

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

BRAIAN ANGEL TOMAZI

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM VEÍCULO DEVIDO AO INCREMENTO DE
MASSA**

CAXIAS DO SUL

2021

BRAIAN ANGEL TOMAZI

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM VEÍCULO DEVIDO AO INCREMENTO DE
MASSA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico no curso de Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Adelair Lino Colombo

CAXIAS DO SUL

2021

BRAIAN ANGEL TOMAZI

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM VEÍCULO DEVIDO AO INCREMENTO DE
MASSA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Me. Adelair Lino Colombo

Aprovado em: 08/07/2021

Banca Examinadora

Prof. Me. Adelair Lino Colombo

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Vagner Grison

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho a minha mãe, Sandra Leir Tomazi, meu pai, Pedro Ramiro Tomazi, minha irmã, Cibele Alves Tomazi, em especial à minha namorada, Ingridi da Silva, todos os amigos que sempre estiveram me incentivando e apoiando nos momentos difíceis e para todos os meus colegas e professores da graduação.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos:

Aos meus pais, Sandra Leir Tomazi e Pedro Ramiro Tomazi que sempre me apoiaram e incentivaram.

A minha irmã, Cibele Alves Tomazi pelo incentivo.

À minha namorada, Ingridi da Silva, pela compreensão e amor.

Ao professor Me. Adelair Lino Colombo, pela orientação, atenção e oportunidade.

Aos meus colegas de curso, pelas horas de estudos e dedicação que passamos juntos.

RESUMO

Neste trabalho se apresenta o estudo teórico e prático para a realização de uma análise de um automóvel com motor de combustão interna e caixa de câmbio manual, verificando seu desempenho quanto ao incremento de massa, visando uma melhor compreensão dos fatores envolvidos, desta forma obtendo dados de como realizar a troca de marchas de maneira mais eficiente e a inclinação máxima na qual o veículo consiga superar. Através de estudo bibliográfico dos parâmetros dos sistemas que influenciam no desempenho do veículo, um equacionamento foi elaborado em uma planilha de cálculos capaz de obter os dados necessários, assim como, foi modelado no *software* AMESin®, um sistema capaz de simular o comportamento do automóvel em questão para a obtenção de dados referentes ao consumo e a emissão de dióxido de carbono, os dados obtidos foram organizados em tabelas e gráficos e comparados com a literatura. A velocidade máxima encontrada foi de aproximadamente 190 km/h, enquanto que o percentual de inclinação da rampa máxima foi de 73% com a massa de 1150 kg. Conforme o incremento de massa esse percentual foi decrescendo, até atingir 45% de inclinação com a massa de 1700 kg, 60 kg acima da massa máxima recomendada pela montadora. A velocidade máxima reduziu com o aumento da massa, decaindo até 176 km/h.

Palavras-chave: Automotivo, Performance, Incremento de massa.

ABSTRACT

This work presents the theoretical and practical study to carry out an analysis of a car with an internal combustion engine and manual gearbox, verifying its performance in terms of mass increase, aiming at a better understanding of the factors involved, thus obtaining data how to perform gear shifts more efficiently and the maximum inclination the vehicle can overcome. Through a bibliographical study of the parameters of the systems that influence the vehicle's performance, an equation was elaborated in a spreadsheet capable of obtaining the necessary data, as well as, a system capable of simulating the behavior of the automobile was built in the AMESin® software. In order to obtain data on the consumption and emission of carbon dioxide, the data obtained were organized in tables and graphs and compared with the literature. The speed found was approximately 190 km/h, while the percentage of inclination of the maximum grade was 73% with a mass of 1150 kg. As the mass increases, this percentage decreases, until reaching 45% of great inclination with a mass of 1700 kg, 60 kg above the maximum mass recommended by the assembler. Top speed reduced with increasing mass, dropping to 176 km/h.

Keywords: Automotive, Performance, Mass Increment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema do motor a combustão interna.	17
Figura 2: Veículo com motor a combustão interna.	18
Figura 3: Ciclo Otto para motor real de ignição por centelha de quatro tempos real (a) e ciclo Otto ideal (b).	19
Figura 4: Trem de força automotivo.	21
Figura 5: Layouts dos sistemas de transmissão.	22
Figura 6: Caixa de mudanças.	25
Figura 7 - Forças atuando sobre um veículo.	27
Figura 8 - Inclinação da pista.	31
Figura 9 - Interface do AMESim com um sistema mecânico em simulação.	35
Figura 10 - Fluxograma de atividades.	38
Figura 11 - Curva de potência e torque em função da rotação de trabalho do motor.	40
Figura 12 - Força trativa pela velocidade.	44
Figura 13 - Força trativa pela velocidade com 1220 kg.	45
Figura 14 - Força trativa pela velocidade com 1430 kg.	46
Figura 15 - Força trativa pela velocidade com 1640 kg.	46
Figura 16 - Força trativa pela velocidade com 1700 kg.	47
Figura 17 - Curva de potência e torque em função da rotação de trabalho do motor.	47
Figura 18 - Sistema do automóvel no software AMESim.	48
Figura 19 - Ciclo NEDC.	49
Figura 20 - Consumo de combustível para as massas de 1220 kg (a) e 1430 kg (b).	49
Figura 21 - Consumo de combustível para as massas de 1640 kg (a) e 1700kg (b).	50
Figura 22 - Percentual de rampa e velocidade máxima pela massa.	51
Figura 23 - Emissão e consumo pela massa.	52
Figura 24 - Performance câmbio manual parte 1.	57

Figura 25 - Performance câmbio manual parte 2.	57
Figura 26 - Performance câmbio manual parte 3.	57
Figura 27 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1150 kg.	58
Figura 28 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1220 kg.	58
Figura 29 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1460 kg.	59
Figura 30 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1640 kg.	59
Figura 31 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1700 kg.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de arraste aerodinâmico de veículos.	28
Tabela 2 - Rendimento de motores.	32
Tabela 3 - Submodelos do software.	34
Tabela 4 - Especificações do veículo.	38
Tabela 5 - Torque do motor em função da rotação.	38
Tabela 6 - Relação total de transmissão.	41
Tabela 7 - Relação total de transmissão.	42
Tabela 8 - Incremento de massa no veículo.	43
Tabela 9 - Consumo e emissão devido ao incremento de massa.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CVT	Transmissão continuamente variável
MCI	Motor de combustão interna
TA	Transmissão automática
RPM	Rotações por minuto
DCL	Diagrama de corpo livre
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo de inclinação da pista [°]
β	Ângulo da parcela atuante do vento lateral sobre o veículo [°]
ρ	Densidades do ar [kg/m^3]
η	Rendimento global da transmissão [-]
ω	Rotação do motor [rad/s]
A	Área frontal projetada do veículo [m ²]
C_a	Coefficiente de arraste aerodinâmico [-]
F	Coefficiente de rolamento [-]
f_d	Coefficiente de rolamento do eixo dianteiro [-]
F_m	Força motiva aplicada na roda [N]
f_t	Coefficiente de rolamento do eixo traseiro [-]
h	Altura da inclinação da pista [m]
i	Inclinação da pista [%]
i_c	Coefficiente de multiplicação da relação da caixa [-]
i_{cvt}	Coefficiente de relação da CVT [-]
i_t	Redução total da transmissão [-]
N	Rotação do motor [rpm]
P	Peso total do veículo [N]
P_d	Peso do eixo dianteiro [N]
P_r	Pressão atmosférica [kPa]
P_t	Peso do eixo traseiro [N]
R	Raio estático do pneu, preferencialmente dinâmico [mm]
R_a	Resistência aerodinâmica [N]
R_d	Raio dinâmico do pneu [m]
R_r	Resistência ao rolamento [N]
R_{rd}	Resistência ao rolamento no eixo dianteiro [N]
R_{rt}	Resistência ao rolamento no eixo traseiro [N]
R_s	Resistência a subida [N]
R_t	Relação total de transmissão [-]

S_x	Comprimento da inclinação da pista [m]
T_m	Torque gerado pelo motor [Nm]
T_r	Temperatura do ar [°C]
T_r	Torque gerado na roda [Nm]
V	Velocidade do veículo [m/s]
V_f	Velocidade do vento frontal [m/s]
V_l	Velocidade do vento lateral [m/s]
V_v	Velocidade do vento [m/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2 TEMA	16
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA	16
1.4 OBJETIVO GERAL	16
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	17
2.1.1 Ciclo Otto	18
2.1.2 Emissão de Dióxido de carbono	20
2.2 TRANSMISSÃO AUTOMOTIVA	20
2.3.1 Transmissão CVT	22
2.3.2 Transmissão Automática	23
2.3.3 Transmissão Manual	24
2.3.3.1 Caixa de mudanças	24
2.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO	26
2.4.1 Resistência ao movimento	27
2.4.2 Resistência ao Rolamento	27
2.4.3 Resistência aerodinâmica	28
2.4.4 Velocidade do veículo	29
2.4.5 Velocidade do vento	30
2.4.6 Resistência devido à subida	30
2.4.7 Força motiva	31
2.4.8 Redução total da transmissão	32
2.4.9 Rendimento global de transmissão	32

2.5 ANÁLISE DE COMPORTAMENTO EM SOFTWARES	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO	38
3.1.1 Desenvolvimento planilha de cálculos	40
3.1.2 Desenvolvimento da simulação em software	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 ANÁLISE MATEMÁTICA	42
4.1.1 Análise gráfica	43
4.2 ANÁLISE NO SOFTWARE AMESIM	48
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54
ANEXO A – FICHA TÉCNICA RENAULT CLIO III	56
APÊNDICE B – PERFORMANCE CÂMBIO MANUAL	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A história dos automóveis está em constante evolução desde seu conceito inicial, enquanto que sua ideia original não pode ser atribuída a um único indivíduo, tendo a participação de vários engenheiros ao longo de sua história.

O desenvolvimento começou no século 17, com o avanço da tecnologia na utilização do vapor como meio de propulsão, levou à criação do primeiro automóvel a vapor capaz de transporte humano, construído por Nicolas-Joseph Cugnot em 1769 (ECKERMANN, 2001).

Segundo Crolla (2009) atualmente os automóveis de combustão interna são maioria no mundo, estes necessitam de uma transmissão do torque do motor para as rodas. Existem alguns tipos de transmissão veicular, sendo a mais comum a manual. O câmbio manual possui uma maior eficiência mecânica, baixo custo, baixo peso e dependendo da habilidade do motorista em realizar as marchas, uma redução no consumo de combustível.

A função da transmissão do veículo é transferir a potência do motor para as rodas motrizes do veículo. Mudar as marchas dentro da transmissão permite combinar a velocidade do motor e o torque com as condições de carga e velocidade do veículo. Nas transmissões manuais, o motorista deve realizar a mudança das marchas (CROLLA; MASHADI, 2011).

Como há complexidade nos sistemas dos motores de combustão interna, aliado à presença da informática nas aplicações em engenharia, o estudo e desenvolvimento de softwares para simulação vêm ganhando espaço, refletindo de várias formas, desde o chão de fábrica, com a presença cada vez maior de sistemas automatizados, até a prancheta do engenheiro, nas atividades de projeto e no uso de simulações nos projetos, através do uso dos mais variados tipos de programas de computadores. (LODER; BENDER, 2009; LOSSO, 2007).

As simulações possibilitam estudar, em um ambiente virtual, o comportamento estático e dinâmico da situação-problema permitindo, dessa forma, projetar e prever a resposta do sistema/processo sob investigação nas condições de trabalho que irão ocorrer no mundo real, sendo assim, uma alternativa para reproduzir experimentos onerosos, ou até mesmo perigosos (LODER; BENDER, 2009).

Atualmente as simulações em sistemas de múltiplos domínios têm sido objeto de diversas investigações, dado seu potencial para obter respostas em curto espaço de tempo para sistemas complexos como os motores de combustão interna. Entre as ferramentas disponíveis, o AMESIM abstrai esse problema com módulos, cujas dinâmicas já estão formuladas, possibilitando ao usuário concentrar-se em suas interações (AGUIAR, 2010).

1.2 TEMA

Análise de desempenho dinâmico de um veículo submetido a incrementos de carga eventual.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Visando a melhoria do desempenho dinâmico, as montadoras têm investido constantemente no aumento da performance dos veículos. Nesse contexto é importante avaliar o comportamento dinâmico do veículo como consequência do incremento de carga eventual, adicionando massa a partir das especificações básicas de massa do veículo.

Portanto, o estudo da eficiência em condições de carga é importante para a melhoria do desempenho. A relevância deste trabalho está em analisar o desempenho do veículo, verificando as velocidades, força em rampa e consumo de combustível.

1.4 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral a análise de desempenho dinâmico e comparação de um veículo em diferentes condições de incremento de carga eventual.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar sistemas de transmissão;
- b) Realizar cálculos de desempenho no *software* Excel®;
- c) Realizar simulações de consumo de combustível no *software* no AMESim®;
- d) Elaborar gráficos de performance veicular;
- e) Realizar comparação de desempenho referentes às mudanças de carregamento e verificar sua influência no consumo de combustível;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção caracteriza a fundamentação teórica necessária para a realização da análise de desempenho. O objetivo é uma breve descrição sobre o assunto, bem como apresentar os parâmetros e as condições envolvidas no processo. Esta revisão concentra-se principalmente em variáveis do processo indispensáveis para a obtenção dos dados necessários.

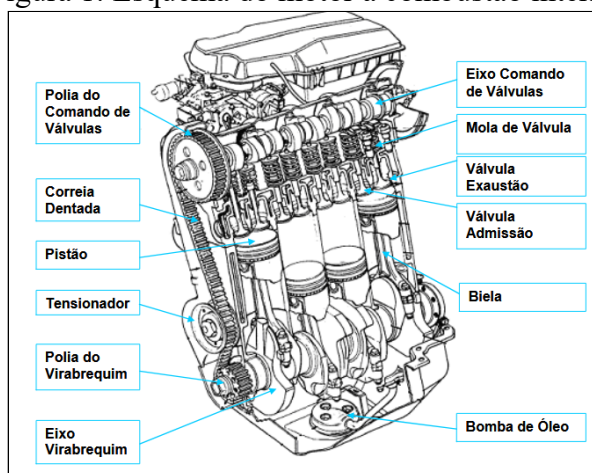
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna, são um de um grupo de dispositivos em que os reagentes da combustão (oxidante e combustível) e os produtos da combustão servem como fluidos de trabalho do motor. O trabalho útil gerado por um motor de combustão interna resulta dos produtos gasosos aquecidos da combustão, agindo nas superfícies móveis do motor, como a face de um pistão, uma turbina ou um bocal (PROCTOR, 2020).

Os motores de combustão interna são os dispositivos de geração de energia mais amplamente aplicados e mais usados atualmente, sendo utilizados em motores a gasolina, motores a diesel, motores de turbina a gás e sistemas de propulsão de foguete, o mais relevante para este trabalho são os motores a gasolina (PROCTOR, 2020).

Nos motores a gasolina, os gases quentes movem o pistão em direção ao virabrequim, a biela faz a ligação entre estes, transmitindo assim a força atuante, fazendo este girar, transformando o movimento retilíneo em rotativo. Na Figura 1 um esquema do motor a combustão pode ser observado. (HEYWOOD, 1988).

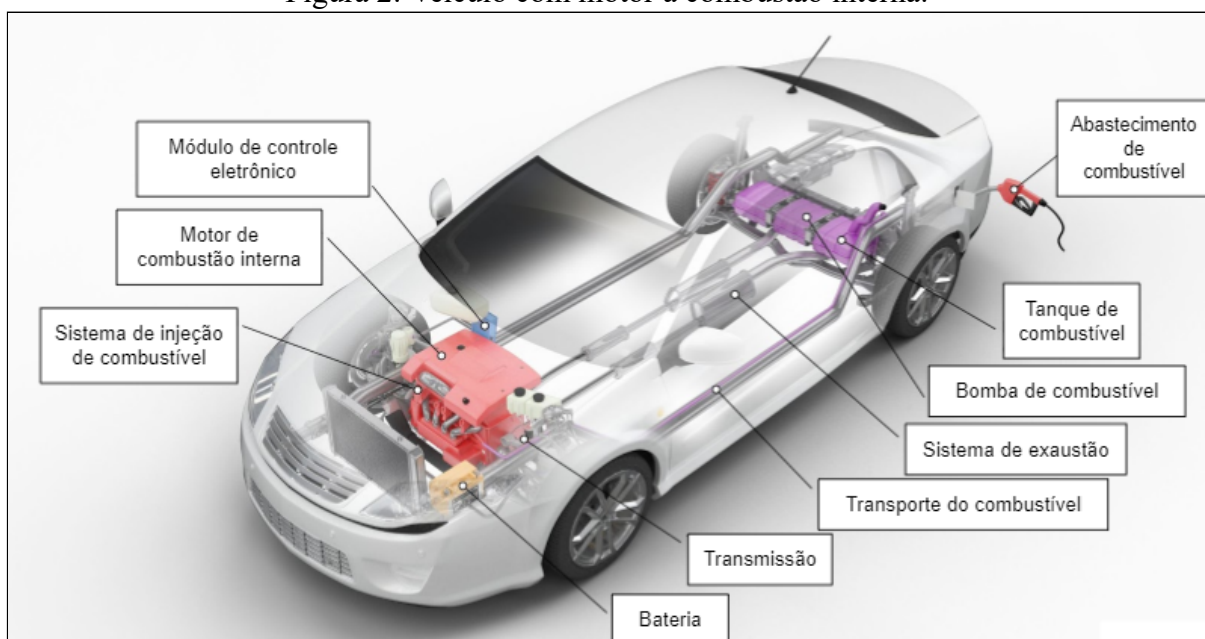
Figura 1: Esquema do motor a combustão interna.



Fonte: Adaptado de Heywood (1988)

Os motores de combustão interna são divididos em dois grupos: motores de combustão contínua como no motor a jato por exemplo e motores de combustão intermitente no caso de motores a gasolina. O motor de combustão intermitente é caracterizado pela ignição periódica de ar e combustível, estes são processados de maneira cíclica. Na Figura 2 o esquema de um motor e seus componentes pode ser visto. (PROCTOR, 2020; AFDC, 2021)

Figura 2: Veículo com motor a combustão interna.



Fonte: Adaptado de U. S. Alternative Fuels Data Center (2021)

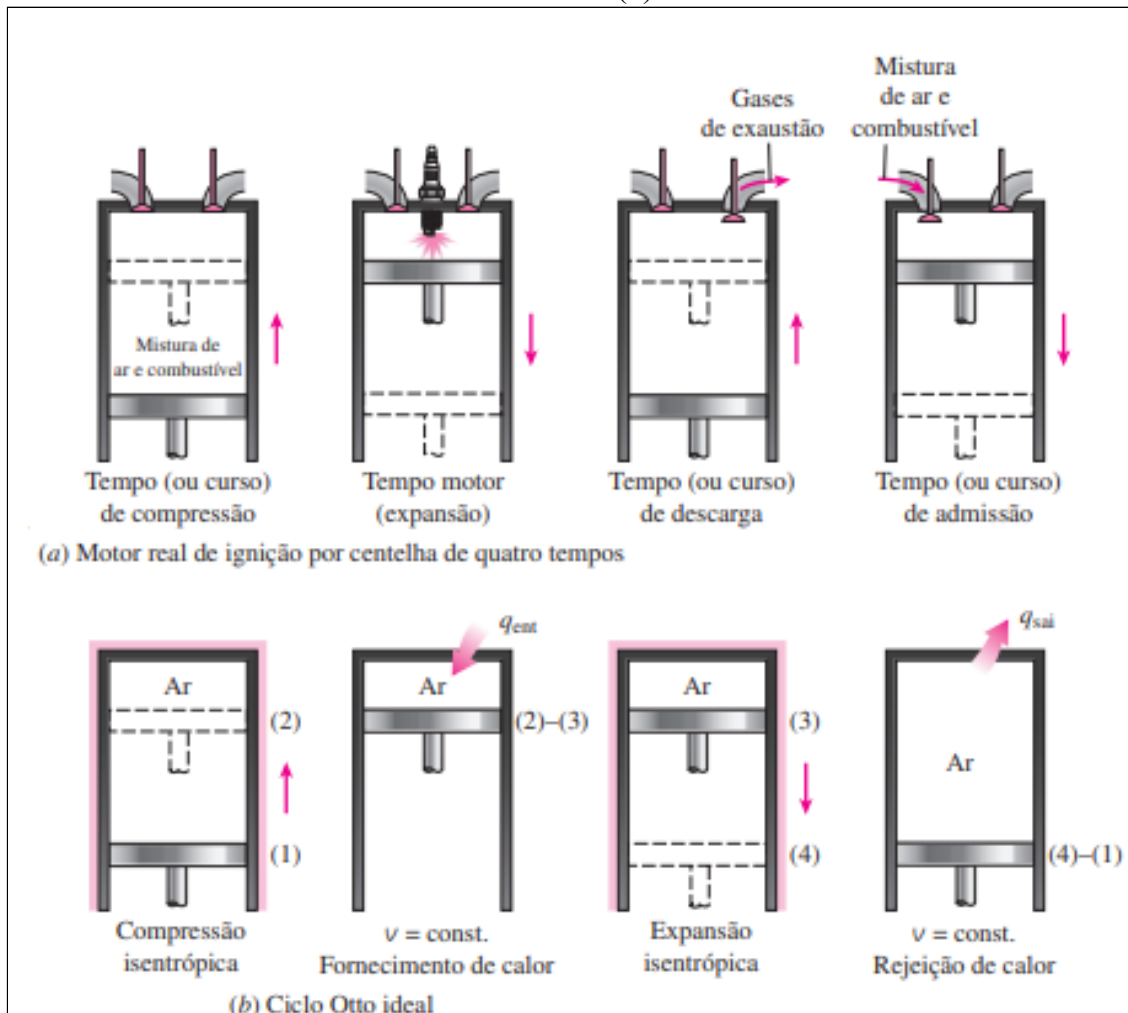
Os motores a combustão interna tem o ciclo Otto como seu ciclo ideal. Ele deve seu nome a Nikolaus A. Otto, que criou um bem-sucedido motor de quatro tempos em 1876, na Alemanha, usando o ciclo proposto pelo francês Beau de Rochas em 1862 (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

2.1.1 Ciclo Otto

O ciclo padrão a ar, Otto, é um ciclo ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha. Na maioria destes, o pistão executa quatro cursos completos (dois ciclos mecânicos) dentro do cilindro, e o eixo de manivelas realiza duas revoluções para cada ciclo termodinâmico. Esses motores são chamados de motores de combustão interna de

quatro tempos (ÇENGEL; BOLES, 2015). A Figura 3 mostra um esquema do ciclo Otto ideal e real.

Figura 3: Ciclo Otto para motor real de ignição por centelha de quatro tempos real (a) e ciclo Otto ideal (b).



Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2015)

Inicialmente, as válvulas de admissão e de descarga estão fechadas, e o pistão está em sua posição mais baixa. Durante a compressão, o pistão move-se para cima, comprimindo a mistura de ar e combustível. Logo depois que o pistão atinge sua posição mais alta, a vela solta faíscas e a mistura sofre ignição, aumentando a pressão e a temperatura do sistema. Os gases à alta pressão forçam o pistão para baixo, fazendo desta forma o eixo das manivelas a girar, produzindo trabalho útil. Ao final desse curso, o pistão está na posição mais baixa e o cilindro está cheio de produtos de combustão. O pistão move-se para cima mais uma vez,

expulsando os gases de exaustão pela válvula de descarga, e uma segunda vez para baixo sugando a mistura de ar fresco e combustível pela válvula de admissão, reiniciando assim o ciclo (ÇENGEL; BOLES, 2015).

Existe ainda o ciclo de Otto de dois tempos, entretanto este não é muito utilizado em automóveis, sendo assim pouco relevante para este trabalho.

2.1.2 Emissão de Dióxido de carbono

A gasolina é um dos combustíveis mais utilizados no Brasil segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) com aproximadamente 41.137 bilhões de litros vendidos em 2015. Este é um destilado derivado do petróleo bruto e é composto por inúmeros hidrocarbonetos. É utilizado em motores de ciclo Otto por apresentar uma temperatura de autoignição elevada (MARTINS, 2006). O potencial de produção de CO_2 pela gasolina é cerca de 331 g/km, do processo de produção à utilização, sendo um dos mais altos (VASCONCELLOS, 2008).

Quando um combustível é submetido a uma combustão completa, os produtos obtidos nesta reação são H_2O , N_2 e CO_2 (BRUNETTI, 2012). Entretanto, quando a mistura ar-combustível não é suficiente para uma combustão plena, a constituição dos gases de escape se altera, podendo incluir componentes tais como hidrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, oxigênio, monóxido de nitrogênio, dióxido de nitrogênio, além do dióxido de carbono, água e nitrogênio (MARTINS, 2006).

2.2 TRANSMISSÃO AUTOMOTIVA

O motor de combustão interna deve ser desconectado das rodas motrizes quando for ligado e quando estiver em marcha lenta. Além disso, a eficiência de um motor de automóvel em produzir torque e potência é maior em uma faixa de velocidade mais alta, com o acelerador quase totalmente aberto. Em velocidades moderadas em pavimento nivelado, a potência necessária para impulsionar um automóvel é apenas uma fração disso.

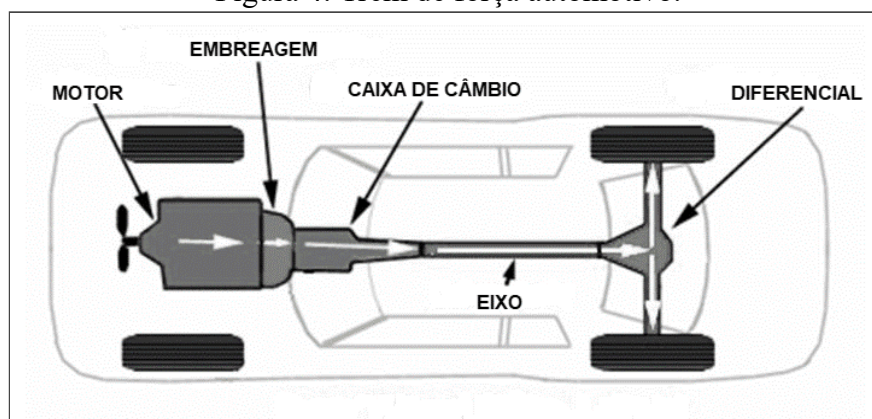
Desta forma se o motor fosse conectado diretamente nas rodas motrizes sua eficiência seria baixa, portanto é necessário se utilizar um mecanismo de transmissão intermediário para

que a rotação do motor possa operar na faixa de maior eficiência, assim como um dispositivo de descarga e engate para permitir a aplicação gradual de carga ao motor.

Um sistema de transmissão é um conjunto de mecanismos utilizados para transmitir a força produzida no motor às rodas motrizes, para que o veículo entre em movimento que são responsáveis por distribuir a potência gerada pelo motor, responsável pela transformação da energia potencial em energia cinética, até as rodas, produzindo movimento.

Esse sistema geralmente é composto por embreagem, caixa de câmbio, diferencial e eixo, cada um deles tem um importante papel no sistema de transmissão. A indústria automobilística tem definido o conjunto de força do veículo como “*powertrain*” (trem de força), que é composto pela ligação entre o motor, sistema de transmissão e o sistema de rodagem (CROLLA, 2012). A Figura 4 mostra um esquema de um sistema de trem de força.

Figura 4: Trem de força automotivo.



Fonte: Adaptado de Crolla (2012)

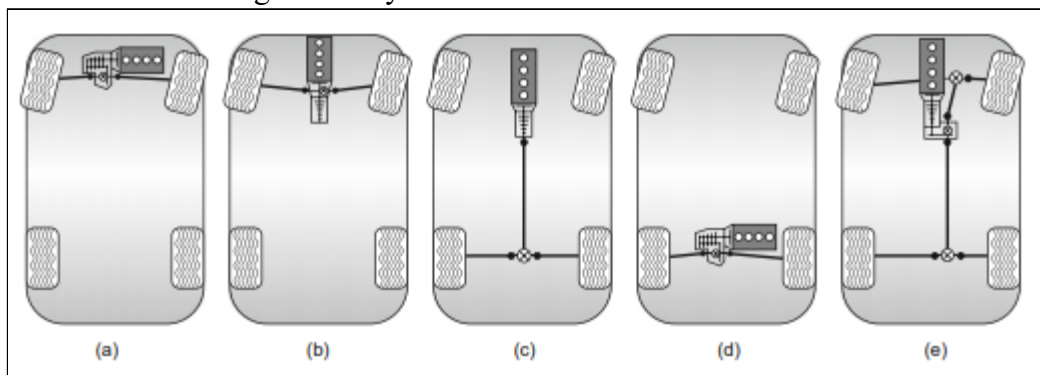
Os principais componentes dos trem de força são (PADILHA, 2018; GIMENEZ, 2017):

- a) Embreagem: É um conjunto de peças que se articula com a finalidade de acoplar e desacoplar o motor do sistema de transmissão. Tem a função de manter a rotação e o torque do motor, sem que eles sejam transmitidos para a caixa de mudanças e conseqüentemente para as rodas motrizes. Também possibilita uma ligação suave e progressiva entre o motor e o conjunto de transmissão.
- b) Caixa de câmbio: Permite que a relação de transmissão entre o motor e as rodas de acionamento mude à medida que a velocidade do veículo aumente ou diminua, para que o motor se mantenha na faixa de rotação de sua melhor performance;

- c) Eixo/Árvore: É um componente com a finalidade de transmitir potência mecânica, torque e rotação, utilizado para conectar outros componentes de um trem de força, no qual sua conexão direta não é possível, devido à distância ou à necessidade de permitir um movimento relativo entre eles;
- d) Diferencial: É um dispositivo mecânico indispensável em veículos de tração. Tem a função de transferir e distribuir o torque entre a árvore de acionamento e os eixos das rodas motrizes, possibilitando através de um conjunto de engrenagens, velocidades de rotação diferentes entre os eixos das rodas;

A posição dos componentes do trem de força dentro do veículo tem implicações para a engenharia do veículo. A escolha do layout do veículo é determinada principalmente pelo setor de mercado-alvo e pela imagem da marca que o veículo deve projetar. A Figura 5 mostra os principais tipos de layout.

Figura 5: Layouts dos sistemas de transmissão.



Fonte: Adaptado de Crolla (2012)

O tipo de transmissão é um fator de influência no desempenho do veículo, e segundo Cardoso (2012), os principais tipos de transmissão são a manual, automática e CVT.

2.3.1 Transmissão CVT

O CVT é baseado em um conceito de transmissão de potência de um eixo rotativo para outro com velocidade continuamente variável. Uma CVT transmite potência sem as descontinuidades típicas das transmissões escalonadas, de forma a evitar mudanças abruptas

no torque e na velocidade de saída. A ideia básica pode ser entendida a partir de um arranjo simples de duas polias interligadas por uma correia metálica (ALBUQUERQUE, 2003; CROLLA; MASHADI, 2011)

O sistema CVT visa otimizar a eficiência do sistema de modo que o motor opere sempre no seu melhor regime de rotação independente da velocidade do veículo, o que conseqüentemente melhora a economia de combustível e o desempenho dinâmico de um veículo ao combinar melhor as condições de operação do motor com os cenários de direção variáveis. Também pode trabalhar com fricção ou atrito, produzindo torque com base no contato entre as superfícies. Esse torque é transmitido ao sistema por meio de correias ou rolos. (BEACHLEY, 1979; SRIVASTAVA; HAQUE, 2009).

2.3.2 Transmissão Automática (TA)

Inicialmente as TA eram usadas com sistemas de controle que não dependiam de eletrônica. Em uma transmissão automática convencional, a embreagem é substituída por um acoplamento de fluido ou conversor de torque para eliminar a ação de engate / desengate durante a mudança de marcha. Um sistema de engrenagens planetárias ou epicicloidais é usado para realizar mudanças na relação de transmissão no lugar das engrenagens convencionais, isto torna seu sistema de funcionamento totalmente diferente das manuais (CROLLA; MASHADI, 2011).

Numa transmissão de várias velocidades, vários conjuntos de engrenagens epicicloidais são necessários, onde várias relações de engrenagem são alcançadas pelo acoplamento de diferentes componentes de conjuntos de engrenagens planetárias uns com os outros. O acoplamento ocorre por meio do engate de embreagens e freios imersos em óleo, chamados de elementos de mudança. Usando combinações de engrenagens planetárias na transmissão, uma ampla gama de relações de transmissão torna-se disponível (GREINER et al. 2004).

O princípio de operação de um acoplamento de fluido é a transferência de momento de um fluido de trabalho para uma turbina. Um acoplamento de fluido tem duas turbinas com aletas voltadas uma para a outra. Conforme a turbina movida a motor gira, um torque é transmitido pela agitação do óleo que circula entre eles. No automóvel, o fluido permite que o

acoplamento deslize facilmente em baixas rotações do motor. Em altas velocidades, o deslizamento é quase eliminado e o acoplamento de fluido funciona como uma conexão sólida. (CROLLA; MASHADI, 2011).

Com o recente progresso na eletrônica automotiva, no entanto, novos tipos de sistemas de transmissão automática foram propostos. Um conceito simples é a automação de uma transmissão manual (AMT), que permite o uso controlado de manuais bem elaborados e também com maior eficiência. Outras derivações automáticas de manuais são as transmissões de embreagem dupla (DCT) com a característica atrativa de ter fluxo de torque contínuo (CROLLA; MASHADI, 2011).

2.3.3 Transmissão Manual

Uma transmissão manual é um sistema de múltiplas velocidades, onde as mudanças de marcha exigem que o motorista selecione manualmente as marchas operando uma alavanca de câmbio e embreagem, escolhendo a marcha mais apropriada para o deslocamento do veículo.

Os principais benefícios da transmissão manual são seu custo, peso e volume aproximadamente 50% inferior às equivalentes automáticas, além de uma maior eficiência mecânica e dependendo da habilidade do motorista um menor consumo de combustível (CROLLA; MASHADI, 2011).

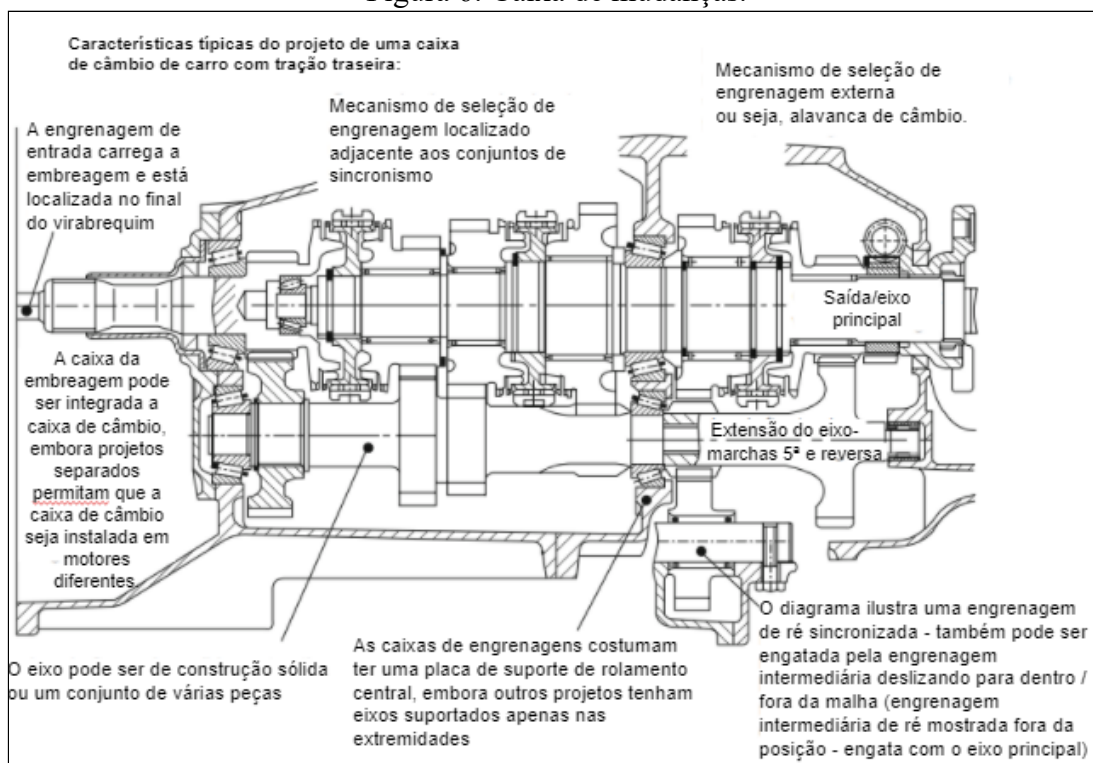
2.3.3.1 Caixa de mudanças

A caixa de mudanças possibilita ao motor operar na faixa de rotação onde sua potência e torque são maiores, variando a rotação da roda motora de acordo com as necessidades de condução, aumentando assim sua eficiência (NAUNHEIMER et al, 2011).

Basicamente, a caixa de mudanças é formada por três árvores distintas: primária, intermediária e secundária. O sistema mais comum utilizado em automóveis consiste em um eixo primário que recebe o movimento de rotação do motor que, através de engrenagens transmite esse movimento, aumentando ou diminuindo a rotação para um eixo intermediário, este transfere o torque ao eixo secundário acoplado ao sistema das rodas motrizes. A Figura 6

exemplifica um tipo de caixa de mudanças, bem como os seus componentes (CROLLA, 2012; NAUNHEIMER et al, 2011).

Figura 6: Caixa de mudanças.



Fonte: Adaptado de Crolla (2012)

Os principais componentes da caixa de transmissão são (CROLLA, 2012; NAUNHEIMER et al, 2011):

- Árvore primária: Composta por um eixo estriado com uma engrenagem, uma das extremidades do eixo primário é constituída de estrias que estão acopladas ao disco de embreagem, este recebe a rotação do motor e transmite às demais engrenagens. O eixo primário da caixa convencional possui apenas uma engrenagem que está constantemente engrenada com a engrenagem do eixo intermediário.
- Árvore Intermediária: Tem a função de acoplar-se ao eixo primário para transmitir o torque ao eixo secundário por meio de uma combinação de engrenagem. Na transferência de movimento ocorre a redução de rotação, da árvore secundária, e, conseqüentemente, a elevação do torque na mesma. Entre as engrenagens do eixo

secundário e eixo intermediário existe uma terceira engrenagem, que é a intermediária de ré, o conjunto de marcha à ré tem a finalidade de inverter o sentido de giro do eixo secundário em relação ao sentido de rotação das marchas à frente.

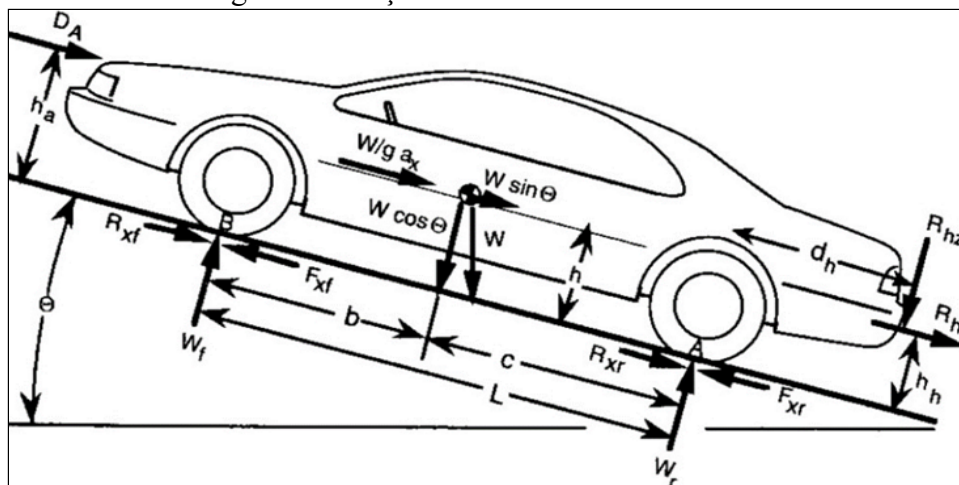
- c) **Árvore secundária:** Transfere a rotação proveniente do eixo primário ao eixo motriz do veículo através de suas engrenagens, acopladas à árvore intermediária. A velocidade desenvolvida por cada marcha depende da relação de engrenagem existente entre as engrenagens intermediárias e secundárias. As engrenagens da árvore secundária estão constantemente engatadas com as engrenagens da árvore intermediária que formam os seus pares. Essas engrenagens deslizam livremente na árvore secundária sobre anéis de aço especial e lubrificados, e são responsáveis pelo engrenamento das marchas, através de luvas que as acopla à árvore.
- d) **Conjunto sincronizador:** O engrenamento das marchas é realizado por meio deste, possui a finalidade de igualar a velocidade de rotação entre as engrenagens, com objetivo de facilitar a troca de marchas.

2.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Conforme Crolla (2012), para se iniciar um projeto de transmissão deve-se conhecer as principais forças que atuarão sobre o veículo, atuando como resistência à rodagem do mesmo.

Quando um veículo está em deslocamento atuam sobre ele forças que tendem a mudar sua trajetória. Essas forças são provocadas pelo atrito do contato do pneu com o solo, o atrito do ar com a superfície do veículo, a inclinação da pista e forças de inércia (GILLESPIE, 1992). A Figura 7 expõe como estes carregamentos atuam sobre um veículo em deslocamento, demonstrado a partir de um diagrama de corpo livre.

Figura 7 - Forças atuando sobre um veículo.



Fonte: Gillespie (1992).

2.4.1 Resistência ao movimento

Segundo Gillespie (1992), para que um veículo se mantenha em movimento é necessário que a força motora do veículo seja maior que a força de resistência ao movimento. As resistências ao movimento retilíneo de um veículo incluem a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica e a resistência a subidas.

Dessa forma pode-se expressar a resistência ao movimento conforme a Equação 1:

$$F_r = R_r + R_a + R_s \quad (1)$$

Onde:

R_r é a resistência ao rolamento em N;

R_a é a resistência aerodinâmica em N;

R_s é a resistência à subida em N.

2.4.2 Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento é um fenômeno decorrente principalmente da deformação da área de contato do pneu com o solo quando em operação no veículo, mas além disso há ainda a deformação do solo pela roda, o atrito no escorregamento parcial dos pneus e a circulação de ar dentro e em torno dos mesmos (GILLESPIE, 1992). Pode ser expressa por:

$$R_r = R_{rt} + R_{rd} = f_t \cdot P_t + f_d \cdot P_d \quad (2)$$

Sendo:

R_{rt} a resistência ao rolamento no eixo traseiro em N;

R_{rd} a resistência ao rolamento no eixo dianteiro em N;

f_t o coeficiente de rolamento do eixo traseiro;

f_d o coeficiente de rolamento do eixo dianteiro;

P_t o peso do eixo traseiro em N;

P_d o peso do eixo dianteiro em N.

Como f é o mesmo tanto na traseira quanto na dianteira, a Equação 2 pode ser simplificada de acordo com a Equação 3, dessa forma podemos expressar a resistência ao rolamento conforme a Equação 4:

$$f_d = f_t = f \quad (3)$$

Logo:

$$R_r = f \cdot P \cos \theta \quad (4)$$

Onde:

θ é a inclinação da pista

P o peso total do veículo em N.

Alguns fatores influenciam no coeficiente de resistência ao rolamento como temperatura do pneu, pressão interna do pneu, força de tração, cargas radiais e velocidade.

2.4.3 Resistência aerodinâmica

Segundo Gillespie (1992) há alguns fatores que podem influenciar na aerodinâmica do veículo, tendo como fator principal seu *designer*. O veículo deve ser projetado de forma com que a passagem de ar sob ele seja suave, melhorando a eficiência, uma equação que serve para calcular a força do ar ao avanço do veículo é representada na Equação 5. Nesta o R_a é a

força ou resistência total. Como sabe a força aplicada a um objeto é igual à pressão exercida sobre ele multiplicada pela área projetada, dessa forma pode-se escrever como:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho \cdot C_a \cdot A \cdot V^2 \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_a \cdot A \cdot (V + V_v)^2 \quad (5)$$

Sendo:

ρ a densidades do ar em kg/m³;

C_a o coeficiente de arraste aerodinâmico;

A a área frontal projetada do veículo em m²;

V a velocidade do veículo em m/s;

V_v a velocidade do vento em m/s.

A influência da densidade do ar deve ser aplicada em cálculos para desempenho mais preciso. Podendo ser obtida segundo a Equação 6:

$$\rho = 1,225 \left(\frac{P_r}{101,325} \right) \cdot \left(\frac{288,16}{273,16 + T_r} \right) \quad (6)$$

Sendo:


ρ a densidades do ar em kg/m³;

P_r a pressão atmosférica em kPa;

T_r temperatura do ar em °C.

O coeficiente de arraste aerodinâmico (C_a), conforme Bosch (2005), é obtido experimentalmente em túneis de vento se existirem modelos em escala, caso contrário são estimados através de gráficos ou simulações. A Tabela 2 apresenta valores característicos do coeficiente de arraste aerodinâmico para diferentes tipos de veículos.

Tabela 1 - Coeficientes de arraste aerodinâmico de veículos.

Veículo	Forma	C_a
Carro de passeio		0,3 – 0,5

Fonte: Adaptado de Hucho e Sovran (1998).

2.4.4 Velocidade do veículo

A velocidade do veículo (V), pode ser determinada através de parâmetros do seu trem de força, conforme Equação 7 (GILLESPIE, 1992):

$$V = \frac{2\pi \times N \times R}{60000 \times R_t} \quad (7)$$

Onde:

N a rotação do motor em rpm;

R o raio estático, preferencialmente dinâmico de pneu em mm;

R_t a relação total de transmissão.

2.4.5 Velocidade do vento

A velocidade do vento V_v é a soma vetorial da velocidade do vento frontal V_f com a velocidade do vento lateral V_l incidente no veículo. Podendo ser obtida segundo a Equação 8 (GILLESPIE, 1992).

$$|\vec{V}_v| = |\vec{V}_f| + |\vec{V}_l| \cos \beta \quad (8)$$

Onde o β é o ângulo da parcela atuante do vento lateral sobre o veículo.

2.4.6 Resistência devido à subida

Quando um veículo está subindo uma rampa, parte de seu peso transforma-se em força que se opõe ao movimento, conforme a Equação 9 (CANALE, 1989).

$$R_s = P \cdot \sin \theta \quad (9)$$

Onde:

R_s é a resistência devido à subida em N;

P é o peso do veículo em N;

θ é o ângulo de inclinação da pista em graus.

Na prática é costume se definir a inclinação da pista em porcentagem, conforme a Equação 10, a Figura 8 relaciona o ângulo, a porcentagem e a razão de inclinação de pista entre si:

$$i = \frac{h}{s_x} \cdot 100 = 100 \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (10)$$

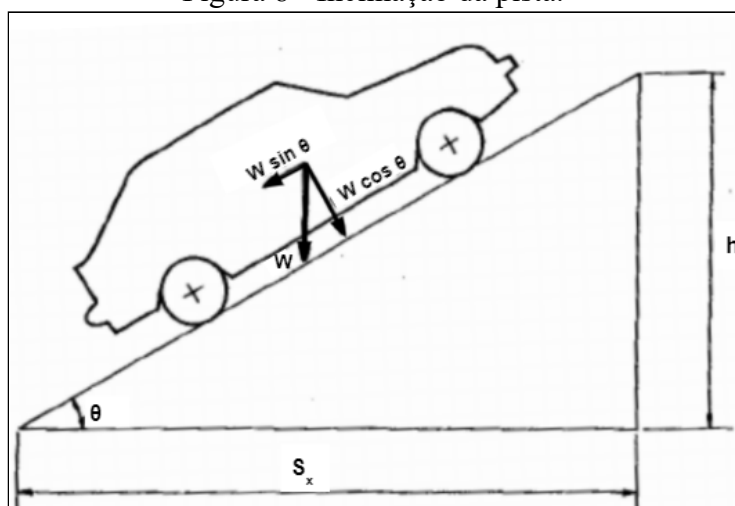
Sendo:

i a inclinação da pista em %;

h a altura da inclinação em m;

s_x o comprimento da inclinação em m;

Figura 8 - Inclinação da pista.



Fonte: Adaptado de Canale (1989)

Para ângulos pequenos pode-se assumir que $\operatorname{sen} \theta \cong \operatorname{tg} \theta$, implicando na Equação 11:

$$R_s = P \cdot \operatorname{sen} \theta \cong P \cdot \operatorname{tg} \theta = \frac{P \cdot i}{100} \quad (11)$$

2.4.7 Força motiva

O torque é o produto de uma força por um braço de alavanca. No caso de um veículo a sua força de movimento, F_m responsável pelo deslocamento, é o resultado obtido da

divisão do torque resultante T_r gerado na roda pelo raio dinâmico do pneu R_d , podendo ser expresso conforme a Equação 12 (GILLESPIE, 1992; BOSCH, 2005):

$$F_m = \frac{T_r}{R_d} \quad (12)$$

Onde:

F_m é a força motiva aplicada na roda em N ;

T_r é o torque gerado na roda em $N \cdot m$;

R_d é o raio dinâmico do pneu em m .

O torque aplicado na roda é o produto do torque do motor pela redução total da transmissão. Devido ao número de par de engrenagens que transmite o torque que sai do volante do motor até chegar à roda, é necessário aplicar ao sistema um rendimento, visando às perdas de energia que irá sofrer, essa perda é transformada em calor e ruído. Assim pode-se definir o torque na roda conforme a Equação 13 (GILLESPIE, 1992; BOSCH, 2005):

$$T_r = T_m \cdot i_t \cdot \eta \quad (13)$$

Onde:

T_m é o torque que o motor gera em $N \cdot m$;

i_t redução total da transmissão;

η rendimento global da transmissão.

2.4.8 Redução total da transmissão


A redução total de transmissão i_t é a multiplicação da relação da caixa com a relação primária (BOSCH, 2005). Para um automóvel com câmbio manual é dado pela Equação (14):

$$i_t = \text{relação primária} \times \text{relação câmbio} \quad (14)$$

2.4.9 Rendimento global de transmissão

Todo o engrenamento e acoplamento rotativo despreendem parte da energia que deveria transmitir devido ao atrito entre as partes. A quantidade desta perda define o rendimento do acoplamento, o qual é determinado pelo quociente entre a potência de entrada e saída, representando a parcela de potência perdida no processo de transmissão do torque do eixo do motor até o eixo da roda. Essa perda de energia é definida como η e é medida experimentalmente ou estimada pelo engenheiro. A Tabela 2 apresenta rendimentos para configurações de motores em linha e transversais. (BOSCH, 2005).

Tabela 2 - Rendimento de motores.

Configuração de Motor	Rendimento ()
Motores em linha	0,88 - 0,92
Motores transversais	0,91 - 0,95

Fonte: Bosch (2005).

2.5 ANÁLISE DE COMPORTAMENTO EM *SOFTWARES*

O motor de combustão interna a pistão é um sistema dinâmico que exige a interação de um sistema mecânico com um sistema de controle de forma que o seu modelo matemático computacional interprete os estados de operação de um sistema dinâmico real (LOSSO 2007).

O programa AMESim (Advanced Modeling Environment for Simulations) apresenta um ambiente computacional de simulação capaz de reproduzir a dinâmica do sistema MCI a pistão, construído a partir de componentes característicos situados dentro da biblioteca interna. Ele tem como objetivo analisar, sob simulação, o desempenho, o consumo e a emissão de poluentes de veículos (LOSSO 2007).

Este sistema é um dos mais difundidos no mundo que aplica a abordagem MultiPortas na modelagem dinâmica de sistemas de vários domínios energéticos. O AMESim foi criado em 1986 pelo Prof. Michel Lebrun da Universidade de Lyon, a partir do projeto bem sucedido denominado EKOFISK, compreendendo a simulação do sistema de levantamento das plataformas de petróleo no mar do norte da Europa, sendo posteriormente adquirido pela empresa Siemens®, esta ampliou o sistema do *software*, abrangendo várias áreas da engenharia (AGUIAR, 2010).

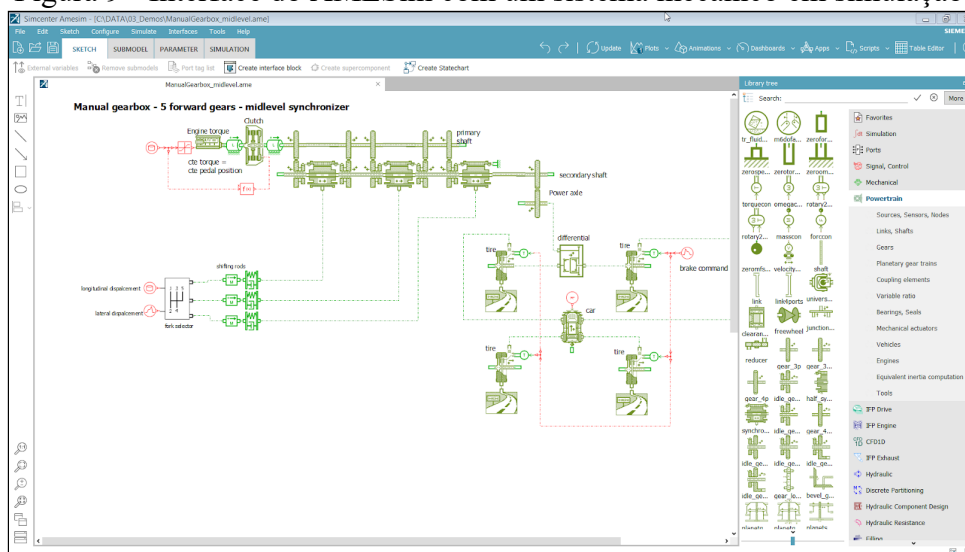
A modelagem e simulação no ambiente AMESim está baseada em quatro etapas (AGUIAR,2010; BERTO, 2015), que são descritas a seguir:

- a) Construção do modelo do sistema (*Sketch Mode*): O modo Sketch é a etapa inicial, utiliza várias bibliotecas disponíveis no software para construir o modelo do sistema. Na medida em que o projetista desenvolve o circuito e constrói as conexões por intermédio das portas dos componentes, vão se estabelecendo as relações de causalidade e a conectividade.
- b) Definição dos modelos matemáticos dos componentes (*Submodel Mode*): é a etapa onde se faz a escolha dos modelos matemáticos que acompanham o software ou desenvolvem seu próprio modelo, seguindo as hipóteses consideradas acerca do fenômeno físico em estudo.
- c) Definição de parâmetros (*Parameter Mode*): nessa etapa definem-se os valores dos parâmetros de cada um dos modelos, como valores de massa, tipo de motor, relação de câmbio, torque e potência máxima, entre outros.
- d) Execução da Simulação (*Run Mode*): definem-se nesta etapa valores referentes à simulação a ser realizada como tempo, modo e tolerância de simulação. Ao final dela é possível gerar gráficos das variáveis do modelo.

O sistema de simulação do software para veículos tem como uma das opções o *New European Driving Cycle* (NEDC), este é um ciclo de direção, projetado para avaliar os níveis de emissão dos motores de automóveis de passageiros e sua economia de combustível. O NEDC representa o uso típico de um carro na Europa, e consiste em quatro ciclos de condução urbana e um ciclo de condução extra-urbano.

A Figura 9 mostra a interface do programa com um sistema mecânico em simulação. É possível observar as ligações entre os componentes representados por linhas, a biblioteca do software se localiza à direita enquanto que o sistema está à esquerda.

Figura 9 - Interface do AMESim com um sistema mecânico em simulação.



Fonte: adaptado de Siemens (2021)

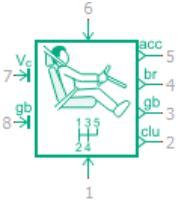
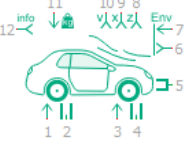
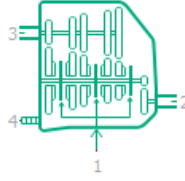
Dentre as diversas bibliotecas disponíveis no software as mais importantes para esse trabalho são as *IFP Driver* utilizada para computar consumo de combustível, emissões e/ou para avaliar a performance de veículos convencionais ou híbridos e a *mechanics* com elementos para simular sistemas mecânicos completos, inclui elemento de movimento linear e de rotação. Nestas existem submodelos de componentes, no qual aqueles que possuem relevância para o trabalho estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Submodelos do software.


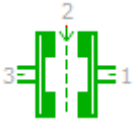
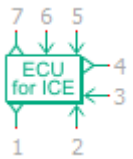
(continua)

Componente	Representação	Entrada e saída de dados
Motor MCI		<ol style="list-style-type: none"> 1. Torque de saída; 2. Exaustão de gases; 3. Saída de informações do motor; 4. Entrada de combustível; 5. Entrada de ar, 6. Entrada e saída de calor; 7. Temperatura do motor; 8. Temperatura do óleo e perdas por fricção.

(continua)

Componente	Representação	Entrada e saída de dados
Motorista		<ol style="list-style-type: none"> 1. Entrada de torque e velocidade do motor; 2. Controle embreagem; 3. Saída caixa de câmbio; 4. Controle do freio; 5. Controle da aceleração; 6. Entrada de dados do ambiente e velocidade do veículo; 7. Controle de velocidade; 8. Controle da caixa de câmbio.
Veículo		<ol style="list-style-type: none"> 1. Freio das rodas traseiras; 2. Torque e rotação das rodas; 3. Freio das rodas dianteiras; 4. Torque e rotação das rodas; 5. Velocidade e aceleração do veículo; 6. Posição do veículo; 7. Entrada de dados do ambiente; 8. Saída de altitude; 9. Saída da posição; 10. Saída da velocidade; 11. Carga sobre o veículo; 12. Saída de dados gerais sobre o veículo;
Caixa de câmbio		<ol style="list-style-type: none"> 1. Seleção de marchas; 2. Saída do torque; 3. Entrada do torque; 4. Perda por fricção e temperatura.

(conclusão)

Componente	Representação	Entrada e saída de dados
Medidor		<ol style="list-style-type: none"> 1. Entrada dos dados; 2. Saída dos dados.
Embreagem		<ol style="list-style-type: none"> 1. Saída do torque; 2. Acionamento; 3. Entrada do torque.
Unidade de controle do motor		<ol style="list-style-type: none"> 1. Injeção de combustível; 2. Entrada de dados do motor; 3. Entrada de aceleração; 4. Saída de dados do motor; 5. Consumo de combustível; 6. Aceleração do motorista; 7. Saída de dados do câmbio;

Fonte: Autor (2021)

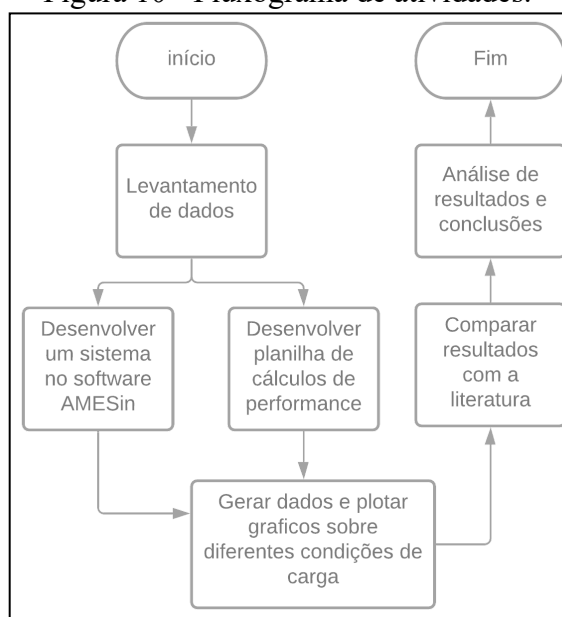
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentada a proposta de execução utilizada para obter os dados necessários do veículo para se realizar a análise de desempenho.

3.1 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

A execução do trabalho foi dividida em algumas etapas, mostrada na Figura 10 e descritas a seguir, de forma a ilustrar como podem obter-se as melhores condições de contorno do trabalho e também buscando os resultados para os objetivos propostos inicialmente.

Figura 10 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Autor (2021)

3.1.1 Análise do veículo

O estudo tem como base um automóvel do fabricante Renault, do modelo Clio III. Este possui uma potência de 82 kW a 6000 rev/min e momento torsor de 151 Nm a 4250 rev/min. A Tabela 4 traz os dados do fabricante do automóvel que serão utilizados no trabalho.

Tabela 4 - Especificações do veículo.

Característica	Especificações
Diâmetro/ curso	79,5 / 80,5 mm
Número de cilindros / válvulas	4 / 16
Relação diferencial	3.875
Câmbio	5 marchas
Relação Engrenagens 1ª marcha	3,73
Relação Engrenagens 2ª marcha	2,05
Relação Engrenagens 3ª marcha	1,39
Relação Engrenagens 4ª marcha	1,1
Relação Engrenagens 5ª marcha	0,89
Diâmetro externo do pneu	441 mm
Raio dinâmico	211,42 mm
Raio estático	207,27 mm
Massa	1150 kg
Consumo Médio	6,7 L/100km
Emissões de CO_2	160 g/km

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 5 apresenta os valores de torque do motor em função da rotação.

Tabela 5 - Torque do motor em função da rotação.

(continua)

Rotação Motor (rpm)	Momento Torsor (Nm)
1000	70,3
1500	105,5
2000	123,1
2500	133,6
3000	140,7

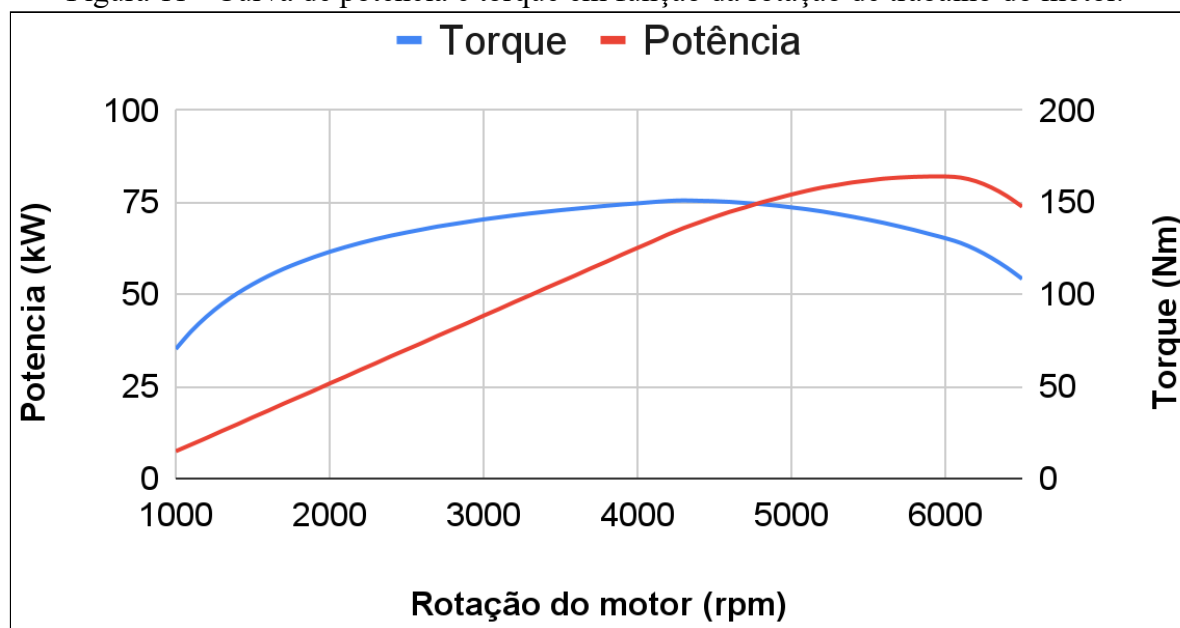
(conclusão)

Rotação Motor (rpm)	Momento Torsor (Nm)
3500	145,7
4000	149,4
4500	150,6
5000	147,2
5500	140,5
6000	130,5
6500	108,4

Fonte: Autor (2021)

Através da Tabela 5 e a Figura 11 pode-se analisar a curva de desempenho do veículo em questão, atingindo seu ponto máximo e em seguida caindo, conforme a literatura.

Figura 11 - Curva de potência e torque em função da rotação de trabalho do motor.



Fonte: Autor (2021)

A montadora fornece também dados referentes à velocidade do veículo, de acordo com a marcha, e com a rotação do motor no mínimo, portanto 1000 rotações por minuto. A Tabela 6 apresenta estes dados.

Tabela 6 - Dados de velocidade fornecidos pelo fabricante.

Marchas	Velocidade (Km/h)
Primeira	7,61
Segunda	13,85
Terceira	20,36
Quarta	25,86
Quinta	31,80

Fonte: Autor (2021)

3.1.1 Desenvolvimento planilha de cálculos

A segunda etapa consistiu em desenvolver uma planilha de cálculos das equações do capítulo 2 através do software Excel®. Com os dados do motor foi calculada a velocidade, o torque e a força motiva para as cinco marchas do câmbio manual. Posteriormente foi calculada a resistência de rampa, a resistência aerodinâmica e a resistência ao rolamento. Também foram obtidos os valores de rotação de torque máximo e rotação de potência máxima.

3.1.2 Desenvolvimento da simulação em *software*

A sexta etapa para execução do projeto foi a modelagem de um sistema no *software* Sincenter AMESim® da empresa Siemens®, capaz de reproduzir as características do automóvel sob análise, em uma simulação computadorizada para analisar e prever o desempenho deste sobre diferentes condições de cargas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são detalhados e analisados os resultados obtidos a partir do que foi proposto no capítulo anterior.

4.1 ANÁLISE MATEMÁTICA

Inicialmente foi feita a análise do sistema de transmissão do automóvel Clio, cujo os dados técnicos foram descritos anteriormente. Primeiramente foi determinada a relação de i_t para cada marcha através da Equação 15, considerando os valores das Tabela 4. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação total de transmissão.

Relação de marcha	i_t
Primeira	14,443
Segunda	7,935
Terceira	5,397
Quarta	4,250
Quinta	3,456

Fonte: Autor (2021)

Com estes resultados determinou-se os valores de velocidade em km/h com a Equação 8, para as rotações entre 1000 e 6000 rpm para as 5 marchas do câmbio. Também foram encontrados os valores de torque e força através das Equações 13 e 14. Para o cálculo do torque, foi considerado um rendimento $\eta = 0,96$, conforme indica Melconian (2009). Para os cálculos foi utilizado um coeficiente de rolagem de 0,015 (asfalto) e a densidade do ar considerada 1,141 kg/m³.

A Tabela 8 traz os valores máximos e mínimos encontrados considerando a rotação mínima 1000 rpm e máxima 6000 rpm.

Tabela 8 - Valores obtidos.

Marchas	Velocidade (km/h)		Torque (Nm)		Força (N)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Primeira	7,610	45,661	803,942	1492,381	3343,210	6206,100
Segunda	13,853	83,117	441,654	819,856	1836,630	3409,391
Terceira	20,365	122,188	300,428	557,693	1249,335	2319,179
Quarta	25,862	155,174	236,565	439,143	983,761	1826,185
Quinta	31,803	190,820	192,374	357,109	799,990	1485,046

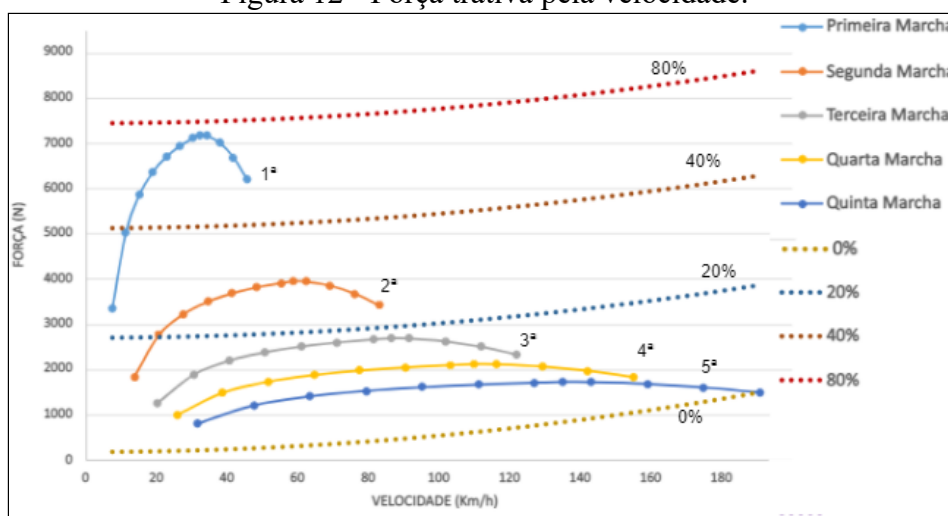
Fonte: Autor (2021)

Pelos dados obtidos pode-se verificar que, conforme a marcha aumenta, a velocidade máxima aumenta proporcionalmente a queda da força, o que é esperado e está de acordo com a literatura. Os valores obtidos matematicamente se mostravam muito similares, em torno de 99% aos fornecidos pelo fabricante, este forneceu os valores de velocidade para cada marcha a 1000 rpm.

4.1.1 Análise gráfica

Com base nos resultados encontrados no item anterior foram geradas as curvas de força trativa para cada marcha do câmbio manual, em seguida foi calculada a força motiva em percentual de inclinação da rampa em relação a velocidade do veículo e marchas, os dados para isso foram obtidos através das Fórmulas 5 e 6. As inclinações utilizadas foram de 20%, 40% e 80%, enquanto a massa do veículo empregada foi de ordem de marcha, portanto sem passageiros (Tabela 3). A Figura 12 apresenta o gráfico com os resultados encontrados.

Figura 12 - Força trativa pela velocidade.



Fonte: Autor (2021)

As linhas pontilhadas representam os valores obtidos com a força de tração requerida em função da rampa para as inclinações utilizadas, enquanto as linhas contínuas são as curvas de força trativa para cada marcha do câmbio manual. Pode-se verificar pela figura que para a rotação de torque máximo de 4250 rpm, a inclinação máxima se dá em aproximadamente 76,68%. Enquanto que as discontinuidades entre as marchas provocada pelo desacoplamento do eixo do motor com o eixo de transmissão ficou de acordo com o esperado, pode-se observar que conforme aumenta-se a marcha, reduz-se o torque e aumenta-se a velocidade, distribuindo melhor a força produzida no motor.

Foram gerados mais quatro gráficos de força por tração, variando-se a massa do veículo, considerando a massa do motorista, dos ocupantes, das bagagens e do próprio veículo. Conforme a Tabela 8, foi levado em consideração a massa média de um brasileiro do sexo masculino como 70kg.

Tabela 9 - Incremento de massa no veículo.

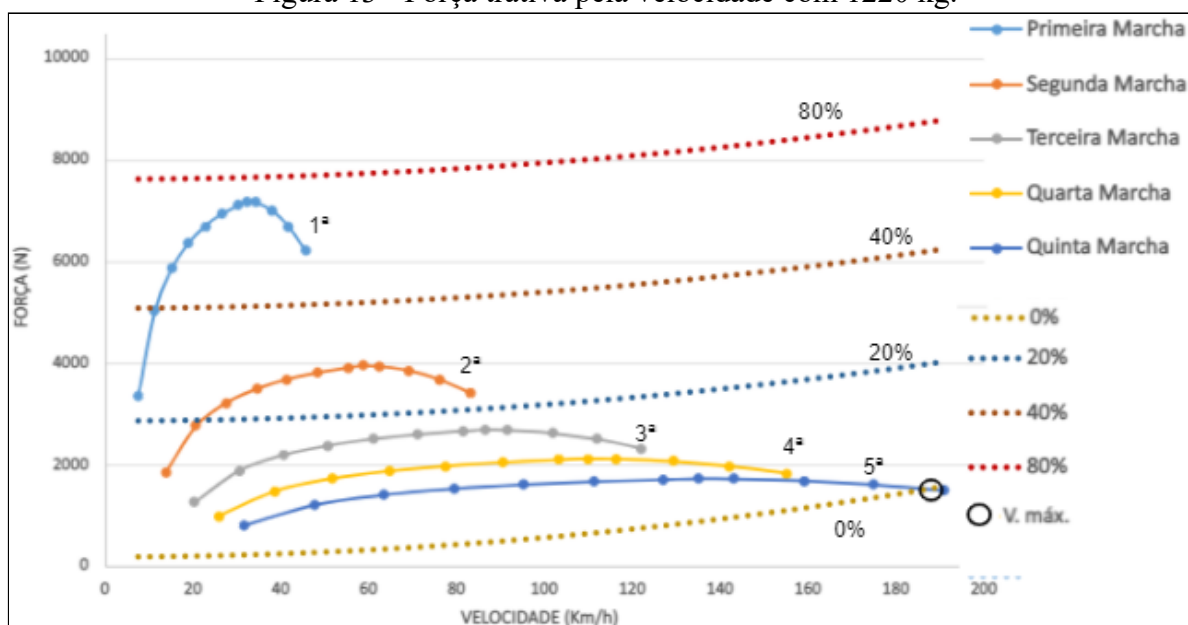
Condição de carga	Massa
Veículo + motorista	1.220kg
Veículo com motorista + 3 passageiros	1.430kg
Veículo com motorista + 3 passageiros + bagagens	1.640 kg
Veículo com excesso de carga	1.700kg

Fonte: Autor (2021)

A velocidade máxima varia de acordo com o incremento de carga, segundo Gillespie (1992), esta pode ser obtida através da análise do gráfico da força trativa pela velocidade, onde a curva da inclinação de 0% cruzar a curva de força da última marcha, será o ponto onde a força resistiva ao movimento será maior que a força propulsora, portanto o veículo não irá mais acelerar, atingindo a velocidade máxima.

A Figura 13 mostra o gráfico para o primeiro caso, é possível observar um aumento na força necessária para o automóvel superar a rampa, o pico de torque máximo se dá em torno de 70,01% de inclinação enquanto a velocidade máxima é de aproximadamente 187 km/h.

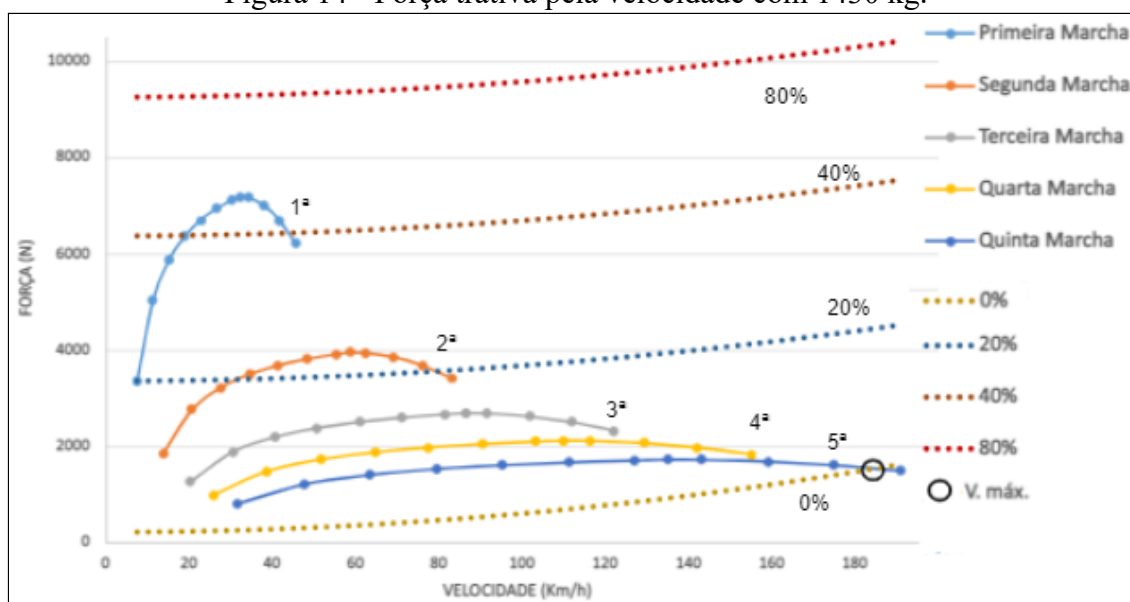
Figura 13 - Força trativa pela velocidade com 1220 kg.



Fonte: Autor (2021)

A Figura 14 mostra o gráfico para o veículo com 1.430 kg, com um aumento de 17,21% na massa total em comparação com o primeiro caso. A força requerida pela rampa aumentou consideravelmente. A inclinação máxima se dá em 56,07%, a velocidade máxima se dá por volta de 182 km/h.

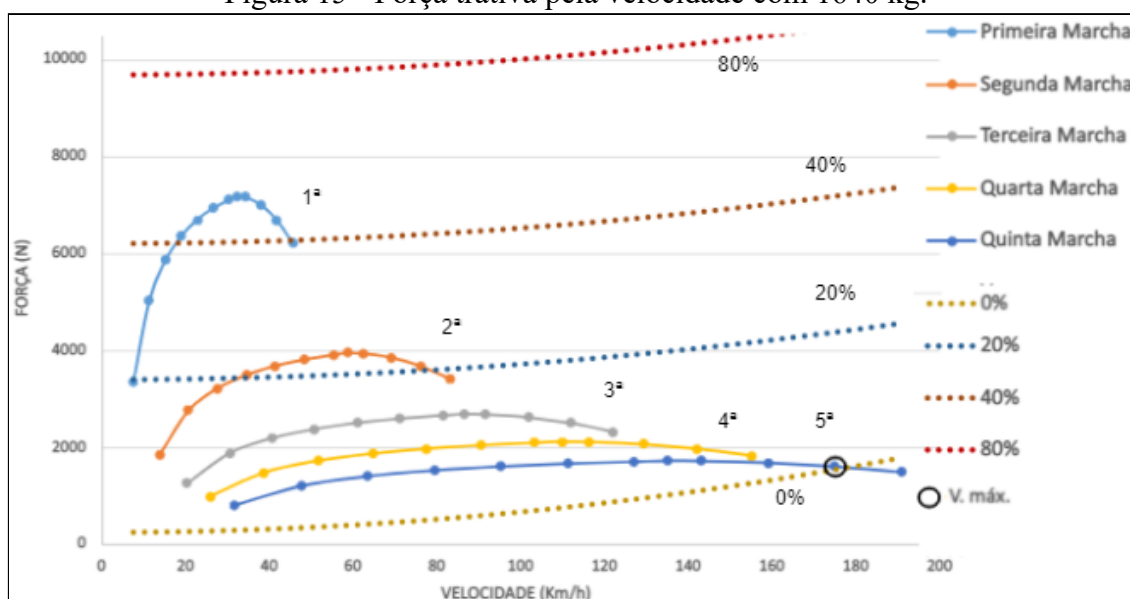
Figura 14 - Força trativa pela velocidade com 1430 kg.



Fonte: Autor (2021)

A Figura 15 mostra o caso três no qual, a massa foi aumentada em 34,42% em relação ao primeiro caso. Com isso a inclinação máxima se deu em 47,12%, enquanto que a velocidade máxima está aproximadamente em 178 km/h.

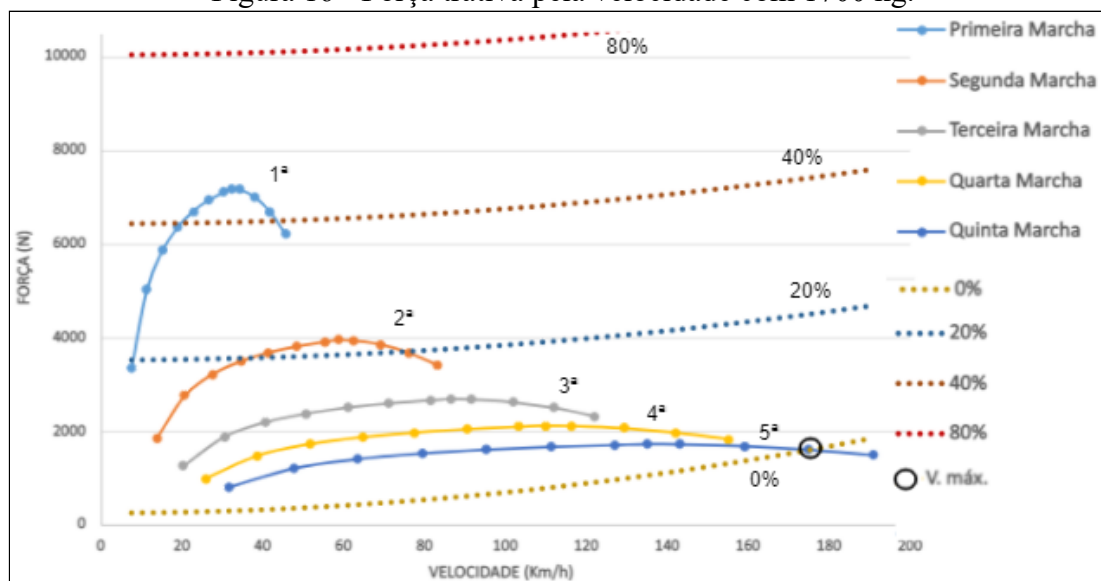
Figura 15 - Força trativa pela velocidade com 1640 kg.



Fonte: Autor (2021)

A Figura 16 mostra o gráfico para a carga de 1700 kg, com uma massa 39,35% maior, obteve o menor desempenho, com uma inclinação máxima de aproximadamente 45,10%, a velocidade máxima se encontra por volta de 176 km/h.

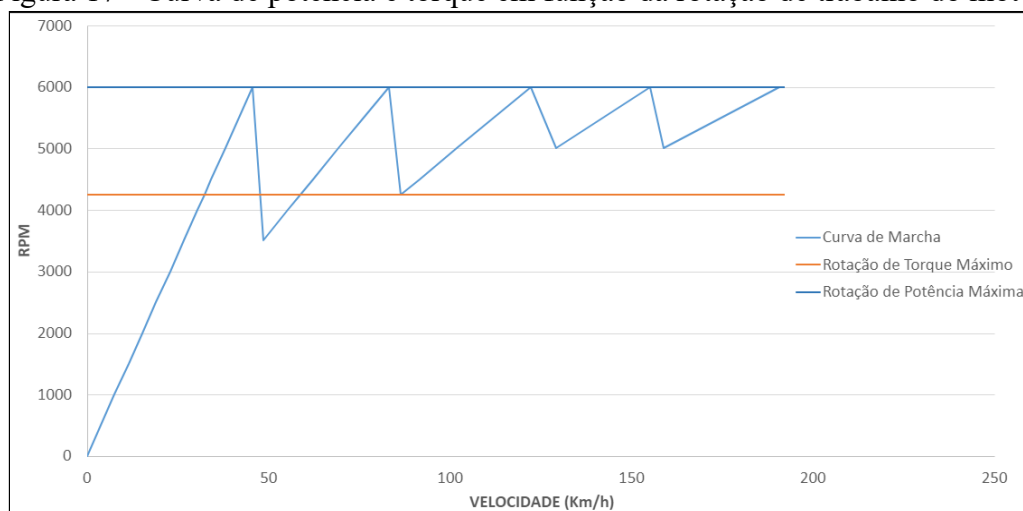
Figura 16 - Força trativa pela velocidade com 1700 kg.



Fonte: Autor (2021)

Com os valores de velocidade calculados, levantou-se as curvas de rotação pela velocidade, conhecido como diagrama dente de serra, onde mostra o ponto onde deve ser efetuada a troca de marchas, mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Curva de potência e torque em função da rotação de trabalho do motor.



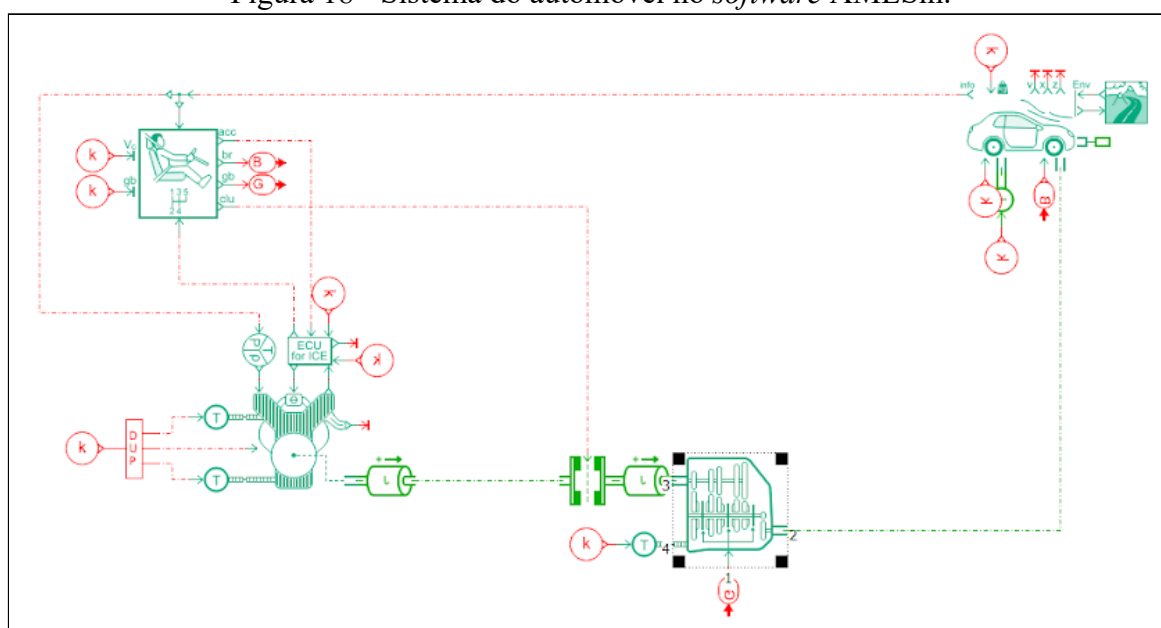
Fonte: Autor (2021)

Analisando o gráfico dente de serra pode-se observar que nas trocas de marchas a rotação está retornando ao nível próximo da rotação de torque máximo. A caixa de câmbio em questão apresentou incrementos de velocidade variável, significando que a mudança na rotação do motor a cada troca de marcha fica progressivamente menor à medida que marchas mais altas são engatadas.

4.2 ANÁLISE NO *SOFTWARE* AMESIM

No *software* foram realizadas as simulações de consumo de combustível e CO_2 gerado no processo. Inicialmente foi gerado o sistema do veículo no programa seguindo as quatro etapas citadas na seção 2.4, os dados do motor e transmissão utilizados estão disponíveis na Tabela 4. A Figura 18 mostra o modelo utilizado no programa.

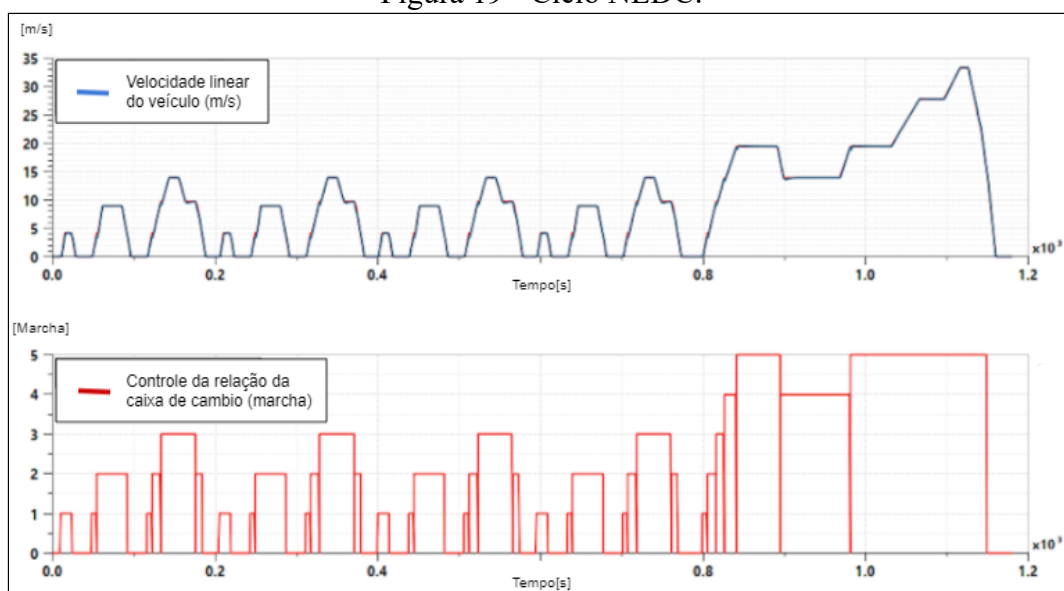
Figura 18 - Sistema do automóvel no *software* AMESin.



Fonte: Autor (2021)

Selecionou-se o ciclo NEDC para o veículo. Como é possível perceber na Figura 19 o ciclo de condução urbana que inicia no instante zero e termina no instante 0,8 s, enquanto que o ciclo extra urbano começa em 0,8 s e finaliza em 1,7 s (tempo em escala de 1 para 1000).

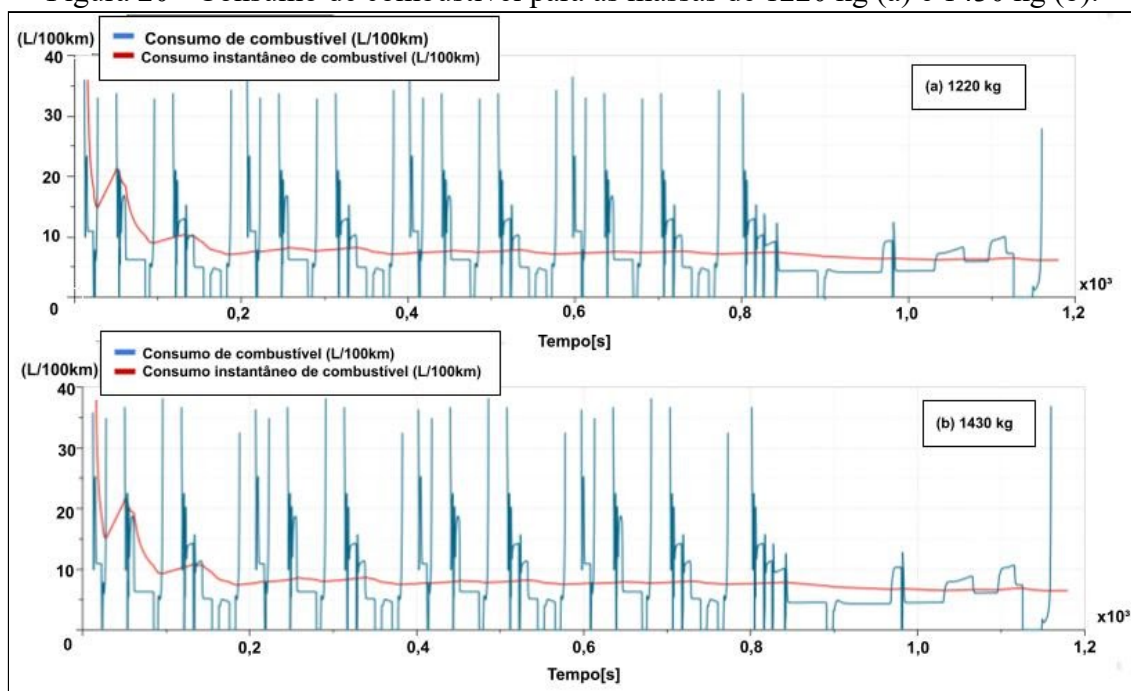
Figura 19 - Ciclo NEDC.



Fonte: Autor (2021)

Com isso foi iniciada a simulação e com as opções gráficas do software foram gerados os gráficos para o veículo. Foram elaborados os gráficos para as quatro condições de cargas mostradas na Tabela 6. A Figura 20 mostra o gráfico de consumo de combustível para as massas de 1220 e 1430 kg.

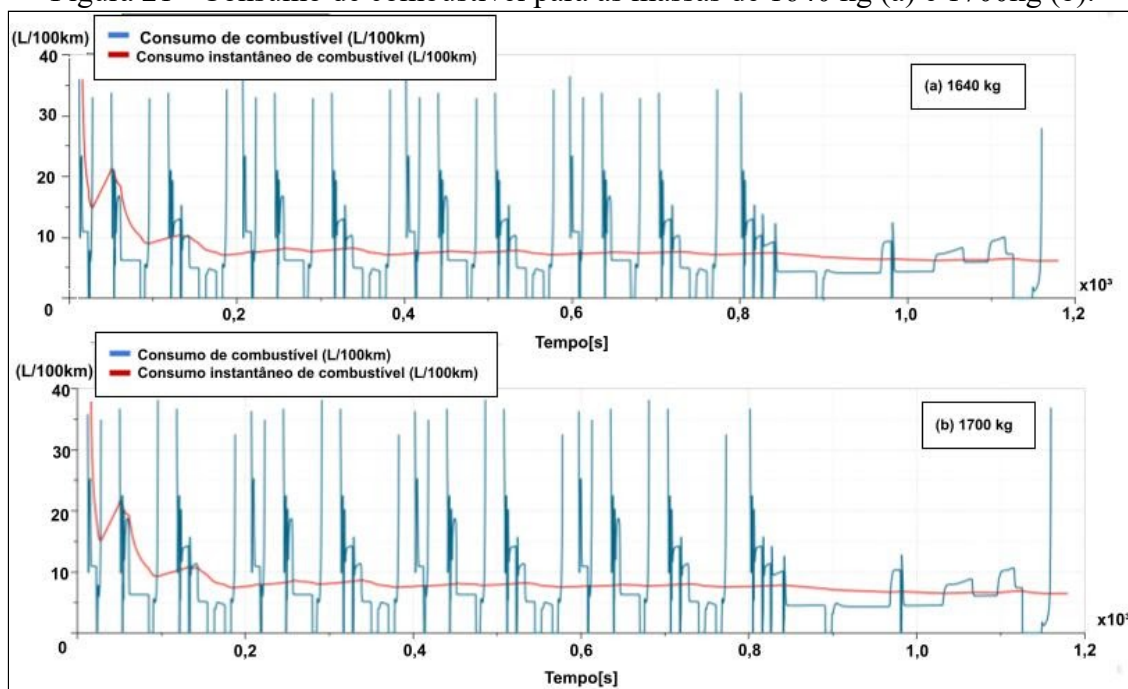
Figura 20 - Consumo de combustível para as massas de 1220 kg (a) e 1430 kg (b).



Fonte: Autor (2021)

Embora o comportamento dos gráficos seja similar, é possível observar um aumento módico no consumo de combustível, representado pela linha vermelha nos gráficos. As curvas para as massas de 1640 e 1700kg estão representadas pela Figura 21.

Figura 21 - Consumo de combustível para as massas de 1640 kg (a) e 1700kg (b).



Fonte: Autor (2021)

O comportamento das curvas de performance do combustível mostrou-se semelhante, a única variação foi um aumento modesto no consumo e emissão de gás carbônico. Os valores totais do consumo do combustível e emissão de CO_2 são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Consumo e emissão devido ao incremento de massa.

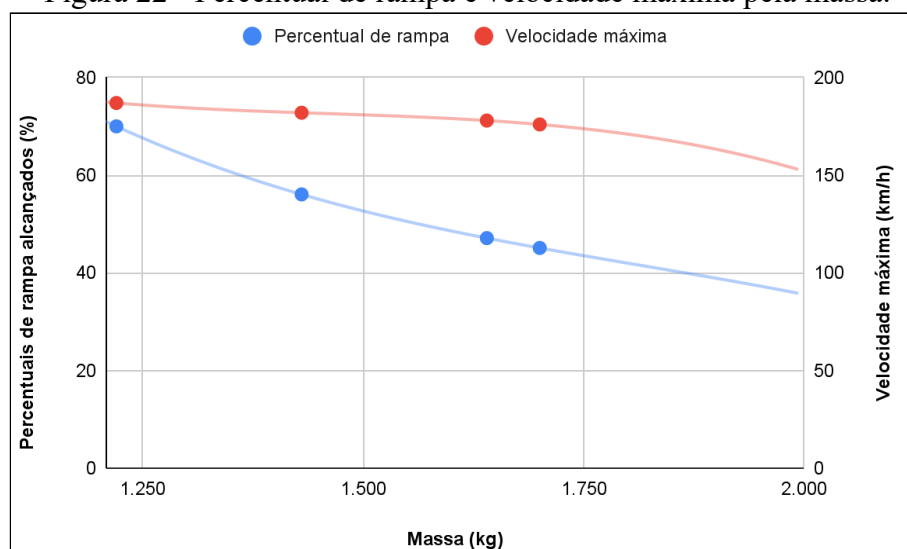
Massa	Consumo de Combustível	Emissão de CO_2
1.150 kg	6,7 L/100km	160 g/km
1.220 kg	6,138 L/100km	146,6 g/km
1.430 kg	6,462 L/100km	154,3 g/km
1.640 kg	6,789 L/100km	162,1 g/km
1.700 kg	6,883 L/100km	164,4 g/km

Fonte: Autor (2021)

Os dados obtidos mostraram uma variação se comparados com os dados iniciais para a emissão e consumo de combustível em ordem de marcha, com massa de 1150 kg (Tabela 9), fornecidos pelo fabricante.

Com os dados obtidos individualmente para cada massa empregada nas análises foram gerados gráficos comparativos para o percentual de rampa alcançado, para consumo de combustível e para a emissão de dióxido de carbono, A Figura 22 mostra o percentual de rampa pela massa e velocidade máxima, uma linha de tendência foi adicionada ao gráfico para melhorar a compreensão da queda e estimar valores se a massa fosse aumentada ainda mais.

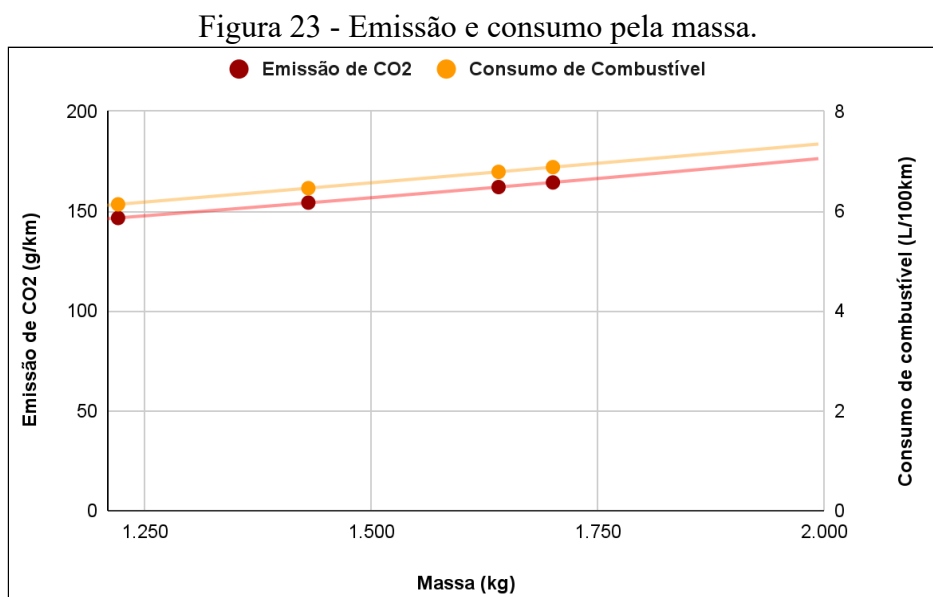
Figura 22 - Percentual de rampa e velocidade máxima pela massa.



Fonte: Autor (2021)

Pode-se observar o perfil de queda do percentual de inclinação conforme aumentamos a massa de forma mais acentuada, se comparado ao decréscimo na velocidade máxima, isso ocorreu pois conforme a Equação 9, o veículo quando sujeito a uma rampa com inclinação, sofre efeito da força peso mais intensamente. Enquanto que a velocidade máxima é obtida em pistas sem inclinação, as principais forças contrárias ao movimento são a resistência ao rolamento e aerodinâmica, a resistência aerodinâmica não depende da massa do veículo conforme a Equação 5, sendo assim, a resistência ao rolamento a principal força resistiva ao movimento, de acordo com a Equação 4.

O comportamento do consumo e emissão de acordo aumentou conforme a massa. A Figura 23 mostra o gráfico de emissão de dióxido de carbono pela massa, este aumentou proporcionalmente à massa.



Fonte: Autor (2021)

No geral o aumento do combustível não seria significativo pelos resultados apresentados. Com um aumento de aproximadamente 40% na massa resultou em um acréscimo em torno de 10%. Segundo as Equações 4 e 9, as resistências ao rolamento e aerodinâmica oscilam de acordo com a massa linearmente, devido a este fato o comportamento do consumo apresentou estes resultados.

5 CONCLUSÕES

O desempenho de automóveis é de grande importância para a sociedade no geral e como os veículos propelidos a gasolina continuam sendo os mais comuns, o estudo da performance destes é válido, sobretudo visto que a maneira como são operados impacta significativamente na sua eficiência.

Através da análise de simulação em *software* Excel® obteve-se resultados que são similares aos do fabricante, a velocidade máxima encontrada foi de aproximadamente 190 km/h, enquanto que o percentual de inclinação da rampa máxima foi de 73% com a massa de 1150 kg. Conforme o incremento de massa esse percentual foi decrescendo, até atingir 45% de inclinação com a massa de 1700 kg, 60 kg acima da massa máxima recomendada pela montadora. A velocidade máxima reduziu com o aumento da massa, decaindo até 176 km/h.

Realizou-se uma simulação com dados compatíveis ao veículo automotivo através do *software* AMESin® para obter dados relativos a consumo de combustível e dados emissivos de CO₂, tendo como variação a massa do veículo.

Os dados obtidos no AMESin® mostraram uma similaridade no consumo de combustível e emissão de CO₂ na configuração básica do veículo.

Mediante os resultados obtidos no propósito de se analisar o veículo quando ao incremento de carga percebe-se que os objetivos estabelecidos para este trabalho foram atingidos.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se uma simulação considerando outros ciclos além do NEDC, sistema de transmissão automático e mais parâmetros emissivos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Ítalo de Fazio. Modelagem e análise de falhas de uma servo-válvula de controle de freio utilizando AMESIM. 2010. 84f. Dissertação de Mestrado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ALBUQUERQUE, Alfredo Alves de. Caracterização da Resposta Dinâmica de uma CVT por Polias Expansivas, 2003. 205f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis 2017 (Ano-Base 2016). Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.etc.com.br/economia/noticia/2017-02/consumo-de-combustiveisno-brasil-caiu-45-em-2016-segundo-anp>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BERTO, Lucas Figueiró. Modelagem dinâmica de sistema automotivo: estudo de caso via testes de performance e falhas do Baja SAE. 2015. 182 f. Tese de mestrado - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

BORGNAGE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentals of Thermodynamics**. 8th ed. New York: Wiley, 2013.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25 ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2005.

BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna. Volume 1. São Paulo: Bluncher, 2012.

CANALE, Antônio Carlos. **Automobilística : Dinâmica e Desempenho**. 1 ed. São Paulo, Érica , 1989.

ÇENGEL, Y.; BOLES, A. M. **Thermodynamics: an engineering approach**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

CROLLA, David; MASHADI, Behrooz. **Vehicle Powertrain Systems**. Chichester: Wiley, 2011.

CROLLA, David. A. **Automotive Engineering: powertrain, chassis and vehicle body**. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2009.

CROLLA, David. **Automotive Engineering: powertrain, chassis system and vehicle body**. Oxford: Butterworth-heinemann, 2009.

CROMER, G. C. et al. Automobile. In **Encyclopædia Britannica**. 2021. Disponível em:<<https://www.britannica.com/technology/automobile>>. Acesso em: 17 maio, 2021.

ECKERMANN, E. **World History of the Automobile**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2001.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA, EUA: Society of Automotive Engineers, 1992.

GREINER, J. et al. The new 7g-tronic of mercedes-benz: Innovative transmission technology for better driving performance, comfort and fuel economy. **SAE Technical Paper** 2004-01-0649.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1 ed. New York: Mcgraw-hill Education. 1988.

HUCHO, Wolf-Heinrich, SOVRAN, Gino. **Aerodynamics of Road Vehicles**. 4 ed. Warrandale: SAE International, 1998.

LANG, Kevin. **Continuously Variable Transmissions: An Overview of CVT Research Past, Present, and Future**. Maio de 2000. Disponível em:<https://pdfs.semanticscholar.org/8b84/74586deef3d757fe447c8768351db544b615.pdf?_ga=2.224137373.705587074.1598236225-1103594891.1598236225>. Acesso em 18 maio, 2021.

LOSSO, Giovana Sguissardi. Detecção de Falhas de Motores de Combustão Interna à Pistão. 2007. 150f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

NAUNHEIMER, Harald et al. **Automotive Transmissions: fundamentals, selection, design and application**. 2. ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

PROCTOR, C. L. Internal-combustion engine. **Encyclopedia Britannica**, 10 Jun. 2020, Disponível em:<<https://www.britannica.com/technology/internal-combustion-engine>>. Acesso em: 17 maio, 2021.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Alternative Fuels Data Center**. Disponível em:<<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-gasoline-cars-work>>. Acesso em: 18 maio, 2021.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análise de impactos. São Paulo: Annablume Editora, 2006

ANEXO A – FICHA TÉCNICA RENAULT CLIO III


TECHNICAL SPECIFICATIONS
NEW RENAULT CLIO
3 DOOR, 5 DOOR AND ESTATE VERSIONS

Engine	PETROL								
	1.2 16v		TCe	1.6 16v		2.0 16v			
Type	1.2 16v 75	1.2 16v 80	TCe 100*	1.6 16v 110	1.6 16v 110	1.6 16v 128	2.0 16v 140**	2.0 16v 140**	
Transmission	D4F 740	D4F 764	D4F 784	K4M 800	K4M 801	K4M 862	M4R 700	M4R 701	
Depollution standard	MT 5	AMT 5	MT 5	MT 5	AT 4	MT 6	MT 6	AT 4	
French fiscal rating	Euro 4								
Meet the three criteria required for Renault eco ³ appellation									
HOMOLOGATION									
French fiscal rating	5		6	7			8		
ENGINE SPECIFICATIONS									
Capacity (cc)	1,149			1,598		1,997			
Bore x stroke (mm)	69 x 76.8			79.5 x 80.5		84 x 90.1			
Number of cylinders/valves	4/16			4/16		4/16			
Compression ratio	9.8 : 1			9.7 : 1		11 : 1		10.1 : 1	
Max. power kW EEC (hp DIN), at (rpm)	55 (75) at 5,500	57.5 (80) at 5,500	74 (100) at 5,500	82 (110) at 6,000		94 (128) at 6,750		101.5 (140) at 6,000	
Max. torque Nm EEC at (rpm)	105 at 4,250	108 at 4,250	145 at 3,000	151 at 4,250		155 at 4,250		194 at 3,750	
Injection type	multipoint sequential								
GEARBOX									
Type	JH3	JA3	JH3	JH3	DPO	TL4	TL4	DPO	
Number of forward speeds	5		5	5	4	6	6	4	
Speed at 1,000rpm in 1st gear	6.71 (11/41)		7.61 (11/41)	7.61 (11/41)	8.65	7.56	8.30	9.01	
in 2nd gear	12.21 (21/43)		13.85 (21/43)	13.85 (21/43)	15.56	13.60	13.34	16.38	
in 3rd gear	17.94 (28/39)		20.36 (28/39)	20.36 (28/39)	23.32	18.26	20.50	24.55	
in 4th gear	24.28 (34/35)		27.56 (34/35)	25.86 (31/34)	32.81	22.82	25.07	35.54	
in 5th gear	30.46 (39/32)		34.57 (39/32)	31.80 (37/33)		27.82	30.55		
in 6th gear						33.00	36.39		
STEERING									
Electric power steering	standard								
Variable rate power steering	standard								
Turning circle between kerbs/walls (m)	10.3/10.6 (tire 165) - 10.7/11 (tire 185) - 11.3/11.5 (tire 195)								
AXLES									
Front	Mac Pherson								
Rear	Flexible beam								
Diameter of front/rear anti-roll bar (mm)	Front: 20.5/built-in (3 and 5 door) Front: 21 /Rear: built-in (GT and estate versions)								
WHEELS - TYRES									
Wheels (inches)	5.5" J15"		6" J15"	6" J15"		6" J16"			
Standard tyres	165 x 65 R15 81T		185 x 60 R15 84H	185 x 60 R15 84H		195 x 50 R16 88V			
BRAKING									
Type of circuit	X								
ABS and emergency brake assist	standard								
ESP with CVS	Option								
Servo: double, diameter (inches)	10"								
Front: vented discs, diameter (mm)			260/22				280/24		
Rear: drums/solid discs, diameter (mm)	Drums 203***					Discs 240/8			
PERFORMANCE									
S/Cd	0.725								
Maximum speed (kph)	167	171	184	190	186	197	205/-	200/-	
0 - 100kph (s)	13.4/13.6	14.9/15.1	11/11.2	10.2/10.4	12.2/12.4	9.3/9.5	8.7/-	9.3/-	
400m standing start (s)	18.7/18.8	19.2/19.4	17.4/17.6	17.1/17.3	18.1/18.3	16.6/16.8	16.3/-	16.9/-	
1,000m standing start (s)	35.2/35.4	36/36.6	32.6/32.8	33.1/33.3	33.4/33.6	30.5/30.7	30.10/-	30.10/-	
FUEL CONSUMPTION EEC 99/100									
CO ₂ emissions (g/km)	139	133	137	160	179	160	173	187	
Urban cycle (cold start) (litres/100km)	7.6	7.1	7.4	9.0	10.0	8.9	9.9	10.9	
Extra-urban cycle (litres/100km)	4.9	4.7	4.8	5.4	6.1	5.6	5.8	6.2	
Combined cycle (litres/100km)	5.9	5.6	5.8	6.7	7.5	6.9	7.3	7.9	
CAPACITIES									
Fuel tank (litres)	55								
Engine oil, with filter (litres)	4					5			
WEIGHTS (KG)									
Kerb weight	1,080/1,090/1,110	1,080/1,090/1,110	1,080/1,090/1,120	1,140/1,150/1,170	1,190/1,180/1,210	1,140/1,150/1,270	1,175/1,185/-	1,205/1,215/-	
Gross vehicle weight (GVW)	1,570/1,580/1,598	1,570/1,580/1,608	1,570/1,580/1,608	1,630/1,640/1,665	1,630/1,640/1,665	1,630/1,640/1,665	1,665/1,675/-	1,695/1,705/-	
Gross train weight (GTW)	2,500	2,500	2,500	2,550	2,550/2,600/2,600	2,550	2,550/2,600/-	2,600	
Braked trailer weight (within limit of GVW)	1,200	1,200	1,200	1,150	1,150	1,200/1,150	1,200/1,150	1,200	
Unbraked trailer weight	535	535	535	535	535	535	535	535	

Powertrain ranges vary depending on market. Please consult the pricing press release of the country concerned to establish which powertrains are available for a particular market. Example (France): the 1.2 16v 80 Quickshift, the 1.6 16v with manual gearbox and the 2.0 16v 140 (with manual gearbox and automatic transmission) are not available.

MT 5 = five-speed manual gearbox/AMT 5 = five-speed robotized transmission / MT 6 = six-speed manual gearbox / AT 4 = four-speed automatic transmission.

*Turbo Control Efficiency

** Not available for New Renault Clio Estate

*** Disc diameter with ESP: 240mm

APÊNDICE B – PERFORMANCE CÂMBIO MANUAL

Figura 24 - Performance câmbio manual parte 1.

rpm	torque	Primeira Marcha			
		velocidade (Km/h)	velocidade (m/s)	torque (Nm)	força (N)
1000,00	70,30	7,756	2,154	788,849	3280,446
1500,00	105,50	11,634	3,232	1183,834	4923,002
2000,00	123,10	15,512	4,309	1381,327	5744,280
2500,00	133,60	19,389	5,386	1499,149	6234,247
3000,00	140,70	23,267	6,463	1578,820	6565,558
3500,00	145,70	27,145	7,540	1634,926	6798,876
4000,00	149,40	31,023	8,618	1676,444	6971,531
4250,00	151,00	32,962	9,156	1694,398	7046,192
4500,00	150,60	34,901	9,695	1689,909	7027,527
5000,00	147,20	38,779	10,772	1651,757	6868,871
5500,00	140,50	42,657	11,849	1576,576	6556,225
6000,00	130,50	46,535	12,926	1464,364	6089,590

Fonte: Autor (2021)

Figura 25 - Performance câmbio manual parte 2.

Segunda Marcha				Terceira Marcha			
velocidade (Km/h)	velocidade (m/s)	torque (Nm)	força (N)	velocidade (Km/h)	velocidade (m/s)	torque (Nm)	força (N)
14,118	3,922	433,363	1802,150	20,754	20,754	294,788	1225,881
21,177	5,882	650,353	2704,506	31,132	31,132	442,391	1839,693
28,236	7,843	758,847	3155,685	41,509	41,509	516,193	2146,599
35,294	9,804	823,575	3424,854	51,886	51,886	560,222	2329,697
42,353	11,765	867,342	3606,863	62,263	62,263	589,994	2453,506
49,412	13,726	898,165	3735,039	72,640	72,640	610,961	2540,695
56,471	15,686	920,973	3829,889	83,017	83,017	626,476	2605,215
60,001	16,667	930,836	3870,905	88,206	88,206	633,185	2633,115
63,530	17,647	928,371	3860,651	93,395	93,395	631,508	2626,140
70,589	19,608	907,411	3773,491	103,772	103,772	617,251	2566,852
77,648	21,569	866,109	3601,736	114,149	114,149	589,156	2450,018
84,707	23,530	804,465	3345,385	124,526	124,526	547,223	2275,640

Fonte: Autor (2021)

Figura 26 - Performance câmbio manual parte 3.

Quarta Marcha				Quinta Marcha			
velocidade (Km/h)	velocidade (m/s)	torque (Nm)	força (N)	velocidade (Km/h)	velocidade (m/s)	torque (Nm)	força (N)
26,357	7,321	232,124	965,293	32,412	9,003	188,762	784,972
39,536	10,982	348,351	1448,625	48,618	13,505	283,277	1178,016
52,714	14,643	406,464	1690,292	64,824	18,007	330,535	1374,538
65,893	18,304	441,134	1834,468	81,030	22,508	358,729	1491,781
79,072	21,964	464,578	1931,958	97,236	27,010	377,793	1571,060
92,250	25,625	481,087	2000,613	113,441	31,512	391,218	1626,890
105,429	29,286	493,305	2051,418	129,647	36,013	401,153	1668,204
112,018	31,116	498,588	2073,388	137,750	38,264	405,449	1686,070
118,607	32,946	497,267	2067,895	145,853	40,515	404,375	1681,603
131,786	36,607	486,040	2021,210	162,059	45,016	395,246	1643,639
144,964	40,268	463,918	1929,212	178,265	49,518	377,256	1568,827
158,143	43,929	430,899	1791,901	194,471	54,020	350,405	1457,166

Fonte: Autor (2021)

Figura 27 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1150 kg.

Velocidade	0%	20%	30%	40%	60%	80%
7,61017	227,4798	2435,5824	3459,6793	4401,1859	5999,6098	7225,5344
11,41525	229,7921	2437,8947	3461,9916	4403,4982	6001,9221	7227,8467
15,22033	233,0293	2441,1319	3465,2288	4406,7354	6005,1593	7231,0839
19,02541	237,1914	2445,2940	3469,3909	4410,8975	6009,3214	7235,2460
22,83050	242,2784	2450,3810	3474,4779	4415,9845	6014,4084	7240,3330
26,63558	248,2904	2456,3930	3480,4899	4421,9965	6020,4204	7246,3450
30,44066	255,2272	2463,3298	3487,4267	4428,9333	6027,3572	7253,2818
32,34320	259,0425	2467,1451	3491,2420	4432,7486	6031,1725	7257,0971
34,24574	263,0890	2471,1916	3495,2885	4436,7951	6035,2190	7261,1436
38,05083	271,8757	2479,9782	3504,0752	4445,5818	6044,0056	7269,9303
41,85591	281,5872	2489,6898	3513,7868	4455,2933	6053,7172	7279,6418
45,66099	292,2237	2500,3263	3524,4233	4465,9298	6064,3537	7290,2783
48,48464	300,7146	2508,8172	3532,9141	4474,4207	6072,8446	7298,7692
55,41101	323,6997	2531,8023	3555,8992	4497,4058	6095,8297	7321,7543
58,87420	336,3415	2544,4441	3568,5410	4510,0476	6108,4715	7334,3961
62,33739	349,7495	2557,8521	3581,9490	4523,4556	6121,8795	7347,8041
69,26376	378,8639	2586,9665	3611,0634	4552,5700	6150,9939	7376,9185
76,19014	411,0430	2619,1456	3643,2426	4584,7492	6183,1730	7409,0977
83,11652	446,2868	2654,3894	3678,4864	4619,9930	6218,4168	7444,3415
86,55011	464,8943	2672,9969	3697,0938	4638,6004	6237,0243	7462,9489
91,64129	493,8710	2701,9736	3726,0705	4667,5771	6266,0010	7491,9256
101,82365	556,7917	2764,8943	3788,9912	4730,4978	6328,9217	7554,8463
112,00602	626,3356	2834,4382	3858,5352	4800,0417	6398,4656	7624,3902
122,18839	702,5028	2910,6054	3934,7023	4876,2089	6474,6328	7700,5574
129,31176	759,7253	2967,8279	3991,9249	4933,4314	6531,8553	7757,7799
142,24294	871,8854	3079,9880	4104,0849	5045,5915	6644,0154	7869,9400
155,17412	994,7273	3202,8299	4226,9268	5168,4334	6766,8573	7992,7819
159,01681	1033,2904	3241,3930	4265,4899	5206,9965	6805,4204	8031,3450
174,91849	1202,8991	3411,0017	4435,0986	5376,6052	6975,0291	8200,9537
190,82017	1388,6610	3596,7636	4620,8605	5562,3671	7160,7910	8386,7156

Fonte: Autor (2021)

Figura 28 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1220 kg.

Velocidade	0%	20%	30%	40%	60%	80%
7,61017	241,2138	2583,7227	3670,1559	4668,9716	6364,6909	7665,2370
11,41525	243,5261	2586,0349	3672,4682	4671,2839	6367,0031	7667,5493
15,22033	246,7633	2589,2721	3675,7054	4674,5211	6370,2403	7670,7865
19,02541	250,9254	2593,4343	3679,8675	4678,6832	6374,4024	7674,9486
22,83050	256,0124	2598,5213	3684,9545	4683,7702	6379,4895	7680,0356
26,63558	262,0244	2604,5332	3690,9665	4689,7822	6385,5014	7686,0475
30,44066	268,9612	2611,4701	3697,9033	4696,7190	6392,4383	7692,9844
32,34320	272,7765	2615,2853	3701,7186	4700,5343	6396,2535	7696,7996
34,24574	276,8230	2619,3318	3705,7651	4704,5808	6400,3000	7700,8461
38,05083	285,6097	2628,1185	3714,5517	4713,3674	6409,0867	7709,6328
41,85591	295,3212	2637,8301	3724,2633	4723,0790	6418,7983	7719,3444
45,66099	305,9577	2648,4666	3734,8998	4733,7155	6429,4348	7729,9809
48,48464	314,4486	2656,9575	3743,3907	4742,2064	6437,9257	7738,4718
55,41101	337,4337	2679,9426	3766,3758	4765,1915	6460,9107	7761,4569
58,87420	350,0755	2692,5843	3779,0176	4777,8333	6473,5525	7774,0987
62,33739	363,4835	2705,9923	3792,4256	4791,2413	6486,9605	7787,5066
69,26376	392,5979	2735,1068	3821,5400	4820,3557	6516,0750	7816,6211
76,19014	424,7770	2767,2859	3853,7191	4852,5348	6548,2541	7848,8002
83,11652	460,0208	2802,5297	3888,9629	4887,7786	6583,4979	7884,0440
86,55011	478,6283	2821,1372	3907,5704	4906,3861	6602,1054	7902,6515
91,64129	507,6050	2850,1138	3936,5471	4935,3628	6631,0820	7931,6281
101,82365	570,5257	2913,0345	3999,4678	4998,2835	6694,0027	7994,5488
112,00602	640,0696	2982,5785	4069,0117	5067,8274	6763,5467	8064,0928
122,18839	716,2368	3058,7457	4145,1789	5143,9946	6839,7139	8140,2600
129,31176	773,4593	3115,9682	4202,4014	5201,2171	6896,9364	8197,4825
142,24294	885,6194	3228,1282	4314,5615	5313,3771	7009,0964	8309,6425
155,17412	1008,4613	3350,9701	4437,4034	5436,2191	7131,9383	8432,4844
159,01681	1047,0244	3389,5333	4475,9665	5474,7822	7170,5015	8471,0476
174,91849	1216,6331	3559,1420	4645,5752	5644,3909	7340,1101	8640,6563
190,82017	1402,3950	3744,9038	4831,3371	5830,1528	7525,8720	8826,4182

Fonte: Autor (2021)

Figura 29 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1460 kg.

Velocidade	0%	20%	30%	40%	60%	80%	100%
7,61017	212,2743	2959,3640	4234,4023	5407,2039	7399,7882	8929,5733	10070,1485
11,41525	214,5866	2961,6763	4236,7146	5409,5162	7402,1004	8931,8856	10072,4608
15,22033	217,8238	2964,9135	4239,9518	5412,7534	7405,3376	8935,1228	10075,6980
19,02541	221,9859	2969,0756	4244,1139	5416,9155	7409,4997	8939,2849	10079,8601
22,83050	227,0729	2974,1626	4249,2009	5422,0025	7414,5868	8944,3719	10084,9471
26,63558	233,0849	2980,1745	4255,2128	5428,0144	7420,5987	8950,3838	10090,9590
30,44066	240,0217	2987,1114	4262,1497	5434,9513	7427,5355	8957,3207	10097,8959
32,34320	243,8370	2990,9267	4265,9649	5438,7666	7431,3508	8961,1359	10101,7111
34,24574	247,8835	2994,9732	4270,0114	5442,8130	7435,3973	8965,1824	10105,7576
38,05083	256,6702	3003,7598	4278,7981	5451,5997	7444,1840	8973,9691	10114,5443
41,85591	266,3817	3013,4714	4288,5097	5461,3113	7453,8956	8983,6807	10124,2559
45,66099	277,0182	3024,1079	4299,1462	5471,9478	7464,5321	8994,3172	10134,8924
48,48464	285,5091	3032,5988	4307,6371	5480,4387	7473,0229	9002,8081	10143,3833
55,41101	308,4942	3055,5839	4330,6222	5503,4238	7496,0080	9025,7932	10166,3684
58,87420	321,1360	3068,2257	4343,2640	5516,0656	7508,6498	9038,4350	10179,0102
62,33739	334,5440	3081,6337	4356,6719	5529,4735	7522,0578	9051,8429	10192,4181
69,26376	363,6584	3110,7481	4385,7864	5558,5880	7551,1722	9080,9574	10221,5326
76,19014	395,8375	3142,9272	4417,9655	5590,7671	7583,3514	9113,1365	10253,7117
83,11652	431,0813	3178,1710	4453,2093	5626,0109	7618,5952	9148,3803	10288,9555
86,55011	449,6888	3196,7785	4471,8168	5644,6184	7637,2026	9166,9878	10307,5630
91,64129	478,6655	3225,7551	4500,7934	5673,5950	7666,1793	9195,9644	10336,5396
101,82365	541,5862	3288,6759	4563,7141	5736,5158	7729,1000	9258,8851	10399,4603
112,00602	611,1301	3358,2198	4633,2581	5806,0597	7798,6440	9328,4291	10469,0043
122,18839	687,2973	3434,3870	4709,4253	5882,2269	7874,8112	9404,5963	10545,1715
129,31176	744,5198	3491,6095	4766,6478	5939,4494	7932,0337	9461,8188	10602,3940
142,24294	856,6799	3603,7695	4878,8078	6051,6094	8044,1937	9573,9788	10714,5540
155,17412	979,5218	3726,6115	5001,6497	6174,4514	8167,0356	9696,8208	10837,3959
159,01681	1018,0849	3765,1746	5040,2129	6213,0145	8205,5987	9735,3839	10875,9591
174,91849	1187,6936	3934,7833	5209,8216	6382,6232	8375,2074	9904,9926	11045,5678
190,82017	1373,4555	4120,5452	5395,5835	6568,3851	8560,9693	10090,7545	11231,3297

Fonte: Autor (2021)

Figura 30 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1640 kg.

Força de Tração Requerida em Função da Rampa							
Velocidade	0%	20%	30%	40%	60%	80%	100%
7,61017	243,1758	3393,6843	4855,9659	6200,9971	8486,1987	10240,6376	11548,7098
11,41525	245,4881	3395,9965	4858,2782	6203,3094	8488,5110	10242,9499	11551,0221
15,22033	248,7253	3399,2337	4861,5154	6206,5466	8491,7482	10246,1871	11554,2593
19,02541	252,8874	3403,3959	4865,6775	6210,7087	8495,9103	10250,3492	11558,4214
22,83050	257,9744	3408,4829	4870,7645	6215,7958	8500,9973	10255,4362	11563,5084
26,63558	263,9864	3414,4948	4876,7765	6221,8077	8507,0092	10261,4481	11569,5204
30,44066	270,9232	3421,4317	4883,7133	6228,7445	8513,9461	10268,3850	11576,4572
32,34320	274,7385	3425,2469	4887,5286	6232,5598	8517,7613	10272,2002	11580,2725
34,24574	278,7850	3429,2934	4891,5751	6236,6063	8521,8078	10276,2467	11584,3190
38,05083	287,5717	3438,0801	4900,3618	6245,3930	8530,5945	10285,0334	11593,1056
41,85591	297,2832	3447,7917	4910,0733	6255,1046	8540,3061	10294,7450	11602,8172
45,66099	307,9197	3458,4282	4920,7098	6265,7411	8550,9426	10305,3815	11613,4537
48,48464	316,4106	3466,9191	4929,2007	6274,2319	8559,4335	10313,8724	11621,9446
55,41101	339,3957	3489,9041	4952,1858	6297,2170	8582,4186	10336,8575	11644,9297
58,87420	352,0375	3502,5459	4964,8276	6309,8588	8595,0604	10349,4993	11657,5715
62,33739	365,4455	3515,9539	4978,2356	6323,2668	8608,4683	10362,9072	11670,9795
69,26376	394,5599	3545,0684	5007,3500	6352,3812	8637,5828	10392,0217	11700,0939
76,19014	426,7390	3577,2475	5039,5292	6384,5604	8669,7619	10424,2008	11732,2730
83,11652	461,9828	3612,4913	5074,7730	6419,8042	8705,0057	10459,4446	11767,5168
86,55011	480,5903	3631,0988	5093,3804	6438,4116	8723,6132	10478,0521	11786,1243
91,64129	509,5670	3660,0754	5122,3571	6467,3883	8752,5898	10507,0287	11815,1010
101,82365	572,4877	3722,9961	5185,2778	6530,3090	8815,5105	10569,9494	11878,0217
112,00602	642,0316	3792,5401	5254,8217	6599,8530	8885,0545	10639,4934	11947,5656
122,18839	718,1988	3868,7073	5330,9889	6676,0201	8961,2217	10715,6606	12023,7328
129,31176	775,4213	3925,9298	5388,2114	6733,2427	9018,4442	10772,8831	12080,9553
142,24294	887,5814	4038,0898	5500,3715	6845,4027	9130,6042	10885,0431	12193,1153
155,17412	1010,4233	4160,9317	5623,2134	6968,2446	9253,4461	11007,8850	12315,9573
159,01681	1048,9864	4199,4949	5661,7765	7006,8077	9292,0093	11046,4482	12354,5204
174,91849	1218,5951	4369,1036	5831,3852	7176,4164	9461,6180	11216,0569	12524,1291
190,82017	1404,3570	4554,8654	6017,1471	7362,1783	9647,3799	11401,8188	12709,8910

Fonte: Autor (2021)

Figura 31 - Força de tração requerida em função da rampa massa 1700 kg.

Velocidade	0%	20%	30%	40%	60%	80%
7,61017	565,9248	2767,4550	3783,8509	4715,4242	6289,8240	7489,8156
11,41525	568,2371	2769,7673	3786,1631	4717,7365	6292,1363	7492,1279
15,22033	571,4743	2773,0045	3789,4003	4720,9737	6295,3735	7495,3651
19,02541	575,6364	2777,1666	3793,5624	4725,1358	6299,5356	7499,5272
22,83050	580,7234	2782,2537	3798,6495	4730,2228	6304,6226	7504,6142
26,63558	586,7354	2788,2656	3804,6614	4736,2348	6310,6346	7510,6261
30,44066	593,6722	2795,2024	3811,5982	4743,1716	6317,5714	7517,5630
32,34320	597,4875	2799,0177	3815,4135	4746,9869	6321,3867	7521,3782
34,24574	601,5340	2803,0642	3819,4600	4751,0334	6325,4332	7525,4247
38,05083	610,3207	2811,8509	3828,2467	4759,8201	6334,2198	7534,2114
41,85591	620,0322	2821,5625	3837,9583	4769,5316	6343,9314	7543,9230
45,66099	630,6687	2832,1990	3848,5948	4780,1681	6354,5679	7554,5595
48,48464	639,1596	2840,6898	3857,0857	4788,6590	6363,0588	7563,0504
55,41101	662,1447	2863,6749	3880,0707	4811,6441	6386,0439	7586,0355
58,87420	674,7865	2876,3167	3892,7125	4824,2859	6398,6857	7598,6773
62,33739	688,1945	2889,7247	3906,1205	4837,6939	6412,0937	7612,0852
69,26376	717,3089	2918,8391	3935,2350	4866,8083	6441,2081	7641,1997
76,19014	749,4880	2951,0183	3967,4141	4898,9874	6473,3872	7673,3788
83,11652	784,7318	2986,2621	4002,6579	4934,2312	6508,6310	7708,6226
86,55011	803,3393	3004,8695	4021,2653	4952,8387	6527,2385	7727,2301
91,64129	832,3160	3033,8462	4050,2420	4981,8154	6556,2152	7756,2067
101,82365	895,2367	3096,7669	4113,1627	5044,7361	6619,1359	7819,1274
112,00602	964,7806	3166,3109	4182,7067	5114,2800	6688,6798	7888,6714
122,18839	1040,9478	3242,4780	4258,8739	5190,4472	6764,8470	7964,8386
129,31176	1098,1703	3299,7006	4316,0964	5247,6697	6822,0695	8022,0611
142,24294	1210,3304	3411,8606	4428,2564	5359,8298	6934,2295	8134,2211
155,17412	1333,1723	3534,7025	4551,0983	5482,6717	7057,0715	8257,0630
159,01681	1371,7354	3573,2656	4589,6615	5521,2348	7095,6346	8295,6262
174,91849	1541,3441	3742,8743	4759,2701	5690,8435	7265,2433	8465,2349
190,82017	1727,1060	3928,6362	4945,0320	5876,6054	7451,0052	8650,9968

Fonte: Autor (2021)