

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA

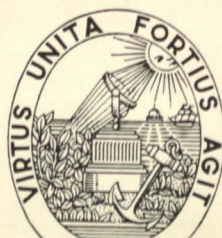
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

- Opção de Materiais e Processos de Fabrico, Edição 92/93 -

A Segurança Passiva Contra o Capotamento

Mário Filipe Dias Fernandes

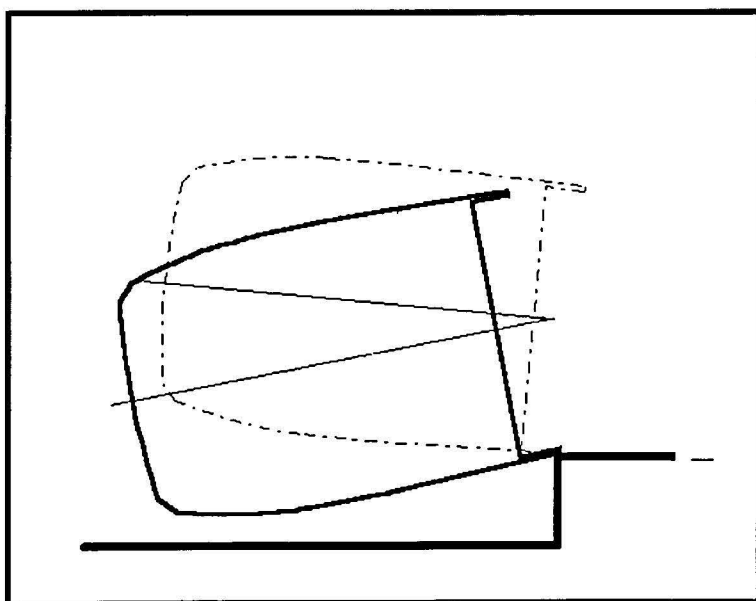
Outubro 1996



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

- Opção de Materiais e Processos de Fabrico, Edição 92/93 -



Tema de Dissertação

A Segurança Passiva Contra o Capotamento

621(042)FCRM/SEG

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTEC.
N.º 13914
CDU
Data 31.10.1997

Mário Filipe Dias Fernandes

Outubro 1996

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	2
2	ESTADO DA ARTE.....	4
3	PROJECTO DOS PÓRTICOS DA ESTRUTURA DE AUTOCARROS RESISTENTES AO CAPOTAMENTO.....	3
3.1	SECÇÕES RESISTENTES DO PÓRTICO.....	7
3.2	DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE FLEXÃO.....	8
3.3	CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS PERFILADOS E DAS ZONAS DE DESCONTINUIDADE LOCAL.....	10
3.4	MODOS DE DEFORMAÇÃO DO PÓRTICO E ENERGIA CORRESPONDENTE.....	14
3.5	CURVA F/δ DO PÓRTICO.....	20
3.6	PROPRIEDADES FÍSICAS DO MÓDULO DE ENSAIO.....	22
3.7	MODELAÇÃO DO ENSAIO DE CAPOTAMENTO..... - Simbologia utilizada -	23
3.7.1	Fase 1 - ROTAÇÃO SIMPLES.....	26
3.7.2	Fase 2 - ROTAÇÃO COM DESLIZAMENTO.....	30
3.7.3	Fase 3 - QUEDA LIVRE.....	34
3.7.4	Fase 4 - IMPACTO COM O SOLO.....	36
3.7.5	Fase 5 - DEFORMAÇÃO PROGRESSIVA.....	40
3.7.6	Fase 6 - RECUPERAÇÃO ELÁSTICA E IMOBILIZAÇÃO.....	48
3.7.7	EFEITOS DA VARIAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS INICIAIS.....	49
3.8	MÓDULO DE ENSAIO - TESTE DE VALIDAÇÃO.....	53
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
5	BIBLIOGRAFIA.....	57

1 INTRODUÇÃO

Numa altura em que cada vez mais, se valoriza a componente ecológica da utilização dos recursos, o transporte colectivo de passageiros toma especial relevância pelo seu baixo índice de consumo e de degradação, dos meios e bens, por utilizador.

Na grande fatia que corresponde ao transporte colectivo terrestre, o autocarro destaca-se pela sua versatilidade no estabelecimento de novas carreiras e percursos.

De facto não necessita de infraestruturas especiais para as tomadas e saídas de passageiros e mantém uma elevada segurança e razoável comodidade a baixo custo.

No que diz respeito à segurança e apesar do pequeno índice de acidentes envolvendo feridos com autocarros de passageiros, qualquer desastre com este tipo de veículo tem um grande impacto na opinião pública, tendente a desacreditar a segurança desta opção de transporte.

Estimativas, sobre acidentes envolvendo autocarros, apontam para cerca de 6%, os casos que envolvem capotamento, sendo no entanto responsáveis por 40% de vítimas com ferimentos graves ou mortais.

A consciência destes factos, levou a que a Organização das Nações Unidas, através da E.C.E., desenvolvesse legislação que proporcionasse uma diminuição da gravidade dos danos causados aos ocupantes de veículos de transporte de passageiros, em caso de capotamento.

Assim, nasceu o Regulamento 66 da E.C.E. em 1 de Dezembro de 1986, entrando em vigor no Reino Unido e em Espanha, e prevendo-se que venha rapidamente a estender-se a toda a Comunidade Europeia.

A segurança passiva contra o capotamento prevista neste regulamento, tem como objectivo garantir um valor de resistência mínimo, para a estrutura envolvente do compartimento dos passageiros.

Para o efeito, define um espaço de sobrevivência, que deverá continuamente ser garantido, durante a submissão da estrutura do veículo a determinadas condições de capotamento padrão.

Opcionalmente prevê a comprovação deste requisito, pela demonstração da aptidão da estrutura para dissipar um determinado valor de energia, considerado equivalente ao posto em jogo nas mesmas condições de capotamento padrão.

Esta energia a dissipar sem que a deformação estrutural invada o referido espaço de sobrevivência, deverá resultar da aplicação de uma força, sob um determinado ângulo, ao nível superior do painel.

Com base nestes pressupostos, o Reg. 66 aceita a comprovação por cálculo ou por teste de validação prático.

O teste baseado na dissipação de energia prevê a utilização de um pêndulo de grandes dimensões com um volume de atravancamento demasiado oneroso, para as utilizações esporádicas de uma única empresa de construção de autocarros.

Os testes mais utilizados são os que procuram reproduzir o ensaio de capotamento padrão, pois para além de exigirem um equipamento mais simples, contemplam determinadas nuances, da dinâmica real dos veículos neste tipo de acidentes, que segundo a convicção geral, permitem para a mesma solução estrutural, uma melhor dissipação da energia.

O ensaio de capotamento, pode ser efectuado com um veículo completo, ou apenas com a sua estrutura, ou ainda, com um módulo correspondente a um sector longitudinal representativo.

Apesar de existir também a convicção, que o capotamento de um veículo completo, é mais favorável, em termos de capacidade de absorção de energia, que a utilização de um módulo representativo, os elevados custos que tal ensaio implicam, relevam esta opção, para os casos em que se pretende, por motivos de “marketing”, tirar partido da sua espectacularidade.

O ensaio de capotamento de um módulo, é pois a opção mais cómoda, e dado o grau de liberdade que o regulamento permite relativamente a alguns parâmetros da sua implementação, torna-se importante o estudo dos efeitos destes, no resultado final do ensaio.

Para este tipo de teste, o Reg.66 da E.C.E. prescreve que o módulo seja deixado cair, por capotamento lateral, do cimo de uma plataforma situada 800mm acima do solo de impacto.

É exigido também, que a altura do C.G. (centro de gravidade) corresponda ao do veículo real, bem como que o seu peso seja correspondente à porção de estrutura que representa.

A Rev.1 / Add. 65 de 30 de Janeiro de 1987 do referido regulamento em vigor, nada refere acerca da distribuição da massa do módulo, nem do seu momento de inércia longitudinal. Tão pouco refere as condições de atrito da superfície de embate, embora exija que deva ser de betão ou de outro material rígido.

O trabalho teórico, aqui exposto, pretende ser um método de aproximação das soluções construtivas, destinadas a serem ensaiadas segundo este último teste, permitindo um ganho em tempo e em número de tentativas de validação, e logo evidentes proveitos económicos.

É certo que, com os mesmos objectivos, existem alguns programas de cálculo reconhecidos como válidos para a comprovação da conformidade com o Reg. 66 da E.C.E., como é o caso do SIMSTAT desenvolvido no Cranfield Impact Centre no Reino Unido, mas a filosofia em que se baseiam reside na determinação da capacidade de dissipação da energia, prescrita pelo regulamento.

Também pelas mesmas razões do ensaio de pêndulo, é convicção geral que estes cálculos, conduzem a resultados demasiado conservadores, relativamente aos ensaios práticos de capotamento, para além de implicarem o estabelecimento de contratos, com as entidades peritas na utilização desses programas (geralmente estrangeiras), que acarretam alguma perda de rapidez de resposta, nomeadamente por razões de comunicação. Além disto, nem sempre, nestes casos, é dispensado o ensaio prático de validação.

2 ESTADO DA ARTE

O problema da segurança passiva em autocarros, começou a tornar-se uma preocupação internacional na década de 70. O GRSA (grupo de especialistas em segurança de autocarros, ECE/WP29 Genebra) começou a trabalhar em duas principais vertentes: o capotamento lateral de autocarros (requisitos de resistência da superestrutura) e o impacto frontal (resistência de bancos e sua ancoragem). Os objectivos deste grupo eram produzir legislação internacional, para aprovação tipo de autocarros.

O primeiro passo importante foi a obtenção de dados estatísticos relativos a acidentes com este tipo de veículos. Desde logo surgiu a evidência da perigosidade do capotamento lateral, o qual ocupou o segundo lugar da tabela, logo atrás da colisão com combóios.

Um segundo passo foi a definição de um acidente padrão baseado em evidências estatísticas tecnicamente bem definidas com condições de reprodutibilidade e aceitável pela sociedade em termos de severidade.

Deste trabalho surgiu o Reg. 66 da E.C.E. que estabelece como acidente padrão, o capotamento lateral do veículo completo, mas sem ocupantes, do cimo de uma plataforma de 800mm de altura.

Como já atrás foi dito, este regulamento prevê a sua aprovação de conformidade por um dos seguintes métodos:

- Teste de capotamento de um veículo completo;
- Teste de capotamento de uma secção representativa do veículo;
- Teste de pêndulo de uma secção representativa do veículo;
- Cálculo.

Diversos estudos (vêr ref. cap. 5), têm sido feitos no sentido da compreensão dos vários mecanismos envolvidos no comportamento da superestrutura ao capotamento.

Para a modelação teórica de rótulas plásticas formadas em secções tubulares submetidas a esforços de flexão combinada, existem vários trabalhos desenvolvidos por especialistas (vêr ref. cap. 5, nom.: D. Kecman - CIC-U.K., M. Matolcsy - R.I.A.I., Budapeste), passíveis de serem utilizados em programas de cálculo. No entanto, nesses mesmos trabalhos se comprova que frequentemente o colapso ocorre nas zonas de descontinuidade das secções resistentes, para as quais se torna impossível extrapolar resultados ou ter uma biblioteca exaustiva. O ensaio prático das características locais destas zonas continua pois indispensável.

Para a modelação do colapso global da superestrutura, (sequência de formação de rótulas e consequente deformação geométrica e energia dissipada), existem já desenvolvidos e comercializados programas específicos aceites pelas entidades homologadoras, como é o caso da família de programas CIC-SIM.

Assim sendo, a análise teórica global do problema começa a estar facilitada.

3 PROJECTO DOS PÓRTICOS DA ESTRUTURA DE AUTOCARROS RESISTENTES AO CAPOTAMENTO

O trabalho que se segue, descreve uma metodologia para a abordagem do problema do projecto dos pórticos da estrutura, de um autocarro resistente ao capotamento.

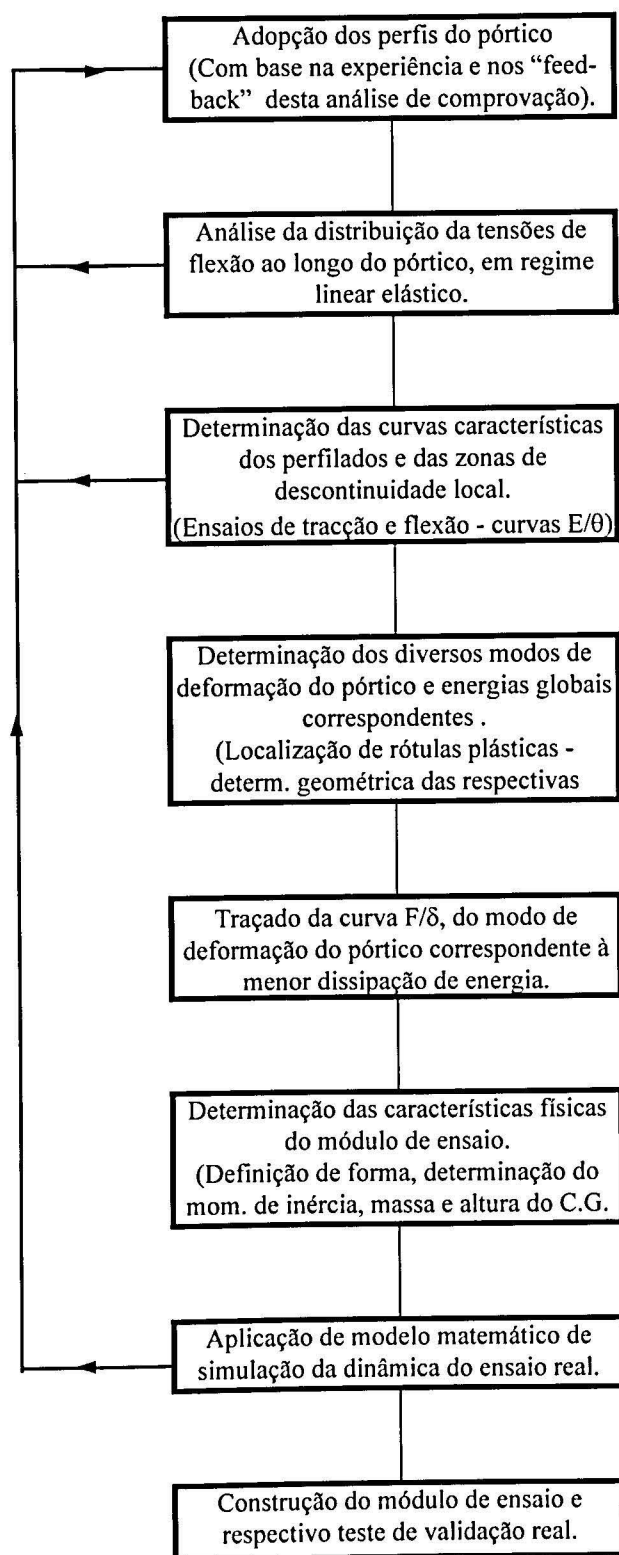
Muitas das ferramentas, processos e conceitos aqui descritos foram desenvolvidos e utilizados no âmbito de projectos de cooperação entre Salvador Caetano SA e o INEGI - FEUP. De entre estes destaca-se o protocolo que visou o projecto e a construção da primeira carroçaria de autocarro de fabrico português, e uma das primeiras da Europa, homologada segundo o Reg. 66 da E.C.E., a qual vem sendo comercializada por aquela empresa com a designação genérica de modelo DELTA.

O projecto referido, participado pelo PEDIP, contou também com a participação do Centro de Aerodinâmica da Universidade de Coimbra para os temas relativos à aerodinâmica de veículos.

Neste projecto, para além análise de outros aspectos técnicos, como a resistência à fadiga e o estudo da aplicabilidade de novos materiais e processos de fabrico, o INEGI colaborou intensamente na resolução do problema da conformidade com o Reg. 66 da E.C.E..

Neste sentido foram usadas, nomeadamente, ferramentas de análise de resistência por elementos finitos e o programa SIMSAT específico para o estudo do fenómeno do capotamento, desenvolvido pelo CIC (Cranfield Impact Centre) e reconhecido em Inglaterra como válido para a homologação segundo o referido regulamento.

De todo o conhecimento adquirido quer nos projectos referidos quer no decorrer dos trabalhos desenvolvidos no âmbito deste tema de dissertação, ressalta uma sequência de abordagem das principais fases de projecto da estrutura de autocarros resistentes ao capotamento lateral, que é resumida esquematicamente no fluxograma apresentado na página seguinte.



3.1 SECÇÕES RESISTENTES DO PÓRTICO

O dimensionamento e a selecção dos materiais, dos perfis que constituem os anéis resistentes envolventes do espaço reservado aos ocupantes do autocarro, são numa primeira fase de projecto o resultado do histórico de fabrico e do conhecimento do seu respectivo comportamento em serviço em veículos do mesmo tipo.

Como referências complementares existem ainda os diversos resultados de ensaios efectuados com soluções estruturais usadas correntemente e com protótipos. Estes ensaios abrangem quer sectores representativos da globalidade da carroçaria (ensaios de capotamento), quer pormenores locais de zonas reforçadas ou de ligações de perfis (ensaios de flexão de modelos) quer troços simples dos perfis base e do material que os constitui (ensaios de flexão de troços e de tracção de provetes).

Estruturas não concebidas segundo objectivos de segurança passiva ao capotamento, evidenciam as fraquezas dos antigos princípios construtivos, virados principalmente para aspectos como o da facilidade do fabrico, resistência às solicitações de serviço, leveza da estrutura e disponibilidade de mercado dos materiais de construção.

A evolução dos trabalhos de projecto, que a seguir se descrevem, comprovará ou não as soluções avançadas, permitindo iterativamente corrigi-las.

3.2 DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE FLEXÃO

Aquando da deformação da carroçaria, como consequência das condições de capotamento padrão previstas no Reg. 66 da E.C.E., são as tensões de flexão geradas nos aros envolventes da zona do habitáculo, que condicionam o comportamento global da estrutura envolvente, do espaço residual vital para os ocupantes do veículo.

A sua distribuição ao longo de cada aro, ditará os locais onde se irão produzir as rótulas plásticas que regerão o modo de colapso da mesma.

O seu conhecimento prévio permite, reforçar ou substituir os perfis previstos, de modo a evitar fraquezas locais. Estas, para além de reduzirem a capacidade de resistência global, não permitem que outras zonas mais resistentes, (normalmente mais massivas,) ponham em jogo toda a sua capacidade, contribuindo apenas para aumentar o peso da estrutura.

Teoricamente, o ideal seria constituir um aro que se aproximasse de um corpo de igual resistência à flexão mas tal objectivo não é compatível com a utilização de perfilados de mercado e só seria possível recorrendo a perfis estampados ou moldados. No corrente projecto no entanto, apenas será abordada a opção tradicional do uso de perfis tubulares de mercado.

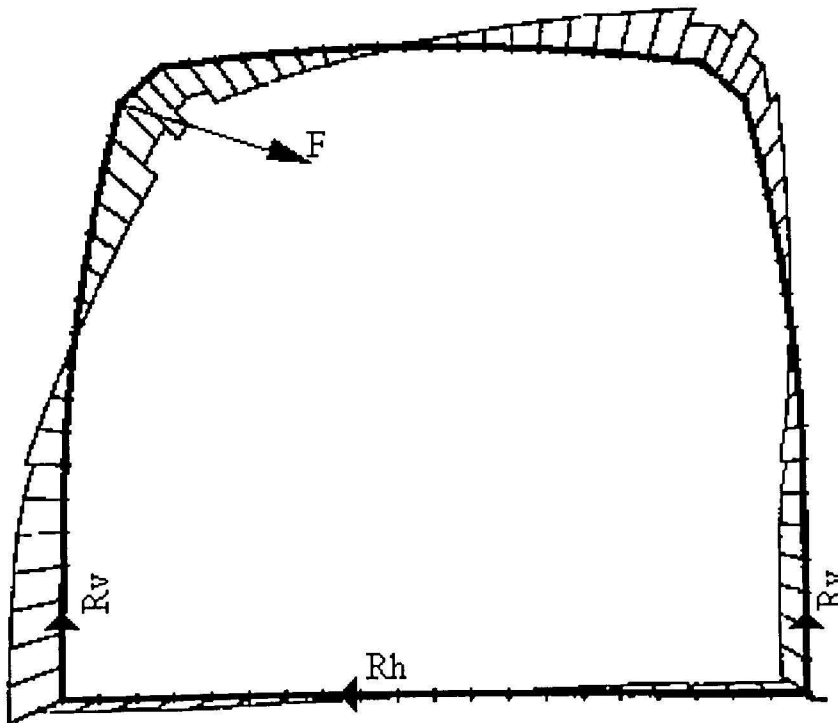


Diagrama de distribuição de tensões de flexão em regime elástico, (do cálculo por elementos finitos de um pórtico de estrutura de autocarro respeitando o Reg. 66 da E.C.E.)

Assim sendo, o dimensionamento procura evitar a formação precoce de rótulas plásticas, antes de se atingir um razoável nível global de solicitação do pórtico. Isto é conseguido, tentando que as quatro rótulas do mecanismo de deformação, se produzam o mais simultaneamente possível, ou seja, procurando-se que durante a fase de deformação elástica, os níveis de tensão dos quatro pontos mais solicitados do pórtico, (onde provavelmente se irão criar as rótulas plásticas,) sejam idênticos.

Para além desta contribuição para a optimização do dimensionamento da estrutura, os resultados desta análise servem para a definição conveniente das condições de teste à flexão de modelos de troços do aro, de forma a reproduzirem as mesmas condições de distribuição de tensões, como a seguir se verá.

Esta análise de distribuição de tensões pode realizar-se admitindo a aplicação de uma força unitária na transição pilar tejadilho com uma orientação relativa aproximadamente igual à da reacção exercida pelo pavimento, na posição correspondente ao impacto com o solo. O modelo de cálculo poderá resumir-se ao aro resistente fixado verticalmente pela base dos painéis e horizontalmente no centro do pavimento.

A figura acima representa um caso de distribuição de tensões ao longo dum pórtico, obtido como resultado de um cálculo por elementos finitos em regime elástico de uma estrutura conseguida, em termos de conformidade com o Reg. 66 da E.C.E.

Como pode verificar-se existem oito pontos onde a tensão de flexão atinge um máximo: bases dos pilares, zona média dos pilares ao nível inferior das janelas, nível superior dos pilares e extremidades do tejadilho.

O conhecimento destes locais, permite também inferir sobre a localização das rótulas plásticas e consequentemente sobre o modo de colapso global, como mais adiante se verá.

3.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS PERFILADOS E DAS ZONAS DE DESCONTINUIDADE LOCAL

Como já atrás foi dito (cap.2 - Estado da Arte), existem publicados diversos trabalhos de especialistas na matéria, (ref. cap. 8,) onde são desenvolvidos métodos de cálculo e compilados dados, relativos ao comportamento à flexão plástica de perfis e de algumas ligações típicas utilizadas em carroçarias de autocarros. No entanto, aqueles tratados estão longe de serem exaustivos e, em termos de rigor, de serem preferíveis aos ensaios reais para cada caso particular.

Sempre que existam condições para a sua realização, os ensaios reais locais devem ser realizados. Estes permitem simultaneamente avaliar outros aspectos como sejam, por exemplo, a consistência das ligações, o efeito dos reforços utilizados, o efeito da orientação da linha de costura de tubos e outros eventualmente não previstos.

Previamente aos ensaios de flexão, deve proceder-se à determinação das características mecânicas do material base recorrendo, nomeadamente, ao ensaio de tracção. Aquele deve ser tomado de vários lotes de origens diferentes, com vista à selecção do que tiver características mais próximas dos mínimos de norma.

No caso de não se encontrarem lotes nesta situação, devem as características obtidas passar a estabelecer os novos limites de aceitação dos respectivos materiais. Recorde-se que muitos dos requisitos de norma referentes à aceitação de materiais, como nomeadamente no caso do st37-2, são mínimos e que não é raro acontecerem fornecimentos desta qualidade de material que se afastam positivamente bastante daqueles valores. Mesmo no que diz respeito à espessura de chapa dos perfilados, a sua variação autorizada por norma ($\pm 10\%$) é de molde a fazer variar de modo significativo o comportamento dos mesmos.

As curvas características que se apresentam de seguida referem-se a tubos rectangulares com costura com qualidade de material st37-2 e características mecânicas de acordo com o acima referido, confirmadas por ensaios de tracção efectuados sobre provetes extraídos dos mesmos.

Os ensaios de flexão foram efectuados em máquina de ensaio de tracção universal pertencente ao Laboratório da Qualidade da Divisão Fabril de Gaia da empresa de carroçarias Salvador Caetano I.M.V.T. - S.A. no âmbito dos estudos preliminares que, como foi já referido, levaram à construção das primeiras carroçarias portuguesas certificadas pelo Reg.66 da E.C.E..

A forma dos provetes de teste foi projectada de molde a permitir a utilização dos pontos de cavilhamento normalmente utilizados para os mordentes da máquina e uma distribuição de tensões ao longo dos perfis, idêntica à determinada no cálculo por elementos finitos atrás referido (3.2 - Distribuição das tensões de flexão).

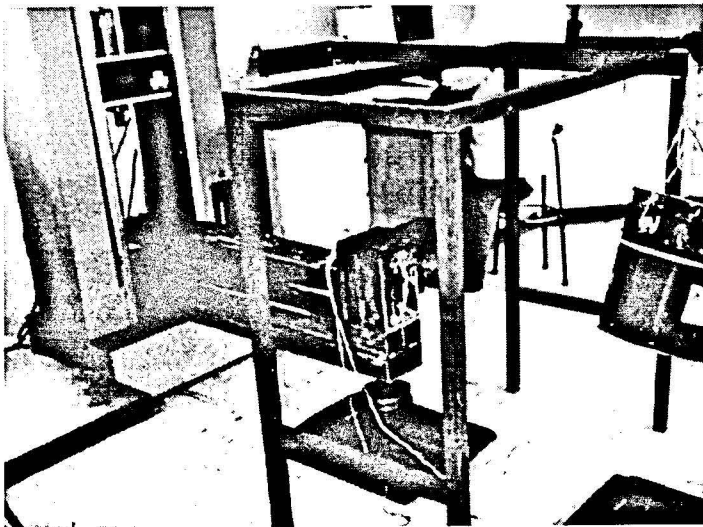
Em termos gerais, os provetes tiveram a forma de "U" deitado, sendo uma das pernas correspondente ao perfil ou à solução construtiva a ensaiar e a outra um corpo auxiliar de rigidez elevada (deformação desprezível).

A fixação à máquina foi feita por um furo em cada extremidade das pernas dos provetes, de modo a permitir a sua articulação durante o ensaio.

O comprimento das pernas, no caso dos ensaios de soluções construtivas, foi fixado de modo a que a cavilhamento se efectuasse a uma distância correspondente à

dos pontos, onde no aro resistente envolvente do habitáculo do veículo, se dá a inversão das tensões de flexão e por conseguinte apenas existem esforços cortantes.

A zona dos provetes onde se dá a junção do corpo a ensaiar e do corpo rígido



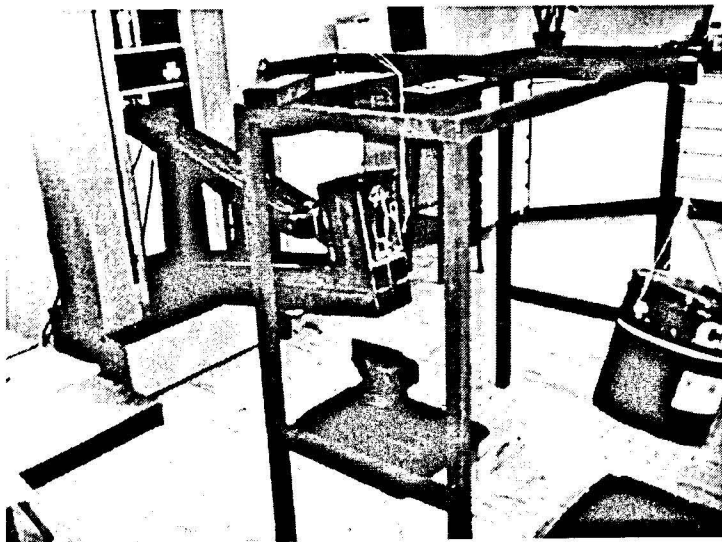
auxiliar, projecta-se para fora da máquina, pelo que o seu peso teve de ser equilibrado por um sistema de contrapeso com cabo e roldanas, de modo a não solicitar radialmente o eixo de ensaio da máquina.

A velocidade da máquina foi seleccionada para o seu máximo (500mm/min).

Os resultados foram automaticamente registados em ficheiro, sob a forma de tabela de duas colunas, força e deslocamento, com uma periodicidade geradora de uma superabundância de dados.

Só foram aceites como válidos os resultados que provieram da formação de rótulas plásticas sem indícios de roturas de material. Assim sendo, sempre que se

manifestaram inícios de roturas de ligações ou de soldaduras de reforços as soluções de projecto foram alteradas.



Após os ensaios, foram localizados dimensionalmente os pontos de formação das rótulas plásticas relativamente aos pontos de amarração.

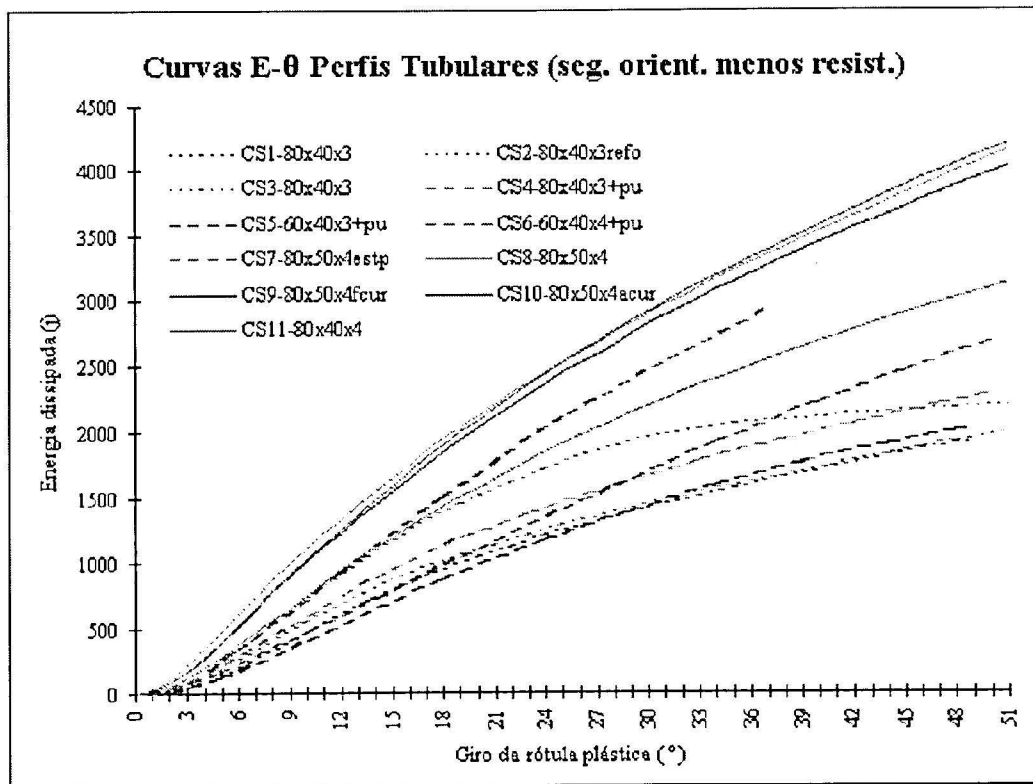
Estes dados permitiram, por fórmulas do tipo das que regem os mecanismos de viela-manivela, a conversão das tabelas força-deslocamento

em tabelas momento-ângulo ($M-\theta$) e energia-ângulo ($E-\theta$), sendo que este ângulo é o de rotação da rótula plástica.

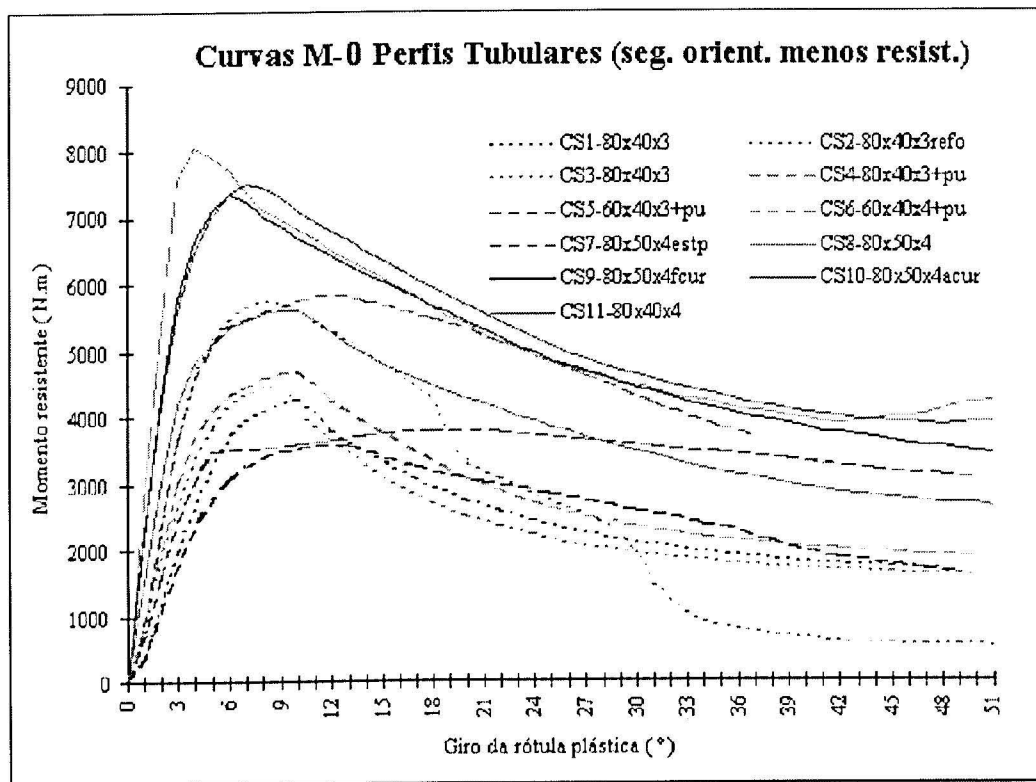
Os dois primeiros gráficos representam os resultados de ensaios efectuados com troços simples de tubos de diversas dimensões correntemente utilizadas na construção de carroçarias de autocarros.

A orientação das secções resistentes, corresponde à solicitação do eixo de inércia de menor resistência, (em conformidade com a orientação na estrutura do pórtico, por imposição de atravancamento).

O primeiro gráfico representa a variação do momento resistente com o ângulo de rotação da rótula plástica formada.



O segundo gráfico representa o acumulado da energia dissipada na deformação.



No ensaio CS2, foi testado o mesmo tubo dos ensaios redundantes CS1 e CS3, (TB 80x40x3) mas reforçado pelo interior de uma das faces de 80mm, com chapa de 4mm (soldada por enchimento de furos) e na face oposta reforçado pelo exterior com chapa de 3mm (soldadas por cordões de canto descontínuos aplicados nos bordos longitudinais). Esta configuração correspondia a um reforço em estudo, para aplicação nas zonas mais esforçadas da parte superior do pórtico. Este ensaio (CS2) teve um comportamento de colapso atípico, mas mais resistente na amplitude angular útil.

Os ensaios CS4, (TB 80x40x3), CS5 (60x40x3) e CS6 (60x40x4), destinaram-se a avaliar o efeito do enchimento do interior de tubos com poliuretano expandido de alta densidade. Como se pode comprovar no tubo de 80x40x3, o efeito do poliuretano é desprezível. Também devido à maior instabilidade à compressão da face de 80mm o tubo de 60mm portou-se quase de igual modo que o correspondente de 80mm, à excepção da fase inicial da deformação plástica.

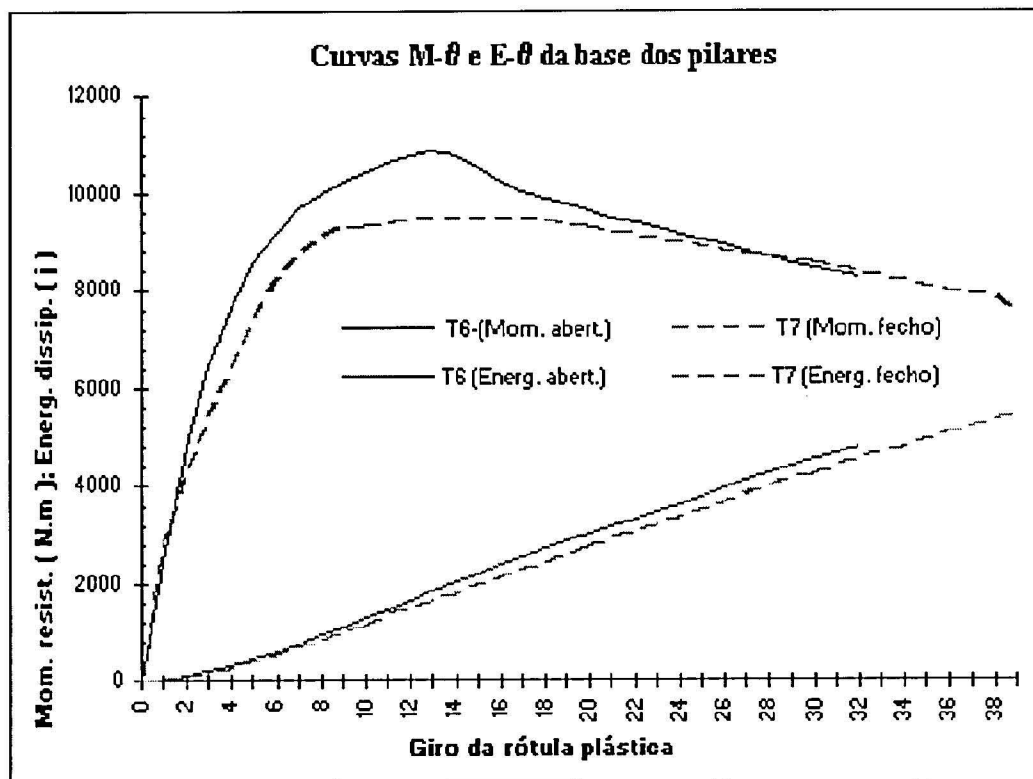
O ensaio CS7, (TB 80x50x4) foi efectuado com um perfil composto pela soldadura de 2 “Us” de 80x25x4 soldados em contínuo e o seu comportamento foi medíocre por plastificação rápida das faces soldadas.

O ensaio CS8, (TB 80x50x4) representa o comportamento típico deste perfil.

Os ensaios CS9 e CS10 também com a mesma secção nominal, destinaram-se a avaliar o efeito da calandragem ligeira, utilizada na conformação das vigas transversais do tejadilho de autocarros, respectivamente no sentido do fechar e do abrir dessa curvatura prévia. Apesar da pequena redução de altura motivada pela calandragem o comportamento não diferiu muito do caso CS8.

Por último o ensaio CS11, (TB 80x40x4) representa o comportamento típico do perfil respectivo.

Os resultados apresentados no gráfico seguinte, dizem respeito a um tipo de ligação pilar-travessa do pavimento, estudada e utilizada como referência para a aplicação desta metodologia de projecto.



O pilar em causa tinha uma secção variável, aumentando do nível da janela até à base pela aplicação de um “U” de reforço ligeiramente inclinado, soldado pelo interior.

A travessa do pavimento tinha uma consistência superior à base reforçada do pilar.

O colapso plástico deu-se cerca de 100mm acima do pavimento por intrusão das paredes do tubo ou do “U”.

O ensaio T6, diz respeito à deformação no sentido de aumentar o ângulo com o pavimento, ou seja correspondente à deformação do pilar para o exterior do habitáculo.

O ensaio T7 diz respeito à deformação contrária aquela, ou seja, idêntica à que no veículo em capotamento tem lugar nos pilares do lado que choca com o solo, ou seja corresponde à deformação para o interior do habitáculo.

Não são apresentados resultados da ligação pilar-tejadilho, pois neste local deve procurar-se que as deformações plásticas tenham lugar fora das secções complexas, e por conseguinte, os ensaios desta zona apenas se destinam a comprová-lo. As rótulas da parte superior do pórtico, têm pois as características dos perfis base.

3.4 MODOS DE DEFORMAÇÃO DO PÓRTICO E ENERGIA CORRESPONDENTE

O colapso do aro envolvente do habitáculo destinado aos ocupantes do autocarro, dá-se pela formação de um mecanismo envolvendo a criação de rótulas plásticas no pórtico constituído pelos troços laterais e superior.

A sequência da formação de rótulas e as suas localizações são condicionadas às correspondentes secções onde na decorrência da deformação global se vão atingindo as tensões de cedência do material.

Pela análise da distribuição das tensões elásticas de flexão ao longo do pórtico, verificou-se existirem oito pontos onde as tensões atingem um máximo: bases dos pilares, zona média dos pilares ao nível inferior das janelas, nível superior dos pilares e extremidades do tejadilho.

Como se sabe para a transformação de um pórtico num mecanismo bastam existirem quatro rótulas.

Duas delas localizar-se-ão forçosamente nas transições pilar tejadilho por serem os locais onde as tensões são as mais elevadas. Existe no entanto a incógnita, se terão lugar na extremidade do pilar ou na do tejadilho.

As outras duas rótulas, uma em cada pilar, ou terão lugar na base ou ao nível inferior das janelas.

Assim sendo, foi feita uma esquematização gráfica das várias combinações possíveis, e determinados os ângulos de rotação correspondentes em cada rótula, admitindo uma deformação global até ao limite do espaço residual de sobrevivência, previsto pelo Reg. 66 da E.C.E..

Foi também prevista uma localização suplementar das rótulas superiores, nos pequenos troços de ligação entre os pilares e o tejadilho, embora os ensaios destas transições não tenham reflectido esta possibilidade (Modos 17 a 20).

Atendendo aos resultados dos ensaios de flexão atrás apresentados foi possível determinar a energia de deformação global correspondente a cada modo de deformação, para o caso do pórtico utilizado no ensaio real de referência.

Neste caso o menor valor corresponde ao “Modo 14”, com uma dissipação total de 6612 J, logo seguido do “Modo 16” com 6900 J, do “Modo 13” com 7444 J” e do “Modo 8” com 7731 J. Os restantes modos implicam energias de deformação que se afastam muito desta gama de valores, pelo que correspondem a mecanismos de formação de rótulas improváveis para as características da estrutura analisada.

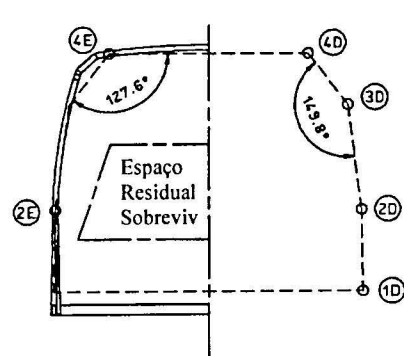
Estes modos de deformação têm como factor comum a localização de duas das rótulas no pilar do lado do impacto com o solo, sendo uma ao nível da extremidade superior (3E) e outra ao nível da base (1E), para os três primeiros modos e ao nível inferior da janela (2E), para o “Modo 8”.

Do outro lado do pórtico, a localização da rótula superior situa-se na extremidade do tejadilho (4D) para os “Modos 14, 16 e 8” e na extremidade superior do pilar para o “Modo 13”.

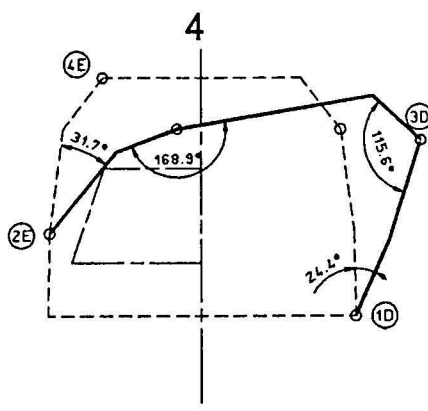
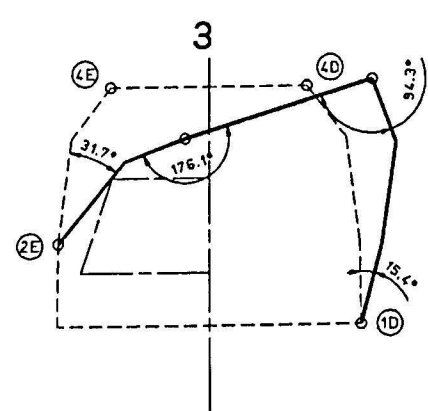
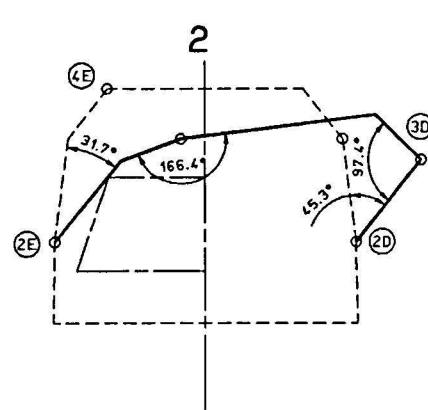
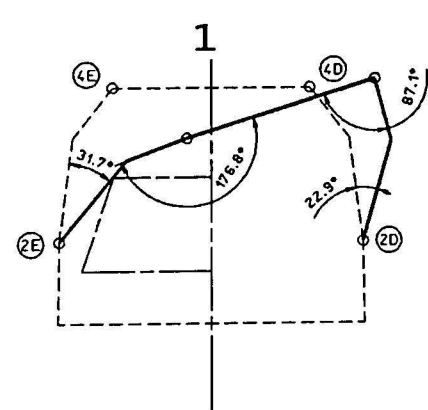
Quanto à rótula inferior, também do lado oposto, a sua localização é a base do pilar para os “Modos 14, 13 e 8” e o nível inferior da janela para o “Modo 16”.

Assim sendo, é de esperar que a deformação real se localize preferencialmente nestes pontos e a energia dissipada seja da ordem de grandeza determinada.

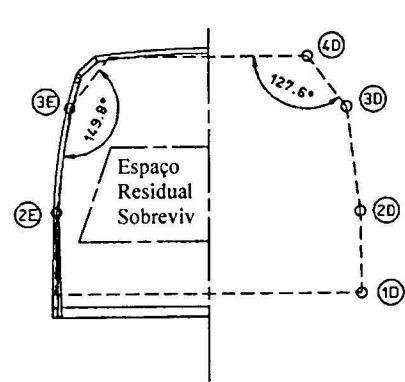
MODOS DE DEFORMAÇÃO 1-4



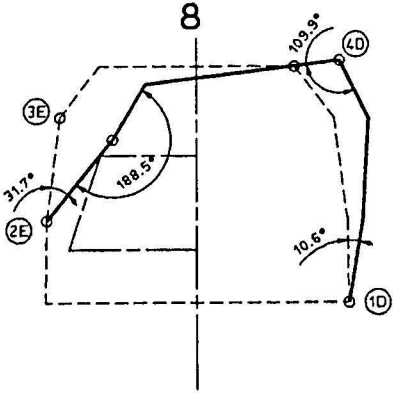
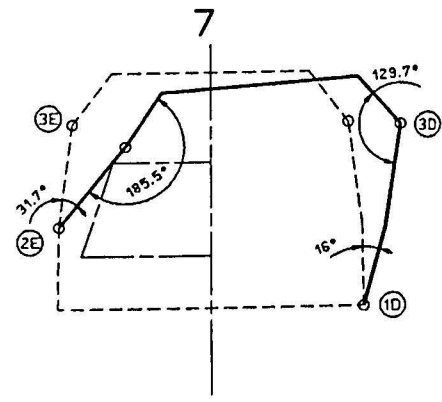
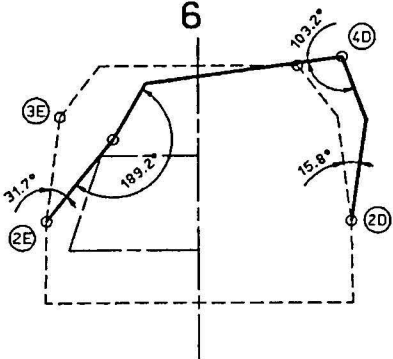
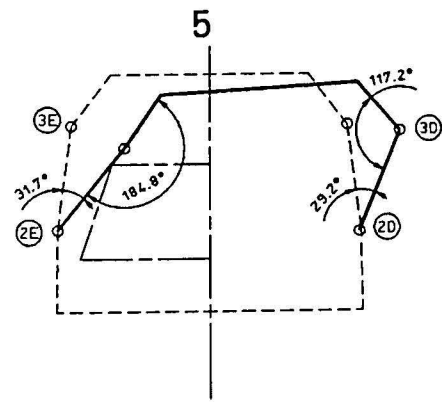
ótul	Curv Ref.	Modo 1		Modo 2		Modo 3		Modo 4	
		Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)
2E	CS11	31.7	2293	31.7	2293	31.7	2293	31.7	2293
4E	CS11	49.2	3067	38.8	2636	48.5	3040	41.3	2748
1D	T6	-	-	-	-	15.4	2280	24.4	3733
2D	CS11	22.9	1771	45.3	2914	-	-	-	-
3D	CS11	-	-	52.4	3190	-	-	34.2	2418
4D	CS11	40.5	2713	-	-	33.3	2375	-	-
Σ		9844		Σ	1103	Σ	9988	Σ	1119



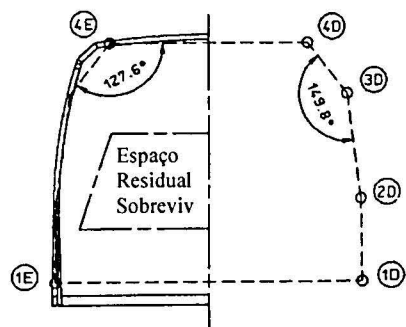
MODOS DE DEFORMAÇÃO 5-8



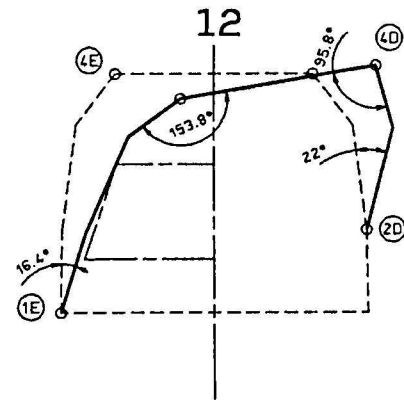
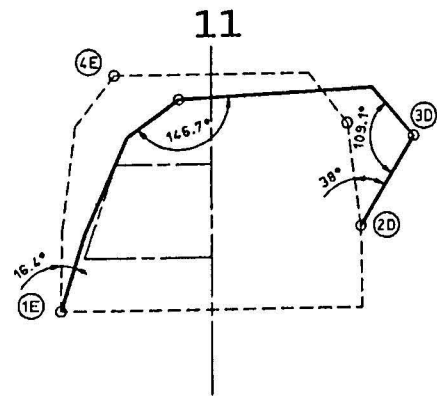
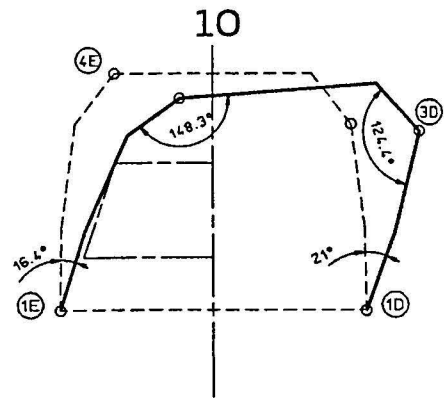
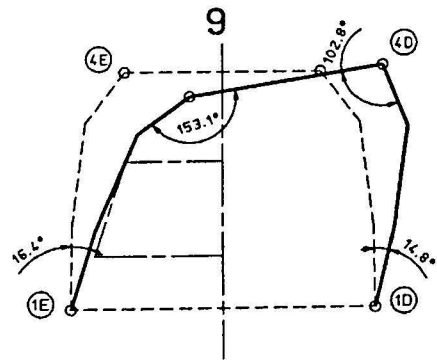
ótul	Curv Ref.	Modo 5		Modo 6		Modo 7		Modo 8	
		Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)
2E	CS11	31.7	2293	31.7	2293	31.7	2293	31.7	2293
3E	CS11	35.0	2459	39.4	2664	35.7	2494	38.7	2632
1D	T6	-	-	-	-	16.0	2386	10.6	1399
2D	CS11	29.2	2157	15.8	1260	-	-	-	-
3D	CS11	32.6	2340	-	-	20.1	1580	-	-
4D	CS11	-	-	24.4	1870	-	-	17.7	1407
Σ		9249		Σ	8087	Σ	8753	Σ	7731



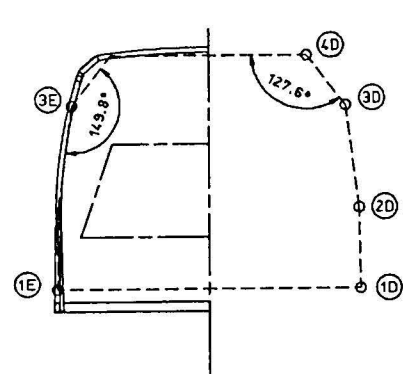
MODOS DE DEFORMAÇÃO 9-12



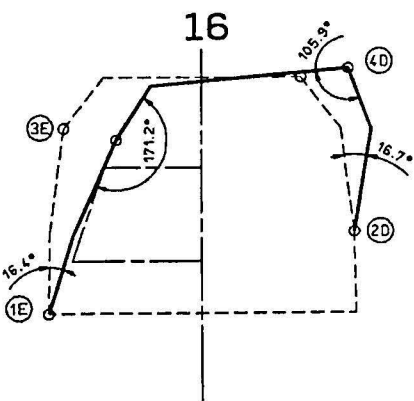
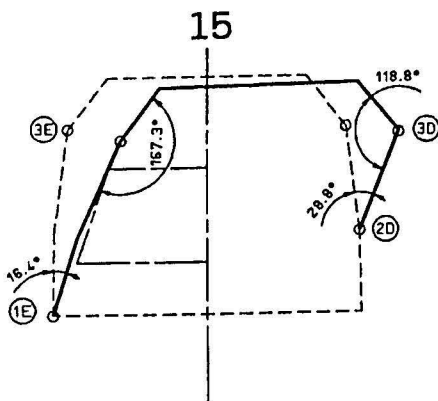
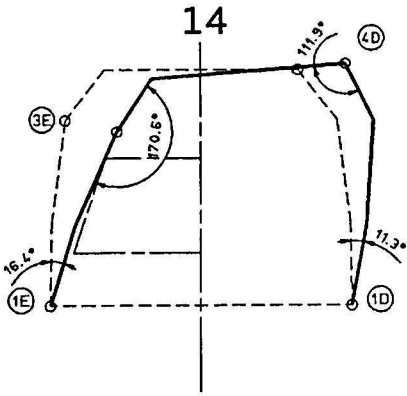
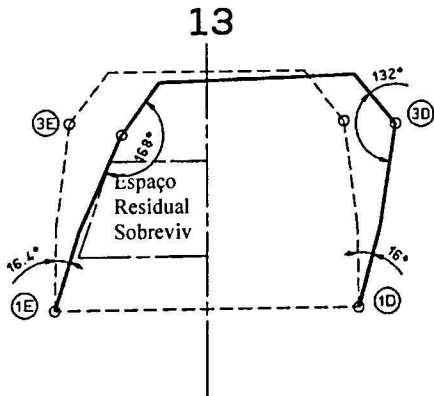
		Modo 9		Modo 10		Modo 11		Modo 12	
ótul	Curv Ref.	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)
1E	T7	16.4	2201	16.4	2201	16.4	2201	16.4	2201
4E	CS11	25.5	1937	20.7	1625	19.1	1512	26.2	1980
1D	T6	14.8	2174	21.0	3209	-	-	-	-
2D	CS11	-	-	-	-	38.0	2602	22.0	1712
3D	CS11	-	-	25.4	1931	40.7	2721	-	-
4D	CS11	24.8	1895	-	-	-	-	31.8	2298
Σ		8207		Σ	8966	Σ	9036	Σ	8191



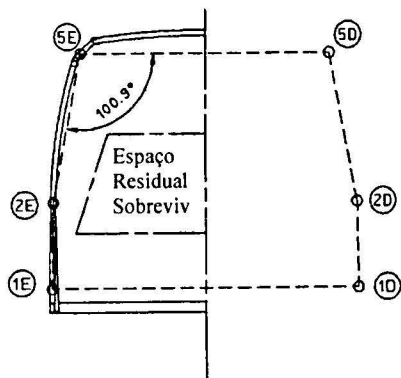
MODOS DE DEFORMAÇÃO 13-16



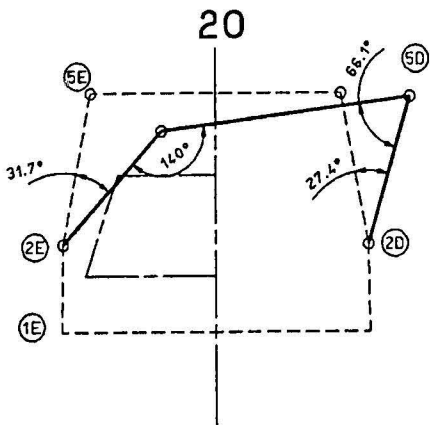
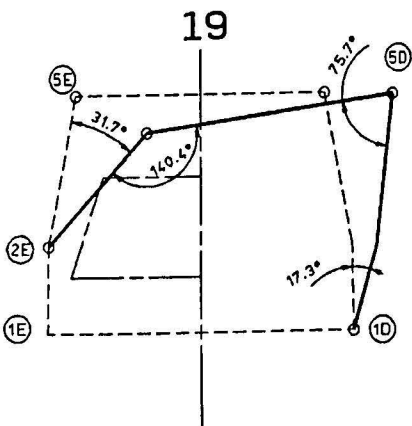
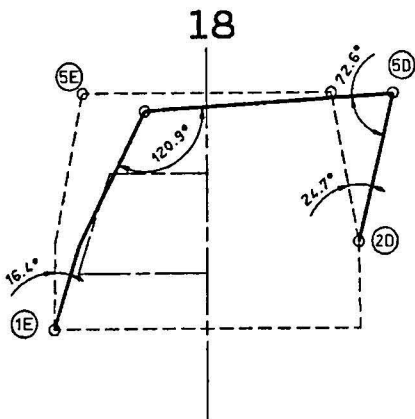
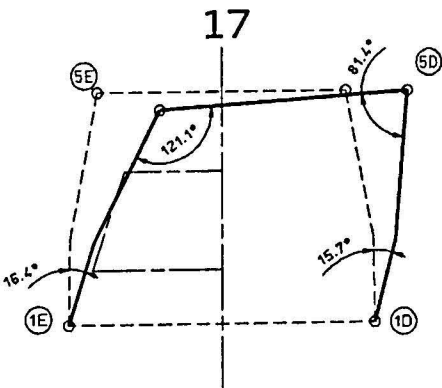
ótuI	Curv Ref.	Modo 13		Modo 14		Modo 15		Modo 16	
		Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)
1E	T7	16.4	2201	16.4	2201	16.4	2201	16.4	2201
3E	CS11	18.2	1443	20.8	1632	17.5	1393	21.4	1673
1D	T6	16.0	2386	11.3	1528	-	-	-	-
2D	CS11	-	-	-	-	28.8	2135	16.7	1333
3D	CS11	17.8	1414	-	-	31.0	2256	-	-
4D	CS11	-	-	15.7	1251	-	-	21.7	1693
Σ		7444		Σ	6612	Σ	7985	Σ	6900



MODOS DE DEFORMAÇÃO 17-20



ótul	Curv Ref.	Modo 17		Modo 18		Modo 19		Modo 20	
		Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)	Ang (°)	E (J)
1E	T7	16.4	2201	16.4	2201	-	-	-	-
2E	CS11	-	-	-	-	31.7	2293	31.7	2293
5E	CS11	20.2	1588	20.0	1573	39.5	2669	39.1	2650
1D	T6	15.7	2333	-	-	17.3	2608	-	-
2D	CS11	-	-	24.7	1888	-	-	27.4	2055
5D	CS11	19.5	1539	28.3	2106	25.2	1919	34.8	2449
Σ			7661	Σ	7768	Σ	9489	Σ	9447



3.5 CURVA F/δ DO PÓRTICO

Estabelecido o mecanismo de deformação global dos pórticos da zona do habitat e a curva da variação da energia com o ângulo de rotação, para cada rótula, é agora determinável uma curva de variação da força, aplicada na extremidade superior do pilar, em função do seu respectivo deslocamento (curva F-δ).

Esta força corresponde à que o pavimento exerce sobre a extremidade superior do painel, após o impacto com o solo, e que tende a desacelerar as velocidades de rotação e de translação do veículo em queda (ou opcionalmente, de um módulo representativo deste).

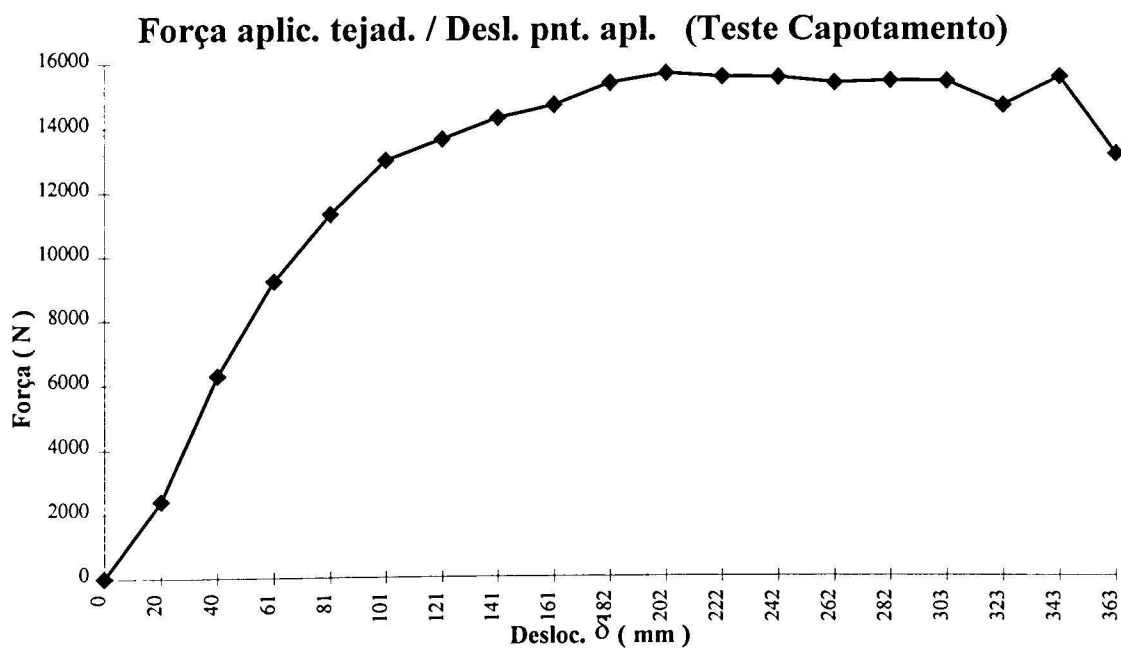
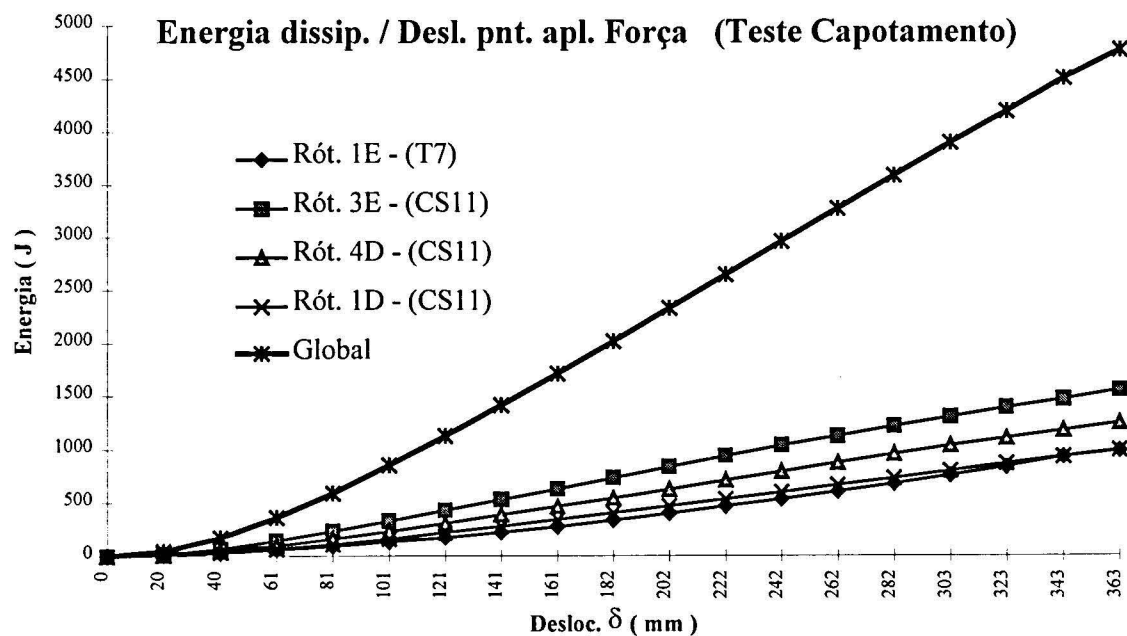
Esta curva F- δ, é uma aproximação à real, (de difícil determinação,) e é assumida considerando que a variação dos ângulos das quatro rótulas do mecanismo, se faz de uma forma proporcional, até que atinjam simultaneamente os seus valores máximos conhecidos. Em termos de energia dissipada global a assunção é correcta. Admite-se, assim sendo, que a aproximação não afecta significativamente o resultado global da análise.

Estes valores máximos poderiam ser tomados do exercício do capítulo anterior.

No caso presente, tomar-se-ão antes os valores finais medidos no ensaio real de referência, dado estarem disponíveis e pretender-se a sua utilização na comprovação do procedimento de cálculo dinâmico mais adiante descrito. Note-se que os valores máximos são menores pois não correspondem à máxima deformação admissível.

Partindo então, dos ângulos máximos de deformação de cada rótula plástica, obtidos por medição directa após o ensaio real de referência, e do valor do deslocamento correspondente na extremidade superior do painel, é possível construir a seguinte tabela, e a sua representação gráfica:

Rót. 1E - T7		Rót. 3E - CSTI		Rót. 4D - CSTI		Rót. 1D - CSTI		Global	Desloc	Força
Ang.(°)	En. (J)	Ang.(°)	En. (J)	Ang.(°)	En. (J)	Ang.(°)	En. (J)	En. (J)	δ (mm)	F (N)
0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0	0	0
0.5	8	1.09	19	0.87	13	0.70	9	48	20	2391
1	28	2.18	69	1.74	46	1.40	32	175	40	6264
1.5	60	3.27	143	2.61	96	2.10	63	361	61	9217
2	91	4.36	232	3.48	159	2.80	108	589	81	11309
2.5	133	5.45	328	4.35	230	3.49	160	851	101	12980
3	174	6.55	429	5.22	307	4.19	217	1126	121	13639
3.5	224	7.64	527	6.09	386	4.89	278	1415	141	14296
4	274	8.73	630	6.95	467	5.59	341	1711	161	14703
4.5	338	9.82	735	7.82	544	6.29	405	2021	182	15380
5	401	10.91	840	8.69	626	6.99	470	2337	202	15674
5.5	469	12.00	941	9.56	711	7.69	532	2652	222	15573
6	536	13.09	1038	10.43	794	8.39	596	2965	242	15545
6.5	609	14.18	1125	11.30	877	9.09	664	3275	262	15375
7	682	15.27	1216	12.17	956	9.78	732	3587	282	15444
7.5	759	16.36	1305	13.04	1034	10.48	799	3898	303	15428
8	836	17.45	1389	13.91	1103	11.18	866	4194	323	14668
8.5	932	18.55	1470	14.78	1175	11.88	930	4508	343	15558
8.8	962	19.20	1519	15.30	1219	12.30	968	4668	355	13218



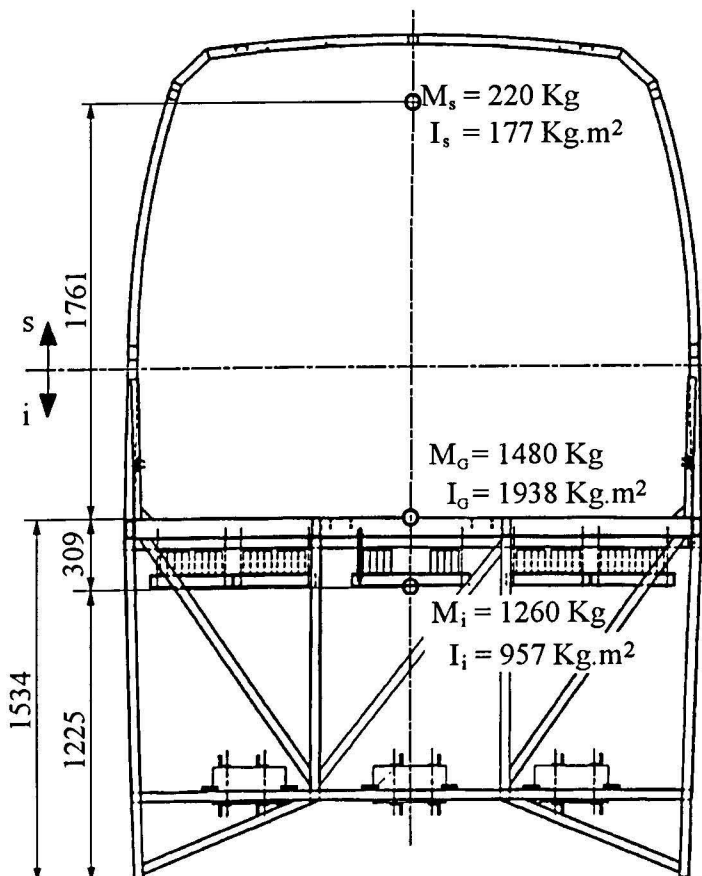
Os pares de valores força-deslocamento, serão utilizados na validação do modelo analítico do ensaio de capotamento, apresentado mais adiante.

3.6 PROPRIEDADES FÍSICAS DO MÓDULO DE ENSAIO

Para a definição das características que determinam o comportamento do veículo, (ou do módulo de ensaio representativo do mesmo,) perante as condições de capotamento padrão, é ainda necessário conhecer a forma geométrica do mesmo, a localização do seu centro de gravidade, a sua massa global e o modo como esta está distribuída.

Sobre esta distribuição, veremos mais adiante que devido à forma como a deformação global se processa, (mecanismo tipo pantógrafo ligando duas massas principais), se torna necessário conhecer as características mássicas parciais, (localização do C.G., valores da massa e momento de inércia,) do corpo do tejadilho e da restante massa complementar de que faz parte o pavimento e a zona subjacente.

De seguida são apresentados os referidos elementos, referentes ao ensaio de referência, obtidos por definição de projecto e por cálculo, tendo ainda parte deles sido comprovados por medição directa.



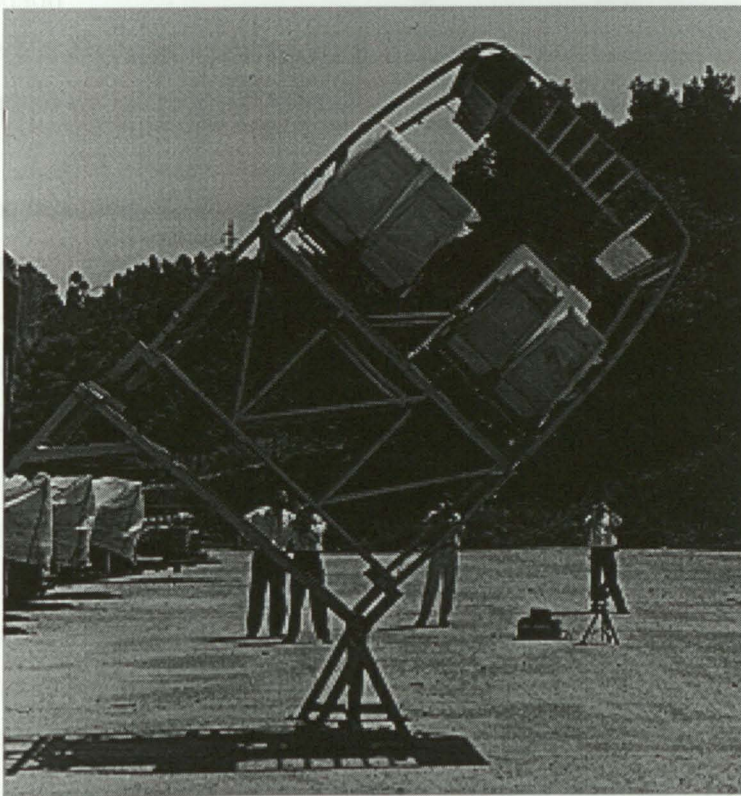
3.7 MODELAÇÃO DO ENSAIO DE CAPOTAMENTO

A metodologia seguida neste trabalho, divide o ensaio de capotamento do módulo representativo da estrutura do veículo, em 6 fases com leis dinâmicas distintas:

- Fase 1 - Rotação simples, em torno das patas de apoio sobre a plataforma de ensaio.
- Fase 2 - Rotação com deslizamento de fuga, das patas de apoio sobre a plataforma.
- Fase 3 - Queda livre.
- Fase 4 - Impacto com o solo.
- Fase 5 - Deformação progressiva.
- Fase 6 - Recuperação elástica e imobilização.

A fim de ser exemplificada e validada a utilização do método, irá sendo feita, no fim de cada fase, a sua aplicação aos dados de um ensaio real deste tipo.

Este ensaio, foi efectuado em 12 de Outubro de 1992 nas instalações da firma Salvador Caetano, no âmbito dum protocolo estabelecido com o I.N.E.G.I.-F.E.U.P., sob o título “Design de Um Novo Tipo de Carroçaria para Autocarros de Turismo”.



Simbologia utilizada

Índices

D	- pref. indicativo de variação	v	- sufixo indic. de vertical
$0,1\dots$	- sufixo indic. das fases	i	- sufixo indic. de parte inf. módulo
h	- sufixo indic. de horizontal	r	- sufixo indic. de rotação
s	- sufixo indic. de parte sup. módulo	G	- sufixo indic. - C.G. global
A	- sufixo indic. - pata de apoio	T	- sufixo indic. - linha sup. painel
B	- sufixo indic. - linha inf. painel		

Parâmetros e Variáveis

a	- ângulo rodado	h_G	- dist. variável do C.G. ao solo
β	- ângulo de ρ c/ eixo vert. módulo	h_{Gi}	- dist. variável de G_i ao solo
δ_F	- def. elementar do módulo em T	l_p	- dist. B - T
γ	- âng. de B - T com plano vert. ctr.	P	- peso do módulo de ensaio
φ	- coef. atrito tejadilho - solo	r_H	- reacção horizontal do apoio
θ_i	- ângulo entre ρ_i e a horizontal	r_V	- reacção vertical do apoio
ρ	- módulo do vector G-T	r_{pf}	- reacção de inércia periférica
ρ_i	- módulo do vector G_i -T	r_{cf}	- força centrífuga
ω	- aceleração angular	t	- tempo
w	- velocidade angular	v_{Gh}	- componente horiz. da veloc. de G
ψ	- ângulo entre F e a vertical	v_{Gih}	- componente horiz. da veloc. de G_i
a_{cf}	- aceleração centrífuga	v_{Gsh}	- componente horiz. veloc. de G_s
a_{pf}	- aceleração periférica	v_{Gv}	- componente vert. da veloc. de G
a_v	- aceleração vertical	v_{Giv}	- componente vert. da veloc. de G_i
b_{hs}	- componente horiz. vector G_s -T	v_{Gsv}	- componente vert. da veloc. de G_s
e_{Ah}	- escorregamento do apoio A	E_c	- energia cinética global
e_G	- deslocamento do C.G. global	E_{ch}	- energia cinética translação. horiz.
e_{Th}	- escorregam. de T sobre o solo	E_{ct}	- energia cinética translação global
f	- função	E_{cr}	- energia cinética rotação global
h_B	- dist. variável de B ao solo	E_{cv}	- energia cinética translação vert.

Ep - energia potencial	Is - mom. ctr. inércia longit. parte sup.
F - força react. na direcç. deform. δ	I _A - mom. inércia long. global rel. a <i>A</i>
G - aceleração gravítica (fórmulas)	I _G - mom. central inérc. longit. global
H - altura nominal linha sup. painel	M - massa do módulo
H _p - altura nominal da linha inf. painel	M _i - massa da parte inf. do módulo
H _s - altura nominal do C.G. global	M _s - massa da parte sup. do módulo
H _{si} - altura do centróide inf. módulo	R - módulo do vector <i>A-G</i>
H _{ss} - altura do centróide sup. módulo	Wa - largura da base do módulo
Ie - mom. inércia equival. (I _i + I _s)	W _m - largura máxima (nível soalho)
I _i - mom. ctr. inércia longit. parte inf.	W _t - largura do tejadilho

Localizações geométricas

A - limite da base de apoio do módulo	G _s - centróide parte superior
B - painel ao nível do pavimento	T - intersecção tejadilho com painel
G _i - centróide parte inferior	G - C.G. global

3.7.1 Fase 1 - ROTAÇÃO SIMPLES

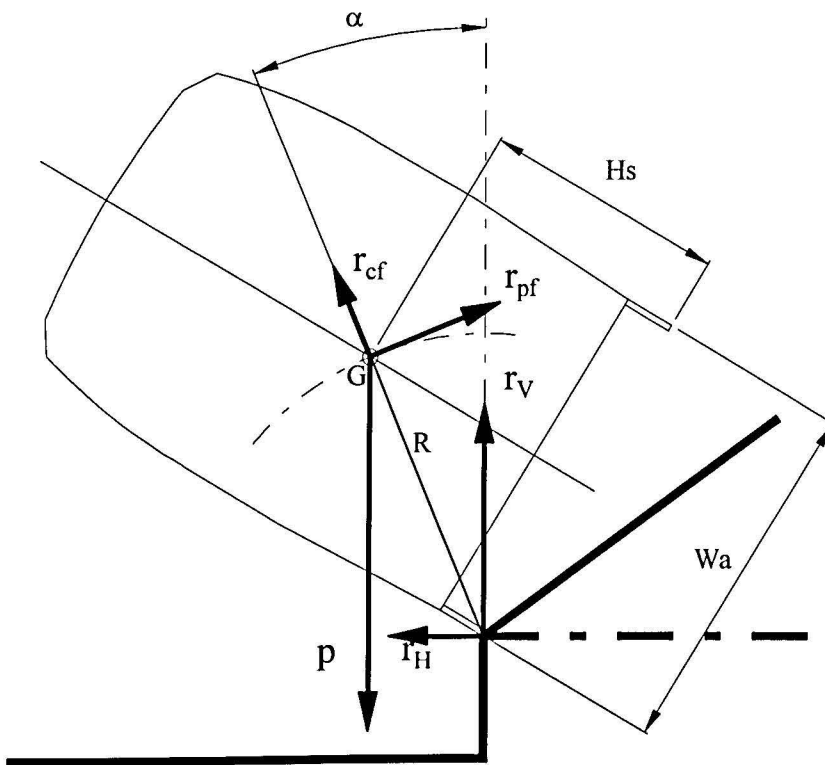
Após a manobra lenta de inclinação da plataforma de ensaio, até à posição correspondente ao limite de estabilidade do módulo, (localização do seu C.G. sobre a vertical que passa pela linha limite das suas patas de apoio), dá-se início ao movimento de queda.

O módulo começa então a rodar em torno do batente de encosto lateral das patas do módulo, sobre a plataforma de ensaio.

À medida que o C.G. se afasta da vertical limite de equilíbrio, a velocidade de rotação vai aumentando e com o incremento do braço do binário acelerador (conjugação da reacção vertical do apoio com o peso do módulo) a intensidade da aceleração de rotação aumenta também.

Analisando a dinâmica do movimento, temos como forças exteriores actuando sobre o módulo: a reacção do apoio (componentes r_H e r_V), o peso p , e as reacções de inércia devidas às variações da velocidade periférica r_{pf} e da alteração da direcção do movimento, (força centrífuga r_{cf}).

As condições de equilíbrio dinâmico são pois:



$$\begin{cases} -r_{pf} \cdot \cos \alpha + r_{cf} \cdot \sin \alpha + r_H = 0 & \text{(forças segundo a horizontal)} \\ +r_{pf} \cdot \sin \alpha + r_{cf} \cdot \cos \alpha - p + r_V = 0 & \text{(forças segundo a vertical)} \\ +r_H \cdot R \cdot \cos \alpha - r_V \cdot R \cdot \sin \alpha + I_G \cdot \omega = 0 & \text{(momentos relativamente a G)} \end{cases}$$

sendo

$$r_{pf} = M \cdot a_{pf} = M \cdot \varpi \cdot R$$

$$r_{cf} = M \cdot a_{cf} = M \cdot \omega^2 \cdot R$$

$$p = M \cdot G$$

a função da velocidade angular, ω^2 , pode ser obtida a partir da análise da transformação da energia potencial em cinética

$$p \cdot e_{Gv} = 1 / 2 \cdot I_A \cdot \omega^2$$

sendo

$$e_{Gv} = R \cdot (1 - \cos \alpha) \quad \text{e} \quad I_A = I_G + M \cdot R^2$$

e logo

$$\omega^2 = 2 \cdot M \cdot G \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha) / (I_G + M \cdot R^2)$$

Determinam-se agora os parâmetros finais do movimento no fim desta fase, ou seja, quanto a componente horizontal da reacção do apoio que assegura o encosto ao esbarro da plataforma, tiver um valor nulo, $r_H = 0$, (no momento seguinte iniciar-se-á a fuga do apoio).

Fazendo agora as substituições convenientes tem-se

$$\begin{cases} -M \cdot \varpi \cdot R \cdot \cos \alpha + M \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \sin \alpha = 0 \\ +M \cdot \varpi \cdot R \cdot \sin \alpha + M \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \cos \alpha - M \cdot G + r_V = 0 \\ \varpi = r_V \cdot R \cdot \sin \alpha / I_G \end{cases}$$

e desenvolvendo

$$\begin{cases} -M \cdot r_V \cdot R \cdot \sin \alpha / I_G \cdot R \cdot \cos \alpha + M \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \sin \alpha = 0 \\ +M \cdot r_V \cdot R \cdot \sin \alpha / I_G \cdot R \cdot \sin \alpha + M \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \cos \alpha - M \cdot G + r_V = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -r_V / I_G \cdot R \cdot \cos \alpha + \omega^2 = 0 \\ +M \cdot r_V \cdot R \cdot \sin \alpha / I_G \cdot R \cdot \sin \alpha + M \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \cos \alpha - M \cdot G + r_V = 0 \end{cases}$$

e substituindo ω^2 pela expressão acima determinada

$$\begin{cases} r_v = 2 \cdot M \cdot G \cdot I_G \cdot (1 / \cos \alpha - 1) / (I_G + M \cdot R^2) \\ r_v \cdot R^2 \cdot \sin^2 \alpha / I_G + 2 \cdot M \cdot G \cdot R^2 \cdot (\cos \alpha - \cos^2 \alpha) / (I_G + M \cdot R^2) - G + r_v / M = 0 \end{cases}$$

$$M \cdot R^2 \cdot (1 / \cos \alpha - 1) \cdot \sin^2 \alpha + M \cdot R^2 \cdot (\cos \alpha - \cos^2 \alpha) - (I_G + M \cdot R^2) / 2 + I_G \cdot (1 / \cos \alpha - 1) = 0$$

$$M \cdot R^2 \cdot (1 / \cos \alpha - 1) - (I_G + M \cdot R^2) / 2 + I_G \cdot (1 / \cos \alpha - 1) = 0$$

$$(I_G + M \cdot R^2) \cdot (1 / \cos \alpha - 1) - (I_G + M \cdot R^2) / 2 = 0$$

$$(1 / \cos \alpha - 1) - 1 / 2 = 0$$

$$\cos \alpha = 2 / 3$$

A partir do conhecimento do ângulo podem determinar-se outros parâmetros como sejam:

A altura de queda;

$$e_{Gv} = R \cdot (1 - \cos \alpha) = R / 3$$

em que $R = \sqrt{Hs^2 + Wa^2 / 4}$, sendo Hs a altura do C.G. e Wa a largura da base do módulo

a velocidade angular;

$$\omega = \sqrt{2 / 3 \cdot G \cdot R / (I_G / M + R^2)}$$

e as componentes vertical e horizontal da velocidade do C.G. ;

$$V_{Gv} = \sqrt{5 / 3 \cdot R \cdot \omega} = \sqrt{10 / 27 \cdot G \cdot R^3 / (I_G / M + R^2)}$$

$$V_{Gh} = 2 / 3 \cdot R \cdot \omega = \sqrt{8 / 27 \cdot G \cdot R^3 / (I_G / M + R^2)}$$

A determinação do tempo correspondente a esta fase, não é relevante para o estudo fenómeno em causa, nem tem significado físico se for considerado desde a posição de equilíbrio instável inicial, (teoricamente é infinito).

Exemplo de aplicação:

Dados

M	I _G	Hs	Wa
kg	kg.m ²	m	m
1480	1938	1.53	2.36

Resultados

R	α	ω	V _{Gv1}	V _{Gh1}	ΔE _p	E _c
m	graus	rad/s	m/s	m/s	J	J
1.93	48.19	1.58	2.28	2.04	9334	= 9334

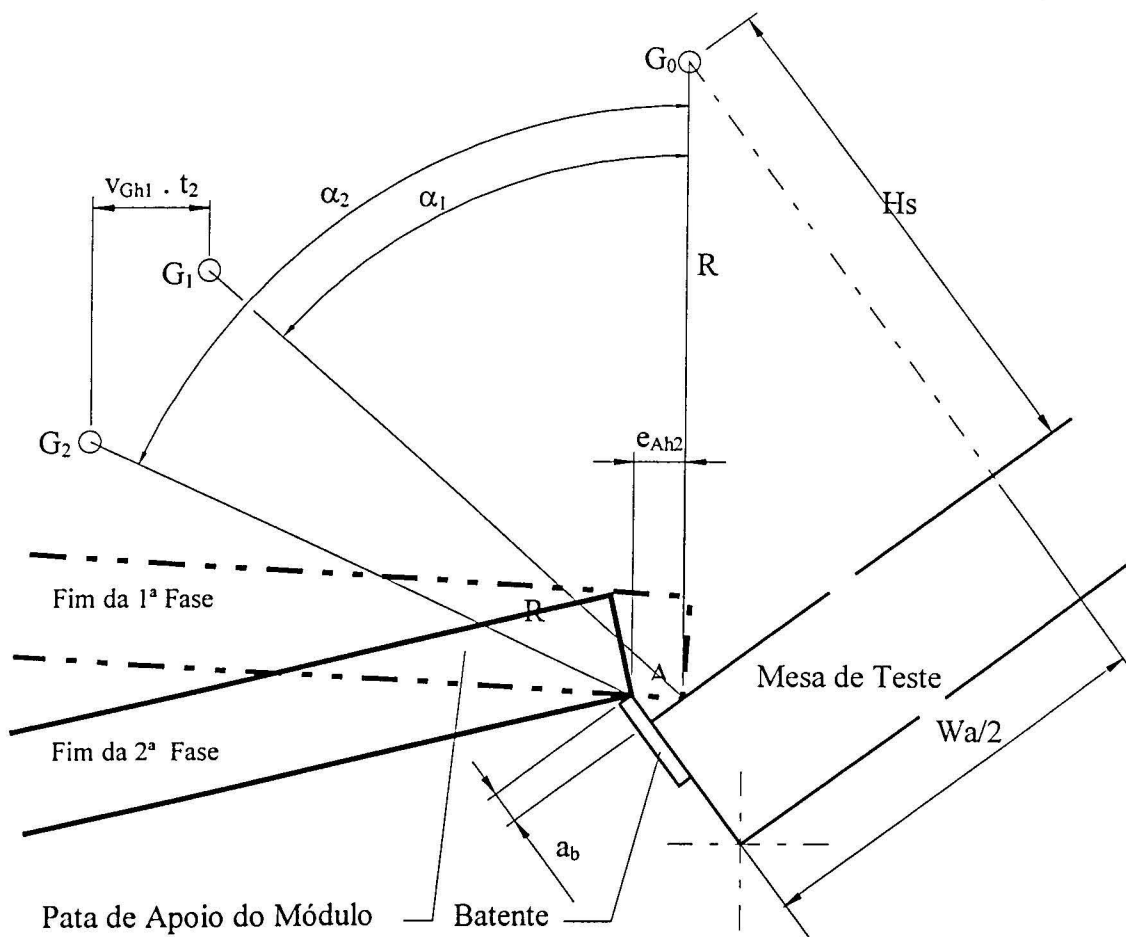
3.7.2 Fase 2 - ROTAÇÃO COM DESLIZAMENTO

Durante esta fase, e após a rotação correspondente à fase anterior, o apoio do módulo de ensaio sobre a plataforma de teste A^4 , inicia o seu movimento de fuga ao batente de encosto, deslizando sobre este até à sua libertação. A este instante corresponde o fim desta fase.

Enquanto esta fase decorre, a velocidade de rotação aumenta, devido ao binário formado pela reacção vertical do apoio com o peso, mantendo-se constante a velocidade horizontal do C.G. por não haver forças exteriores relevantes, gerando componentes horizontais.

O valor do deslocamento horizontal do apoio e_{Ah2} , está fortemente condicionado pelas características dimensionais do batente e pode ser considerado

$$e_{Ah2} \cong a_b \cdot W_a / 2 / H_s \quad \text{em que } a_b \text{ é a altura do batente.}$$



A equação relativa aquele movimento será

$$e_{Ah2} = V_{Gh1} \cdot t_2 + R \cdot \sin \alpha_1 - R \cdot \sin \alpha_2$$

em que V_{Gh1} e α_1 são valores conhecidos, correspondentes à velocidade e ao ângulo do final da 1ª fase, e em que são incógnitas, a duração total do deslocamento t_2 e o ângulo final α_2 , desta 2ª fase.

Recorrendo agora à Lei da Conservação da Energia Cinética

$$M \cdot G \cdot \Delta e_{Gv} = 1/2 \cdot I_G \cdot \omega^2 + 1/2 \cdot M \cdot V_{Gv}^2 + 1/2 \cdot M \cdot V_{Gh}^2$$

e simplificando teremos

$$2 \cdot G \cdot \Delta e_{Gv} = I_G / M \cdot \omega^2 + V_{Gv}^2 + V_{Gh}^2$$

$$\text{E sendo } \Delta e_{Gv} = R \cdot (1 - \cos \alpha) \quad \text{e} \quad V_{Gv} = R \cdot \omega \cdot \sin \alpha \quad \text{logo}$$

$$2 \cdot G \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha) = I_G / M \cdot \omega^2 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2 \alpha + V_{Gh}^2$$

Como a velocidade horizontal se mantém constante desde o fim da 1ª Fase sendo o seu valor dado por

$$V_{Gh} = \sqrt{8/27 \cdot G \cdot R^3 / (I_G / M + R^2)} \quad \text{então}$$

$$2 \cdot G \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha) - 8/27 \cdot G \cdot R^3 / (I_G / M + R^2) = I_G / M \cdot \omega^2 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2 \alpha$$

obtendo-se a fórmula da velocidade de rotação

$$\omega = \sqrt{2 \cdot G \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha - 4/27 \cdot R^2 / (I_G / M + R^2)) / (I_G / M + R^2 \cdot \sin^2 \alpha_2)}$$

Tendo agora em conta o equilíbrio dinâmico do sistema

$$\begin{cases} +M \cdot a_v - P + r_v = 0 & \text{(forças segundo a vertical)} \\ -r_v \cdot R \cdot \sin \alpha + I_G \cdot \varpi = 0 & \text{(momentos relativamente a } G) \end{cases}$$

substituindo r_v

$$+M \cdot a_v - P + I_G \cdot \varpi / R / \sin \alpha = 0$$

e tendo em conta a relação entre a aceleração vertical e a de rotação, obtida da derivação da equação da velocidade vertical $v_{Gv} = R \cdot \omega \cdot \sin \alpha$, em ordem ao tempo

$$a_v = R \cdot \sin \alpha \cdot \varpi + R \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha$$

e exprimindo o peso P pelo seu equivalente dinâmico $M \cdot G$, vem

$$+M \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \varpi + M \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha - M \cdot G + I_G \cdot \varpi / R / \sin \alpha = 0$$

Exemplo de aplicação (continuação):
Integração numérica

Cálculo					Dado	Cálculo de confirmação		
α_2	ω_2	ϖ_2	$d\alpha/\omega$	$t=\Sigma d\alpha/\omega$	e_{Ah2}	$d\omega/\varpi$	$t=\Sigma d\omega/\varpi$	$\varpi=d\omega/dt$
grau	rad/s	ad/s ⁻²	s	s	m	s	s	rad/s ⁻²
48.19	1.582	2.800						
48.44	1.590	2.791	3E-3	0.003		3E-3	0.003	
48.69	1.598	2.782	3E-3	0.005	0.000	3E-3	0.005	2.782
48.94	1.605	2.773	3E-3	0.008	0.000	3E-3	0.008	2.773
⋮					⋮	⋮		
64.44	2.000	2.594	2E-3	0.158	0.020	2E-3	0.158	2.594
64.69	2.005	2.597	2E-3	0.160	0.020	2E-3	0.160	2.597

Deslocamento horizontal
condicionado pelo esbarro

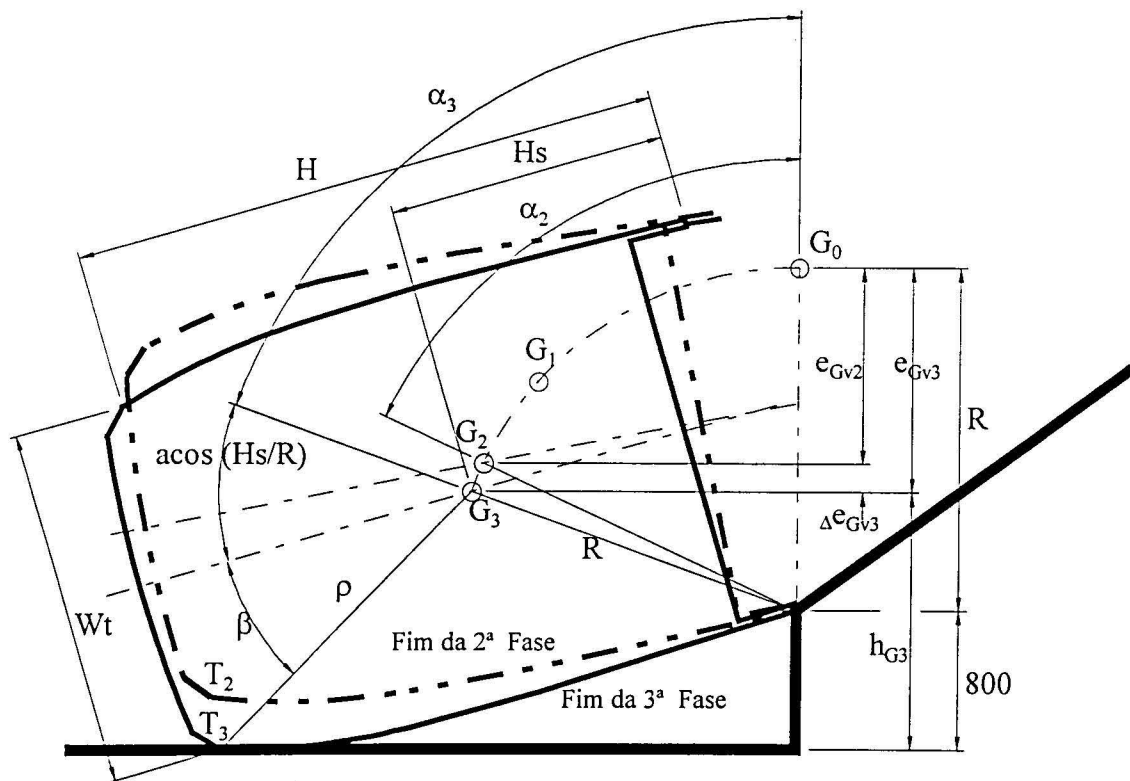
Cálculo suplementar

Dados				Resultados		
R	M	I _G	v _{Gh1}	ΔE_{pot}	E_{cin}	v_{Gv2}
m	kg	J	m/s	J	J	m/s
1.931	1480	1938	2.04	16031	16031	3.500

3.7.3 Fase 3 - QUEDA LIVRE

Após a perda de contacto das patas de apoio, com a plataforma de ensaio, o módulo entra em queda livre, mantendo as suas velocidades de translação e de rotação, adquiridas nas fases anteriores.

Esta fase, termina no momento em que a linha superior do painel T , toca o solo.



Nesse instante, a distância do C.G. ao solo, é igual à componente vertical, do vector que liga T a G .

Como a distância do C.G. ao solo é dada por

$$h_G = 0,8 + R - e_{Gv}$$

em que $0,8$ corresponde à altura estabelecida pelo Reg. 66 da E.C.E. para a plataforma de queda e ΔG_{V3} é o valor total do deslocamento vertical do C.G., e como se trata de movimento uniformemente acelerado

$$\Delta e_{Gv3} = e_{Gv2} + v_{Gv2} \cdot t + 1/2 \cdot G \cdot t^2$$

e logo sendo $e_{GV2} = R - R \cdot \cos \alpha_2$

a referida distância será

$$hG = 0,8 + R \cdot \cos \alpha_2 - v_{Gv2} \cdot t - 1/2 \cdot G \cdot t^2$$

Quanto à componente vertical do vector $T-G$, será (em radianos) igual a

$$\rho \cdot \cos (\pi - \alpha_3 - \arccos (H_s / R) - \beta)$$

e como o ângulo entre a vertical e a direcção $A-G$ (descrito módulo desde o início do ensaio), é $\alpha_3 = \alpha_2 + \omega_2 \cdot t_3$ virá

$$- \rho \cdot \cos (\alpha_2 + \omega_2 \cdot t_3 + \arccos (H_s / R) + \beta)$$

em que

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho = \sqrt{W_t^2 / 4 + (H - H_s)^2} & \text{onde } W_t \text{ é a largura do tejadilho, } H \text{ a altura a que fica a} \\ & \text{linha superior do painel e } H_s \text{ a altura do C.G. do veículo,} \\ & \text{na posição horizontal de marcha,} \\ \arccos (H_s / R) & \text{é o ângulo entre a direcção } A-G \text{ e o eixo de simetria} \\ & \text{vertical do módulo, e } R \text{ é o comprimento do vector } A-G. \\ \beta = \arctg (W_t / 2 / (H - H_s)) & \text{é o ângulo entre o referido eixo de simetria e a} \\ & \text{direcção } G-T. \end{array} \right.$$

Igualando então as expressões determinadas para hG e para o módulo da componente vertical do vector $G-T$

$$0,8 + R \cdot \cos \alpha_2 - v_{Gv2} \cdot t_3 - 1/2 \cdot G \cdot t_3^2 = - \rho \cdot \cos (\alpha_2 + \omega_2 \cdot t_3 + \arccos (H_s / R) + \beta)$$

obtém-se uma equação em que a única incógnita é o tempo t_3 , sendo possível, nomeadamente por um processo iterativo, determiná-lo, e a partir deste, os parâmetros do movimento alterados durante esta fase

$$\alpha_3 = \alpha_2 + \omega_2 t_3$$

e

$$v_{Gv3} = v_{Gv2} + G \cdot t_3$$

Exemplo de aplicação (continuação da fase anterior):

Dados iniciais

M	I _G	R	H	H _s	W _t
kg	J	m	m	m	m
1480	1938	1.931	3.389	1.530	2.052
ρ	β				
m	grau				
2.123	28.89				

Dados calculados anteriormente

α ₂	VG _{v2}	VG _{h1}	ω ₂
grau	m/s	m/s	rad/s
64.69	3.500	2.037	2.005

Resultados do cálculo iterativo

h _{G3}	ρ _v	t ₃
m	m	s
1.502	= 1.502	0.034

Resultados de cálculos suplementares

α ₃	VG _{v3}	Δ _{Ep3}	E _{c3}	E _{ch1}	E _{cv3}	E _{cr2}
grau	m/s	J	J	J	J	J
68.55	3.829	17818	= 17818	3070	10852	3896

3.7.4 Fase 4 - IMPACTO COM O SOLO

No fim da *queda livre* do módulo de ensaio, dá-se o impacto da linha superior do painel com o solo, e a paragem brusca do movimento vertical desta zona.

Pelas características do próprio fenómeno de impacto, a sequência dos acontecimentos primeiro a nível infinitesimal e depois macroscópico, poderá ocorrer do seguinte modo:

Os primeiros pontos materiais a contactar o solo, são desacelerados com uma intensidade tal que a sua energia cinética é dispersa a nível atómico em todas as direcções, correspondendo este fenómeno a um comportamento fluídico e ao desenvolvimento de elevadíssimas temperaturas, numa muito pequena porção de material.

De seguida a velocidade segundo a vertical dos pontos imediatos, vai sendo amortecida pela massa fluídica dos primeiros, e a uma distância cada vez maior, à medida que a zona pastosa se vai ampliando e arrefecendo por dispersão térmica, numa extensão também cada vez maior.

Entretanto à frente da zona em plastificação, formam-se ondas de compressão, que irradiam à velocidade do som para as regiões mais afastadas do ponto de impacto, ajudando desta forma a dispersar sob esta forma de vibração, parte da energia cinética da travagem.

Fenómenos idênticos se passam no material de que é composto o solo de impacto, e outros, de tipo diferente, relacionados com as características específicas da constituição do mesmo.

Entretanto, o gradiente das tensões geradas na zona de impacto vai diminuindo, à medida que a frente do campo de tensões se vai afastando do ponto inicial.

Quando a dimensão deste campo atinge troços suficientemente longos e flexíveis, nomeadamente a altura dos pilares e a largura do tejadilho, fenómenos de encurvadura e principalmente de flexão começam a ocorrer, passando a serem estes os principais tipos de mecanismos de dissipação de energia.

Os fenómenos de vibração por compressão e flexão, resultantes da variação rápida dos esforços aplicados, prolongar-se-ão para além desta fase só terminando com a imobilização do módulo de ensaio.

Quanto à quantificação da energia dissipada nesta fase, é evidente a impossibilidade de estabelecer um modelo matemático que abranja a totalidade dos fenómenos em jogo.

É porém constatável por simples análise de registos de imagem de ensaios, que após o instante do embate com o solo, três zonas distintas dos corpo do módulo podem ser identificadas quanto ao tipo de movimento resultante:

a) - zona inferior do módulo (abaixo do parapeito das janelas) - nenhuma alteração significativa da velocidade instantânea parece ocorrer, continuando a sua queda e rotação como se de um bloco independente se tratasse.

b) - painéis laterais acima dos parapeitos das janelas - sofrem uma redução significativa da velocidade vertical dos seus C.G. locais e uma inversão dos seus sentidos de rotação.

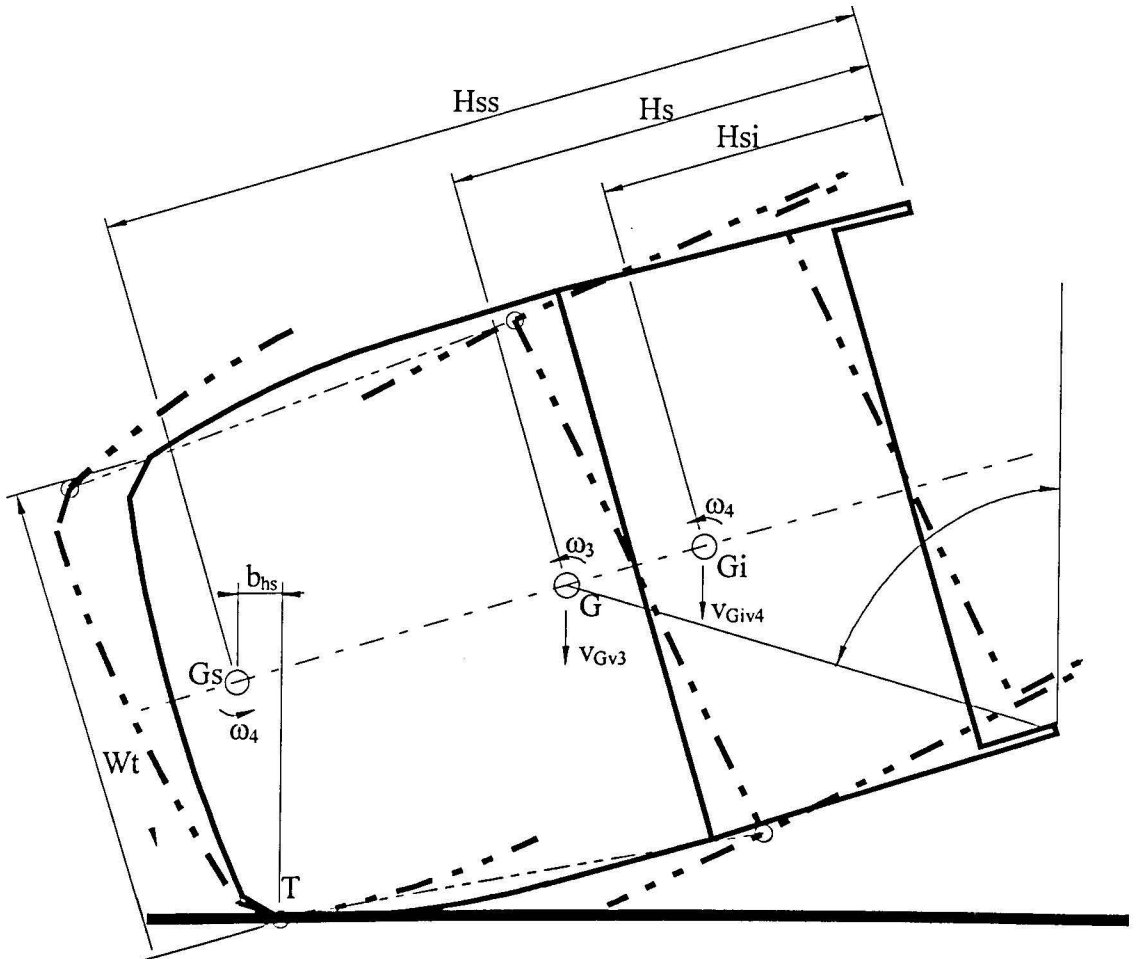
c) - tejadilho - sofre uma anulação total da sua velocidade de queda, mantendo ou aumentando ligeiramente a sua velocidade de rotação.

Assim sendo, e como aproximação, poder-se-á dizer que após o impacto:

i) - a energia de translação vertical, será apenas a correspondente à massa do módulo abaixo dos paraqueiros das janelas, que mantém sensivelmente a mesma velocidade que possuía antes do impacto.

ii) - a energia de rotação, será o somatório das energias de rotação da parte do módulo abaixo das janelas, (considerando o momento de inércia relativamente ao seu centróide respectivo,) com a da parte superior complementar, (também considerando o seu momento de inércia relativamente ao seu respectivo centróide,) tendo em conta um ligeiro aumento da velocidade de rotação conjugada comum, devido a transferências de quantidade de movimento na altura do impacto.

iii) - a energia de translação horizontal, supõe-se não ser afectada pelo impacto.



A energia de translação vertical resultante será então

$$E_{cv4} = 1/2 \cdot M_i \cdot V_{Giv4}^2 \quad \text{em que } M_i \text{ é a massa da parte inferior do módulo}$$

e V_{Giv4} é a velocidade do seu centróide determinável por

$$V_{Giv4} = V_{Giv3} = V_{Gv3} - (H_s - H_{si}) \cdot \cos(\alpha_3 + \arccos(H_s / R) - \pi / 2) \cdot \omega_3$$

A energia de rotação será

$$E_{cr4} = I_s / 2 \cdot \omega_4^2 + I_i / 2 \cdot \omega_4^2 \quad \text{em que } I_s \text{ é o momento de inércia da parte superior e } I_i \text{ o momento de inércia da parte inferior, ambos relativamente aos seus respectivos centróides.}$$

ou

$$E_{cr4} = I_e / 2 \cdot \omega_4^2 \quad \text{considerando o momento de inércia equivalente ao conjunto das duas partes } (I_e = I_s + I_i).$$

Quando à velocidade de rotação ω_4 poderá ser determinada igualando as quantidades de movimento de rotação, em torno de T , antes e após o impacto.

Para o efeito apenas se considera a componente vertical da velocidade do centróide da parte superior v_{Gsv3} , devido aos considerandos anteriormente expostos

$$M_s \cdot v_{Gsv3} \cdot b_{hs} + I_e \cdot \omega_3 = M_s \cdot v_{Gsv4} \cdot b_{hs} + I_e \cdot \omega_4 \quad \text{em que } b_{hs} \text{ é o braço do momento}$$

$$\text{e como } v_{Gsv4} = \omega_4 \cdot b_{hs}$$

$$M_s \cdot v_{Gsv3} \cdot b_{hs} + I_e \cdot \omega_3 = M_s \cdot \omega_4 \cdot b_{hs} \cdot b_{hs} + I_e \cdot \omega_4$$

donde

$$\omega_4 = (M_s \cdot v_{Gsv3} \cdot b_{hs} + I_e \cdot \omega_3) / (M_s \cdot b_{hs}^2 + I_e)$$

expressando agora os parâmetros v_{Gsv3} e b_{hs} teremos

$$v_{Gsv3} = v_{Gv3} + (H_{ss} - H_s) \cdot \cos(\alpha_3 + \arccos(H_s / R) - \pi / 2) \cdot \omega_3$$

e

$$b_{hs} = Wt / 2 \cdot \sin(\alpha_3 + \arccos(H_s / R) - \pi / 2) - (H - H_{ss}) \cdot \cos(\alpha_3 + \arccos(H_s / R) - \pi / 2)$$

Exemplo de aplicação (continuação da fase anterior):

Dados iniciais

Wt	R	Hs	Hsi	Hss	H	M	Mi	Ms
m	m	m	m	m	m	kg	kg	kg
2.052	1.931	1.530	1.225	3.295	3.389	1480	1260	220

Ii	Is	Ig	Ec3
kg.m ²	kg.m ²	kg.m ²	J
957	177	1938	18320

Dados calculados anteriormente

α_3	V _{Gv3}	V _{Ghl}	ω_3
grau	m/s	m/s	rad/s
68.55	3.829	2.037	2.005

Dados finais

Ie	b _{hs}	vGiv4	vGsv3	ω_4	E _{cv4}	E _{ch4}	E _{cr4}	E _{c4}
rad/s	m	m/s	m/s	rad/s	J	J	J	J
1134	0.195	3.242	7.229	2.262	6621	3070	2901	12592

3.7.5 Fase 5 - DEFORMAÇÃO PROGRESSIVA

Como se viu na fase anterior, o impacto da linha superior do painel T , com o pavimento, deu lugar à dissipação total da energia cinética, correspondente à translação vertical da parte superior do habitáculo (zona do tejadilho). Quanto ao movimento de rotação, desdobrou-se em dois parcelares, correspondendo um à parte superior e outro à parte inferior do módulo.

Pode-se pois supor um comportamento típico de um mecanismo, formado pelas partes inferior e superior do módulo, (respectivamente abaixo e acima do nível do parapeito das janelas), funcionando os painéis como braços de pantógrafo, conjugando o movimento de rotação de cada parte.

Durante esta fase, a aceleração vertical do centróide de inércia da zona inferior, passa a depender do seu respectivo peso e da reacção vertical que a restante parte da estrutura, agora apoiada no solo, exerce nesta, abandonando pois o movimento de queda de tipo gravítico.

Aquela reacção, para além de contrariar o movimento de queda da parte inferior do módulo, induz simultaneamente um momento desacelerador da sua velocidade de rotação, e por conjugação de movimentos, também da rotação da parte superior.

Se este momento for suficiente, acabará por inverter esse sentido de rotação, permitindo o início da recuperação elástica, antes que qualquer outra parte do módulo toque o solo, ou os pilares em deformação, invadam o espaço residual de sobrevivência dos passageiros.

Iniciada a recuperação elástica da deformação, considera-se terminada esta fase crítica de comportamento.

Para o estudo analítico desta fase, dividiu-se o movimento em etapas, correspondentes a deformações elementares δF , ao nível superior do painel (ponto T).

A cada deformação $\delta F(n)$, corresponde uma diferente força reactiva vertical da estrutura ($F(n) / \cos \psi(n)$), suposta constante durante cada etapa.

A força média $F(n)$, segundo a direcção de $\delta F(n)$, obtém-se de tabela, construída a partir de resultados de ensaios de flexão, para cada valor da deformação acumulada $\sum_{i=1}^n \delta F(i)$.

Estes ensaios são efectuados sobre provetes representativos das zonas vizinhas dos locais onde se dão os colapsos do pórtico.

Analizando agora a variação da quantidade de movimento segundo a vertical, da parte inferior do módulo, num intervalo de tempo, $\Delta t(n)$, suficientemente pequeno para se considerarem que as variações de velocidade são uniformes, teremos

$$M_i \cdot (V_{Giv(n)} - V_{Giv(n-1)}) = (M_i \cdot G - F(n) / \cos \psi(n)) \cdot \Delta t(n)$$

em que M_i , é a massa da parte inferior do módulo, e $V_{Giv(n)}$ e $V_{Giv(n-1)}$ as componentes verticais da velocidade, do centróide da parte inferior, no fim e no início de cada etapa.

Expressando agora em ordem à velocidade no fim de cada intervalo

$$V_{Giv(n)} = V_{Giv(n-1)} + (M_i \cdot G - F_{(n)} / \cos \psi_{(n)}) / M_i \cdot \Delta t_{(n)}$$

em que $\Delta t_{(n)} = t_{(n)} - t_{(n-1)}$ é a duração de cada deformação elementar, e $\psi_{(n)}$ é o ângulo entre a direcção do deslocamento $\delta F_{(n)}$, segundo a qual se conhece a força F_n , e a direcção da correspondente reacção normal do pavimento.

Tendo agora em conta a Lei da Conservação da Energia Mecânica, pela qual a variação da energia cinética no fim de cada intervalo, deverá ser igual à soma algébrica da variação da energia potencial com as energia dissipadas pela deformação e pelo atrito com o solo

$$1/2 \cdot M_i \cdot (V_{Giv(n)}^2 - V_{Giv(n-1)}^2) + 1/2 \cdot M \cdot (V_{Gh(n)}^2 - V_{Gh(n-1)}^2) + 1/2 \cdot I_E \cdot ((\sin \omega_{(n)}) \cdot \omega_{(n)}^2 - (\sin \omega_{(n-1)}) \cdot \omega_{(n-1)}^2) = M_i \cdot G \cdot \Delta e_{Giv(n)} - F_{(n)} \cdot \delta F_{(n)} - F_{(n)} / \cos \psi \cdot \varphi \cdot |\Delta e_{Th(n)}|$$

Note-se que para efeito da energia de translação horizontal, se considerou a massa global M , e para momento de inércia da rotação conjugada, o equivalente I_e correspondente a soma simples dos momentos de inércia locais, das partes inferior e superior

$$I_e = I_i + I_s$$

e desenvolvendo

$$\omega_{(n)}^2 - \omega_{(n-1)}^2 = 1/I_e \cdot (2 \cdot M_i \cdot G \cdot \Delta e_{Giv(n)} - 2 \cdot F_{(n)} \cdot (\delta F_{(n)} + \varphi / \cos \psi \cdot (|\Delta e_{Th(n)}|))) - M_i \cdot (V_{Giv(n)}^2 - V_{Giv(n-1)}^2) - M \cdot (V_{Gh(n)}^2 - V_{Gh(n-1)}^2)$$

$$\omega_{(n)} = \sin \omega_{(n-1)} + |\omega_{(n)}| \cdot \sqrt{|\omega_{(n-1)}^2 + 1/I_e \cdot (2 \cdot M_i \cdot G \cdot \Delta e_{Giv(n)} - 2 \cdot F_{(n)} \cdot (\delta F_{(n)} + \varphi / \cos \psi \cdot (|\Delta e_{Th(n)}|))) - M_i \cdot (V_{Giv(n)}^2 - V_{Giv(n-1)}^2) - M \cdot (V_{Gh(n)}^2 - V_{Gh(n-1)}^2)|}$$

Torna-se necessário, entretanto, determinar os parâmetros, $V_{Gh(n)}$, e $\Delta e_{Gv(n)}$.

Assim a velocidade horizontal do C.G., $V_{Gh(n)}$, será determinada pelo equilíbrio das quantidades de movimento segundo essa direcção

$$M \cdot (V_{Gh(n)} - V_{Gh(n-1)}) = - (M_s \cdot G + F_{(n)} / \cos \psi_{(n)}) \cdot \varphi_{(n)} \cdot \Delta t_{(n)} \cdot \sin \omega_{(n)} (\Delta e_{Th(n)})$$

sendo no fim de cada intervalo

$$V_{Gh(n)} = V_{Gh(n-1)} - (M_s \cdot G + F_{(n)} / \cos \psi_{(n)}) \cdot \varphi \cdot \Delta t_{(n)} \cdot \sin \omega_{(n)} (\Delta e_{Th(n)})$$

em que φ é o coeficiente de atrito entre a linha superior do painel e o solo, e M_s a massa da parte superior, cujo peso descarrega directamente sobre o solo.

Quanto ao deslocamento vertical $\Delta e_{Giv(n)}$, correspondente ao trabalho realizado pelo peso da parte inferior do módulo, terá de ser compatível com as condições dinâmicas e com as condições geométricas.

As condições de equilíbrio dinâmico vertical desta parte são

$$- M_i \cdot G + F_{(n)} / \cos \psi_{(n)} - M_i \cdot a_{Giv} = 0$$

donde

$$a_{Giv} = F_{(n)} / \cos \psi_{(n)} / M_i - G$$

e como

$$\Delta e_{Giv(n)} = V_{Giv(n-1)} \cdot \Delta t_{(n)} - a_{Giv} / 2 \cdot \Delta t_{(n)}^2$$

logo

$$\Delta e_{Giv(n)} = V_{Giv(n-1)} \cdot \Delta t_{(n)} - (F_{(n)} / \cos \psi_{(n)} / M_i - G) / 2 \cdot \Delta t_{(n)}^2$$

As condições geométricas são

$$\Delta e_{Giv(n)} = \Delta h_{Gi(n)} = h_{Gi(n-1)} - h_{Gi(n)}$$

em que a altura a que se encontra o centróide da parte inferior do módulo h_{Gi} é

$$h_{Gi} = \rho_i \cdot \text{sen} \theta_i$$

e logo

$$\Delta h_{Gi(n)} = \rho_{i(n-1)} \cdot \text{sen} \theta_{i(n-1)} - \rho_{i(n)} \cdot \text{sen} \theta_{i(n)}$$

igualando agora esta expressão de $\Delta h_{Gi(n)}$ (condições geométricas), com a de $\Delta e_{Giv(n)}$ (condições cinemáticas), obtém-se a equação de onde se pode obter o valor de $\Delta t_{(n)}$

$$V_{Giv(n-1)} \cdot \Delta t_{(n)} - (F_{(n)} / \cos \psi_{(n)} / M_i - G) / 2 \cdot \Delta t_{(n)}^2 = \rho_{i(n)} \cdot \text{sen} \theta_{i(n)} - \rho_{i(n-1)} \cdot \text{sen} \theta_{i(n-1)}$$

Outros parâmetros a substituir nesta expressão são

$$\psi_{(n)} = \alpha_{(n)} + \text{acos} (H_s / R) - \gamma_{(n)} - \pi / 2 ;$$

$$\theta_{i(n)} = \alpha_{(n)} + \text{acos} (H_s / R) + \beta_{i(n)} - \pi / 2 ;$$

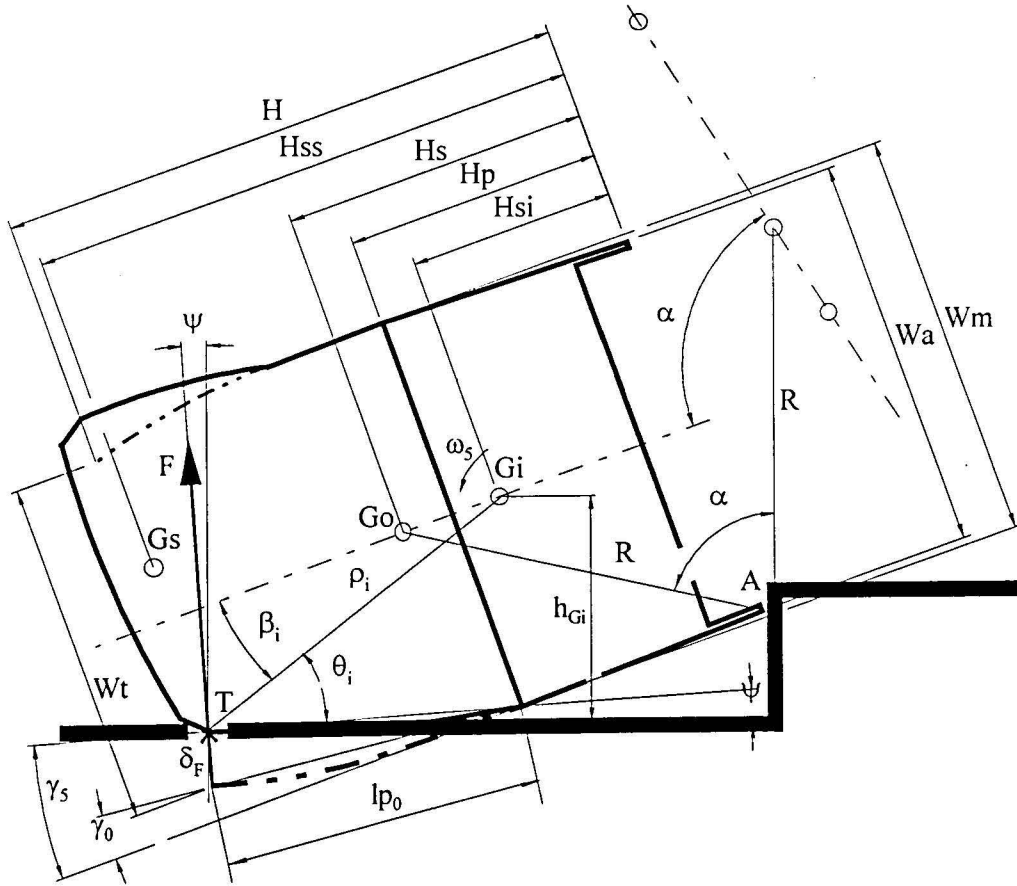
$$\rho_{i(n)} = \sqrt{((W_m / 2) - l_{p(n)} \cdot \text{sen} \gamma_{(n)})^2 + (l_{p(n)} \cdot \cos \gamma_{(n)} + (H_p - H_{si}))^2} ;$$

em que

$$\alpha_{(n)} = \alpha_{(n-1)} + \omega_{(n)} \cdot \Delta t_{(n)} + F_{(n)} / \cos \psi_{(n-1)} \cdot \rho_{i(n)} / I_e \cdot (\varphi \cdot \text{sen} \theta_{i(n-1)} - \cos \theta_{i(n-1)}) / 2 \cdot \Delta t_{(n)}^2$$

e

$$\beta_{i(n)} = \text{atan} ((W_m / 2) - l_{p(n)} \cdot \text{sen} \gamma_{(n)}) / (l_{p(n)} \cdot \cos \gamma_{(n)} + H_p - H_{si})$$



por sua vez

$$\gamma_{(n)} = \gamma_{(0)} + \text{asen} (\delta_{F(n)} / l_{p(0)})$$

e

$$l_{p(n)} = \text{sqrt} (l_{p(0)}^2 - \delta_{F(n)}^2)$$

sendo os seus valores iniciais respectivamente

$$\gamma_{(0)} = \arcsin \left((W_m / 2 - W_t / 2) / l_{p(0)} \right)$$

$$l_{p(0)} = \sqrt{(W_m / 2 - W_t / 2)^2 + (H - H_p)^2}$$

O deslocamento horizontal $\Delta e_{Th(n)} = e_{Th(n)} - e_{Th(n-1)}$, que corresponde ao trabalho elementar realizado pela força de atrito (aplicada em T), será determinado por

$$\Delta e_{Th(n)} = \Delta e_{Gh(n-1)} + (\rho_{i(n)} \cdot \cos \theta_{i(n)} - \rho_{i(n-1)} \cdot \cos \theta_{i(n-1)})$$

considerando-se desprezível a diferença entre a projecção horizontal do C.G. global e a do centróide da parte inferior do módulo.

sendo o deslocamento horizontal do C.G. dado por

$$\Delta e_{Gh(n)} = V_{Gh(n-1)} \cdot \Delta t_{(n)} - (M_s \cdot G + F_{(n)} / \cos \psi_{(n)}) \cdot \varphi / M / 2 \cdot \Delta t_{(n)}^2$$

A distância da linha de cintura B ao solo h_B , é um parâmetro a controlar e o seu valor determinar-se-á por

$$h_{B(n)} = \rho_{i(n)} \cdot \sin \theta_{i(n)} + (H_p - H_{si}) \cdot \cos (\alpha_{(n)} + \arccos (H_s / R)) - W_m / 2 \cdot \sin (\alpha_{(n)} + \arccos (H_s / R))$$

A sua anulação, antes do início da recuperação elástica da deformação, significaria que parte da energia de translação vertical, seria de imediato convertida em rotação em torno do novo contacto com o solo B .

Dever-se-á ter em conta pois, que existe uma velocidade de rotação mínima, para a qual, caso o ponto B atinja o solo antes de se iniciar a recuperação elástica, a rotação não se inverta solicitando ainda mais a estrutura do módulo.

Esse valor será determinado pela conservação da quantidade de movimento de rotação em torno de B , após este segundo impacto

$$v''_{Giv(n)} \cdot M_i \cdot b_{hi} = I_e \cdot \omega_{(n)}$$

em que o braço do momento é

$$b_{hi} = (H_p - H_{si}) \cdot \sin (\alpha_{(n)} + \arccos (H_s / R)) + W_m / 2 \cdot \cos (\alpha_{(n)} + \arccos (H_s / R))$$

logo

$$v''_{Giv(n)} = I_e \cdot \omega_{(n)} / M_i / ((H_p - H_{si}) \cdot \sin (\alpha_{(n)} + \arccos (H_s / R)) + W_m / 2 \cdot \cos (\alpha_{(n)} + \arccos (H_s / R)))$$

Como o andamento do cálculo se rege por incrementos de deformação, o modo de detectar a altura em que os incrementos, já na sua fase negativa, (recuperação elástica), não são suficientes para acompanhar a rotação inversa do módulo, é pela velocidade vertical relativa entre T e Gi .

Quando esta velocidade for simétrica da de queda de G_i , dar-se-á o início do voo do módulo, correspondente ao desencosto do ponto T do solo, situação verificada em alguns ensaios reais e nomeadamente no de aferição.

O seu valor será determinado por

$$v'_{Giv(n)} = \omega_{(n)} \cdot \rho i_{(n)} \cdot \cos \theta i_{(n)}$$

Quanto à energia cinética, será obtida de

$$Ec = 1 / 2 \cdot M \cdot (V_{Gv(n)}^2 + V_{Gh(n)}^2) + 1 / 2 \cdot I_E \cdot \omega_{(n)}^2$$

O fim desta fase, é detectado pelo fim do incremento da velocidade de rotação inversa, que corresponderia à inversão, impossível, da força de reacção vertical do pavimento.

Exemplo de aplicação (continuação da fase anterior):

Nota - Foi introduzido um coeficiente k , para correcção da tabela de valores força-deformação, obtida dos ensaios de flexão, no sentido de aferir o modelo ao ensaio prático.

O coeficiente de atrito usado, parece ser aceitável para o pavimento em alcatrão sobre brita, onde se realizou o ensaio. Refira-se que nos pontos de impacto não se verificou nenhum enterramento nem desagregação do piso.

$\delta F(n)$	$F(n)$	$\rho_i(n)$	$l_p(n)$	$\gamma(n)$	$\beta_i(n)$	$\theta(n)$	$\psi(n)$	$eq.\Delta t, \Delta t^2$	$\Delta t(n)$	$h_{Gi}(n)$
m	N	m	m	rad	rad	rad	rad	-	s	m
0.000	0	2.395	1.869	0.105	0.443	0.724	0.176		0.000	1.587
0.020	4528	2.384	1.869	0.116	0.436	0.723	0.172	-2E-16	0.003	1.578
0.040	12065	2.373	1.869	0.127	0.428	0.722	0.167	-8E-16	0.005	1.569
0.061	17663	2.362	1.868	0.138	0.421	0.721	0.162	-1E-16	0.008	1.560
0.081	21542	2.351	1.868	0.148	0.414	0.720	0.157	5E-17	0.011	1.550
0.101	24665	2.339	1.867	0.159	0.407	0.719	0.153	-5E-16	0.014	1.541
0.121	26179	2.327	1.865	0.170	0.400	0.718	0.147	-4E-16	0.017	1.531
0.141	27039	2.315	1.864	0.181	0.393	0.716	0.142	-1E-16	0.021	1.520
0.161	28347	2.303	1.862	0.192	0.386	0.715	0.137	6E-16	0.024	1.509
0.182	29636	2.290	1.861	0.203	0.379	0.713	0.131	-1E-15	0.028	1.498
0.202	29677	2.277	1.858	0.213	0.372	0.711	0.125	2E-16	0.032	1.486
0.222	28422	2.264	1.856	0.224	0.366	0.709	0.119	-8E-16	0.036	1.473
0.242	31013	2.251	1.854	0.235	0.359	0.706	0.112	-2E-16	0.041	1.460
0.262	35299	2.237	1.851	0.246	0.352	0.702	0.104	-2E-16	0.046	1.445
0.282	31912	2.224	1.848	0.257	0.345	0.698	0.096	-6E-16	0.052	1.429
0.303	30335	2.209	1.845	0.268	0.339	0.693	0.086	-6E-16	0.059	1.411
0.323	26715	2.195	1.841	0.279	0.332	0.686	0.075	-5E-16	0.067	1.391
0.343	24905	2.181	1.838	0.290	0.326	0.675	0.060	-1E-15	0.079	1.362
0.355	23095	2.172	1.835	0.296	0.322	0.654	0.036	-3E-17	0.097	1.321
0.360	22920	2.168	1.834	0.299	0.320	0.651	0.032	5E-03	0.098	1.314
0.340	20370	2.183	1.838	0.288	0.326	0.652	0.037	1E-15	0.094	1.324
		-	-	-	-	--	--	-	-	-

☞ Quando $v'_{Giv(n)} = -v_{Giv(n)}$, o módulo descola do chão

☞ Máx. $v_{Giv(n)}$, para que, tocando B no solo ($h_{B(n)}=0$), não se inverta a rotação

$v_{Giv(n)}$ m/s	$v'_{Giv(n)}$ m/s	$v''_{Giv(n)}$ m/s	$hB(n)$ m	$\Delta e_{Th(n)}$ m/s	$v_{Gh(n)}$ m/s	$\alpha(n)$ rad	$\omega(n)$ rad	E_c J	ΔE_p-E_d J	$E_d(def)$ J
3.242			0.328	0.000	2.037	1.196	2.262	12592	12592	0
3.259	4.004	-36.994	0.319	-0.001	2.038	1.203	2.240	12610	12610	91
3.259	3.889	-31.588	0.311	-0.002	2.041	1.209	2.184	12477	12477	335
3.246	3.724	-27.046	0.302	-0.003	2.045	1.215	2.099	12232	12232	691
3.225	3.523	-23.186	0.293	-0.004	2.049	1.221	1.994	11912	11912	1125
3.194	3.289	-19.839	0.284	-0.004	2.055	1.227	1.869	11533	11533	1623
3.159	3.034	-16.935	0.274	-0.005	2.061	1.232	1.731	11128	11128	2151
3.119	2.761	-14.383	0.264	-0.005	2.068	1.238	1.581	10711	10711	2696
3.074	2.509	-12.289	0.254	-0.005	2.060	1.243	1.442	10273	10273	3268
3.022	2.236	-10.367	0.243	-0.004	2.052	1.248	1.291	9813	9813	3866
2.966	1.951	-8.617	0.232	-0.002	2.044	1.253	1.131	9358	9358	4465
2.911	1.666	-7.048	0.220	0.000	2.035	1.258	0.969	8933	8933	5038
2.841	1.337	-5.455	0.207	0.003	2.024	1.262	0.781	8463	8463	5663
2.746	0.938	-3.715	0.193	0.008	2.011	1.265	0.549	7912	7912	6375
2.652	0.558	-2.166	0.177	0.016	1.997	1.268	0.328	7444	7444	7019
2.552	0.287	-1.101	0.159	0.027	1.982	1.269	0.169	7024	7024	7631
2.460	-0.351	1.347	0.139	0.040	1.966	1.269	-0.206	6696	6696	8170
2.340	-1.090	4.371	0.109	0.068	1.944	1.264	-0.640	6479	6479	8672
2.183	-2.138	10.122	0.066	0.125	1.913	1.247	-1.240	6582	6582	8952
2.177	2.116	-10.114	0.059	0.127	1.912	1.246	1.227	6544	6544	9066
2.206	-2.343	11.937	0.068	0.129	1.918	1.240	-1.351	6824	6824	8659
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

3.7.6 Fase 6 - RECUPERAÇÃO ELÁSTICA E IMOBILIZAÇÃO

Após ser atingida a deformação máxima dos pórticos do módulo, sem invasão do espaço residual de segurança, inicia-se a recuperação elástica parcial da deformação sofrida, ao mesmo tempo que a rotação inversa, relativamente à de queda, permite a continuação da descida da zona inferior do módulo até ao seu choque com o pavimento.

A partir deste momento seguir-se-á um movimento alternado de baloiço sobre a linha do painel correspondente à linha de dobragem inferior da estrutura, (normalmente base dos pilares ao nível do pavimento), ao mesmo tempo que se vai dando a travagem completa do escorregamento horizontal.

Durante esta fase, não mais será atingida a deformação máxima da estrutura, pois o balanceamento vai sendo progressivamente amortecido.

O modelo matemático aqui descrito não aborda esta fase de comportamento, por ser irrelevante para os propósitos deste trabalho.

3.7.7 EFEITOS DA VARIAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS INICIAIS

Procedimento

Como já referido na introdução, nem todos os parâmetros relevantes que regem o comportamento mecânico do ensaio de validação previsto no Reg. 66 da E.C.E., estão explicitamente condicionados no texto do mesmo.

O regulamento prefere expressar características fáceis de controlar, como por exemplo a massa do módulo, admitindo por omissão, que os outros parâmetros não são significativos para os resultados do ensaio.

A aplicação que se segue, utilizando a modelação matemática anteriormente desenvolvida, destina-se a avaliar a importância relativa da massa do módulo de ensaio, cujo valor é devidamente condicionado pelo regulamento, do momento de inércia e do atrito com o solo, parâmetros não explicitamente condicionados pelo Regulamento.

Para o efeito fez-se variar, isoladamente, a massa e o momento de inércia do módulo, em torno dos respectivos valor no ensaio real de referência, referido no capítulo 2., e no que se refere ao coeficiente de atrito, por ser desconhecido, fez-se variar entre os valores de 0 e 0.5.

O objectivo de cada determinação foi encontrar, para cada combinação de parâmetros, o factor de correcção k da tabela da rigidez da estrutura, que conduz a uma deformação máxima igual à do ensaio real.

Análise dos resultados

O quadro e o gráfico que se seguem, reproduzem os resultados obtidos na aplicação.

No gráfico podem ver-se as curvas referentes ao factor de correcção de rigidez em função da variação, (percentual relativamente aos valores do ensaio real de referência,) quer do momento de inércia quer da massa do módulo.

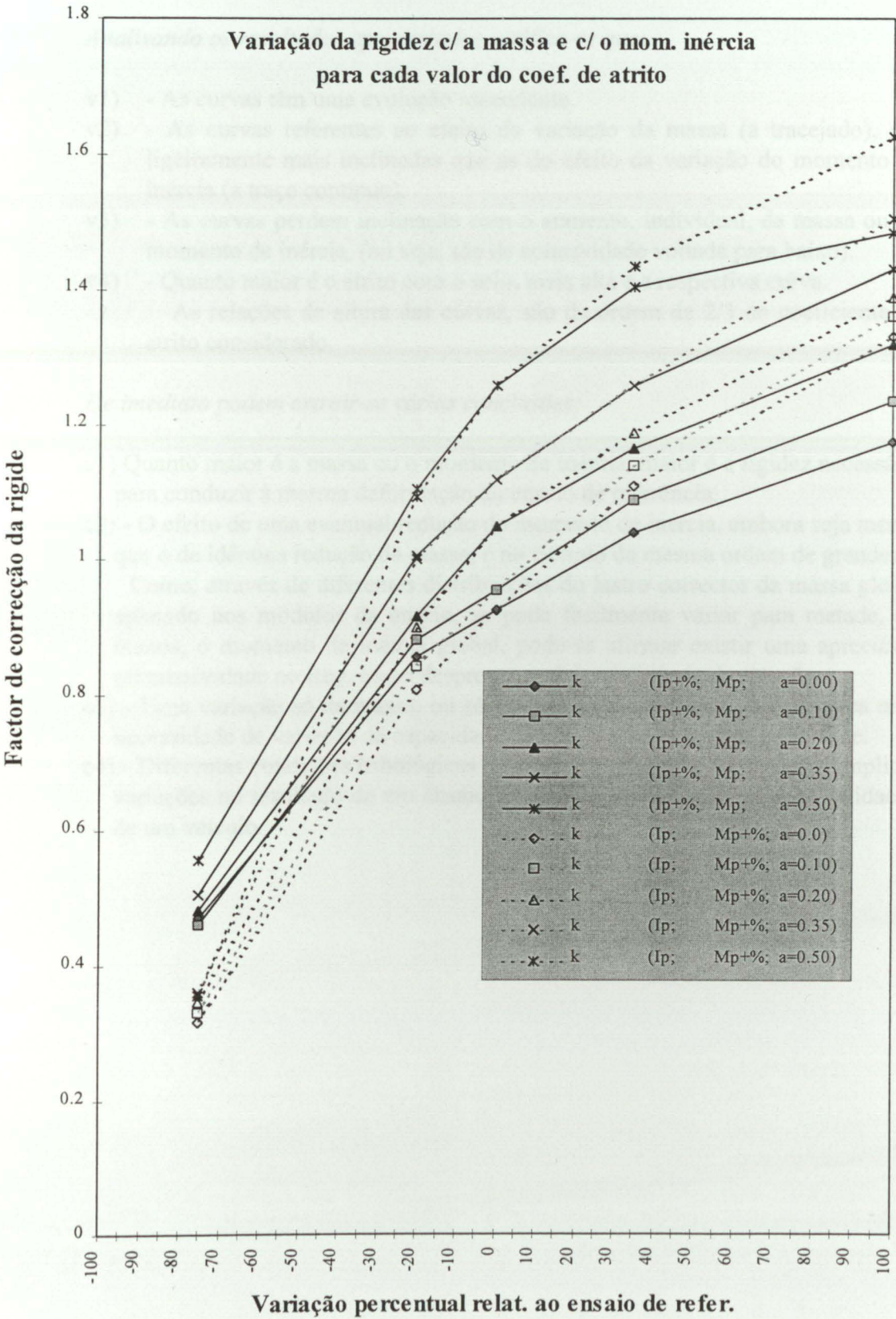
As curvas representadas a contínuo correspondem ao efeito da variação do momento de inércia, as representadas a tracejado ao da massa.

As cores/símbolos das referidas curvas, identificam os diferentes valores de coeficiente de atrito módulo-solo utilizados.

Cada curva função do momento de inércia, foi obtida considerando a massa constante e igual à do ensaio de referência.

Cada curva função da massa, foi obtida considerando o momento de inércia constante e igual ao do ensaio de referência.

(%)	k (Ip+%; Mp; a=0.00)	k (Ip+%; Mp; a=0.10)	k (Ip+%; Mp; a=0.20)	k (Ip+%; Mp; a=0.35)	k (Ip+%; Mp; a=0.50)	k (Ip; Mp+%; a=0.0)	k (Ip; Mp+%; a=0.10)	k (Ip; Mp+%; a=0.20)	k (Ip; Mp+%; a=0.35)	k (Ip; Mp+%; a=0.50)
-100										
-95										
-90										
-85										
-80										
-75	0.47	0.46	0.48	0.505	0.555	0.315	0.33	0.345	0.36	0.355
-70										
-65										
-60										
-55										
-50										
-45										
-40										
-35										
-30										
-25										
-20	0.855	0.88	0.915	1.005	1.105	0.805	0.84	0.9	1	1.095
-15										
-10										
-5										
0	0.925	0.955	1.05	1.12	1.26	0.925	0.955	1.05	1.12	1.26
5										
10										
15										
20										
25										
30										
35	1.04	1.09	1.165	1.26	1.405	1.11	1.141	1.19	1.26	1.435
40										
45										
50										
55										
60										
65										
70										
75										
80										
85										
90										
95										
100	1.175	1.236	1.32	1.43	1.485	1.33	1.36	1.39	1.505	1.625



Analisando os resultados apresentados verifica-se que:

- v1) - As curvas têm uma evolução ascendente.
- v2) - As curvas referentes ao efeito da variação da massa (a tracejado), são ligeiramente mais inclinadas que as do efeito da variação do momento de inércia (a traço contínuo).
- v3) - As curvas perdem inclinação com o aumento, individual, da massa ou do momento de inércia, (ou seja, são de concavidade voltada para baixo).
- v4) - Quanto maior é o atrito com o solo, mais alta é a respectiva curva.
As relações de altura das curvas, são da ordem de $2/3$ do coeficiente de atrito considerado.

De imediato podem extrair-se várias conclusões:

- c1) Quanto maior é a massa ou o momento de inércia, maior é a rigidez necessária para conduzir à mesma deformação do ensaio de referência.
- c2) - O efeito de uma eventual redução do momento de inércia, embora seja menor que o de idêntica redução da massa, é no entanto da mesma ordem de grandeza.
Como, através de diferentes distribuições do lastro corrector da massa global aplicado nos módulos de ensaio, se pode facilmente variar para metade, ou menos, o momento de inércia global, pode-se afirmar existir uma apreciável permissividade no Reg. 66 ao desprezar o efeito da inércia de rotação.
- c3) - Uma variação só da massa, ou só do momento de inércia, não implica uma necessidade de variação da capacidade de resistência da mesma amplitude.
- c4) - Diferentes condições tribológicas do contacto módulo solo, poderão implicar variações no resultado de um ensaio de capotamento, decisivas para validação de um veículo.

3.8 MÓDULO DE ENSAIO - TESTE DE VALIDAÇÃO

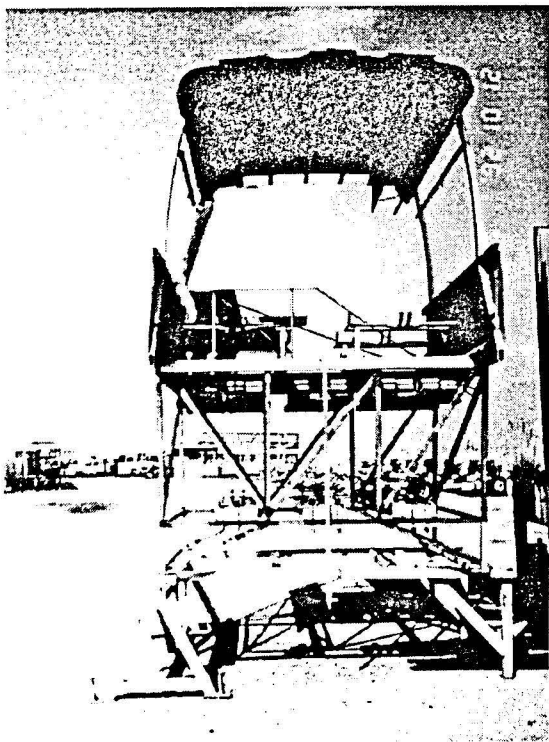
Como já foi anteriormente referido, a 12 de Outubro de 1992 foi efectuado nas instalações da firma Salvador Caetano um (de entre vários,) ensaio de capotamento no âmbito de um protocolo de projecto estabelecido com o INEGI - FEUP, sob o título, “Design de Um Novo Tipo de Carroçaria para Autocarros de Turismo”.

O objectivo deste ensaio foi testar, segundo as condições do Reg.66 da E.C.E., uma estrutura suficientemente resistente para que o seu comportamento não fosse de colapso completo, de forma a permitir, por extrapolação, determinar a resistência necessária.

Este ensaio foi tomado neste trabalho como referência para ilustrar e validar a metodologia de projecto, dos pórticos envolventes da área do habitáculo.

Preparação do Ensaio

O ensaio foi efectuado sobre um módulo central, de uma hipotética estrutura, de um autocarro da linha comercializada com a designação Modelo DELTA, que viria a ser o primeiro autocarro comercializado em Portugal, e um dos primeiros europeus, em conformidade com o referido regulamento relativo à segurança passiva contra o capotamento.



O módulo de ensaio era constituído por dois pórticos em tubo de 80x40x4, afastados entre si da distância “standard” entre pilares e ligados pelos perfis e chapeamentos típicos. Nas zonas de ligação e no corpo inferior dos pilares foram aplicados reforços, cujos comportamentos prévios haviam sido testados em ensaios de flexão e cujas curvas características (T6 e CS11) foram em capítulo anterior apresentadas.

Foram aplicados blocos de ferro rigidamente ligados sob o pavimento de modo a corrigir a posição do centro de gravidade para a altura estimada como real no veículo.

Foi aplicada uma placa de polistireno expandido com as dimensões correspondentes à área residual de sobrevivência definida pelo regulamento.

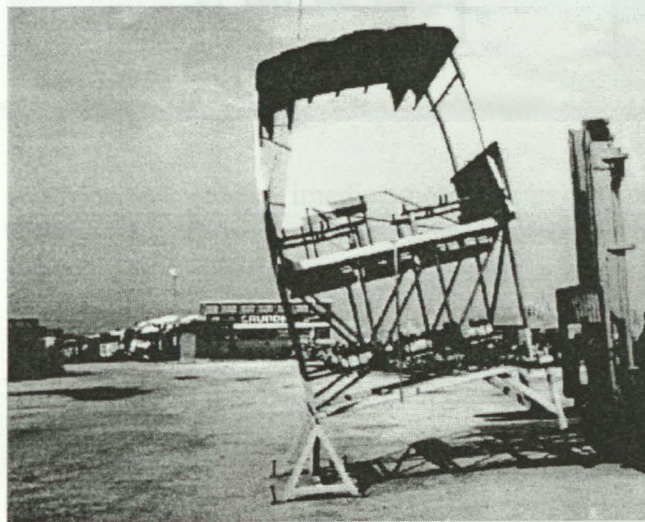
Foram também criados dispositivos mecânicos de cursor deslizante, para

medição das deformações máximas atingidas pelos pórticos durante o ensaio e mobilizadas câmaras de vídeo.

O módulo foi colocado em cima de uma estrutura rotativa a 800 mm de altura do solo. Este era formado por uma superfície dura de brita, levemente revestida a betuminoso.

3.8.2 Ensaio e Modo de Colapso

A estrutura rotativa de ensaio, foi rodada muito lentamente até à perda de estabilidade do módulo. A partir desse momento iniciou a sua dinâmica de queda



própria, primeiro em rotação simples e depois de se libertar do apoio, em queda livre.

Da análise dos registos vídeos verifica-se que nos momentos seguintes ao impacto da linha superior do painel lateral (transição para o tejadilho) com o solo, o ponto de contacto se manteve estático, ou até com escorregamento ligeiro no sentido contrário ao da projecção da queda, e só numa fase mais adiantada da deformação iniciou um escorregamento final sentido da mesma.

No pavimento não foi verificado qualquer enterramento nem levantamento da capa superficial.

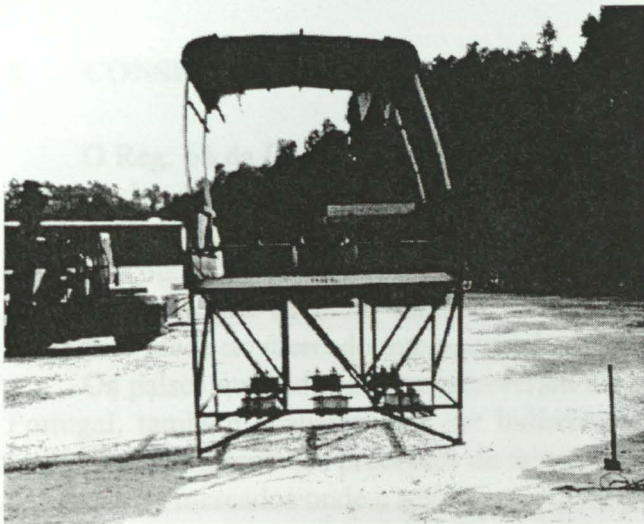


É observável um movimento de rotação independente entre o tejadilho e o corpo inferior, ligados pelos pilares que funcionaram como braços de pantógrafo.

A rotação dos pilares no entanto não foi de forma a aproximarem-se da placa delimitadora do espaço residual de sobrevivência.

As rótulas que permitiram a formação daquele mecanismo tiveram a seguinte localização e características:

- zona inferior de cada pilar do lado do capotamento, por perda de estabilidade à compressão do “U” de reforço, (quer na alma, quer nas abas ligadas por soldadura descontínua ao tubo 80x40x4). Zona correspondente ao teste de flexão T6 referido no capítulo 3.4.



-zona superior da cada pilar do lado do capotamento, por perda de estabilidade da parede do tubo à compressão, (parede voltada para o exterior do módulo) na zona do pilar imediatamente abaixo dos reforços da transição pilar-tejadilho, como se pretendia. Características correspondentes, portanto, ao ensaio de um troço simples de tubo (CS11).

-Zona superior do lado contrário ao de capotamento, deformação localizada predominantemente no tubo do

tejadilho na secção imediatamente antes da zona reforçada de transição. Alguma deformação também no pilar com localização homologa à do lado do capotamento. Portanto características também correspondentes ao ensaio de um troço simples de tubo (CS11).

-Zona inferior do lado contrário ao de capotamento, deformação predominante ao nível inferior das janelas, logo com características também correspondentes ao ensaio de um troço simples de tubo (CS11). Notou-se no entanto alguma uma pequena deformação distribuída por todo o troço reforçado do pilar entre a base o nível inferior das janelas.

Os valores correspondentes à deformação máxima atingida, são os referidos no capítulo 3.5 (Curva F/δ do pórtico).

Este modo de deformação está em perfeito acordo com as previsões da análise do capítulo 3.4 (Modos de Deformação do Pórtico e Energia Correspondente).

Resultados

A deformação máxima atingida no topo dos pilares (355 mm), foi cerca de 75% da admissível pelo Reg. 66 da E.C.E., que corresponderia à invasão da área residual de sobrevivência.

A energia dissipada, estimada a partir das deformações máximas de cada rótula, foi de cerca de 4668 J em cada um dos dois pórticos, o que dá um total de 9336J.

Segundo a fórmula de cálculo do referido regulamento a energia que corresponderia ao ensaio seria:

$$E = 0.75 * M * G * h \quad (\text{em que } M \text{ é a massa, } G \text{ a aceleração da gravidade e } h \text{ a altura máxima de queda do centro de gravidade})$$

$$E = 0.75 * 1480 * 9.8 * 1.2 = 13054 \text{ J}$$

Ou seja neste caso, um valor cerca de 40% superior ao efectivamente necessário.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Reg. 66 da E.C.E. muito contribuiu para a melhoria das condições de segurança dos veículos de transporte colectivo de passageiros, nesta fase inicial da sua aplicação.

As principais empresas construtoras deste tipo de veículos, puderam debruçar-se sobre as condições de segurança da estrutura envolvente do “habitat” dos passageiros, sem receio de que as mais valia no custo final dos veículos, criasse uma perda de competitividade no mercado internacional.

Os países que ainda não subscreveram a aplicação do referido regulamento, como Portugal, também acabaram por ser indirectamente beneficiados pela necessidade de normalização interna dos processos de fabrico, das empresas de qualidade que exportam para aqueles mercados onde a segurança é mais considerada.

Isto pese embora o prejuízo de perda de competitividade daquelas empresas, nos mercados não subscritores do Reg. 66 da E.C.E..

Passada esta fase inicial, em que todas as imperfeições legislativas são compreensíveis, e perante o surgimento de múltiplos organismos ligados à homologação de veículos nem sempre descomprometidos relativamente às soluções técnicas encontradas, novas medidas urge que sejam tomadas.

Assim sendo, torna-se necessária a criação de legislação comunitária que obrigue todos os seus membros a subscreverem o Reg. 66, valorizando a competitividade das competências.

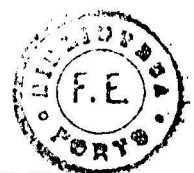
Para além disto, é também imperioso o aperfeiçoamento do Reg. 66, de modo a garantir que a bitola mínima de homologação, não flutue com a escolha do método de validação, nem com a maior ou menor utilização das omissões do referido regulamento.

Neste sentido, e como corolário do presente trabalho, não devem continuar a ser aceites, por não serem equivalentes, procedimentos de validação que não contemplem a dinâmica da queda, e desconsiderem nomeadamente, o efeito decisivo do momento de inércia do veículo.

5 BIBLIOGRAFIA

1. Miles, The Application of Finite Element Methods to Vehicle Collapse Analysis, PhD Thesis, SAS, Cranfield Institute of Technology, UK 1976.
2. Miles, The Determination of Collapse Load and Energy Absorbing Properties of Thin Walled Structures Using Matrix Methods of Analysis, Int. Journal. Mech. Sci. Vol.18, 1976.
3. Tidbury, The Investigation of 8 Bus Roll Over Accidents in Great Britain 1976-77, Invited paper to the Hungarian Society of Scientific Engineers, 1977.
4. D. Kecman, Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes in Relation to the Bus Roll Over Problem, PhD Thesis, Cranfield Institute of technology, UK 1979.
5. Brown, The Collapse of Thin Walled Rectangular Beams in Bi-axial Bending, Msc Thesis, Cranfield Institute of Technology, UK 1980.
6. Wardill & Kecman, Theoretical Prediction of the Overall Collapse Mode and Maximum Strength of a Bus Structure in a Roll Over Situation, Congress FISITA, Hamburg 1980.
7. Brown & Tidbury, An Investigation of the Collapse of Thin Walled Rectangular Beams in Bi-axial Bending, Int. Journal of Mech. Sciences, Vol. 25 No 9-10, 1983.
8. Matolcsy, M., Plastic hinge theory to analyse the structural strength and energy absorption of bus frames. Nauka I Motorna Vozila, Belgrado - Yugoslavia, 1-3 Aril 1987.
9. Brown, The Design and Type Approval of Coach Structures for Roll-Over Using the CRASH-D Program, Int. Conf. on the Design, Manufacture and Operation of Bus, Liverpool, April 1988.
10. Brown, ECE Regulation 66 and the Use of the CRASH-D Program in the Design and Type Approval of Coach Structures for Roll-Over, XXI Meeting of Bus and Coach Experts, Budapest 1990.
11. D. Kecman, Design-analysis of optimum safety structures in buses. Forensic Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 371-385, 1990.
12. Vignjevic & Kecman & Sadeghi, Extraction of the Hinge-Rotation Curves from the DYNA3-D Analysis of the Deep Bending Collapse of a Thin Walled Tube.

13. D. Kecman, Deep Bending Collapse of Thin Walled Beams and Joints, Manual of Crashworthiness Engineering, Vol. 5, Massachusetts Institute of Technology, 1989
14. D. Kecman, Occupant Protection in Minibuses and Coaches. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Crashworthiness of Transportations Systems: Structural impact and occupant protection, Tróia - Portugal, 7-19 Julho 1996.
15. Matolcsy, M., Crashworthiness of Bus Structures and Roll-Over Protection. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Crashworthiness of Transportations Systems: Structural Impact and Occupant Protection, Tróia - Portugal, 7-19 Julho 1996.
16. S. Vincze-Pap, Occupant and Roll-over Safety Tests on Coaches. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Crashworthiness of Transportations Systems: Structural Impact and Occupant Protection, Tróia - Portugal, 7-19 Julho 1996.





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000013974