



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

João Pedro Carvalho Dias Rasteiro

**OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CICLO DE UM
TRANSELEVADOR**
ANÁLISE E ESTUDO DE POSSÍVEIS GANHOS DE TEMPO
NO MOVIMENTO DE UM TRANSELEVADOR NUM CICLO
DE FUNCIONAMENTO

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de
Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor José Domingos Moreira da
Costa e apresentada ao departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Julho de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Otimização do tempo de ciclo de um transelevador.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto.

Cycle time optimization of a stacker crane.

Autor

João Pedro Carvalho Dias Rasteiro

Orientadores

José Domingos Moreira da Costa

José Alfredo Simões de Jesus

Júri

Presidente	Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho Professor Associado da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Nord Drivesystems PTP,
Lda.**

Coimbra, Julho, 2019

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação,
não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

Aos meus pais, irmã, amigos, professores e colegas de trabalho.

Agradecimentos

O trabalho aqui apresentado só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Agradeço ao Doutor José Domingos Moreira da Costa por me guiar em tudo o que conseguiu bem como por ter partilhado toda a sua experiência e conhecimento.

Agradeço à Nord Drivesystems PTP por me acolherem como um dos seus, por me darem todas as ferramentas que necessitei para o desenvolvimento da minha tese bem como todo o apoio que foi necessário.

Agradeço ao Engenheiro José Alfredo Simões de Jesus por me ter aceitado como seu orientando e por toda a ajuda que me deu ao longo desta tese.

Um especial agradecimento aos funcionários da Nord por tão bem me acolherem e por toda a ajuda que sempre me deram, dispondo muitas vezes do seu tempo pessoal para me ajudarem sempre que necessitei.

Agradeço também à Consoveyo, em especial ao Engenheiro Marco Lima, por toda a disponibilidade mostrada seja no fornecimento de dados, seja no esclarecimento de dúvidas relacionadas com o processo de dimensionamento do mecanismo e estrutura.

Resumo

O objetivo deste trabalho é a otimização do tempo de ciclo de um transelevador presente num armazém automático de modo a diminuir o tempo de viagem.

Serão apenas dinamizadas a aceleração e desaceleração do transelevador, tendo em conta diferentes patamares de carga e de altura. Esta dinamização tem em vista uma redução do tempo de ciclo quando comparado com o tempo ciclo atual obtido através de uma aceleração e desaceleração fixas e quando comparado com o melhor tempo de ciclo obtido pelo método utilizado nos dias de hoje.

Para efetuar esta alteração será analisada a estabilidade da estrutura, recorrendo aos esforços aplicados na estrutura através do peso próprio de cada constituinte e das forças de inércia resultantes da aceleração e desaceleração.

Será ainda analisado o ponto crítico de aceleração que leva ao escorregamento das rodas motrizes no carril e onde serão tidos em conta os limites de aceleração e de binário de arranque do próprio conjunto de acionamento. Será, no entanto, necessário proceder a uma otimização de maneira a atingir o melhor compromisso entre a aceleração permitida pelo motor e a aceleração permitida pelo fator de atrito dado que, para uma maior aceleração permitida pelo acionamento, é necessário disponibilizar um maior binário de arranque. Este aumento de binário resulta numa maior força aplicada nas rodas o que leva a um mais fácil escorregamento, logo menor aceleração permissível pelo fator de atrito.

Após explorado o acionamento instalado, será feita uma otimização livre de limitações por parte do acionamento com vista a encontrar um acionamento ótimo para esta estrutura. Esta otimização fará com que o fator limitante passe a ser dependente unicamente da estrutura, seja este devido ao fator de atrito seja devido à estabilidade.

Por último será resumido como implementar este novo modelo de aceleração e desaceleração bem como o que será necessário mudar para a mesma.

Palavras-chave: Otimização, Aceleração, Transelevador, Estabilidade, Atrito.

Abstract

The main objective of the work presented is the optimization of the cycle time of a stacker crane in order to reduce its travel time.

A dynamic acceleration will be studied by considering different levels of cargo weight and height. This dynamic acceleration will be compared with the static acceleration used today and with the acceleration obtained when the current method is applied (heaviest load on the highest point) in order to investigate if there is a waste of time that can be cut, resulting in more cycles for the same amount of time.

This dynamic approach will be done by analyzing the limits of stability of the structure when the loads are applied either by own sheer weight of the stacker crane parts or by the forces of inertia generated by applying an acceleration to the bodies' mass.

The friction between both wheels can also be a limiting factor since that, due to a higher acceleration, the wheels can start to slip on top of the rails increasing the time needed to achieve the required acceleration and by doing this, start to damage the components in the meantime. To study this factor the motor maximum acceleration and torque need to be taken into consideration since that there is a need to optimize in order to obtain the best compromise between the acceleration permitted by the motor and the one permitted by the non-slip condition. This compromise exists since, to achieve a higher acceleration permitted by the motor, there is a need for higher starting torque which in turn ups the force applied to the wheels. Therefore, to slip is easier helping to reduce the acceleration permitted by the friction factor.

After optimizing to its fullest extent, the currently installed motor and gear, a non-restrained optimization will be made in order to find an optimal motor and gear solution for this structure. By doing this the limiting factor will only depend on the structure, being it due to the stability or/and the non-slip condition.

Lastly there is an explanation on how to implement this new acceleration and what is needed to change.

Keywords Optimization, Stacker crane, Acceleration, Stability, Friction.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Siglas	xiii
1. Introdução	1
1.1. Introdução da Nord Drivesystems PTP	1
1.2. Introdução ao problema em estudo	1
1.3. Metodologia a utilizar	2
1.4. Estrutura da Dissertação	3
2. Definição de transelevador	5
3. Modelo atual versus modelo proposto	7
3.1. Modelo atual de aceleração e desaceleração fixa	7
3.2. Modelo proposto de aceleração e desaceleração dinâmica	8
3.3. Método de comparação de modelos	8
4. Análise das limitações à aceleração modelo atual	9
4.1. Limitação através do Motor	9
4.1.1. Informação do acionamento instalado	9
4.1.2. Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração	12
4.1.3. Conclusão sobre as limitações do acionamento	14
4.1.4. Análise do tempo de ciclo limitado pelo motor	15
4.2. Dados da estrutura em análise	17
4.2.1. Cálculo das reações estáticas nos apoios	18
4.3. Limitação através da estabilidade	20
4.3.1. Modelo de análise de estabilidade	20
4.3.2. Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração	21
4.3.3. Conclusão sobre as limitações da estabilidade	25
4.3.4. Análise do tempo de ciclo limitado pela estabilidade	27
4.4. Limitação devido ao escorregamento	30
4.4.1. Modelo de análise de atrito	30
4.4.2. Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração	31
4.4.3. Conclusão sobre as limitações do atrito	34
4.4.4. Análise do tempo de ciclo limitado pelo atrito	35
4.5. Junção dos três fatores limitantes	37
4.5.1. Seleção da aceleração mínima para cada altura e carga	37
4.5.2. Conclusão com junção dos três fatores	39
4.5.3. Análise final do tempo de ciclo limitado	39
5. Otimização do transelevador	43
5.1. Limitação através do motor e atrito	43
5.2. Otimização atingida	47
5.3. Proposta de acionamento otimizada	49

6. Esquematização de um modo de aplicação dos resultados atingidos.....	51
7. Conclusões	53
7.1. Transelevador instalado atualmente	53
7.2. Transelevador otimizado	53
7.3. Considerações finais	54
Referências Bibliográficas	57
Apêndice A.....	59
Apêndice B.....	63
Apêndice C.....	65
Apêndice D.....	69
Apêndice E	75
Anexo A	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Transelevador Consoveyo, Coldservice, Veghel Holanda.....	5
Figura 4.1. Evolução da aceleração limitada pelo motor com o aumento de carga.	15
Figura 4.2. Diagrama de forças.	19
Figura 4.3. Esquema de forças num modelo dinâmico com sentido positivo da aceleração.	22
Figura 4.4. Esquema de forças num modelo dinâmico com sentido negativo da aceleração.	22
Figura 4.5. Evolução da aceleração limitada pela estabilidade com o aumento de carga nos dois sentidos.	26
Figura 4.6. Evolução da aceleração limitada pela estabilidade com o aumento da altura nos dois sentidos.	27
Figura A.1. Evolução da aceleração limitada pelo atrito com o aumento de carga nos dois sentidos.	59
Figura A.2. Evolução da desaceleração limitada pelo atrito com o aumento de carga nos dois sentidos.	60
Figura A.3. Evolução da aceleração limitada pelo atrito com o aumento da altura nos dois sentidos.	61
Figura A.4. Evolução da desaceleração limitada pelo atrito com o aumento da altura nos dois sentidos.	62
Figura D.1. Evolução da aceleração no cenário final, com o aumento da altura nos dois sentidos.	69
Figura D.2. Evolução da desaceleração no cenário final, com o aumento da altura nos dois sentidos.	70
Figura D.3. Evolução da aceleração no cenário final, com o aumento da massa nos dois sentidos.	70
Figura D.4. Evolução da desaceleração no cenário final, com o aumento da massa nos dois sentidos.	71
Figura D.5. Evolução da aceleração no cenário final, com o aumento de carga nos dois sentidos.	72
Figura D.6. Evolução da desaceleração no cenário final, com o aumento de carga nos dois sentidos.	73
Figura AA.1. Tabela retirada do livro técnico da Stahl [2] onde são apresentados os valores de w_r para cada diâmetro de roda.	79

Figura AA.2. Evolução do parâmetro w_r com o aumento do diâmetro da roda e respetiva equação de curva. 79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Tabela de parâmetros do sistema de translação horizontal.....	10
Tabela 4.2. Tabela de características do conjunto motor redutor a 50Hz.	11
Tabela 4.3. Valores das variáveis da aceleração calculadas.....	13
Tabela 4.4. Aceleração e desaceleração no motor face à variação de carga no percurso médio.....	14
Tabela 4.5. Tempo e distância de aceleração e desaceleração no motor variando a carga no percurso médio.	16
Tabela 4.6. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.....	17
Tabela 4.7. Massas da estrutura do transelevador.	18
Tabela 4.8. Valores das variáveis da aceleração calculadas.....	18
Tabela 4.9. Tabela de valores das reações estáticas.	20
Tabela 4.10. Variação da aceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pela estabilidade.....	24
Tabela 4.11. Tempo de aceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pela estabilidade.....	25
Tabela 4.12. Distância percorrida na aceleração, limitado pela estabilidade.....	28
Tabela 4.13. Tempo decorrido com aceleração nula, limitado pela estabilidade.....	28
Tabela 4.14. Tempo de viagem limitado pela estabilidade, variando a altura e carga.....	29
Tabela 4.15. Variação do tempo de ciclo padrão com o modelo adotado.....	30
Tabela 4.16. Variação da aceleração e desaceleração limitada pelo atrito, variando a altura e carga.....	32
Tabela 4.17. Tempo de aceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pelo atrito.....	33
Tabela 4.18. Tempo de desaceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pelo atrito.....	34
Tabela 4.19. Tempo de viagem limitado pelo atrito, variando a altura e carga.	35
Tabela 4.20. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.....	36
Tabela 4.21. Variação da aceleração e desaceleração limitada pelos três fatores, variando a altura e carga.	37
Tabela 4.22. Variação da desaceleração limitada pelos três fatores, variando a altura e carga.	38
Tabela 4.23. Tempo de viagem no cenário final, variando a altura e carga.....	40

Tabela 4.24. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.	41
Tabela 5.1. Valores das variáveis da aceleração calculadas na otimização.	44
Tabela 5.2. Variação da aceleração e desaceleração, limitada pelo acionamento otimizado, face à variação de carga no percurso médio.....	45
Tabela 5.3. Variação da aceleração limitada pelo atrito, variando a altura e carga na situação otimizada.....	46
Tabela 5.4. Variação da desaceleração limitada pelo atrito, variando a altura e carga na situação otimizada.....	46
Tabela 5.5. Tempo de viagem final otimizado, variando a altura e carga.	47
Tabela 5.6. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.	48
Tabela B.1. Distância percorrida na aceleração, limitado pelo atrito.	63
Tabela B.2. Distância percorrida na desaceleração, limitado pelo atrito.	63
Tabela B.3. Distância percorrida com aceleração nula, limitado pelo atrito.	64
Tabela B.4. Tempo decorrido com aceleração nula, limitado pelo atrito.	64
Tabela C.1. Tempo decorrido na aceleração do cenário final.....	65
Tabela C.2. Tempo decorrido na desaceleração do cenário final.....	65
Tabela C.3. Distância percorrida na aceleração do cenário final.	66
Tabela C.4. Distância percorrida na desaceleração do cenário final.....	66
Tabela C.5. Distância percorrida com aceleração nula no cenário final.	67
Tabela C.6. Tempo decorrido com aceleração nula no cenário final.	67
Tabela E.1. Variação da aceleração final otimizada, variando a altura e carga.	75
Tabela E.2. Variação da desaceleração final otimizada, variando a altura e carga.....	75
Tabela E.3. Tempo decorrido na aceleração do cenário final otimizado.	76
Tabela E.4. Tempo decorrido na desaceleração do cenário final otimizado.....	76
Tabela E.5. Distância percorrida na aceleração do cenário final otimizado.	77
Tabela E.6. Distância percorrida na desaceleração do cenário final otimizado.....	77
Tabela E.7. Distância percorrida com aceleração nula no cenário final otimizado.	78
Tabela E.8. Tempo decorrido com aceleração nula no cenário final otimizado.	78

SIGLAS

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FEM – Federação Europeia de Manutenção

1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução da Nord Drivesystems PTP

Este tema nasceu de uma parceria entre a Universidade de Coimbra mais concretamente da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCTUC), através do Departamento de Engenharia Mecânica de Coimbra (DEM) e a Nord Drivesystems PTP, no âmbito de um estágio curricular.

A empresa doravante apenas referida como Nord, é fornecedora de soluções de acionamentos para inúmeras empresas das mais variadas áreas desde a indústria alimentar a cerâmicas. Fundada em 2007 serve como representante da fábrica mãe alemã em Portugal, fornecendo assistência técnica aos produtos Nord Drivesystems no mercado português. A assistência técnica consiste no acompanhamento próximo de cada cliente, no fornecimento da solução e acompanhamento durante todas as fases do processo incluindo o pós-venda com a manutenção, reparação e modificação de produtos quando necessário.

A Nord fornece produtos de várias categorias: motores, redutores, motoredutores, variadores e outros componentes de eletrónica, para além de componentes para reparação dos seus produtos. A intervenção na Nord teve em vista a criação de um método de dimensionamento para redutores presentes em transelevadores bem como de um método de cálculo de aceleração e desaceleração com intuito de reduzir o tempo de ciclo.

1.2. Introdução ao problema em estudo

A empresa Nord tem como cliente empresas de vários ramos, sendo um destes ramos o fornecimento e implementação de soluções de acionamento para transelevadores de armazéns automáticos como os presentes na Portucel.

Nestes armazéns os transelevadores estão apenas parametrizados para uma aceleração fixa independentemente de se movimentarem com a carga máxima ou em vazio, à altura máxima ou à mínima. Considerando estes dados, a presente dissertação pretende investigar o possível ganho de tempo que advém da aplicação de diferentes acelerações e

desacelerações, dependendo do patamar de carga a ser transportado e do nível de altura destino.

Este problema é um problema real uma vez que há empresas que construíram o seu armazém automatizado quando possuíam uma determinada cadência de produção. Neste momento, com o crescimento da empresa e com o conseqüente aumento de produção, viram o seu armazém tornar-se o fator limitante a este aumento, levando à necessidade de construção de *buffers* auxiliares ou novos armazéns para conseguir dar resposta à nova cadência de produção.

Se esta investigação der resultados significativos, empresas com este problema serão capazes de aumentar o número de ciclos de carga e descarga dos seus armazéns sem a necessidade de investir noutras soluções ou noutro armazém, pelo menos dentro dos limites estruturais do transelevador.

Mesmo para empresas sem este problema esta opção de diminuição de tempo de ciclo significará uma segurança extra para, em caso de necessidade ou de uma futura expansão de negócio/aumento de produção, terem capacidade de acelerar o seu armazém apenas mudando a parametrização do transelevador, operação rápida de efetuar diminuindo assim quer o tempo de transição para a maior produção quer o investimento necessário.

1.3. Metodologia a utilizar

De modo a avaliar estes efeitos será analisada a estabilidade da estrutura durante os períodos de arranque e paragem para ambos os sentidos do movimento.

Como o deslizamento entre as rodas e o carril também poderá ser um fator limitante, será também estudado o valor máximo de aceleração e desaceleração de modo a evitar o escorregamento entre roda e carril.

O acionamento será fornecido pela Nord, determinado inicialmente através de um programa de cálculo da própria empresa e, na situação otimizada, será determinado pelos valores obtidos através do Excel construído sendo os seus limites de binário de arranque, aceleração e velocidade máxima, também tidos em conta.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, seguidos das referências bibliográficas, apêndices e anexos.

Observar-se-á que o primeiro capítulo está focado na apresentação da empresa onde foi efetuado o estágio curricular, na apresentação do problema, na metodologia utilizada na análise e na estrutura da dissertação.

A definição de transelevador será feita no segundo capítulo onde será descrita a sua função, o seu propósito e os diferentes tipos, de entre os quais o que será estudado.

No terceiro capítulo serão analisadas quais as diferenças entre o atual modelo de aceleração e desaceleração utilizado, um modelo que utiliza uma aceleração fixa no pior caso possível e o modelo em investigação, um modelo de acelerações dinâmicas que variam consoante a carga a transportar e a altura destino.

No quarto capítulo é feita a análise das limitações à aceleração com o acionamento instalado atualmente. Neste capítulo teremos quatro subcapítulos onde será feita a análise dos três fatores limitantes (motor, estabilidade e atrito) e a análise do panorama de acelerações e desacelerações quando os três fatores limitantes são tidos em conta.

No quinto será realizada a otimização da estrutura não restringindo a estrutura ao acionamento. Deste capítulo será obtido o acionamento ótimo para esta estrutura e aplicação de maneira a obter o mínimo tempo de ciclo.

A esquematização de uma forma de implementação dos resultados obtidos e de como o *software* poderá utilizar os dados finais sobre as acelerações e desacelerações para diminuir o tempo de ciclo será feita no sexto capítulo.

No último capítulo serão apresentadas as principais conclusões, sendo também feito um conjunto de sugestões aos fabricantes de transelevadores bem como ao fornecedor de motoredutores.

2. DEFINIÇÃO DE TRANSELEVADOR

Um transelevador é uma máquina que trabalha num corredor de estantes, dentro de um armazém automatizado. A sua função é movimentar mercadoria de e para dentro do armazém.



Figura 2.1. Transelevador Consoveyo, Coldservice, Veghel Holanda.

Para atingir esse objetivo conta com uma estrutura com um, dois ou mais mastros, uma base fixa a um carril, sendo este carril térreo ou aéreo, uma ou duas unidades de acionamento compostas por um moto redutor e respectivas rodas, uma acionamento para o movimento de elevação de carga composto por outro motoredutor e um conversor de movimento rotação/translação (guincho elétrico, pinhão cremalheira, etc.) e um tabuleiro que tem o propósito de servir de plataforma onde é fixo o extrator da mercadoria (braço robotizado, garfos paletizadores, etc.).

Existem também aplicações que contam com dois carris, um superior e um inferior com o objetivo de dividirem os esforços aplicados nos apoios, seja uma divisão de todos os esforços (estáticos e dinâmicos) ou apenas um apoio para conferir estabilidade lateral e/ou estabilidade relacionada com o movimento do transelevador. Também são construídos transelevadores de duplo carril inferior e/ou superior.

A escolha usual de método de elevação para cargas pesadas é o guincho elétrico pois necessita de menos manutenção e é menos sensível às condições ambientais, (funciona bem sem necessidade de um meio limpo (sem poeiras e sujidade)).

Neste caso será utilizado um transelevador de apenas um carril inferior e superior, sendo o superior utilizado maioritariamente como suporte de guiamento lateral. Apresenta apenas um mastro, duas rodas motrizes e um sistema de elevação através de guincho elétrico e dois tambores de enrolamento do cabo de aço.

Funciona num corredor com estantes em ambos os lados e trabalha num ciclo de 24 horas, sendo desejados 120 ciclos por hora.

3. MODELO ATUAL VERSUS MODELO PROPOSTO

Neste capítulo serão apresentadas as diferenças entre os dois modelos em análise bem como o método utilizado para os comparar. Serão também mencionadas as vantagens e desvantagens de ambos.

3.1. Modelo atual de aceleração e desaceleração fixa

O modelo atual de aceleração baseia-se na utilização da norma FEM 9.311, [1], que regulamenta o desenho de máquinas para armazenagem e remoção de materiais em armazéns.

Segundo os técnicos da Consoveyo, empresa que construiu o armazém e transelevador em estudo, o método utilizado para o seu dimensionamento parte de uma verificação à estabilidade da estrutura e da situação de atrito entre o par roda-carril no caso de maior carga a ser transportada e maior altura de transporte. Isto significa que a máquina utiliza sempre a mesma aceleração e desaceleração, proveniente do caso limite que foi estudado. Daqui resulta que o transelevador quer circule em vazio, a meia carga ou no máximo de carga demorará sempre o mesmo tempo a completar um ciclo. Isto verifica-se também qualquer que seja a altura destino da carga, pois a aceleração é constante.

Este modelo, decorrente do estudo do caso limite, isto é, do pior caso, confere segurança uma vez que todos os outros cenários de carga e altura serão mais seguros que o caso estudado, levando a que o equipamento funcione maioritariamente do lado da segurança.

Por outro lado, isto leva a uma possível perda de tempo e desperdício de recursos. Leva também a uma máquina de difícil atualização, quando for necessário aumentar o número de ciclos de carga e descarga do armazém. Estas desvantagens são consequência de o armazém ser dimensionado apenas com uma aceleração predefinida para o pior caso, sendo necessário substituir todo o transelevador quando este cenário for alterado ou pelo menos obriga à substituição de todo o acionamento do movimento horizontal e/ou vertical.

3.2. Modelo proposto de aceleração e desaceleração dinâmica

Após análise do modelo atual surgiu a ideia de analisar a viabilidade de utilizar um modelo dinâmico para a aceleração e desaceleração. Este modelo implica que o transelevador acelere e desacelere tendo sempre em conta de que altura está a arrancar e com que carga, bem como a altura em que vai parar.

Este modelo, em princípio, trará ganhos em termos de tempo de ciclo o que implica que num determinado espaço de tempo, digamos uma hora, será possível efetuar mais cargas e descargas do armazém do que utilizando o modelo atual. Permite também construir uma máquina que tenha alguma atualização dentro dos limites de estabilidade, atrito e de motor. Esta atualização será de fácil implementação dado que consiste essencialmente num programa que irá ler a tabela de acelerações e desacelerações.

Este novo modelo permite ainda atualizar antigos transelevadores que já estejam a funcionar no seu limite com o modelo fixo, apenas adicionando *software* de controlo para gerir as acelerações e desacelerações consoante a carga transportada permitindo um aumento de rendimento a baixo custo. A desvantagem deste modelo será o desgaste maior induzido na máquina por esta estar sempre a trabalhar próxima do seu limite (motores, rodas, etc.) levando a uma possível vida inferior. Também existe a possibilidade de este estudo não representar melhorias que justifiquem uma mudança de abordagem ao problema.

3.3. Método de comparação de modelos

Para efetuar a comparação entre os dois modelos será efetuado o cálculo do tempo de ciclo para uma carga média (dado que a carga máxima neste caso é de 2500 [kg] a carga média será de 1250 [kg]), uma altura média (dado a altura máxima serem 31 [m] será utilizada a altura de 16 [m]) e uma distância de viagem média (42 [m] dado a distância máxima de 84 [m]). Posteriormente, para efetuar a análise final no modelo otimizado com as três limitações sobrepostas, será feita a comparação numa viagem utilizando uma carga fixa (por exemplo 2000, 2250 e 2500 [kg]) variando apenas a altura de destino. O tempo de ciclo para ir buscar e posteriormente ir levar, cada uma destas cargas, será somado e comparado entre modelos para perceber quais os ganhos em termos de tempo que a utilização de acelerações variáveis traz no processo de ir levar uma carga a várias alturas e no ciclo de ir buscar às mesmas alturas.

4. ANÁLISE DAS LIMITAÇÕES À ACELERAÇÃO MODELO ATUAL

Neste capítulo será feita a análise separada dos três fatores limitantes do transelevador, em três subcapítulos, bem como uma análise final dos três fatores em conjunto.

O primeiro será centrado em obter os limites dos motores instalados, tendo em consideração a informação proveniente do programa de dimensionamento da Nord bem como os métodos de cálculo utilizados pelo fabricante de pontes rolantes Stahl [2].

O segundo subcapítulo será relacionado com a estabilidade da estrutura. Para este estudo será utilizado o método de análise da norma FEM 9.311 [1] baseado no cálculo de estabilidade em função da carga transportada e da altura da carga.

O limite de escorregamento entre as rodas motoras e o carril será analisado no terceiro subcapítulo, tendo também em conta a norma acima mencionada. O objetivo é obter o máximo de aceleração com os diferentes patamares de carga e altura, não criando uma situação de escorregamento entre a roda e o carril.

O quarto subcapítulo será focado na junção dos três fatores analisados de modo a criar uma matriz da aceleração limite em função da altura de carga e descarga e da carga a transportar.

4.1. Limitação através do Motor

4.1.1. Informação do acionamento instalado

Para a obtenção das informações do acionamento será utilizado um sistema já dimensionado pela Nord para a empresa Consoveyo o qual já foi aprovado e fornecido. Para o dimensionamento dos motores, os dados fornecidos são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Tabela de parâmetros do sistema de translação horizontal.

Variável	Valor	Variável	Valor
Massa própria	35753 [kg]	Nº variadores	2
Massa da carga	2500 [kg]	Temperatura de trabalho	0 – 40 [°C]
Aceleração	0.5 [m/s ²]	Diâmetro da roda	800 [mm]
Desaceleração	0.5 [m/s ²]	Distância de transporte	84 [m]
Velocidade máxima	3.6 [m/s]	Material roda / carril	Aço/Aço
Velocidade mínima	0 [m/s]	Classe de eficiência	IE3
Nº de motores	2	Nº de ciclos	120 [ciclos/ h]
Período de trabalho	24 [h/dia]	Humidade relativa	< 85 % (sem condensação)

Este transelevador requer a utilização de redutores de engrenagens cónicas, veio oco com disco de bloqueio e travão com binário máximo de 117 [N. m]

Inserindo os valores no programa atualmente em utilização, tendo em atenção os dados acima referidos, o conjunto motor mais redutor será o motor 160 SP/4 BRE100 HL TF com o redutor SK9052.1 AZSH.

Os dados referentes a este motor e redutor são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Tabela de características do conjunto motor redutor a 50Hz.

160 SP/4 BRE100 HL TF		SK9052.1 AZSH	
Potência nominal	9.2 [kW]	Velocidade de saída	63 [rpm]
Velocidade nominal	1470 [rpm]	Binário de saída	1394 [N.m]
Binário nominal	59.8 [N.m]	Binário máximo admissível	4300 [N.m]
Binário de arranque	173.42 [N.m]	Binário de arranque	4045.89 [N.m]
Tensão nominal	230/400 [V]	Fator de serviço	3.1
Corrente nominal	29/16.70 [A]	Redução	23.33
Momento de inércia	0.067 [kg.m ²]	Veio de saída	70 [mm]

Os dados indicados na tabela 4.2. são valores nominais referentes à utilização da curva característica binário-frequência de 50 [Hz]. Segundo o manual técnico da Nord [3], os seus motores podem ser utilizados com uma frequência superior à nominal, utilizando as curvas características de binário a 87 [Hz] ou a 100 [Hz] sem que existam perdas de binário. Utilizando a curva característica de 87 [Hz], será possível usar uma frequência de 68 [Hz] que se traduz numa velocidade de saída de 85.68 [rpm] que é a velocidade máxima requisitada pela Consoveyo de 3.6 [m/s] para a estrutura.

Presente nas diretivas técnicas internas da Nord existe a informação de que é permitido utilizar os seus motores com um excesso de binário até 401%, desde que por curtos períodos. Isto resulta num binário de arranque máximo à saída do redutor de 5576 [N.m] em vez dos 4045.89 [N.m] utilizando a relação descrita no catálogo de $\frac{M_a}{M_N} = 2,9$ para este motor.

Ao utilizar este método de excesso de binário acontece que se entra no campo em que o fator de serviço do redutor é inferior a 1 o que pode causar problemas a longo prazo, apesar da Nord garantir segurança até um fator de serviço de 0.8.

Deste modo é possível, através da utilização de uma curva de frequência diferente e de um binário de arranque superior, atingir a aceleração desejada pela Consoveyo de 0.5 [m/s²].

4.1.2. Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração

Após seleção do motor será necessário calcular diversos parâmetros de modo a obter os limites de aceleração (a_H) e desaceleração (a_B) do motor para os diferentes patamares de carga. Para estes cálculos será utilizado o manual técnico da Stahl [2], empresa fabricante de pontes rolantes.

$$a_H = \frac{F_{mH} - F_{wr}}{m_F + m_{F,J} \times \eta} \quad [m/s^2], \quad (4.1)$$

em que F_{mH} é a força motriz aplicada por roda motriz, F_{wr} é a força resistente ao movimento devido ao atrito no par roda carril, m_F é a massa do conjunto grua mais carga, $m_{F,J}$ é a massa em translação com inércia equivalente ao motor elétrico e η é o rendimento do acionamento.

Cada uma destas variáveis é obtida através das seguintes equações.

$$F_{mH} = 2 \times \pi \times \frac{n_1}{v} \times T_H \times \eta \quad [N], \quad (4.2)$$

$$F_{wr} = m_F \times w_r \quad [N], \quad (4.3)$$

$$m_F = \frac{m_{estrutura} + m_{carga}}{n} \quad [kg], \quad (4.4)$$

$$m_{F,J} = 4 \times \pi^2 \times \left(\frac{n_1}{v}\right)^2 \times J_{motor} \quad [kg], \quad (4.5)$$

sendo n_1 a velocidade de rotação do motor em $[rpm]$, v a velocidade máxima de transporte, T_H o binário de arranque do motor, w_r a resistência específica de rolamento em $[N/kg]$ obtida através da extrapolação efetuada no anexo A, Figura AA.1, que utiliza os dados retirados do manual técnico da Stahl [2] também apresentados na Figura AA.2, $m_{estrutura}$ será a massa da estrutura incluindo os garfos de movimentação de carga, m_{carga} a massa da carga a transportar que varia de 0 até ao valor máximo a transportar (neste caso 2500 $[kg]$), dividida em 11 patamares, n o número de rodas de apoio da estrutura e J_{motor} o momento de inércia do motor.

De seguida será apresentada a equação da desaceleração bem como a equação da única variável diferente em relação à fórmula da aceleração (equação 4.1).

$$a_B = \frac{F_{mB} + F_{wr}}{m_F + m_{F,J} \div \eta} \quad [m/s^2], \quad (4.6)$$

em que F_{mB} é a força de travagem aplicada à roda, obtida através da seguinte equação.

$$F_{mB} = 2 \times \pi \times \frac{n_1}{v} \times T_B \div \eta \quad [N], \quad (4.7)$$

em que a única variável desconhecida será T_B , que representa o binário de travagem escolhido que é menor ou igual ao binário de arranque do motor (neste caso 239 [N.m]) que será acoplado ao motor e, portanto, será multiplicado pela relação de transmissão da caixa redutora.

Através das equações mencionadas obtiveram-se os valores expostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Valores das variáveis da aceleração calculadas

Variável	Valor	Variável	Valor
n_1	2005.07 [rpm]	m_F	[17877, 19126.5] [kg]
v	3.6 [m/s]	w_r	0.026 [N/kg]
T_H	239 [N.m]	F_{wr}	[471.36, 504.32] [N]
η	80%	J_{motor}	0.067 [kg.m ²]
F_{mH}	11152 [N]	m_{FJ}	227.92 [kg]
m_{Carga}	[0, 2500] [kg]	T_B	248.11 [N.m]
n	2	F_{mB}	18088.42 [N]

O valor do binário de travagem calculado é superior ao binário máximo que o motor é capaz de produzir, assim sendo será reduzido para o valor máximo de $T_B = 239$ [N.m] alterando F_{mB} para 17425 [N].

Após cálculo de todas as variáveis necessárias para a determinação dos limites de aceleração e desaceleração do motor face à variação da carga o seu valor é o apresentado de seguida na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Aceleração e desaceleração no motor face à variação de carga no percurso médio.

$m_{Carga} [kg]$	$a_H [m/s^2]$	$t_H [s]$	$a_B [m/s^2]$	$t_B [s]$
0	0.591	6.1	0.985	3.7
250	0.587	6.1	0.979	3.7
500	0.583	6.2	0.972	3.7
750	0.579	6.2	0.966	3.7
1000	0.575	6.3	0.960	3.8
1250	0.571	6.3	0.954	3.8
1500	0.567	6.4	0.947	3.8
1750	0.563	6.4	0.941	3.8
2000	0.559	6.4	0.935	3.8
2250	0.555	6.5	0.929	3.9
2500	0.551	6.5	0.924	3.9

De modo a ser mais fácil visualizar o efeito da diferença de acelerações e desacelerações foi calculado o tempo necessário para atingir a velocidade máxima de 3.6 [m/s]. Esse tempo foi determinado utilizando a fórmula apresentada abaixo.

$$t = \frac{v}{a} \quad [s], \quad (4.8)$$

4.1.3. Conclusão sobre as limitações do acionamento

Depois de calculadas as acelerações observamos que o acionamento é unicamente afetado pelos diferentes patamares de carga, sendo independente da altura destino. Isto deve-se a que os dois motores são apenas limitados pelo binário de saída e pela velocidade máxima de rotação.

Assim sendo, a conclusão atingida é que quanto mais carga o transelevador transportar maior será o esforço a que o motor é exposto logo menor será a aceleração e desaceleração máxima. Os gráficos expostos na Figura 4.1. evidenciam exatamente esta

conclusão uma vez que a aceleração e desaceleração diminuem à medida que a carga aumenta.

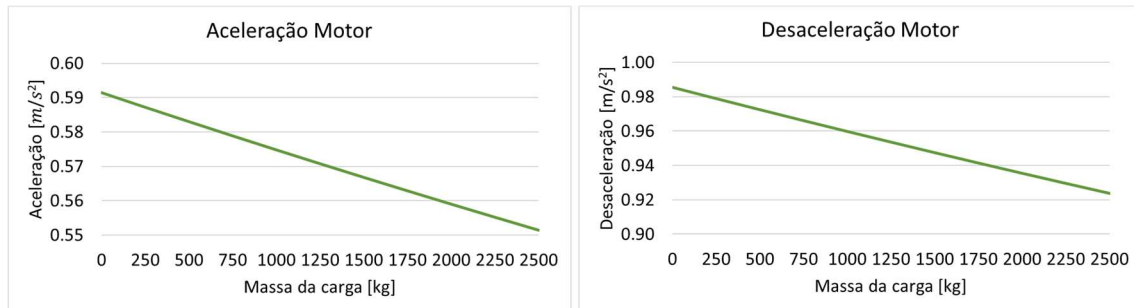


Figura 4.1. Evolução da aceleração limitada pelo motor com o aumento de carga.

4.1.4. Análise do tempo de ciclo limitado pelo motor.

Comparando o tempo de aceleração para o ciclo padrão com carga de 1250 [kg], quando aplicado ao modelo proposto e atual, observamos um tempo de aceleração mais desaceleração de 19.94 [s] para o modelo em estudo e de 20.99 [s] para o modelo atual. Uma diferença de 1.05 [s] o que representa 5 % do tempo do pior caso, o utilizado atualmente. Por este valor poder-se-á verificar que existe aqui uma possível otimização do tempo de ciclo.

O próximo passo será aferir qual o efeito desta diferença de aceleração no tempo total de viagem para uma viagem no percurso padrão de 42 [m].

De modo a fazer esta análise é necessário calcular a distância utilizada para o arranque (s_H) e paragem (s_B). Após a obtenção desses dados basta subtrair a soma desses valores à distância total para saber a distância percorrida à velocidade máxima (s_T). Tendo a distância e a velocidade é possível saber o tempo (t_T) em que o transelevador tem aceleração nula. Tendo esse tempo, o tempo de arranque e paragem é possível saber o tempo de uma ida (t_{ida}) ou de uma volta (t_{volta}) e, portanto, o tempo de ciclo (t_{ciclo}).

$$s = \frac{1}{2} \times a \times t^2 \quad [m], \quad (4.9)$$

$$s_T = s_{Total} - s_H - s_B \quad [m], \quad (4.10)$$

O tempo percorrido com velocidade máxima é obtido através da equação 4.8, o tempo de ida e volta é a soma do tempo de arranque com o tempo de viagem à velocidade

máxima e o tempo de paragem. O tempo de ciclo é a soma do tempo de ida com o tempo de retorno.

Os resultados recolhidos através dos cálculos efetuados apresentam-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Tempo e distância de aceleração e desaceleração no motor variando a carga no percurso médio.

Massa [kg]	t_H [s]	s_H [m]	t_B [s]	s_B [m]	s_T [m]	t_T [s]	t_{viagem} [s]
0	6.1	10.96	3.7	6.58	24.47	6.8	16.5
250	6.1	11.04	3.7	6.62	24.34	6.8	16.6
500	6.2	11.11	3.7	6.66	24.22	6.7	16.6
750	6.2	11.19	3.7	6.71	24.10	6.7	16.6
1000	6.3	11.27	3.8	6.75	23.97	6.7	16.7
1250	6.3	11.35	3.8	6.80	23.85	6.6	16.7
1500	6.4	11.43	3.8	6.84	23.73	6.6	16.7
1750	6.4	11.51	3.8	6.88	23.60	6.6	16.8
2000	6.4	11.59	3.8	6.93	23.48	6.5	16.8
2250	6.5	11.67	3.9	6.97	23.36	6.5	16.8
2500	6.5	11.75	3.9	7.02	23.23	6.5	16.9

A separação entre tempo de ida e tempo de volta deve-se a que o transelevador pode transportar cargas diferentes entre os dois movimentos e, portanto, os seus valores são diferentes. Por exemplo, o transelevador numa viagem para ir buscar uma carga viaja na ida (movimento para dentro do armazém) em vazio e, quando se desloca na volta (para fora do armazém), traz uma carga. Devido a isto, a sua aceleração e desaceleração são diferentes logo o tempo de ida será diferente do tempo de volta.

Aplicando o método de comparação evidenciado no capítulo 3, subcapítulo 3.3 “Método de comparação de modelos”, averiguar-se-á na Tabela 4.6. como a adoção dos diferentes modelos influencia os tempos de ciclo de teste.

Tabela 4.6. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.

	Modelo atual	Modelo dinâmico
Tempo de arranque ida [s]	6.528	6.087
Tempo de viagem a velocidade constante ida [s]	6.454	6.797
Tempo de paragem ida [s]	3.898	3.653
Tempo de arranque volta [s]	6.528	6.307
Tempo de viagem a velocidade constante volta [s]	6.454	6.625
Tempo de paragem volta [s]	3.898	3.776
Tempo total [s]	33.760	33.245

É possível observar que apesar de apenas depender da carga a transportar, já existe uma diferença de 0.515 [s] entre os dois modelos o que em termos percentuais significa uma redução de 1.525 % no tempo de ciclo. Espera-se que com a adição da variável altura a diferença entre os dois valores aumente devido à maior complexidade do problema.

4.2. Dados da estrutura em análise

A estrutura em análise é um transelevador de mastro único, bi-apoiado em duas rodas motrizes como já referido, com uma plataforma de elevação com garfos paletizadores que retiram e colocam as paletes no armazém. Para efeitos da realização deste estudo será analisado um transelevador com um mastro de 30 [m] de elevação e uma massa de 25303 [kg], uma base com 6.6 [m] de comprimento ($r = 6.6$ [m]) que percorre um carril com 84 [m], esta base tem uma massa de 6100 [kg]. A plataforma desta estrutura tem uma massa de 4350 [kg] e o seu centro de massa dista 3.2 [m] do centro do referencial utilizado (roda do lado direito do transelevador).

Tabela 4.7. Massas da estrutura do transelevador.

	Valor
Massa do mastro (m_M)	25303 [kg]
Massa da base (m_B)	6100 [kg]
Massa da plataforma (m_G)	4350 [kg]
Massa da carga (m_L)	0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 [kg]

A informação sobre a localização do centro de massa e do respectivo peso dos respectivos constituintes será apresentada na tabela abaixo, sendo os pesos calculados multiplicando as massas apresentadas na tabela 4.7. por $9.81 [m/s^2]$, valor utilizado para a aceleração da gravidade. Os sufixos apresentados abaixo nos pesos e na localização do centro de massa (B, M, G e L) dizem respeito à base, mastro, plataforma e carga, respetivamente.

Tabela 4.8. Valores das variáveis da aceleração calculadas

Variável	Peso [N]	Coordenada x [m]	Coordenada y [m]
Mastro	248222.43	3.20	13.3
Base	59841	3.30	0.3
Plataforma	42673.5		
Carga	0, 2452.5, 4905, 7357.5, 9810, 12262.5, 14715, 17167.5, 19620, 22072.5, 24525	3.40	1, 3.5, 6, 8.5, 11, 13.5, 16, 18.5, 21, 23.5, 26, 28.5, 31

4.2.1. Cálculo das reações estáticas nos apoios

Para o cálculo das reações estáticas nos apoios foi utilizado o diagrama de forças da Figura 4.2. que demonstra onde essas forças estão aplicadas e os momentos que daí resultam.

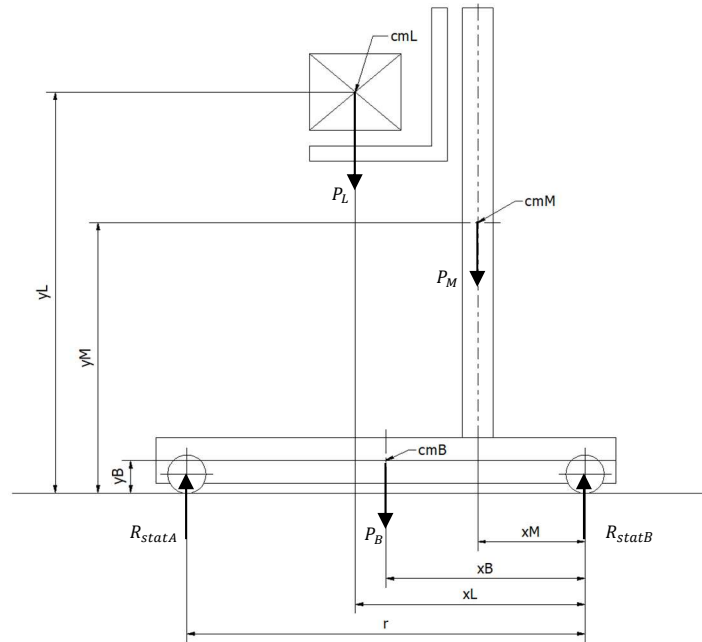


Figura 4.2. Diagrama de forças.

Atendendo ao diagrama de forças, será elaborado um sistema de equações de equilíbrio estático com vista a obter os valores das variáveis R_{statA} (Reação no apoio A) e R_{statB} (Reação no apoio B).

$$\begin{cases} \sum M_B = 0 \text{ [N.m]} \\ \sum V = 0 \text{ [N]} \end{cases}, \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} R_{statA} = (P_B \times x_B + P_M \times x_M + P_L \times x_L) \div r \\ R_{statB} = P_B + P_M + P_L - R_{statA} \end{cases} \text{ [N]}, \quad (4.12)$$

Na Tabela 4.9., infra apresentada, constam os valores das reações estáticas R_{statA} (Reação no apoio A) e R_{statB} (Reação no apoio B).

Tabela 4.9. Tabela de valores das reações estáticas.

Massa [kg]	R_{statA} [N]	R_{statB} [N]
0	172254.09	178482.84
250	173517.50	179671.93
500	174780.91	180861.02
750	176044.31	182050.12
1000	177307.72	183239.21
1250	178571.13	184428.30
1500	179834.54	185617.39
1750	181097.95	186806.48
2000	182361.36	187995.57
2250	183624.77	189184.66
2500	184888.18	190373.75

Como verificado, os valores das duas variáveis apesar de muito próximos, são diferentes. Isto irá causar uma diferença entre acelerações máximas consoante o sentido do movimento como será observado nos pontos seguintes.

4.3. Limitação através da estabilidade

4.3.1. Modelo de análise de estabilidade

Utilizando a norma FEM 9.311 [1] como base, de modo a construir um transelevador seguro é necessário garantir a sua estabilidade quando este se desloca. Uma estrutura instável tem por consequência grandes prejuízos uma vez que, chegando ao ponto de instabilidade a estrutura poderá, em caso extremo, tombar, levando à ruína de possivelmente toda a estrutura da máquina e a perda de todos os bens que estejam a ser movimentados e armazenados.

Presente na norma estão as guias de como analisar este coeficiente de segurança ao tombamento e de quais os valores aceitáveis para o mesmo.

Num momento inicial é necessário aferir quais as reações estáticas aplicadas nos pontos de apoio da estrutura. Esta estrutura, estando bi-apoiada em duas rodas assentes num carril será considerada uma estrutura rígida bi-apoiada em apoios móveis que restringem todas as direções de movimento exceto a deslocação segundo o eixo Ox .

Em seguida será calculada a aceleração máxima para cada cenário de carga e altura. Neste ponto será necessário ter em conta a diferença na direção do movimento, se no sentido positivo (esquerda para a direita) se no sentido negativo (direita para a esquerda) uma vez que o centro de massa da estrutura está desviado do centro geométrico, apesar de pouco, causando diferenças de carregamento nos apoios consoante o sentido. Isto resulta numa das rodas ser sempre mais solicitada que a outra para o mesmo movimento num determinado sentido.

4.3.2. Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração

De modo a analisar a estabilidade da estrutura, analisar-se-ão duas hipóteses consequentes do sentido da aceleração uma vez que o centro de massa global da estrutura não coincide com o centro de massa geométrico desta. Este pormenor é comprovado nos cálculos efetuados de seguida uma vez que as acelerações têm valores diferentes.

Foram então realizados dois esquemas de forças (Figura 4.3. e Figura 4.4.), tendo em conta a força aplicada nos centros de massa de cada constituinte, devido às forças dinâmicas de inércia, para cada sentido. Nestes esquemas foi feita uma análise dinâmica da estrutura, considerando o ponto de apoio B como origem do referencial. As forças R_{statA} e R_{statB} são as reações estáticas que equilibram os pesos próprios.

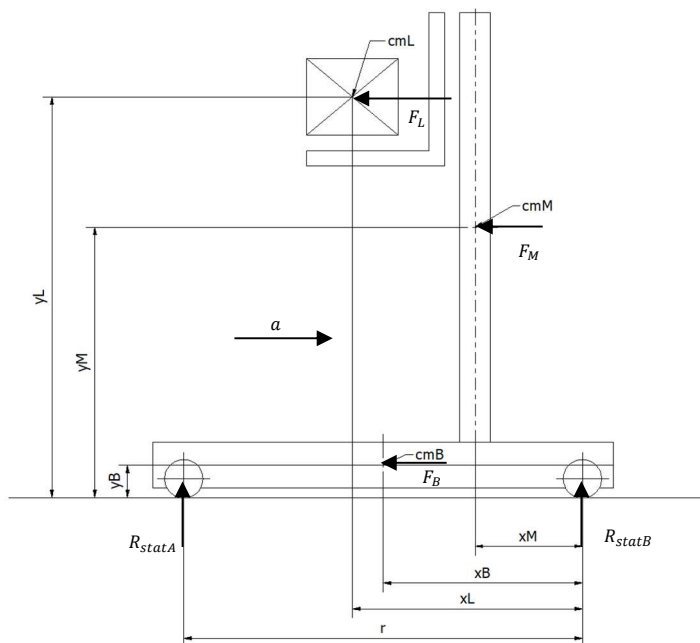


Figura 4.3. Esquema de forças num modelo dinâmico com sentido positivo da aceleração.

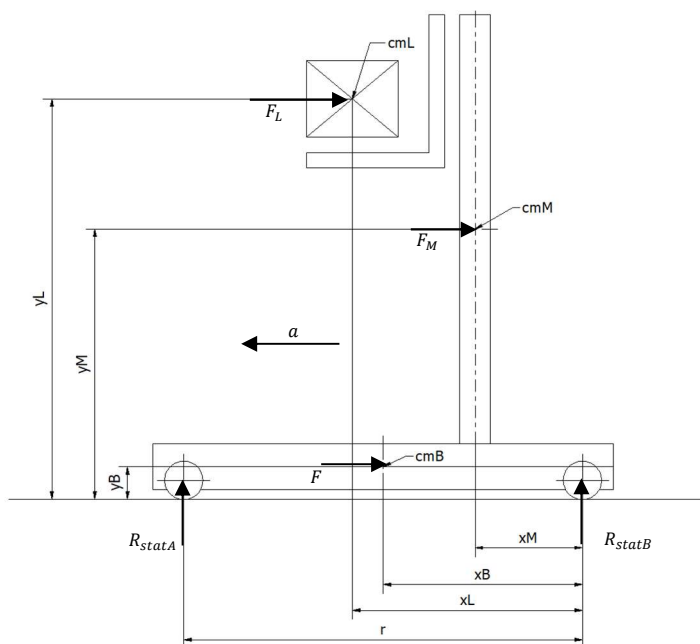


Figura 4.4. Esquema de forças num modelo dinâmico com sentido negativo da aceleração.

Dado estes dois esquemas foi realizado um equilíbrio de momentos em relação a cada apoio, dado que os momentos desestabilizadores (resultado das forças dinâmicas de inércia aplicadas nos centros de massa) têm de ser no mínimo uma vez e meia inferiores aos momentos estabilizadores (criados pelas reações estáticas). Este valor de uma vez e meia

está definido pela norma como valor de segurança para a estabilidade da estrutura ($\nu \geq 1.5$). Todas as acelerações provenientes deste cálculo serão assim consideradas finais e seguras.

De seguida serão apresentados os sistemas de equações com vista a obter o valor de aceleração máxima para a aceleração e desaceleração para os dois sentidos de movimento.

$$\begin{cases} \sum M_B = 0 \\ \sum M_A = 0 \end{cases} [N \cdot m], \quad (4.13)$$

Para o sentido positivo de movimento a estrutura quer rodar em torno do ponto B sendo por isso a aceleração máxima dada pela reação estática A.

$$\begin{cases} \left(\frac{R_{statA \times r}}{\nu} \right) \geq a(2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B) \\ \left(-\frac{R_{statB \times r}}{\nu} \right) \leq a(2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B) \end{cases}, \quad (4.14)$$

$$\begin{cases} a \leq \frac{R_{statA \times r}}{\nu \times (2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B)} \\ a \geq \frac{-R_{statB \times r}}{\nu \times (2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B)} \end{cases} [m/s^2], \quad (4.15)$$

Para o sentido negativo, o corpo tende a rodar sobre o ponto A, levando a que a máxima aceleração seja dependente da reação estática no ponto B.

$$\begin{cases} \left(-\frac{R_{statA \times r}}{\nu} \right) \geq a(2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B) \\ \left(\frac{R_{statB \times r}}{\nu} \right) \leq a(2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B) \end{cases}, \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} a \geq \frac{-R_{statA \times r}}{\nu \times (2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B)} \\ a \leq \frac{R_{statB \times r}}{\nu \times (2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B)} \end{cases} [m/s^2], \quad (4.17)$$

Devido à estabilidade depender unicamente da geometria e peso próprio da estrutura, esta é independente dos outros dois fatores (atrito e acionamento). Dado isto, a aceleração no sentido positivo será igual à desaceleração no sentido negativo e vice-versa. Tal cenário não se verifica para o fator de atrito uma vez que a força aplicada às rodas pelo acionamento na aceleração (quer seja em sentido positivo como negativo) é diferente da força aplicada às rodas nos dois sentidos da desaceleração levando a que o cálculo da aceleração resulte em valores diferentes para o mesmo sentido da desaceleração, como será demonstrado no capítulo respetivo ao fator de atrito.

Isto leva a que o cálculo da desaceleração seja exatamente igual ao de aceleração para o fator da estabilidade. Por exemplo, numa viagem no sentido positivo, a aceleração é determinada pela equação 4.15 e a desaceleração, por ser uma aceleração em sentido

negativo, é obtida através da equação 4.17. Para o movimento em sentido negativo, a aceleração e desaceleração são inversamente obtidas, a aceleração pela equação 4.17 e a desaceleração pela 4.15.

Aplicadas as equações anteriores é obtida a tabela 4.10. que contém os resultados de acelerações máximas consoante a carga a transportar e a altura destino.

Tabela 4.10. Variação da aceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pela estabilidade.

Sentido Positivo estabilidade [v]	aceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1.5	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	1.109	1.075	1.042	1.012	0.984	0.957	0.931	0.907	0.884	0.862	0.841	0.821	0.802
massa= 250 kg	1.116	1.080	1.046	1.014	0.984	0.955	0.929	0.903	0.879	0.857	0.835	0.815	0.795
massa= 500 kg	1.123	1.085	1.049	1.015	0.984	0.954	0.926	0.900	0.875	0.852	0.830	0.808	0.788
massa= 750 kg	1.131	1.090	1.052	1.017	0.984	0.953	0.924	0.897	0.871	0.847	0.824	0.802	0.782
massa= 1000 kg	1.138	1.095	1.056	1.019	0.984	0.952	0.922	0.894	0.867	0.842	0.819	0.796	0.775
massa= 1250 kg	1.145	1.100	1.059	1.020	0.984	0.951	0.920	0.891	0.863	0.838	0.813	0.790	0.769
massa= 1500 kg	1.152	1.105	1.062	1.022	0.985	0.950	0.918	0.888	0.860	0.833	0.808	0.785	0.763
massa= 1750 kg	1.160	1.110	1.065	1.023	0.985	0.949	0.916	0.885	0.856	0.829	0.803	0.779	0.757
massa= 2000 kg	1.167	1.115	1.068	1.025	0.985	0.948	0.914	0.882	0.852	0.824	0.798	0.774	0.751
massa= 2250 kg	1.174	1.120	1.071	1.027	0.985	0.947	0.912	0.879	0.849	0.820	0.794	0.769	0.745
massa= 2500 kg	1.181	1.125	1.075	1.028	0.985	0.946	0.910	0.876	0.845	0.816	0.789	0.764	0.740

Sentido Negativo estabilidade [v]	aceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1.5	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	1.149	1.113	1.080	1.049	1.019	0.991	0.965	0.940	0.916	0.893	0.872	0.851	0.831
massa= 250 kg	1.156	1.118	1.083	1.050	1.019	0.989	0.962	0.935	0.911	0.887	0.865	0.844	0.823
massa= 500 kg	1.162	1.123	1.086	1.051	1.018	0.988	0.959	0.931	0.906	0.881	0.858	0.836	0.816
massa= 750 kg	1.169	1.127	1.088	1.052	1.018	0.986	0.956	0.928	0.901	0.876	0.852	0.830	0.808
massa= 1000 kg	1.176	1.132	1.091	1.053	1.017	0.984	0.953	0.924	0.896	0.870	0.846	0.823	0.801
massa= 1250 kg	1.183	1.136	1.094	1.054	1.017	0.982	0.950	0.920	0.892	0.865	0.840	0.816	0.794
massa= 1500 kg	1.190	1.141	1.096	1.055	1.016	0.981	0.947	0.916	0.887	0.860	0.834	0.810	0.787
massa= 1750 kg	1.196	1.145	1.099	1.056	1.016	0.979	0.945	0.913	0.883	0.855	0.829	0.804	0.781
massa= 2000 kg	1.203	1.150	1.101	1.057	1.015	0.977	0.942	0.909	0.878	0.850	0.823	0.798	0.774
massa= 2250 kg	1.210	1.154	1.104	1.058	1.015	0.976	0.939	0.906	0.874	0.845	0.818	0.792	0.768
massa= 2500 kg	1.216	1.159	1.106	1.059	1.015	0.974	0.937	0.902	0.870	0.840	0.812	0.786	0.762

Nas tabelas supra apresentadas observar-se-á que os valores de aceleração entre os dois sentidos são realmente diferentes, tal como sugerido no texto acima.

É observável que o máximo de estabilidade é obtido para a carga máxima à altura mínima de transporte (valor a verde) e que o valor mínimo de estabilidade será obtido para a carga máxima e altura máxima (valor a vermelho).

Evidenciado a laranja estão os valores máximos de aceleração para cada altura analisada. É de notar que a partir dos 8.5 metros para o sentido negativo e dos 11 metros para o sentido positivo acontece uma inversão de panorama em que a estabilidade máxima para determinada altura deixa de ser com a carga máxima e passa a ser obtida para a carga mínima. Esta inversão deve-se aos efeitos causados pela carga quando esta ultrapassa o centro de massa da estrutura levando a que um aumento da carga deixe de causar um momento estabilizador da estrutura passando a causar um momento desestabilizador.

Analisando as tabelas obtidas é evidenciado que a diferença entre a aceleração máxima e mínima é de $0.442 [m/s^2]$ no sentido positivo e $0.455 [m/s^2]$ no negativo, o que corresponde a 37% do valor máximo nos dois casos.

Para facilitar a análise da tabela de acelerações foi efetuado o mesmo cálculo utilizado na secção do acionamento, secção 4.1.2, utilizando a equação 4.8 com o objetivo de obter o tempo de aceleração para os diferentes valores presentes na tabela 4.10.

Tabela 4.11. Tempo de aceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pela estabilidade.

Sentido Positivo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	3.25	3.35	3.45	3.56	3.66	3.76	3.87	3.97	4.07	4.18	4.28	4.38	4.49
massa= 250 kg	3.23	3.33	3.44	3.55	3.66	3.77	3.88	3.98	4.09	4.20	4.31	4.42	4.53
massa= 500 kg	3.20	3.32	3.43	3.55	3.66	3.77	3.89	4.00	4.11	4.23	4.34	4.45	4.57
massa= 750 kg	3.18	3.30	3.42	3.54	3.66	3.78	3.90	4.01	4.13	4.25	4.37	4.49	4.61
massa= 1000 kg	3.16	3.29	3.41	3.53	3.66	3.78	3.90	4.03	4.15	4.27	4.40	4.52	4.64
massa= 1250 kg	3.14	3.27	3.40	3.53	3.66	3.79	3.91	4.04	4.17	4.30	4.43	4.55	4.68
massa= 1500 kg	3.12	3.26	3.39	3.52	3.66	3.79	3.92	4.06	4.19	4.32	4.45	4.59	4.72
massa= 1750 kg	3.10	3.24	3.38	3.52	3.66	3.79	3.93	4.07	4.21	4.34	4.48	4.62	4.76
massa= 2000 kg	3.08	3.23	3.37	3.51	3.65	3.80	3.94	4.08	4.22	4.37	4.51	4.65	4.79
massa= 2250 kg	3.07	3.21	3.36	3.51	3.65	3.80	3.95	4.10	4.24	4.39	4.54	4.68	4.83
massa= 2500 kg	3.05	3.20	3.35	3.50	3.65	3.81	3.96	4.11	4.26	4.41	4.56	4.71	4.87

Sentido Negativo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	3.13	3.23	3.33	3.43	3.53	3.63	3.73	3.83	3.93	4.03	4.13	4.23	4.33
massa= 250 kg	3.12	3.22	3.32	3.43	3.53	3.64	3.74	3.85	3.95	4.06	4.16	4.27	4.37
massa= 500 kg	3.10	3.21	3.32	3.43	3.54	3.65	3.76	3.86	3.97	4.08	4.19	4.30	4.41
massa= 750 kg	3.08	3.19	3.31	3.42	3.54	3.65	3.77	3.88	4.00	4.11	4.23	4.34	4.45
massa= 1000 kg	3.06	3.18	3.30	3.42	3.54	3.66	3.78	3.90	4.02	4.14	4.26	4.38	4.49
massa= 1250 kg	3.04	3.17	3.29	3.42	3.54	3.66	3.79	3.91	4.04	4.16	4.29	4.41	4.53
massa= 1500 kg	3.03	3.16	3.28	3.41	3.54	3.67	3.80	3.93	4.06	4.19	4.32	4.44	4.57
massa= 1750 kg	3.01	3.14	3.28	3.41	3.54	3.68	3.81	3.94	4.08	4.21	4.35	4.48	4.61
massa= 2000 kg	2.99	3.13	3.27	3.41	3.55	3.68	3.82	3.96	4.10	4.24	4.37	4.51	4.65
massa= 2250 kg	2.98	3.12	3.26	3.40	3.55	3.69	3.83	3.97	4.12	4.26	4.40	4.55	4.69
massa= 2500 kg	2.96	3.11	3.25	3.40	3.55	3.70	3.84	3.99	4.14	4.28	4.43	4.58	4.73

Na tabela 4.11. mais uma vez é observada uma grande diferença entre o tempo de aceleração máximo e mínimo ($1.82 [s]$ para o sentido positivo e $1.77 [s]$ para o negativo) representando 60 % do tempo mínimo.

4.3.3. Conclusão sobre as limitações da estabilidade

É de relembrar que o objetivo deste estudo é a de otimizar a aceleração de modo a que o equipamento se desloque o máximo de tempo à velocidade máxima uma vez que isso resultará num tempo de ciclo inferior. Com este propósito o desejado é utilizar o menor tempo possível para a aceleração e desaceleração. Ora com os dados acima é possível observar que existem diferenças claras entre utilizar o pior caso e um caso otimizado, fruto desta limitação ser afetada através da variação da massa da carga e da altura a que a mesma

está a ser transportada. Tal como tinha sido sugerido no capítulo relativo ao motor, com o aumento da complexidade dos fatores em análise, maior é a possibilidade de otimização.

Serão então representados em gráficos (Figura 4.5. e Figura 4.6.) os dados obtidos, de modo a melhor observar a variação dos dados bem como as linhas criadas consoante a restrição aplicada (massa ou altura e sentido).

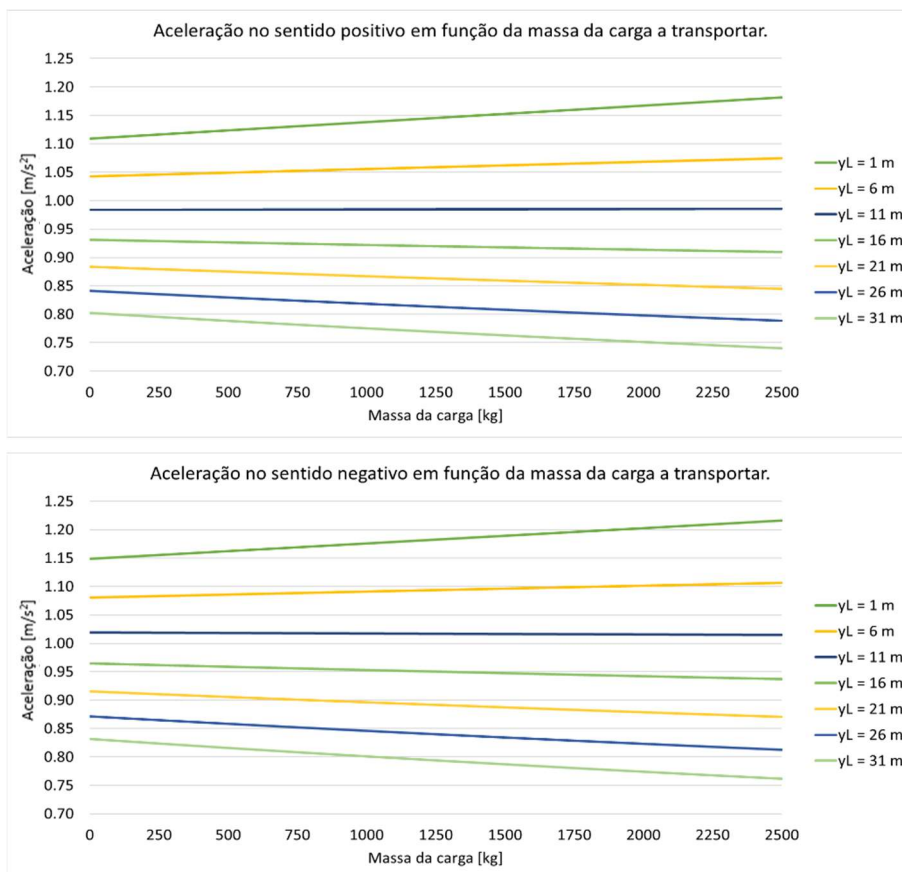


Figura 4.5. Evolução da aceleração limitada pela estabilidade com o aumento de carga nos dois sentidos.

Como pode ser observado, representando a variação da aceleração em função da massa obtemos retas consoante a altura considerada e, representando a aceleração em função da altura, obtemos curvas consoante a massa utilizada (Figura 4.6.).

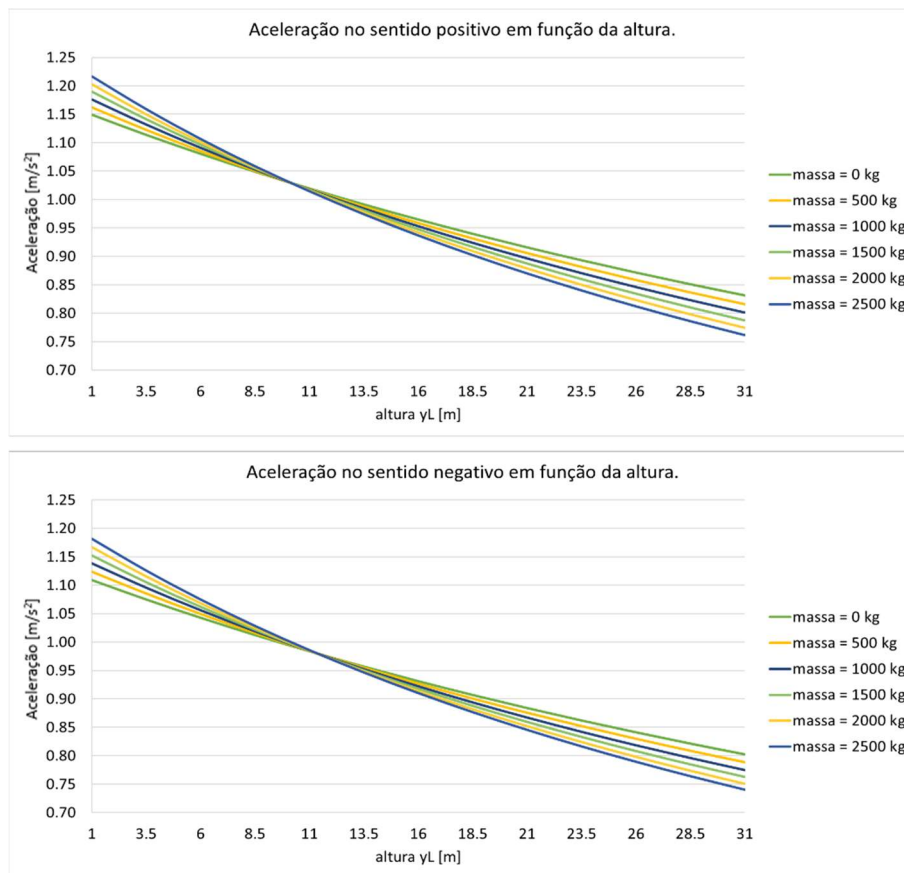


Figura 4.6. Evolução da aceleração limitada pela estabilidade com o aumento da altura nos dois sentidos.

Esta dependência resulta em, quanto maior a carga transportada, até aos 11 [m] no sentido positivo e 8.5 [m] no sentido negativo, maior é a aceleração que o transelevador é capaz. A partir desse ponto, quando menor a carga a transportar, maior a aceleração possível.

Como já referido antes, no caso da estabilidade, como não são consideradas as forças aplicadas na roda quer na aceleração quer na travagem, as conclusões obtidas para a aceleração são inversamente aplicadas à desaceleração (até aos 8.5 [m] no sentido positivo temos a maior desaceleração para a maior carga e a partir dos 11 [m] no sentido negativo temos a maior desaceleração para a menor carga).

4.3.4. Análise do tempo de ciclo limitado pela estabilidade.

Para uma melhor análise e como efetuado na secção 4.1.4 para o motor, calcular-se-á o tempo de ciclo quando este é unicamente limitado pela estabilidade, utilizando as fórmulas 4.9 e 4.10 e a tabela 4.12., de modo a obter a distância de aceleração e desaceleração

com vista a obter a distância percorrida com aceleração nula e velocidade máxima. Após obtenção da aceleração será calculada a distância percorrida neste regime.

Tabela 4.12. Distância percorrida na aceleração, limitado pela estabilidade.

Sentido Positivo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	5.845	6.030	6.216	6.402	6.588	6.774	6.960	7.146	7.332	7.518	7.704	7.890	8.076
massa= 250 kg	5.806	6.001	6.197	6.392	6.587	6.782	6.977	7.173	7.368	7.563	7.758	7.954	8.149
massa= 500 kg	5.768	5.973	6.177	6.381	6.586	6.790	6.994	7.199	7.403	7.607	7.812	8.016	8.220
massa= 750 kg	5.731	5.945	6.158	6.371	6.585	6.798	7.011	7.225	7.438	7.651	7.864	8.078	8.291
massa= 1000 kg	5.695	5.917	6.139	6.361	6.583	6.805	7.028	7.250	7.472	7.694	7.916	8.139	8.361
massa= 1250 kg	5.658	5.889	6.120	6.351	6.582	6.813	7.044	7.275	7.506	7.737	7.968	8.199	8.429
massa= 1500 kg	5.623	5.862	6.102	6.341	6.581	6.820	7.060	7.300	7.539	7.779	8.018	8.258	8.497
massa= 1750 kg	5.588	5.836	6.084	6.332	6.580	6.828	7.076	7.324	7.572	7.820	8.068	8.316	8.564
massa= 2000 kg	5.553	5.809	6.066	6.322	6.579	6.835	7.091	7.348	7.604	7.861	8.117	8.373	8.630
massa= 2250 kg	5.519	5.783	6.048	6.313	6.577	6.842	7.107	7.371	7.636	7.901	8.165	8.430	8.695
massa= 2500 kg	5.485	5.758	6.031	6.303	6.576	6.849	7.122	7.395	7.668	7.940	8.213	8.486	8.759

Sentido Negativo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	5.641	5.820	5.999	6.179	6.358	6.538	6.717	6.897	7.076	7.256	7.435	7.615	7.794
massa= 250 kg	5.607	5.796	5.984	6.173	6.361	6.550	6.738	6.927	7.116	7.304	7.493	7.681	7.870
massa= 500 kg	5.575	5.772	5.969	6.167	6.364	6.562	6.759	6.957	7.154	7.352	7.549	7.747	7.944
massa= 750 kg	5.542	5.748	5.955	6.161	6.367	6.574	6.780	6.986	7.192	7.399	7.605	7.811	8.018
massa= 1000 kg	5.510	5.725	5.940	6.155	6.370	6.585	6.800	7.015	7.230	7.445	7.660	7.875	8.090
massa= 1250 kg	5.479	5.702	5.926	6.149	6.373	6.597	6.820	7.044	7.267	7.491	7.715	7.938	8.162
massa= 1500 kg	5.448	5.680	5.912	6.144	6.376	6.608	6.840	7.072	7.304	7.536	7.768	8.000	8.232
massa= 1750 kg	5.417	5.657	5.898	6.138	6.379	6.619	6.860	7.100	7.340	7.581	7.821	8.062	8.302
massa= 2000 kg	5.386	5.635	5.884	6.133	6.381	6.630	6.879	7.128	7.376	7.625	7.874	8.122	8.371
massa= 2250 kg	5.357	5.613	5.870	6.127	6.384	6.641	6.898	7.155	7.412	7.669	7.925	8.182	8.439
massa= 2500 kg	5.327	5.592	5.857	6.122	6.387	6.652	6.917	7.182	7.447	7.712	7.977	8.241	8.506

Obtida a distância da aceleração, será apresentada a tabela 4.13. de tempos de viagem.

Tabela 4.13. Tempo decorrido com aceleração nula, limitado pela estabilidade.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]	altura de chegada da carga													
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	8.42	8.37	8.32	8.28	8.23	8.18	8.13	8.08	8.03	7.98	7.93	7.88	7.83	
massa= 250 kg	8.44	8.39	8.34	8.28	8.23	8.18	8.13	8.08	8.02	7.97	7.92	7.87	7.81	
massa= 500 kg	8.46	8.40	8.35	8.29	8.24	8.18	8.13	8.08	8.02	7.97	7.91	7.86	7.80	
massa= 750 kg	8.48	8.42	8.36	8.30	8.25	8.19	8.13	8.07	8.02	7.96	7.90	7.85	7.79	
massa= 1000 kg	8.49	8.43	8.37	8.31	8.25	8.19	8.13	8.07	8.01	7.96	7.90	7.84	7.78	
massa= 1250 kg	8.51	8.45	8.38	8.32	8.26	8.20	8.14	8.07	8.01	7.95	7.89	7.83	7.76	
massa= 1500 kg	8.53	8.46	8.40	8.33	8.27	8.20	8.14	8.07	8.01	7.94	7.88	7.82	7.75	
massa= 1750 kg	8.54	8.47	8.41	8.34	8.27	8.21	8.14	8.07	8.01	7.94	7.87	7.81	7.74	
massa= 2000 kg	8.56	8.49	8.42	8.35	8.28	8.21	8.14	8.07	8.00	7.93	7.87	7.80	7.73	
massa= 2250 kg	8.57	8.50	8.43	8.36	8.29	8.22	8.14	8.07	8.00	7.93	7.86	7.79	7.72	
massa= 2500 kg	8.59	8.51	8.44	8.37	8.29	8.22	8.15	8.07	8.00	7.93	7.85	7.78	7.70	

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]	altura de partida da carga													
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	8.42	8.37	8.32	8.28	8.23	8.18	8.13	8.08	8.03	7.98	7.93	7.88	7.83	
massa= 250 kg	8.44	8.39	8.34	8.28	8.23	8.18	8.13	8.08	8.02	7.97	7.92	7.87	7.81	
massa= 500 kg	8.46	8.40	8.35	8.29	8.24	8.18	8.13	8.08	8.02	7.97	7.91	7.86	7.80	
massa= 750 kg	8.48	8.42	8.36	8.30	8.25	8.19	8.13	8.07	8.02	7.96	7.90	7.85	7.79	
massa= 1000 kg	8.49	8.43	8.37	8.31	8.25	8.19	8.13	8.07	8.01	7.96	7.90	7.84	7.78	
massa= 1250 kg	8.51	8.45	8.38	8.32	8.26	8.20	8.14	8.07	8.01	7.95	7.89	7.83	7.76	
massa= 1500 kg	8.53	8.46	8.40	8.33	8.27	8.20	8.14	8.07	8.01	7.94	7.88	7.82	7.75	
massa= 1750 kg	8.54	8.47	8.41	8.34	8.27	8.21	8.14	8.07	8.01	7.94	7.87	7.81	7.74	
massa= 2000 kg	8.56	8.49	8.42	8.35	8.28	8.21	8.14	8.07	8.00	7.93	7.87	7.80	7.73	
massa= 2250 kg	8.57	8.50	8.43	8.36	8.29	8.22	8.14	8.07	8.00	7.93	7.86	7.79	7.72	
massa= 2500 kg	8.59	8.51	8.44	8.37	8.29	8.22	8.15	8.07	8.00	7.93	7.85	7.78	7.70	

O tempo de ciclo será obtido através da soma do tempo de aceleração, velocidade constante e desaceleração. De notar que foi tido em conta que um armazém automatizado tem um ou dois pontos de entrega e/ou carregamento de mercadoria. Neste caso foi considerado que o ponto de carga e descarga estavam situados no mesmo sítio, numa ponta do carril a uma altura de 3.5 [m] de altura.

Tabela 4.14. Tempo de viagem limitado pela estabilidade, variando a altura e carga.

		Tempo total de viagem [s]												
Sentido Positivo		altura de chegada da carga												
partida y_i =	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	14.91	14.96	15.01	15.06	15.11	15.16	15.21	15.26	15.31	15.36	15.41	15.46	15.51	15.51
massa= 250 kg	14.89	14.94	15.00	15.05	15.10	15.15	15.21	15.26	15.31	15.36	15.41	15.47	15.52	15.52
massa= 500 kg	14.87	14.93	14.98	15.04	15.09	15.15	15.20	15.26	15.31	15.37	15.42	15.48	15.53	15.53
massa= 750 kg	14.86	14.91	14.97	15.03	15.09	15.14	15.20	15.26	15.32	15.37	15.43	15.49	15.55	15.55
massa= 1000 kg	14.84	14.90	14.96	15.02	15.08	15.14	15.20	15.26	15.32	15.38	15.44	15.50	15.56	15.56
massa= 1250 kg	14.82	14.89	14.95	15.01	15.07	15.13	15.20	15.26	15.32	15.38	15.45	15.51	15.57	15.57
massa= 1500 kg	14.81	14.87	14.94	15.00	15.07	15.13	15.20	15.26	15.32	15.39	15.45	15.52	15.58	15.58
massa= 1750 kg	14.79	14.86	14.93	14.99	15.06	15.13	15.19	15.26	15.33	15.39	15.46	15.53	15.59	15.59
massa= 2000 kg	14.78	14.85	14.91	14.98	15.05	15.12	15.19	15.26	15.33	15.40	15.47	15.54	15.61	15.61
massa= 2250 kg	14.76	14.83	14.90	14.98	15.05	15.12	15.19	15.26	15.33	15.40	15.47	15.55	15.62	15.62
massa= 2500 kg	14.75	14.82	14.89	14.97	15.04	15.11	15.19	15.26	15.33	15.41	15.48	15.56	15.63	15.63

		Tempo total de viagem [s]												
Sentido Negativo		altura de partida da carga												
chegada y_i =	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	14.91	14.96	15.01	15.06	15.11	15.16	15.21	15.26	15.31	15.36	15.41	15.46	15.51	15.51
massa= 250 kg	14.89	14.94	15.00	15.05	15.10	15.15	15.21	15.26	15.31	15.36	15.41	15.47	15.52	15.52
massa= 500 kg	14.87	14.93	14.98	15.04	15.09	15.15	15.20	15.26	15.31	15.37	15.42	15.48	15.53	15.53
massa= 750 kg	14.86	14.91	14.97	15.03	15.09	15.14	15.20	15.26	15.32	15.37	15.43	15.49	15.55	15.55
massa= 1000 kg	14.84	14.90	14.96	15.02	15.08	15.14	15.20	15.26	15.32	15.38	15.44	15.50	15.56	15.56
massa= 1250 kg	14.82	14.89	14.95	15.01	15.07	15.13	15.20	15.26	15.32	15.38	15.45	15.51	15.57	15.57
massa= 1500 kg	14.81	14.87	14.94	15.00	15.07	15.13	15.20	15.26	15.32	15.39	15.45	15.52	15.58	15.58
massa= 1750 kg	14.79	14.86	14.93	14.99	15.06	15.13	15.19	15.26	15.33	15.39	15.46	15.53	15.59	15.59
massa= 2000 kg	14.78	14.85	14.91	14.98	15.05	15.12	15.19	15.26	15.33	15.40	15.47	15.54	15.61	15.61
massa= 2250 kg	14.76	14.83	14.90	14.98	15.05	15.12	15.19	15.26	15.33	15.40	15.47	15.55	15.62	15.62
massa= 2500 kg	14.75	14.82	14.89	14.97	15.04	15.11	15.19	15.26	15.33	15.41	15.48	15.56	15.63	15.63

Da tabela acima é possível observar uma diferença entre o pior tempo de viagem e o melhor de 0.88 [s] o que representa cerca de 6 % do melhor tempo. De referir que isto são tempos de viagem com o ponto de partida no sentido positivo e chegada no sentido negativo a uma altura fixa de 3.5 [m]. O pior tempo de viagem, o que é utilizado pela empresa Consoveyo, é um tempo ainda maior dado utilizarem sempre a aceleração para a maior massa e maior altura. Utiliza, portanto, a aceleração e desaceleração de 0.740 [m/s^2] que resulta num tempo de viagem de 16.53 [s].

Aplicando o método de comparação evidenciado no capítulo 3, subcapítulo 3.3 “Método de comparação de modelos”, é possível verificar como a adoção dos diferentes modelos influencia os tempos de ciclo de teste (Tabela 4.15.).

Tabela 4.15. Variação do tempo de ciclo padrão com o modelo adotado.

	Modelo atual	Modelo dinâmico
Tempo de arranque ida [s]	4.866	3.350
Tempo de viagem a velocidade constante ida [s]	6.801	8.126
Tempo de paragem ida [s]	4.866	3.732
Tempo de arranque volta [s]	4.866	3.272
Tempo de viagem a velocidade constante volta [s]	6.801	8.136
Tempo de paragem volta [s]	4.866	3.789
Tempo total [s]	33.066	30.405

Da tabela supra apresentada é possível retirar que o aumento de complexidade fez aumentar a diferença entre o modelo atual e o proposto. Esta diferença para a estabilidade é de 2.661 [s] entre os dois modelos o que em termos percentuais significa 8.75 % do melhor tempo de ciclo. Comparando com o valor obtido na análise do acionamento, começamos a notar que a limitação a toda a estrutura, atualmente, será no motor. Por último, analisar-se-á o atrito a fim de verificar se esta tendência é mantida.

4.4. Limitação devido ao escorregamento

4.4.1. Modelo de análise de atrito

Tal como a análise feita para a estabilidade, também o atrito é regido pela norma FEM 9.311 [1]. O que é enunciado nela é que a força aplicada nas rodas pelo motor não pode exceder o valor da reação, na mesma roda, multiplicada pelo coeficiente de atrito (μ) dos materiais envolvidos (aço-aço neste caso, portanto, $\mu=0.2$ obtido através da norma [1] e do manual técnico da Stahl [2]).

Aplicando este princípio será atingida a situação em que, para dado binário aplicado pelo motor nas rodas, obtemos uma determinada aceleração máxima que nos garante que abaixo da mesma não acontece uma situação de escorregamento.

O perigo do escorregamento deve-se a que se este existir, acontecerá um desgaste prematuro da superfície menos resistente, seja esta o carril ou a roda. Este desgaste prematuro leva a uma perda de rendimento do transelevador e no limite há falha do componente de uma maneira não prevista. Acontecendo isto a empresa terá de pelo menos parar este corredor do armazém automático, passando a ter uma produção inferior a 100% com todos os custos associados a este cenário.

Para analisar este fator limitante será então estudado o diagrama de forças dinâmicas para os dois sentidos da aceleração bem como o cálculo da aceleração e desaceleração máxima para cada patamar de altura e carga.

4.4.2. Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração

De modo a calcular os limites de aceleração é necessário recuperar o valor da força motriz aplicada pelo motor na aceleração e na travagem. Estes variáveis foram calculadas na secção 4.1.2 através das fórmulas 4.2 e 4.7 e têm o valor de $F_{mH} = 11152 [N]$ e $F_{mB} = 17425 [N]$.

O cálculo necessário para a obtenção da aceleração parte da fórmula apresentada de seguida.

$$M_{Rstat} - \sum M_{inércia} \leq \frac{F_m}{\mu} \times r [N \cdot m], \quad (4.18)$$

Simplificando e rearranjando em ordem à aceleração e desaceleração.

$$\begin{cases} a \geq \frac{\left(\frac{F_{mH}}{\mu} - R_{statB}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \\ a \leq \frac{\left(R_{statA} - \frac{F_{mH}}{\mu}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \end{cases} [m/s^2], \quad (4.19)$$

$$\begin{cases} a \geq \frac{\left(\frac{F_{mB}}{\mu} - R_{statA}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \\ a \leq \frac{\left(R_{statB} - \frac{F_{mB}}{\mu}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \end{cases} [m/s^2], \quad (4.20)$$

$$\begin{cases} a \geq \frac{\left(\frac{F_{mH}}{\mu} - R_{statA}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \\ a \leq \frac{\left(R_{statB} - \frac{F_{mH}}{\mu}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \end{cases} [m/s^2], \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} a \geq \frac{\left(\frac{F_{mB}}{\mu} - R_{statB}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \\ a \leq \frac{\left(R_{statA} - \frac{F_{mB}}{\mu}\right) \times r}{2((m_L + m_G) \times y_L + m_M \times y_M) + m_B \times y_B} \end{cases} [m/s^2], \quad (4.22)$$

As equações 4.19 e 4.21 dizem respeito às acelerações no sentido positivo e negativo respetivamente e as equações 4.20 e 4.22 dizem respeito às desacelerações também nos dois sentidos respetivamente. Aplicando estas equações obtemos então a Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Variação da aceleração e desaceleração limitada pelo atrito, variando a altura e carga.

Sentido Positivo		aceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	1.125	1.090	1.057	1.027	0.998	0.970	0.944	0.920	0.897	0.874	0.853	0.833	0.814	
massa= 250 kg	1.136	1.099	1.065	1.032	1.001	0.973	0.945	0.920	0.895	0.872	0.850	0.829	0.810	
massa= 500 kg	1.147	1.108	1.072	1.037	1.005	0.975	0.946	0.919	0.894	0.870	0.847	0.826	0.805	
massa= 750 kg	1.159	1.117	1.079	1.042	1.009	0.977	0.947	0.919	0.893	0.868	0.844	0.822	0.801	
massa= 1000 kg	1.170	1.126	1.085	1.047	1.012	0.979	0.948	0.919	0.892	0.866	0.842	0.819	0.797	
massa= 1250 kg	1.181	1.135	1.092	1.053	1.016	0.981	0.949	0.919	0.891	0.864	0.839	0.815	0.793	
massa= 1500 kg	1.193	1.144	1.099	1.058	1.019	0.983	0.950	0.919	0.890	0.862	0.836	0.812	0.789	
massa= 1750 kg	1.204	1.153	1.106	1.062	1.022	0.985	0.951	0.919	0.888	0.860	0.834	0.809	0.786	
massa= 2000 kg	1.215	1.162	1.112	1.067	1.026	0.987	0.952	0.918	0.887	0.858	0.831	0.806	0.782	
massa= 2250 kg	1.226	1.170	1.119	1.072	1.029	0.989	0.952	0.918	0.886	0.857	0.829	0.803	0.778	
massa= 2500 kg	1.238	1.179	1.126	1.077	1.032	0.991	0.953	0.918	0.885	0.855	0.827	0.800	0.775	

Sentido Negativo		aceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	1.185	1.148	1.114	1.082	1.051	1.022	0.995	0.969	0.944	0.921	0.899	0.878	0.857	
massa= 250 kg	1.195	1.157	1.120	1.086	1.054	1.023	0.995	0.968	0.942	0.918	0.895	0.873	0.852	
massa= 500 kg	1.206	1.165	1.126	1.090	1.056	1.025	0.995	0.966	0.940	0.915	0.891	0.868	0.846	
massa= 750 kg	1.217	1.173	1.132	1.094	1.059	1.026	0.995	0.965	0.937	0.911	0.887	0.863	0.841	
massa= 1000 kg	1.227	1.181	1.138	1.099	1.062	1.027	0.994	0.964	0.935	0.908	0.883	0.859	0.836	
massa= 1250 kg	1.238	1.189	1.144	1.103	1.064	1.028	0.994	0.963	0.933	0.905	0.879	0.854	0.831	
massa= 1500 kg	1.248	1.197	1.150	1.107	1.067	1.029	0.994	0.962	0.931	0.902	0.875	0.850	0.826	
massa= 1750 kg	1.259	1.205	1.156	1.111	1.069	1.030	0.994	0.960	0.929	0.899	0.872	0.846	0.821	
massa= 2000 kg	1.269	1.213	1.162	1.115	1.071	1.031	0.994	0.959	0.927	0.897	0.868	0.842	0.817	
massa= 2250 kg	1.280	1.221	1.168	1.119	1.074	1.032	0.994	0.958	0.925	0.894	0.865	0.838	0.812	
massa= 2500 kg	1.290	1.229	1.174	1.123	1.076	1.033	0.994	0.957	0.923	0.891	0.862	0.834	0.808	

Sentido Positivo		desaceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.882	0.855	0.829	0.805	0.782	0.761	0.741	0.721	0.703	0.686	0.669	0.653	0.638	
massa= 250 kg	0.893	0.864	0.837	0.811	0.787	0.764	0.743	0.723	0.704	0.685	0.668	0.652	0.636	
massa= 500 kg	0.904	0.873	0.844	0.817	0.792	0.768	0.745	0.724	0.704	0.685	0.667	0.650	0.634	
massa= 750 kg	0.914	0.882	0.851	0.823	0.796	0.771	0.748	0.725	0.705	0.685	0.666	0.649	0.632	
massa= 1000 kg	0.925	0.891	0.858	0.828	0.800	0.774	0.750	0.727	0.705	0.685	0.666	0.647	0.630	
massa= 1250 kg	0.936	0.899	0.865	0.834	0.805	0.777	0.752	0.728	0.706	0.685	0.665	0.646	0.628	
massa= 1500 kg	0.947	0.908	0.872	0.839	0.809	0.781	0.754	0.729	0.706	0.684	0.664	0.645	0.626	
massa= 1750 kg	0.958	0.917	0.879	0.845	0.813	0.784	0.756	0.731	0.707	0.684	0.663	0.643	0.625	
massa= 2000 kg	0.968	0.925	0.886	0.850	0.817	0.787	0.758	0.732	0.707	0.684	0.662	0.642	0.623	
massa= 2250 kg	0.979	0.934	0.893	0.856	0.821	0.790	0.760	0.733	0.707	0.684	0.662	0.641	0.621	
massa= 2500 kg	0.990	0.943	0.900	0.861	0.825	0.793	0.762	0.734	0.708	0.684	0.661	0.640	0.620	

Sentido Negativo		desaceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.822	0.797	0.773	0.750	0.729	0.709	0.690	0.672	0.655	0.639	0.624	0.609	0.595	
massa= 250 kg	0.834	0.806	0.781	0.757	0.735	0.714	0.694	0.675	0.657	0.640	0.624	0.608	0.594	
massa= 500 kg	0.845	0.816	0.789	0.764	0.740	0.718	0.697	0.677	0.658	0.641	0.624	0.608	0.593	
massa= 750 kg	0.857	0.826	0.797	0.771	0.746	0.722	0.700	0.680	0.660	0.642	0.624	0.608	0.592	
massa= 1000 kg	0.868	0.836	0.805	0.777	0.751	0.726	0.703	0.682	0.662	0.643	0.625	0.607	0.591	
massa= 1250 kg	0.880	0.845	0.813	0.784	0.756	0.731	0.707	0.684	0.663	0.643	0.625	0.607	0.591	
massa= 1500 kg	0.891	0.855	0.821	0.790	0.761	0.735	0.710	0.686	0.665	0.644	0.625	0.607	0.590	
massa= 1750 kg	0.903	0.864	0.829	0.797	0.767	0.739	0.713	0.689	0.666	0.645	0.625	0.607	0.589	
massa= 2000 kg	0.914	0.874	0.837	0.803	0.772	0.743	0.716	0.691	0.668	0.646	0.625	0.606	0.588	
massa= 2250 kg	0.926	0.883	0.845	0.809	0.777	0.747	0.719	0.693	0.669	0.6465	0.626	0.606	0.587	
massa= 2500 kg	0.937	0.893	0.852	0.815	0.782	0.750	0.722	0.695	0.670	0.6473	0.626	0.606	0.587	

No caso do atrito, a tabela de acelerações e desacelerações tem quatro em vez de duas tabelas devido a neste fator ser utilizado a força aplicada à roda. Esta força depende de o motor estar em aceleração ou em travagem, causando assim uma diferença nos valores entre aceleração e desaceleração.

No entanto, a diferença entre o valor de aceleração para uma dada altura e carga entre os dois sentidos, quer na aceleração quer na desaceleração continua a ser baixa. A diferença entre os valores máximos e mínimos segue a mesma tendência da estabilidade em que na aceleração é de $0.463 [m/s^2]$ no sentido positivo e de $0.482 [m/s^2]$ no sentido negativo representando 37 % do valor máximo em cada um dos casos.

Na desaceleração temos $0.370 [m/s^2]$ no sentido positivo e $0.350 [m/s^2]$ no sentido negativo, representando a mesma percentagem do valor máximo.

Para facilitar a análise da tabela de acelerações foi feito o mesmo cálculo utilizado na secção da limitação do acionamento, secção 4.1.2, utilizando a equação 4.8 com o objetivo de obter o tempo de aceleração para os diferentes valores presentes na tabela 4.16.

Tabela 4.17. Tempo de aceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pelo atrito.

Sentido Positivo		altura da carga												
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31	
massa= 0 kg	3.20	3.30	3.40	3.51	3.61	3.71	3.81	3.91	4.02	4.12	4.22	4.32	4.42	
massa= 250 kg	3.17	3.28	3.38	3.49	3.59	3.70	3.81	3.91	4.02	4.13	4.23	4.34	4.45	
massa= 500 kg	3.14	3.25	3.36	3.47	3.58	3.69	3.80	3.92	4.03	4.14	4.25	4.36	4.47	
massa= 750 kg	3.11	3.22	3.34	3.45	3.57	3.68	3.80	3.92	4.03	4.15	4.26	4.38	4.49	
massa= 1000 kg	3.08	3.20	3.32	3.44	3.56	3.68	3.80	3.92	4.04	4.16	4.28	4.40	4.52	
massa= 1250 kg	3.05	3.17	3.30	3.42	3.54	3.67	3.79	3.92	4.04	4.17	4.29	4.42	4.54	
massa= 1500 kg	3.02	3.15	3.28	3.40	3.53	3.66	3.79	3.92	4.05	4.18	4.30	4.43	4.56	
massa= 1750 kg	2.99	3.12	3.26	3.39	3.52	3.65	3.79	3.92	4.05	4.18	4.32	4.45	4.58	
massa= 2000 kg	2.96	3.10	3.24	3.37	3.51	3.65	3.78	3.92	4.06	4.19	4.33	4.47	4.60	
massa= 2250 kg	2.94	3.08	3.22	3.36	3.50	3.64	3.78	3.92	4.06	4.20	4.34	4.48	4.62	
massa= 2500 kg	2.91	3.05	3.20	3.34	3.49	3.63	3.78	3.92	4.07	4.21	4.36	4.50	4.64	

Sentido Negativo		altura da carga												
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31	
massa= 0 kg	3.04	3.13	3.23	3.33	3.42	3.52	3.62	3.71	3.81	3.91	4.00	4.10	4.20	
massa= 250 kg	3.01	3.11	3.21	3.32	3.42	3.52	3.62	3.72	3.82	3.92	4.02	4.13	4.23	
massa= 500 kg	2.98	3.09	3.20	3.30	3.41	3.51	3.62	3.73	3.83	3.94	4.04	4.15	4.25	
massa= 750 kg	2.96	3.07	3.18	3.29	3.40	3.51	3.62	3.73	3.84	3.95	4.06	4.17	4.28	
massa= 1000 kg	2.93	3.05	3.16	3.28	3.39	3.51	3.62	3.73	3.85	3.96	4.08	4.19	4.31	
massa= 1250 kg	2.91	3.03	3.15	3.26	3.38	3.50	3.62	3.74	3.86	3.98	4.10	4.21	4.33	
massa= 1500 kg	2.88	3.01	3.13	3.25	3.38	3.50	3.62	3.74	3.87	3.99	4.11	4.24	4.36	
massa= 1750 kg	2.86	2.99	3.11	3.24	3.37	3.49	3.62	3.75	3.88	4.00	4.13	4.26	4.38	
massa= 2000 kg	2.84	2.97	3.10	3.23	3.36	3.49	3.62	3.75	3.88	4.01	4.15	4.28	4.41	
massa= 2250 kg	2.81	2.95	3.08	3.22	3.35	3.49	3.62	3.76	3.89	4.03	4.16	4.30	4.43	
massa= 2500 kg	2.79	2.93	3.07	3.21	3.35	3.48	3.62	3.76	3.90	4.04	4.18	4.32	4.46	

Tabela 4.18. Tempo de desaceleração com as diferentes cargas e alturas, limitada pelo atrito.

Sentido Positivo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.08	4.21	4.34	4.47	4.60	4.73	4.86	4.99	5.12	5.25	5.38	5.51	5.64
massa= 250 kg	4.03	4.17	4.30	4.44	4.57	4.71	4.85	4.98	5.12	5.25	5.39	5.52	5.66
massa= 500 kg	3.98	4.12	4.27	4.41	4.55	4.69	4.83	4.97	5.11	5.25	5.39	5.54	5.68
massa= 750 kg	3.94	4.08	4.23	4.38	4.52	4.67	4.82	4.96	5.11	5.26	5.40	5.55	5.69
massa= 1000 kg	3.89	4.04	4.19	4.35	4.50	4.65	4.80	4.95	5.11	5.26	5.41	5.56	5.71
massa= 1250 kg	3.85	4.00	4.16	4.32	4.47	4.63	4.79	4.94	5.10	5.26	5.42	5.57	5.73
massa= 1500 kg	3.80	3.96	4.13	4.29	4.45	4.61	4.77	4.94	5.10	5.26	5.42	5.58	5.75
massa= 1750 kg	3.76	3.93	4.09	4.26	4.43	4.59	4.76	4.93	5.09	5.26	5.43	5.60	5.76
massa= 2000 kg	3.72	3.89	4.06	4.23	4.40	4.58	4.75	4.92	5.09	5.26	5.43	5.61	5.78
massa= 2250 kg	3.68	3.85	4.03	4.21	4.38	4.56	4.74	4.91	5.09	5.26	5.44	5.62	5.79
massa= 2500 kg	3.64	3.82	4.00	4.18	4.36	4.54	4.72	4.90	5.09	5.27	5.45	5.63	5.81

Sentido Negativo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.38	4.52	4.66	4.80	4.94	5.08	5.22	5.36	5.49	5.63	5.77	5.91	6.05
massa= 250 kg	4.32	4.46	4.61	4.75	4.90	5.05	5.19	5.34	5.48	5.63	5.77	5.92	6.06
massa= 500 kg	4.26	4.41	4.56	4.71	4.86	5.01	5.17	5.32	5.47	5.62	5.77	5.92	6.07
massa= 750 kg	4.20	4.36	4.52	4.67	4.83	4.98	5.14	5.30	5.45	5.61	5.77	5.92	6.08
massa= 1000 kg	4.15	4.31	4.47	4.63	4.79	4.96	5.12	5.28	5.44	5.60	5.76	5.93	6.09
massa= 1250 kg	4.09	4.26	4.43	4.59	4.76	4.93	5.09	5.26	5.43	5.60	5.76	5.93	6.10
massa= 1500 kg	4.04	4.21	4.38	4.56	4.73	4.90	5.07	5.24	5.42	5.59	5.76	5.93	6.10
massa= 1750 kg	3.99	4.17	4.34	4.52	4.70	4.87	5.05	5.23	5.40	5.58	5.76	5.94	6.11
massa= 2000 kg	3.94	4.12	4.30	4.48	4.67	4.85	5.03	5.21	5.39	5.57	5.76	5.94	6.12
massa= 2250 kg	3.89	4.08	4.26	4.45	4.64	4.82	5.01	5.20	5.38	5.57	5.75	5.94	6.13
massa= 2500 kg	3.84	4.03	4.22	4.42	4.61	4.80	4.99	5.18	5.37	5.56	5.75	5.94	6.13

Mais uma vez existe uma grande diferença entre o tempo de aceleração máximo e mínimo (1.74 [s] para o sentido positivo e 1.67 [s] para o negativo) representando 60 % do tempo mínimo. Para a desaceleração a diferença será de 2.17 [s] para o sentido positivo e 2.29 [s] para o negativo, representando a mesma percentagem do tempo mínimo.

4.4.3. Conclusão sobre as limitações do atrito.

Tal como aconteceu na análise da estabilidade com a análise a incidir sobre dois parâmetros, existe uma maior possibilidade de otimização face ao cenário de apenas analisar um parâmetro como o efetuado para o acionamento. O atrito é então mais limitante para a estrutura em termos de acelerações que a estabilidade, sendo mesmo assim menos limitante que o acionamento.

Neste caso, quanto maior a carga transportada, até aos 16 [m] no sentido positivo e negativo, maior é a aceleração que o transelevador é capaz, a partir desse ponto, quando menor a carga a transportar, maior a aceleração possível.

Na travagem, até aos 21 [m] no sentido positivo existe a maior desaceleração para a maior carga e a partir dos 26 [m] no sentido negativo a maior desaceleração para a menor carga.

Para o atrito não serão aqui apresentados gráficos da variação da aceleração com a altura e com a massa da carga, dado a representação das tabelas resultar em curvas muito

semelhantes às apresentadas na secção respetiva à estabilidade, contudo, serão sim disponibilizadas no apêndice A.

4.4.4. Análise do tempo de ciclo limitado pelo atrito.

Para uma melhor análise e como efetuado na secção 4.1.4 para o motor, calcular-se-á o tempo de ciclo quando este é unicamente limitado pelo atrito, utilizando as fórmulas 4.9 e 4.10 e a tabela 4.18. e 4.19., de modo a obter a distância de aceleração e desaceleração com vista a obter a distância percorrida com aceleração nula e velocidade máxima.

Dado o processo de cálculo ser semelhante ao efetuado com a estabilidade e o acionamento, as tabelas correspondentes à distância percorrida na aceleração e desaceleração e consequentemente a distância percorrida com aceleração nula e velocidade máxima serão apresentadas no apêndice B, sendo apenas apresentada a tabela de tempos de viagem considerando o mesmo ponto de entrada e saída de mercadoria que na estabilidade.

O tempo de ciclo será obtido através do mesmo processo utilizado na análise dos dois outros fatores limitantes.

Tabela 4.19. Tempo de viagem limitado pelo atrito, variando a altura e carga.

		Tempo total de viagem [s]												
Sentido Positivo		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg		15.36	15.42	15.49	15.55	15.62	15.68	15.75	15.81	15.88	15.94	16.01	16.07	16.14
massa= 250 kg		15.32	15.39	15.46	15.52	15.59	15.66	15.73	15.79	15.86	15.93	16.00	16.07	16.13
massa= 500 kg		15.28	15.35	15.42	15.49	15.56	15.64	15.71	15.78	15.85	15.92	15.99	16.06	16.13
massa= 750 kg		15.25	15.32	15.39	15.47	15.54	15.61	15.69	15.76	15.83	15.91	15.98	16.05	16.13
massa= 1000 kg		15.21	15.29	15.36	15.44	15.51	15.59	15.67	15.74	15.82	15.89	15.97	16.05	16.12
massa= 1250 kg		15.18	15.25	15.33	15.41	15.49	15.57	15.65	15.72	15.80	15.88	15.96	16.04	16.12
massa= 1500 kg		15.14	15.22	15.30	15.38	15.47	15.55	15.63	15.71	15.79	15.87	15.95	16.03	16.11
massa= 1750 kg		15.11	15.19	15.27	15.36	15.44	15.53	15.61	15.69	15.78	15.86	15.94	16.03	16.11
massa= 2000 kg		15.08	15.16	15.25	15.33	15.42	15.50	15.59	15.68	15.76	15.85	15.93	16.02	16.11
massa= 2250 kg		15.04	15.13	15.22	15.31	15.40	15.48	15.57	15.66	15.75	15.84	15.93	16.01	16.10
massa= 2500 kg		15.01	15.10	15.19	15.28	15.37	15.46	15.56	15.65	15.74	15.83	15.92	16.01	16.10

		Tempo total de viagem [s]												
Sentido Negativo		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg		15.40	15.49	15.58	15.68	15.77	15.86	15.95	16.04	16.13	16.22	16.31	16.40	16.50
massa= 250 kg		15.36	15.46	15.55	15.64	15.74	15.83	15.93	16.02	16.12	16.21	16.31	16.40	16.50
massa= 500 kg		15.32	15.42	15.52	15.61	15.71	15.81	15.91	16.01	16.10	16.20	16.30	16.40	16.50
massa= 750 kg		15.28	15.38	15.48	15.58	15.68	15.79	15.89	15.99	16.09	16.19	16.29	16.39	16.50
massa= 1000 kg		15.24	15.34	15.45	15.55	15.66	15.76	15.87	15.97	16.08	16.18	16.29	16.39	16.50
massa= 1250 kg		15.20	15.31	15.42	15.53	15.63	15.74	15.85	15.96	16.06	16.17	16.28	16.39	16.49
massa= 1500 kg		15.17	15.28	15.39	15.50	15.61	15.72	15.83	15.94	16.05	16.16	16.27	16.38	16.49
massa= 1750 kg		15.13	15.24	15.36	15.47	15.58	15.70	15.81	15.92	16.04	16.15	16.26	16.38	16.49
massa= 2000 kg		15.09	15.21	15.33	15.44	15.56	15.68	15.79	15.91	16.02	16.14	16.26	16.37	16.49
massa= 2250 kg		15.06	15.18	15.30	15.42	15.54	15.65	15.77	15.89	16.01	16.13	16.25	16.37	16.49
massa= 2500 kg		15.03	15.15	15.27	15.39	15.51	15.63	15.76	15.88	16.00	16.12	16.24	16.36	16.49

Da tabela acima observar-se-á uma diferença entre o pior tempo de viagem e o melhor de 1.13 [s] para o sentido positivo, o que representa cerca de 7.5 % do melhor tempo, e para o sentido negativo a diferença é de 1.47 [s] o que representa cerca de 9.8 % do melhor

tempo. De referir que isto são tempos de viagem com o ponto de partida no sentido positivo e chegada no sentido negativo a uma altura fixa de 3.5 [m]. O pior tempo de viagem, o que é utilizado pela empresa Consoveyo, é um tempo ainda maior dado utilizarem sempre a aceleração para a maior massa e maior altura. Utiliza, portanto, a aceleração de 0.775 [m/s^2] e 0.587 [m/s^2] para a desaceleração. Isto resulta num tempo de viagem de 17.06 [s].

Aplicando o método de comparação já utilizado, é possível observar como a adoção dos diferentes modelos influencia os tempos de ciclo de teste.

Tabela 4.20. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.

	Modelo atual	Modelo dinâmico
Tempo de arranque ida [s]	4.645	3.303
Tempo de viagem a velocidade constante ida [s]	6.277	7.585
Tempo de paragem ida [s]	6.135	4.861
Tempo de arranque volta [s]	4.645	3.027
Tempo de viagem a velocidade constante volta [s]	6.277	7.727
Tempo de paragem volta [s]	6.135	5.094
Tempo total [s]	34.114	31.597

Através da tabela verifica-se que o aumento de complexidade continua a fazer aumentar a diferença entre o modelo atual e o proposto. Esta diferença para o atrito é de 2.517 [s] entre os dois modelos o que em termos percentuais significa 7.97 % do melhor tempo de ciclo. Comparando com o valor obtido na análise do acionamento, confirma-se que a limitação do equipamento, atualmente, será no motor para a aceleração e no atrito para a desaceleração.

4.5. Junção dos três fatores limitantes.

O objetivo deste capítulo será reunir os três casos de possível limitação à aceleração numa só tabela em que só o valor mínimo para uma dada massa e altura será selecionado entre os três casos.

Será também feita uma análise do tempo de ciclo, a partir da qual será sumariada a conclusão a que se chegou bem como os passos a realizar de seguida.

4.5.1. Seleção da aceleração mínima para cada altura e carga.

O processo de seleção é de extrema simplicidade. As três tabelas já obtidas para a aceleração e desaceleração de cada fator são postas lado a lado e o valor mínimo para cada carga e altura é retirado para a tabela de aceleração ou desaceleração final.

Nas tabelas apresentadas os valores a verde, representam os dados provenientes da tabela de acelerações do motor, os a amarelo da tabela do atrito e os sem nenhuma formatação da estabilidade.

Tabela 4.21. Variação da aceleração e desaceleração limitada pelos três fatores, variando a altura e carga.

Sentido Positivo	aceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591
massa= 250 kg	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587
massa= 500 kg	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583
massa= 750 kg	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579
massa= 1000 kg	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575
massa= 1250 kg	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571
massa= 1500 kg	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567
massa= 1750 kg	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563
massa= 2000 kg	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559
massa= 2250 kg	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555
massa= 2500 kg	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551

Sentido Negativo	aceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591	0.591
massa= 250 kg	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587
massa= 500 kg	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583	0.583
massa= 750 kg	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579	0.579
massa= 1000 kg	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575
massa= 1250 kg	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571	0.571
massa= 1500 kg	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567
massa= 1750 kg	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563
massa= 2000 kg	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559	0.559
massa= 2250 kg	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555
massa= 2500 kg	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551

Como é visível, se os valores agora apresentados forem cruzados com os da Tabela 4.4. presente na secção 4.1.2. “Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração”, os valores de aceleração para cada carga e altura são os mesmos. Isto significa que o motor

está a limitar a aceleração da estrutura. Este facto deve-se à falta de capacidade do acionamento em fornecer um maior binário.

Apesar disto, o acionamento utilizado é mais que capaz de fornecer os requisitos da Consoveyo quanto à aceleração máxima pedida de $0.5 [m/s^2]$ e à velocidade máxima desejada de $3.6 [m/s]$.

Na Tabela 4.22. é apresentado um cenário diferente dado que o motor apenas restringe uma pequena parcela dos valores apresentados sendo maioritariamente restringidos pelo atrito. Isto fica evidenciado se cruzarmos a tabela abaixo com a tabela 4.4. na secção 4.1.2 e a Tabela 4.17. na secção 4.4.2.

Tabela 4.22. Variação da desaceleração limitada pelos três fatores, variando a altura e carga.

Sentido Positivo	desaceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.882	0.855	0.829	0.805	0.782	0.761	0.741	0.721	0.703	0.686	0.669	0.653	0.638
massa= 250 kg	0.893	0.864	0.837	0.811	0.787	0.764	0.743	0.723	0.704	0.685	0.668	0.652	0.636
massa= 500 kg	0.904	0.873	0.844	0.817	0.792	0.768	0.745	0.724	0.704	0.685	0.667	0.650	0.634
massa= 750 kg	0.914	0.882	0.851	0.823	0.796	0.771	0.748	0.725	0.705	0.685	0.666	0.649	0.632
massa= 1000 kg	0.925	0.891	0.858	0.828	0.800	0.774	0.750	0.727	0.705	0.685	0.666	0.647	0.630
massa= 1250 kg	0.936	0.899	0.865	0.834	0.805	0.777	0.752	0.728	0.706	0.685	0.665	0.646	0.628
massa= 1500 kg	0.947	0.908	0.872	0.839	0.809	0.781	0.754	0.729	0.706	0.684	0.664	0.645	0.626
massa= 1750 kg	0.941	0.917	0.879	0.845	0.813	0.784	0.756	0.731	0.707	0.684	0.663	0.643	0.625
massa= 2000 kg	0.935	0.925	0.886	0.850	0.817	0.787	0.758	0.732	0.707	0.684	0.662	0.642	0.623
massa= 2250 kg	0.929	0.929	0.893	0.856	0.821	0.790	0.760	0.733	0.707	0.684	0.662	0.641	0.621
massa= 2500 kg	0.924	0.924	0.900	0.861	0.825	0.793	0.762	0.734	0.708	0.684	0.661	0.640	0.620

Sentido Negativo	desaceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa = 0 kg	0.822	0.797	0.773	0.750	0.729	0.709	0.690	0.672	0.655	0.639	0.624	0.609	0.595
massa = 250 kg	0.834	0.806	0.781	0.757	0.735	0.714	0.694	0.675	0.657	0.640	0.624	0.608	0.594
massa = 500 kg	0.845	0.816	0.789	0.764	0.740	0.718	0.697	0.677	0.658	0.641	0.624	0.608	0.593
massa = 750 kg	0.857	0.826	0.797	0.771	0.746	0.722	0.700	0.680	0.660	0.642	0.624	0.608	0.592
massa = 1000 kg	0.868	0.836	0.805	0.777	0.751	0.726	0.703	0.682	0.662	0.643	0.625	0.607	0.591
massa = 1250 kg	0.880	0.845	0.813	0.784	0.756	0.731	0.707	0.684	0.663	0.643	0.625	0.607	0.591
massa = 1500 kg	0.891	0.855	0.821	0.790	0.761	0.735	0.710	0.686	0.665	0.644	0.625	0.607	0.590
massa = 1750 kg	0.903	0.864	0.829	0.797	0.767	0.739	0.713	0.689	0.666	0.645	0.625	0.607	0.589
massa = 2000 kg	0.914	0.874	0.837	0.803	0.772	0.743	0.716	0.691	0.668	0.646	0.625	0.606	0.588
massa = 2250 kg	0.926	0.883	0.845	0.809	0.777	0.747	0.719	0.693	0.669	0.647	0.626	0.606	0.587
massa = 2500 kg	0.924	0.893	0.852	0.815	0.782	0.750	0.722	0.695	0.670	0.647	0.626	0.606	0.587

Tal como o sucedido no atrito, para limitar a extensão do texto, a tabela referente ao cálculo do tempo e distância de aceleração e desaceleração, distância e tempo a aceleração constante e velocidade máxima será colocado no apêndice C, dado o seu processo já ter sido descrito e não representar grande relevância para a análise sendo apenas fornecido a título de curiosidade.

A diferença entre o tempo máximo e mínimo de aceleração é igual para os dois sentidos dado ser o motor a limitar este parâmetro e tem o valor de $0.44 [s]$ o que representa 7.25% do valor mínimo. Na desaceleração a diferença será de $2.01 [s]$ para o sentido

positivo e 2.25 [s] para o negativo, representando 52.77 % e 57.74 % do tempo mínimo respetivamente.

4.5.2. Conclusão com junção dos três fatores.

Como já foi sugerido neste ponto, o motor é o fator limitador da aceleração dado a sua baixa capacidade de disponibilizar binário de modo a atingir maiores acelerações para esta carga.

Na desaceleração o limite está maioritariamente no atrito dado que este depende unicamente da força de travagem que o motor consegue fornecer. Mesmo assim o motor tem influência neste parâmetro pois, ao não permitir um maior binário de travagem, limita a travagem para massas elevadas e para as duas alturas mais baixas.

Nesta análise final a aceleração nos dois sentidos apenas varia com a massa da carga a transportar. Quanto maior a carga transportada maior a aceleração possível sendo as duas tabelas iguais.

Na travagem no sentido positivo temos a maior desaceleração para a maior carga até aos 21 [m], sendo que a partir desse ponto teremos a maior desaceleração para a menor massa de carga. No sentido negativo quanto maior a massa até aos 26 [m] obtemos a maior desaceleração, a partir daí temos a maior desaceleração para a menor carga.

Também aqui não serão apresentados gráficos da variação da aceleração com a altura e com a massa da carga, dado a representação das tabelas resultar em curvas muito semelhantes às apresentadas na secção respetiva à estabilidade, serão sim disponibilizados no apêndice D bem como gráficos a três dimensões para que seja possível visualizar a superfície criada pela aceleração com a variação da altura e carga.

4.5.3. Análise final do tempo de ciclo limitado.

De modo a perceber os ganhos possíveis com este acionamento e esta estrutura, será realizado o mesmo processo de cálculo de tempo de ciclo já efetuado anteriormente utilizando as equações 4.9 e 4.10 e as tabelas C.1 e C.2 de tempo decorrido na aceleração e desaceleração presentes no apêndice C.

O tempo de ciclo será obtido através do mesmo processo utilizado na análise dos dois outros fatores limitantes.

Tabela 4.23. Tempo de viagem no cenário final, variando a altura e carga.

Sentido Positivo		Tempo total de viagem [s]												
		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg		16.75	16.82	16.88	16.95	17.01	17.08	17.14	17.21	17.27	17.34	17.40	17.47	17.53
massa= 250 kg		16.75	16.82	16.88	16.95	17.02	17.09	17.15	17.22	17.29	17.36	17.43	17.49	17.56
massa= 500 kg		16.75	16.82	16.89	16.96	17.03	17.10	17.17	17.24	17.31	17.38	17.45	17.52	17.59
massa= 750 kg		16.74	16.82	16.89	16.96	17.04	17.11	17.18	17.26	17.33	17.40	17.48	17.55	17.62
massa= 1000 kg		16.74	16.82	16.90	16.97	17.05	17.12	17.20	17.27	17.35	17.43	17.50	17.58	17.65
massa= 1250 kg		16.74	16.82	16.90	16.98	17.06	17.14	17.21	17.29	17.37	17.45	17.53	17.61	17.69
massa= 1500 kg		16.74	16.82	16.91	16.99	17.07	17.15	17.23	17.31	17.39	17.47	17.55	17.63	17.72
massa= 1750 kg		16.78	16.83	16.91	16.99	17.08	17.16	17.25	17.33	17.41	17.50	17.58	17.66	17.75
massa= 2000 kg		16.81	16.83	16.92	17.00	17.09	17.17	17.26	17.35	17.43	17.52	17.60	17.69	17.78
massa= 2250 kg		16.85	16.85	16.92	17.01	17.10	17.19	17.28	17.36	17.45	17.54	17.63	17.72	17.81
massa= 2500 kg		16.88	16.88	16.93	17.02	17.11	17.20	17.29	17.38	17.47	17.56	17.65	17.74	17.84

Sentido Negativo		Tempo total de viagem [s]												
		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg		16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97
massa= 250 kg		16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96
massa= 500 kg		16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96
massa= 750 kg		16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96	16.96
massa= 1000 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95
massa= 1250 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95
massa= 1500 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95
massa= 1750 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95
massa= 2000 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95
massa= 2250 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95
massa= 2500 kg		16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95	16.95

Da Tabela 4.23. observar-se-á que a diferença entre o pior tempo de viagem e o melhor é de 1.10 [s] para o sentido positivo, o que representa cerca de 6.5 % do melhor tempo, e para o sentido negativo a diferença é de 0.02 [s] o que representa cerca de 0.1 % do melhor tempo. De referir que isto são tempos de viagem com o ponto de partida no sentido positivo e chegada no sentido negativo a uma altura fixa de 3.5 [m]. O pior tempo de viagem, neste caso será de 17.84 [s] resultado da aplicação do modelo atual de dimensionamento de aceleração limite. Pior é ainda o caso aplicado e pedido pela Consoveyo uma vez que utilizada uma aceleração e desaceleração igual a 0.5 [m/s²]. Isto resulta num tempo de viagem de 18.87 [s].

Aplicando o método de comparação utilizado até aqui, será apresentado de seguida na Tabela 4.24. como a adoção dos diferentes modelos influencia os tempos de ciclo de teste.

Tabela 4.24. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.

	Modelo atual	Modelo dinâmico	Aceleração pedida
Tempo de arranque ida [s]	6.528	6.087	7.200
Tempo de viagem a velocidade constante ida [s]	5.355	6.193	4.467
Tempo de paragem ida [s]	6.135	4.861	7.200
Tempo de arranque volta [s]	6.528	6.307	7.200
Tempo de viagem a velocidade constante volta [s]	5.355	6.383	4.467
Tempo de paragem volta [s]	6.135	4.259	7.200
Tempo total [s]	36.036	34.090	37.734

Existe então uma diferença de 1.95 [s] entre os dois modelos o que em termos percentuais significa 5.68 % do melhor tempo de ciclo. Comparando com o valor utilizado atualmente com a aceleração pedida de $0.5 [m/s^2]$, esta diferença cresce para os 3.64 [s], passando a representar 10.64 %.

Em suma, apesar do acionamento estar a cumprir o pedido pelo cliente, está a impedir uma maior otimização do equipamento devido a permitir uma menor aceleração, e até desaceleração em alguns casos, que o fator de atrito e de estabilidade. Mesmo assim, há espaço para otimização dado que o ganho entre o modelo proposto e o modelo atual é significativo. Mais significativo é o ganho em comparação com a aceleração aplicada atualmente que fica aquém das capacidades da estrutura quer comparando com o modelo atual (diferença de 4.72 %) quer com o modelo proposto (10.64 %).

5. OTIMIZAÇÃO DO TRANSELEVADOR

Este capítulo tem como objetivo determinar os limites estruturais do transelevador com o propósito de encontrar um acionamento que explore ao máximo os limites de atrito e de estabilidade.

Refletindo sobre os diferentes fatores chega-se à conclusão de que os únicos fatores que possivelmente serão de mais fácil otimização são o atrito e o acionamento dado que, a estabilidade depende da forma da estrutura e dos seus pesos próprios.

De modo a otimizar o fator força de atrito é necessário alterar o acionamento dado que a única variável que não depende da forma e peso da estrutura é a força de acionamento aplicada às rodas quer seja em aceleração como em desaceleração. Ora isto significa que o fator força de atrito está diretamente relacionado com o binário do motor.

Na situação atual verifica-se que, para não ser o motor a limitar a otimização da estrutura, este necessita de ter um maior binário, um binário maior leva a uma maior força aplicada às rodas até ao limite de aceleração de que estas são capazes de suportar sem entrar numa situação de escorregamento. É então necessário conciliar estes dois fatores de maneira a que o motor debite o binário apenas suficiente para que a aceleração mínima imposta pelo motor seja igual à aceleração máxima no limiar de escorregamento.

Através deste método é possível garantir que o método de falha do transelevador é exclusivamente devido ao fator força de atrito. Como este parâmetro utiliza um coeficiente de atrito de projeto (valor de segurança) a força de atrito real será sempre maior que o utilizado na análise garantido um funcionamento seguro.

5.1. Limitação através do motor e atrito.

Igualando a menor aceleração do motor à maior aceleração do fator que é responsável pela mesma (neste caso o atrito) conseguir-se-á encontrar a força ótima a aplicar às rodas, de maneira à estrutura ser unicamente limitada por ela mesma sem depender do motor. Procedendo da mesma maneira para a desaceleração é possível garantir uma

desaceleração otimizada, tendo apenas em atenção que o binário de travagem ótimo não pode ser superior ao binário máximo admissível do redutor.

Os valores obtidos através da otimização serão apresentados na tabela seguinte, sendo também apresentadas as tabelas referentes às novas acelerações dos fatores modificados (motor e atrito).

Tabela 5.1. Valores das variáveis da aceleração calculadas na otimização.

Variável	Valor	Variável	Valor
n_1	2169.22 [rpm]	m_F	[17962, 19211.5] [kg]
v	3.6 [m/s]	w_r	0.026 [N/kg]
T_H	370.02 [N.m]	F_{wr}	[473.60, 506.56] [N]
η	80%	J_{motor}	0.092 [kg.m ²]
F_{mH}	18678.35 [N]	m_{FJ}	366.31 [kg]
m_{Carga}	[0, 2500] [kg]	T_B	231.182 [N.m]
n	2	F_{mB}	18234.50 [N]

Os valores presentes na tabela relativos às características do acionamento já são as do acionamento que será sugerido no final. Este acionamento tem uma relação de transmissão superior de 25.24 e um aumento de massa de 273 kg para 442 kg.

Estes novos dados resultam na Tabela 5.2. que representa a variação da aceleração e desaceleração, limitada pelo acionamento otimizado, face à variação de carga no percurso médio.

Tabela 5.2. Variação da aceleração e desaceleração, limitada pelo acionamento otimizado, face à variação de carga no percurso médio.

$m_{Carga} [kg]$	$a_H [m/s^2]$	$t_H [s]$	$a_B [m/s^2]$	$t_B [s]$
0	0.997	3.6	1.016	3.5
250	0.990	3.6	1.009	3.6
500	0.983	3.7	1.002	3.6
750	0.977	3.7	0.996	3.6
1000	0.970	3.7	0.990	3.6
1250	0.963	3.7	0.983	3.7
1500	0.957	3.8	0.977	3.7
1750	0.950	3.8	0.971	3.7
2000	0.944	3.8	0.965	3.7
2250	0.938	3.8	0.959	3.8
2500	0.932	3.9	0.953	3.8

Comparando com a tabela dos valores do acionamento instalado, tabela 4.4., verificamos um aumento de cerca de 70 % do valor da aceleração atual para a otimizada e de 3 % entre a desaceleração atual para a otimizada.

O atrito, tal como explicado no texto acima, também sofre alterações. A tabela otimizada da aceleração será fornecida de seguida.

Tabela 5.3. Variação da aceleração limitada pelo atrito, variando a altura e carga na situação otimizada.

Sentido Positivo		aceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.764	0.741	0.719	0.698	0.678	0.660	0.642	0.626	0.610	0.595	0.581	0.567	0.554	
massa= 250 kg	0.776	0.751	0.727	0.705	0.684	0.665	0.646	0.629	0.612	0.596	0.581	0.567	0.554	
massa= 500 kg	0.787	0.760	0.735	0.712	0.690	0.669	0.650	0.632	0.614	0.598	0.582	0.568	0.554	
massa= 750 kg	0.799	0.770	0.744	0.719	0.696	0.674	0.654	0.635	0.616	0.599	0.583	0.568	0.553	
massa= 1000 kg	0.810	0.780	0.752	0.726	0.702	0.679	0.657	0.637	0.618	0.601	0.584	0.568	0.553	
massa= 1250 kg	0.822	0.790	0.760	0.733	0.707	0.683	0.661	0.640	0.621	0.602	0.585	0.568	0.553	
massa= 1500 kg	0.833	0.799	0.768	0.739	0.713	0.688	0.664	0.643	0.622	0.603	0.585	0.569	0.553	
massa= 1750 kg	0.845	0.809	0.776	0.746	0.718	0.692	0.668	0.645	0.624	0.605	0.586	0.569	0.552	
massa= 2000 kg	0.856	0.819	0.784	0.753	0.723	0.696	0.671	0.648	0.626	0.606	0.587	0.569	0.552	
massa= 2250 kg	0.868	0.828	0.792	0.759	0.729	0.701	0.675	0.651	0.628	0.607	0.588	0.569	0.552	
massa= 2500 kg	0.879	0.838	0.800	0.765	0.734	0.705	0.678	0.653	0.630	0.608	0.588	0.569	0.552	

Sentido Negativo		aceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.824	0.799	0.775	0.750	0.732	0.712	0.693	0.675	0.658	0.642	0.626	0.612	0.598	
massa= 250 kg	0.835	0.808	0.783	0.7591	0.737	0.716	0.696	0.677	0.659	0.642	0.626	0.611	0.596	
massa= 500 kg	0.846	0.817	0.790	0.7652	0.742	0.719	0.698	0.679	0.660	0.642	0.626	0.610	0.595	
massa= 750 kg	0.857	0.826	0.798	0.7712	0.746	0.723	0.701	0.681	0.661	0.643	0.625	0.609	0.593	
massa= 1000 kg	0.867	0.835	0.805	0.7771	0.751	0.727	0.704	0.682	0.662	0.643	0.625	0.608	0.592	
massa= 1250 kg	0.878	0.844	0.812	0.7830	0.756	0.730	0.706	0.684	0.663	0.643	0.625	0.607	0.591	
massa= 1500 kg	0.889	0.853	0.820	0.7888	0.760	0.734	0.709	0.686	0.664	0.644	0.625	0.607	0.590	
massa= 1750 kg	0.900	0.862	0.827	0.7945	0.765	0.737	0.711	0.687	0.665	0.644	0.624	0.606	0.588	
massa= 2000 kg	0.910	0.870	0.834	0.8002	0.769	0.740	0.714	0.689	0.666	0.644	0.624	0.605	0.587	
massa= 2250 kg	0.921	0.879	0.841	0.8058	0.774	0.744	0.716	0.691	0.667	0.645	0.624	0.604	0.586	
massa= 2500 kg	0.932	0.888	0.848	0.8114	0.778	0.747	0.719	0.692	0.668	0.645	0.624	0.604	0.585	

Tabela 5.4. Variação da desaceleração limitada pelo atrito, variando a altura e carga na situação otimizada.

Sentido Positivo		desaceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.846	0.820	0.795	0.772	0.751	0.730	0.711	0.692	0.675	0.658	0.643	0.627	0.613	
massa= 250 kg	0.856	0.829	0.803	0.778	0.756	0.734	0.713	0.694	0.676	0.659	0.642	0.626	0.611	
massa= 500 kg	0.867	0.838	0.810	0.784	0.760	0.737	0.716	0.696	0.677	0.659	0.641	0.625	0.610	
massa= 750 kg	0.878	0.847	0.818	0.790	0.765	0.741	0.719	0.697	0.678	0.659	0.641	0.624	0.608	
massa= 1000 kg	0.889	0.856	0.825	0.796	0.769	0.744	0.721	0.699	0.678	0.659	0.640	0.623	0.607	
massa= 1250 kg	0.899	0.864	0.832	0.802	0.774	0.748	0.723	0.701	0.679	0.659	0.640	0.622	0.605	
massa= 1500 kg	0.910	0.873	0.839	0.808	0.778	0.751	0.726	0.702	0.680	0.659	0.639	0.621	0.604	
massa= 1750 kg	0.921	0.882	0.846	0.813	0.783	0.754	0.728	0.704	0.681	0.659	0.639	0.620	0.602	
massa= 2000 kg	0.932	0.891	0.853	0.819	0.787	0.758	0.730	0.705	0.681	0.659	0.639	0.619	0.601	
massa= 2250 kg	0.942	0.899	0.860	0.824	0.791	0.761	0.733	0.707	0.682	0.659	0.638	0.618	0.599	
massa= 2500 kg	0.953	0.908	0.867	0.830	0.796	0.764	0.735	0.708	0.683	0.660	0.638	0.617	0.598	

Sentido Negativo		desaceleração [a] ≤												
Coeficiente de atrito (μ)		altura da carga												
0.2		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.785	0.761	0.739	0.717	0.697	0.678	0.660	0.643	0.627	0.611	0.597	0.583	0.569	
massa= 250 kg	0.797	0.771	0.747	0.724	0.703	0.683	0.664	0.646	0.629	0.613	0.597	0.583	0.569	
massa= 500 kg	0.809	0.781	0.755	0.731	0.709	0.688	0.668	0.649	0.631	0.614	0.598	0.583	0.568	
massa= 750 kg	0.820	0.791	0.764	0.738	0.714	0.692	0.671	0.651	0.633	0.615	0.599	0.583	0.568	
massa= 1000 kg	0.832	0.800	0.772	0.745	0.720	0.697	0.675	0.654	0.635	0.616	0.599	0.583	0.568	
massa= 1250 kg	0.843	0.810	0.780	0.752	0.725	0.701	0.678	0.657	0.637	0.618	0.600	0.583	0.567	
massa= 1500 kg	0.854	0.820	0.788	0.758	0.731	0.705	0.681	0.659	0.638	0.619	0.600	0.583	0.567	
massa= 1750 kg	0.866	0.829	0.796	0.765	0.736	0.709	0.685	0.662	0.640	0.620	0.601	0.583	0.566	
massa= 2000 kg	0.877	0.839	0.804	0.771	0.741	0.714	0.688	0.664	0.642	0.621	0.601	0.583	0.566	
massa= 2250 kg	0.889	0.848	0.811	0.778	0.746	0.718	0.691	0.666	0.643	0.622	0.600	0.583	0.565	
massa= 2500 kg	0.900	0.858	0.819	0.784	0.752	0.722	0.694	0.669	0.645	0.623	0.600	0.583	0.565	

Da comparação entre estas tabelas e a tabela 4.17. da secção 4.4.2 “Cálculo dos limites de aceleração e desaceleração”, observa-se uma redução entre 28.81 % e 32.06 % no sentido positivo e entre 27.61 % e 30.42 % no sentido negativo do valor de aceleração da tabela 4.17. Na desaceleração as diferenças atingidas são entre 3.48 % e 4.12 % no sentido positivo e entre 3.71 % e 4.44 % no sentido negativo.

5.2. Otimização atingida

Nesta secção serão apresentados os resultados atingidos aquando a estrutura é maximizada sem efetuar alterações à sua geometria. Será feita uma comparação entre o tempo de ciclo padrão obtido, o que seria obtido com o pior caso e o utilizado atualmente.

Será então apresentada a nova tabela final de tempo de viagem, sendo as novas tabelas de aceleração, tempo e distância de aceleração, tempo e distância a velocidade constante apresentadas no apêndice E. Estas tabelas serão disponibilizadas a título de curiosidade de modo a que o leitor, caso decida analisar melhor os ganhos nas diferentes fases de cálculo, o possa realizar sem efetuar ele próprio os cálculos.

Tabela 5.5. Tempo de viagem final otimizado, variando a altura e carga.

		Tempo total de viagem [s]												
Sentido Positivo		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg		16.23	16.29	16.36	16.43	16.49	16.56	16.63	16.70	16.76	16.83	16.90	16.97	17.03
massa= 250 kg		16.17	16.24	16.31	16.38	16.45	16.52	16.59	16.66	16.73	16.80	16.87	16.94	17.01
massa= 500 kg		16.11	16.18	16.26	16.33	16.40	16.47	16.55	16.62	16.69	16.77	16.84	16.91	16.99
massa= 750 kg		16.05	16.13	16.21	16.28	16.36	16.43	16.51	16.58	16.66	16.74	16.81	16.89	16.96
massa= 1000 kg		16.00	16.08	16.16	16.24	16.31	16.39	16.47	16.55	16.63	16.71	16.78	16.86	16.94
massa= 1250 kg		15.95	16.03	16.11	16.19	16.27	16.35	16.43	16.52	16.60	16.68	16.76	16.84	16.92
massa= 1500 kg		15.90	15.98	16.06	16.15	16.23	16.31	16.40	16.48	16.57	16.65	16.73	16.82	16.90
massa= 1750 kg		15.85	15.93	16.02	16.10	16.19	16.28	16.36	16.45	16.54	16.62	16.71	16.79	16.88
massa= 2000 kg		15.80	15.89	15.98	16.06	16.15	16.24	16.33	16.42	16.51	16.60	16.68	16.77	16.86
massa= 2250 kg		15.75	15.84	15.93	16.02	16.11	16.21	16.30	16.39	16.48	16.57	16.66	16.75	16.84
massa= 2500 kg		15.70	15.80	15.89	15.98	16.08	16.17	16.27	16.36	16.45	16.55	16.64	16.73	16.83

		Tempo total de viagem [s]												
Sentido Negativo		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg		16.21	16.28	16.35	16.42	16.49	16.56	16.63	16.70	16.77	16.84	16.90	16.97	17.04
massa= 250 kg		16.16	16.23	16.30	16.37	16.44	16.52	16.59	16.66	16.73	16.80	16.88	16.95	17.02
massa= 500 kg		16.10	16.17	16.25	16.32	16.40	16.47	16.55	16.62	16.70	16.77	16.85	16.92	17.00
massa= 750 kg		16.04	16.12	16.20	16.28	16.35	16.43	16.51	16.59	16.67	16.74	16.82	16.90	16.98
massa= 1000 kg		15.99	16.07	16.15	16.23	16.31	16.39	16.47	16.55	16.63	16.71	16.79	16.88	16.96
massa= 1250 kg		15.94	16.02	16.10	16.19	16.27	16.35	16.44	16.52	16.60	16.69	16.77	16.85	16.94
massa= 1500 kg		15.89	15.97	16.06	16.14	16.23	16.32	16.40	16.49	16.57	16.66	16.74	16.83	16.92
massa= 1750 kg		15.84	15.93	16.01	16.10	16.19	16.28	16.37	16.46	16.54	16.63	16.72	16.81	16.90
massa= 2000 kg		15.79	15.88	15.97	16.06	16.15	16.24	16.33	16.42	16.52	16.61	16.70	16.79	16.88
massa= 2250 kg		15.74	15.84	15.93	16.02	16.12	16.21	16.30	16.39	16.49	16.58	16.67	16.77	16.86
massa= 2500 kg		15.70	15.79	15.89	15.98	16.08	16.17	16.27	16.37	16.46	16.56	16.65	16.75	16.84

Da tabela acima é visível uma diferença entre o pior tempo de viagem e o melhor de 1.12 [s] para o sentido positivo, o que representa cerca de 7.13 % do melhor tempo, e para o sentido negativo a diferença é de 1.35 [s] o que representa cerca de 8.57 % do melhor tempo.

Aplicando o método de comparação já mencionado noutras secções, verificar-se-á na tabela 5.6. como a adoção dos diferentes modelos influencia os tempos de ciclo de teste.

Tabela 5.6. Variação do tempo de ciclo com o modelo adotado.

	Modelo atual	Modelo dinâmico	Aceleração pedida
Tempo de arranque ida [s]	6.524	4.860	7.200
Tempo de viagem a velocidade constante ida [s]	5.219	6.705	4.467
Tempo de paragem ida [s]	6.371	5.064	7.200
Tempo de arranque volta [s]	6.524	5.096	7.200
Tempo de viagem a velocidade constante volta [s]	5.219	6.897	4.467
Tempo de paragem volta [s]	6.371	4.444	7.200
Tempo total [s]	36.228	33.066	37.734

É possível aferir uma diferença de 3.16 [s] entre os dois modelos o que em termos percentuais significa 9.59 % do melhor tempo de ciclo. Comparando com o valor utilizado atualmente, esta diferença cresce para os 4.67 [s], passando a representar 14.16 %. Comparando entre o método atual e o instalado existe um aumento também significativo de 4.17 %.

Concluindo, com uma mudança de acionamento é possível atingir valores bastante significativos de ganhos de tempo no ciclo padrão, especialmente quando comparados com os ganhos relativos ao tempo de ciclo atual.

Como última análise calcular-se-á os ganhos temporais entre transportar uma carga de 2000, 2250 e 2500 [kg] a todas as alturas, a ir levar e ir buscar, com o modelo proposto e o atual. Para este cenário temos um ganho de 9.91 %, 10.02 % e 10.12 % face ao modelo atual e de 14.47 %, 14.58 % e 14.69 % face ao instalado para o ciclo de ir levar as respetivas cargas.

Para o cenário de ir buscar a dita carga temos ganhos de 9.92 %, 10.03 %, 10.14 % face ao atual e de 14.49 %, 14.60 % e 14.71 % face ao instalado. No total, face ao que foi exigido, acelerações de 0.5 [m/s²], existem ganhos de aproximadamente 14.60 % relativamente ao melhor tempo.

5.3. Proposta de acionamento otimizada

Face ao apresentado, o acionamento com características mais próximas às ótimas é o motoredutor SK9072.1 AZSH – 160LP/4 BRE 100 HL TF IG21K. Este motoredutor tem um binário máximo de saída de 2468 $[N.m]$, uma redução de 25.24 e uma rotação de saída de 58 $[rpm]$. Para trabalhar à velocidade desejada trabalharia também na curva de frequência de 87 $[Hz]$, trabalhando mais exatamente a 74 $[Hz]$ para atingir a velocidade máxima desejada e, pelo processo já descrito no acionamento atual, o seu binário de arranque máximo, à saída do redutor, será o quádruplo (9872 $[N.m]$). Este motor tem, portanto, um binário máximo superior ao necessário, o que significa que o motor não estará sempre a funcionar no seu limite e a situação de não escorregamento será de certeza o fator limitante.

6. ESQUEMATIZAÇÃO DE UM MODO DE APLICAÇÃO DOS RESULTADOS ATINGIDOS

Para a aplicação destas tabelas de aceleração e desaceleração, permitindo um menor tempo de ciclo, pouco é necessário adaptar ou/e acrescentar ao que já se encontra instalado. Todos os armazéns automáticos têm um ponto de pesagem de mercadoria, seja dentro ou fora do armazém, e essa informação é registada para que no futuro se saiba quanta mercadoria está armazenada.

Cada armazém regista também a que altura e distância do ponto inicial está cada carga de modo a facilmente a encontrar.

Quando o sistema vai arrumar uma nova carga sabe também onde existem espaços vazios no armazém, conhecendo assim as coordenadas iniciais e finais da mercadoria.

Com esta informação, já necessária ao funcionamento do armazém, a única parte em falta são as tabelas de aceleração criadas na fase de projeto do armazém. A partir daí o programa apenas tem de utilizar as variáveis de altura e peso para, inserindo os valores nas duas variáveis analisadas (peso e altura) nesta tabela de dupla entrada, retirar a aceleração necessária para o arranque e travagem. Quando descarrega ou carrega uma carga na sua posição, conhece também a aceleração e desaceleração a aplicar novamente.

A aceleração e desaceleração a aplicar é guardada numa variável que de seguida é enviada para o variador de frequência para este as aplicar. Este envio é feito recorrendo a uma função específica para o efeito que permite a modificação de parâmetros do variador a partir de um plc, pc industrial, etc...

Com isto é perceptível que aplicar este método não é algo de elevada complexidade, não implicando grande investimento para o utilizar, resultando em ganhos significativos.

7. CONCLUSÕES

7.1. Transelevador instalado atualmente

Em suma, o transelevador, mesmo no seu estado atual, tem capacidade para ser otimizado e obter ganhos relevantes (cerca de 10 %) face ao que está neste momento a ser utilizado. Face ao pior caso definido, utilizando o modelo atual, o transelevador atual continua a apresentar uma melhoria, que para algumas empresas já poderá ser significativa, dado representar um aumento em termos de ciclos por hora de cerca de 5.60 %. Estes ganhos traduzem-se em 105.6 ciclos por hora, um aumento de 5.6 face ao conseguido utilizando o modelo de aceleração fixa (100 ciclos por hora) e um aumento de 10.20 face ao atingido com a aceleração requisitada pela Consoveyo (95.4 ciclos por hora).

A limitação atual ocorre por parte do motor, induzida pelas restrições impostas à Nord para as características do acionamento.

Se o objetivo seria apenas $0.5 [m/s^2]$ então a estrutura não necessitaria ter estas dimensões havendo um gasto em material desnecessário.

7.2. Transelevador otimizado

Na situação otimizada é imediatamente realçado um ganho muito mais significativo de cerca de 10 % em termos de número de ciclos face ao modelo utilizado atualmente. Esta otimização ganha uma maior significância quando é colocada lado a lado com o número de ciclos do acionamento proposto e o acionamento atual dado que existe um aumento aproximadamente 14.5 % face ao atualmente instalado.

Com esta otimização do conjunto acionador, o número de ciclos aumenta para 108.9 ciclos por hora no modelo proposto e seriam atingidos 99.4 ciclos por hora no modelo de aceleração fixa.

Quando feita a comparação entre o acionamento proposto e o instalado é visível um aumento de três ciclos por hora (3.1 %) no modelo proposto e uma redução insignificante no número de ciclos com o modelo atual. O grande ganho será na segurança da máquina uma

vez que o fator de segurança passará de 0.77 (inseguro mesmo pela margem de segurança alargada da Nord de 0.8) para 0.91 entre a utilização do modelo proposto no acionamento instalado e no acionamento proposto.

7.3. Considerações finais

Após simulação do processo efetuado pela Consoveyo, algumas sugestões foram surgindo. A maneira como é efetuado o dimensionamento do transelevador, não entrando com os dados do motor *a priori*, implica não conseguir dimensionar a situação de não escorregamento numa primeira abordagem, dado que a força aplicada pelo motor às rodas é uma variável chave. Isto implica uma nova verificação pós definição do acionamento por parte da Nord e poderá levar a que exista necessidade de novas iterações para atingir o número de ciclos desejado.

O dimensionamento efetuado pela Nord, utilizando a margem de segurança do motor (mais concretamente a capacidade de o mesmo motor debitar um binário quatro vezes superior ao nominal e utilizar uma frequência superior que é consequência de uma voltagem utilizada superior à nominal) leva a que a vida útil do motor seja diminuída, apesar da Nord alemã garantir a segurança do equipamento nestas condições. Ao trabalhar muito próximo dos limites máximos, o motor deixa de ter algumas seguranças quando acontecem acidentes, como um esforço extra derivado de uma prisão num objeto estranho, etc. algumas vezes levando o fator de serviço da redutora a valores inferiores a 1, o que não é desejado apesar de existir algum zelo extra por parte da Nord quando apresenta os valores máximos admissíveis de binário para as redutores, o que leva à própria fábrica mãe a aceitar a instalação de equipamentos com fator de serviço até 0.8 sem preocupações de segurança desde que por curtos períodos de tempo.

O processo de dimensionamento destes equipamentos deverá ser efetuado tendo sempre em conta todos os fatores em simultâneo ao invés do que é realizado neste momento. Este dimensionamento deverá ser efetuado como o que foi aqui exposto uma vez que permite à empresa construtora do equipamento necessitar apenas de efetuar uma verificação de segurança após definição do acionamento por parte da Nord devido a obter, logo à partida, uma melhor perceção das capacidades do equipamento tendo apenas de acertar alguns

fatores que dependem do modelo específico do motor (momento de inércia, peso do motor, etc.).

Isto deve-se a que apesar da estabilidade ser independente do acionamento, o fator de atrito depende diretamente da força aplicada às rodas pelo motor na aceleração e desaceleração levando a que se não forem analisados os dois fatores em conjunto, poderá ser atingida uma aceleração pelo fator de não escorregamento que depois não é possível atingir com o motor e vice-versa devido à baixa capacidade do motor em termos de binário de arranque (como acontece no primeiro caso analisado neste estudo com o caso instalado atualmente).

Posto isto, a melhor maneira será a maneira otimizada em que os dois fatores são dimensionados simultaneamente através de igualar as expressões da menor aceleração obtida pelo motor (equação 4.1 e 4.6) e a maior aceleração na junção da limitação do atrito e estabilidade (equação 4.15 e 4.17 ou 4.19 a 4.22). Deste modo garantimos um acionamento ótimo colocando o fator limitante na estrutura e não no acionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEM 9.311 (09.1982). *Rules for the Design of Storage and Retrieval Machines 2nd edition*. Preparado pelo subcomité técnico “Storage and Retrieval Machines and Stacker Cranes” da IX secção da Federação Europeia da Manutenção (FEM).
- [2] R. Stahl Fordertechnik GMBH. (1998). Manual Técnico “The Big MATERIAL HANDLING Handbook”, F-PH-DEF-1998.
- [3] Nord Drivesystems Group. (Versão 0219). Catálogo Técnico Nord “*Motors M7000*”, 6000602 / 0219.
- [4] Nord Drivesystems Group. (Versão 2317). Catálogo Técnico Nord “*Constant Speeds G1000*”, 6001802 / 2317.

APÊNDICE A

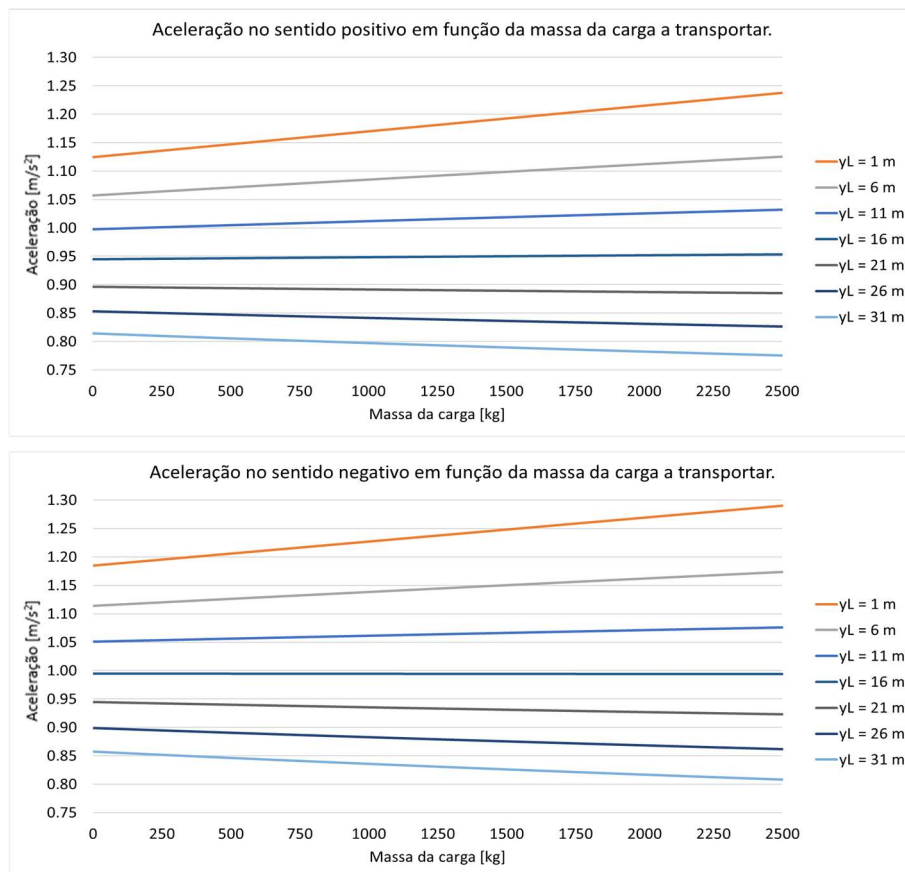


Figura A.1. Evolução da aceleração limitada pelo atrito com o aumento de carga nos dois sentidos.

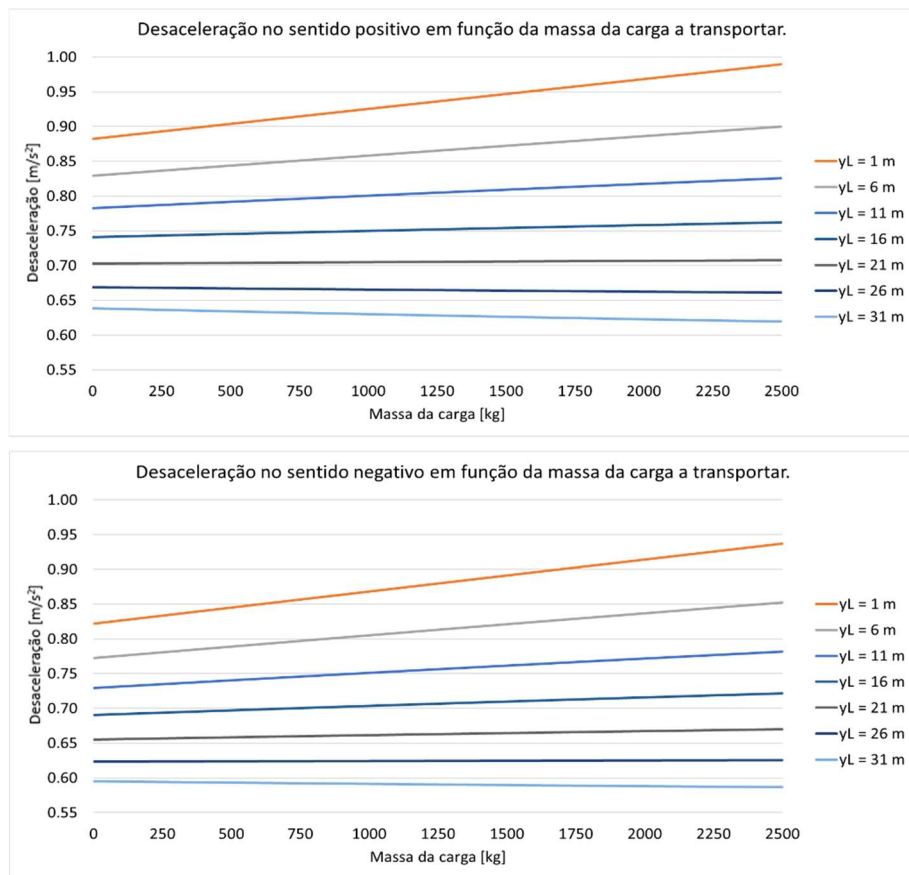


Figura A.2. Evolução da desaceleração limitada pelo atrito com o aumento de carga nos dois sentidos.

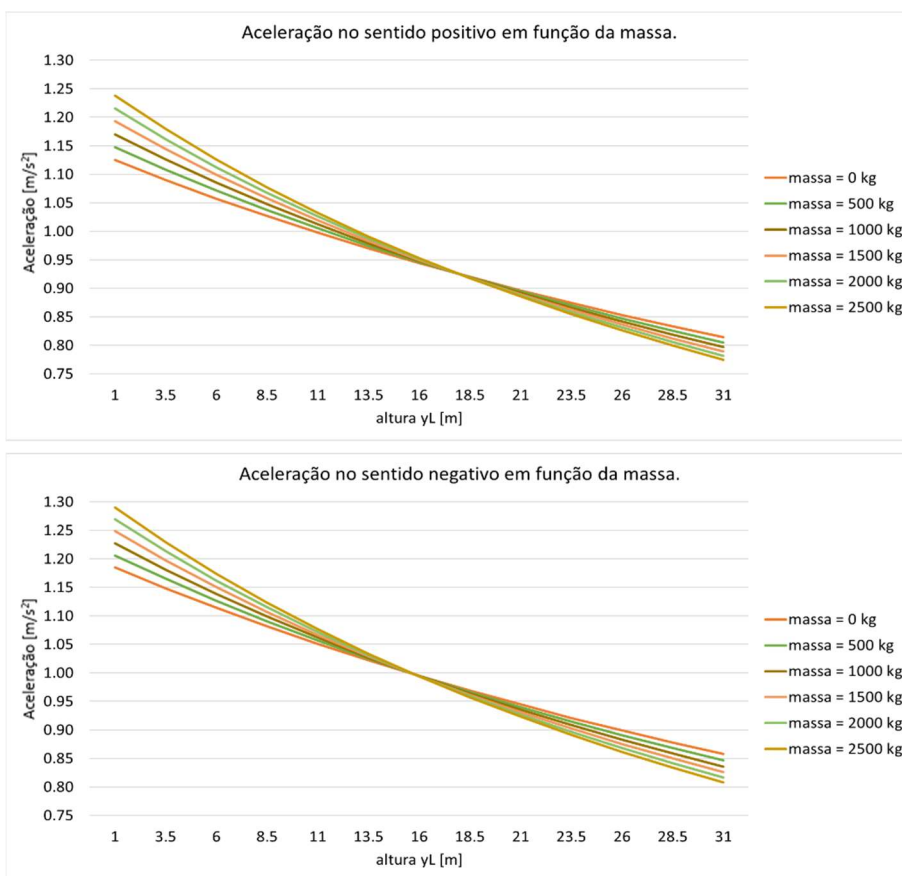


Figura A.3. Evolução da aceleração limitada pelo atrito com o aumento da altura nos dois sentidos.

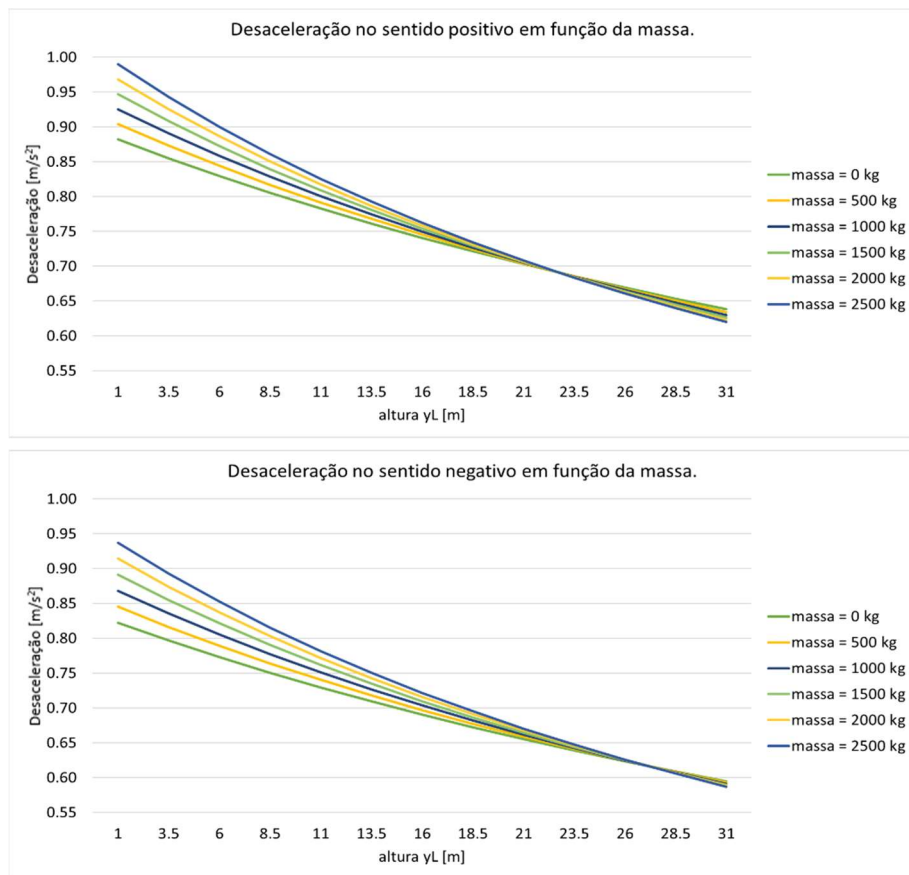


Figura A.4. Evolução da desaceleração limitada pelo atrito com o aumento da altura nos dois sentidos.

APÊNDICE B

Tabela B.1. Distância percorrida na aceleração, limitado pelo atrito.

Sentido Positivo		altura da carga												
Distância percorrida [m]		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0	5.761	5.945	6.128	6.311	6.495	6.678	6.861	7.045	7.228	7.411	7.594	7.778	7.961	
massa= 250	5.704	5.895	6.087	6.279	6.471	6.663	6.854	7.046	7.238	7.430	7.621	7.813	8.005	
massa= 500	5.647	5.847	6.047	6.247	6.447	6.647	6.848	7.048	7.248	7.448	7.648	7.848	8.048	
massa= 750	5.592	5.800	6.008	6.216	6.425	6.633	6.841	7.049	7.257	7.465	7.673	7.882	8.090	
massa= 1000	5.538	5.754	5.970	6.186	6.402	6.618	6.834	7.050	7.267	7.483	7.699	7.915	8.131	
massa= 1250	5.485	5.709	5.933	6.157	6.380	6.604	6.828	7.052	7.276	7.500	7.723	7.947	8.171	
massa= 1500	5.433	5.665	5.896	6.127	6.359	6.590	6.822	7.053	7.285	7.516	7.748	7.979	8.211	
massa= 1750	5.382	5.621	5.860	6.099	6.338	6.577	6.816	7.055	7.294	7.533	7.771	8.010	8.249	
massa= 2000	5.332	5.579	5.825	6.071	6.317	6.564	6.810	7.056	7.302	7.548	7.795	8.041	8.287	
massa= 2250	5.284	5.537	5.790	6.044	6.297	6.551	6.804	7.057	7.311	7.564	7.817	8.071	8.324	
massa= 2500	5.236	5.496	5.756	6.017	6.277	6.538	6.798	7.059	7.319	7.579	7.840	8.100	8.361	

Sentido Negativo		altura da carga												
Distância percorrida [m]		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0	5.469	5.643	5.817	5.991	6.165	6.339	6.513	6.687	6.861	7.035	7.209	7.383	7.557	
massa= 250	5.420	5.603	5.785	5.967	6.149	6.332	6.514	6.696	6.878	7.061	7.243	7.425	7.607	
massa= 500	5.373	5.563	5.753	5.944	6.134	6.324	6.515	6.705	6.895	7.086	7.276	7.466	7.657	
massa= 750	5.326	5.524	5.723	5.921	6.119	6.317	6.516	6.714	6.912	7.110	7.309	7.507	7.705	
massa= 1000	5.280	5.486	5.692	5.898	6.104	6.310	6.516	6.722	6.928	7.134	7.341	7.547	7.753	
massa= 1250	5.235	5.449	5.663	5.876	6.090	6.304	6.517	6.731	6.945	7.158	7.372	7.586	7.799	
massa= 1500	5.191	5.412	5.633	5.855	6.076	6.297	6.518	6.739	6.960	7.182	7.403	7.624	7.845	
massa= 1750	5.148	5.376	5.605	5.833	6.062	6.290	6.519	6.747	6.976	7.204	7.433	7.661	7.890	
massa= 2000	5.105	5.341	5.577	5.812	6.048	6.284	6.520	6.755	6.991	7.227	7.463	7.698	7.934	
massa= 2250	5.063	5.306	5.549	5.792	6.035	6.278	6.520	6.763	7.006	7.249	7.492	7.735	7.977	
massa= 2500	5.022	5.272	5.522	5.772	6.022	6.271	6.521	6.771	7.021	7.271	7.520	7.770	8.020	

Tabela B.2. Distância percorrida na desaceleração, limitado pelo atrito.

Sentido Positivo		altura da carga												
Distância percorrida [m]		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0	7.347	7.580	7.814	8.048	8.282	8.515	8.749	8.983	9.216	9.450	9.684	9.918	10.151	
massa= 250	7.257	7.501	7.745	7.989	8.233	8.477	8.721	8.965	9.209	9.453	9.697	9.941	10.185	
massa= 500	7.171	7.425	7.679	7.933	8.187	8.441	8.695	8.949	9.203	9.457	9.711	9.965	10.219	
massa= 750	7.086	7.350	7.613	7.877	8.141	8.405	8.668	8.932	9.196	9.460	9.723	9.987	10.251	
massa= 1000	7.003	7.277	7.550	7.823	8.096	8.370	8.643	8.916	9.189	9.463	9.736	10.009	10.282	
massa= 1250	6.923	7.205	7.488	7.770	8.053	8.335	8.618	8.901	9.183	9.466	9.748	10.031	10.313	
massa= 1500	6.844	7.136	7.427	7.719	8.011	8.302	8.594	8.885	9.177	9.468	9.760	10.052	10.343	
massa= 1750	6.768	7.068	7.368	7.669	7.969	8.270	8.570	8.870	9.171	9.471	9.772	10.072	10.372	
massa= 2000	6.693	7.002	7.311	7.620	7.929	8.238	8.547	8.856	9.165	9.474	9.783	10.092	10.401	
massa= 2250	6.619	6.937	7.254	7.572	7.889	8.207	8.524	8.842	9.159	9.477	9.794	10.112	10.429	
massa= 2500	6.548	6.874	7.199	7.525	7.851	8.176	8.502	8.828	9.154	9.479	9.805	10.131	10.456	

Sentido Negativo		altura da carga												
Distância percorrida [m]		1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0	7.884	8.135	8.386	8.637	8.887	9.138	9.389	9.640	9.891	10.142	10.393	10.643	10.894	
massa= 250	7.774	8.036	8.297	8.559	8.820	9.081	9.343	9.604	9.866	10.127	10.388	10.650	10.911	
massa= 500	7.668	7.940	8.211	8.483	8.754	9.026	9.298	9.569	9.841	10.113	10.384	10.656	10.927	
massa= 750	7.565	7.846	8.128	8.409	8.691	8.972	9.254	9.535	9.817	10.099	10.380	10.662	10.943	
massa= 1000	7.464	7.755	8.046	8.338	8.629	8.920	9.211	9.503	9.794	10.085	10.376	10.668	10.959	
massa= 1250	7.366	7.667	7.968	8.268	8.569	8.869	9.170	9.471	9.771	10.072	10.373	10.673	10.974	
massa= 1500	7.271	7.581	7.891	8.200	8.510	8.820	9.130	9.440	9.749	10.059	10.369	10.679	10.988	
massa= 1750	7.179	7.497	7.816	8.135	8.453	8.772	9.091	9.409	9.728	10.047	10.365	10.684	11.003	
massa= 2000	7.089	7.416	7.743	8.071	8.398	8.725	9.052	9.380	9.707	10.034	10.362	10.689	11.016	
massa= 2250	7.001	7.337	7.672	8.008	8.344	8.680	9.015	9.351	9.687	10.023	10.358	10.694	11.030	
massa= 2500	6.915	7.259	7.603	7.947	8.291	8.635	8.979	9.323	9.667	10.011	10.355	10.699	11.043	

Tabela B.3. Distância percorrida com aceleração nula, limitado pelo atrito.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Distância percorrida [m]		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	28.709	28.475	28.241	28.008	27.774	27.540	27.306	27.073	26.839	26.605	26.371	26.138	25.904	
massa= 250 kg	28.847	28.603	28.359	28.115	27.871	27.627	27.383	27.139	26.895	26.651	26.407	26.163	25.919	
massa= 500 kg	28.982	28.728	28.474	28.220	27.966	27.712	27.458	27.204	26.950	26.696	26.442	26.188	25.934	
massa= 750 kg	29.114	28.850	28.586	28.323	28.059	27.795	27.531	27.268	27.004	26.740	26.476	26.213	25.949	
massa= 1000 kg	29.243	28.969	28.696	28.423	28.150	27.876	27.603	27.330	27.057	26.783	26.510	26.237	25.964	
massa= 1250 kg	29.368	29.086	28.803	28.521	28.238	27.956	27.673	27.391	27.108	26.826	26.543	26.260	25.978	
massa= 1500 kg	29.491	29.200	28.908	28.616	28.325	28.033	27.742	27.450	27.159	26.867	26.575	26.284	25.992	
massa= 1750 kg	29.611	29.311	29.010	28.710	28.410	28.109	27.809	27.508	27.208	26.908	26.607	26.307	26.006	
massa= 2000 kg	29.729	29.420	29.111	28.802	28.493	28.184	27.875	27.565	27.256	26.947	26.638	26.329	26.020	
massa= 2250 kg	29.844	29.526	29.209	28.891	28.574	28.256	27.939	27.621	27.304	26.986	26.669	26.352	26.034	
massa= 2500 kg	29.956	29.630	29.305	28.979	28.653	28.327	28.002	27.676	27.350	27.025	26.699	26.373	26.048	

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Distância percorrida [m]		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	28.396	28.222	28.048	27.874	27.700	27.526	27.352	27.178	27.004	26.830	26.656	26.482	26.308	
massa= 250 kg	28.544	28.362	28.179	27.997	27.815	27.633	27.450	27.268	27.086	26.904	26.721	26.539	26.357	
massa= 500 kg	28.688	28.497	28.307	28.117	27.926	27.736	27.546	27.355	27.165	26.975	26.784	26.594	26.404	
massa= 750 kg	28.828	28.630	28.431	28.233	28.035	27.837	27.638	27.440	27.242	27.044	26.845	26.647	26.449	
massa= 1000 kg	28.964	28.758	28.552	28.346	28.140	27.934	27.728	27.522	27.316	27.110	26.904	26.698	26.492	
massa= 1250 kg	29.098	28.884	28.670	28.457	28.243	28.030	27.816	27.602	27.389	27.175	26.961	26.748	26.534	
massa= 1500 kg	29.228	29.007	28.786	28.564	28.343	28.122	27.901	27.680	27.459	27.238	27.016	26.795	26.574	
massa= 1750 kg	29.355	29.126	28.898	28.669	28.441	28.212	27.984	27.755	27.527	27.298	27.070	26.841	26.613	
massa= 2000 kg	29.479	29.243	29.007	28.772	28.536	28.300	28.064	27.829	27.593	27.357	27.122	26.886	26.650	
massa= 2250 kg	29.600	29.357	29.114	28.872	28.629	28.386	28.143	27.900	27.657	27.415	27.172	26.929	26.686	
massa= 2500 kg	29.718	29.469	29.219	28.969	28.719	28.469	28.219	27.970	27.720	27.470	27.220	26.970	26.721	

Tabela B.4. Tempo decorrido com aceleração nula, limitado pelo atrito.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.97	7.91	7.84	7.78	7.71	7.65	7.59	7.52	7.46	7.39	7.33	7.26	7.20	
massa= 250 kg	8.01	7.95	7.88	7.81	7.74	7.67	7.61	7.54	7.47	7.40	7.34	7.27	7.20	
massa= 500 kg	8.05	7.98	7.91	7.84	7.77	7.70	7.63	7.56	7.49	7.42	7.35	7.27	7.20	
massa= 750 kg	8.09	8.01	7.94	7.87	7.79	7.72	7.65	7.57	7.50	7.43	7.35	7.28	7.21	
massa= 1000 kg	8.12	8.05	7.97	7.90	7.82	7.74	7.67	7.59	7.52	7.44	7.36	7.29	7.21	
massa= 1250 kg	8.16	8.08	8.00	7.92	7.84	7.77	7.69	7.61	7.53	7.45	7.37	7.29	7.22	
massa= 1500 kg	8.19	8.11	8.03	7.95	7.87	7.79	7.71	7.63	7.54	7.46	7.38	7.30	7.22	
massa= 1750 kg	8.23	8.14	8.06	7.98	7.89	7.81	7.72	7.64	7.56	7.47	7.39	7.31	7.22	
massa= 2000 kg	8.26	8.17	8.09	8.00	7.91	7.83	7.74	7.66	7.57	7.49	7.40	7.31	7.23	
massa= 2250 kg	8.29	8.20	8.11	8.03	7.94	7.85	7.76	7.67	7.58	7.50	7.41	7.32	7.23	
massa= 2500 kg	8.32	8.23	8.14	8.05	7.96	7.87	7.78	7.69	7.60	7.51	7.42	7.33	7.24	

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.89	7.84	7.79	7.74	7.69	7.65	7.60	7.55	7.50	7.45	7.40	7.36	7.31	
massa= 250 kg	7.93	7.88	7.83	7.78	7.73	7.68	7.63	7.57	7.52	7.47	7.42	7.37	7.32	
massa= 500 kg	7.97	7.92	7.86	7.81	7.76	7.70	7.65	7.60	7.55	7.49	7.44	7.39	7.33	
massa= 750 kg	8.01	7.95	7.90	7.84	7.79	7.73	7.68	7.62	7.57	7.51	7.46	7.40	7.35	
massa= 1000 kg	8.05	7.99	7.93	7.87	7.82	7.76	7.70	7.65	7.59	7.53	7.47	7.42	7.36	
massa= 1250 kg	8.08	8.02	7.96	7.90	7.85	7.79	7.73	7.67	7.61	7.55	7.49	7.43	7.37	
massa= 1500 kg	8.12	8.06	8.00	7.93	7.87	7.81	7.75	7.69	7.63	7.57	7.50	7.44	7.38	
massa= 1750 kg	8.15	8.09	8.03	7.96	7.90	7.84	7.77	7.71	7.65	7.58	7.52	7.46	7.39	
massa= 2000 kg	8.19	8.12	8.06	7.99	7.93	7.86	7.80	7.73	7.66	7.60	7.53	7.47	7.40	
massa= 2250 kg	8.22	8.15	8.09	8.02	7.95	7.88	7.82	7.75	7.68	7.62	7.55	7.48	7.41	
massa= 2500 kg	8.26	8.19	8.12	8.05	7.98	7.91	7.84	7.77	7.70	7.63	7.56	7.49	7.42	

APÊNDICE C

Tabela C.1. Tempo decorrido na aceleração do cenário final.

Sentido Positivo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09
massa= 250 kg	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13
massa= 500 kg	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17
massa= 750 kg	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22
massa= 1000 kg	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26
massa= 1250 kg	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31
massa= 1500 kg	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35
massa= 1750 kg	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40
massa= 2000 kg	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44
massa= 2250 kg	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48
massa= 2500 kg	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53

Sentido Negativo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09
massa= 250 kg	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13
massa= 500 kg	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17
massa= 750 kg	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22
massa= 1000 kg	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26
massa= 1250 kg	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31
massa= 1500 kg	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35
massa= 1750 kg	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40
massa= 2000 kg	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44
massa= 2250 kg	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48
massa= 2500 kg	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53

Tabela C.2. Tempo decorrido na desaceleração do cenário final.

Sentido Positivo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.08	4.21	4.34	4.47	4.60	4.73	4.86	4.99	5.12	5.25	5.38	5.51	5.64
massa= 250 kg	4.03	4.17	4.30	4.44	4.57	4.71	4.85	4.98	5.12	5.25	5.39	5.52	5.66
massa= 500 kg	3.98	4.12	4.27	4.41	4.55	4.69	4.83	4.97	5.11	5.25	5.39	5.54	5.68
massa= 750 kg	3.94	4.08	4.23	4.38	4.52	4.67	4.82	4.96	5.11	5.26	5.40	5.55	5.69
massa= 1000 kg	3.89	4.04	4.19	4.35	4.50	4.65	4.80	4.95	5.11	5.26	5.41	5.56	5.71
massa= 1250 kg	3.85	4.00	4.16	4.32	4.47	4.63	4.79	4.94	5.10	5.26	5.42	5.57	5.73
massa= 1500 kg	3.80	3.96	4.13	4.29	4.45	4.61	4.77	4.94	5.10	5.26	5.42	5.58	5.75
massa= 1750 kg	3.82	3.93	4.09	4.26	4.43	4.59	4.76	4.93	5.09	5.26	5.43	5.60	5.76
massa= 2000 kg	3.85	3.89	4.06	4.23	4.40	4.58	4.75	4.92	5.09	5.26	5.43	5.61	5.78
massa= 2250 kg	3.87	3.87	4.03	4.21	4.38	4.56	4.74	4.91	5.09	5.26	5.44	5.62	5.79
massa= 2500 kg	3.90	3.90	4.00	4.18	4.36	4.54	4.72	4.90	5.09	5.27	5.45	5.63	5.81

Sentido Negativo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.38	4.52	4.66	4.80	4.94	5.08	5.22	5.36	5.49	5.63	5.77	5.91	6.05
massa= 250 kg	4.32	4.46	4.61	4.75	4.90	5.05	5.19	5.34	5.48	5.63	5.77	5.92	6.06
massa= 500 kg	4.26	4.41	4.56	4.71	4.86	5.01	5.17	5.32	5.47	5.62	5.77	5.92	6.07
massa= 750 kg	4.20	4.36	4.52	4.67	4.83	4.98	5.14	5.30	5.45	5.61	5.77	5.92	6.08
massa= 1000 kg	4.15	4.31	4.47	4.63	4.79	4.96	5.12	5.28	5.44	5.60	5.76	5.93	6.09
massa= 1250 kg	4.09	4.26	4.43	4.59	4.76	4.93	5.09	5.26	5.43	5.60	5.76	5.93	6.10
massa= 1500 kg	4.04	4.21	4.38	4.56	4.73	4.90	5.07	5.24	5.42	5.59	5.76	5.93	6.10
massa= 1750 kg	3.99	4.17	4.34	4.52	4.70	4.87	5.05	5.23	5.40	5.58	5.76	5.94	6.11
massa= 2000 kg	3.94	4.12	4.30	4.48	4.67	4.85	5.03	5.21	5.39	5.57	5.76	5.94	6.12
massa= 2250 kg	3.89	4.08	4.26	4.45	4.64	4.82	5.01	5.20	5.38	5.57	5.75	5.94	6.13
massa= 2500 kg	3.90	4.03	4.22	4.42	4.61	4.80	4.99	5.18	5.37	5.56	5.75	5.94	6.13

Tabela C.3. Distância percorrida na aceleração do cenário final.

Sentido Positivo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956
massa= 250 kg	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036
massa= 500 kg	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115
massa= 750 kg	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194
massa= 1000 kg	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274
massa= 1250 kg	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353
massa= 1500 kg	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433
massa= 1750 kg	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512
massa= 2000 kg	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592
massa= 2250 kg	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671
massa= 2500 kg	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751

Sentido Negativo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956	10.956
massa= 250 kg	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036	11.036
massa= 500 kg	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115	11.115
massa= 750 kg	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194	11.194
massa= 1000 kg	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274	11.274
massa= 1250 kg	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353	11.353
massa= 1500 kg	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433	11.433
massa= 1750 kg	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512	11.512
massa= 2000 kg	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592	11.592
massa= 2250 kg	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671	11.671
massa= 2500 kg	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751	11.751

Tabela C.4. Distância percorrida na desaceleração do cenário final.

Sentido Positivo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.347	7.580	7.814	8.048	8.282	8.515	8.749	8.983	9.216	9.450	9.684	9.918	10.151
massa= 250 kg	7.257	7.501	7.745	7.989	8.233	8.477	8.721	8.965	9.209	9.453	9.697	9.941	10.185
massa= 500 kg	7.171	7.425	7.679	7.933	8.187	8.441	8.695	8.949	9.203	9.457	9.711	9.965	10.219
massa= 750 kg	7.086	7.350	7.613	7.877	8.141	8.405	8.668	8.932	9.196	9.460	9.723	9.987	10.251
massa= 1000 kg	7.003	7.277	7.550	7.823	8.096	8.370	8.643	8.916	9.189	9.463	9.736	10.009	10.282
massa= 1250 kg	6.923	7.205	7.488	7.770	8.053	8.335	8.618	8.901	9.183	9.466	9.748	10.031	10.313
massa= 1500 kg	6.844	7.136	7.427	7.719	8.011	8.302	8.594	8.885	9.177	9.468	9.760	10.052	10.343
massa= 1750 kg	6.884	7.068	7.368	7.669	7.969	8.270	8.570	8.870	9.171	9.471	9.772	10.072	10.372
massa= 2000 kg	6.928	7.002	7.311	7.620	7.929	8.238	8.547	8.856	9.165	9.474	9.783	10.092	10.401
massa= 2250 kg	6.972	6.972	7.254	7.572	7.889	8.207	8.524	8.842	9.159	9.477	9.794	10.112	10.429
massa= 2500 kg	7.016	7.016	7.199	7.525	7.851	8.176	8.502	8.828	9.154	9.479	9.805	10.131	10.456

Sentido Negativo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	4	6	9	11	14	16	19	21	24	26	29	31
massa= 0 kg	7.884	8.135	8.386	8.637	8.887	9.138	9.389	9.640	9.891	10.142	10.393	10.643	10.894
massa= 250 kg	7.774	8.036	8.297	8.559	8.820	9.081	9.343	9.604	9.866	10.127	10.388	10.650	10.911
massa= 500 kg	7.668	7.940	8.211	8.483	8.754	9.026	9.298	9.569	9.841	10.113	10.384	10.656	10.927
massa= 750 kg	7.565	7.846	8.128	8.409	8.691	8.972	9.254	9.535	9.817	10.099	10.380	10.662	10.943
massa= 1000 kg	7.464	7.755	8.046	8.338	8.629	8.920	9.211	9.503	9.794	10.085	10.376	10.668	10.959
massa= 1250 kg	7.366	7.667	7.968	8.268	8.569	8.869	9.170	9.471	9.771	10.072	10.373	10.673	10.974
massa= 1500 kg	7.271	7.581	7.891	8.200	8.510	8.820	9.130	9.440	9.749	10.059	10.369	10.679	10.988
massa= 1750 kg	7.179	7.497	7.816	8.135	8.453	8.772	9.091	9.409	9.728	10.047	10.365	10.684	11.003
massa= 2000 kg	7.089	7.416	7.743	8.071	8.398	8.725	9.052	9.380	9.707	10.034	10.362	10.689	11.016
massa= 2250 kg	7.001	7.337	7.672	8.008	8.344	8.680	9.015	9.351	9.687	10.023	10.358	10.694	11.030
massa= 2500 kg	7.016	7.259	7.603	7.947	8.291	8.635	8.979	9.323	9.667	10.011	10.355	10.699	11.043

Tabela C.5. Distância percorrida com aceleração nula no cenário final.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Distância percorrida [m]		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	23.697	23.463	23.230	22.996	22.762	22.528	22.295	22.061	21.827	21.593	21.360	21.126	20.892	
massa= 250 kg	23.707	23.463	23.219	22.975	22.731	22.487	22.243	21.999	21.755	21.511	21.267	21.023	20.779	
massa= 500 kg	23.714	23.460	23.206	22.952	22.698	22.444	22.190	21.936	21.682	21.428	21.174	20.920	20.666	
massa= 750 kg	23.720	23.456	23.192	22.929	22.665	22.401	22.137	21.874	21.610	21.346	21.082	20.819	20.555	
massa= 1000 kg	23.723	23.450	23.176	22.903	22.630	22.357	22.083	21.810	21.537	21.264	20.990	20.717	20.444	
massa= 1250 kg	23.724	23.441	23.159	22.876	22.594	22.311	22.029	21.746	21.464	21.181	20.899	20.616	20.334	
massa= 1500 kg	23.723	23.432	23.140	22.848	22.557	22.265	21.974	21.682	21.391	21.099	20.807	20.516	20.224	
massa= 1750 kg	23.604	23.420	23.119	22.819	22.519	22.218	21.918	21.617	21.317	21.017	20.716	20.416	20.115	
massa= 2000 kg	23.480	23.407	23.098	22.789	22.479	22.170	21.861	21.552	21.243	20.934	20.625	20.316	20.007	
massa= 2250 kg	23.357	23.357	23.074	22.757	22.439	22.122	21.804	21.487	21.169	20.852	20.535	20.217	19.900	
massa= 2500 kg	23.233	23.233	23.050	22.724	22.398	22.072	21.747	21.421	21.095	20.770	20.444	20.118	19.793	

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Distância percorrida [m]		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909	22.909
massa= 250 kg	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929	22.929
massa= 500 kg	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945	22.945
massa= 750 kg	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960	22.960
massa= 1000 kg	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971	22.971
massa= 1250 kg	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980
massa= 1500 kg	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986	22.986
massa= 1750 kg	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991	22.991
massa= 2000 kg	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992
massa= 2250 kg	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992	22.992
massa= 2500 kg	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990

Tabela C.6. Tempo decorrido com aceleração nula no cenário final.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]		altura de chegada da carga												
partida $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	6.58	6.52	6.45	6.39	6.32	6.26	6.19	6.13	6.06	6.00	5.93	5.87	5.80	
massa= 250 kg	6.59	6.52	6.45	6.38	6.31	6.25	6.18	6.11	6.04	5.98	5.91	5.84	5.77	
massa= 500 kg	6.59	6.52	6.44	6.37	6.30	6.22	6.15	6.08	6.00	5.93	5.86	5.78	5.71	
massa= 750 kg	6.59	6.52	6.44	6.37	6.30	6.22	6.15	6.08	6.00	5.93	5.86	5.78	5.71	
massa= 1000 kg	6.59	6.51	6.44	6.36	6.29	6.21	6.13	6.06	5.98	5.91	5.83	5.75	5.68	
massa= 1250 kg	6.59	6.51	6.43	6.35	6.28	6.20	6.12	6.04	5.96	5.88	5.81	5.73	5.65	
massa= 1500 kg	6.59	6.51	6.43	6.35	6.27	6.18	6.10	6.02	5.94	5.86	5.78	5.70	5.62	
massa= 1750 kg	6.56	6.51	6.42	6.34	6.26	6.17	6.09	6.00	5.92	5.84	5.75	5.67	5.59	
massa= 2000 kg	6.52	6.50	6.42	6.33	6.24	6.16	6.07	5.99	5.90	5.82	5.73	5.64	5.56	
massa= 2250 kg	6.49	6.49	6.41	6.32	6.23	6.14	6.06	5.97	5.88	5.79	5.70	5.62	5.53	
massa= 2500 kg	6.45	6.45	6.40	6.31	6.22	6.13	6.04	5.95	5.86	5.77	5.68	5.59	5.50	

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]		altura de partida da carga												
chegada $y_i =$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
massa= 250 kg	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37
massa= 500 kg	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37	6.37
massa= 750 kg	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38
massa= 1000 kg	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38
massa= 1250 kg	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38
massa= 1500 kg	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39
massa= 1750 kg	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39
massa= 2000 kg	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39
massa= 2250 kg	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39
massa= 2500 kg	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39

APÊNDICE D

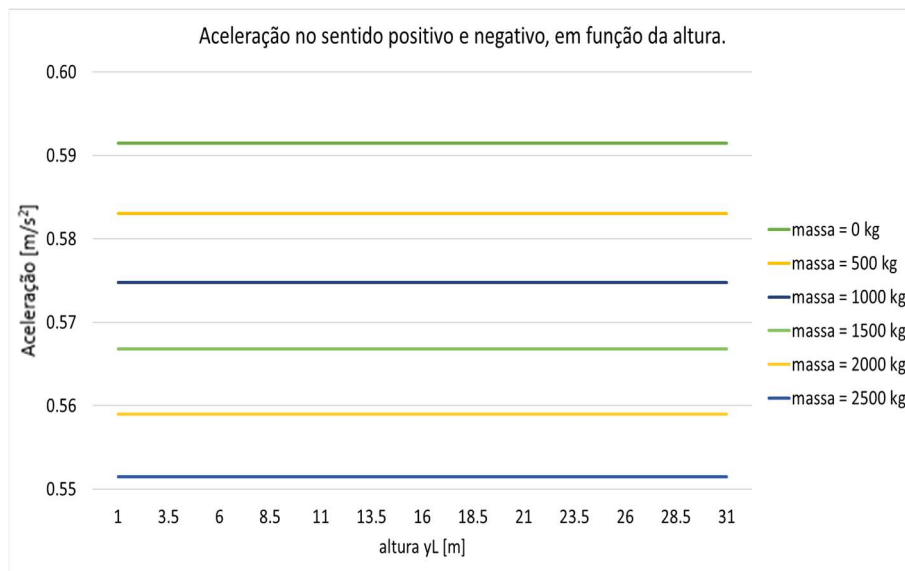


Figura D.1. Evolução da aceleração no cenário final, com o aumento da altura nos dois sentidos.

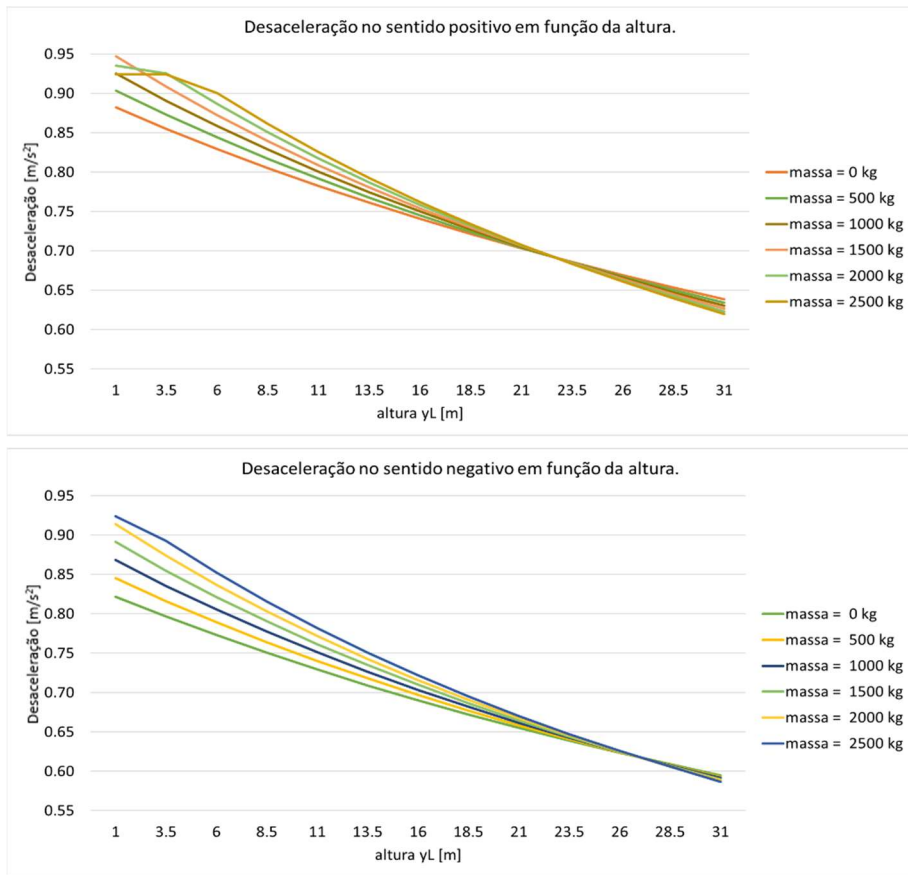


Figura D.2. Evolução da desaceleração no cenário final, com o aumento da altura nos dois sentidos.

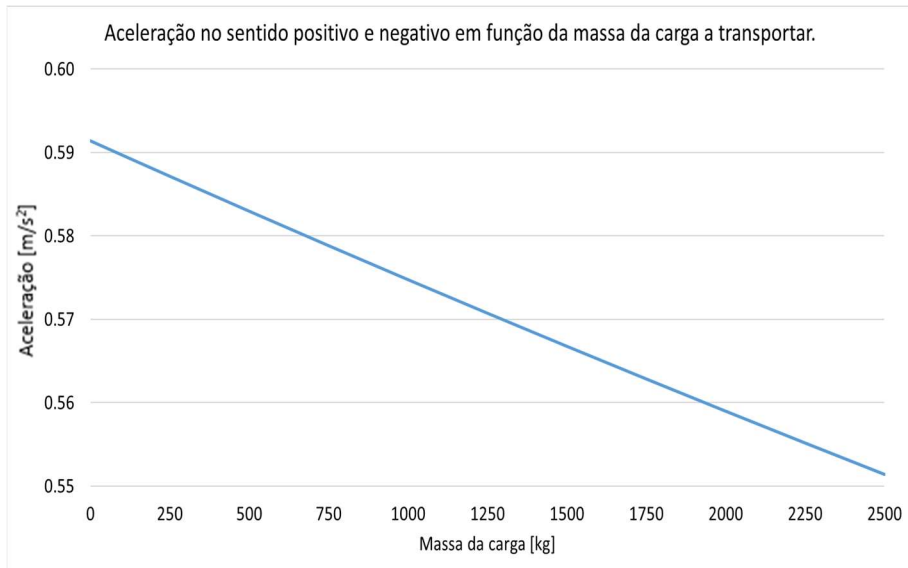


Figura D.3. Evolução da aceleração no cenário final, com o aumento da massa nos dois sentidos.

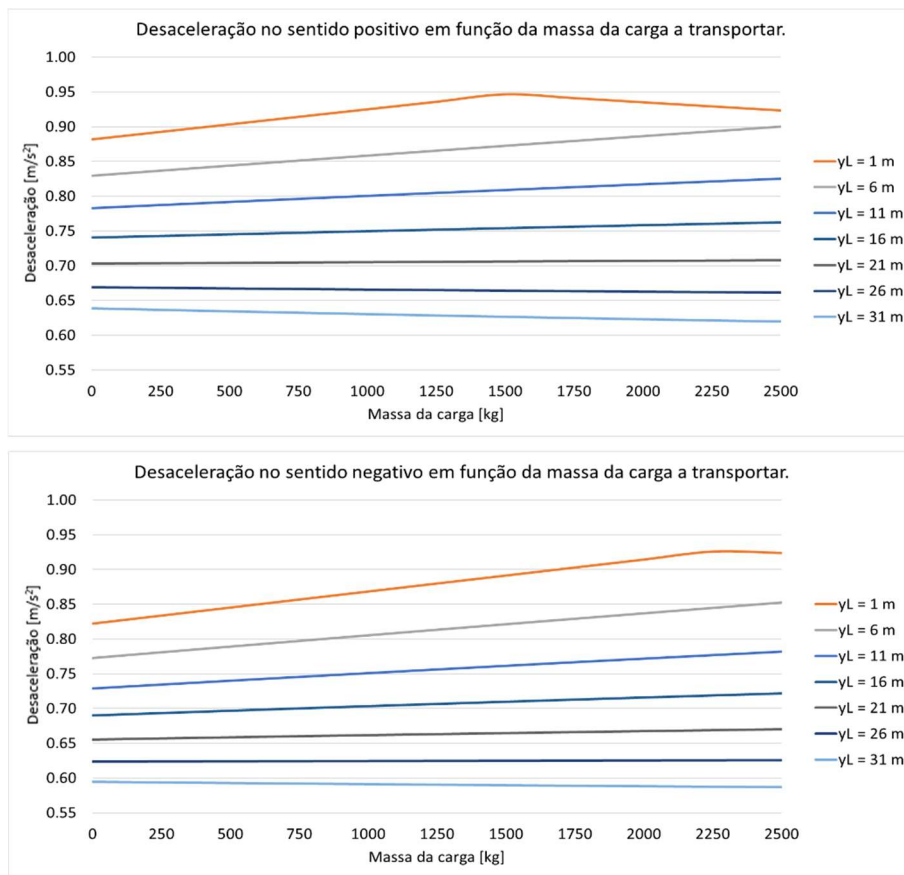


Figura D.4. Evolução da desaceleração no cenário final, com o aumento da massa nos dois sentidos.

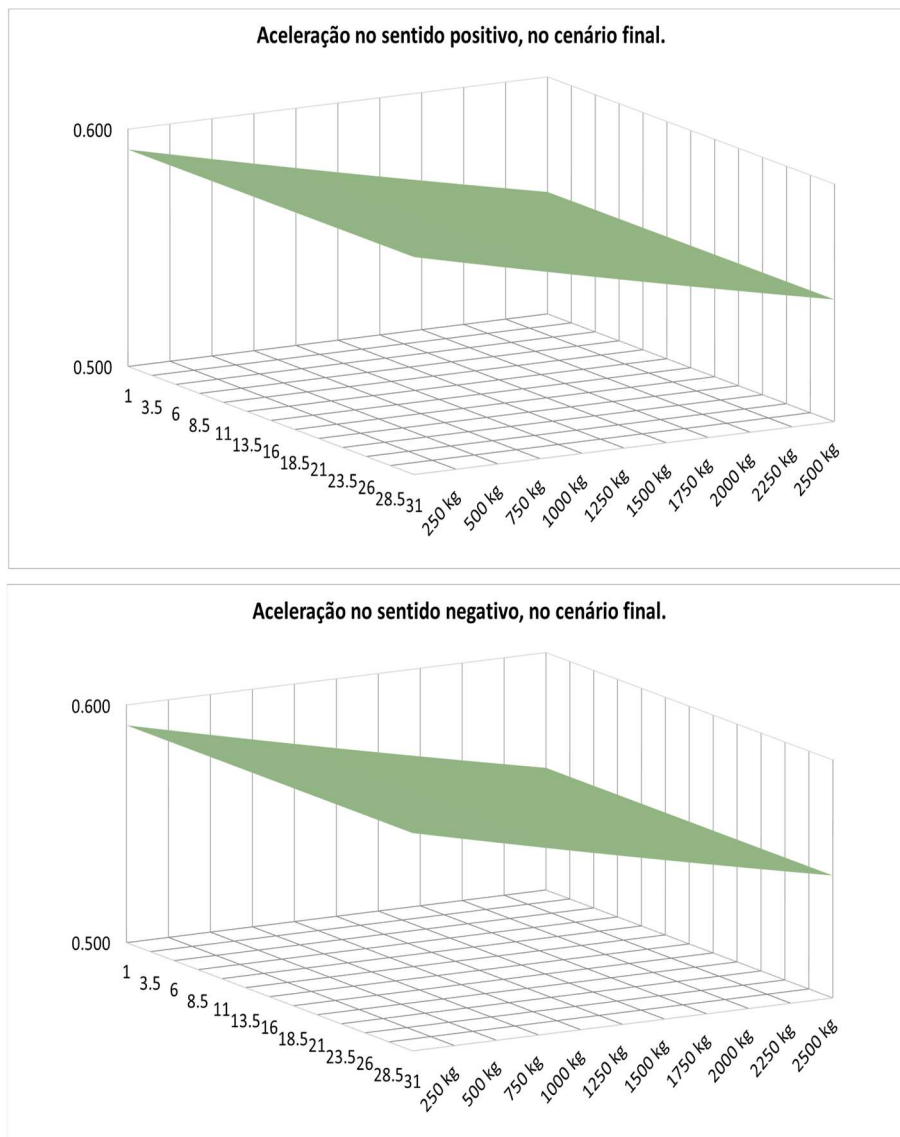


Figura D.5. Evolução da aceleração no cenário final, com o aumento de carga nos dois sentidos.

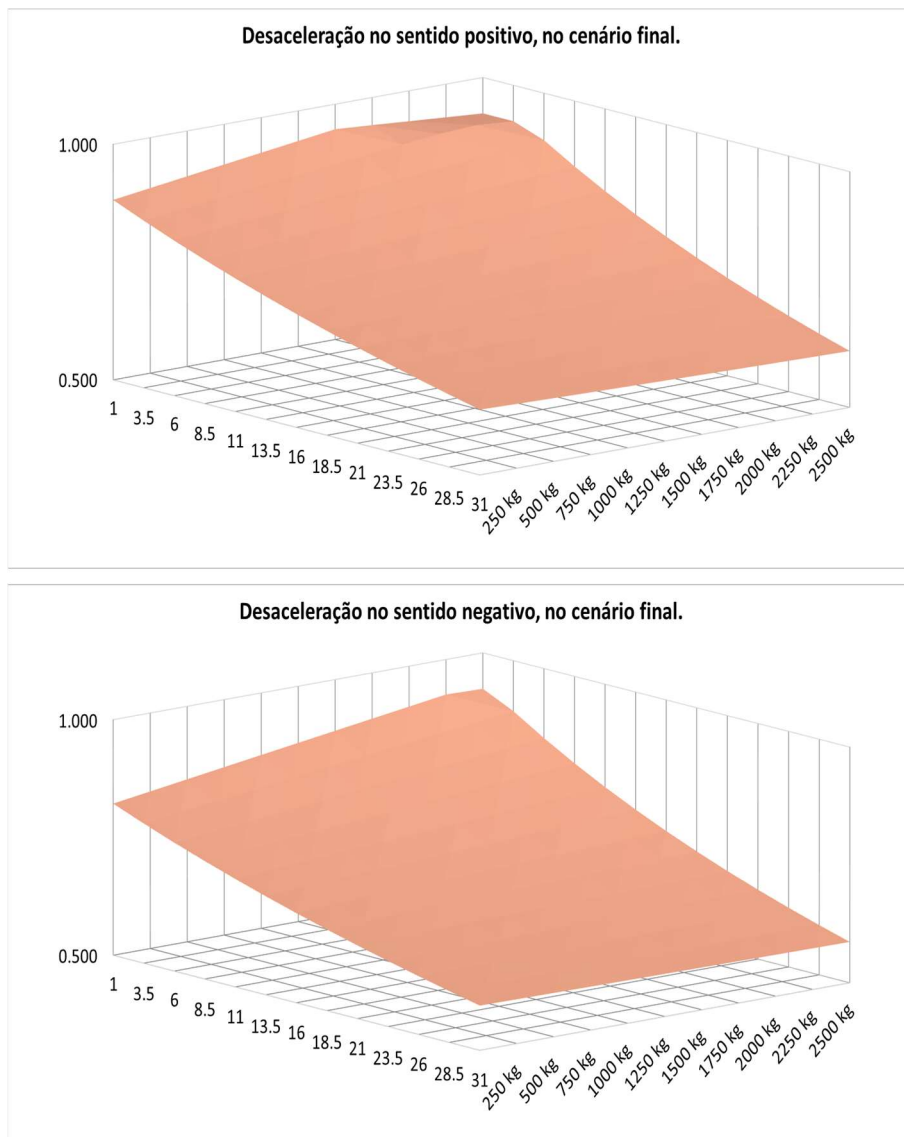


Figura D.6. Evolução da desaceleração no cenário final, com o aumento de carga nos dois sentidos.

APÊNDICE E

Tabela E.1. Variação da aceleração final otimizada, variando a altura e carga.

Sentido Positivo	aceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.764	0.741	0.719	0.698	0.678	0.660	0.642	0.626	0.610	0.595	0.581	0.567	0.554
massa= 250 kg	0.776	0.751	0.727	0.705	0.684	0.665	0.646	0.629	0.612	0.596	0.581	0.567	0.554
massa= 500 kg	0.787	0.760	0.735	0.712	0.690	0.669	0.650	0.632	0.614	0.598	0.582	0.568	0.554
massa= 750 kg	0.799	0.770	0.744	0.719	0.696	0.674	0.654	0.635	0.616	0.599	0.583	0.568	0.553
massa= 1000 kg	0.810	0.780	0.752	0.726	0.702	0.679	0.657	0.637	0.618	0.601	0.584	0.568	0.553
massa= 1250 kg	0.822	0.790	0.760	0.733	0.707	0.683	0.661	0.640	0.621	0.602	0.585	0.568	0.553
massa= 1500 kg	0.833	0.799	0.768	0.739	0.713	0.688	0.664	0.643	0.622	0.603	0.585	0.569	0.553
massa= 1750 kg	0.845	0.809	0.776	0.746	0.718	0.692	0.668	0.645	0.624	0.605	0.586	0.569	0.552
massa= 2000 kg	0.856	0.819	0.784	0.753	0.723	0.696	0.671	0.648	0.626	0.606	0.587	0.569	0.552
massa= 2250 kg	0.868	0.828	0.792	0.759	0.729	0.701	0.675	0.651	0.628	0.607	0.588	0.569	0.552
massa= 2500 kg	0.879	0.838	0.800	0.765	0.734	0.705	0.678	0.653	0.630	0.608	0.588	0.569	0.552

Sentido Negativo	aceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.824	0.799	0.775	0.753	0.732	0.712	0.693	0.675	0.658	0.642	0.626	0.612	0.598
massa= 250 kg	0.835	0.808	0.783	0.759	0.737	0.716	0.696	0.677	0.659	0.642	0.626	0.611	0.596
massa= 500 kg	0.846	0.817	0.790	0.765	0.742	0.719	0.698	0.679	0.660	0.642	0.626	0.610	0.595
massa= 750 kg	0.857	0.826	0.798	0.771	0.746	0.723	0.701	0.681	0.661	0.643	0.625	0.609	0.593
massa= 1000 kg	0.867	0.835	0.805	0.777	0.751	0.727	0.704	0.682	0.662	0.643	0.625	0.608	0.592
massa= 1250 kg	0.878	0.844	0.812	0.783	0.756	0.730	0.706	0.684	0.663	0.643	0.625	0.607	0.591
massa= 1500 kg	0.889	0.853	0.820	0.789	0.760	0.734	0.709	0.686	0.664	0.644	0.625	0.607	0.590
massa= 1750 kg	0.900	0.862	0.827	0.795	0.765	0.737	0.711	0.687	0.665	0.644	0.624	0.606	0.588
massa= 2000 kg	0.910	0.870	0.834	0.800	0.769	0.740	0.714	0.689	0.666	0.644	0.624	0.605	0.587
massa= 2250 kg	0.921	0.879	0.841	0.806	0.774	0.744	0.716	0.691	0.667	0.645	0.624	0.604	0.586
massa= 2500 kg	0.932	0.888	0.848	0.811	0.778	0.747	0.719	0.692	0.668	0.645	0.624	0.604	0.585

Tabela E.2. Variação da desaceleração final otimizada, variando a altura e carga.

Sentido Positivo	desaceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.846	0.820	0.795	0.772	0.751	0.730	0.711	0.692	0.675	0.658	0.643	0.627	0.613
massa= 250 kg	0.856	0.829	0.803	0.778	0.756	0.734	0.713	0.694	0.676	0.659	0.642	0.626	0.611
massa= 500 kg	0.867	0.838	0.810	0.784	0.760	0.737	0.716	0.696	0.677	0.659	0.641	0.625	0.610
massa= 750 kg	0.878	0.847	0.818	0.790	0.765	0.741	0.719	0.697	0.678	0.659	0.641	0.624	0.608
massa= 1000 kg	0.889	0.856	0.825	0.796	0.769	0.744	0.721	0.699	0.678	0.659	0.640	0.623	0.607
massa= 1250 kg	0.899	0.864	0.832	0.802	0.774	0.748	0.723	0.701	0.679	0.659	0.640	0.622	0.605
massa= 1500 kg	0.910	0.873	0.839	0.808	0.778	0.751	0.726	0.702	0.680	0.659	0.639	0.621	0.604
massa= 1750 kg	0.921	0.882	0.846	0.813	0.783	0.754	0.728	0.704	0.681	0.659	0.639	0.620	0.602
massa= 2000 kg	0.932	0.891	0.853	0.819	0.787	0.758	0.730	0.705	0.681	0.659	0.639	0.619	0.601
massa= 2250 kg	0.942	0.899	0.860	0.824	0.791	0.761	0.733	0.707	0.682	0.659	0.638	0.618	0.599
massa= 2500 kg	0.953	0.908	0.867	0.830	0.796	0.764	0.735	0.708	0.683	0.660	0.638	0.617	0.598

Sentido Negativo	desaceleração [a] ≤												
	altura da carga												
	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	0.785	0.761	0.739	0.717	0.697	0.678	0.660	0.643	0.627	0.611	0.597	0.583	0.569
massa= 250 kg	0.797	0.771	0.747	0.724	0.703	0.683	0.664	0.646	0.629	0.613	0.597	0.583	0.569
massa= 500 kg	0.809	0.781	0.755	0.731	0.709	0.688	0.668	0.649	0.631	0.614	0.598	0.583	0.568
massa= 750 kg	0.820	0.791	0.764	0.738	0.714	0.692	0.671	0.651	0.633	0.615	0.599	0.583	0.568
massa= 1000 kg	0.832	0.800	0.772	0.745	0.720	0.697	0.675	0.654	0.635	0.616	0.599	0.583	0.568
massa= 1250 kg	0.843	0.810	0.780	0.752	0.725	0.701	0.678	0.657	0.637	0.618	0.600	0.583	0.567
massa= 1500 kg	0.854	0.820	0.788	0.758	0.731	0.705	0.681	0.659	0.638	0.619	0.600	0.583	0.567
massa= 1750 kg	0.866	0.829	0.796	0.765	0.736	0.709	0.685	0.662	0.640	0.620	0.601	0.583	0.566
massa= 2000 kg	0.877	0.839	0.804	0.771	0.741	0.714	0.688	0.664	0.642	0.621	0.601	0.583	0.566
massa= 2250 kg	0.889	0.848	0.811	0.778	0.746	0.718	0.691	0.666	0.643	0.622	0.602	0.583	0.565
massa= 2500 kg	0.900	0.858	0.819	0.784	0.752	0.722	0.694	0.669	0.645	0.623	0.602	0.583	0.565

Tabela E.3. Tempo decorrido na aceleração do cenário final otimizado.

Sentido Positivo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.71	4.86	5.01	5.16	5.31	5.46	5.60	5.75	5.90	6.05	6.20	6.35	6.50
massa= 250 kg	4.64	4.80	4.95	5.11	5.26	5.42	5.57	5.73	5.88	6.04	6.19	6.35	6.50
massa= 500 kg	4.57	4.73	4.89	5.06	5.22	5.38	5.54	5.70	5.86	6.02	6.18	6.34	6.50
massa= 750 kg	4.51	4.67	4.84	5.01	5.17	5.34	5.51	5.67	5.84	6.01	6.17	6.34	6.51
massa= 1000 kg	4.44	4.62	4.79	4.96	5.13	5.30	5.48	5.65	5.82	5.99	6.17	6.34	6.51
massa= 1250 kg	4.38	4.56	4.74	4.91	5.09	5.27	5.45	5.62	5.80	5.98	6.16	6.33	6.51
massa= 1500 kg	4.32	4.50	4.69	4.87	5.05	5.23	5.42	5.60	5.78	5.97	6.15	6.33	6.51
massa= 1750 kg	4.26	4.45	4.64	4.83	5.01	5.20	5.39	5.58	5.77	5.95	6.14	6.33	6.52
massa= 2000 kg	4.20	4.40	4.59	4.78	4.98	5.17	5.36	5.56	5.75	5.94	6.13	6.33	6.52
massa= 2250 kg	4.15	4.35	4.55	4.74	4.94	5.14	5.34	5.53	5.73	5.93	6.13	6.32	6.52
massa= 2500 kg	4.10	4.30	4.50	4.70	4.91	5.11	5.31	5.51	5.71	5.92	6.12	6.32	6.52

Sentido Negativo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.37	4.50	4.64	4.78	4.92	5.06	5.20	5.33	5.47	5.61	5.75	5.89	6.02
massa= 250 kg	4.31	4.45	4.60	4.74	4.89	5.03	5.17	5.32	5.46	5.61	5.75	5.89	6.04
massa= 500 kg	4.26	4.41	4.55	4.70	4.85	5.00	5.15	5.30	5.45	5.60	5.75	5.90	6.05
massa= 750 kg	4.20	4.36	4.51	4.67	4.82	4.98	5.13	5.29	5.45	5.60	5.76	5.91	6.07
massa= 1000 kg	4.15	4.31	4.47	4.63	4.79	4.95	5.12	5.28	5.44	5.60	5.76	5.92	6.08
massa= 1250 kg	4.10	4.27	4.43	4.60	4.76	4.93	5.10	5.26	5.43	5.59	5.76	5.93	6.09
massa= 1500 kg	4.05	4.22	4.39	4.56	4.74	4.91	5.08	5.25	5.42	5.59	5.76	5.94	6.11
massa= 1750 kg	4.00	4.18	4.35	4.53	4.71	4.88	5.06	5.24	5.41	5.59	5.77	5.94	6.12
massa= 2000 kg	3.95	4.14	4.32	4.50	4.68	4.86	5.04	5.22	5.41	5.59	5.77	5.95	6.13
massa= 2250 kg	3.91	4.09	4.28	4.47	4.65	4.84	5.03	5.21	5.40	5.58	5.77	5.96	6.14
massa= 2500 kg	3.86	4.05	4.25	4.44	4.63	4.82	5.01	5.20	5.39	5.58	5.77	5.96	6.16

Tabela E.4. Tempo decorrido na desaceleração do cenário final otimizado.

Sentido Positivo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.26	4.39	4.53	4.66	4.80	4.93	5.06	5.20	5.33	5.47	5.60	5.74	5.87
massa= 250 kg	4.20	4.34	4.48	4.62	4.76	4.91	5.05	5.19	5.33	5.47	5.61	5.75	5.89
massa= 500 kg	4.15	4.30	4.44	4.59	4.74	4.88	5.03	5.17	5.32	5.47	5.61	5.76	5.90
massa= 750 kg	4.10	4.25	4.40	4.56	4.71	4.86	5.01	5.16	5.31	5.46	5.62	5.77	5.92
massa= 1000 kg	4.05	4.21	4.36	4.52	4.68	4.84	4.99	5.15	5.31	5.46	5.62	5.78	5.94
massa= 1250 kg	4.00	4.16	4.33	4.49	4.65	4.81	4.98	5.14	5.30	5.46	5.63	5.79	5.95
massa= 1500 kg	3.96	4.12	4.29	4.46	4.63	4.79	4.96	5.13	5.29	5.46	5.63	5.80	5.96
massa= 1750 kg	3.91	4.08	4.25	4.43	4.60	4.77	4.94	5.12	5.29	5.46	5.63	5.81	5.98
massa= 2000 kg	3.86	4.04	4.22	4.40	4.57	4.75	4.93	5.11	5.28	5.46	5.64	5.81	5.99
massa= 2250 kg	3.82	4.00	4.19	4.37	4.55	4.73	4.91	5.10	5.28	5.46	5.64	5.82	6.01
massa= 2500 kg	3.78	3.97	4.15	4.34	4.53	4.71	4.90	5.09	5.27	5.46	5.65	5.83	6.02

Sentido Negativo		altura da carga											
Tempo decorrido [s]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	4.58	4.73	4.87	5.02	5.16	5.31	5.45	5.60	5.74	5.89	6.03	6.18	6.32
massa= 250 kg	4.52	4.67	4.82	4.97	5.12	5.27	5.42	5.57	5.72	5.87	6.03	6.18	6.33
massa= 500 kg	4.45	4.61	4.77	4.92	5.08	5.24	5.39	5.55	5.71	5.86	6.02	6.18	6.33
massa= 750 kg	4.39	4.55	4.71	4.88	5.04	5.20	5.36	5.53	5.69	5.85	6.01	6.18	6.34
massa= 1000 kg	4.33	4.50	4.67	4.83	5.00	5.17	5.34	5.50	5.67	5.84	6.01	6.18	6.34
massa= 1250 kg	4.27	4.44	4.62	4.79	4.96	5.14	5.31	5.48	5.66	5.83	6.00	6.18	6.35
massa= 1500 kg	4.21	4.39	4.57	4.75	4.93	5.10	5.28	5.46	5.64	5.82	6.00	6.17	6.35
massa= 1750 kg	4.16	4.34	4.52	4.71	4.89	5.07	5.26	5.44	5.62	5.81	5.99	6.17	6.36
massa= 2000 kg	4.10	4.29	4.48	4.67	4.86	5.04	5.23	5.42	5.61	5.80	5.99	6.17	6.36
massa= 2250 kg	4.05	4.24	4.44	4.63	4.82	5.02	5.21	5.40	5.59	5.79	5.98	6.17	6.37
massa= 2500 kg	4.00	4.20	4.39	4.59	4.79	4.99	5.19	5.38	5.58	5.78	5.98	6.17	6.37

Tabela E.5. Distância percorrida na aceleração do cenário final otimizado.

Sentido Positivo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	8.480	8.748	9.016	9.284	9.552	9.820	10.088	10.356	10.624	10.892	11.160	11.428	11.696
massa= 250 kg	8.354	8.633	8.912	9.191	9.470	9.749	10.028	10.307	10.586	10.865	11.144	11.423	11.702
massa= 500 kg	8.231	8.521	8.810	9.100	9.390	9.679	9.969	10.259	10.548	10.838	11.128	11.417	11.707
massa= 750 kg	8.112	8.412	8.712	9.012	9.312	9.612	9.912	10.212	10.512	10.812	11.112	11.412	11.712
massa= 1000 kg	7.997	8.307	8.617	8.927	9.237	9.547	9.857	10.167	10.477	10.787	11.097	11.407	11.717
massa= 1250 kg	7.885	8.205	8.525	8.845	9.164	9.484	9.804	10.123	10.443	10.763	11.083	11.402	11.722
massa= 1500 kg	7.777	8.106	8.435	8.764	9.094	9.423	9.752	10.081	10.410	10.739	11.068	11.398	11.727
massa= 1750 kg	7.671	8.010	8.348	8.686	9.025	9.363	9.701	10.040	10.378	10.716	11.055	11.393	11.731
massa= 2000 kg	7.569	7.916	8.263	8.611	8.958	9.305	9.652	10.000	10.347	10.694	11.041	11.388	11.736
massa= 2250 kg	7.469	7.825	8.181	8.537	8.893	9.249	9.605	9.961	10.316	10.672	11.028	11.384	11.740
massa= 2500 kg	7.372	7.737	8.101	8.465	8.830	9.194	9.558	9.923	10.287	10.651	11.015	11.380	11.744

Sentido Negativo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.860	8.109	8.357	8.606	8.854	9.103	9.351	9.600	9.848	10.096	10.345	10.593	10.842
massa= 250 kg	7.759	8.018	8.277	8.536	8.795	9.054	9.314	9.573	9.832	10.091	10.350	10.609	10.869
massa= 500 kg	7.660	7.929	8.199	8.469	8.738	9.008	9.277	9.547	9.816	10.086	10.355	10.625	10.895
massa= 750 kg	7.564	7.843	8.123	8.403	8.682	8.962	9.242	9.521	9.801	10.081	10.360	10.640	10.920
massa= 1000 kg	7.470	7.759	8.049	8.339	8.628	8.918	9.207	9.497	9.786	10.076	10.365	10.655	10.944
massa= 1250 kg	7.379	7.678	7.977	8.276	8.575	8.874	9.173	9.473	9.772	10.071	10.370	10.669	10.968
massa= 1500 kg	7.290	7.598	7.907	8.215	8.524	8.832	9.141	9.449	9.758	10.066	10.375	10.683	10.992
massa= 1750 kg	7.203	7.520	7.838	8.156	8.473	8.791	9.109	9.426	9.744	10.062	10.379	10.697	11.015
massa= 2000 kg	7.118	7.445	7.771	8.098	8.424	8.751	9.078	9.404	9.731	10.057	10.384	10.710	11.037
massa= 2250 kg	7.036	7.371	7.706	8.041	8.377	8.712	9.047	9.382	9.718	10.053	10.388	10.723	11.058
massa= 2500 kg	6.955	7.299	7.643	7.986	8.330	8.674	9.017	9.361	9.705	10.049	10.392	10.736	11.080

Tabela E.6. Distância percorrida na desaceleração do cenário final otimizado.

Sentido Positivo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.663	7.905	8.147	8.389	8.631	8.874	9.116	9.358	9.600	9.842	10.085	10.327	10.569
massa= 250 kg	7.566	7.819	8.071	8.324	8.577	8.830	9.082	9.335	9.588	9.840	10.093	10.346	10.599
massa= 500 kg	7.472	7.735	7.998	8.261	8.524	8.787	9.050	9.313	9.576	9.839	10.102	10.365	10.627
massa= 750 kg	7.381	7.654	7.926	8.199	8.472	8.745	9.018	9.291	9.564	9.837	10.110	10.383	10.656
massa= 1000 kg	7.291	7.574	7.857	8.139	8.422	8.705	8.987	9.270	9.553	9.835	10.118	10.400	10.683
massa= 1250 kg	7.205	7.497	7.789	8.081	8.373	8.665	8.957	9.249	9.541	9.833	10.126	10.418	10.710
massa= 1500 kg	7.120	7.421	7.722	8.024	8.325	8.626	8.928	9.229	9.530	9.832	10.133	10.434	10.736
massa= 1750 kg	7.037	7.348	7.658	7.968	8.279	8.589	8.899	9.210	9.520	9.830	10.141	10.451	10.761
massa= 2000 kg	6.957	7.276	7.595	7.914	8.233	8.552	8.871	9.190	9.510	9.829	10.148	10.467	10.786
massa= 2250 kg	6.878	7.206	7.533	7.861	8.189	8.516	8.844	9.172	9.499	9.827	10.155	10.483	10.810
massa= 2500 kg	6.801	7.137	7.473	7.809	8.145	8.481	8.817	9.153	9.490	9.826	10.162	10.498	10.834

Sentido Negativo		altura da carga											
Distância percorrida [m]	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	8.250	8.511	8.772	9.032	9.293	9.554	9.815	10.075	10.336	10.597	10.858	11.119	11.379
massa= 250 kg	8.131	8.402	8.674	8.945	9.217	9.488	9.760	10.032	10.303	10.575	10.846	11.118	11.389
massa= 500 kg	8.015	8.297	8.579	8.861	9.143	9.425	9.707	9.989	10.271	10.553	10.835	11.117	11.399
massa= 750 kg	7.902	8.195	8.487	8.779	9.071	9.363	9.656	9.948	10.240	10.532	10.824	11.117	11.409
massa= 1000 kg	7.793	8.095	8.397	8.699	9.001	9.304	9.606	9.908	10.210	10.512	10.814	11.116	11.418
massa= 1250 kg	7.687	7.999	8.310	8.622	8.934	9.245	9.557	9.869	10.180	10.492	10.804	11.115	11.427
massa= 1500 kg	7.584	7.905	8.226	8.547	8.868	9.189	9.510	9.831	10.152	10.473	10.794	11.115	11.436
massa= 1750 kg	7.484	7.814	8.144	8.474	8.804	9.134	9.464	9.794	10.124	10.454	10.784	11.114	11.444
massa= 2000 kg	7.386	7.725	8.064	8.403	8.742	9.081	9.419	9.758	10.097	10.436	10.775	11.114	11.453
massa= 2250 kg	7.292	7.639	7.986	8.334	8.681	9.029	9.376	9.723	10.071	10.418	10.766	11.113	11.461
massa= 2500 kg	7.199	7.555	7.911	8.267	8.622	8.978	9.334	9.690	10.045	10.401	10.757	11.113	11.468

Tabela E.7. Distância percorrida com aceleração nula no cenário final otimizado.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Distância percorrida [m]		altura de chegada da carga												
partida $y_i=$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	25.590	25.347	25.105	24.863	24.621	24.379	24.136	23.894	23.652	23.410	23.168	22.925	22.683	22.441
massa= 250 kg	25.801	25.549	25.296	25.043	24.790	24.538	24.285	24.032	23.780	23.527	23.274	23.022	22.770	22.517
massa= 500 kg	26.007	25.744	25.481	25.218	24.955	24.692	24.429	24.166	23.903	23.641	23.378	23.115	22.852	22.590
massa= 750 kg	26.207	25.934	25.661	25.388	25.115	24.842	24.569	24.297	24.024	23.751	23.478	23.205	22.932	22.660
massa= 1000 kg	26.401	26.119	25.836	25.553	25.271	24.988	24.705	24.423	24.140	23.858	23.575	23.292	23.010	22.728
massa= 1250 kg	26.590	26.298	26.006	25.714	25.422	25.130	24.838	24.546	24.253	23.961	23.669	23.377	23.085	22.793
massa= 1500 kg	26.774	26.473	26.171	25.870	25.569	25.267	24.966	24.665	24.363	24.062	23.761	23.459	23.158	22.857
massa= 1750 kg	26.953	26.643	26.332	26.022	25.712	25.401	25.091	24.781	24.470	24.160	23.850	23.539	23.229	22.919
massa= 2000 kg	27.127	26.808	26.489	26.170	25.851	25.532	25.213	24.893	24.574	24.255	23.936	23.617	23.298	22.979
massa= 2250 kg	27.297	26.969	26.642	26.314	25.986	25.658	25.331	25.003	24.675	24.348	24.020	23.692	23.365	23.038
massa= 2500 kg	27.462	27.126	26.790	26.454	26.118	25.782	25.446	25.110	24.774	24.438	24.102	23.765	23.429	23.093

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Distância percorrida [m]		altura de partida da carga												
chegada $y_i=$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	25.629	25.380	25.132	24.883	24.635	24.386	24.138	23.890	23.641	23.393	23.144	22.896	22.647	22.399
massa= 250 kg	25.839	25.580	25.321	25.062	24.802	24.543	24.284	24.025	23.766	23.507	23.248	22.988	22.729	22.470
massa= 500 kg	26.043	25.774	25.504	25.235	24.965	24.696	24.426	24.156	23.887	23.617	23.348	23.078	22.809	22.540
massa= 750 kg	26.242	25.962	25.683	25.403	25.123	24.843	24.564	24.284	24.004	23.725	23.445	23.165	22.886	22.607
massa= 1000 kg	26.435	26.145	25.856	25.566	25.277	24.987	24.698	24.408	24.119	23.829	23.539	23.250	22.960	22.671
massa= 1250 kg	26.623	26.324	26.024	25.725	25.426	25.127	24.828	24.529	24.229	23.930	23.631	23.332	23.033	22.734
massa= 1500 kg	26.805	26.497	26.188	25.880	25.571	25.263	24.954	24.646	24.337	24.029	23.720	23.412	23.103	22.795
massa= 1750 kg	26.983	26.666	26.348	26.030	25.713	25.395	25.077	24.760	24.442	24.125	23.807	23.489	23.172	22.855
massa= 2000 kg	27.157	26.830	26.503	26.177	25.850	25.524	25.197	24.871	24.544	24.218	23.891	23.565	23.238	22.912
massa= 2250 kg	27.325	26.990	26.655	26.320	25.984	25.649	25.314	24.979	24.643	24.308	23.973	23.638	23.303	22.968
massa= 2500 kg	27.490	27.146	26.802	26.459	26.115	25.771	25.427	25.084	24.740	24.396	24.053	23.709	23.365	23.021

Tabela E.8. Tempo decorrido com aceleração nula no cenário final otimizado.

Sentido Positivo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]		altura de chegada da carga												
partida $y_i=$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.11	7.04	6.97	6.91	6.84	6.77	6.70	6.64	6.57	6.50	6.44	6.37	6.30	6.23
massa= 250 kg	7.17	7.10	7.03	6.96	6.89	6.82	6.75	6.68	6.61	6.54	6.47	6.39	6.32	6.25
massa= 500 kg	7.22	7.15	7.08	7.01	6.93	6.86	6.79	6.71	6.64	6.57	6.49	6.42	6.35	6.28
massa= 750 kg	7.28	7.20	7.13	7.05	6.98	6.90	6.82	6.75	6.67	6.60	6.52	6.45	6.37	6.30
massa= 1000 kg	7.33	7.26	7.18	7.10	7.02	6.94	6.86	6.78	6.71	6.63	6.55	6.47	6.39	6.32
massa= 1250 kg	7.39	7.31	7.22	7.14	7.06	6.98	6.90	6.82	6.74	6.66	6.57	6.49	6.41	6.34
massa= 1500 kg	7.44	7.35	7.27	7.19	7.10	7.02	6.94	6.85	6.77	6.68	6.60	6.52	6.43	6.36
massa= 1750 kg	7.49	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88	6.80	6.71	6.62	6.54	6.45	6.38
massa= 2000 kg	7.54	7.45	7.36	7.27	7.18	7.09	7.00	6.91	6.83	6.74	6.65	6.56	6.47	6.40
massa= 2250 kg	7.58	7.49	7.40	7.31	7.22	7.13	7.04	6.95	6.85	6.76	6.67	6.58	6.49	6.42
massa= 2500 kg	7.63	7.54	7.44	7.35	7.25	7.16	7.07	6.97	6.88	6.79	6.69	6.60	6.51	6.44

Sentido Negativo		Deslocamento com aceleração nula												
Tempo decorrido [s]		altura de partida da carga												
chegada $y_i=$	3.5	1	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26	28.5	31
massa= 0 kg	7.12	7.05	6.98	6.91	6.84	6.77	6.71	6.64	6.57	6.50	6.43	6.36	6.29	6.23
massa= 250 kg	7.18	7.11	7.03	6.96	6.89	6.82	6.75	6.67	6.60	6.53	6.46	6.39	6.31	6.25
massa= 500 kg	7.23	7.16	7.08	7.01	6.93	6.86	6.78	6.71	6.64	6.56	6.49	6.41	6.34	6.28
massa= 750 kg	7.29	7.21	7.13	7.06	6.98	6.90	6.82	6.75	6.67	6.59	6.51	6.43	6.36	6.30
massa= 1000 kg	7.34	7.26	7.18	7.10	7.02	6.94	6.86	6.78	6.70	6.62	6.54	6.46	6.38	6.32
massa= 1250 kg	7.40	7.31	7.23	7.15	7.06	6.98	6.90	6.81	6.73	6.65	6.56	6.48	6.40	6.34
massa= 1500 kg	7.45	7.36	7.27	7.19	7.10	7.02	6.93	6.85	6.76	6.67	6.59	6.50	6.42	6.36
massa= 1750 kg	7.50	7.41	7.32	7.23	7.14	7.05	6.97	6.88	6.79	6.70	6.61	6.52	6.44	6.38
massa= 2000 kg	7.54	7.45	7.36	7.27	7.18	7.09	7.00	6.91	6.82	6.73	6.64	6.55	6.45	6.40
massa= 2250 kg	7.59	7.50	7.40	7.31	7.22	7.12	7.03	6.94	6.85	6.75	6.66	6.57	6.47	6.42
massa= 2500 kg	7.64	7.54	7.45	7.35	7.25	7.16	7.06	6.97	6.87	6.78	6.68	6.59	6.49	6.44

ANEXO A

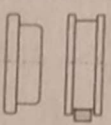
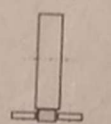
D (mm)		63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
wr (N/kg)		0,212	0,172	0,143	0,120	0,100	0,083	0,072	0,063	0,053	0,047	0,042
		-	-	-	0,110	0,090	0,076	0,062	0,053	0,044	0,037	0,033

Figura AA.1. Tabela retirada do livro técnico da Stahl [2] onde são apresentados os valores de wr para cada diâmetro de roda.

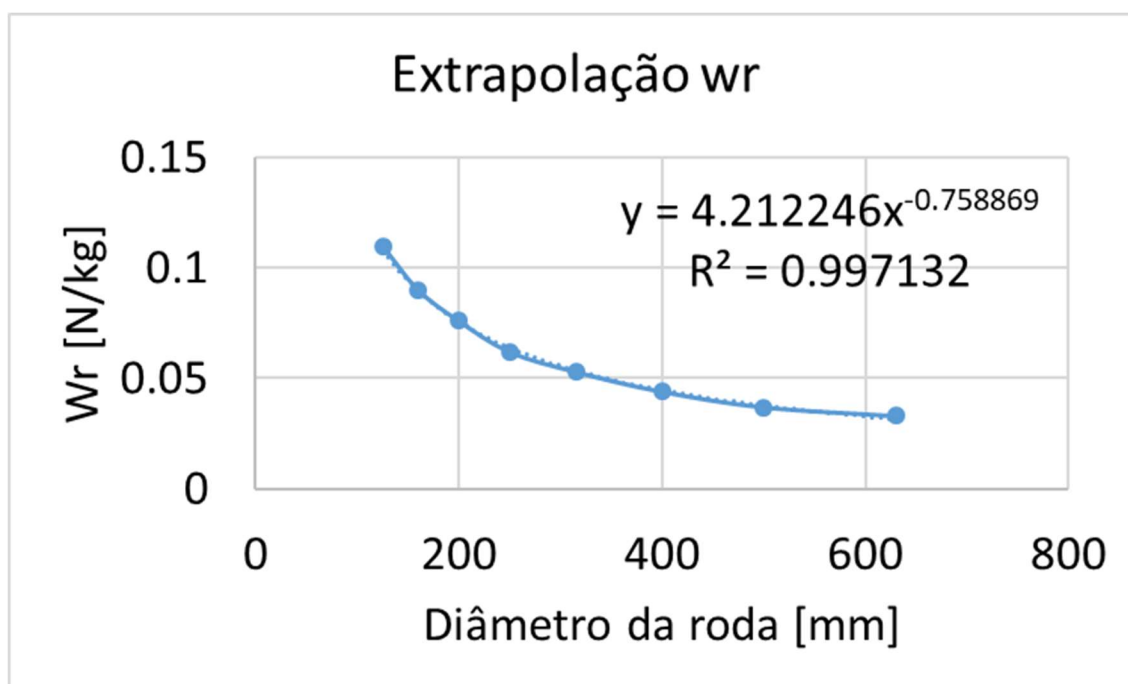


Figura AA.2. Evolução do parâmetro wr com o aumento do diâmetro da roda e respetiva equação de curva.

