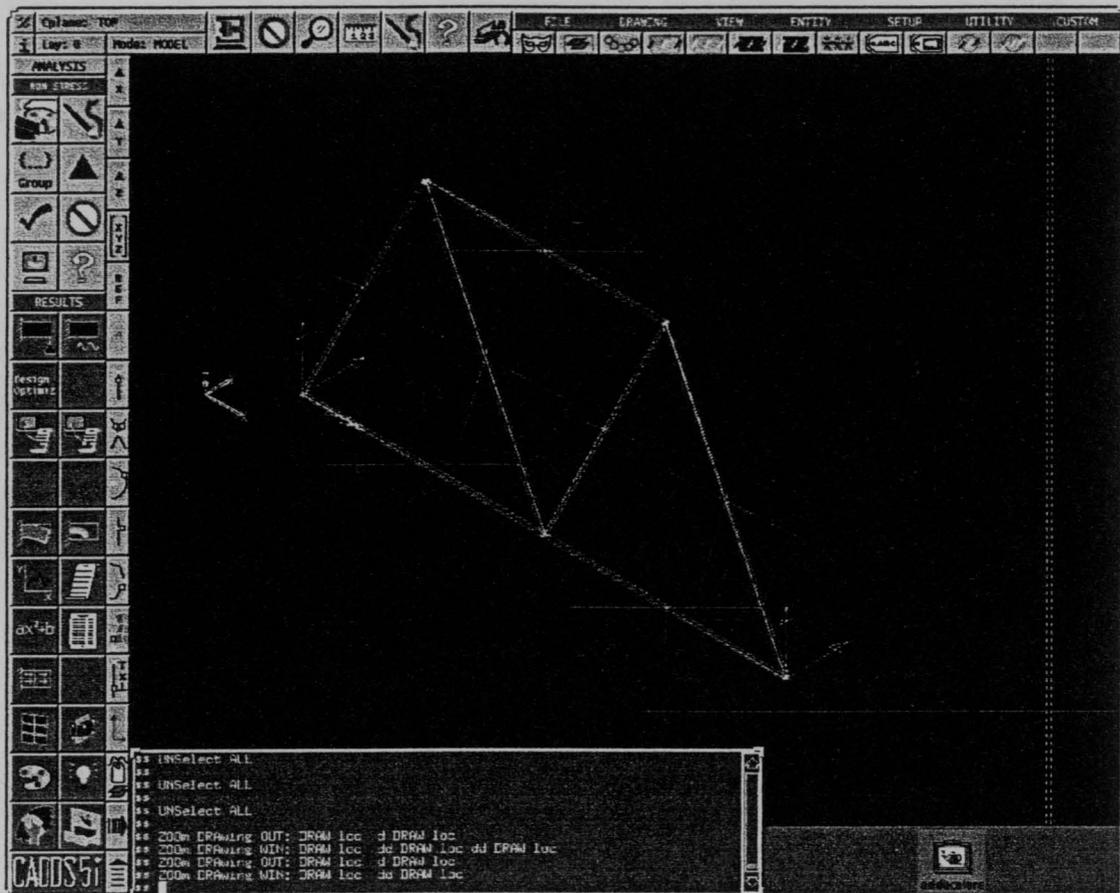


Figura. Menu geral de resultados activo e aspecto do modelo após aplicação de cargas pontuais (a azul), cargas de aceleração (a verde) e restrições (a amarelo).

#### 4.2.3 Cálculo e Pós Processamento

Com a fase de pré-processamento completa, é então possível fazer correr o processo de cálculo (menu “RESULTS”). O processo de cálculo é iniciado definindo o tipo de cálculo a efectuar (estático ou dinâmico), o tipo de resultados a obter e os casos de carga e de restrição a considerar. Se o processo de cálculo correr normalmente os resultados ficarão disponíveis para consulta.

A consulta dos resultados pode ser feita na forma de tabela e na forma gráfica por tipo de resultado (deslocamentos, deformações, esforços, tensões, etc).

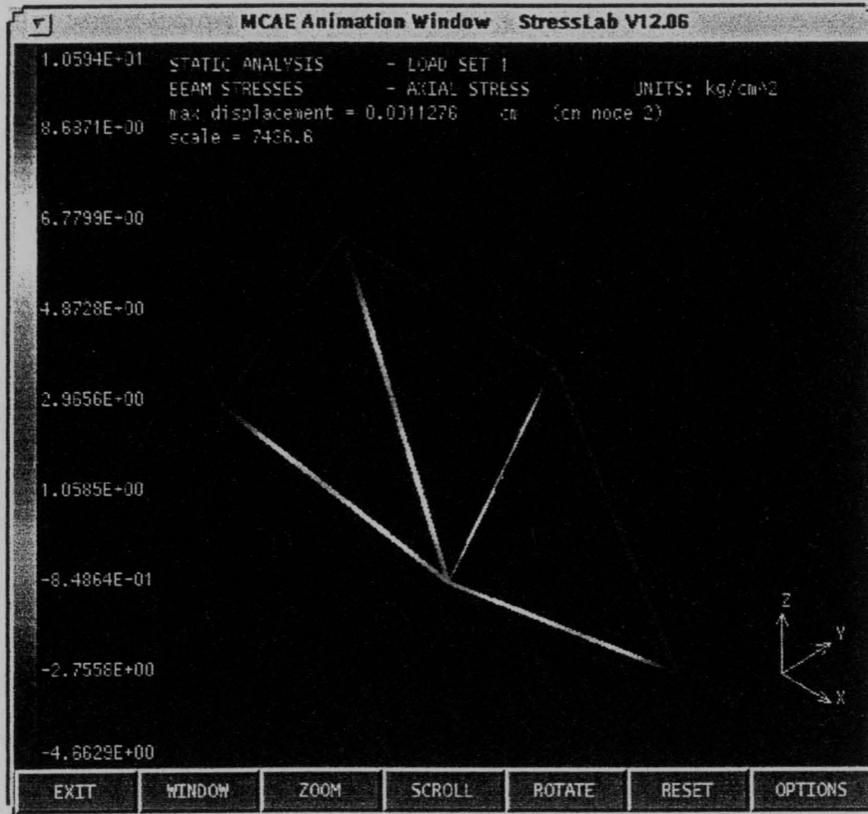


Figura. Visualização gráfica da distribuição de tensões axiais.

Convém referir que a apresentação de resultados na forma gráfica se revelou pouco útil, porque o grande número de elementos da estrutura torna confusa a apreciação individual dos resultados, mesmo com a ajuda dos campos de cores. Além disso, por limitações do sistema, não é efectuado o cálculo da tensão equivalente global, que seria o resultado mais útil para uma primeira apreciação.

Para o cálculo desta tensão equivalente, optou-se pelo tratamento dos resultados parciais em folha de cálculo Excel.

### **4.3 Abordagem do problema**

Os autocarros produzidos na CaetanoBus são constituídos por uma parte metálica (em aço ou alumínio) que constitui o principal elemento resistente e corresponde, para o caso de um autocarro urbano, a cerca 45% do peso bruto total (da ordem dos 17000 Kg, para veículos de 12 m).

É essencialmente sobre o comportamento estrutural desta parte, no caso de um autocarro com estrutura em aço de construção, que incide o estudo aqui descrito.

A estrutura resistente de um autocarro é constituída por dois módulos distintos, a correspondente ao chassis e a correspondente à carroçaria. O chassis é um produto comprado ao exterior sobre o qual a informação necessária para a construção de um modelo pelo MEF é quase sempre incompleta. A estrutura da carroçaria, cujo projecto é desenvolvido no DGE, compreende o estrado, os painéis laterais, a frente, a traseira e o tejadilho.

Esta estrutura é fundamentalmente constituída por perfis tubulares (rectangulares ou quadrados) e blindagens em chapa. Estes elementos resistentes são ligados pelo processo de soldadura automático MIG (Mass Inert Gas).

Existem outros componentes que contribuem de um modo não desprezável para a rigidez global do veículo, como sejam os vidros e os revestimentos exteriores (metálicos ou em PRFV) do tejadilho e laterais.

Existem outros componentes que poderiam ser considerados na estrutura resistente, mas que por possuírem módulo de elasticidade demasiado baixo (como por exemplo a madeira), ou por estarem ligados ao resto da estrutura de um modo deficiente (como é o caso das ligações rebitadas), só a sua massa tem relevância no comportamento do autocarro.

Para além das cargas relativas aos pesos destes componentes não estruturais, existirão cargas relativas a pesos ocasionais. Estes pesos correspondem, nomeadamente a passageiros e bagagens.

A descarga por eixo é limitada tecnicamente segundo as características específicas de cada chassis, a um máximo de cerca de 7000 Kg para rodado simples e de 12000 Kg para rodado duplo.

Para a modelação pelo MEF desta estrutura optou-se pela estratégia de modelar os vários componentes referidos, de forma sequencial, começando pelo chassis.

A modelação independente da estrutura do chassis justifica-se quer pela sua massa quer pela importância da sua participação na resistência global. Para além destes aspectos há ainda a considerar o seu carácter independente em termos de responsabilidade de projecto. A conclusão da modelação do chassis torna-se assim um patamar, no processo de análise, que permite fazer uma primeira aferição de distribuição de massas.

A modelação individualizada dos outros grupos estruturais da carroçaria para além de ter como objectivo, permitir conhecer as respectivas distribuições de massa, decorre normalmente, do processo de consulta, da documentação estruturada de projecto.

### *4.3.1 Modelação do Chassis*

#### *4.3.1.1 Considerações gerais*

O chassis é uma parte estrutural importante do autocarro, que não é da responsabilidade da CaetanoBus. É um produto comprado ao exterior sobre o qual o fornecedor assume total responsabilidade, desde que sejam cumpridos os requisitos constantes das respectivas instruções técnicas de carroçamento. Apesar deste aspecto o seu comportamento estrutural deve ser considerado na análise pois o seu desempenho é decisivo para a qualidade final do produto.

A construção do modelo do chassis passa pelo levantamento das dimensões dos seus componentes, pelo cálculo de propriedades físicas das secções resistentes e pela estimativa dos pesos dos componentes não estruturais (por falta de dados exactos). Para se garantir que o modelo MEF simula convenientemente o chassis real, procede-se a acções de controlo e correcção. Estas acções consistem na comparação entre a distribuição de massas do modelo MEF e a conhecida do chassis real.

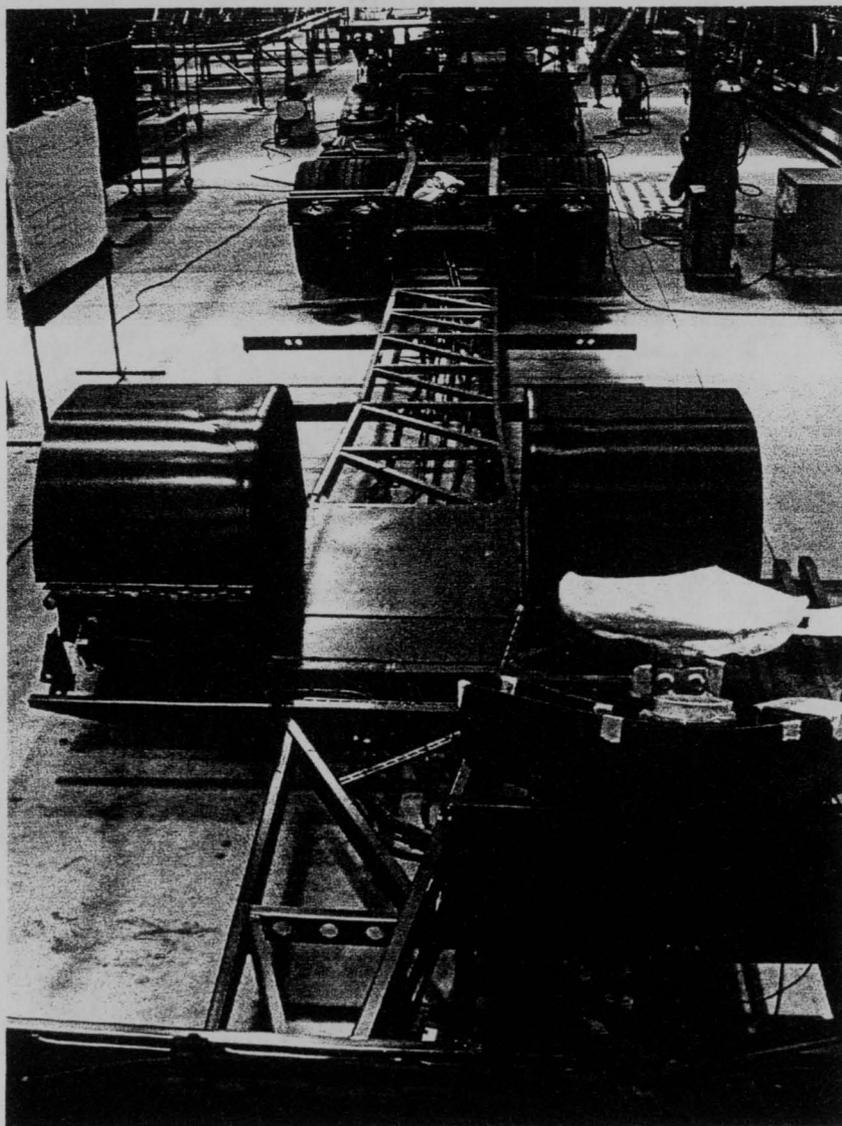


Figura. Chassis do autocarro urbano em estudo

#### 4.3.1.2 Dificuldades na modelização do Chassis:

A estrutura do chassis é maioritariamente constituída por elementos perfilados, elementos em chapa e algumas peças de forma complexa, nomeadamente, forjadas e estampadas. Como já referido, os dados necessários para a construção do modelo do chassis foram essencialmente recolhidos da estrutura real. A maior parte dos elementos resistentes possuem secções não normalizadas, pelo que as suas propriedades físicas tiveram de ser determinadas usando as ferramentas de computação gráfica do sistema Cadds5. Os valores de momento de inércia à torção e do módulo de torção foram estimados pelas relações aconselhadas pelo autor Roark (ver referência [A]) e que passo a citar:

$$I_{TOR.} = \frac{1}{3} \cdot U \cdot t^3 \qquad W_{TOR.} = \frac{U^2 \cdot t^2}{3 \cdot U + 1,8 \cdot t}$$

em que:

- ✧  $I_{TOR.}$  - Momento de Inércia à torção;
- ✧  $W_{TOR.}$  - Módulo de corte à torção;
- ✧  $U$  - Comprimento da linha média (localizada a meio da espessura);
- ✧  $t$  - Espessura do perfil;

Estas fórmulas são válidas para perfis abertos de espessura uniforme.

As peças estruturais de forma complexa foram equiparadas a elementos de secção regular de comportamento estrutural equivalente.

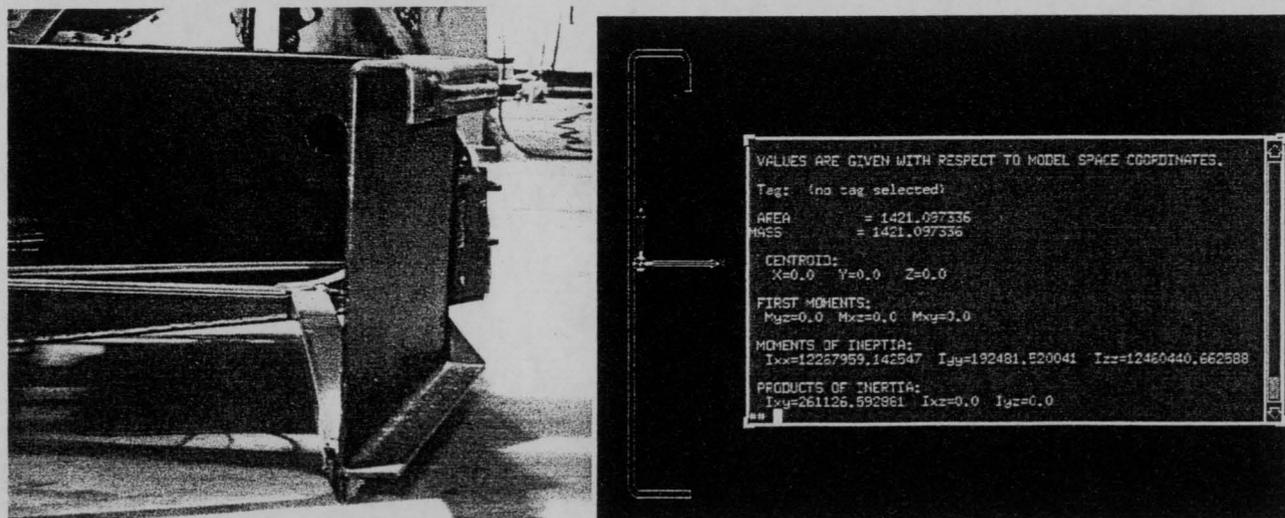


Figura. Determinação das propriedades físicas de uma secção perfil de viga.

Como referido, uma das dificuldades surgidas foi a falta de dados relativa ao peso dos componentes não estruturais, como os órgãos de direcção, o motor, o radiador, e reservatórios, entre outros. A atribuição destes pesos foi baseada em dados de componentes similares e no parecer de técnicos experimentados.

<b>Pesos (Kg)</b> <b>dos Componentes não Estruturais no chassis</b>	
Motor e Caixa de Velocidades	1200
Duas Baterias	120
Órgãos de Direcção	83
Radiador	82
Panela de Escape	40
Reservatório de combustível (vazio)	35
Reservatório de ar Comprimido (vazio)	10

Tabela. Pesos estimados para os principais componentes não estruturais no chassis

Outra das dificuldades foi de reproduzir o comportamento da suspensão. Este tema é abordado na secção seguinte.

#### 4.3.1.3 Influência e comportamento da suspensão

A suspensão é o sistema flexível que suporta, sobre a ponte de eixos (bloco mecânico apoiado sobre o solo, que inclui os eixos e as rodas), o corpo rígido principal do autocarro (que engloba o habitáculo dos passageiros). Tem como principal função garantir uma boa distribuição do peso da viatura por todos os rodados. Durante a movimentação proporciona também estabilidade dinâmica e conforto para os ocupantes.

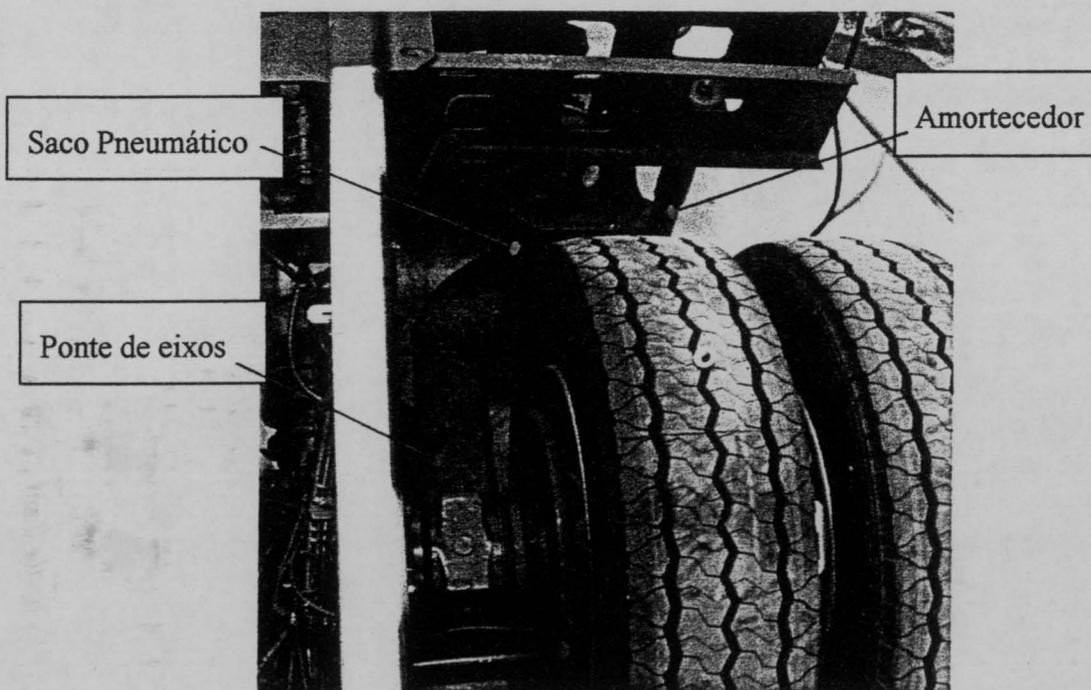


Figura. Sistema da suspensão traseira

A suspensão é essencialmente constituída por componentes que funcionam como molas (acumuladores de energia mecânica) e componentes que funcionam como amortecedores (dissipadores de energia).

No caso de suspensões pneumáticas, como no caso em estudo, o comportamento da suspensão varia consoante a velocidade de sollicitação. Para movimentos rápidos, o comportamento poder-se-á assemelhar ao de uma mola com constante elástica definida. Para movimentos mais lentos o fluxo de ar comprimido, que alimenta o saco, altera substancialmente a relação força deformação.

A simulação da suspensão real é importante nos estudos sobre o comportamento dinâmico do autocarro e nos estudos em que se pretende identificar os elementos mais sollicitados para análise de fenómenos de fadiga.

Em análises em que se pretenda a determinação dos elementos com níveis de tensão mais elevados, o cálculo estático fornece resultados razoavelmente indicativos, desde que efectuado para uma situação de carga suficientemente desfavorável, em que o comportamento da suspensão se possa considerar irrelevante.

Uma situação em que as condições atrás descritas se verificam é aquela em que por razões de desnivelamento drástico do pavimento, o veículo passa pelo estado de apoiado em apenas três rodas (as duas de trás e uma da frente) mantendo o nivelamento da plataforma dos passageiros.

Ao apoiar e estabilizar o modelo deste modo, as forças de ligação ao exterior serão perfeitamente verticais e independentes dos parâmetros característicos da suspensão.

Esta situação corresponde a um estado limite bem determinado e possível, que poderá ser tomado como referência para o cálculo. Além disso é passível de ser reproduzida na prática, para efeitos de validação do modelo.

#### 4.3.1.4 Validação do modelo do chassis

A validação do modelo do chassis consistiu em obter a concordância da descarga por roda ao solo, entre um caso de cálculo considerando o veículo apoiado nas condições de pesagem (quatro rodas apoiadas) e os dados técnicos do chassis real (constantes da tabela abaixo).

Chassis - dados técnicos	Distrib. Massas (Kg)		
	FRENTE	TRAS	TOTAL
Chassis completo:	1300	4900	6200
Massas não apoiadas na suspensão:*	513	1027	1540
Massas que apoiam na suspensão:*	787	3873	4660

(\* Valores estimados, como referido em 4.3.1.2)

Tabela. Descarga ao solo do chassis real considerada

As diferenças encontradas na descarga ao solo foram minimizadas pela correcção do peso e posicionamento dos componentes principais e pela afectação da densidade dos componentes resistentes.

Os componentes principais considerados para este efeito foram, nomeadamente, o conjunto motor - caixa de velocidades, o radiador, os reservatórios de combustível e ar comprimido e os órgãos de direcção e das pontes de eixos.

A densidade dos componentes resistentes foi sobrestimada de modo a contemplar o peso dos elementos, não estruturais, dispersos pelo chassis, tais como: os pesos da pintura, das instalações eléctrica e de ar comprimido e dos elementos de ligação.

O modelo MEF do chassis (ver figura seguinte) compreende 263 elementos do tipo viga e 190 elementos placa (seis graus de liberdade em ambos os tipos).

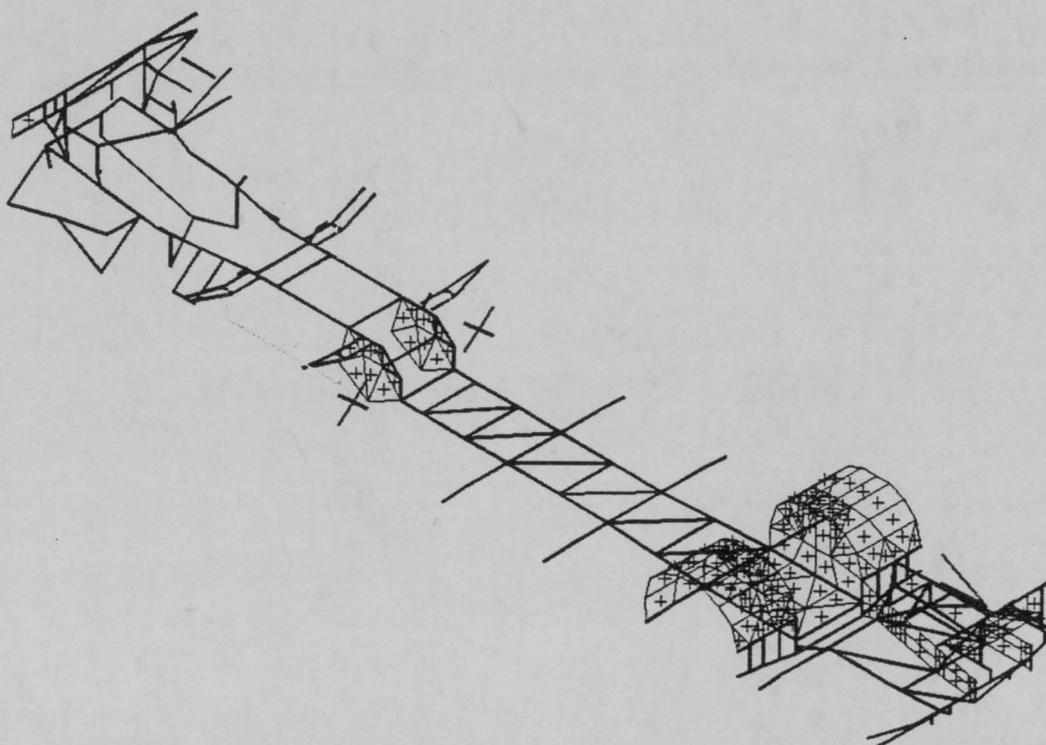


Figura. Modelo em elementos finitos relativo à estrutura do chassis

### *4.3.2 Modelação dos grupos estruturais da carroçaria*

Como já referido os grupos estruturais da carroçaria são projectados, obedecendo a requisitos do cliente, requisitos de fornecedores de equipamento, normas e legislação aplicável e ainda a compatibilidade mútua.

A construção do modelo representativo dos grupos estruturais da carroçaria baseou-se na informação de projecto disponível, nomeadamente nos desenhos e listas técnicas de fabrico respectivos, em fase de construção do protótipo.

Apesar da informação técnica não estar ainda num estado completo e final, tal situação relevou-se vantajosa porque a conciliação da informação técnica disponível com a observação da construção da estrutura real facilitou a interpretação do projecto e permitiu um contacto com detalhes que de outro modo seriam de difícil percepção.

#### *4.3.2.1 Modelação do Estrado*

O estrado do autocarro é a estrutura aplicada directamente sobre o chassis que conjuntamente com a estrutura deste constitui o corpo resistente inferior do autocarro.

Em termos estruturais estabelece também ligação com as estruturas resistentes dos painéis laterais da frente e da traseira.

Tem ainda como funções suplementares:

- ◇ Suportar o pavimento do habitáculo;
- ◇ Permitir a fixação de equipamento de conforto e segurança dos passageiros, tais como bancos e varões de amparo e, no caso de veículos de turismo e interurbanos, ainda a disponibilização de compartimentos, para outros equipamentos de conforto (órgãos de climatização, quarto de banho, cabine de dormida do motorista) e bagagens;

Como consequência, os principais condicionalismos, do projecto da estrutura do estrado, são:

- ◇ Configuração do chassis e instruções de carroçamento estabelecidas pelo fabricante do chassis;
- ◇ Legislação que dita o espaço livre mínimo para passageiros sentados (ponto 7.7.8 do Anexo I, Directiva 01/85/CE);
- ◇ Legislação que define as dimensões limite dos degraus (ponto 7.7.7 do Anexo I, Directiva 01/85/CE);
- ◇ Legislação que dita a localização dos corrimãos e pegas de amparo (ponto 7.11 do Anexo I, Directiva 01/85/CE);



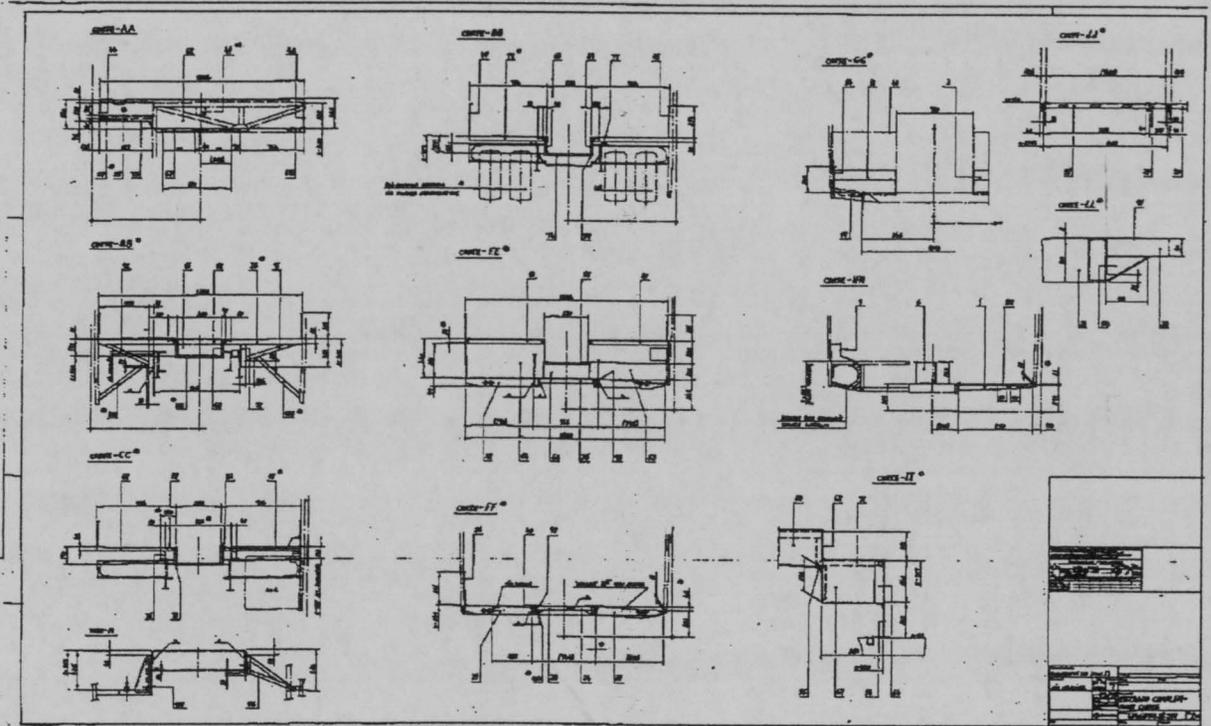


Figura. Informação suporte à modelação: representação de cortes do desenho do Estrado

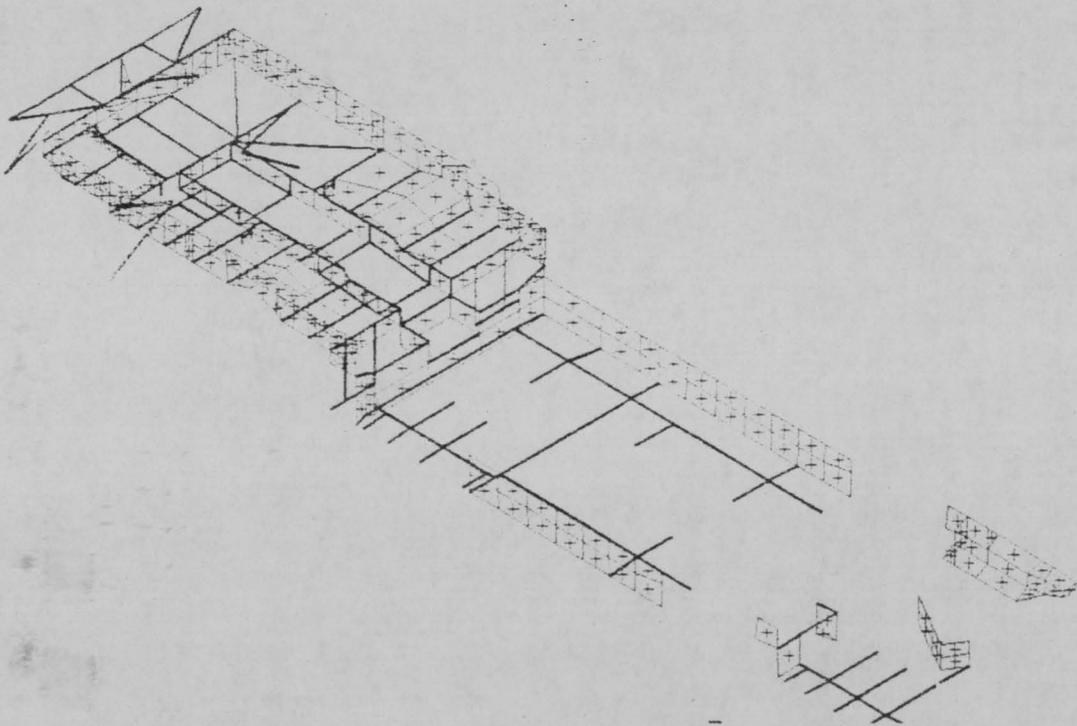


Figura. Modelo em elementos finitos relativo à estrutura do Estrado

<b>Estrado</b>		483 elementos	
<b>Rodas:</b>	<i>Fr. Esq.</i>	22	57
	<i>Fr. Dir.</i>	35	
	<i>Tras. Esq.</i>	163	319
	<i>Tras. Dir.</i>	156	
	<b>TOTAL:</b>	<b>376</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos finitos e peso do modelo do Estrado

#### 4.3.2.2 Modelação dos Painéis laterais

Os painéis laterais do autocarro são estruturas “planas” aplicadas perpendicularmente à plataforma dos passageiros, e que pela sua robustez estrutural têm um efeito importante na rigidez global do autocarro.

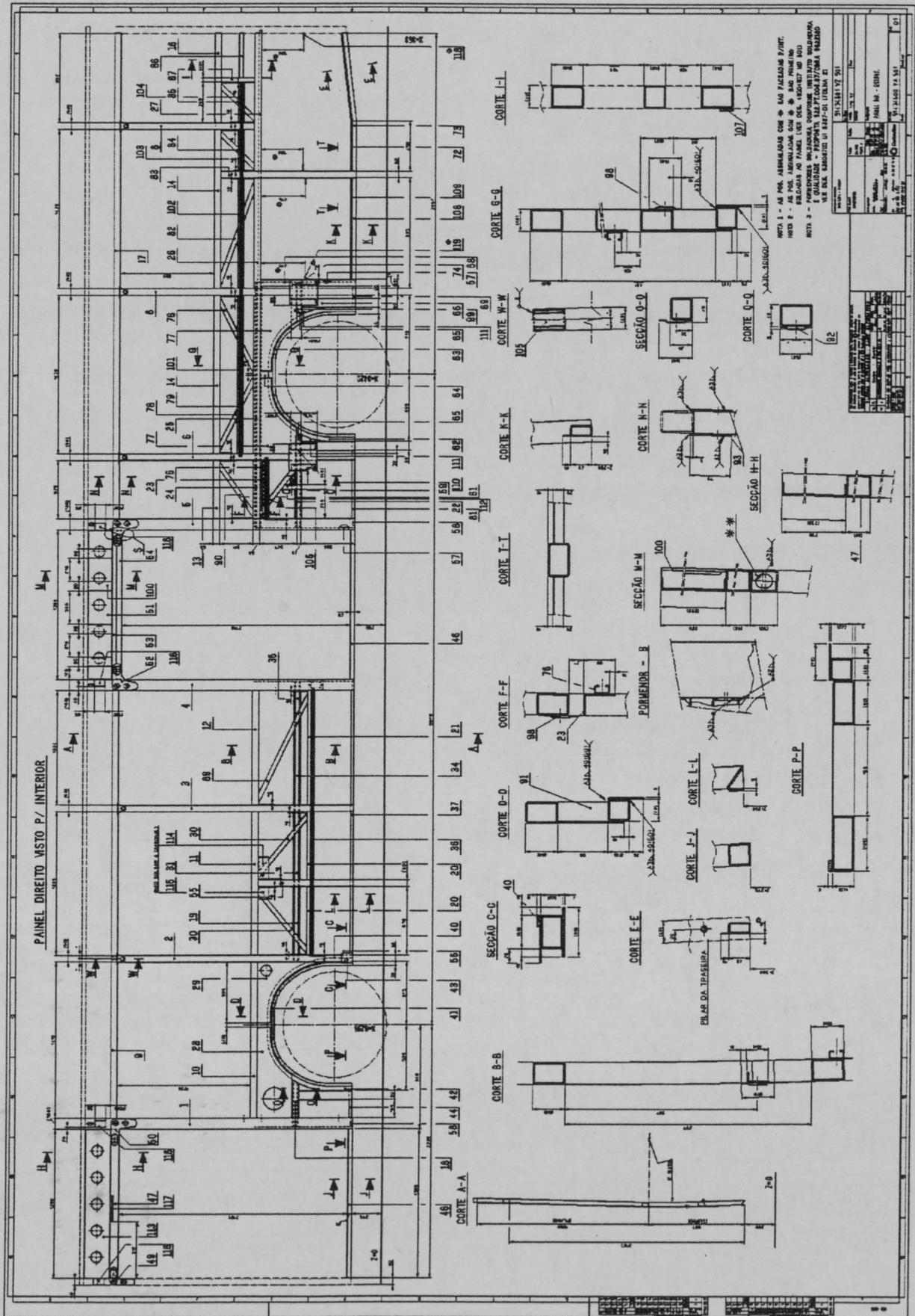
Em termos construtivos estabelecem também ligação com as restantes estruturas resistentes do autocarro (chassis, estrado, tejadilho, frente e traseira). Os painéis possuem uma construção genericamente simétrica, a menos das descontinuidades geométricas operadas pela presença das portas.

Os painéis têm ainda como funções suplementares:

- ✧ Incorporar as janelas, portas e tampas de acesso a compartimentos auxiliares e de manutenção;
- ✧ Permitir a fixação de equipamento de conforto e segurança dos passageiros, tais como bancos e anteparas da caixa de degraus dos acessos;

Como consequência, os principais condicionalismos, do projecto da estrutura dos painéis laterais, são:

- ✧ Legislação que define as dimensões mínimas das saídas (ponto 7.6.3.1 da Directiva 01/85/CE);
- ✧ Apesar do regulamento 66 (regulamento que estabelece a resistência passiva ao capotamento da superestrutura) não ser ainda aplicável a autocarros urbanos, o projecto na CaetanoBus considera a mesma solução, de pilares contínuos a toda a altura, que é aplicada em veículos sujeitos a esta legislação.
- ✧ A presença das portas leva à inexistência de perfis resistentes numa área considerável, pelo que o projecto tem em consideração uma maior sollicitação nos componentes circundantes;



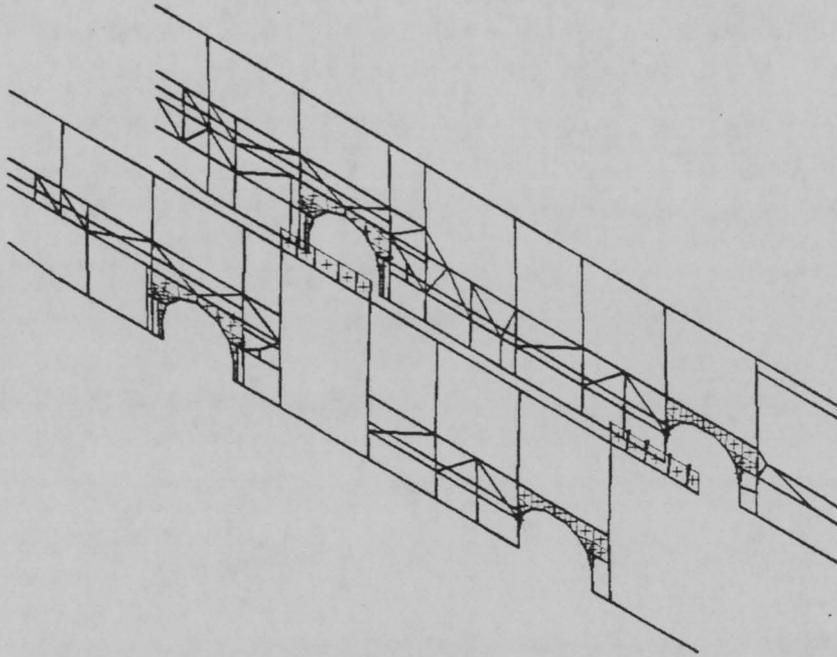


Figura. Modelo, em elementos finitos, relativos à estrutura dos painéis laterais (painel direito a magenta e painel esquerdo a verde).

<b>Painel Direito</b> 301 elementos				<b>Painel Esquerdo</b> 330 elementos			
Rodas:	Frnt. Esq.	-49	189	Frnt. Esq.	179	115	
	Frnt. Dir.	238		Frnt. Dir.	-64		
	Tras. Esq.	-136	341	Tras. Esq.	682	523	
	Tras. Dir.	477		Tras. Dir.	-159		
	<b>TOTAL:</b>	<b>530</b>	<b>(Kg)</b>	<b>TOTAL:</b>	<b>638</b>	<b>(Kg)</b>	

Tabela. Número de elementos finitos e peso dos modelos dos painéis laterais

#### 4.3.2.4 Modelação do Tejadilho

O tejadilho do autocarro é a estrutura resistente que cobre a área do habitáculo, estabelecendo a ligação com as estruturas resistentes dos painéis laterais da frente e da traseira.

Tem ainda como funções suplementares, nomeadamente:

- ✧ Suportar equipamentos diversos, tais como, aparelhos de ar condicionado, de depósitos de gás ou de pilhas de combustível;
- ✧ Permitir a aplicação de equipamentos eléctricos como lâmpadas, colunas, cablagem, etc, e no caso dos veículos de turismo, condutas de ar de climatização e bagageiras suplementares.
- ✧ Permitir a aplicação de pegas e varões de amparo.



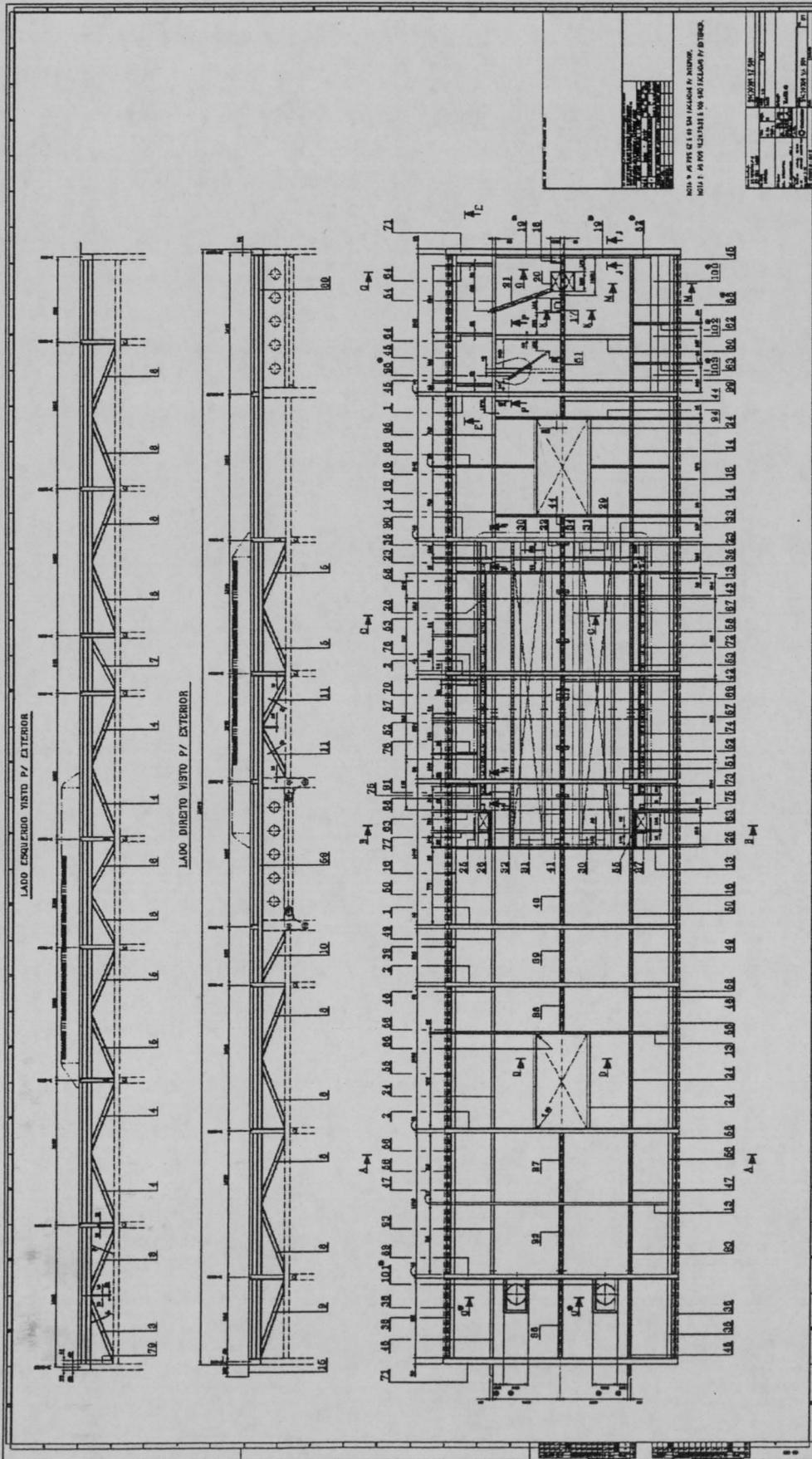


Figura. Informação suporte à modelização: desenho de conjunto do tejadilho

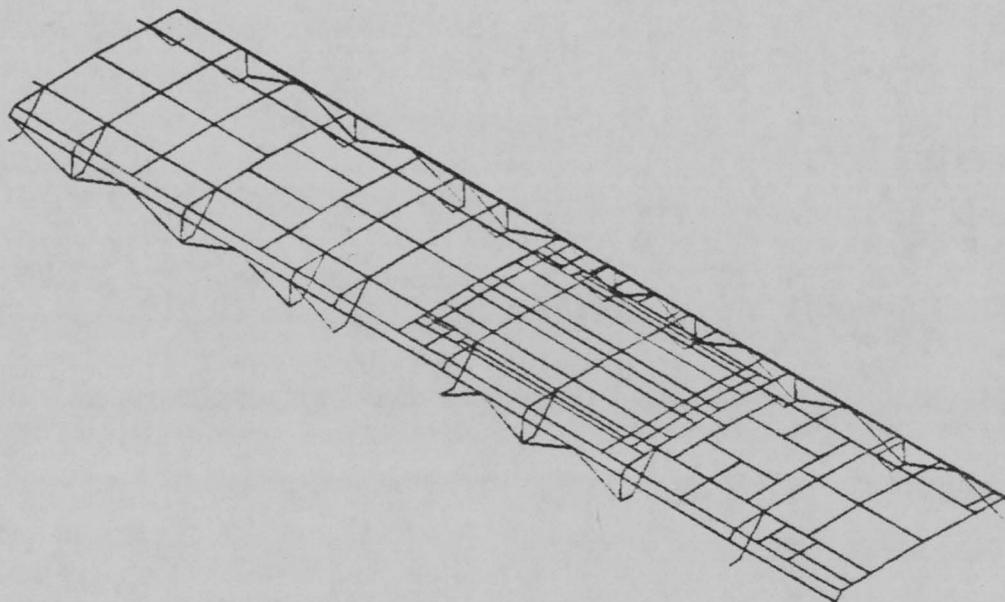


Figura. Modelo em elementos finitos relativo à estrutura do Tejadilho

<b>Tejadilho</b>		<i>519 elementos</i>	
<b>Rodas:</b>	<i>Frnt. Esq.</i>	110	203
	<i>Frnt. Dir.</i>	93	
	<i>Tras. Esq.</i>	121	242
	<i>Tras. Dir.</i>	121	
	<b>TOTAL:</b>	<b>445</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos finitos e peso do modelo do Tejadilho

#### 4.3.2.5 Modelação da Frente

Nas acções de Concepção e Desenvolvimento da estrutura Frente é necessário ter em conta:

- ❖ Requisitos de fornecedores nomeadamente os relativos à instalação de aparelhos mostradores de destinos e numerário;
- ❖ Localização e suporte de órgãos de iluminação, limpeza e desembaciamento do pára-brisas e respectivos acessos de manutenção. No caso de veículos não urbanos, ainda o eventual acesso à roda de reserva através do pára-choques;
- ❖ Área do campo de visão do motorista incluindo a localização e aplicação de espelhos retrovisores;
- ❖ O tablier que inclui o painel de instrumentos e envolve a coluna de direcção, e respectivos arrumos da tripulação.

Como consequência, os principais condicionalismos, do projecto da estrutura da frente, são:

- ✧ Legislação que define a instalação os equipamentos de iluminação dianteiros (Directiva 76/756/CEE);
- ✧ Legislação que determina o número e localização de dispositivos para visualização indirecta (Directiva 2003/97/CE);
- ✧ Legislação que regula a aplicação de equipamentos de desembaciamento (Directiva 78/317/CEE);
- ✧ Legislação que regula a aplicação de equipamentos de limpeza (Directiva 78/318/CEE);

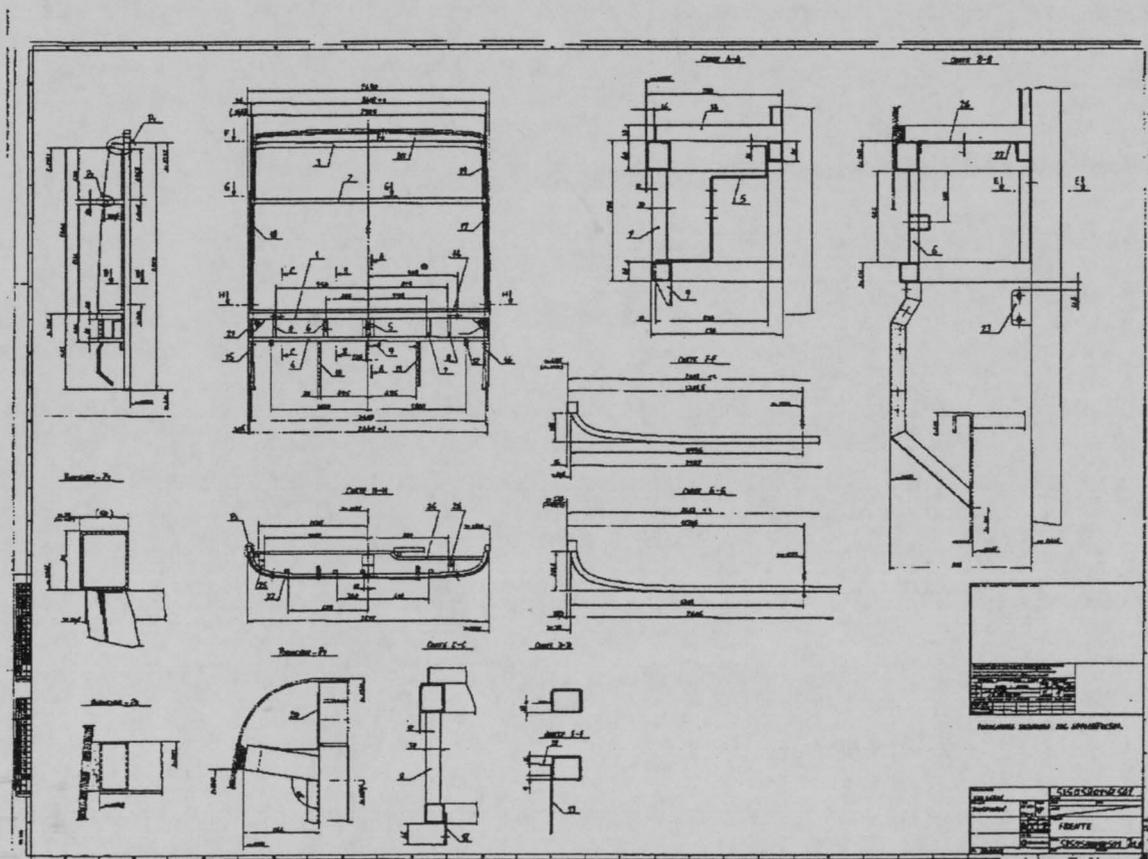


Figura. Informação suporte à modelação: desenho de conjunto da Frente

<b>Frente</b>		<b>141 elementos</b>	
<b>Rodas:</b>	<i>Fr. Esq.</i>	64	121
	<i>Fr. Dir.</i>	57	
	<i>Tras. Esq.</i>	-21	-36
	<i>Tras. Dir.</i>	-15	
	<b>TOTAL:</b>	<b>85</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos finitos e peso do modelo da Frente

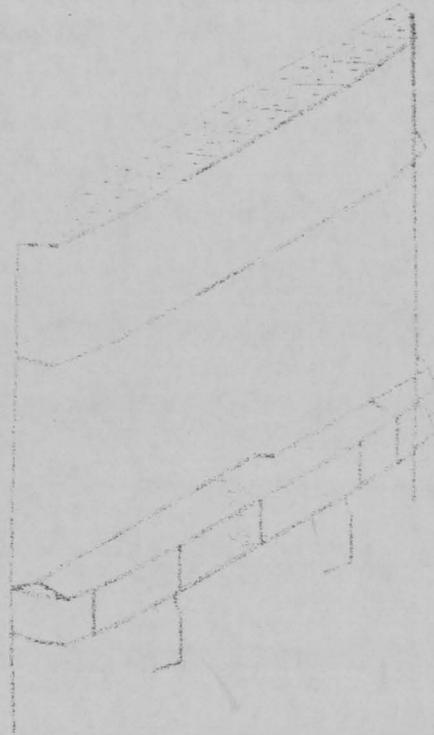


Figura. Modelo, em elementos finitos, relativo à estrutura da frente do autocarro

#### 4.3.2.6 Modelação da Traseira

Nas acções de Concepção e Desenvolvimento da estrutura Traseira é necessário ter em conta:

- ✧ Requisitos de fornecedores nomeadamente os relativos à instalação de aparelhos mostradores de destinos e numerário;
- ✧ Eventuais acessos a órgãos mecânicos, para acções de manutenção, ou bagageira no caso de veículos não urbanos;
- ✧ Localização e suporte de órgãos de iluminação e reflexão traseiros;

Como consequência, os principais condicionalismos, do projecto da estrutura da traseira, são:

- ✧ Legislação que define a instalação os equipamentos de iluminação traseiros (Directiva 76/756/CEE);

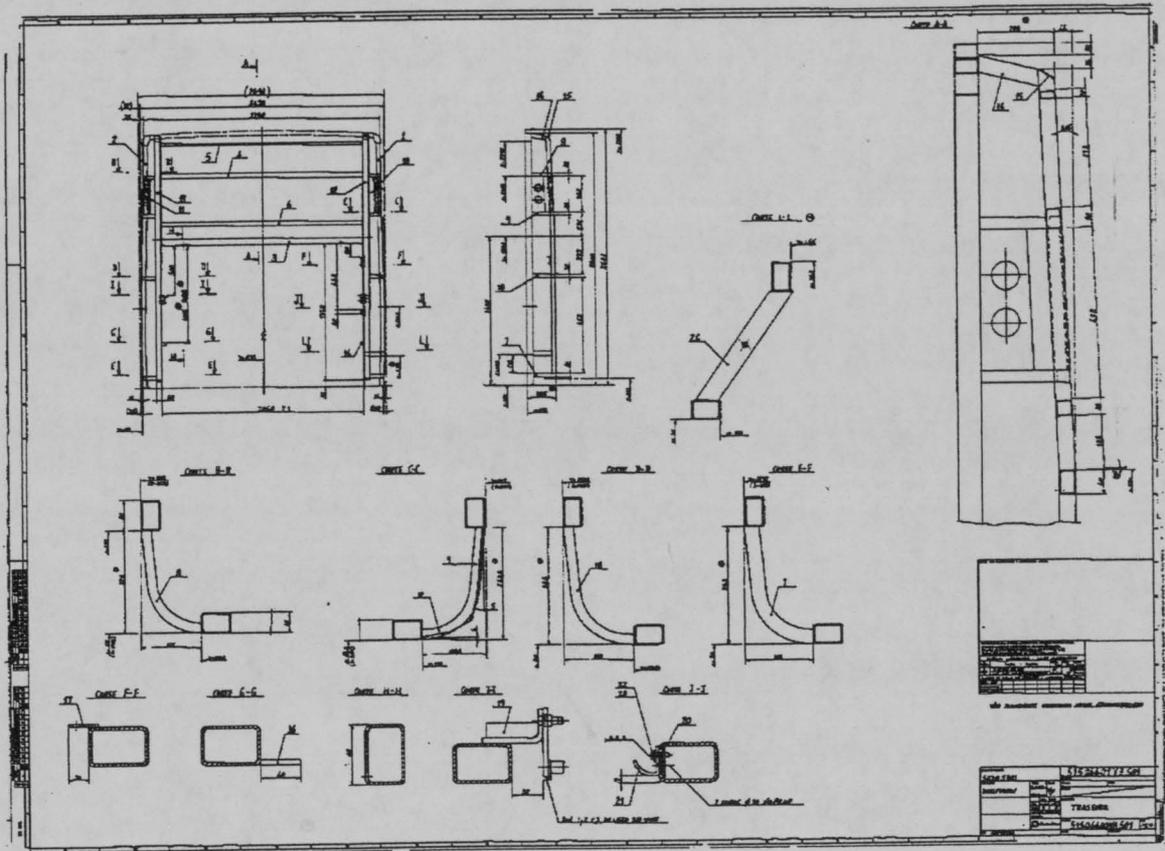


Figura. Informação suporte à modelação: desenho de conjunto da Traseira

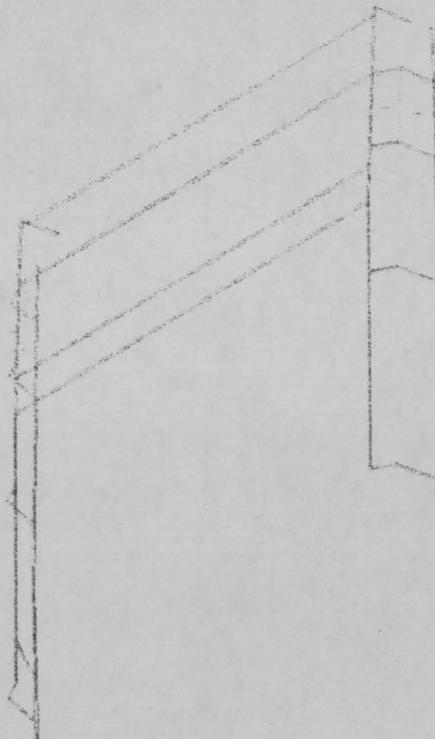


Figura. Modelo em elementos finitos relativo à estrutura da traseira

Traseira		74 elementos	
Rodas:	Fr. Esq.	-28	-47
	Fr. Dir.	-19	
	Tras. Esq.	69	130
	Tras. Dir.	61	
	<b>TOTAL:</b>	<b>83</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos finitos e peso do modelo da Traseira

#### 4.3.2.7 Modelação dos Vidros

##### 4.3.2.7.1 Considerações gerais

A presença dos vidros no modelo estrutural teve em consideração o seu efeito de travamento do caixilho das janelas, e logo a sua contribuição para a rigidez global do autocarro (não desprezável segundo estudos já realizados, ver ref. [B]).

Neste autocarro os vidros fixos ocupam apenas parcialmente a altura total das janelas. A consideração dos vidros permitiu também analisar a possível existência de tensões importantes a meio dos pilares, ao nível do limite superior daqueles.

A fixação dos vidros à estrutura é efectuada por uma camada de adesivo (elastómero polibutadieno) com cerca de 6 mm de espessura.

##### 4.3.2.7.2 Determinação do Módulo de Elasticidade Equivalente dos materiais combinados vidro e adesivo

A criação de um modelo representativo da acção dos vidros deveria passar pela modelação de uma camada de adesivo ao longo de toda a fronteira dos vidros com a estrutura.

Para evitar a complexidade de modelação da camada de adesivo em todo o modelo do autocarro, modificou-se as propriedades materiais do vidro das janelas, de modo a simular o efeito da camada do elastómero de ligação.

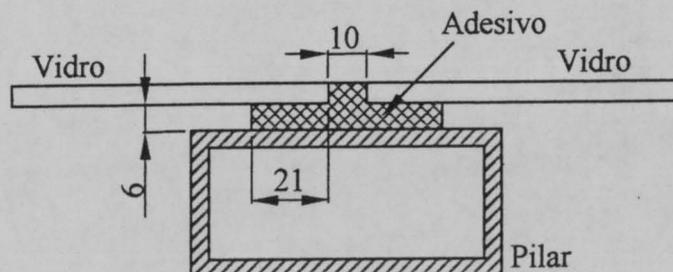


Figura. Ligação, por colagem, dos vidros ao pilar

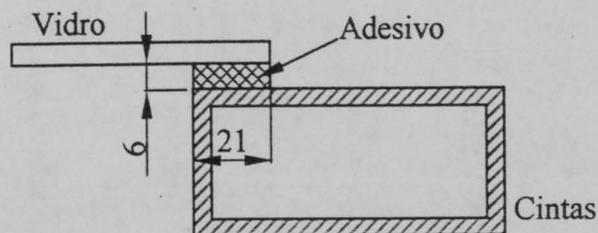


Figura. Ligação, por colagem, de um vidro à cinta da janela.

A determinação das propriedades materiais equivalentes relativas ao conjunto vidro e adesivo, passou pela modelação auxiliar da ligação de um tramo típico.

Embora existam duas configurações típicas de ligações do vidro à estrutura (ver figuras acima) considerou-se a do tipo vidro – cinta como genérica. Esta ligação consiste de uma banda periférica de adesivo funcionando ao corte. O adesivo interposto entre os topos dos dois vidros, no outro caso, considerou-se desprezável pela sua pequena área de adesão e por não constituir uma ligação à estrutura.

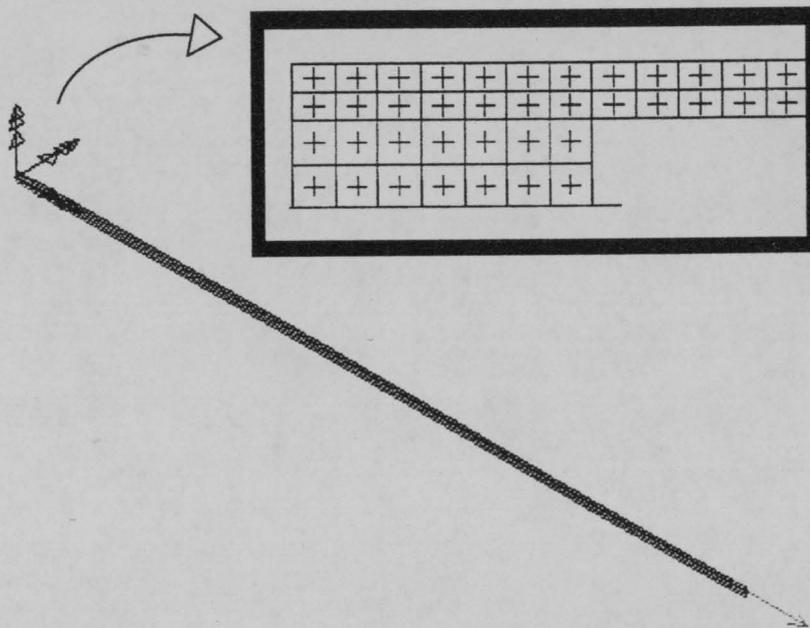


Figura. Modelo 3D representativo de uma ligação vidro - estrutura

As propriedades materiais dos elementos finitos sólidos incorporados no modelo são:

	Janelas	Adesivo	
<b>Material</b>	Vidro	Elastómero Polibutadieno	
<b>Densidade (<math>\rho</math>)</b>	2500	910	(Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Módulo de Young (<math>E</math>)</b>	46.2	0.0016	(GPa)
<b>Módulo de Corte (<math>G</math>)</b>	18.6	0.0005	(GPa)
<b>Coef. de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.245	0.5	

Tabela. Propriedades materiais dos elementos do modelo vidro - estrutura

O modelo construído tem um comprimento de valor igual à dimensão média das janelas e uma secção resistente unitária. Para determinação do módulo de Elasticidade equivalente aplicou-se uma força longitudinal de valor conhecido (10 *Kgf*), e determinou-se o deslocamento sofrido pelo nó solicitado. O módulo de Elasticidade equivalente sai pela fórmula:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta F/A}{\Delta\ell/\ell} = \frac{10/1}{44,52/104,2} = \frac{10}{0,427} = 23,4 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 0,0023 \text{ (GPa)}$$

A simulação da contribuição de rigidez dada pelas janelas de vidros fixos passou pela criação de um modelo constituído por elementos para flexão de placas (thin shell), afectado do módulo de elasticidade anteriormente determinado.

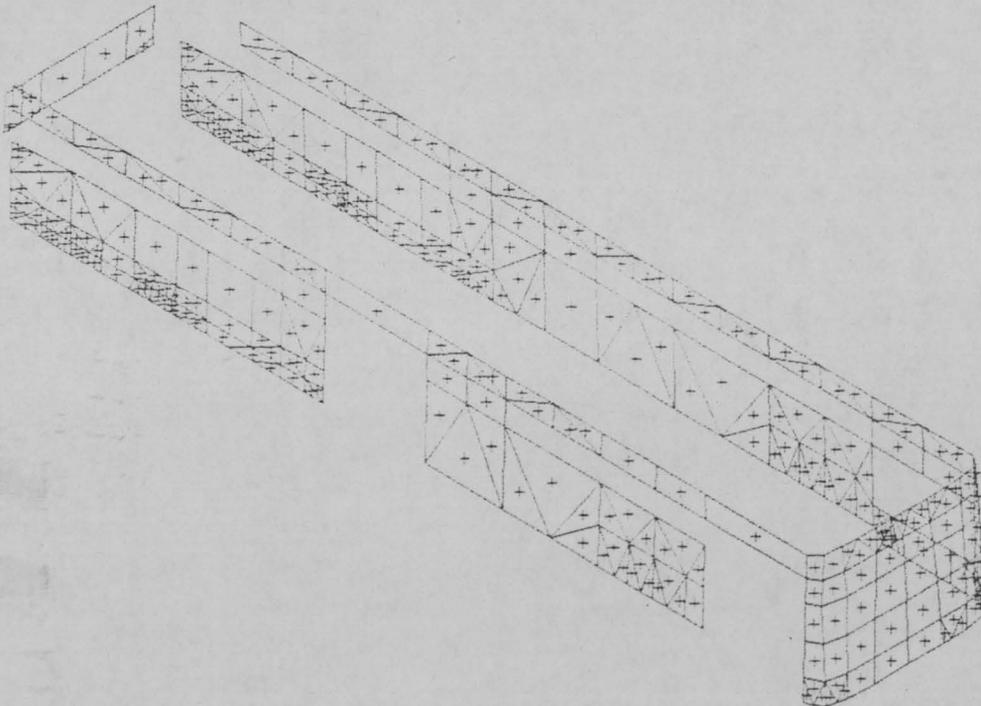


Figura. Modelo em elementos finitos relativo aos vidros

<b>Vidros</b>		308 elementos	
<b>Rodas:</b>	<i>Fr. Esq.</i>	134	222
	<i>Fr. Dir.</i>	88	
	<i>Tras. Esq.</i>	104	188
	<i>Tras. Dir.</i>	84	
	<b>TOTAL:</b>	<b>410</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos e peso dos Vidros modelados

#### 4.3.2.8 Modelação do Chapeamento e Blindagens

O Chapeamento e as Blindagens são essencialmente constituídos por chapas de pequena espessura. Apesar da pequena espessura dessas chapas, estas contribuem de modo relevante para a rigidez do autocarro, embora o seu efeito apenas se faça sentir num único plano.

O chapeamento é constituído por chapas de revestimento exterior que se encontram ligadas aos painéis laterais. O chapeamento pode ser subdividido em duas principais partes: chapeamento superior e chapeamento inferior.

O chapeamento dos painéis laterais imediatamente abaixo das janelas é constituído por chapa de aço galvanizado. Está ligado ao painel por soldaduras nos seus topos verticais (menor dimensão da chapa), e por adesivo na sua direcção longitudinal (direcção de maior das dimensões da chapa). Esta técnica tem por fim evitar o empeno, que surgiria aquando da execução de soldaduras de elevado comprimento, em chapas de baixa espessura.

Na modelização deste elemento estrutural optou-se desprezar as ligações por adesivo, considerando-se que a rigidez da ligação por adesivo é desprezável face à rigidez da ligação soldada nos topos.

O chapeamento da zona mais inferior é efectuado em chapa fina de alumínio. A aplicação destes elementos em alumínio advém da sua maior resistência à corrosão. Dado que a estrutura do painel é em aço, e as chapas do chapeamento inferior são em alumínio, a ligação é feita por adesivo.

A rigidez conjunta da chapa de alumínio com a ligação colada, foi simulada por um módulo de elasticidade equivalente. A determinação deste módulo de elasticidade seguiu um processo idêntico ao descrito no ponto 4.3.2.7.2 (determinação do módulo de elasticidade do funcionamento conjunto vidro adesivo).

As Blindagens da frente e da traseira têm respectivamente como principal função a protecção contra intrusões e contra a propagação do fogo e do ruído do motor. A sua ligação aos elementos tubulares é rígida por soldadura.

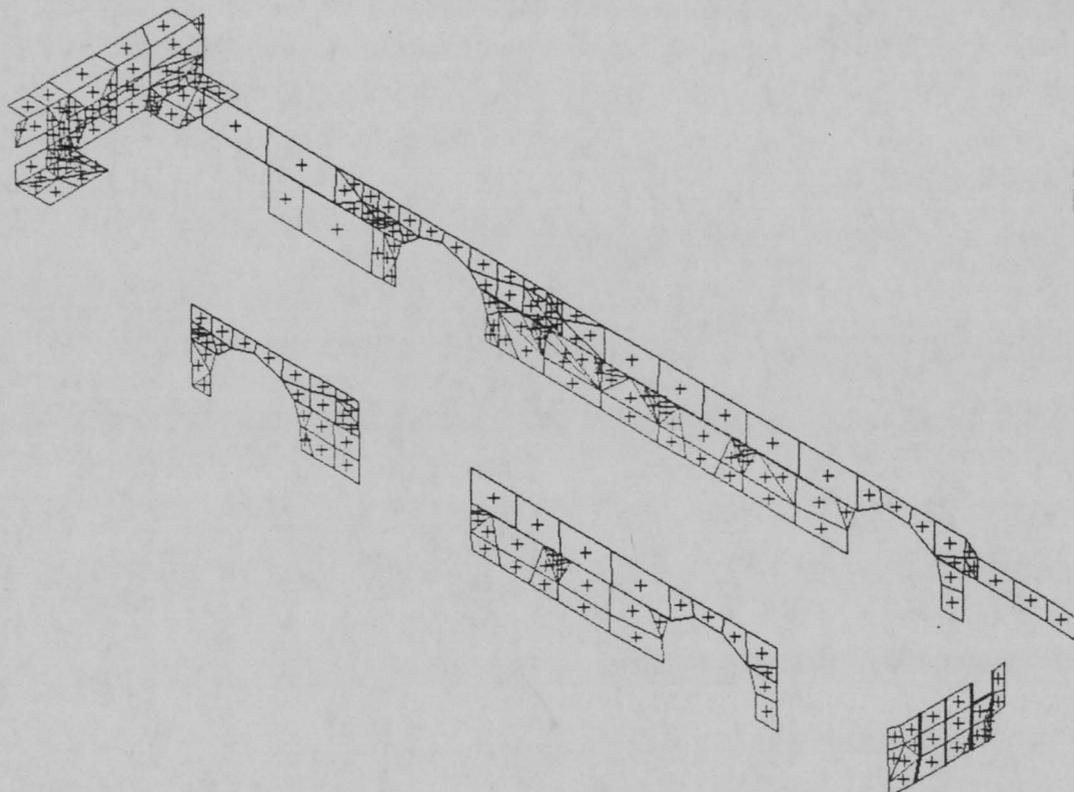


Figura. Modelo em elementos finitos relativo aos componentes estruturais Blindagens e chapeamentos

<b>Chaps e Blinds</b>		<b>171 elementos</b>	
<b>Rodas:</b>	<i>Frnt. Esq.</i>	15	34
	<i>Frnt. Dir.</i>	19	
	<i>Tras. Esq.</i>	25	43
	<i>Tras. Dir.</i>	18	
	<b>TOTAL:</b>	<b>77</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos e peso dos Chapeamentos e Blindagens modeladas

#### 4.3.2.9 Modelação do Revestimento do Tejadilho

O tejadilho é revestido por uma placa de Plástico Reforçado a Fibra de Vidro (PRFV). A ligação deste material compósito à estrutura metálica do tejadilho é feita através de um adesivo. Este revestimento abrange uma grande área (toda a área do tejadilho), pelo que a sua influência no comportamento do autocarro é relevante.

<b>Plástico Reforçado com Fibras de Vidro</b>		
<b>Densidade (<math>\rho</math>)</b>	1400	(Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Módulo de Young (E)</b>	26	(GPa)
<b>Módulo de Corte (G)</b>	10	(GPa)
<b>Coef. de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.28	

Tabela. Propriedades materiais do material de revestimento do Tejadilho

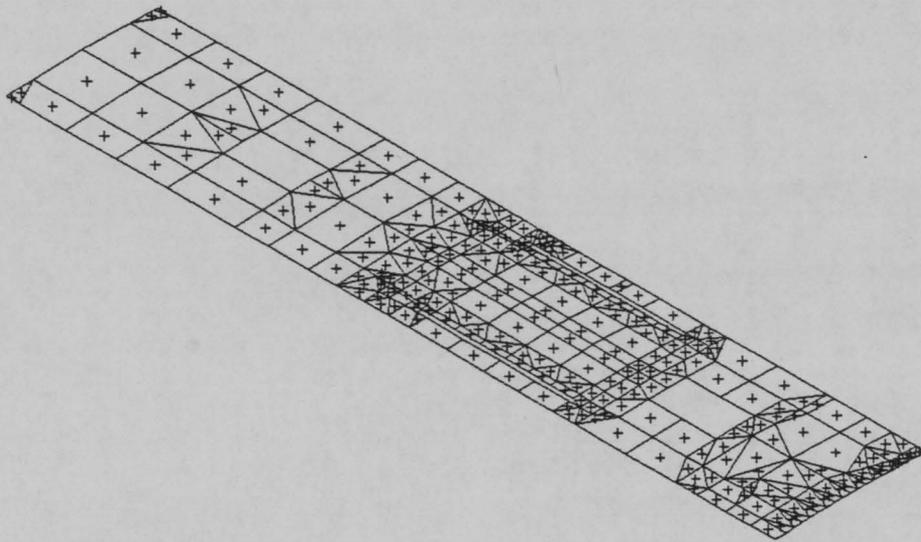


Figura. Modelo em elementos finitos relativo ao revestimento do tejadilho em PRFV

<b>RevTejadilho</b>		278 elementos	
<b>Rodas:</b>	<i>Fr. Esq.</i>	14	28
	<i>Fr. Dir.</i>	14	
	<i>Tras. Esq.</i>	19	38
	<i>Tras. Dir.</i>	19	
	<b>TOTAL:</b>	<b>66</b>	<b>(Kg)</b>

Figura. Número de elementos e peso do Revestimento do Tejadilho modelado

#### 4.3.2.10 Modelação do Pavimento

O pavimento do autocarro é constituído por recortes de madeira prensada (tola marítima) revestida a oleado e colada à estrutura. Embora a rigidez da madeira que constitui o pavimento não seja relevante, foi considerada como elemento resistente, para consideração do efeito do seu peso.

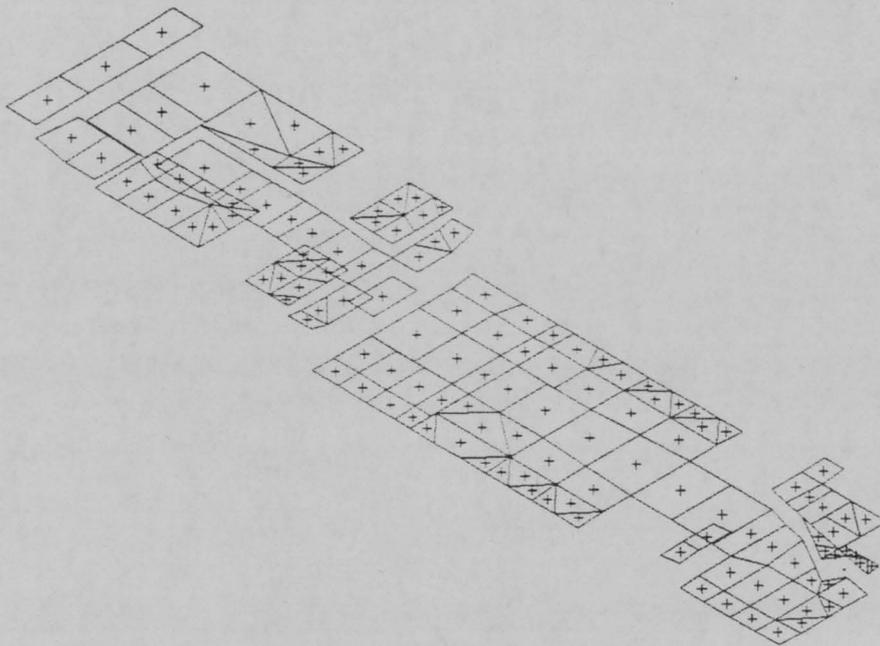


Figura. Modelo em elementos finitos relativo ao Pavimento do autocarro

<b>Pavimento (mad.)</b>		<b>135 elementos</b>	
<b>Rodas:</b>	<i>Fr. Esq.</i>	55	121
	<i>Fr. Dir.</i>	66	
	<i>Tras. Esq.</i>	95	192
	<i>Tras. Dir.</i>	97	
	<b>TOTAL:</b>	<b>313</b>	<b>(Kg)</b>

Tabela. Número de elementos e peso do Pavimento modelado

4.3.3 Validação do modelo geral

<b>Descarga por eixo ao solo (Kg)</b>			
	<i>Frente</i>	<i>Traseira</i>	<i>TOTAL</i>
<b>Valores do Cálculo MEF</b>	1916	6441	8357
<b>Valores da Pesagem</b>	1433	6097	7530
<b>Diferença</b>	483	344	827

Tabela. Valores de validação do modelo MEF geral

Da comparação dos valores de descarga ao solo obtidos do cálculo MEF com os da pesagem, para o mesmo estado final da construção da estrutura metálica resistente, constatou-se uma diferença significativa. A esta diferença deverá ser abatido o peso dos órgãos mecânicos do chassis retirados durante a construção da carroçaria, tais como baterias, depósitos de ar comprimido, quadros eléctricos, etc estimado em cerca de 400 Kg.

Estas diferenças são atribuíveis a três causas principais, as variações da espessura no fornecimento do material em bruto, as simplificações implícitas no modelo de cálculo e a eventual imprecisão da pesagem.

De acordo com as normas correntes que regulam as condições de fornecimento de material em bruto (exemplo DIN2395 parte 2) são admissíveis variações de mais ou menos 10% na espessura (por conveniência do fornecedor tende a ser para menos), o que pode corresponder a cerca de 210 Kg (10% da estrutura da carroçaria, com aproximadamente 2100 Kg).

No que diz respeito às simplificações do modelo MEF, uma das simplificações mais relevante na afectação do valor do peso final, é o facto de as ligações entre perfis serem estabelecidas num nó comum. Esta simplificação advém de o modelo não ter em consideração que a secção dos perfis é truncada pela face exterior do perfil aonde estes são soldados, pelo que o cálculo contempla um pequeno excesso de comprimento de viga inexistente (comprimento desde a face de truncatura até à fibra neutra onde está o nó comum). A existência de excesso de comprimento, de elementos de viga, nas ligações entre elementos pode justificar uma diferença de peso de 5% na estrutura da carroçaria, ou seja cerca de 105 Kg (estimado para um comprimento de perfil típico). Outras simplificações, tais como a não consideração de furos de redução de peso em chapas de blindagem, poderão também afectar os resultados do peso calculado.

Relativamente à imprecisão da pesagem, constatou-se que embora as balanças anunciem uma precisão de 1%, as pesagens cruzadas efectuadas revelaram diferenças de cerca três vezes mais.

Considerando a ordem de grandeza destas imprecisões e o carácter essencialmente qualitativo dos objectivos do cálculo, poder-se-á concluir que o modelo definido para o cálculo é suficientemente representativo da estrutura real do autocarro.

#### **4.4 Solicitações e restrições sobre o modelo estrutural**

No uso quotidiano de um autocarro, para além do peso próprio e dos ocupantes, este sofre o mais variado tipo de solicitações.

- ✧ Solicitações dinâmicas na aceleração, travagem e mudanças de direcção;
- ✧ Solicitações devidas a acelerações verticais bruscas, ao passar sobre buracos no pavimento, ou ao subir passeios com as rodas;
- ✧ Solicitações devidas a embates ocasionais;
- ✧ Solicitações cíclicas induzidas pela vibração do motor, ou pelo percurso sobre um piso irregular;
- ✧ Solicitações de natureza térmica por influência da temperatura ambiente exterior e/ou interior, ou por influência da temperatura de órgãos mecânicos como seja o motor ou o radiador;
- ✧ Solicitações devido à força de arrasto (dependentes da aerodinâmica do veículo), entre muitas outras solicitações identificáveis;

Torna-se impossível na prática simular num modelo de cálculo toda esta variedade de solicitações a que um veículo está sujeito durante toda a sua vida útil.

A tendência de várias instituições que se dedicam ao cálculo estrutural ou então à análise experimental de tensões, de autocarros, é tomar como situação crítica de dimensionamento a imposição de um dado deslocamento vertical numa das rodas, relativamente ao plano das outras três.

Assim esta solicitação corresponderá ao caso real de um autocarro subir o passeio com uma das rodas. Quanto mais alto for esse passeio maior será a diferença de valores entre as reacções nos pontos de apoio, até que, num caso limite uma das reacções se anula. Esta situação corresponde à perda de contacto de uma dessas rodas ficando o autocarro apoiado em três pontos.

Como já referido em 4.3.1.3 esta última situação é aquela que é independente das características da suspensão e portanto mais facilmente simulável.

De acordo com estes pressupostos foram tomados dois casos de carga correspondentes às situações de apoio nas rodas traseiras e em cada uma das da frente.

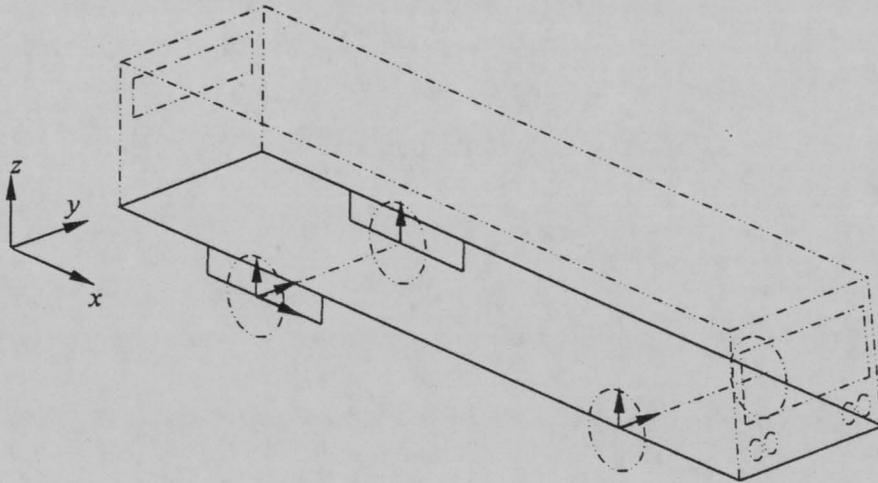


Figura. Restrições nos nós de apoio, de modo a simular que a estrutura apoia nas duas rodas traseiras e na roda da frente direita

Para esta situação de apoio as solicitações estáticas que condicionam o desnivelamento máximo do apoio livre são, como já referido, o peso próprio do veículo e o dos ocupantes.

O modelo de cálculo através das secções atribuídas e propriedades físicas incorporou de forma automática o peso próprio dos respectivos elementos, pela aplicação de uma aceleração sobre a respectiva massa.

Outras sobrecargas não contidas no modelo, como é o caso dos bancos, dos vidros rebatíveis e do peso dos passageiros, tiveram de ser simulados por aplicação de cargas concentradas.

No caso particular do peso dos bancos a simulação foi concretizada pela distribuição das cargas concentradas nos nós mais próximos dos seus locais de fixação.

No caso do peso dos passageiros sentados, as cargas concentradas respectivas foram distribuídas pelos nós de fixação dos bancos, em função da localização do centro de gravidade dos passageiros. No caso dos passageiros de pé, as respectivas cargas foram repartidas pelos nós mais próximos das áreas do pavimento correspondentes às localizações individuais.

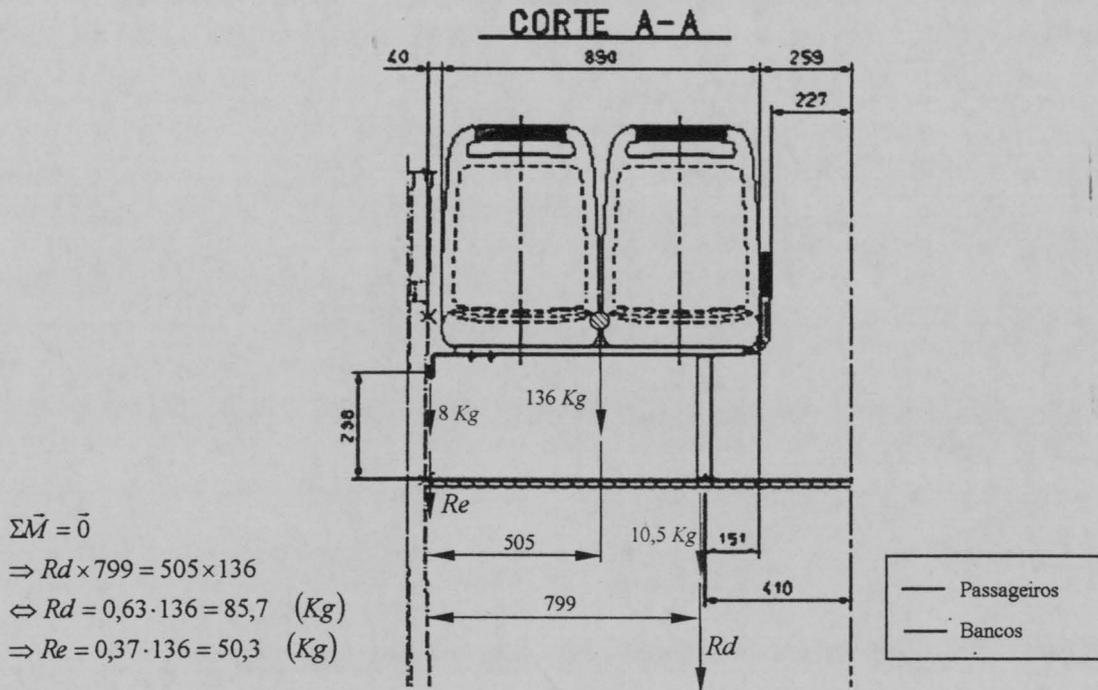


Figura. Repartição de pesos nos apoios de um banco duplo

Relativamente aos restantes componentes não estruturais, estes podem ser considerados distribuídos de uma forma regular por toda a estrutura, como é o caso de materiais de revestimento, instalações eléctricas, condutas de climatização, etc..

Tendo em conta as características da distribuição e os objectivos qualitativos do cálculo, como referido em 4.5.2, estes componentes não afectam o histograma das tensões, pelo que não foram considerados.

## 4.5 Análise e discussão de resultados

### 4.5.1 Metodologia aplicada

Para possibilitar a análise conveniente (ver ponto 4.2.3), os resultados foram exportados para Excel, sendo depois trabalhados, de modo a serem obtidas as tensões equivalentes de Von Mises ordenadas por ordem decrescente.

De seguida constituiu-se um gráfico de densidade de tensões que permitiu identificar um número limitado de elementos da estrutura a que corresponde um intervalo significativo no extremo de tensões mais elevadas (os primeiras 30 elementos correspondem a cerca de metade da gama de tensões).

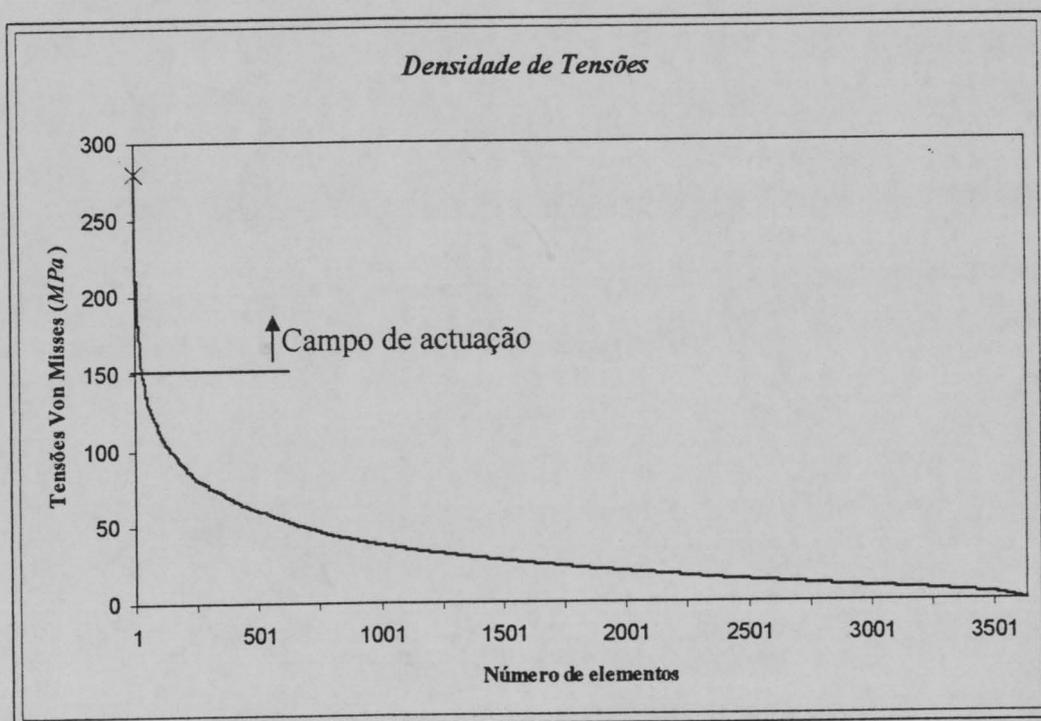


Gráfico. Densidade das tensões de Von Mises, nos elementos, antes de acções de melhoria

Do conjunto dos elementos identificados foram expurgados aqueles cujas tensões obtidas aparecem sobreavaliadas por razões ligadas com a simplificação da própria modelação (ver ponto 4.2.1.3 e ponto 4.3.3).

Para os restantes foi feito um estudo de possíveis acções de melhoria.

O estudo das acções de melhoria consistiu na procura de soluções de projecto complementares, para atenuação dos níveis de tensão. As soluções de projecto procuraram contrapor-se aos esforços predominantemente responsáveis pelas elevadas tensões.

Para validação das soluções de projecto previstas, procedeu-se à modificação do modelo MEF e reanálise dos resultados do cálculo.

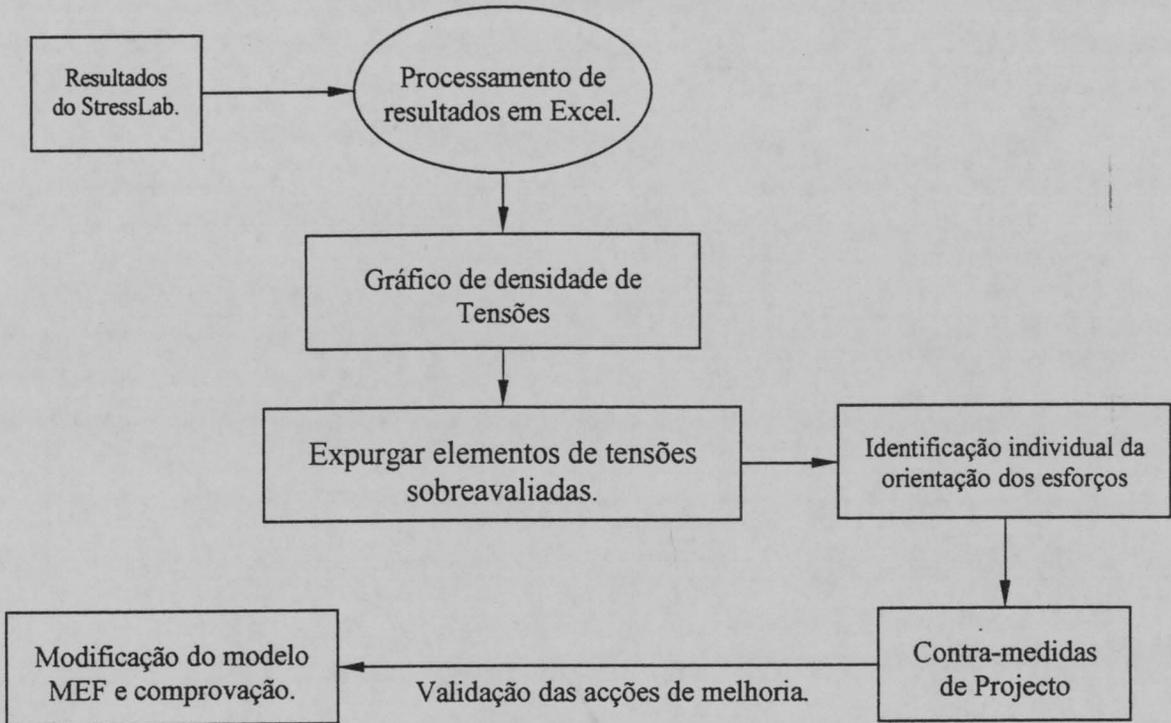


Figura. Método de administração dos resultados do cálculo MEF

#### 4.5.2 Considerações complementares sobre o cálculo

##### 4.5.2.1 Representatividade dos Resultados

Os resultados obtidos, têm um carácter mais qualitativo do que quantitativo. Ou seja, permitem identificar os elementos mais solicitados, mas não afirmar quais os valores correctos das tensões instaladas. Isto decorre, de entre outras condicionantes, do facto de o modelo estrutural construído não representar fielmente a estrutura real.

##### 4.5.2.2 Optimização da estrutura

Em termos teóricos, uma estrutura optimizada, em termos de resistência, seria aquela em que os seus elementos apresentassem tensões máximas admissíveis, em pelo menos um dos casos de solicitação possíveis.

Em termos práticos existem outros factores, que condicionam o dimensionamento, nomeadamente por razões de viabilidade e por razões operacionais.

Não é viável obter os valores reais das tensões nem prever todos os tipos de solicitações possíveis de uma estrutura. Por outro lado, o nivelamento das tensões para uma determinada situação de serviço corresponde forçosamente a um desnivelamento para outra.

Em termos operacionais, há toda a vantagem por razões de logística, processos de fabrico e normalização de perfis reduzir, tanto quanto possível, a variedade de perfilados aplicados.

#### *4.5.2.2 Proveitos para a empresa*

A estrutura, em questão, corresponde à de um autocarro em início de produção, com um projecto definido e com alguns componentes já encomendados. Dado não ser conveniente nesta fase proceder-se a grandes alterações, é útil que o estudo permita definir acções correctivas restritas que facilitem a sua implementação.

#### *4.5.3 Acções de melhoria*

As acções correctivas deverão traduzir-se no abaixamento significativo do pico de tensões junto da origem do eixo das abcissas no gráfico de densidade de tensões.

Para o efeito foram seleccionados os elementos com tensões superiores a 150 MPa (46.3% da gama de tensões), que correspondem aos primeiros 30 elementos da lista ordenada por tensões (constantes no anexo A).

Pelas razões já referidas no ponto 4.2.1.3 e no ponto 4.3.3, excluíram-se, desta selecção, os elementos de tensões sobreavaliadas. Para os elementos pertencentes à estrutura do chassis foram ensaiadas possíveis soluções de projecto, embora a sua fiabilidade não seja da responsabilidade da CaetanoBus, e não se conheça exactamente a qualidade do material aplicado.

Sobre os restantes foi tido em conta a sua interacção dado que a correcção de alguns elementos chave atenuaria convenientemente as tensões nos outros.

Assim sendo foram definidas três principais acções correctivas: uma no estrado (em dois componentes dispostos simetricamente), outra no tejadilho (em quatro elementos iguais) e uma terceira, apenas como proposta, para o chassis.

A localização destes elementos é observável na figura seguinte e os respectivos valores de tensão podem ser encontrados no anexo A.

As acções correctivas consistirão na aplicação directa de reforços sobre os elementos respeitantes a cada uma das zonas críticas.

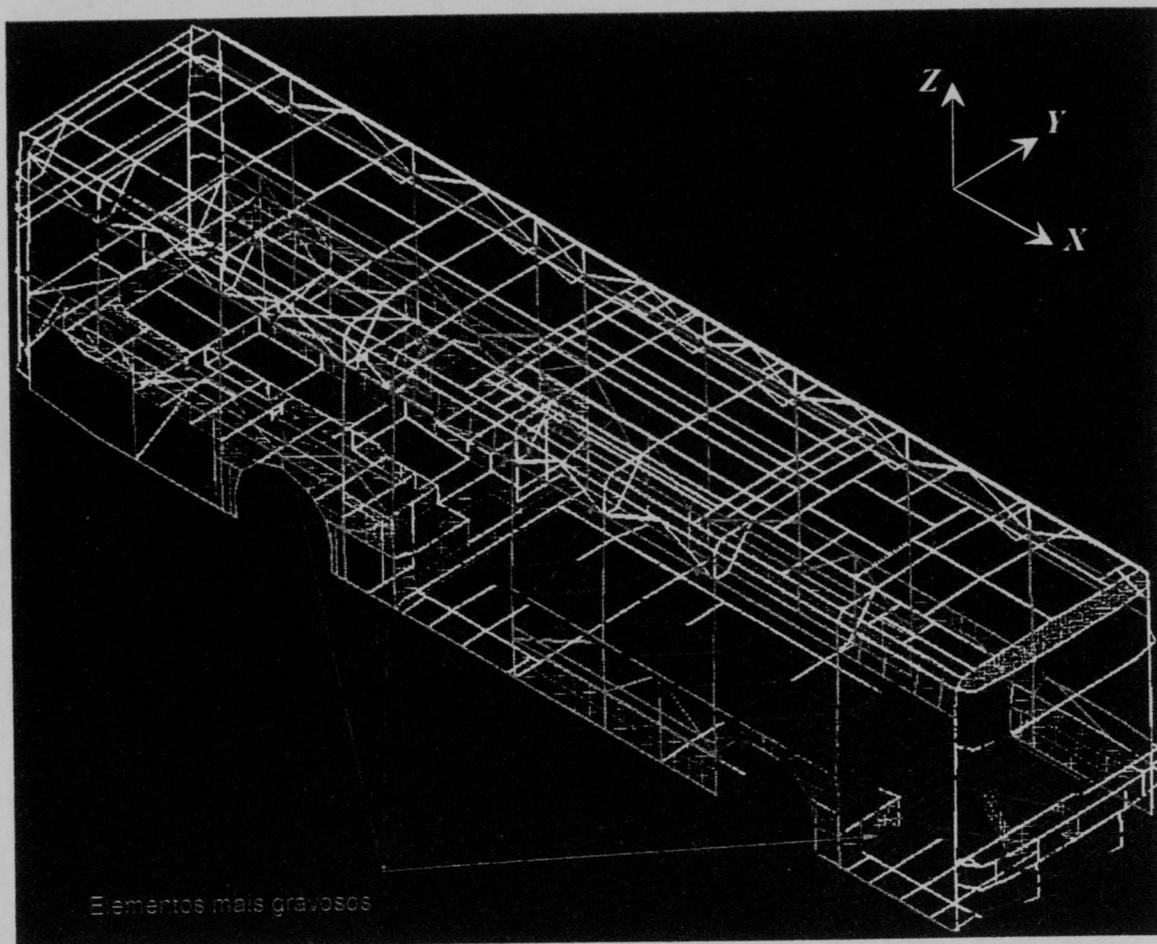


Figura. Identificação das zonas estruturais mais gravosas

#### 4.5.3.1 Acção correctiva nos apoios do estrado

Pela análise das tensões envolvidas, nos elementos dos apoios do estrado (constantes na tabela seguinte), verifica-se que a sollicitação responsável pelo elevado valor de tensão é do tipo flexão, relativamente ao eixo dos  $xx$  do autocarro (ver referencial figura acima).

Elementos a reforçar nas ligações do estrado ao chassis								
Elem	Loc.	Sol.	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	nº
640	2	e	-137.99	-32.74	-178.07	-12.29	179.33	11º
641	3	e	-28.47	-145.92	-176.98	-10.63	177.94	12º
637	6	d	-162.29	-10.63	-176.87	-5.26	177.11	13º
637	8	e	-127.62	-16.34	-144.94	-36.17	157.90	20º
640	2	d	126.60	21.25	153.35	7.21	153.85	24º

Tabela. Tensões mais relevantes nos elementos de apoio do estrado antes da aplicação das acções de reforço

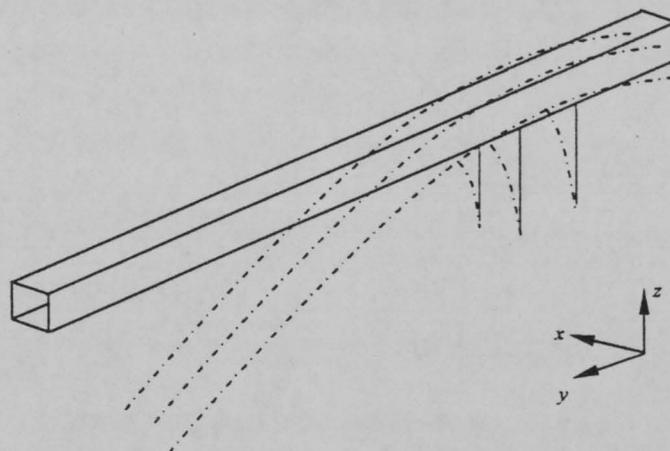


Figura. Principal forma de deformada dos apoios do estrado, e identificação dos elementos com maiores níveis de tensões (a vermelho).

Como contra-medida para os esforços responsáveis pelos elevados valores de tensões, foi idealizado um segundo apoio junto do já existente.

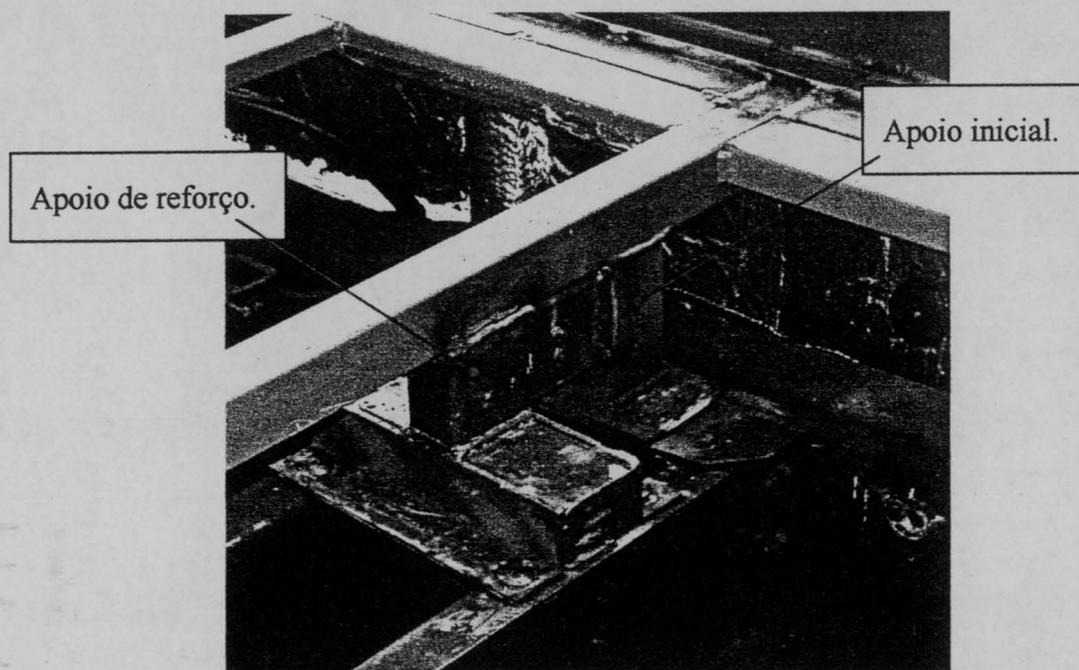


Figura. Solução de reforço aplicada nos apoios do estrado

A configuração idealizada advém da necessidade de garantir um apoio suplementar suficientemente rígido para bloquear a deformação da travessa e permitir a sua ligação por soldadura ao centro das abas do chassi (de acordo com as instruções técnicas de soldadura do fabricante do chassi).

A solução idealizada foi validada pela análise dos resultados do cálculo MEF, após alteração do modelo global da estrutura.

Elementos envolvidos nos apoios do estrado modificados								
Elem	Loc.	Sol.	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	n°
3413	1	e	70.49	75.05	157.32	2.49	157.38	5°
640	3	e	-17.75	-108.95	-129.67	8.18	130.44	21°
637	7	d	-12.26	-109.12	-124.02	-6.97	124.61	34°
3417	2	d	58.59	55.25	121.51	-1.18	121.53	45°
640	3	d	-12.50	-106.28	-118.79	7.62	119.52	51°
637	5	e	4.39	103.07	107.90	-7.32	108.64	75°
3413	3	d	-24.24	-70.52	-95.18	-0.05	95.18	128°
1842	3	e	6.85	53.96	88.09	-3.20	88.27	157°
3415	3	e	-33.80	-28.00	-82.48	1.32	82.51	191°
3417	4	e	-9.02	-64.72	-78.58	2.03	78.66	231°
3414	7	e	62.08	12.63	75.96	4.63	76.38	254°
3416	3	e	-52.71	-11.64	-74.49	1.86	74.56	264°
1832	7	d	3.26	43.00	69.90	2.14	70.00	310°
3419	4	d	-27.09	-25.14	-68.44	-0.46	68.45	326°
3418	6	d	-57.47	-4.52	-62.94	-2.90	63.14	377°
3420	4	d	-42.82	-11.12	-61.53	-1.14	61.57	401°
3414	5	d	-43.48	-12.44	-59.25	1.88	59.34	431°
3419	1	e	-4.24	-48.51	-54.78	2.25	54.92	503°
3418	6	e	-35.02	-11.25	-51.62	0.56	51.63	561°
3415	3	d	-3.49	-40.40	-51.41	-0.70	51.42	570°
3422	1	e	43.26	1.01	46.20	-3.62	46.62	664°
3416	3	d	-22.85	-17.10	-44.54	0.07	44.54	725°
1842	2	d	0.31	25.94	43.27	-0.38	43.28	754°
3421	5	d	35.51	1.27	38.03	2.00	38.19	927°
3420	7	e	-26.67	-5.21	-33.37	1.56	33.48	1095°
1832	3	e	6.54	13.31	31.90	-1.65	32.03	1139°
3422	3	d	-13.11	-1.43	-16.43	-0.78	16.49	2156°
3421	7	e	-3.45	-1.29	-7.15	-1.36	7.53	3129°

Tabela. Tensões nos elementos de apoio do estrado após a aplicação das acções de reforço

#### 4.5.3.2 Acção correctiva nas ligações pilar – tejadilho

Pela análise das tensões instaladas, nos elementos de ligação pilar - tejadilho (constantes na tabela seguinte), verifica-se que a principal sollicitação responsável pelo estado de tensão é a flexão.

<b>Elementos a reforçar envolvidos nas ligações pilar - tejadilho</b>								
<i>Elem</i>	<i>Loc.</i>	<i>Sol.</i>	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	<i>n°</i>
1455	6	d	-168.95	-11.18	-196.81	0.06	196.81	4°
1453	1	d	-155.44	-22.76	-179.55	-35.45	189.75	8°
1456	8	e	149.28	23.89	173.20	-0.41	173.20	15°
1457	8	e	-9.94	-136.32	-153.53	-9.48	154.40	22°

Tabela. Tensões mais relevantes nos elementos de ligação pilar - tejadilho, antes das acções de reforço

A identificação da orientação espacial da flexão, responsável pela maior tensão de flexão, levou à idealização de um reforço que aumentasse o momento de inércia destes elementos, orientados de acordo com o observável na figura que se segue.



Figura. Solução de reforço aplicada nas ligações pilar – tejadilho (vista pelo interior)

A validação da solução idealizada passou por uma primeira fase de simples modificação do momento de inércia do elemento reforçado, no modelo global, e verificação dos resultados do cálculo deste modelo.

<b>Elementos reforçados envolvidos nas ligações pilar - tejadilho</b>								
<i>Elem</i>	<i>Loc.</i>	<i>Sol.</i>	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	<i>n°</i>
1456	8	e	50.76	1.50	52.71	8.19	54.58	507°
1455	6	d	37.83	0.90	38.77	-16.70	48.37	629°
1453	1	d	-33.57	-2.42	-36.37	-16.54	46.29	674°
1457	8	e	39.29	3.83	44.04	1.73	44.14	734°

Tabela. Tensões mais relevantes nos elementos de ligação pilar - tejadilho, depois das acções de reforço

Pela análise dos valores tabelados verifica-se um abaixamento das tensões máximas de 196,81 MPa para 55,91 MPa, o que permite considerar superada a primeira fase de validação.

A segunda fase de validação consistiu na criação de modelações com elementos placa, para as situações antes e após a aplicação de reforços, para garantir que a solução adoptada não introduzisse tensões inesperadas nas extremidades das chapas de reforço.

A criação, em separado, dum modelo pormenorizado da ligação pilar – tejadilho obriga a uma exportação de resultados do modelo global (esforços nas extremidades dos elementos viga) para o modelo local.

Se a ligação pilar – tejadilho fosse modelada, com elementos placa, no próprio modelo global, elevaria substancialmente o número de elementos no modelo, sobrecarregando o processo de cálculo.

A modelação local pormenorizada foi validada pela verificação do somatório global de forças nulo e pela verificação da conformidade entre o comportamento demonstrado, pelos troços envolvidos de ligação pilar – tejadilho, no modelo global e no modelo pormenorizado.

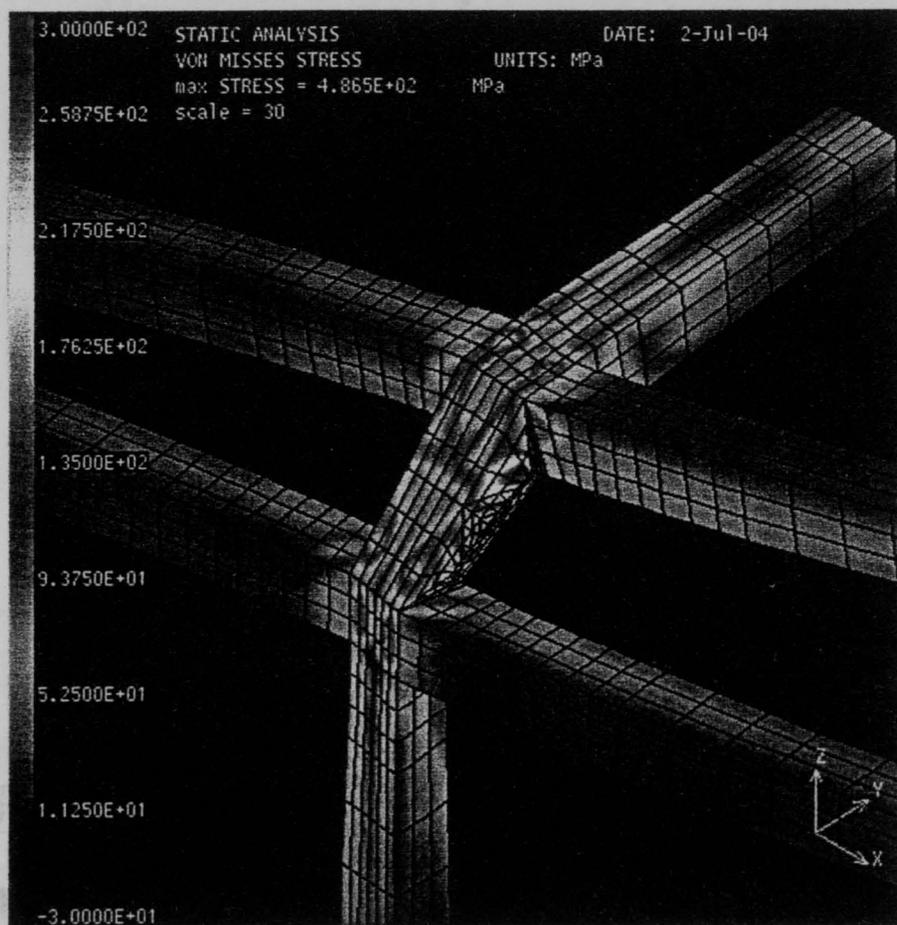


Figura. Modelo pormenorizado da ligação pilar – tejadilho, antes da acção de reforço (visto do exterior)

O modelo pormenorizado construído corresponde à ligação pilar tejadilho mais solicitada (aquela que incorpora o elemento 1456).

Pode-se observar que por efeito da forma da ligação entre os diversos perfis tubulares que convergentes existe uma elevada concentração de tensões:

$$K = \frac{486,5 \text{ (MPa)}}{196,8 \text{ (MPa)}} \Rightarrow K \cong 2,5$$

Todavia, no caso real, a concentração de tensões não deverá ser tão elevada porque os tubos reais possuem as arestas arredondadas e não vivas como no modelo, diminuindo o efeito de penetração pontual.

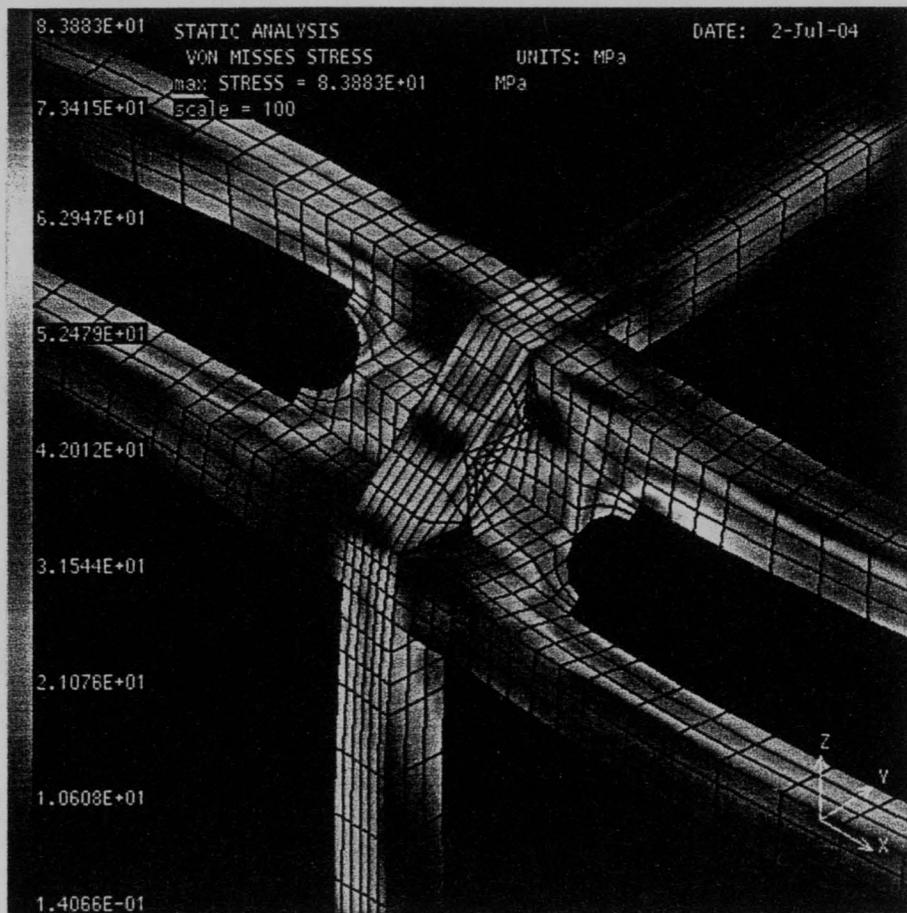


Figura. Modelo pormenorizado da ligação pilar – tejadilho, com aplicação de reforços (visto do exterior)

O modelo pormenorizado da ligação pilar – tejadilho com reforços permite confirmar a diminuição drástica das tensões nos elementos desta ligação, de um máximo de 486,5 MPa para outro máximo de 83,9 MPa.

Mais uma vez verifica-se que existe uma concentração de tensões nos limites da chapa de reforço:

$$K = \frac{83,9 \text{ (MPa)}}{55,9 \text{ (MPa)}} \Rightarrow K \cong 1,5$$

Verifica-se assim que, tal como esperado e em ambos os casos de cálculo, as tensões obtidas por cálculo do modelo global são inferiores às máximas obtidas pelo cálculo do modelo pormenorizado.

Os modelos pormenorizados permitiram confirmar o sucesso da acção de reforço operada, quer pelo abaixamento dos níveis de tensão, quer pelo abaixamento de concentração de tensões.

#### 4.5.3.3 Acção correctiva no chassis

Na análise de resultados identificaram-se elementos do chassis com elevados níveis de tensões. Apesar da não responsabilidade da CaetanoBus sobre o comportamento do chassis, é de todo o interesse analisar uma possível acção correctiva para propor ao fabricante do chassis e, deste modo, melhorar a qualidade do produto. Para além disso, uma possível cedência do chassis, pode pôr em causa a resistência da estrutura da carroçaria e causar conflitos na determinação de responsabilidades.

Elementos envolvidos na zona crítica do chassis								
Elem	Loc.	Sol.	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	nº
22	4	e	-159.82	-9.85	-169.76	18.00	172.59	17º
657	6	e	126.60	21.25	153.35	7.21	153.85	25º
22	3	d	12.05	15.33	34.07	5.07	35.19	1101º
657	8	d	17.83	16.42	34.98	-1.07	35.03	1110º

Tabela. Tensões mais relevantes nos elementos críticos do chassis, antes da aplicação das acções de reforço

Pela análise das tensões envolvidas, nos elementos da zona crítica do chassis (constantes na tabela anterior), verifica-se que a principal solicitação responsável pelo estado de tensão é a flexão. A idealização de uma acção de melhoria visou o aumento do momento de inércia à flexão. Para contrapor esta debilidade propôs-se a aplicação de reforços orientados e localizados, de acordo com o observável na figura seguinte.



Figura. Zona crítica do chassis, com aplicação da solução de melhoria idealizada.

A validação da acção de melhoria idealizada, passou pela adição de elementos placa ao modelo global e análise do seu efeito.

Uma vez que a representação dos elementos é feita ao nível das fibras neutras, os elementos placa adicionados têm uma espessura  $t$ , somente para efeitos de flexão (opção do software) é equivalente ao efeito das duas chapas afastadas de uma determinada distância.

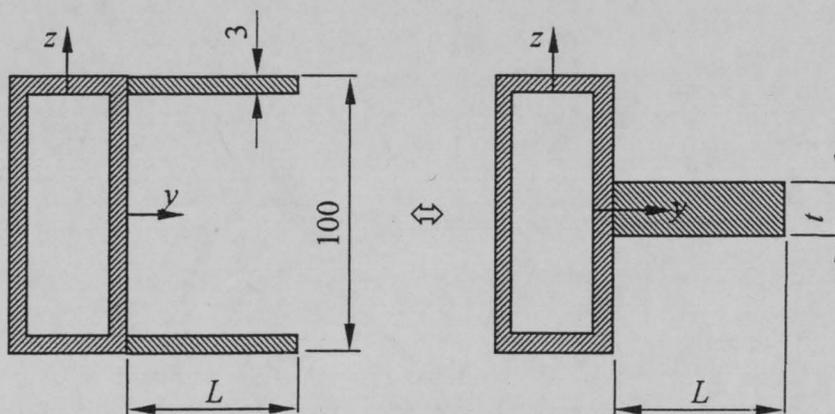


Figura. Cálculo da espessura equivalente da acção de reforço no chassis.

Pela igualdade de momentos de inércia:

$$I_{yy} = 2 \cdot \left( \frac{L \cdot 3^3}{12} + 3 \cdot L \cdot 48,5^2 \right) = \frac{L \cdot t^3}{12}$$

$$\Leftrightarrow 14118 \cdot L = \frac{L \cdot t^3}{12} \Rightarrow t = \sqrt[3]{12 \cdot 14118} = 55,3 \text{ mm}$$

Recalculando o modelo global modificado é possível verificar que as tensões nos elementos envolvidos na zona crítica do chassis baixam de um modo relevante na lista de densidade de tensão. Esta constatação leva a aceitar esta acção de melhoria, como bem sucedida.

Elementos envolvidos na zona crítica do chassis								
Elem	Loc.	Sol.	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	n°
22	3	e	-120.20	-3.81	-127.23	5.90	127.64	28°
3393	3	e	-83.02	-7.32	-94.74	6.32	95.37	125°
657	6	e	52.99	18.90	75.56	-4.32	75.93	257°
3393	8	d	4.74	21.49	28.41	-0.91	28.45	1302°
22	7	d	1.40	4.60	9.60	0.81	9.70	2865°
657	5	d	-7.42	-0.40	-8.01	-0.36	8.03	3066°

Tabela. Tensões mais relevantes nos elementos críticos do chassis, após a aplicação das acções de reforço

#### 4.5.3.4 Verificação das acções de melhoria a nível global

Para além das verificações, caso a caso, das acções de melhoria operadas é necessário verificar que as acções de reforço localizadas não originem agravamentos insustentáveis das tensões noutros elementos. Assim a consolidação do sucesso das acções de melhoria idealizadas é concretizada pela reanálise dos resultados do cálculo sobre o modelo global, após as modificações de melhoria.

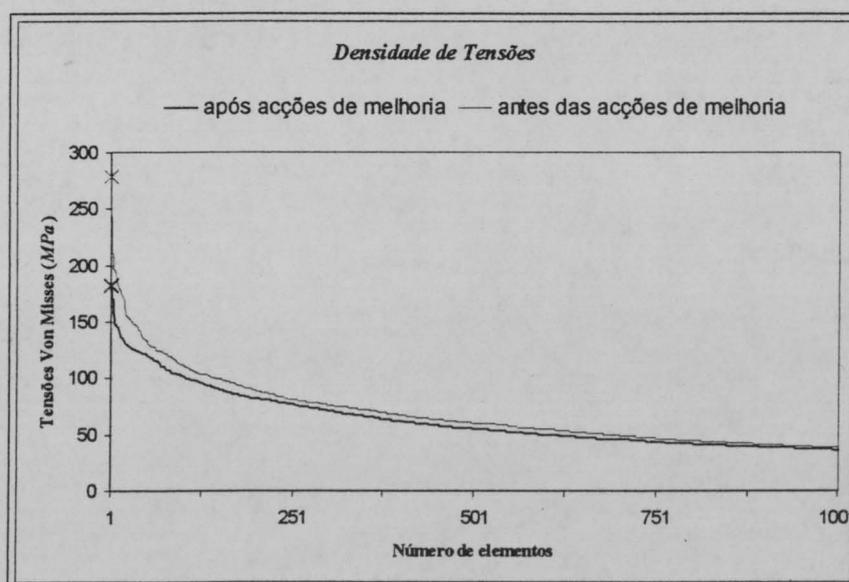


Gráfico. Densidade das tensões de Von Misses, nos elementos, antes e após acções de melhoria

Dos resultados apresentados no gráfico (e constantes do anexo B), alguns valores máximos incluídos correspondem a resultados sobreavaliados, fruto das diferenças entre a estrutura real e o modelo global, já referidas.

Verificou-se que as soluções de reforço idealizadas, atenuam as tensões dos elementos reforçados e que para além de não induzirem agravamentos noutras locais, contribuem para atenuar tensões em outros elementos que estavam sujeitos a tensões elevadas.

#### **4.6 Outros estudos possíveis**

Na busca de um melhor conhecimento e domínio dos fenómenos determinantes da fiabilidade de um produto, muitos outros estudos deste género poderiam ter lugar, quer no âmbito do aqui desenvolvido, quer recorrendo a outros campos de estudo, envolvendo outras tecnologias e debruçando-se sobre diferentes fenómenos.

Enquadrados na área do presente estudo, poder-se-iam ainda incluir nomeadamente, estudos sobre a aferição do programa de cálculo, a optimização estrutural (considerando um conjunto de solicitações prováveis), a consideração do fenómeno da fadiga, a investigação de anomalias estruturais frequentes ou relevantes e ainda a inserção de “fusíveis” mecânicos na estrutura resistente.

Mesmo não vindo a ser feitos estudos noutras vertentes, o trabalho aqui desenvolvido poderá facilitar outros estudos do mesmo género, aproveitando parcialmente o modelo, os conceitos e as metodologias desenvolvidas.

A especialização requerida para a diversidade dos estudos referidos, ultrapassa a área de incumbência do DGE (Departamento de Projecto), ajustando-se mais à área de competência de uma entidade dedicada à Inovação.

## **5 Conclusões**

A utilidade prática do estudo aqui apresentado, leva a concluir que o estágio curricular na CaetanoBus, se revelou benéfico para as partes envolvidas.

Em termos académicos, as actividades realizadas permitiram aprofundar os conhecimentos práticos na aplicação do Método dos Elementos Finitos, sobre um produto complexo real, e também tomar contacto com o funcionamento e a estrutura organizacional de uma grande empresa.

Possibilitaram também conhecer os produtos, os processos e o funcionamento dos grupos de trabalho, bem como a gestão da informação de projecto, da empresa.

Para a CaetanoBus, os resultados do trabalho tiveram aplicação prática imediata num autocarro urbano em início de fabrico, melhorando a qualidade do produto final.

Em termos de projecto a reutilização da ferramenta de cálculo estrutural, para a qual é requerida uma qualificação e dedicação especial, para além de ter permitido validar soluções de projecto contribuiu para fomentar a sua utilização.

O método de abordagem seguido, as dificuldades encontradas e os modos de as ultrapassar, contribuirão certamente para a realização de subseqüentes estudos estruturais.

No entanto a dinâmica de mercado leva cada vez mais as empresas a procurarem respostas imediatas para os seus problemas, recorrendo a soluções expeditas baseadas no seu "know how".

A ocupação de meios humanos internos das empresas em actividades que envolvam conhecimentos teóricos e técnicas sofisticadas é cada vez mais difícil levando a recorrê-las a entidades externas.

É neste contexto que se tornam necessários centros de competência, como é o caso do FEUP e INEGI, que estando a par de novas tecnologias e do estado da arte, podem desenvolver e fornecer conhecimentos inovadores dirigidos às necessidades das indústrias.

## **Lista de Acrónimos e Conceitos**

DGE – Departamento de Projecto da CaetanoBus.

MEF – Método dos Elementos Finitos.

MIG – Mass Inert Gas.

PRFV – Plástico Reforçado com Fibras de Vidro.

CAD3D – Ferramenta de modelação de sólidos.

SAP – Sistema de Apoio à Produção (O SAP é simultaneamente um sistema de base de dados e um gestor informático. Mediante a introdução da informação necessária, processa os MRP's produzindo informação relevante em termos de tempos e quantidades de encomendas de peças. Para além disso o SAP funciona ainda como base de dados relacional, na medida em que permite a listagem das peças que constituem determinado produto.)

Massas não apoiadas na suspensão – são as massas dos próprios elementos da suspensão (molas e amortecedores) mais as massas de todos os componentes que se encontram abaixo desta (como por exemplo: rodados, eixos, e alguns componentes do sistema de travagem).

### **Conceitos de acordo com o software StressLab:**

Propriedades Materiais – São as características associadas à matéria: densidade da matéria; Módulo de elasticidade da matéria; Coeficiente de Poisson; Módulo ao corte e Coeficiente de expansão térmica;

Propriedades Físicas – São os atributos, que definem o comportamento estrutural, associados à geometria de determinada secção resistente;

## **Lista de Referencias**

[A] Roark's Formulas for Stress and Strain

[B] <http://www.osti.gov/dublincore/gpo/servlets/purl/771020-zCUL0x/native/771020.pdf>

(Estudo on-line publicado pela SAE (Society of Automotive Engineers, Inc) intitulado de "Ultralight Satinless Steel Urban Bus Concept")

[C] <http://europa.eu.int/eur-lex/>

(Directivas on-line de veículos motorizados)

[D] [www.iti-cae.com/caelabs/user\\_guide/stresslab](http://www.iti-cae.com/caelabs/user_guide/stresslab)

(Manual on-line do software StressLab)

[E] [www.efunda.com](http://www.efunda.com)

(- enginnering fundamentals - site de princípios e conceitos fundamentais de engenharia)

[F] Norma Portuguesa NP/ISO 9000:2000

(Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário)

[G] Norma Portuguesa NP/ISO 9001:2000

(Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos)

[H] Norma DIN 2395 (Tubos de precisão de aço soldados electricamente com secção rectangular e quadrada)

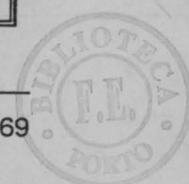
**ANEXO A: Lista de Tensões instaladas antes das acções de melhoria**

Relatório dos 50 elementos com maiores valores de tensões (antes da melhoria)								
Elem	Loc.	Sol.	Y Bending MPa	Z Bending MPa	Comb. Stresses MPa	Tor. Stress MPa	Von Misses Stress MPa	n°
3380	1	d	-36.28	-240.58	-279.34	1.77	279.36	1°
393	5	d	-189.44	-19.80	-210.00	11.80	210.99	
394	6	e	-171.79	-28.89	-209.14	-12.82	210.32	5°
1455	6	d	204.42	3.07	208.10	-16.74	210.11	
1139	1	e	-168.95	-11.18	-196.81	0.06	196.81	5°
1363	1	e	189.74	0.84	195.51	-0.12	195.51	
766	4	d	146.20	39.59	185.90	-34.82	195.43	10°
1453	1	d	-177.18	-12.20	-190.44	-16.31	192.53	
767	5	d	-155.44	-22.76	-179.55	-35.45	189.75	10°
767	8	e	142.74	22.54	169.54	-38.47	182.17	
640	2	e	-27.42	-148.72	-179.81	11.35	180.88	15°
641	3	e	-137.99	-32.74	-178.07	-12.29	179.33	
637	6	d	-28.47	-145.92	-176.98	-10.63	177.94	15°
115	4	e	-162.29	-10.63	-176.87	-5.26	177.11	
1456	8	e	166.44	5.65	173.26	8.16	173.84	15°
269	3	e	149.28	23.89	173.20	-0.41	173.20	
22	4	e	-159.82	-9.85	-169.76	18.00	172.59	20°
766	3	e	129.70	27.37	157.84	-37.77	170.87	
269	3	d	149.15	18.34	167.52	-0.42	167.52	20°
637	8	e	42.70	117.61	160.89	-11.25	162.06	
453	5	d	-127.62	-16.34	-144.94	-36.17	157.90	25°
1457	8	e	137.90	13.68	154.66	1.96	154.70	
1933	6	e	-9.94	-136.32	-153.53	-9.48	154.40	25°
640	2	d	-30.30	-122.41	-153.15	10.66	154.26	
657	6	e	126.60	21.25	153.35	7.21	153.85	25°
422	8	e	-50.44	-102.28	-152.81	4.76	153.03	
403	7	d	-49.18	-90.14	-148.21	-20.50	152.40	30°
2806	5	d	138.43	0.27	152.03	1.28	152.05	
453	8	e	114.88	17.75	134.01	-39.30	150.30	30°
2918	4	e	80.56	68.07	149.57	-0.14	149.57	
2758	5	e	126.91	18.03	148.20	1.27	148.21	35°
2029	5	e	-21.92	-100.56	-147.60	-5.54	147.91	
638	7	d	-106.65	-32.08	-146.02	12.73	147.68	35°
1806	6	e	-5.10	-134.21	-147.14	0.93	147.15	
114	3	e	-106.59	-33.93	-146.54	1.11	146.55	35°
80	4	e	-86.31	-48.51	-145.90	0.79	145.90	
642	5	e	5.05	137.38	145.24	7.74	145.86	40°
1636	3	e	65.29	77.43	144.42	-2.76	144.50	
647	5	d	27.76	113.53	142.65	6.52	143.09	40°
1140	8	e	-134.50	-2.83	-142.14	0.14	142.14	
650	1	e	28.01	112.25	141.61	-5.97	141.99	45°
1167	1	e	13.08	127.79	141.46	-4.62	141.69	
2750	4	e	99.30	36.20	138.30	-2.55	138.37	45°
423	8	e	-53.43	-82.47	-136.38	-1.44	136.41	
2757	3	e	125.38	6.48	135.04	1.11	135.06	45°
2053	7	e	21.02	109.51	132.69	14.32	134.99	
1851	3	d	40.56	79.33	134.49	4.67	134.73	50°
205	5	d	-81.01	-25.99	-120.44	-33.80	133.92	
2760	7	e	-104.90	-21.03	-133.59	0.19	133.59	50°
2805	3	d	115.30	4.60	133.17	1.28	133.18	

Sol.

- e - Com a roda da frente esquerda não apoiada
- d - Com a roda da frente direita não apoiada

	- Pertencentes ao estrado
	- Pertencentes ao chassis
	- Pertencentes ao tejadilho;





UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu



*Mais Educação*



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000091289



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu



Mais Educação