



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharias

Suspensões ativas em autocarros para melhoria do
comportamento dinâmico e do conforto dos
passageiros

João Pedro Francês Silva Costa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Fael

Covilhã, Outubro de 2015

Agradecimentos

Em primeiro lugar tenho de agradecer aos meus pais por toda a educação e formação que me transmitiram desde sempre. Sem isso não seria a pessoa que sou hoje. Por todos os bons e maus, por todas as discussões e momentos alegres, por todas as chamadas de atenção e por toda o apoio incondicional que nunca faltou. A eles devo o término deste ciclo, a eles devo tudo...

A minha irmã que embora seja uma preocupação constante, tem o dom de me fazer sorrir nas situações mais difíceis.

Ao Professor Paulo Fael por toda a disponibilidade, paciência, boa disposição, pela tranquilidade, pela sabedoria e por acreditar nesta dissertação. Sem ele a realização deste trabalho não seria possível. Um grande e sincero muito obrigado.

A Ana Tavares, pela compreensão, ajuda, carinho, dedicação, interesse, plenitude e acima de tudo por nunca duvidar das minhas capacidades. Para sempre ficarás no meu pensamento, para sempre farás parte de mim.

Ao Fábio Pereira grande e eterno amigo, por toda a ajuda técnica nos momentos de aflição e presença nos momentos fundamentais sempre com a calma como uma constante. Ficarei em dívida para contigo, espero poder apoiar-te da mesma forma extraordinária como tu o fizeste.

A todos os amigos e família que indireta ou diretamente estiveram envolvidos em todo o meu percurso académico. Todos me fizeram crescer, todos me fizeram melhorar os traços menos bons da minha personalidade.

Por último agradecer a todos os que passaram pela equipa de andebol masculino da ubi, pois o desporto sempre foi uma grande ajuda para nunca desistir do meu objetivo.

Resumo

Os comboios pendulares vieram responder à necessidade de viagens de alta velocidade mantendo o conforto e segurança dos passageiros. Para diminuir o tempo de viagem, a solução encontrada foi inclinar a carruagem de modo a que os passageiros não sintam as curvas descritas pelo comboio a grandes velocidades. A principal vantagem é o facto de estes veículos não precisarem de linhas próprias para o fazer, ao invés utilizam linhas normais onde circulam outros comboios sem sistema pendular.

Esta dissertação surge no âmbito de responder ao problema que existe atualmente nos autocarros citadinos. A suspensão que os autocarros possuem, embora amortença e suavize os acidentes do pavimento, em curva faz com o veículo incline fazendo com que os passageiros sejam atirados para o lado de fora da curva.

Através de um inquérito a passageiros de autocarros citadinos foi confirmado o problema e a necessidade de desenvolver um sistema que solucione o desconforto sentido pelos mesmos.

Foi elaborado e testado computacionalmente um modelo físico simplificado de um autocarro que demonstrou que a implementação de um sistema de correção que anule o desconforto em curva é possível e necessária.

Palavras-chave

Autocarros citadinos, sistema de suspensão, conforto, conforto em curva, comboios pendulares, sistema de correção.

Abstract

Tilting trains came to address the need for high-speed travel while maintaining comfort and safety for the passengers. To decrease the travel time, the solution was to tilt the carriage, so that passengers do not feel the curves illustrated by train at high speeds. The main advantage is that these vehicles doesn't need their own lines to do so; instead they use normal lines where other trains without this system also travel.

This work comes in response to the problem that currently exists on the city buses. This problem is caused by the suspension that currently although they cushion pavement accidents they also cause the vehicle to tilt, causing the passengers to be thrown to the outside of the curve.

Through a survey of the city buses, passengers confirmed the problem and the need to develop a system that addresses the discomfort felt by them.

Was developed and tested computationally a simplified physical model of a bus, which showed that the implementation of a correction system like that could set aside the discomfort during cornering is possible and necessary.

Keywords

City bus, suspension system, comfort, cornering comfort, tilting trains, correction system

Índice

1.Introdução	1
2.Enquadramento.....	3
2.1.Inquérito.....	3
2.1.1. Inquérito aos passageiros	4
2.1.2. Inquérito aos motoristas	10
2.2. Comboios Pendulares.....	14
3. Princípio de funcionamento.....	19
3.1 Descrição do funcionamento do sistema de suspensão	19
3.2. Modelo físico de um autocarro e forças que atuam sobre ele	23
4.Estudo Computacional.....	26
4.1. Comportamento do veículo sem sistema de correção	26
4.1.2. Influência da rigidez da mola	29
4.1.3 Influência da massa do veículo	32
4.2. Comportamento do veículo com sistema de correção	34
4.2.1 Influência da velocidade na resposta do sistema de correção	35
5.Conclusão	40
6. Trabalhos propostos	42
7.Bibliografia	43

Lista de Figuras

Figura 1 - Conceito basico do sistema pendular [tilting trains]	Erro! Marcador não definido.
Figura 2 - Exemplo de um sistema europeu de “tilting”[4]	16
Figura 3 - Diagrama sobre o tipo de atuação de inclinação passivo e ativo [5].....	17
Figura 4 - Sistema Pneumático de "tilting" Japonês [7]	18
Figura 5 - JR/Hitachii N700	18
Figura 6 - Sistema de suspensão pneumática de um autocarro [8]	19
Figura 7 - Conjunto Mola Pneumática/Amortecedor	20
Figura 8 - Foto tirada por baixo do veículo com foco na suspensão traseira.....	21
Figura 9 - Representação do sistema de suspensão traseiro de um autocarro	21
Figura 10 - Foto tirada por baixo do veículo com foco na suspensão dianteira.....	22
Figura 11 - Representação esquemática do modelo físico da suspensão de um autocarro	23
Figura 12 - Modelo físico de um autocarro a descrever uma curva para a esquerda	24
Figura 13 - Diagrama de forças que atuam no autocarro enquanto curva para esquerda	25
Figura 14 - Diagrama de forças a atuar no autocarro quando este descreve uma curva para a esquerda com sistema de correção	25

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Alguns dos veículos importantes no desenvolvimento daa tecnologia pendular.....	15
Tabela 2 - Dados da equação inseridos no programa excel	26
Tabela 3 - Dados da equação inseridos no programa excel	28
Tabela 4 - Dados da equação inseridos no programa excel	29
Tabela 5 - Dados da equação inseridos no programa excel	30
Tabela 6 - Dados da equação inseridos no programa excel	31
Tabela 7 - Dados inseridos no programa excel	32
Tabela 8 - Dados inseridos no programa excel	33
Tabela 9 - Dados inseridos no programa excel	34
Tabela 10 - Dados inseridos no programa excel	35
Tabela 11 - Dados inseridos no programa excel	36
Tabela 12 - Dados inseridos no programa excel	37
Tabela 13 - Dados inseridos no programa excel	38
Tabela 14 - Dados inseridos no programa excel	39

Lista de Gráficos

Gráfico 1.....	4
Gráfico 2.....	4
Gráfico 3.....	5
Gráfico 4.....	6
Gráfico 5.....	6
Gráfico 6.....	7
Gráfico 7.....	8
Gráfico 8.....	9
Gráfico 9.....	10
Gráfico 10	11
Gráfico 11	11
Gráfico 12	12
Gráfico 13	13
Gráfico 14	13
Gráfico 15 - Resultados referentes á tabela2.....	27
Gráfico 16 - Resultados referentes á tabela 3	28
Gráfico 17 - Dados referentes à tabela 4	29
Gráfico 18 - Dados referentes à tabela 5	30
Gráfico 19 - Dados referentes à tabela 6	31
Gráfico 20 - Dados referentes à tabela 7	32
Gráfico 21 - Dados referentes à tabela 8	33
Gráfico 22 - Dados referentes à tabela 9	34
Gráfico 23 - Dados referentes à tabela 10	35
Gráfico 24 - Dados referentes à tabela 11	36
Gráfico 25 - Dados referentes à tabela 12	37
Gráfico 26 - Dados referentes á tabela 13	38
Gráfico 27 - Dados referentes à tabela 14	39

1.Introdução

A iniciativa deste estudo surgiu através da observação do sistema de “tilting”, ou pendular, que foi introduzido com sucesso nos veículos ferroviários. Como tal, pretende-se estudar a hipótese de implementação de um sistema com o mesmo princípio nos autocarros citadinos. É de salientar, que depois de uma pesquisa primária, ainda não existe nenhum modelo de autocarro em circulação que tenha este princípio. O sistema de suspensão dos autocarros atuais já possui um sistema compensação que diminui a inclinação do veículo quando curva. Os sistemas que controlam esta ação são mecânicos ou eletromecânicos.

O objetivo primordial desta tese surge com o propósito de tornar as viagens dos passageiros que viajam nos autocarros públicos mais confortáveis. Qualquer pessoa que viaje num autocarro quando este descreve uma curva mais apertada, sente uma força a projeta-lo para o lado de fora da curva, este acontecimento deve-se á força centrífuga que está presente em todos os veículos que percorrem uma trajetória curvilínea. A razão disto acontecer é porque a força centrífuga tem apenas componente horizontal.

Irá ser elaborado um inquérito a fim de concluir, se existe de facto um descontentamento por parte dos passageiros, face ao desconforto sentido em curva. Não só é importante a opinião dos passageiros, como também a dos profissionais que conduzem estas viaturas diariamente durante períodos extensos. Por esta razão, vão ser realizados dois inquéritos distintos, face a corresponder o tipo de perguntas ao público-alvo. Os resultados destes inquéritos irão ser fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Existem diferentes tipos de comboios pendulares em que a grande distinção, é o modo atuação. De uma forma geral, há comboios que inclinam de forma passiva, em que o princípio é fazer com as forças atuantes no comboio inclinem a carruagem para o ângulo desejado; e também os comboios que inclinam de forma ativa, em que a carruagem possui sensores que controlam o sistema de atuação que faz inclinar o veículo. Terá de se fazer um estudo breve sobre estes diferentes sistemas, para desta forma haver uma implementação mais eficaz nos autocarros.

Para haver um melhor entendimento sobre os sistemas de suspensão dos autocarros, pretende-se entrar em contacto com empresas ligadas ao ramo dos veículos pesados de passageiros, com o intuito de recolher informação precisa e detalhada. Espera-se com esta cooperação que haja um bom entendimento com as pessoas dentro do meio, para que se possa viabilizar uma visita ao estabelecimento para trocar impressões com engenheiros e mecânicos especializados nesta área.

Numa fase posterior, objetiva-se desenvolver um modelo físico simplificado de um autocarro e simula-lo computacionalmente, para observar a diferença de comportamento do veículo com um sistema pendular. Visto que não existe investigação em sistemas similares ao que o estudo propõe, pretende-se responder se a implementação de um sistema pendular em veículos pesados de passageiros é viável.

2. Enquadramento

2.1. Inquérito

No enquadramento desta tese elaborou-se um inquérito a passageiros e condutores de transportes públicos rodoviários, mais propriamente veículos pesados citadinos. O objetivo foi aferir se os passageiros sentem desconforto em situação de trajetórias curvilíneas. Este inquérito foi realizado com a colaboração da empresa Covibus, responsável pelos transportes públicos em questão na cidade da Covilhã. Assim que houve contacto com a empresa, esta mostrou-se imediatamente disponível e interessada nesta parceria e foi acordado desde o início que os resultados iriam ser dados a conhecer à referida empresa, após devidamente analisados e comentados. Foram elaborados dois tipos de inquéritos: um para passageiros e outro para os motoristas da empresa. Para os passageiros houve a preocupação em saber mais sobre o conforto da viagem, enquanto para os motoristas houve mais enfoque sobre o comportamento do veículo e se a suspensão deste é relevante na fadiga, depois de um dia de trabalho. Foram feitos 70 inquéritos a passageiros, todos eles preenchidos com contacto direto do autor e enquanto se viajava pela cidade, de modo a obter respostas com o máximo de fiabilidade. Em relação aos motoristas, uma vez que existiam 33 funcionários para esta função, foram entregues o mesmo número de inquéritos ao supervisor para este os distribuir e serem preenchidos *a posteriori*. Optou-se por esta decisão para não interferir com o trabalho dos inquiridos. A informação obtida foi organizada através de gráficos circulares para cada uma das questões, permitindo assim uma análise mais detalhada sobre o resultado. Abaixo, estão representados os gráficos com os resultados de cada questão; sendo que primeiro foram tratados os dados referentes aos passageiros e em segundo estão os dados correspondentes aos motoristas.

2.1.1. Inquérito aos passageiros

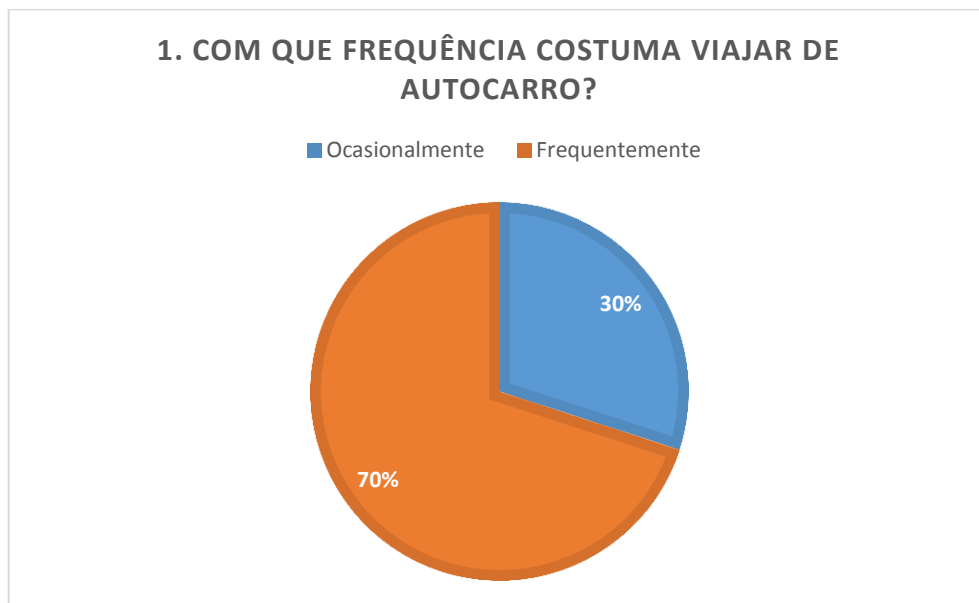


Gráfico 1

Como se pode observar no gráfico 1, a grande maioria dos inquiridos são passageiros assíduos dos transportes rodoviários. Sendo que a resposta “frequentemente” significa que o passageiro anda de transportes pelo menos uma vez por semana. Ao ter uma percentagem tão grande de passageiros regulares pode-se concluir que os dados respondidos pelos mesmos são fidedignos.

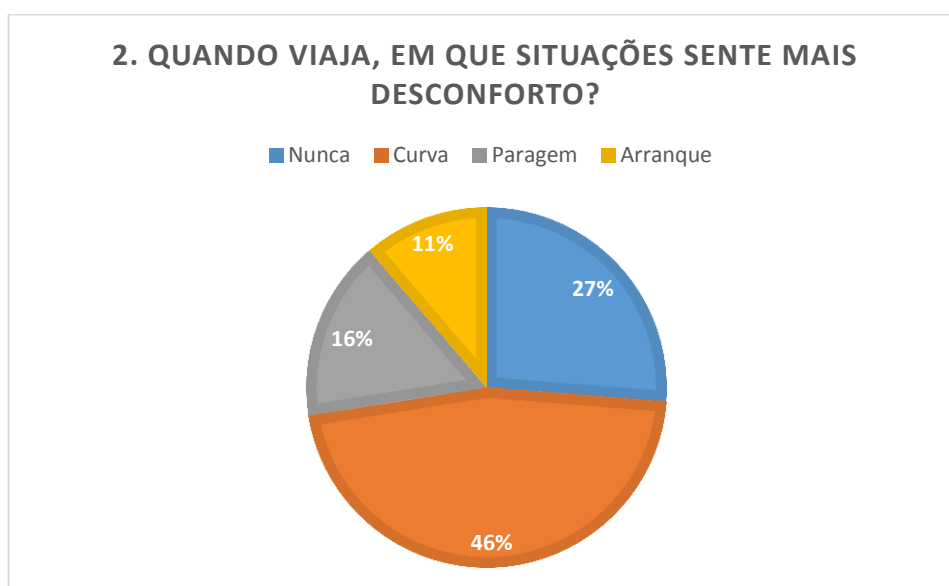


Gráfico 2

No gráfico 2 é deveras notório que a situação mais desconfortável que os passageiros sentem durante a viagem é em trajetórias curvilíneas. O que revela que o sistema em estudo é necessário. Ao realizar o inquérito foi notada uma grande percentagem de respostas “nunca”, talvez porque, a definição de desconforto para estas pessoas seja exagerada.

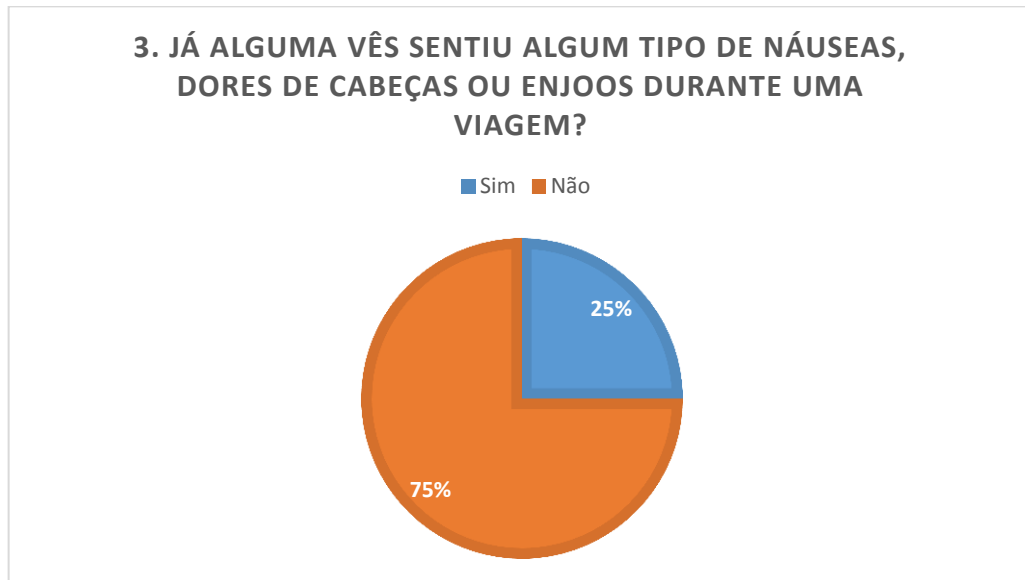


Gráfico 3

Na pergunta 3 pretende-se avaliar se o desconforto sentido pelos passageiros é causado pela força centrífuga provocada pela mudança de trajetória ou pelas vibrações causadas pelo pavimento, orifícios na estrada entre outros. Como se pode notar no gráfico 3, a esmagadora maioria dos inquiridos responderam que não sentem qualquer um dos sintomas associados às vibrações. Logo, pode-se concluir que na parte de amortecimento, este tipo de veículos funciona bem e a parte que é preciso ter em conta, é nas trajetórias que causem forças centrífugas ou laterais.

4. QUANDO VIAJA EM PÉ SENTE DIFICULDADE EM SE SEGURAR ENQUANTO O AUTOCARRO ESTÁ A CURVAR?

■ Sim ■ Não

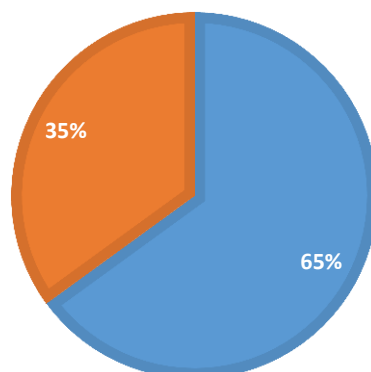


Gráfico 4

A maioria das pessoas já vivenciou o que é avaliado nesta pergunta: a dificuldade em manter a posição vertical quando se viaja de pé num autocarro citadino. Como era de esperar, a maioria dos passageiros respondeu que sente dificuldade em se segurar e alguns, com idade mais avançada, chegaram a comentar que é impossível viajar de pé. O que se torna uma situação bastante difícil, se o autocarro estiver com a lotação de lugares sentados, esgotada. Mais uma vez, as respostas dos inquiridos demonstram que é importante, dedicar esforços para resolver esta situação.

5. JÁ PRESENCIOU ALGUMA QUEDA DE UMA PESSOA ENQUANTO O AUTOCARRO ESTAVA EM ANDAMENTO?

■ Sim ■ Não

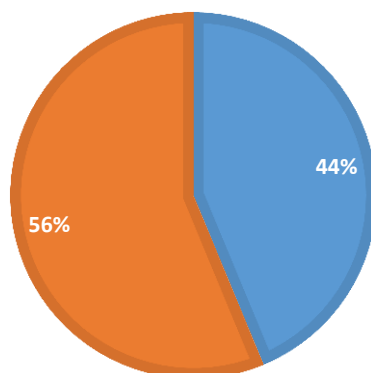


Gráfico 5

A pergunta 5 está ligada á pergunta 4 visto que as quedas acontecem, na maioria das vezes, quando as pessoas viajam em pé. Não era esperado que o número de respostas “sim” fosse tão elevado. Significa que quase metade dos passageiros já presenciaram ou sofreram uma queda. O facto de tal se verificar é preocupante e tem de ser tomado em consideração, pois a integridade dos passageiros é deveras importante.

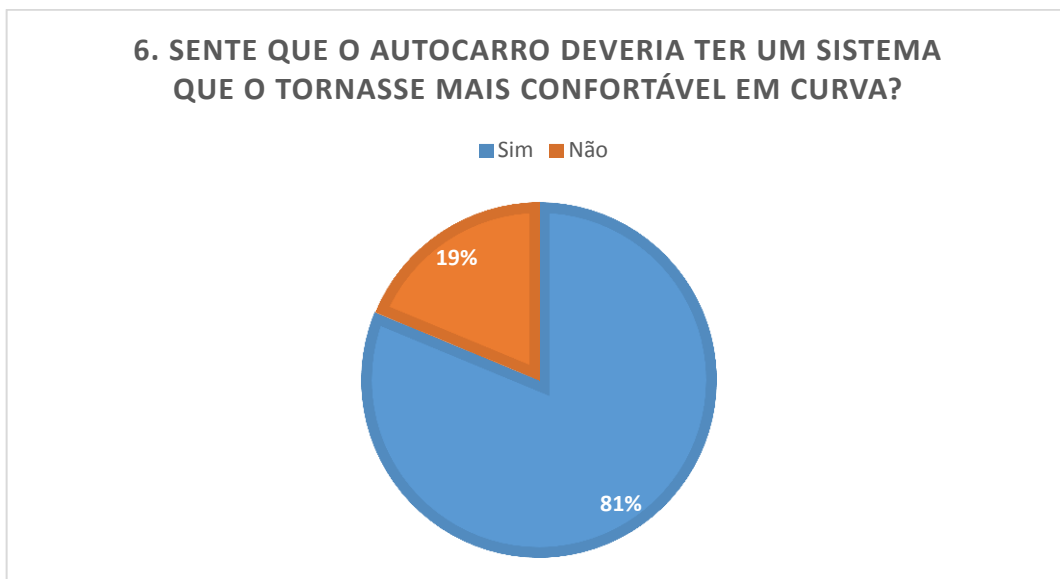


Gráfico 6

No caso da pergunta 6 não há muito a ser analisado. Se os passageiros sentem a necessidade de que o veículo se torne mais confortável em curva, então, mais uma vez se prova a existência desta problemática.

7. QUAL O NÍVEL DE DESCONFORTO QUE SENTE QUANDO O AUTOCARRO ESTÁ A CURVAR, SENDO 1 AUSÊNCIA DE DESCONFORTO E 5 MUITO DESCONFORTÁVEL?

■ Um ■ Dois ■ Três ■ Quatro ■ Cinco

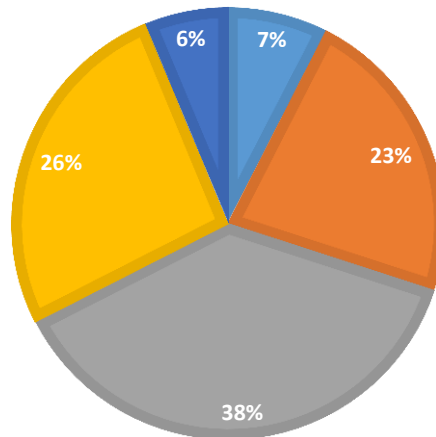


Gráfico 7

A pergunta 7 tem como objetivo quantificar o nível de desconforto que os passageiros sentem quando o autocarro curva, para saber como o sistema tem de atuar e se o grau de inclinação terá de ser alto. Quantificar numericamente uma sensação não é fácil e esta mesma dificuldade sentiu-se nos passageiros ao responderem a esta pergunta. Sendo que a maioria das respostas (70%) foram entre o “nível 3” e o “nível 5”, as elações a tirar são que existe grande desconforto e portanto, o sistema terá de compensar bastante através de uma inclinação contrária à inclinação natural do autocarro, de forma a maximizar o conforto da viagem.

8. SE OS AUTOCARROS FOSSEM MAIS CONFORTÁVEIS, VIAJARIA MAIS FREQUENTEMENTE?

■ Sim ■ Não

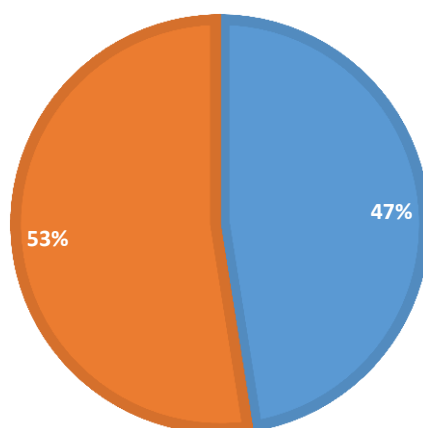


Gráfico 8

Esta pergunta é bastante pertinente para saber se haveria mais passageiros, caso os veículos fossem mais confortáveis, para justificar o investimento dos fabricantes deste tipo de veículos. Há a salientar, que embora haja um grande número de inquiridos a responder “sim”, na percentagem de passageiros que responderam “não”, estão incluídos uma grande parte de pessoas que utilizam os transportes públicos por necessidade. Logo, será impossível para estes viajarem com maior frequência. Pode concluir-se que, se este sistema for implementado com sucesso, será benéfico para as empresas que o adquiram, pois irá aumentar o volume de negócios das empresas de transportes de passageiros em autocarros.

2.1.2. Inquérito aos motoristas

É de referir que todos os motoristas da Covibus responderam a este inquérito. Apesar de ser um número menor de inquiridos em relação aos passageiros, as respostas serão mais fiáveis, uma vez que estes têm maior conhecimento de causa, a nível técnico.

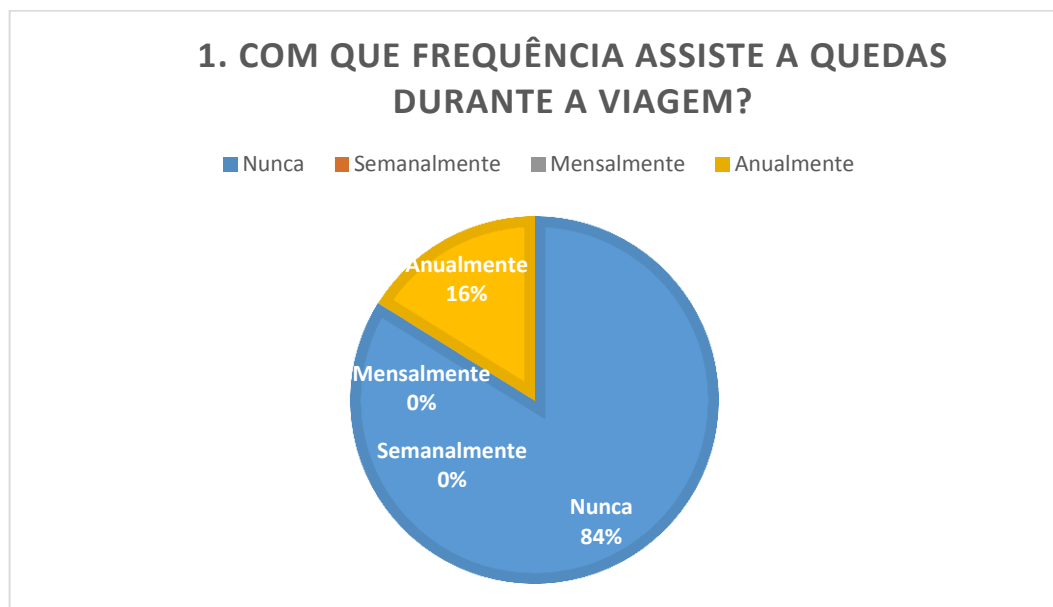


Gráfico 9

Esta pergunta tem como objetivo concluir se as quedas durante a viagem são regulares ou não, para saber se o sistema em causa precisa de atuar somente em curva ou também na paragem e no arranque. Dado que apenas 16% dos motoristas afirmam ter presenciado quedas anualmente, não há necessidade de trabalhar noutras situações sem ser em trajetórias curvilíneas.

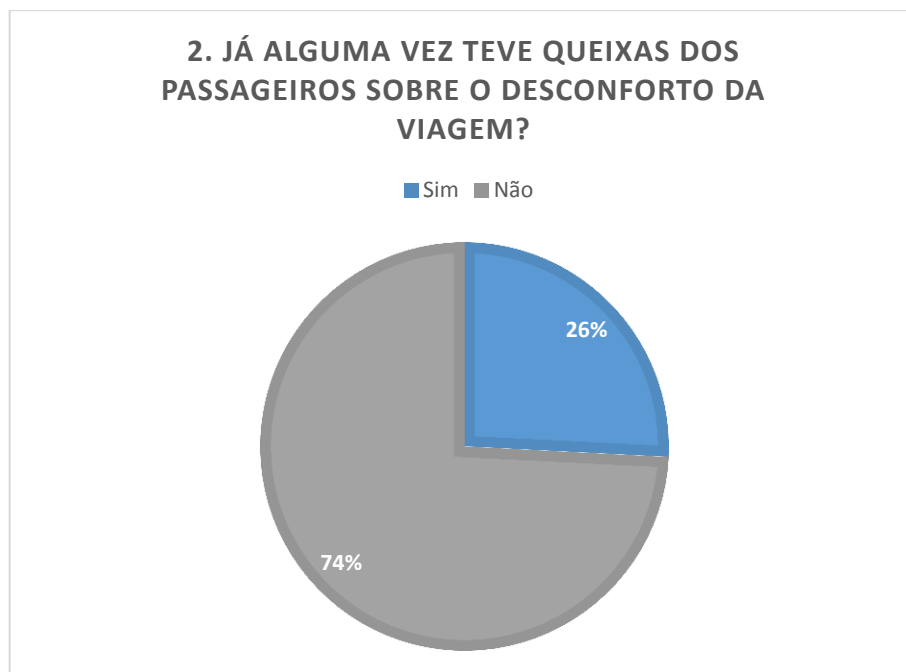


Gráfico 10

Neste caso a pergunta serviu para saber se o desconforto da viagem foi de tal ordem que os passageiros fizeram queixas ao motorista. Como se pode verificar houve uma taxa de 26 % de respostas afirmativas. Isto significa que sensivelmente um quarto dos motoristas inquiridos já teve queixas, o que é considerável. Daí a necessidade de melhorar os veículos.

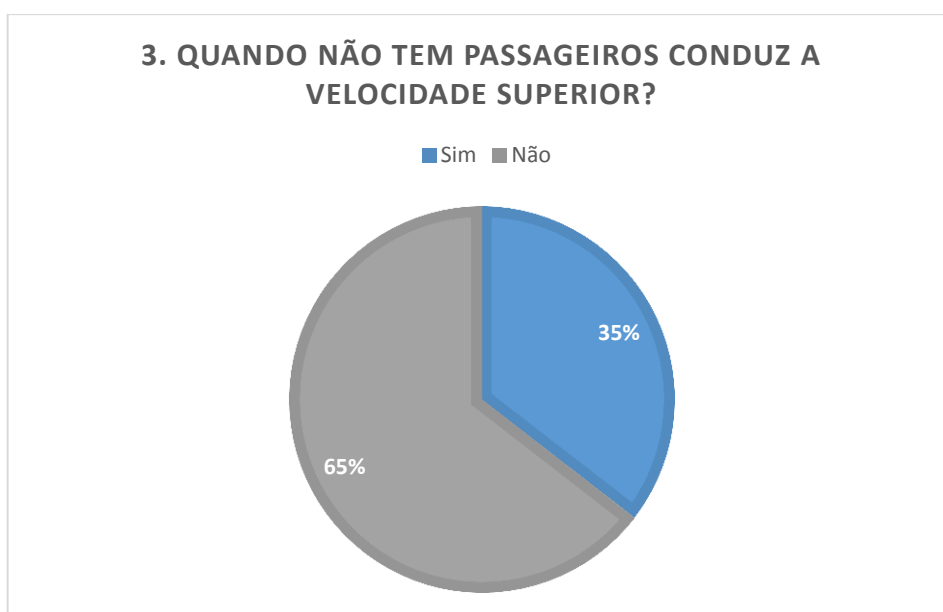


Gráfico 11

Os comboios pendulares devido ao seu sistema de inclinação, permite reduzir o tempo de viagem até 20% só com o melhoramento da suspensão. Por este motivo a pergunta 3 serve para concluir se com a implementação de um sistema de correção, é possível reduzir o tempo das viagens dos autocarros citadinos. Tendo em conta que se sensivelmente um terço dos motoristas o faz, pode-se aferir que tendo um sistema que faça com que os passageiros não sintam tanto a força centrífuga os motoristas podem curvar a uma velocidade superior, sempre dentro dos limites legais obviamente.

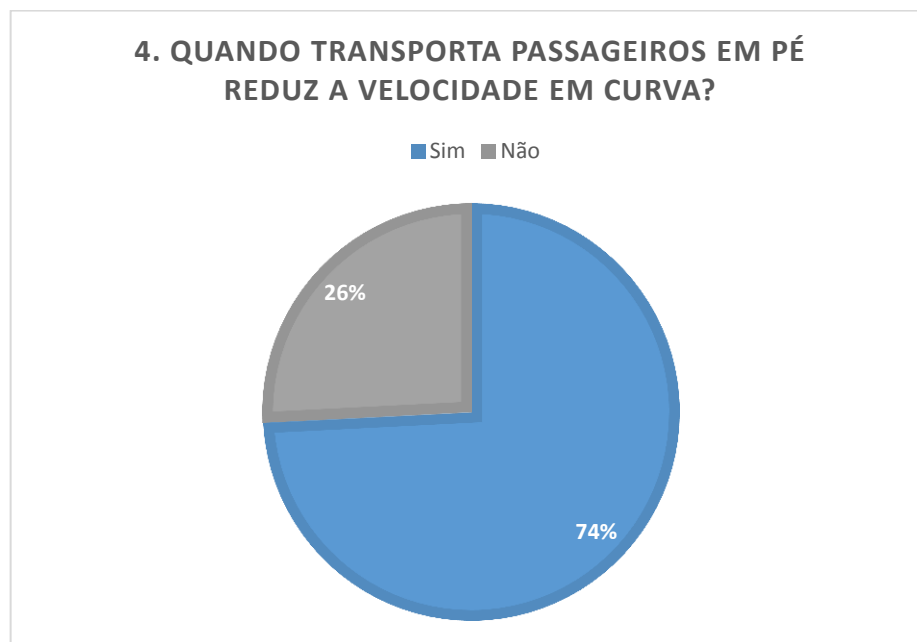


Gráfico 12

Esta questão está diretamente relacionada com a pergunta 3, pois tem o mesmo objetivo. Como a grande maioria das respostas foi positiva, a relação retirada na questão anterior é reforçada. Ou seja, com um sistema que torne o autocarro mais estável consegue-se reduzir o tempo de viagem pois, as pessoas que viajam em pé terão mais facilidade em se segurar.

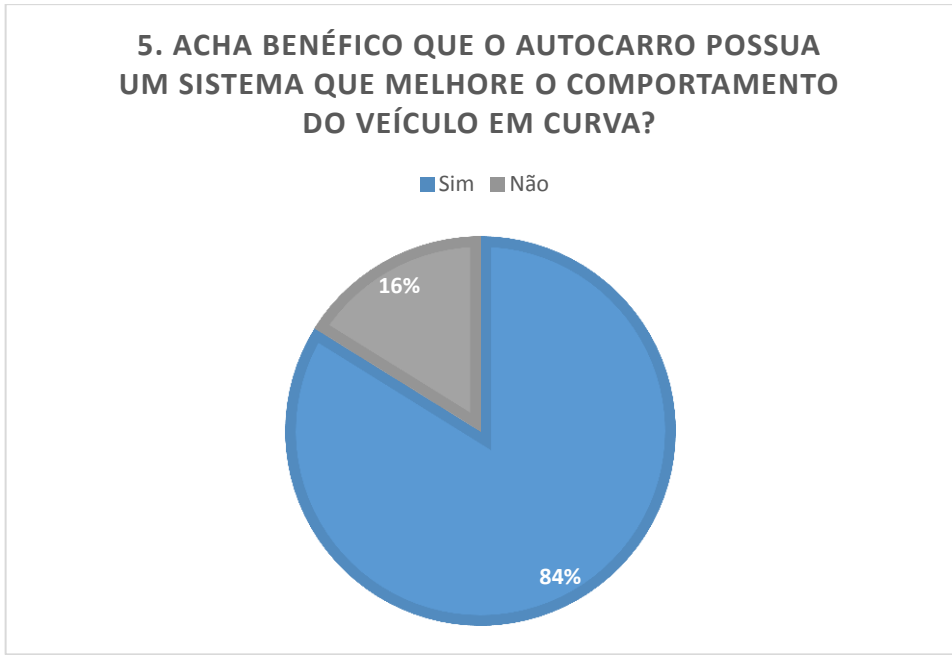


Gráfico 13

Tendo em conta que nestes questionários as respostas são dadas por profissionais e que experienciam todos os dias a condução destes veículos, torna esta resposta importantíssima. Visto que 84% dos motoristas vê benefício num sistema que melhore o comportamento do veículo, é porque o trabalho que está a ser desenvolvido é útil e benéfico para quem conduz um autocarro todos os dias.

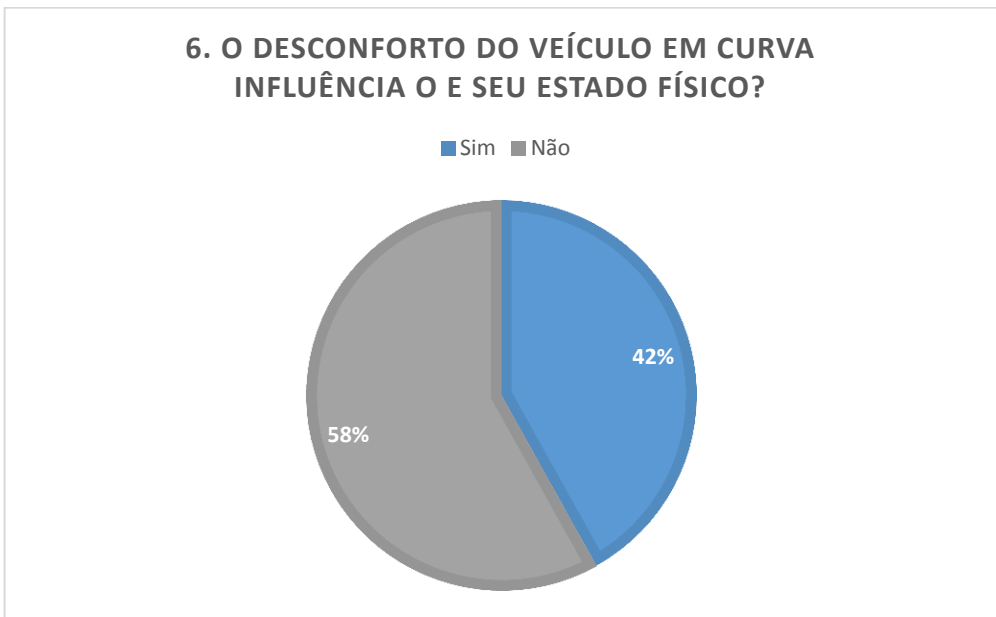


Gráfico 14

Na última pergunta esperava-se que o número de respostas positivas fosse menor pois como se sabe os bancos dos motoristas tem um sistema próprio de amortecimento e são bastante confortáveis. Mas mesmo assim quase metade dos inquiridos sente-se afetado pelas curvas. Logo, mais uma vez, confirma-se que o sistema proposto é útil, vantajoso e necessário.

2.2. Comboios Pendulares

Os comboios pendulares são veículos que se distinguem por terem um mecanismo que permite viajarem mais rápido em linhas ferroviárias normais. Tal não acontece com os comboios de alta velocidade como o TGV, que necessitam de linhas próprias para operar. Quer seja um comboio ou outro veículo, quando descreve uma curva, os passageiros e os objetos no seu interior têm uma força horizontal. Esta faz com que a carga deslize de um lado para o outro ou que os passageiros sejam empurrados para o lado de fora da curva devido a esta que só tem componente lateral. Tendo em conta que o ser humano suporta melhor forças que atuem no eixo vertical e é mais sensível às forças laterais [1], esta força centrífuga não é benéfica para os passageiros em viagens a grande velocidade. Assim, para manter o conforto é preciso que existam mecanismos que atenuem os efeitos desta força. Estes efeitos fazem-se sentir ainda mais quando o centro de gravidade dos veículos é alto e inclusive existe a possibilidade de capotamento quando o raio de curvatura do trajeto é baixo. Os passageiros de um motociclo por exemplo, não sentem esta força pois estes veículos para conseguirem descrever uma curva têm de se inclinar. Quando isso acontece, a força centrífuga passa a atuar no eixo vertical dos passageiros, que nos veículos de 3 ou mais rodas é somente lateral.

Para ajudar os comboios a efetuarem uma curva, existe uma solução que se baseia na inclinação do pavimento de modo a que se eleve a parte de fora da curva. Infelizmente, nem as linhas ferroviárias nem as estradas públicas possuem inclinações em todas as curvas, ou seja, terá de haver um mecanismo que faça o mesmo efeito dessa inclinação. Os comboios pendulares foram desenhados para responder a esta necessidade. Por exemplo, quando é efetuada uma curva para a direita, o comboio também se inclina em relação à linha ferroviária para a direita, de modo a compensar a força que empurra para esquerda; o mesmo acontece nas curvas para o lado esquerdo. A figura 1 ilustra o conceito básico.

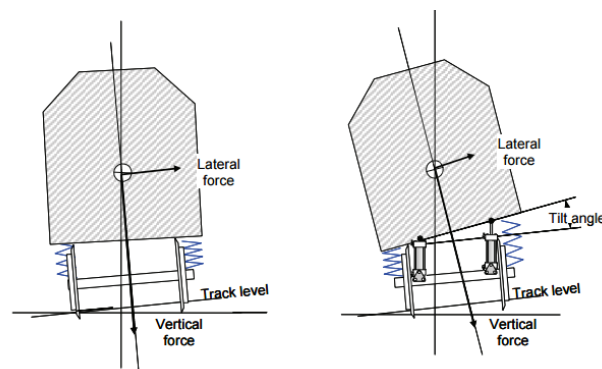


Figura 1- Conceito básico do sistema pendular [tilting trains]

Existem duas formas de fazer com que as carruagens se inclinem: uma de forma passiva onde o comboio é desenhado de tal modo que as forças de inércia fazem com que se incline; outra de forma ativa quando o comboio possui um sistema de atuação controlado através de componentes eletrónicos, que detetam o momento em que deve começar a inclinar. A resultante da força de inclinação com a força centrífuga produz uma aceleração que reduz ou elimina totalmente qualquer componente lateral. É de referir que os primeiros sistemas pendulares possuíam um defeito na forma como atuavam. A atuação era tardia e brusca, o que causava náuseas e dores de cabeça aos passageiros [2]. Com a evolução da tecnologia e estudos mais aprofundados sobre estes sistemas conseguiu-se criar um equilíbrio entre o momento de atuar e a forma como se inclina, eliminando assim este problema. Estes dados são importantes e vão ser tidos em consideração no desenvolvimento desta tese. Abaixo estão alguns dos modelos mais relevantes na história dos comboios pendulares.

Tabela 1 - Alguns dos veículos importantes no desenvolvimento da tecnologia pendular

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Ano</i>	<i>Velocidade máxima [km/h]</i>	<i>Tipo de atuação</i>	<i>Curiosidades</i>
<i>Pullman - Standard</i>	Train-X	1956	Desconhecida	Passivo	Primeiro veículo pendular em serviço
<i>SNCF</i>	-	1957	Desconhecida	Desconhecido	Primeiro com sistema ativo de inclinação
<i>FS/FIAT</i>	Y0160	1969	200	Hidráulica	Primeiro veículo com tecnologia FIAT
<i>DB</i>	634	1972	140	Pneumática	Primeiro veículo com sistema pendular ativo em serviço
<i>BR</i>	APT-E	1972	240	Hidráulica	Foram desenvolvidos os índices de conforto P_{CT} e P_{DE}
<i>JR/Hitachi</i>	381	1973	120	Passiva	Primeiro veículo com tecnologia Hitachi
<i>FS/FIAT</i>	ETR401	1975	171	Hidráulica	Primeiro veículo em serviço com tecnologia FIAT
<i>SJ/ASEA</i>	X15	1975	200	Pneumática/Hidráulica	Primeiro veículo com tecnologia ASEA
<i>Talgo</i>	Pendular	1980	180	Passiva	Primeiro talgo pendular
<i>FS/FIAT</i>	ETR450	1989	250	Hidráulica	Maior velocidade máxima do que todos os comboios em serviço
<i>JR/Hitachi</i>	2000	1989	130	Passiva + Pneumática	Primeiro veículo com armazenamento de dados
<i>ASEA/ABB</i>	X2000	1990	200	Hidráulica	Primeiro veículo com tecnologia ASEA em serviço
<i>AEG</i>	VT611	1997	160	El-Mech.	Primeiro veículo com atuadores electro-mecânicos
<i>JR/Hitachi</i>	N700	2007?	300	Pneumática	Primeiro veículo com uma velocidade máxima acima dos 250 km/h

Quando os países como a França e o Japão começaram a implementar comboios de alta velocidade com linhas magnéticas. Este momento foi um marco histórico no sector ferroviário pois estabeleceu um novo patamar nas viagens de longo curso, dado que os comboios de alta velocidade utilizam linhas completamente distintas dos comboios convencionais e o investimento de implementação de uma rede de alta velocidade é bastante elevado. Desta forma os países da europa, não querendo ficar atrás da França na área do transporte ferroviário, começaram a pensar em soluções mais económicas. Foi aí que se deu o grande “salto” para o desenvolvimento dos comboios pendulares. Visto que os pendulares utilizam as linhas convencionais mas conseguem viajar a uma velocidade superior devido ao seu sistema de “tilting”, são uma solução bastante viável a nível económico em relação aos comboios de alta velocidade. Embora não igualem os TGV’s, estes comboios conseguem fazer curvas com velocidades até 250 km/h. Isto só é possível através do mecanismo pendular que tem a capacidade de inclinar até 8 graus em relação à linha em que viaja [3].

De um modo geral existem três tipos de sistemas de “tilting”. O mecanismo do europeu, que mostra a figura 1, utiliza um sistema ativo que inclina a carruagem utilizando atuadores hidráulicos e o seu sistema de suspensão é constituído pelo conjunto molas helicoidais/amortecedor. É de referir que o modelo Pendolino da marca FIAT, que é um dos utilizadores do sistema europeu, foi dos mais bem-sucedidos quer a nível tecnológico quer a nível económico.



Figura 2 - Exemplo de um sistema europeu de “tilting”[4]

No seguinte esquema da figura 3 “rolar” a carruagem pelo chassis controladamente, sendo o resultado final similar ao do pendulino e o sistema de amortecimento igual. A figura 2 demonstra o funcionamento deste sistema e compara com o sistema do Pendulino.

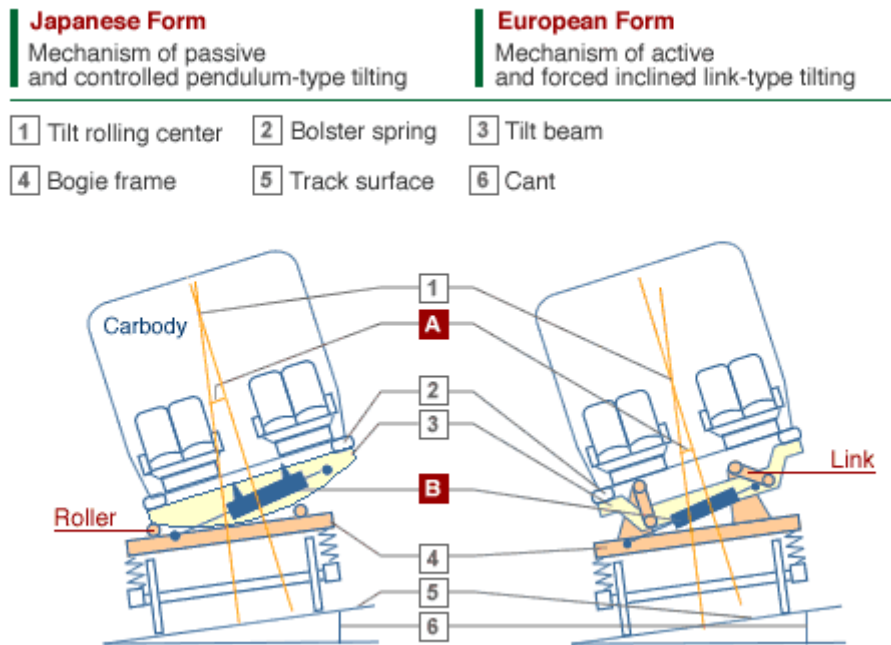


Figura 3 - Diagrama sobre o tipo de atuação de inclinação passivo e ativo [5]

Existe ainda outro sistema de “tilting” japonês que consiste na inclinação da carruagem utilizando um sistema pneumático constituído por dois atuadores. Quando é necessário inclinar a carruagem, é fornecido ar ao atuador pneumático do lado de fora da curva e diminuído no atuador do lado de dentro, como é demonstrado no diagrama da direita da figura 3. Este sistema pendular é ativo e atua segundo a informação que os sensores fornecem. De todos os sistemas pendulares, este é o mais atrativo em relação á possibilidade de implementação de um sistema pendular em autocarro citadinos. O sucesso destas carruagens foi notório, o que revela que um sistema pneumático com um controlo tem a capacidade de melhorar em muito a viagem dos passageiros [6]. O único aspeto que distingue este sistema do sistema de suspensão que praticamente todos os autocarros utilizam, é que estes comboios têm molas helicoidais como sistema suspensão e um sistema pneumático independente e os autocarros têm atuadores pneumáticos como função de molas. Tudo isto indica fortes possibilidades de uma implementação bem-sucedida nos transportes rodoviários. Na figura 5 está uma foto de um comboio com este sistema de atuação a descrever uma curva.

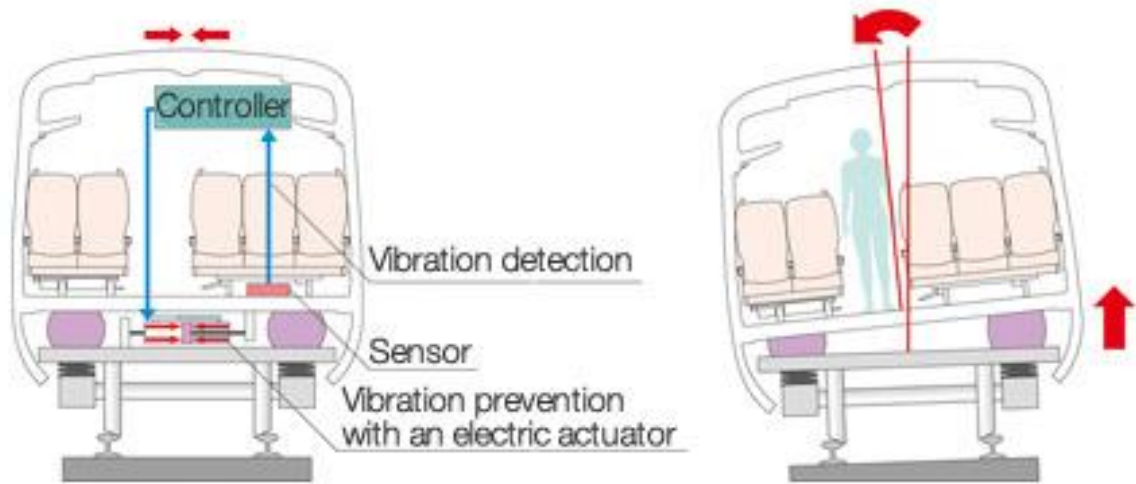


Figura 4 - Sistema Pneumático de "tilting" Japonês [7]



Figura 5 - JR/Hitachi N700

3. Princípio de funcionamento

3.1 Descrição do funcionamento do sistema de suspensão

Antes de começar a explicar o princípio de funcionamento pretendido, é necessário descrever o sistema já existente nos autocarros de hoje em dia. Atualmente, o sistema de suspensão dos veículos pesados de passageiros é constituído por amortecedores, por molas pneumáticas também chamadas na gíria de “balões” e as respetivas ligações do *chassis* à carroçaria como se pode ver na figura 6. Praticamente todos os autocarros atuais possuem este sistema salvo raras exceções em que as marcas optam por outros.

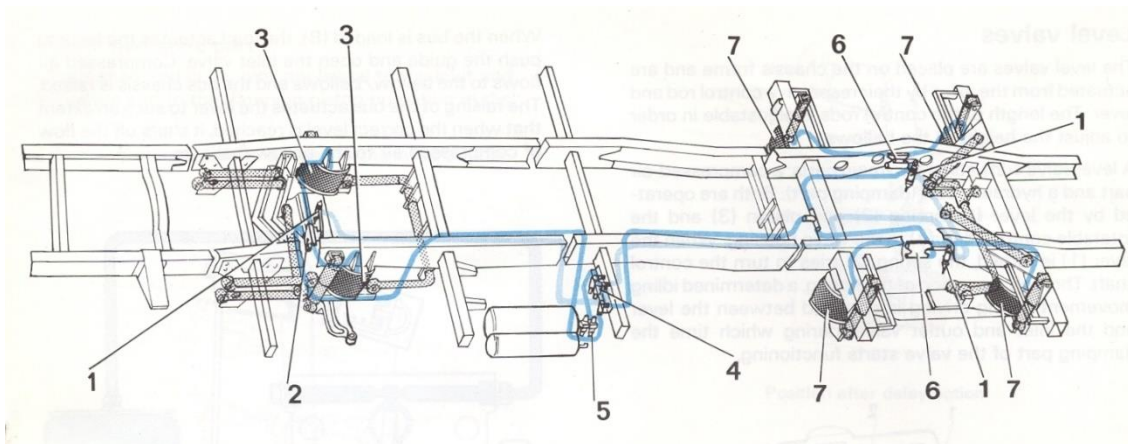


Figura 6 - Sistema de suspensão pneumática de um autocarro [8]

- 1. Cilindro
- 2. Válvulas frontais
- 3. Atuadores pneumáticos frontais
- 4. Válvulas Solenoides de controlo de nível
- 5. Válvula de proteção
- 6. Válvulas de nível traseiras
- 7. Atuadores pneumáticos traseiros

Tendo em conta que este sistema é praticamente universal, irá ser com base nele que se vai desenvolver o sistema de atuação pretendido. Estes veículos possuem 6 atuadores pneumáticos; destes, dois estão em cada roda traseira (nº 7 da figura 6) e um em cada roda dianteira (nº 3 na figura 6), possuindo assim 3 “balões” em cada lado. Para os controlar, o autocarro possui 2 válvulas ou electro válvulas (nº 6 figura 6) para cada par de atuadores traseiros e uma válvula ou electro válvula (nº 2 figura 6) para cada atuador dianteiro. No caso dos veículos mais recentes que possuem electro válvulas, a altura e a afinação do sistema é feita através de um computador ligado à centralina. No caso em que os veículos possuem válvulas mecânicas, esta afinação tem de ser feita manualmente e é um processo complexo. Estes veículos possuem um compressor que alimenta um reservatório em que a pressão se

mantém constante, e é ao reservatório que os “balões” vão buscar ar pressurizado quando necessitam. Por norma, esta pressão nominal é de 8 bar, mas tendo em conta que cada veículo é único, este valor pode variar. O compressor tem capacidade de elevar a pressão no reservatório até 12 bar embora esta pressão nunca seja atingida pois o sistema vem limitado por razões de segurança.

3.1.1. Componentes e pontos de referência

Seguidamente, irá ser descrito um exemplo de um sistema de suspensão de um autocarro específico, em que as imagens foram fotografadas numa visita a uma oficina deste ramo, para haver uma melhor perceção de todos os componentes e seu funcionamento.

A figura 7 mostra o sistema mola/amortecedor, peças vitais para os sistemas de suspensão. Como se observa, a mola pneumática ou atuador pneumático é composto totalmente por borracha, sendo acoplado de forma estanque aos apoios do braço da suspensão.

Estas imagens mostram um, dos dois atuadores traseiros. O amortecedor é a peça cilíndrica localizada no exterior da mola ao seu lado.



Figura 7 - Conjunto Mola Pneumática/Amortecedor

Outro aspeto importante de qualquer suspensão, é a forma como o *chassis* está ligado à carroçaria. A figura 8 foca a parte da suspensão traseira, estando em evidência o diferencial de transmissão. A amarelo, estão as quatro ligações que conectam os braços de suspensão ao *chassis* e à carroçaria. Esta geometria é denominada de 4 ligações com braços paralelos (four-

link with parallel arms) [gillespie]. Na figura 8, identificam-se facilmente os dois veios paralelos, que ligam os braços da suspensão ao *chassis*. O braço A é o do lado esquerdo e o braço B do lado direito. Em cada braço estão acoplados 2 atuadores pneumáticos ou “balões” e dois amortecedores, que não são visíveis na figura 8 mas sim na figura 9. As outras duas ligações também estão assinaladas a amarelo, e são responsáveis por ligar o diferencial à carroçaria. A ligação do diferencial ao *chassis* é feito através de apoios no braço da suspensão. Para melhor entendimento, a figura 9 mostra uma representação deste mesmo sistema, que é comum á maioria dos autocarros de hoje em dia, onde se pode ver com clareza todos o componentes descritos neste parágrafo. Com algum conhecimento sobre esta matéria, olhando para a figura 8, é possível perceber que tipo de movimentos esta permite. Esta geometria permite que as rodas tenham um deslocamento vertical em relação à carroçaria mas não horizontal. Para além deste movimento vertical ainda permite que exista uma rotação da carroçaria em relação ao *chassis*. O eixo de rotação que o autocarro possui, é a ligação entre os dois pontos de rotação instantânea da suspensão traseira com o da suspensão dianteira que irá ser descrita mais à frente

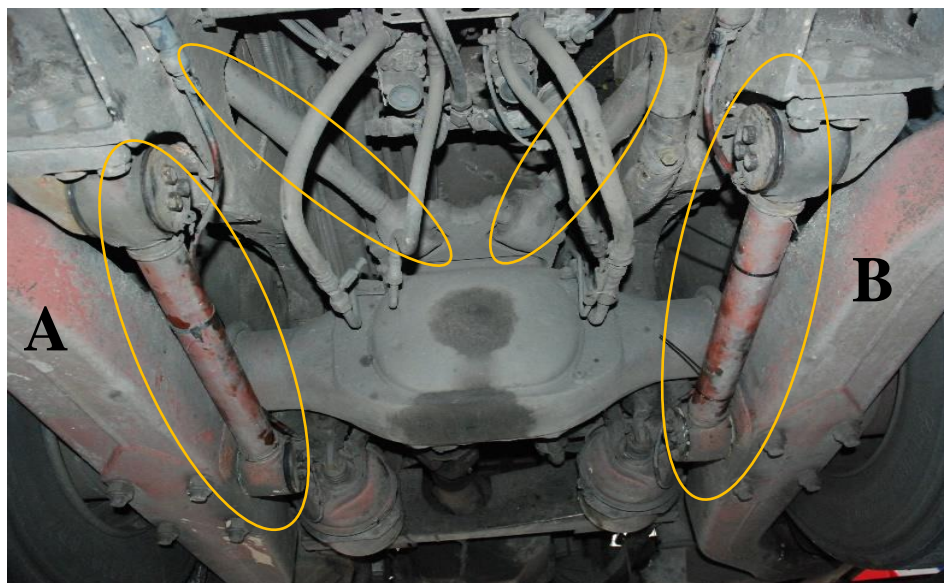


Figura 8 - Foto tirada por baixo do veículo com foco na suspensão traseira

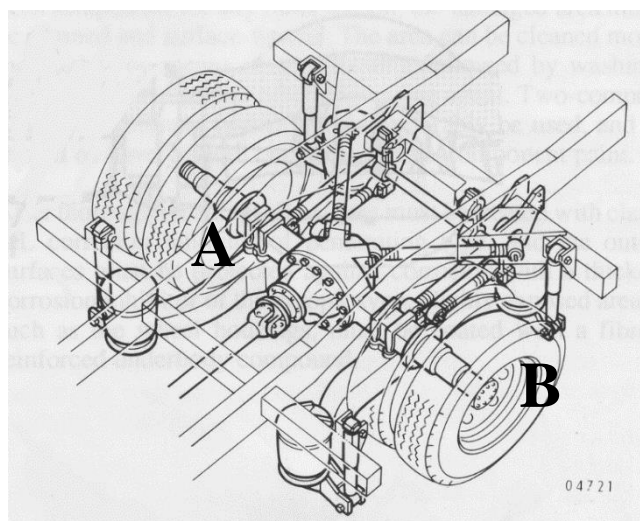


Figura 9 - Representação do sistema de suspensão traseira de um autocarro

A geometria da suspensão dianteira é diferente da suspensão traseira como se pode verificar na figura 10. Como as rodas dianteiras são diretrizes, a geometria do sistema de suspensão ligado às mesmas não poderia ser igual. Neste caso, chama-se suspensão de três ligações ou (three-link suspension). Na imagem abaixo, também é possível observar os dois atuadores dianteiros, um para cada roda. Este tipo de geometria tem os mesmos graus de liberdade que a suspensão de 4 ligações com braços paralelos, vertical e de rotação sobre o ponto instantâneo de rotação. A ligação do ponto instantâneo traseiro com o dianteiro define o eixo de rotação do autocarro.



Figura 10 - Foto tirada por baixo do veículo com foco na suspensão dianteira

3.2. Modelo físico de um autocarro e forças que atuam sobre ele

Para estudar o comportamento do autocarro e a sua resposta foi tido em consideração um modelo físico simplificado. Para simplificação das contas, foi considerado que toda a massa no autocarro está no seu centro de massa (ponto m da figura 11). Considerou-se que, em vez de 3 molas de cada lado, possui uma em que a constante da mola k é a soma das 3 e o mesmo se passa nos amortecedores em relação à constante de elasticidade c . O parâmetro L é correspondente à largura do autocarro, o parâmetro h é a altura do centro de massa do autocarro ao *chassis* do mesmo. Neste modelo, não se tem em consideração a elasticidade nem o amortecimento dos pneus, pois numa situação de curva, estes são praticamente constantes. Portanto, a linha preta equivale ao *chassis* do autocarro. A figura 11 mostra o modelo físico de um autocarro quando este descreve uma trajetória retilínea. Nesta caso, a única força a atuar sobre ele é a gravidade. Visto que a direção da força g é sobre o eixo vertical do autocarro e atua perpendicularmente ao eixo de rotação. Este está em equilíbrio pois a reação nos dois apoios é igual. Assim, não inquilina para nenhum dos lados.

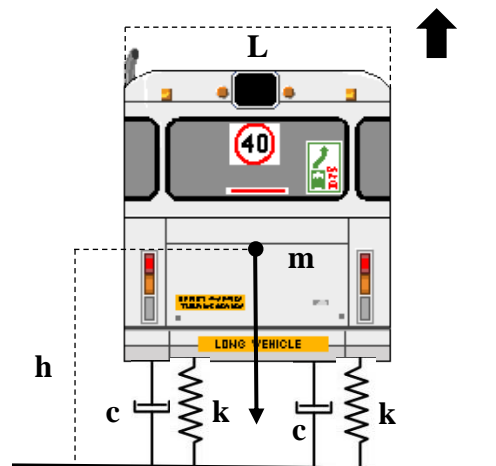


Figura 11 - Representação esquemática do modelo físico da suspensão de um autocarro

Quando o veículo descreve uma curva, as forças a atuar sobre ele são diferentes, como se pode observar na figura 12. Devido à inércia que o autocarro possui, quando é imposta uma alteração da direção, passa a existir sobre ele uma força centrífuga. Consequentemente, os passageiros ou os objetos que estão no seu interior também têm esta força a atuar sobre eles, como consequência do sistema de suspensão o veículo inclina. A figura abaixo ilustra esquematicamente o comportamento da suspensão e a inclinação do autocarro.

$$F_C = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (1)$$

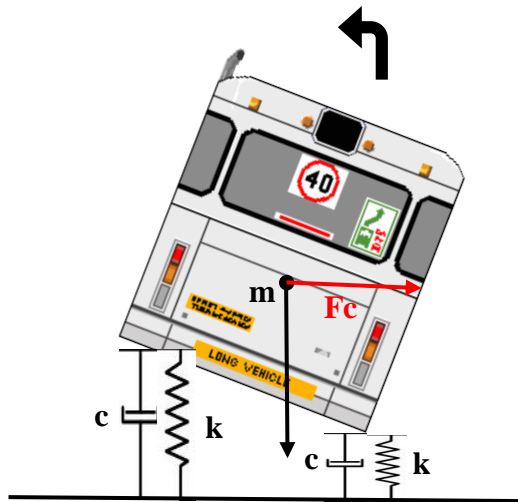


Figura 12 - Modelo físico de um autocarro a descrever uma curva para a esquerda

Nos seguintes esquemas estão somente as forças atuantes e a sua resultante. Como se observa na figura 13, a força resultante que atua nos passageiros tem um ângulo θ em relação ao eixo vertical. O objetivo é fazer com que os passageiros fiquem alinhados verticalmente com a força resultante. Ou seja, quanto mais próximo de zero o $\Delta\theta$ estiver, menos os passageiros sentem forças laterais. Quando o $\Delta\theta$ tem valor zero os passageiros não sentem qualquer força lateral. Como se pode ver na figura 14, o sistema de correção faz com que se eleve o lado de fora. Neste modelo, considera-se que existe um atuador independente do sistema de suspensão, com a função de inclinar a carroçaria em relação ao *chassis*.

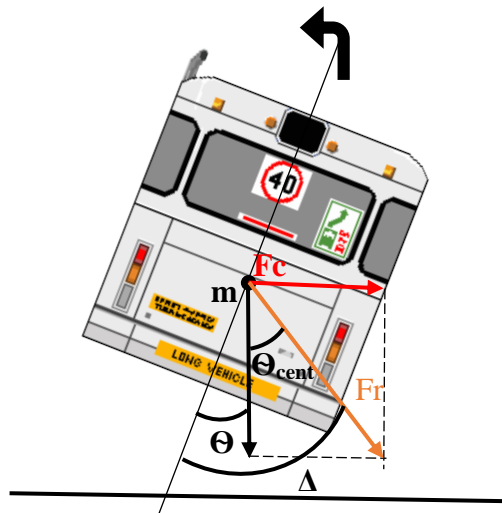


Figura 13 - Diagrama de forças que atuam no autocarro enquanto curva para esquerda

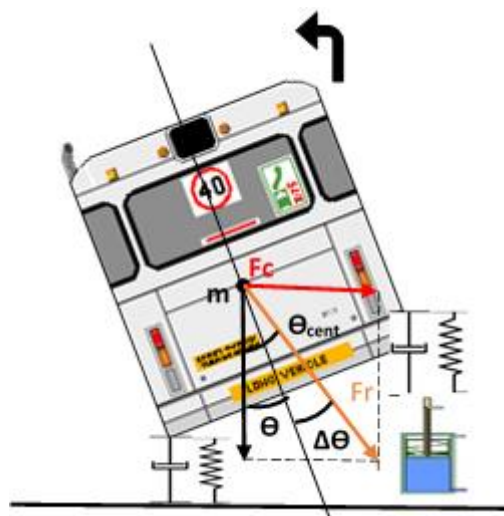


Figura 14 - Diagrama de forças a atuar no autocarro quando este descreve uma curva para a esquerda com sistema de correção

As limitações do veículo fazem com que, em alguns casos, quando a velocidade e a curvatura têm valores altos, não seja possível alinhar totalmente os passageiros com a força resultante.

4. Estudo Computacional

Introdução

Para estudar a viabilidade e o comportamento do veículo com implementação do sistema de correção, foi feito um modelo computacional com base no modelo físico descrito no capítulo 3. A inclinação de qualquer autocarro, quando este descreve uma curva, depende fundamentalmente de três parâmetros: o raio de curvatura, a velocidade a que viaja e a inclinação do pavimento. Para este caso considerou-se um modelo simplificado em que o pavimento é sempre horizontal. Para avaliar a resposta do veículo, foi imposto um trajeto em que o veículo segue em linha reta depois descreve uma curva para a esquerda e logo a seguir uma curva para a direita com uma curvatura ($\frac{1}{R}$) maior do que a anterior. Para traduzir o comportamento do veículo computacionalmente, foi utilizada a seguinte equação diferencial:

$$m\ddot{\theta}h^2 + 2c\dot{\theta}\frac{L}{2} * \frac{L}{2} + 2k\theta\frac{L}{2} * \frac{L}{2} = \frac{mv^2}{R} * h \quad (2)$$

\Leftrightarrow

$$\ddot{\theta} \left(\frac{h^2}{L} \right) + \dot{\theta} \frac{c}{2} + \frac{k}{2} \theta = \frac{mv^2}{R} * \frac{h}{L^2}.$$

As constantes (m), (h), (c), (L), (k) [Matlab] da equação, estão ilustradas na figura 12 do capítulo 3. É de referir que cada autocarro tem os seus próprios valores característicos. Logo, para veículos diferentes, basta alterar as constantes no excel e o programa retifica a equação. As soluções da equação foram obtidas através de integração numérica e estão organizadas nos gráficos seguintes. O parâmetro α que vai ser indicado abaixo é a constante de correção que traduz fisicamente a correção da inclinação do veículo pretendida.

4.1. Comportamento do veículo sem sistema de correção

Tabela 2 - Dados da equação

inseridos no programa excel

m[kg]=	10000
c[kg/s]=	1,00E+04
k[N/m]=	3,20E+04
dt[s]=	0,004
θ_i [rad]=	0,01
v[m/s]=	5
h[m]=	0,75
L[m]=	2
α =	0

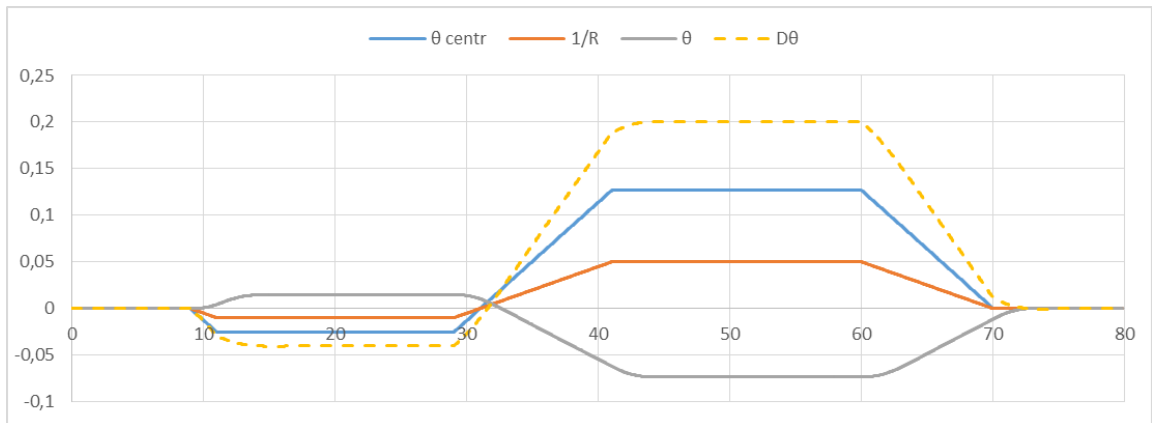


Gráfico 15 - Resultados referentes á tabela2

No gráfico 15 a linha laranja corresponde à curvatura imposta ao veículo. Quando o valor da curvatura é zero significa que o autocarro está a seguir em frente. Quando ela assume valores negativos representa que está a curvar para a esquerda, e valores positivos quando está a curvar para a direita. A curvatura imposta foi obtida de modo a que, nos momentos de transição o volante gire a uma velocidade constante. É de referir que os momentos de transição são quando a linha da curvatura não é paralela ao eixo horizontal, e quando ela é paralela significa que o autocarro está a descrever uma curva com raio constante. Em todos os casos que vão ser estudados abaixo, o veículo foi submetido a este perfil de curvatura. A linha azul demonstra o ângulo que a força resultante faz com o eixo vertical (θ_{centr}). Como foi explicado no capítulo 3, é este ângulo que se pretende anular, ou seja, se o autocarro inclinar θ_{centr} os passageiros irão estar alinhados com a força resultante, não estando sujeitos a quaisquer forças laterais. A linha cinzenta representa a inclinação do autocarro. Como se pode verificar no gráfico 15 a inclinação do autocarro é contrária ao ângulo da força centrífuga, como é de esperar. A linha amarela mostra a diferença entre o ângulo da força centrífuga e o ângulo de inclinação do autocarro.

4.1.1. Influência do coeficiente de amortecimento

Para se ter uma noção clara sobre o efeito do coeficiente de amortecimento (c), no gráfico 16 considerou-se um décimo do valor de referência e no gráfico 17 dez vezes o seu valor de referência, respetivamente.

Tabela 3 - Dados da equação inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	10000
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+03
$k[\text{N/m}] =$	3,20E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varphi_i[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	5
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	0

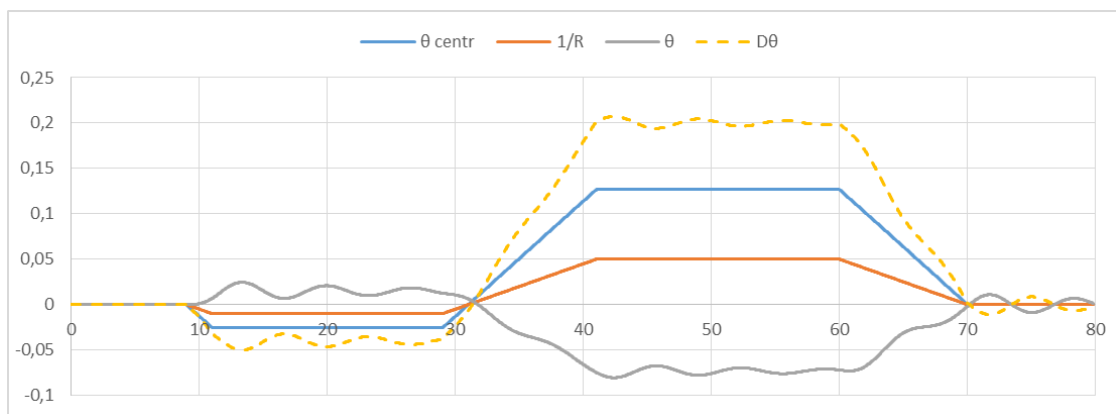


Gráfico 16 – Resultados referentes à tabela 3

Neste gráfico nota-se claramente que, quando o coeficiente de amortecimento é muito baixo e no momento em que o veículo faz uma curva, o sistema de suspensão entra em oscilação e não consegue estabilizar o movimento. Não o consegue porque desta forma, o movimento do autocarro praticamente não é amortecido.

Tabela 4 - Dados da equação inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	10000
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+05
$k[\text{N/m}] =$	3,20E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varphi_i[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	5
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	0

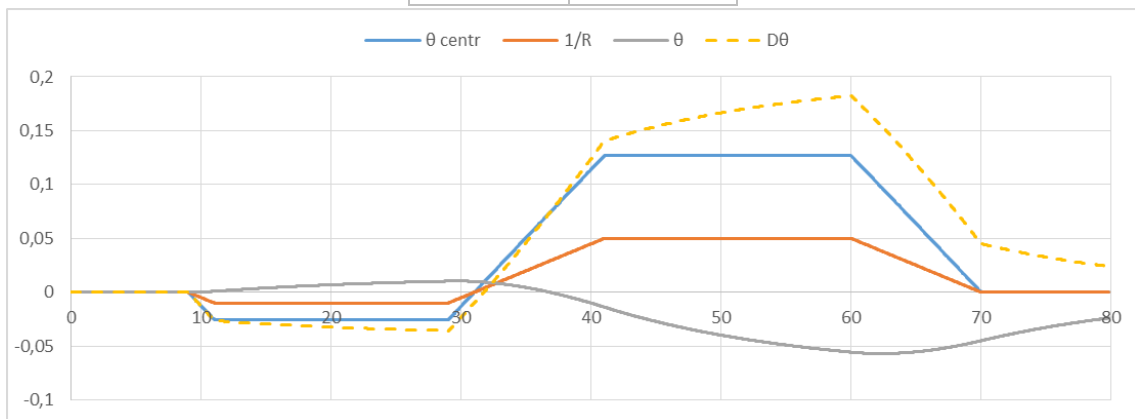


Gráfico 17 - Dados referentes à tabela 4

Por outro lado com um coeficiente de amortecimento muito elevado, o veículo praticamente não oscila e o ângulo de inclinação é menor, como se observa no gráfico 17. Por esta razão, os passageiros sentiriam o pavimento acidentado e também muito mais severamente o efeito da força centrífuga. Estes casos são irreais e não existe equipamento com estas características, mas assim se conclui que o modelo é fiel à física existente no autocarro. Com um coeficiente tão grande o veículo demora muito tempo a estabilizar na posição de equilíbrio

4.1.2. Influência da rigidez da mola

A rigidez da mola (k) é um parâmetro de referência de qualquer suspensão. Para se perceber o efeito deste parâmetro isoladamente, mantiveram-se os valores de referência. A abordagem do parâmetro anterior também se manteve, mas nesta situação aumentou-se e diminuiu-se o dobro do valor de referência da rigidez da mola, gráfico 18 e 19 respetivamente.

Tabela 5 - Dados da equação inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	10000
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+04
$k[\text{N/m}] =$	1,60E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varpi[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	5
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	0

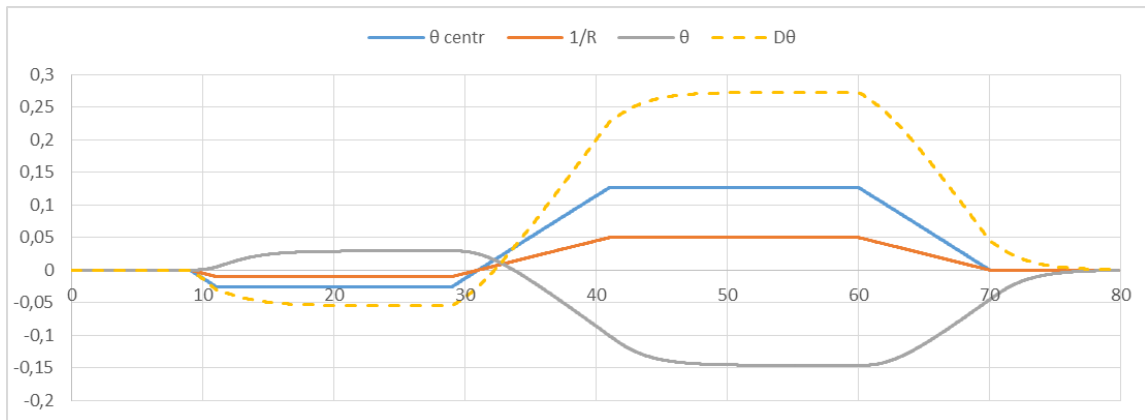


Gráfico 18 - Dados referentes à tabela 5

Se compararmos o gráfico 18 com o gráfico 15 que corresponde aos valores de referência, é de notar que a linha de inclinação θ tem características mais arredondadas. Ou seja, nas situações onde havia vértices, a linha passou a ter uma forma curva. Isto indica que o veículo ficou mais suave. Embora isto seja positivo, com um coeficiente de rigidez baixo, a inclinação do veículo aumenta em módulo. O que faz com que o movimento seja mais longo e que os passageiros se sintam mais empurrados para o lado de fora da curva. A linha amarela evidencia de forma nítida este desconforto, pois quanto maior a diferença de ângulos, maior componente lateral da força resultante existe sobre os passageiros.

Tabela 6 - Dados da equação inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	10000
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+04
$k[\text{N/m}] =$	6,40E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varpi_i[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	5
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	0

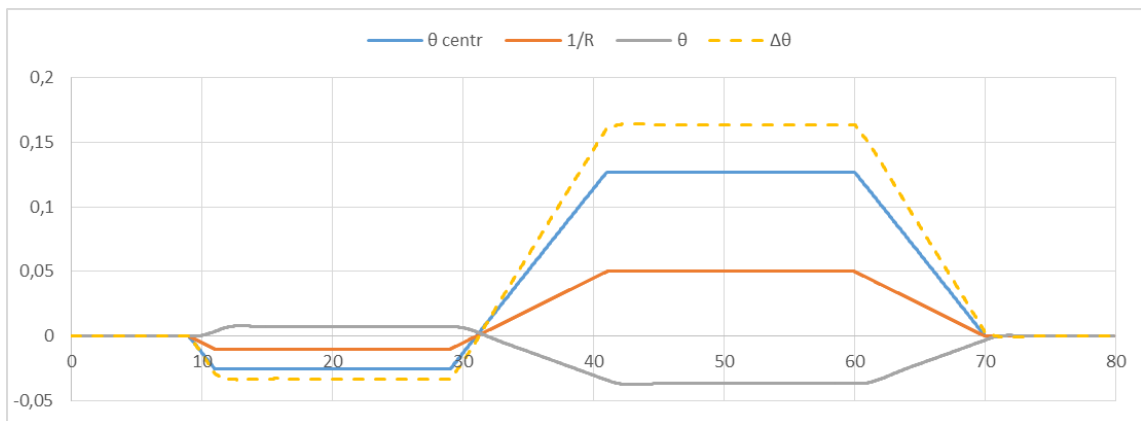


Gráfico 19 - Dados referentes à tabela 6

O efeito do coeficiente de rigidez sobre a linha θ , é exatamente o oposto do que foi explicado acima. Quando o sistema de suspensão tem molas com um coeficiente alto, este fica mais firme e a amplitude do movimento de inclinação é menor. É observável que a resposta do veículo está muito mais semelhante ao efeito da força centrífuga, ou seja o veículo responde melhor a mudanças de direção desta forma. A contrapartida é sempre o conforto, pois se o veículo é mais rígido, os efeitos da viagem sobre os passageiros também irá ser maior. A variação de inclinação é mais brusca.

4.1.3 Influência da massa do veículo

A alteração deste parâmetro vai demonstrar o efeito da inércia quando a trajetória não é retilínea. Este fenómeno pode acontecer na realidade, a diferença entre o autocarro viajar vazio ou com a lotação esgotada, influencia o comportamento do veículo. Para o estudo deste subcapítulo foram obtidos dois gráficos, à semelhança dos subcapítulos anteriores. No gráfico 20 diminui-se a massa metade do seu valor de referência, acontecimento impossível na realidade. No gráfico 21, tendo em conta que em média a lotação máxima de um autocarro citadino pode ir desde os 50 até aos 70 dependendo do veículo e que o peso médio por pessoa é de 70 kg, aumentou-se a massa do veículo 50 (passageiros) x 70 (peso médio por passageiro) = 3500 kg.

Tabela 7 - Dados inseridos no programa excel

m[kg]=	5000
c[kg/s]=	1,00E+04
k[N/m]=	3,20E+04
dt[s]=	0,004
φ_i[rad]=	0,01
v[m/s]=	5
h[m]=	0,75
L[m]=	2
α =	0

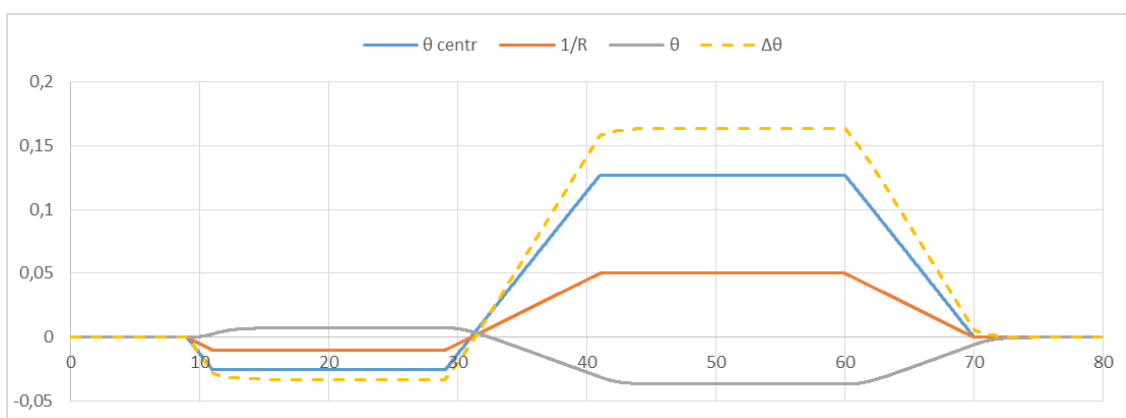


Gráfico 20 - Dados referentes à tabela 7

Como esperado, como o veículo tem menos massa, o grau de inclinação do mesmo é menor e responde mais rapidamente às curvas a que foi sujeito. Isto deve-se à inércia, como esta é diretamente proporcional à massa, quando menos massa menos resistência o veículo vai

oferecer às mudanças de trajetória. No gráfico 20 é bem visível que a linha θ está muito mais similar à linha $1/R$ mas com sinal oposto, pois não tem nenhum sistema de correção atuante sobre o veículo. Estas diferenças em relação ao gráfico com os valores de referência, são tão perceptíveis devido à massa ter diminuído metade, mais exatamente 5000 quilograma.

Tabela 8 - Dados inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	13500
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+04
$k[\text{N/m}] =$	3,20E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varpi_i[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	5
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	0

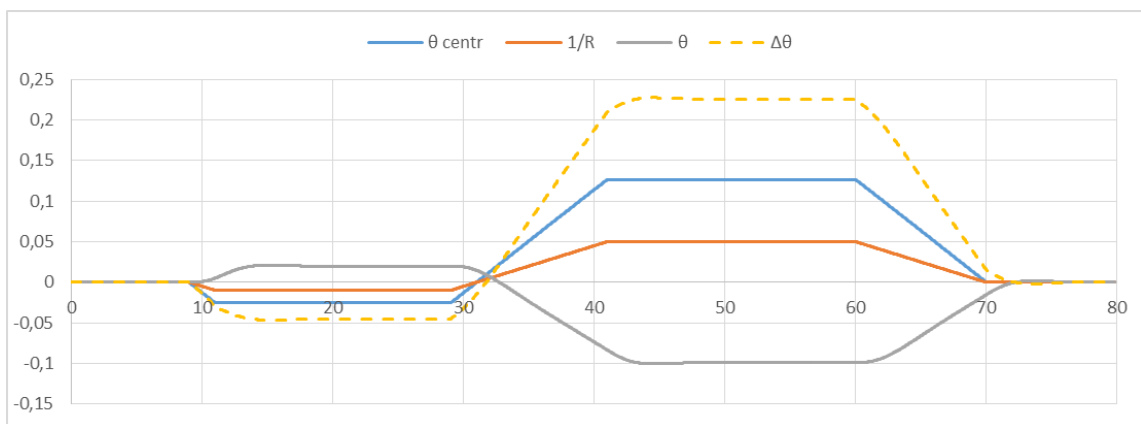


Gráfico 21 - Dados referentes à tabela 8

Neste gráfico podemos verificar que, quando o veículo está com lotação esgotada ou próximo disso, a sua resposta à mudança de direção é mais lenta e a amplitude do ângulo de inclinação aumenta ligeiramente em relação ao gráfico 15 (valores de referência). Pode-se ainda salientar que a linha θ perde uniformidade com o aumento da massa.

4.2. Comportamento do veículo com sistema de correção

A seguir ir-se-á se estudar o comportamento quando tem o sistema de correção a atuar em curva. É de referir que o parâmetro α é o fator de correção e que quanto mais elevado este for maior correção o autocarro irá ter. Na equação diferencial este α foi inserido de modo que fossem adicionados à suspensão do veículo dois atuadores. O valor de α que é mostrado na tabela 9 foi obtido empiricamente através da análise de diversas situações.

Tabela 9 - Dados inseridos no programa excel

m[kg]=	10000
c[kg/s]=	1,00E+04
k[N/m]=	3,20E+04
dt[s]=	0,004
ϖ_i [rad]=	0,01
v[m/s]=	5
h[m]=	0,75
L[m]=	2
α =	1,6

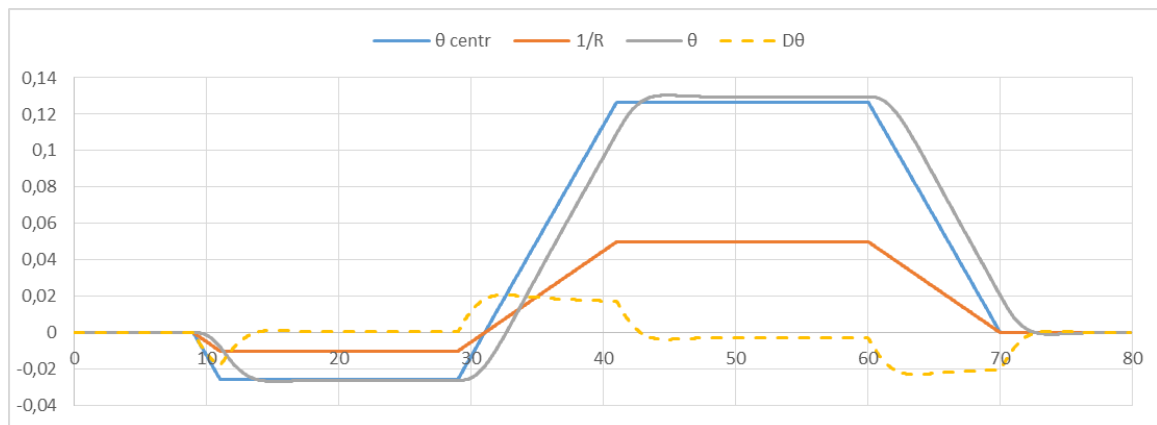


Gráfico 22 - Dados referentes à tabela 9

Assim que se observa o gráfico 22 é clara a inversão da curva θ em relação ao eixo horizontal. Desta forma o autocarro está a inclinar para o lado de dentro da curva. No momento em que o autocarro começa a descrever a curva, vê-se que o veículo reage inclinando-se com um atraso, pois o sistema de suspensão não consegue atuar imediatamente, mas depressa a diferença entre os ângulos θ e θ_{centr} se anula, o que significa que o autocarro está perfeitamente alinhado com a força resultante. Na segunda curva, como esta tem uma

curvatura maior, o autocarro volta a ter um atraso durante a transição, até que acontece um *overshoot* momentâneo e depressa o $\Delta\theta$ vai para zero. Quando desfaz a ultima curva para reiniciar a trajetória retilinea, o sistema, novamente com ligeiro atraso em relação ao que seria ideal, responde até alinhar o autocarro na horizontal.

4.2.1 Influência da velocidade na resposta do sistema de correção

Tabela 10 - Dados inseridos no programa excel

m[kg]=	10000
c[kg/s]=	1,00E+04
k[N/m]=	3,20E+04
dt[s]=	0,004
ϖ [rad]=	0,01
v[m/s]=	10
h[m]=	0,75
L[m]=	2
α =	1,6

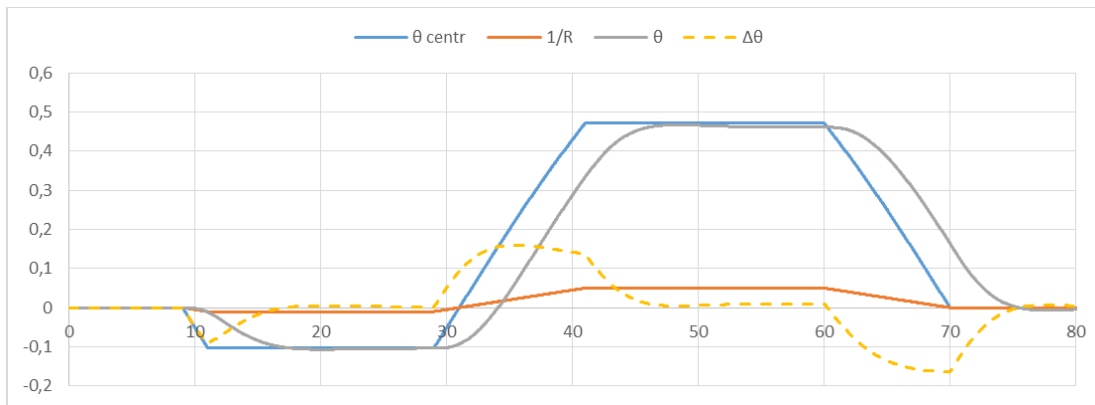


Gráfico 23 - Dados referentes à tabela 10

Quando a velocidade do veículo aumenta, tendo em consideração que a magnitude da força centrífuga aumenta com o quadrado da velocidade, é claro no gráfico 23 o grande aumento do valor da força centrífuga; que se reflete no incremento do ângulo que esta faz com o eixo vertical (θ_{centr}). Por esta razão, se o ângulo que o veículo tem de corrigir é maior, a resposta de correção precisa de mais tempo para elevar o autocarro até ao ângulo pretendido. Analisando o gráfico 23 é notório o aumento do desfasamento entre as curvas θ e θ_{centr} . Isto já era esperado pois quanto maior a velocidade, mais dificuldade os veículos têm de mudar de direção. Comparando com o caso acima, o atraso que existia, com um valor razoável, aumentou bastante. Isto revela, que o tempo que os passageiros estão desprovidos de forças

laterais é menor para a mesma curva. Deste modo, é preciso tentar melhorar a resposta do sistema de correção.

Tabela 11 - Dados inseridos no programa excel

m[kg]=	10000
c[kg/s]=	1,00E+04
k[N/m]=	3,20E+04
dt[s]=	0,004
φ_i [rad]=	0,01
v[m/s]=	10
h[m]=	0,75
L[m]=	2
α =	1,7

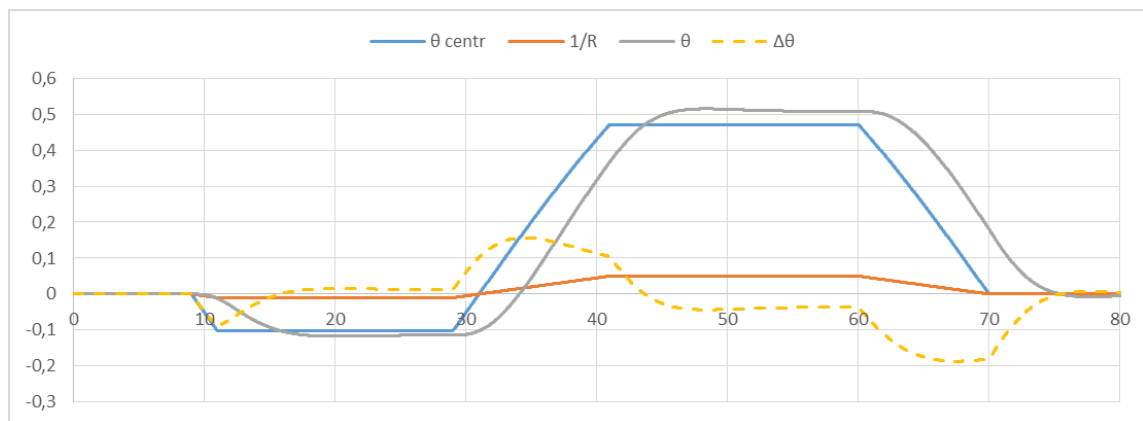


Gráfico 24 - Dados referentes à tabela 11

A única forma que este modelo computacional permite para melhorar a resposta do sistema de correção é aumentar ou diminuir o coeficiente de correção. No caso que se segue ir-se-á aumentar 0,1 o valor de α e mantendo-se a velocidade que foi inserida na tabela 10. É visível no gráfico 24 que o tempo de resposta diminuiu ligeiramente, embora não seja significativo. Passa a haver um fenómeno de *overshoot* constante durante toda a segunda curva. Isto é, os passageiros passam a estar demasiado inclinados, o que leva a que existam forças laterais embora pequenas, a atuar sobre os mesmos. Este não é o objetivo deste estudo, logo, para atenuar este atraso, é necessário trabalhar no sistema de controlo mais aprofundadamente. Baixar o coeficiente de correção está fora de questão pois se com o valor 1,6 o sistema já não responde como deveria, baixando-o só vai diminuir a componente de atuação do sistema de correção, o que vai piorar ainda mais o tempo de resposta.

Tabela 12 - Dados inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	13500
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+04
$k[\text{N/m}] =$	3,20E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varpi_i[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	5
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	1,6

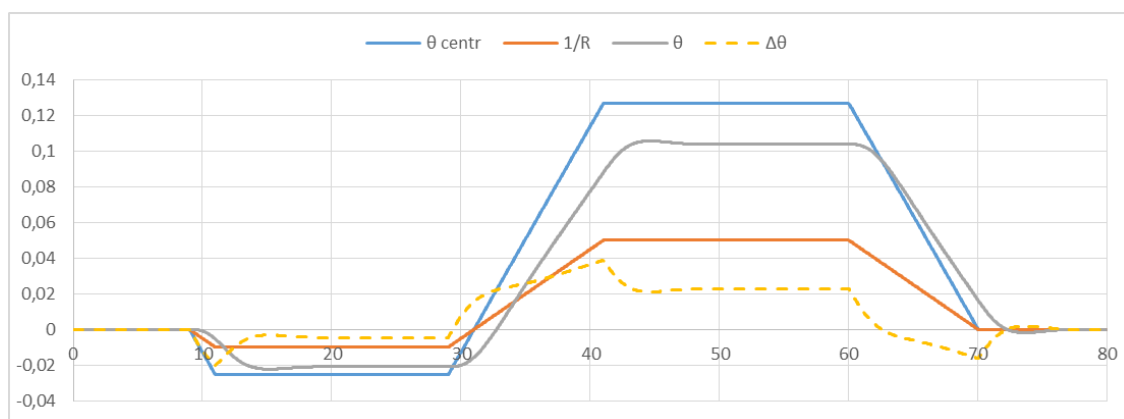


Gráfico 25 - Dados referentes à tabela 12

Outra situação que é preciso ter em conta, é no caso em que o autocarro viaja sem lotação e passa a ter a lotação esgotada. Para se fazer este estudo, foram inseridos de novo a velocidade e o coeficiente de correção de referência e aumentada a massa do veículo 3500 quilograma (valor que já foi justificado acima). Quando isto acontece, o tempo de resposta aumenta um pouco mas não significativamente, pois com o aumento da massa o θ_{centr} também aumenta embora não tanto como em relação ao incremento de velocidade. A maior diferença neste caso, é que o sistema não consegue fazer o ângulo necessário devido á elevada massa que tem inclinar como se pode verificar no gráfico 25. Na primeira curva o sistema quase consegue alinhar o autocarro com a força resultante, embora na segunda curva o $\Delta\theta$ esteja longe do valor zero. Para tentar alterar esta situação mais uma vez se irá aumentar o valor de α para observar se o sistema fica com uma resposta aceitável para quando o autocarro tem lotação esgotada.

Tabela 13 - Dados inseridos no programa excel

m[kg]=	13500
c[kg/s]=	1,00E+04
k[N/m]=	3,20E+04
dt[s]=	0,004
ϖ_i [rad]=	0,01
v[m/s]=	5
h[m]=	0,75
L[m]=	2
α =	1,75

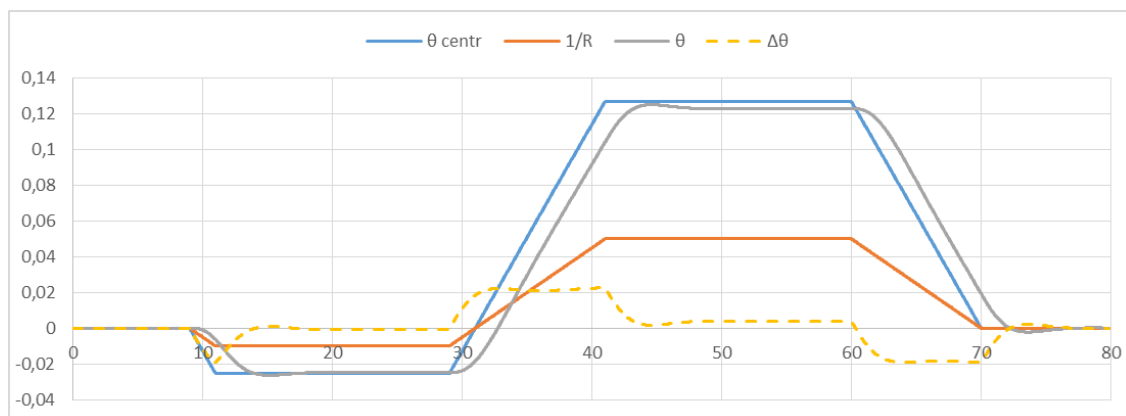


Gráfico 26 - Dados referentes à tabela 13

Para chegar a este valor de $\alpha(1,75)$, foi se incrementando o valor de 0,5 em 0,5, até se chegar à conclusão que para este perfil de curvatura, viajando a uma velocidade de 5 m/s, é o valor que mais se adequa a uma resposta satisfatória. Observando o gráfico 26 é possível aferir que, embora o ângulo de correção tenha de ser maior, o sistema, com um atraso aceitável, reage de forma suficientemente rápida fazendo com que o tempo que o $\Delta\theta$ demora a ir até ao zero seja baixo. Na primeira curva, o sistema consegue anular totalmente as forças laterais a atuar sobre os passageiros. Na segunda já não consegue que a diferença entre o θ_{centr} e θ seja zero, mas, visto que a diferença é tão pequena, pode-se afirmar que o sistema respondeu satisfatoriamente às curvas impostas ao veículo. Isto revela que é necessário que o sistema de correção tenha a informação de qual a alteração de massa que o autocarro sofre em cada paragem, para, deste modo, retificar o valor de α para que o sistema tenha uma boa resposta em todas as situações possíveis.

Tabela 14 - Dados inseridos no programa excel

$m[\text{kg}] =$	13500
$c[\text{kg/s}] =$	1,00E+04
$k[\text{N/m}] =$	3,20E+04
$dt[\text{s}] =$	0,004
$\varphi_i[\text{rad}] =$	0,01
$v[\text{m/s}] =$	10
$h[\text{m}] =$	0,75
$L[\text{m}] =$	2
$\alpha =$	1,82

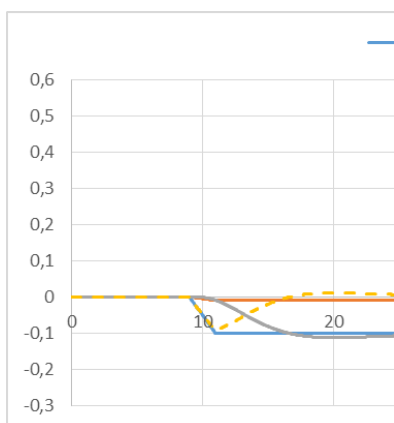


Gráfico 27 - Dados referentes à tabela 14

Por último, estudou-se o pior cenário possível que é quando o autocarro descreve o percurso a uma velocidade alta e com lotação esgotada. Para este caso, como está representado no gráfico 24, o θ_{centr} que é preciso corrigir não tem valores superiores aos que já foram mostrados nos gráficos acima, o que revela que não é um ângulo impossível de corrigir. Devido ao aumento da velocidade o sistema não consegue responder idealmente desprezando esse atraso (que se consegue diminuir através do melhoramento do algoritmo de controlo), o sistema consegue levar o $\Delta\theta$ para zero eficazmente. O valor 1,82 foi obtido empiricamente; foram testados vários valores de α até que se concluiu que só afinando o valor até á centésima é que se tem resultados satisfatórios para casos mais exigentes.

5. Conclusão

Depois de todo o estudo realizado, ficou-se a conhecer melhor o percurso dos comboios pendulares, bem como os seus aspetos técnicos. Foi importante perceber que com o seu desenvolvimento surgiu uma procura no mercado que veio tornar sustentável a sua fabricação em larga escala e apoiar a investigação. Uma das principais razões para tal acontecer, foi o facto de ser uma alternativa vantajosa a nível económico, dado não ser necessário construir linhas ferroviárias alternativas; e circularem a velocidades muito acima dos comboios que não usufruem do sistema pendular.

Com a elaboração dos inquéritos foi detetado um problema no que diz respeito ao conforto em curva em viagens citadinas. Foi confirmado que as pessoas sentem um desconforto físico e apoiam o desenvolvimento de um sistema que melhore esta situação. Uma grande parte também afirmou que viajaria mais por este meio se os autocarros fossem mais confortáveis. Tendo em conta o percurso dos comboios pendulares podemos constatar que existe espaço para melhoramentos nesta área, portanto a ideia é válida e há razões para investir neste projeto.

Foi estabelecido um contacto com a empresa Transdev, do qual resultou uma visita a uma das instalações de manutenção, localizadas no parque industrial do Canhoso, concelho da Covilhã. A empresa disponibilizou duas viaturas para observação e destacou a presença do engenheiro responsável por toda a manutenção das oficinas e veículos, foi também possível fazer perguntas aos mecânicos presentes sobre o funcionamento do sistema de suspensão e as suas características. Como se pôde observar a zona inferior das viaturas, houve uma análise próxima ao sistema de suspensão, onde foram identificados todos os componentes constituintes e foi obtida uma melhor perceção do seu funcionamento. Foram tiradas fotografias aos componentes fundamentais que ajudaram em muito a descrição do funcionamento do sistema de suspensão neste trabalho. Através desta apreciação foi possível perceber que um sistema de inclinação é compatível com o sistema já utilizado pelos autocarros, logo, para a implementação de um sistema pendular não é necessário fazer muitas alterações no sistema já existente, o que é vantajoso economicamente. Toda a informação detalhada e pormenorizada ajudou a desenvolver um modelo físico do autocarro fiel ao comportamento real destes veículos.

O programa informático escolhido para a simulação do modelo físico do autocarro foi o Excel, devido à grande capacidade de tratamento de dados, a fácil adaptação à integração numérica e apresentação gráfica. Numa primeira fase, foram testados modelos simples já comprovados [9], para determinar a fiabilidade de resultados deste programa. Tendo obtido resultados consistentes, conclui-se que o programa tem rigor suficiente para o estudo em causa. Foi escolhido um sistema de atuação similar ao sistema dos comboios japoneses que utilizam

atuadores pneumáticos separados do sistema de suspensão para inclinar a carruagem [10], entre outros possíveis.

Depois de toda a análise feita no capítulo 4 e do estudo elaborado sobre os autocarros, verifica-se que o sistema de correção proposto melhora o conforto dos passageiros e é passível de ser implementado.

6. Trabalhos propostos

É necessário estudar qual dos diferentes tipos de atuação se adapta ao sistema de suspensão que já encontra nas viaturas e também a forma mais económica de instalar este sistema em larga escala.

É fundamental desenvolver o modelo físico para que se possa simular computacionalmente os diferentes tipos de atuação como também testar outros perfis de curvatura para abranger o máximo de casos possíveis da realidade.

Depois de existir um modelo físico já muito próximo a nível do comportamento de um autocarro real, programar um sistema de controlo capaz de atenuar os atrasos na resposta do sistema de correção.

Implementar o sistema de correção num protótipo de escala menor, adaptando o sistema de controlo computacional ao sistema físico e testar a sua viabilidade.

7. Bibliografia

- [1] Lewis, J.B. 2009. Analysis of driver speeds and comfort on horizontal curves in New Brunswick, Master's Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada
- [2] Donohew B & Griffin M: 2005. Report on analysis on SNCF train field tests regarding motion sickness. European Commission Competitive and Sustainable Growth Programme – Fast And Comfortable Trains (FACT), Report D6c. Paris: UIC.
- [3] Gustavsson J: 2003. Fordon för sth 250 km/h -utvecklingstrender och egenskaper, Transrail BVT8R2.1.
- [4] <http://www.railway-technology.com/projects/alaris/alaris6.html>. 17/04/ 2015
- [5] http://www.hitachi-rail.com/products/rolling_stock/tilting/feature05.html. 31/01/2015
- [6] http://web-japan.org/trends/09_sci-tech/sci101209.html. 20/08/2014
- [7] http://web-japan.org/trends/09_sci-tech/sci101209.html. 05/12/2014
- [8] <http://www.volvodemort.com/technical/volvo/manuals/service/tp15052/group72/index.html>. 05/05/2015
- [9] GILLESPIE, T.D., (Thomas D.); Fundamentals of vehicle dynamics Society of Automotive Engineers, Inc., 1992, 1st edition
- [10] <http://www.jterc.or.jp/english/kokusai/conferences/pdf/130211-hitachi-presentation.pdf> 06/08/2014