



Universidade Federal
de Campina Grande

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica – CGEE

**MEDIÇÃO DO CARREGAMENTO DE UM
CAMINHÃO MEDIANTE O EMPREGO DE
SENSORES ELÉTRICOS**

Gilcianne Andreza Fernandes de Araujo

Setembro de 2011

Gilcianne Andreza Fernandes de Araújo



Universidade Federal
de Campina Grande

Trabalho de Conclusão de Curso

MEDIÇÃO DO CARREGAMENTO DE UM CAMINHÃO MEDIANTE O EMPREGO DE SENSORES ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador:

Professor Doutor Benedito Antonio Luciano

Campina Grande

Setembro de 2011

Gilcianne Andreza Fernandes de Araújo

**MEDIÇÃO DO CARREGAMENTO DE UM
CAMINHÃO MEDIANTE O EMPREGO DE
SENSORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em ____ de _____ de 2011

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Professor Convidado
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Campina Grande
Setembro de 2011



Resumo

Tomando como base a mecânica newtoniana e a teoria básica da eletroeletrônica, neste trabalho é apresentada a realização de um sistema autônomo que utiliza sensores para automatizar um sistema de medição do carregamento de um caminhão. A motivação para o desenvolvimento desse sistema foi o fato de na maioria dos sistemas de medição de carregamento existentes atualmente encontra-se a massa do carregamento estimada em malha aberta, através dos olhos humanos. O sistema de estimação da massa carregada no caminhão, em malha aberta, tem causado perda de tempo e dinheiro para empresas, já que esse tipo de estimação é impreciso e acaba, por vezes, não atendendo às especificações normativas que permitem a liberação da carga para seu destino final.

Palavras-chave: Efeito piezoelétrico, sensores, mecânica newtoniana, sistema de medição.



Sumário

Resumo	4
Sumário	5
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tabelas	9
1. Introdução	10
2. Objetivos.....	11
3. Metodologia	11
4. Sensores	12
5. Sistemas de medição de massa atuais.....	14
6. Sensores de força.....	14
6.1. Sensores de força que utilizam o efeito piezoelétrico e piezoresistivo.....	15
6.2. Sensores de força que utilizam a liga amorfa.....	17
6.3. Sensores de movimento	18
6.4. Sensores de aceleração.....	18
7. Estudo das forças que existem entre dois sólidos	19
8. Contato entre duas superfícies	22
9. Estudo de caso: medição da massa carregada de um caminhão	23
9.1. Medição do coeficiente de atrito estático.....	25
9.2. Medição do coeficiente de atrito dinâmico.....	27
10. Conclusão	30



11. Anexo	31
11.1. Anexo 1: Estudo do coeficiente de atrito pneu-solo	31
11.2. Anexo 2: Experimento com a carroça.....	35
12. Bibliografia.....	43

Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama de blocos que representa a ação de um sensor de força.....	15
Figura 2 - Forma física de um sensor de força piezoresistivo	15
Figura 3 - Circuito em ponte normalmente utilizado para aplicação do sensor de força que utiliza o efeito piezoresistivo	16
Figura 4 - Circuito elétrico que representa um sensor piezoelétrico.....	16
Figura 5 - – Circuito do sensor de liga amorfa sendo influenciado pelo campo magnético externo.....	17
Figura 6– Sistema massa mola utilizado nos sensores de aceleração	19
Figura 7 - Força de contato entre duas superfícies	20
Figura 8 – Sistema de forças para duas superfícies em contato	21
Figura 9 – Bolo de matéria que se forma entre duas superfícies e se opõe ao movimento de uma delas.....	23
Figura 10 – Sistema de carregamento do caminhão	24
Figura 11 – Sistema de forças que agem sobre o caminhão no momento que uma força é aplicada em sua traseira.....	24
Figura 12 – Relação entre a força de atrito estático e a força externa aplicada.....	25
Figura 13 – Sistema de medições com sensores (a); Experiência realizada para medir o coeficiente de atrito (b) e (c).....	26
Figura 14 – Relação entre a força de atrito dinâmico e a força externa.....	28
Figura 15 – Esquema para medição do coeficiente de atrito dinâmico.....	28
Figura 16 – Sistema para aplicação de uma força constante no caminhão em forma de pista de skate.....	30
Figura 17 – Partes componentes de um pneu	31
Figura 18 – Temperatura do pneu em função da pressão de enchimento	33
Figura 19 – Aderência Pneu – Solo	34
Figura 20 – Material da experiência	36
Figura 21 – Montagem da experiência.....	37
Figura 22 – Gráfico da força de atrito estático x força peso para o caso em que a carroça foi empurrada e para o caso em que a carroça foi puxada.	39



Figura 23 – Montagem da experiência para medição do coeficiente de atrito dinâmico.	40
Figura 24 - Gráfico da força de atrito estático dinâmico x força peso para o caso em que a carroça foi empurrada e para o caso em que a carroça foi puxada.	42

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Sensores conforme o tipo de conversão, grandeza mensurada, tecnologia utilizada e aplicações	12
Tabela 2 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito estático quando a carroça é empurrada	27
Tabela 3 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito estático quando a carroça é puxada.....	27
Tabela 4 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito dinâmico quando a carroça é empurrada	29
Tabela 5 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito dinâmico quando a carroça é empurrada	29
Tabela 6 – Medição da força aplicada sobre a carroça para fazê-la se deslocar	37
Tabela 7 - Dedução da força de atrito estático para quando a carroça é empurrada e para quando ela é puxada.....	38
Tabela 8 - Dedução da massa da carroça com a utilização do coeficiente de atrito estático deduzido experimentalmente.....	40
Tabela 9 - Medição da tensão correspondente a força aplicada sobre a carroça tanto para o caso em que ela foi empurrada, quanto para o caso em que ela foi puxada	41
Tabela 10 - Dedução da força de atrito dinâmico para quando a carroça é empurrada e para quando ela é puxada.....	41
Tabela 11 - Dedução da massa da carroça com a utilização do coeficiente de atrito dinâmico deduzido experimentalmente.....	43

1. Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias se dá pela necessidade humana de superar suas limitações. Para exemplificar essas limitações dentro do escopo deste trabalho a tecnologia de sensores será dividida em dois grupos: o dos sensores naturais e o dos sensores artificiais.

Os sensores naturais são aqueles encontrados em organismos vivos e normalmente respondem com sinais que possuem características eletroquímicas, ou seja, sua natureza física é baseada no transporte de íons como, por exemplo, as fibras nervosas. Já os dispositivos artificiais também fazem transmissão e processamento de informação em resposta a um estímulo, mas o realizam através do transporte de elétrons.

Os dois grupos citados estão sujeitos a ocorrência de erros, mas o grupo dos sensores naturais está propício a erros maiores devido ao vasto número de variáveis, sobre as quais não se têm controle, que podem interferir na realização de uma medição tornando-se um fator limitante para a qualidade do sistema de controle. No caso dos sensores artificiais é possível manipular o sistema de modo que haja uma estimação dos valores das variáveis atuantes no momento das medições.

Dessa forma, para minimizar os erros, diminuir os fatores limitantes e tornar os sistemas mais autônomos, o homem vem utilizando essas tecnologias que imitam de forma mais aperfeiçoada suas habilidades. Seguindo essa linha, neste trabalho é apresentada uma proposta de utilização de sensores para automatizar um sistema de medição do carregamento de um caminhão tendo em vista a maioria dos sistemas empregados atualmente encontra-se limitada à aplicação de sensores naturais, ou seja, a massa do carregamento é estimada em malha aberta, ou seja, através dos olhos humanos.

O sistema de estimação da massa carregada no caminhão, em malha aberta, tem causado perda de tempo e dinheiro para empresas, já que esse tipo

de estimação é impreciso e acaba, por vezes, não atendendo às especificações normativas que permitem a liberação da carga para seu destino final.

Assim, tomando como base a mecânica newtoniana e a teoria básica da eletroeletrônica, neste trabalho é apresentada a realização de um sistema autônomo que utiliza sensores para automatizar um sistema de medição do carregamento de um caminhão. A motivação para o desenvolvimento desse sistema foi a verificação que a maioria dos sistemas de medição de carregamento de massa existentes utilizam sistema de controle em malha aberta, dependente da acuidade visual do operador.

2. Objetivos

O objetivo neste trabalho é encontrar um método capaz de determinar a massa carregada dentro de um caminhão, no lugar onde o carregamento é realizado, baseado nas forças de contato entre o solo e o caminhão.

O dispositivo concebido para determinação de tal massa deve ser de fácil instalação, apresentar um erro na estimação da massa de no máximo 100 kg para mais ou para menos e não pode ter contato com o produto carregado.

3. Metodologia

Para encontrar uma maneira de determinar a massa carregada sobre um caminhão através da utilização de sensores, um estudo desses dispositivos foi realizado com o objetivo de identificar quais sensores seriam mais apropriados para o fim. Uma vez identificados, um estudo das forças que existem entre o caminhão e o solo também foi realizado.

Depois de entender toda a teoria de sensores e forças de contato, o sistema que representa a problemática real é apresentado e uma proposta de solução para o problema de medição de massa é lançada. De posse da proposta, ensaios são realizados e os resultados analisados.

4. Sensores

Os sensores são elementos específicos que transformam uma determinada variável física de interesse (ou faixas de operação dessa variável) em uma grandeza passível de processamento. Uma observação a ser feita é que, em geral, a variável de interesse é transformada em uma grandeza elétrica, uma vez que com os recursos oferecidos pela eletrônica pode-se efetuar uma série de processamentos posteriores [1]. Os estímulos dados aos sensores são grandezas físicas de diversas naturezas como, por exemplo, radiante, mecânica, gravitacional, elétrica, térmica e magnética, químicas e biológicas.

Eles podem ser classificados pelo princípio de conversão que utilizam, pela grandeza sendo mensurada, pela tecnologia utilizada, pela aplicação [2], ou ainda pela dependência ou não de uma fonte externa na conversão de energia. Na tabela 1 são apresentados os principais tipos de sensores, classificados de acordo com os diferentes tipos aplicações.

Tabela 1 – Sensores conforme o tipo de conversão, grandeza mensurada, tecnologia utilizada e aplicações

Princípio de conversão	Grandeza mensurada	Tecnologia utilizada	Aplicação
Piezoelétricos	Biológicos	Semicondutores	Energia
Piezoresistivos	Químicos	Condutores	Potencia
Termo-elétricos	Elétricos	Substância Química	Aceleração
Foto-elétricos	Magnéticos		Posição
Magneto-elétricos	Aquecimento		Peso
Fotomagnéticos	Temperatura		

Segundo o critério da utilização de uma fonte externa na conversão de energia os sensores são chamados de ativos ou passivos, os primeiros sendo aqueles que são capazes de gerar o sinal elétrico sem a necessidade de uma fonte externa e os segundos são aqueles que precisam de uma fonte externa de energia, ou seja, um sinal de excitação. A atuação de um sensor ativo se dá com a variação de um de seus parâmetros mediante a aplicação do estímulo e essa variação pode ser convertida em um sinal elétrico. Já a atuação de um

sensor passivo se dá através da modulação do sinal elétrico advindo da fonte de alimentação. Essa classificação é importante porque determina uma maior ou menor complexidade do circuito elétrico ligado ao sensor.

A saída de um sensor, bem como a saída do circuito elétrico a ele ligado, precisa ser proporcional à grandeza que está sendo medida ou ainda apresentar uma relação matemática que as relacione [2]. Ela pode ser da forma de tensão, corrente ou carga que serão traduzidas em termos de amplitude, frequência, fase ou código digital [1].

Alguns parâmetros são importantes para um sensor, eles são chamados de especificações e dizem respeito a sua sensibilidade, estabilidade, precisão, velocidade de resposta, tempo de vida, custo, tamanho e peso. Dependendo da aplicação uma especificação pode ser mais importante que outra.

Os sensores são dispositivos eletrônicos que têm extensa aplicação nas mais variadas áreas, na eletrônica de potência, nas telecomunicações, na engenharia biomédica, no controle e automação, na agricultura, nas forças armadas, na medicina, no comércio e diversas outras.

A aplicação desse trabalho é destinada a área do comércio, pois visa ajudar as empresas que despacham carregamentos cujo peso é importante. O que será feito é um estudo de caso que visa medir a massa da carga de um caminhão, ou seja, projetar algo que se assemelhe a uma balança. Dentro desse contexto, o estudo de sensores será restrito a aqueles que podem ser úteis à aplicação, ou seja, aqueles cuja grandeza física medida possa ser proporcional à massa, como os sensores de grandezas mecânicas, por exemplo.

É importante ressaltar que o dispositivo que se deseja projetar nesse trabalho não pode ser um sistema embarcado, deve ser portátil, de preferência autônomo, deve medir a massa do carregamento do caminhão sem que possua contato com o produto e o erro de sua medição deve ser de 100 kg, no máximo.

5. Sistemas de medição de massa atuais

O sistema mais comum e mundialmente conhecido de medição de massa é a balança. Existem balanças de diversos tipos, desde as mais clássicas, cuja medição de massa é realizada por comparação de pesos, até as mais modernas, que são as balanças eletrônicas que utilizam sensores.

Normalmente, as balanças eletrônicas utilizam sensores de carga, mas de acordo com a literatura existente já é possível medir massa utilizando sensores de liga amorfa, através da variação de campo magnético.

A forma de medição para ambos os casos é praticamente a mesma, diferenciando apenas no princípio que é utilizado para a conversão, ou seja, um objeto é posto sobre uma placa, a massa desse objeto causará a mudança de algum parâmetro elétrico do circuito ligado a essa placa e essa mudança é proporcional a massa do objeto, podendo, esta última, ser determinada.

Nesse trabalho objetiva-se determinar a massa de um caminhão utilizando algum desses princípios de conversão já conhecidos, mas não utilizando a mesma forma de medição, dessa forma, é importante entender o princípio para poder imaginar uma forma de aplicá-lo sem que seja a convencional, uma vez que a implementação da mesma forma de medição acarretaria na construção de uma balança gigante, o que foge das especificações desejadas para o sistema.

6. Sensores de força

Um sensor de força é aquele que o sinal de entrada é uma força e o de saída é um sinal elétrico proporcional a força aplicada, conforme ilustrado na Figura 1. Vários princípios de conversão podem ser utilizados para isso e utilizar um ou outro dependerá da aplicação a qual se destina o sensor.

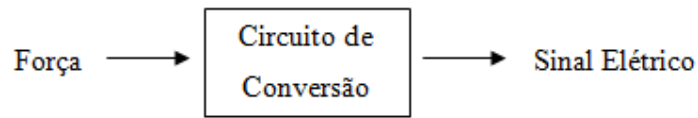


Figura 1 - Diagrama de blocos que representa a ação de um sensor de força

6.1. Sensores de força que utilizam o efeito piezoelétrico e piezoresistivo

Antes de dissertar sobre o sensor, é importante entender ao que se referem esses efeitos, o efeito piezoresistivo é aquele em que a força aplicada é transformada em uma variação da estrutura cristalina do material piezoresistivo que compõe o sensor enquanto que no efeito piezoelétrico a força aplicada é transformada em uma variação no movimento de íons dentro do cristal do material piezoelétrico.

Esses sensores são em geral utilizados para detectar forças exercidas em fios ou cabos e em áreas. A diferença entre utilizar um ou outro está na duração que a força é aplicada. Se a aplicação deseja medir uma força de longa duração, como aquelas exercidas sobre paredes de prédios, lâminas de uma turbina ou mesmo sobre cabos de pontes, então o uso do sensor piezoresistivo é mais apropriado, enquanto que se uma força de curta duração é aplicada, como impulsos, por exemplo, é recomendado o uso do sensor piezoelétrico.

O sensor piezoresistivo consiste de um fio fino firmemente ligado a um material no qual a força será aplicada, conforme ilustrado na Figura 2, mas normalmente ele é utilizado em um circuito em ponte, conforme apresentado na Figura 3.

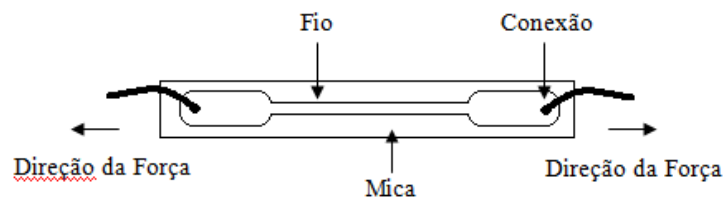


Figura 2 - Forma física de um sensor de força piezoresistivo

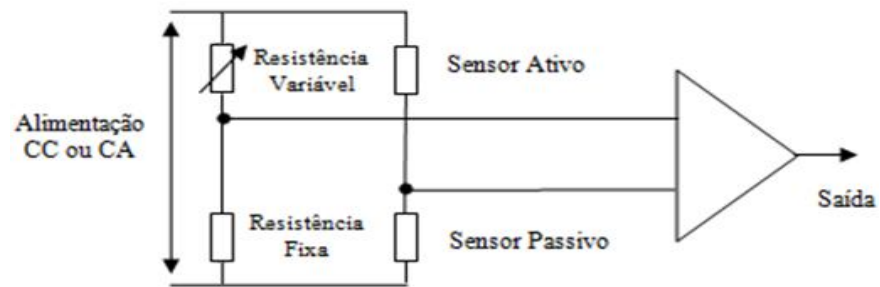


Figura 3 - Circuito em ponte normalmente utilizado para aplicação do sensor de força que utiliza o efeito piezoresistivo

Na Figura 3 vê-se a existência de dois sensores de força, um ativo e outro passivo. O primeiro será aquele que vai ser submetido à aplicação da força.

A existência do sensor passivo no circuito se dá porque as mudanças de temperatura também causam alteração na estrutura cristalina do material piezoresistivo. Dessa forma, a existência de um sensor passivo faz com que o circuito possa ser re-calibrado cada vez que uma mudança de temperatura alterar sua resistência tornando as leituras na saída resultantes apenas das alterações causadas pela força.

Os sensores piezoelétricos são compostos de um cristal que pode ser representado pelo circuito elétrico da Figura 4.

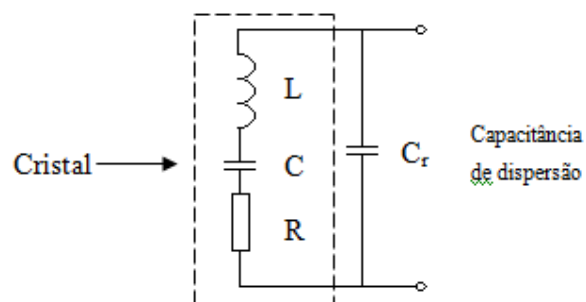


Figura 4 - Circuito elétrico que representa um sensor piezoelétrico

Nesse circuito, a aplicação da força causa uma variação no campo eletromagnético do cristal que resultará na alteração da impedância total do sistema.

6.2 Sensores de força que utilizam a liga amorfa

Esses sensores são estimulados por duas grandezas físicas, o campo magnético externo e a frequência da corrente elétrica aplicada. O que acontece é que a permeabilidade magnética (μ) e a impedância do material se alteram de acordo com a aplicação desses estímulos. A alteração da impedância se dá pelo fato da componente reativa da mesma depender diretamente de μ , conforme a expressão (1):

$$(1),$$

na qual Z é a impedância, R a resistência e X a componente reativa da liga.

Na Figura 5 é apresentado o circuito elétrico do sensor magnético, baseado no emprego de uma liga amorfa. Na citada figura a saída V_o é alterada devido às variações de Z .

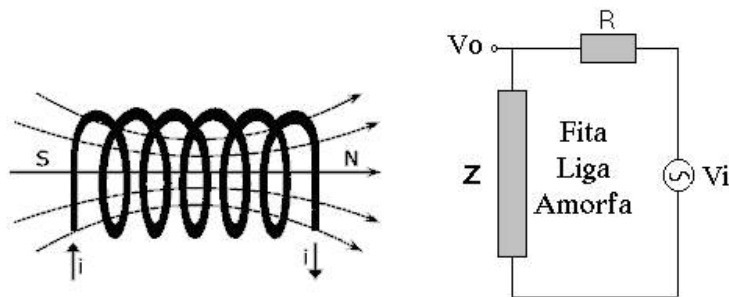


Figura 5 – Circuito do sensor de liga amorfa sendo influenciado pelo campo magnético externo.

Diante do exposto, deseja-se utilizar o sensor de força e as leis de Newton para determinar a massa do caminhão, para isso um estudo das forças que existem entre o caminhão e o solo será feito.

Sabendo-se de antemão que a aplicação das leis de Newton envolve atrito dinâmico e estático, o uso de sensores de movimento e de aceleração também será necessário, dessa forma, antes de deixar o tópico de sensores é prudente dar também uma descrição dos mesmos.

6.3. Sensores de movimento

Existem vários tipos de sensores de movimento cuja concepção se baseia em diferentes princípios. Cada princípio diferente utilizado na concepção de um sensor de movimento está relacionado diretamente à aplicação a qual ele se destina.

Para a problemática do trabalho, deseja-se um sensor de movimento que detecte o instante exato que o pneu do caminhão se deslocou, nesse caso o sensor deve ser sensível a movimentos sutis.

Sensores que detectam movimentos sutis são os sensores de movimento de rotação cujo princípio de detecção de uma rotação é feito com base na utilização das mesmas grandezas utilizadas para detectar um movimento linear, ou seja, deslocamento e velocidade.

Da mesma forma que para outros sensores, a detecção do estímulo é geralmente a mesma, mudando apenas a forma que ele é convertido em sinal elétrico. No caso de um sensor de movimento, o estímulo é dado a um eixo e esse eixo causa a mudança de algum parâmetro elétrico que será proporcional ao deslocamento do eixo.

No caso de movimentos sutis, o sensor de movimento é chamado de *drag cup*, expressão inglesa que designa um eixo imerso em um óleo que causa deflexão em uma mola e essa é responsável pela mudança de impedância de um potenciômetro. A mudança na resistência do potenciômetro é proporcional ao movimento do eixo.

6.4 Sensores de aceleração

Os sensores de aceleração podem usar vários princípios de conversão, o efeito capacitivo, o piezoelétrico, o piezoresistivo, o efeito hall, o magnetoresistivo e a transferência de calor.

A utilização dos efeitos para essa aplicação é feita através de um sistema que utiliza a lei de Newton para determinação da aceleração.

Ele consiste de um sistema massa mola, Figura 6, e utiliza o fato da força exercida sobre a massa ser proporcional à aceleração.

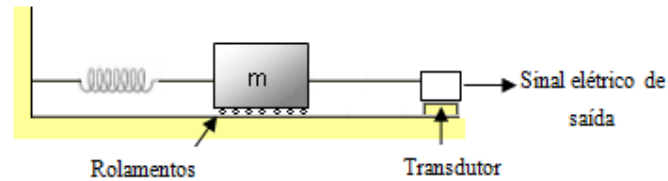


Figura 6– Sistema massa mola utilizado nos sensores de aceleração

O transdutor da Figura 6 é o dispositivo que converte a grandeza física do princípio em sinal elétrico. No efeito piezoelétrico e piezoresistivo o material é fixado na massa e a variação na força causada pela aceleração é convertida em sinal elétrico.

O efeito capacitivo por sua vez é a variação da capacitância do dispositivo devido à aceleração. O que acontece é que a estrutura interna do transdutor é formada por duas placas paralelas e este quando submetido à aceleração muda a distância entre essas duas placas alterando assim a capacitância.

O efeito Hall faz com que movimentos sejam convertidos em sinal elétrico por conta da mudança de campos magnéticos [9]. O efeito magnetoresistivo atua de forma similar, pois sob presença de um campo magnético a resistência do transdutor é alterada.

A determinação da aceleração por transferência de calor se dá pela determinação da massa aquecida quando submetida à aceleração por sensores de temperatura [9].

7. Estudo das forças que existem entre dois sólidos

Quando um corpo está sobre uma superfície não polida ele é submetido a forças chamadas de Forças de Contato.

Essas forças são forças complexas e sua complexidade depende da precisão desejada e igualmente da natureza exata da interação entre o conjunto

de partículas que estão interagindo durante o contato, da posição das partículas na vizinhança das superfícies e por consequência da estrutura microscópica das superfícies.

É possível estudá-las durante dois momentos: quando um corpo está em repouso e quando ele está em movimento. Para o primeiro caso, essas forças de contato serão chamadas de força de aderência ou atrito estático e para o segundo caso serão chamadas de forças de atrito cinético.

Essas forças são consideradas aplicações da segunda e terceira lei de Newton.

Para analisar as forças de contato, deve-se considerar a Figura 7:

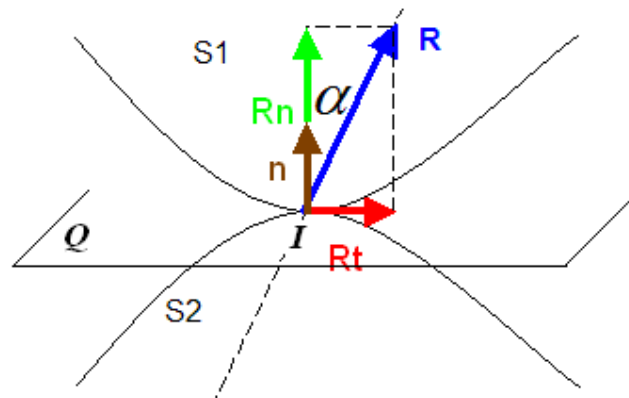


Figura 7 - Força de contato entre duas superfícies

Têm-se duas superfícies em contato, S1 e S2, no ponto I. O conjunto de forças que age sobre S1 será estudado.

Pegando o plano tangente comum Q e sua normal n, orientada até o sólido S1 que sofre a ação, então o vetor de ações de contato pode ser escrito da seguinte forma:

$$R = R_t + R_n \quad (2).$$

Por definição R_n é a reação normal, R_t a força de atrito (estático ou cinético), força de resistência ao escorregamento ou força de aderência.

A força normal é uma força repulsiva, é a força que se opõe a penetração de um sólido em outro. Ela é exercida pelo sólido S2 sobre o sólido S1 é dirigida até o interior do S1.

As leis que descrevem a força de atrito são diferentes segundo o valor da velocidade de escorregamento v_e do corpo S1 (nula ou não).

Para o caso em que a velocidade v_e é nula, ou seja, o corpo está em repouso diz-se que ele está sujeito ao atrito estático e a força F aplicada sobre o sólido S1 é insuficiente para que ele possa deslizar sobre o sólido S2. Essa força F será igual a força R_t . Isso pode ser visto na Figura 8.

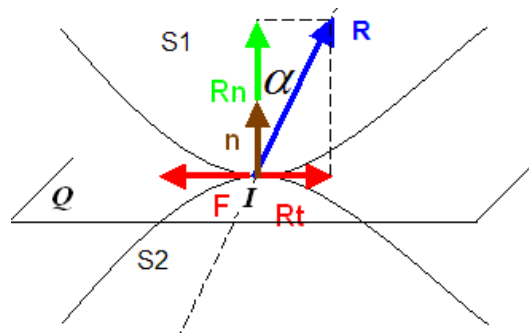


Figura 8 – Sistema de forças para duas superfícies em contato

A experiência mostra que a velocidade de deslizamento fica nula enquanto F não atingir um valor máximo dado pela equação (3), dessa forma, diz-se que o sólido está no caso de aderência.

$$(3),$$

μ_s sendo o coeficiente de atrito estático.

Para o caso em que a velocidade v_e é não nula diz-se que o sólido está sob efeito do atrito cinético. Para esse tipo de atrito existem quatro leis, enunciadas abaixo.

Primeira lei: os vetores força de atrito R_t e velocidade de escorregamento pertencem ao mesmo plano .

Segunda lei: A força de atrito cinético (R_t) e a velocidade de escorregamento possuem sentidos opostos .

Terceira lei: A norma da força de atrito cinético é proporcional à norma da reação normal, conforme a expressão (4).

(4),

μ_d sendo o coeficiente de atrito cinético.

Quarta lei: O coeficiente de atrito cinético para velocidades entre cerca de 1cm/s e diversos metros por segundo é constante e independente da velocidade de deslizamento e inferior ao coeficiente de atrito estático, conforme a expressão 5.

(5).

Vale salientar que o estudo do contato borracha-asfalto é decisivo na escolha dos pneus para os veículos. Uma análise detalhada mostra que a dependência $\mu_d(v_e)$ não é simples e que essa dependência varia notadamente com a carga do veículo e a pressão na qual se encontra o pneu.

8. Contato entre duas superfícies

Fazendo uma análise aprofundada do contato entre duas superfícies é constatado que ele é constituído de microcontatos cuja área efetiva é muito inferior a área das superfícies. Esses microcontatos são feitos pelas partes ásperas das superfícies que se deformam sob ação de forças normais e tangenciais.

É possível escrever as componentes normais e tangenciais da reação normal \mathbf{R} em função da área dos microcontatos como é mostrado nas expressões (7) e (8),

(7),

(8),

com p sendo o coeficiente de pressão, s o coeficiente de cisalhamento, ambos característicos do material S1 e A a área das superfícies em contato.

Se a expressão (8) for dividida pela equação (7), a relação obtida é aquela apresentada na expressão (9):

$$\text{---} \text{---} \text{---} \quad (9),$$

a partir da qual é possível explicar a variação de μ_s , pois dependendo da superfície sobre a qual se encontra o sólido, os coeficientes s e p podem ser ligeiramente diferentes.

No estudo do contato entre superfícies deve ser levado também em consideração o que é chamado de resistência ao escorregamento que se trata de um bolo de matéria que se forma diante do objeto que vai iniciar o movimento. Esse bolo de matéria pode ser visualizado na Figura 9.

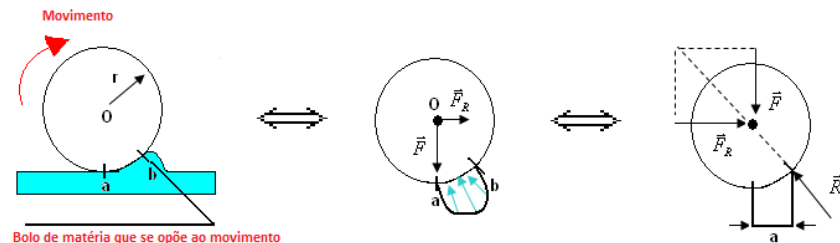


Figura 9 – Bolo de matéria que se forma entre duas superfícies e se opõe ao movimento de uma delas.

Na Figura 9, R é a força de pressão de contato exercida pelo bolo de matéria que se opõe ao movimento e F_r é a força que é preciso exercer para dar início ao movimento.

Se a expressão (3) é aplicada ao sistema de forças da Figura 9, tem-se a expressão (10):

$$\text{---} \quad (10),$$

na qual a é o coeficiente de resistência ao rolamento e depende de numerosos fatores, como a elasticidade do material, o raio da roda, a velocidade de deslocamento, a rugosidade das superfícies, e r é o raio do elemento rolante.

9. Estudo de caso: medição da massa carregada de um caminhão

O sistema a ser estudado é um sistema real no qual um caminhão é posicionado sob uma passarela e carregado, conforme ilustrado na Figura 10.

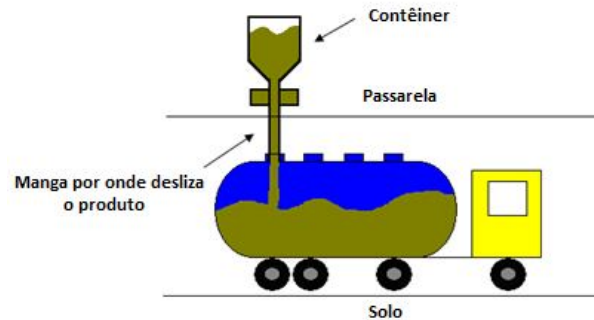


Figura 10 – Sistema de carregamento do caminhão

Deseja-se medir a massa carregada nesse caminhão através da medição do coeficiente de atrito entre os pneus e o solo tanto no caso em que o caminhão está em repouso quanto no caso em que ele está em movimento. Para isso, uma força é aplicada na parte traseira do caminhão conforme ilustrado na Figura 11.

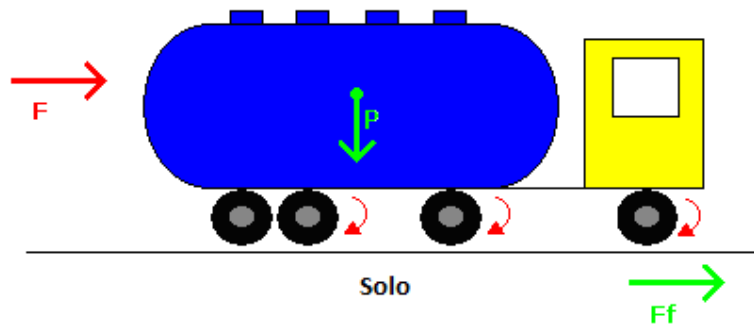


Figura 11 – Sistema de forças que agem sobre o caminhão no momento que uma força é aplicada em sua traseira

Como existem dois tipos de coeficientes de atrito, duas formas diferentes para determinação desses coeficientes serão utilizadas, uma para determinação do coeficiente de atrito estático outra para a determinação do coeficiente de atrito dinâmico.

Para o caso da determinação do coeficiente de atrito estático, uma força foi aplicada na traseira do caminhão e através da utilização de sensores de força e de movimento e o momento exato que o caminhão começou a se deslocar é detectado e também a força necessária para fazê-lo.

Já para a determinação do coeficiente de atrito dinâmico, uma força foi aplicada sobre o caminhão deslocando-o para frente e para trás, a força no momento que a aceleração do mesmo é nula foi medida.

A descrição detalhada de como foi realizado o experimento será dada nos tópicos subsequentes.

9.1. Medição do coeficiente de atrito estático

Para a medição do coeficiente de atrito estático a equação utilizada foi a equação (3). Através da determinação do coeficiente μ_s será possível utilizar a mesma equação para a determinação da massa, conforme apresentado na expressão (11):

$$m = \frac{\vec{F}_{\max}}{\mu_s g} \quad (11).$$

● Medição
● Grandeza a ser determinada
● Grandeza desejada

Segundo a expressão (3), sabe-se que a relação entre a força externa e a força de atrito estático é linear, como constata o gráfico mostrado na Figura 12:

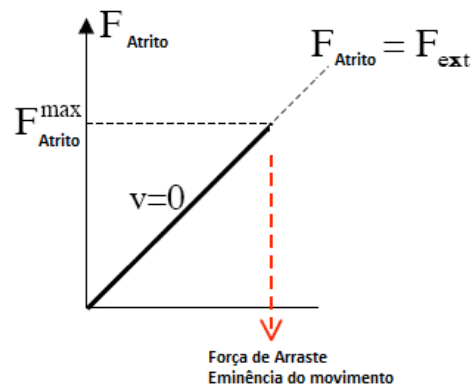


Figura 12 – Relação entre a força de atrito estático e a força externa aplicada

Na prática, para medir o coeficiente de atrito estático, o sistema utilizado foi o da Figura 13 (a) e o experimento realizado nesse sistema encontra-se nas Figuras 13 (b) e (c).

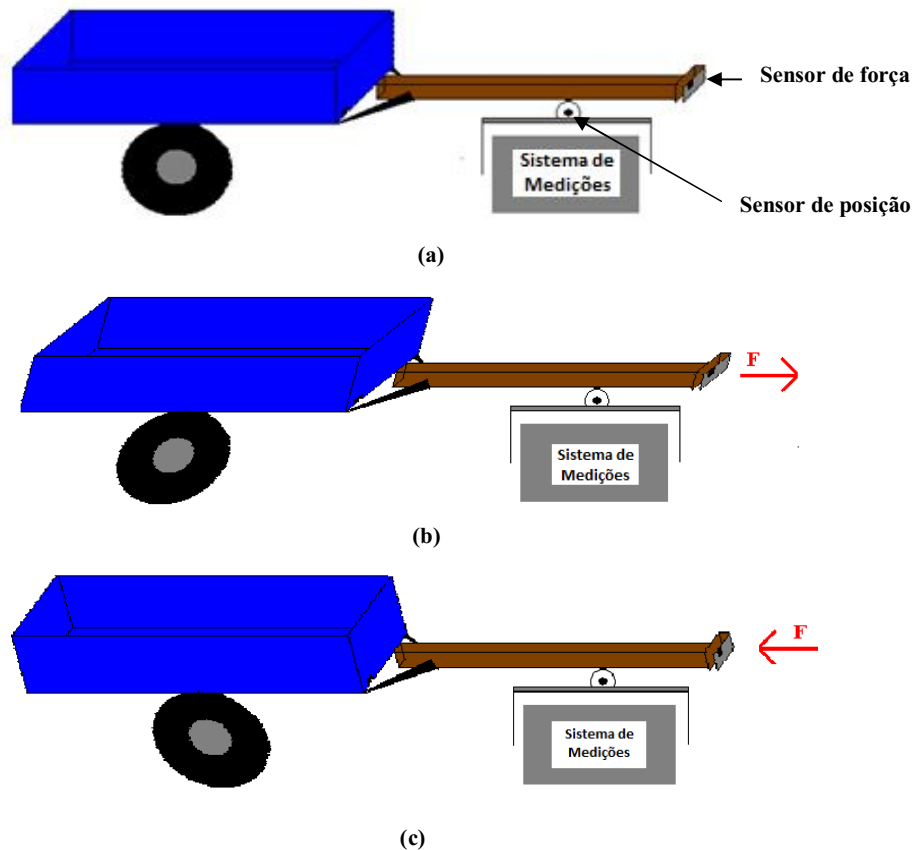


Figura 13 – Sistema de medições com sensores (a); Experiência realizada para medir o coeficiente de atrito (b) e (c)

De acordo com as Figuras 13 (b) e (c), uma força foi aplicada na carroça tanto para empurrá-la, quanto para puxá-la. Para tal, os sensores de posição e de força foram bem calibrados. A força foi aplicada sobre a carroça até o momento em que o sensor de movimento mediu um descolamento. A descrição detalhada do experimento encontra-se no Anexo 2.

Uma vez que o sensor de posição detectou um deslocamento, a força medida pelo sensor de força foi considerada como a força de atrito estático e conhecendo-se a massa da carroça e a força nela aplicada, o coeficiente de atrito estático pôde ser calculado. Os resultados encontram-se na tabela 2 e 3, nos quais os resultados foram considerados para quando a carroça é empurrada e quando ela é puxada.

Tabela 2 – Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito estático quando a carroça é empurrada

Carroça empurrada	Massa (kg)	Peso (N)	Força de aderência (N)	Coeficiente calculado	Massa deduzida (kg)	Erro (%)
Carroça Vazia	147,00	1442,02	25,64	0,13	20,10	86,33
Carroça com 22 kg	169,00	1657,89	53,22		41,71	75,32

Tabela 3 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito estático quando a carroça é puxada

Carroça puxada	Massa (kg)	Peso (N)	Força de aderência (N)	Coeficiente calculado	Massa deduzida (kg)	Erro (%)
Carroça Vazia	147,00	1442,02	352,15	1,00	35,90	75,58
Carroça com 22 kg	169,00	1657,89	508,06		57,91	65,74

De acordo com as tabelas 2 e 3 vê-se que a força aplicada para mover a carroça é diferente de acordo com a mudança na carga sobre ela, isso é esperado. Vê-se também que a força para empurrar a carroça é diferente da força para puxá-la, o que permite concluir que a carroça encontra-se numa ladeira. De fato, no momento do experimento, foi mais difícil movê-la em um sentido que em outro.

A equação (11) foi utilizada para deduzir a massa que se encontra nessas tabelas e o erro encontrado com relação a massa real da carroça é muito grande, o que se faz concluir que a mesma apresenta um ponto de aderência instável que é muito difícil de ser detectado.

9.2. Medição do coeficiente de atrito dinâmico

Neste caso, a carroça foi posta em movimento. Foi considerado que a força de atrito dinâmico é constante no tempo e que seu valor é dado pela equação (12).

(12)

O gráfico da força de atrito dinâmico em função da força externa aplicada pode ser visto na Figura 14.

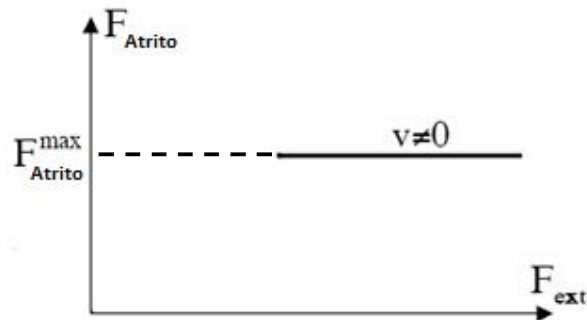


Figura 14 – Relação entre a força de atrito dinâmico e a força externa

O sistema utilizado para a medição do coeficiente de atrito dinâmico foi o mesmo utilizado para a medição do coeficiente de atrito estático, mas o sensor de movimento foi substituído por um sensor de aceleração. O sistema pode ser visualizado na Figura 15.

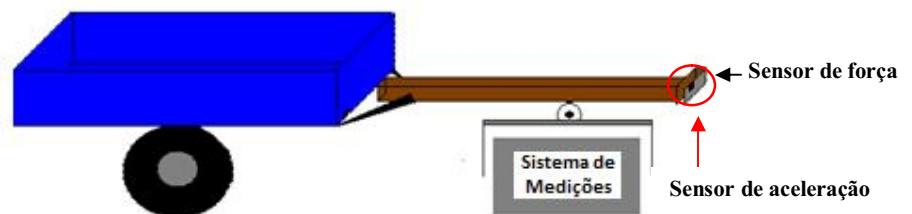


Figura 15 – Esquema para medição do coeficiente de atrito dinâmico

Segundo a segunda lei de Newton, tem-se que:

(13),

sendo a força total aplicada sobre a carroça, m a massa da carroça e sua aceleração. Nesse caso, no sistema estudado, tem-se:

(14),

na qual, é a força externa aplicada e a força de atrito dinâmico.

Partindo-se das expressões (14) e (12) é possível determinar a massa do sistema mediante o emprego da expressão (15):

$$m = \frac{F_{ext}}{a - \mu_d \cdot g} \quad (15)$$

Utilizando a expressão (15) no sistema do experimento, os resultados encontrados estão nas tabelas 4 e 5, para o ato de empurrar e puxar a carroça, respectivamente.

Tabela 4 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito dinâmico quando a carroça é empurrada

Carroça empurrada	Massa (kg)	Peso (N)	Força de aderência (N)	Coeficiente calculado	Massa deduzida (kg)	Erro (%)
Carroça Vazia	169,00	1657,89	598,41	1,00	61,00	66,91
Carroça com 22kg	191,00	1873,71	941,76		96,00	52,94

Tabela 5 - Dados coletados pela experiência para medir o coeficiente de atrito dinâmico quando a carroça é puxada

Carroça puxada	Massa (kg)	Peso (N)	Força de Aderência (N)	Coeficiente calculado	Massa deduzida (kg)	Erro (%)
Carroça Vazia	169,00	1657,89	939,44	1,00	96,76	44,34
Carroça com 22kg	191,00	1873,71	1282,80		130,76	35,90

A descrição detalhada do experimento realizado encontra-se no Anexo 2.

Como esperado, vê-se que a força aplicada para mover a carroça é diferente se sobre ela encontram-se diferentes valores de cargas. O valor da carga sobre a carroça foi calculado e o erro do valor encontrado experimentalmente com relação ao valor real encontra-se nas tabelas 4 e 5.

10. Conclusão

Diante dos resultados experimentais, foi decidido de não mais continuar explorando a medição do coeficiente de atrito estático, pois o ponto onde a força é medida é instável, ele muda por conta das diferentes aderências dos microcontatos, fazendo com que a carroça se desloque em momentos diferentes.

Com relação à medição do coeficiente de atrito dinâmico foi decidido de mudar a montagem, pois, com o sistema utilizado a força necessária para fazer a carroça se deslocar é sempre diferente. Para que a força aplicada sobre a carroça seja a mesma, decidiu-se fazer um sistema que lembre uma pista de skate, como mostrado na Figura 16.

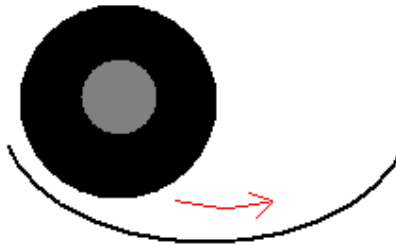


Figura 16 – Sistema para aplicação de uma força constante no caminhão em forma de pista de skate

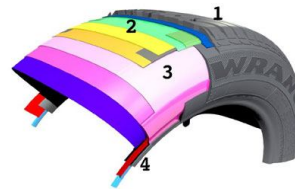
Antes de conceber o novo sistema, chegou-se a conclusão que a problemática envolve contato entre o solo e pneu e que nesse caso, a teoria simplista do atrito não é suficiente para resolver o problema. O caso do contato solo pneu envolve uma teoria mais complexa cujas forças de reação dependem de uma série de fatores como a velocidade de escorregamento, a temperatura, a superfície de contato, a pressão de enchimento e da borracha que constitui o pneu. Por conta da influência desses fatores, o coeficiente de atrito chega a mudar de 10 a 15% em cada medição tornando impossível sua utilização para a aplicação, pois os resultados obtidos estarão sempre fora da precisão desejada. Uma explanação sobre o contato pneu solo encontra-se no Anexo 1.

11. Anexo

11.1. Anexo 1: Estudo do coeficiente de atrito pneu-solo

Conforme apresentado, a determinação do coeficiente de atrito pneu-solo está diretamente ligada aos estudos das forças de contato pneu-solo. Entretanto, essas forças de contato dependem de vários fatores como, por exemplo, a composição do pneu, a sua pressão de enchimento, o desenho de sua banda de escorregamento, a temperatura e a natureza do solo. Dessa forma, para medir o coeficiente de atrito, é necessário saber a influência desses fatores sobre as forças de contato.

O pneu é composto de vários tipos de materiais e partes, Figura 17, que asseguram a resistência às diferentes forças que ele é submetido.



1. **Banda de escorregamento:** Garante boa tração, resistência, aderência e condições de frenagem durante a utilização, além de proteger a carcaça.
2. **Cintos:** Garantem a resistência do pneu, estabilizando a banda de escorregamento e protegendo a carcaça contra perfurações.
3. **Carcaça:** Transmite as cargas, as forças de frenagem e de direção entre a roda e a pista.
4. **Vara:** Posiciona e mantém o pneu sobre o aro.

Figura 17 – Partes componentes de um pneu

Das partes citadas, as de interesse para esse trabalho são as partes 1 e 3, ou seja, a banda de escorregamento e a carcaça.

A banda de escorregamento é camada que está em contato direto com o solo, seu desenho é fundamental para a passagem do fluxo de água e para o resfriamento da borracha sobre a pista seca. Uma boa

escolha da borracha para essa parte do pneu resulta de um compromisso entre aderência e utilização.

A carcaça é constituída de borracha reforçada por várias camadas feitas de fio de nylon, vidro ou aço que são materiais de coeficiente de elasticidade elevado e capazes de suportar grandes forças de tração. O alinhamento desses fios é um parâmetro importante para a aderência do pneu.

O que é chamado de borracha num pneu é na verdade um composto de materiais no qual um dos principais componentes é o carbono negro que é responsável pela melhora da condutividade térmica da borracha.

Tendo visto a composição do pneu fica mais fácil de estudar os fatores que influenciam o coeficiente de atrito. Nesse trabalho, serão abordados a influência da velocidade de escorregamento, da temperatura, da força peso, da superfície em contato com o solo e da pressão de enchimento do pneu que são os principais fatores que influenciam a problemática do projeto.

- Influência da velocidade de escorregamento:

A influência da velocidade de escorregamento no coeficiente de atrito dinâmico é expressa pelas equações (16) e (17),

(16)

ou

—

(17),

sabendo que $k = 0,012m/s$ e e . Vale salientar que o valor de e é válido para pequenas velocidades.

- Influência da força peso

Do que foi dito anteriormente, sabe-se que uma variação da carga vertical causa uma variação da força lateral e que a relação entre essas forças é o coeficiente de atrito. Apesar do que foi visto anteriormente, essa variação não se dá de forma linear, mas pela equação (18),

(18),

na qual F_x e F_y são as forças lateral e vertical quando a carga é zero, respectivamente e p é uma constante e varia de acordo com o tipo de veículo.

- Influência da temperatura

A influência da temperatura sobre o coeficiente de atrito depende do constituinte da pista, mas é certo que ela gera diferentes respostas para a curva $\mu = \mu(T)$.

Na Figura 18 é apresentado o gráfico da temperatura versus a pressão de enchimento do pneu. Sabendo que o coeficiente de atrito depende da pressão de enchimento do pneu, ele também dependerá da temperatura.

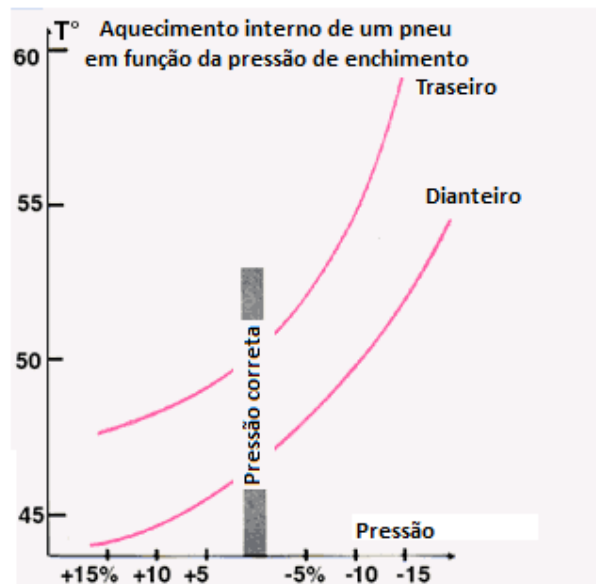


Figura 18 – Temperatura do pneu em função da pressão de enchimento

Apesar de existir uma curva para o pneu traseiro e outra para o dianteiro, é possível tornar essas curvas uma só por meio da transformação de *Williams-Landel-Ferry* (WLF) para um modelo visco-elástico.

É importante salientar nesse ponto que o pneu é feito de carbono negro, responsável pela melhora da condutividade térmica da borracha,

isso fazendo com que haja uma diminuição no valor de pico e do valor médio do coeficiente de atrito. Como existem vários tipos de carbono negro, o comportamento do coeficiente de atrito é diferente para diferentes tipos de pneus.

- A superfície em contato com o solo

A borracha é bastante sensível a extensão da zona de contato. Por conta de sua flexibilidade, o aumento da força vertical aumenta a área de contato efetiva, ou seja, a borracha adere às irregularidades do solo como apresentado na Figura 19.

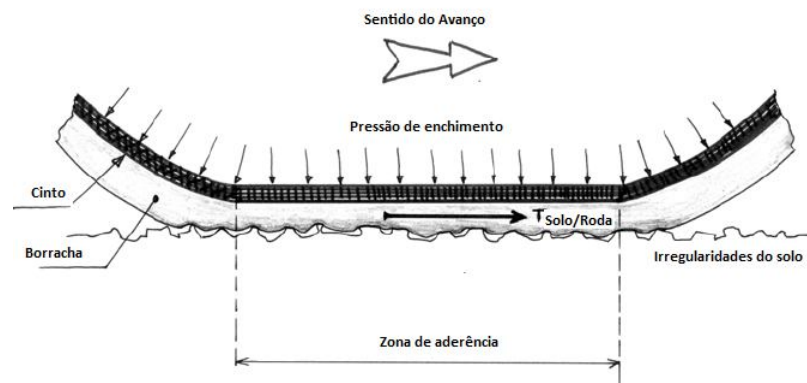


Figura 19 – Aderência Pneu – Solo

Se o solo estiver seco, a adesão interfere no coeficiente de atrito por meio das ligações moleculares entre o solo e o pneu, mas se ele estiver molhado a interferência no coeficiente de atrito é dada pela componente ligada à histerese.

É importante salientar que a profundidade da irregularidade não é tão importante, mas sim o ângulo que ela faz com a vertical.

- A pressão de enchimento

A pressão de enchimento do pneu modifica a aderência ao solo e a temperatura do pneu. Um pneu muito cheio sobrecarrega as bordas da banda de escorregamento enquanto que um pneu seco sobrecarrega o centro do pneu. Mudando a aderência e a temperatura, tem-se uma mudança no coeficiente de atrito.

11.2. Anexo 2: Experimento com a carroça

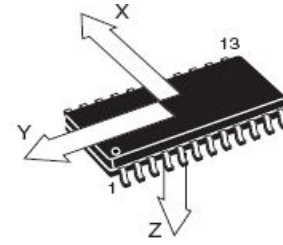
O objetivo desse experimento é aplicar a teoria de força e coeficiente de atrito estudada em um ambiente o mais próximo possível da realidade e ver as incoerências.

- Material utilizado
 - Carroça:
Massa – 147 kg (figura 21 (a)).
 - Sensor de aceleração:
Referência – LIS3L02AS4;
Faixa de medição - . Esse sensor mede acelerações nos eixos x, y e z. Nessa experiência a faixa de aceleração utilizada é de e as medições serão realizadas no eixo z (Figura 21 (b)).
 - Sensor de força
Referência – Precia CPA 3000-10;
Faixa de medição – carga limite de 15 kg;
Foram medidas forças com a seguinte correspondência:

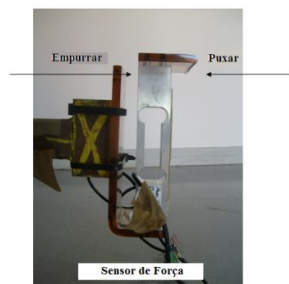
(Figura 21 (c)).
 - Sensor de movimento
Referência - IVO G317.0504X04
Medição – 500imp/ciclo; Trata-se de um sensor incremental no qual é possível medir 60µm por impulsão (Figura 20 (d)).
 - Osciloscópio
Osciloscópio portátil Tecktronix THS720P (Figura 20 (e)).
 - *Notebook* (Figura 20 (f)).



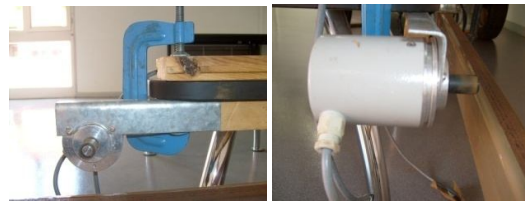
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Acção →



(f)

Figura 20 – Material da experiência

▪ Descrição do experimento

O princípio consiste em aplicar uma força sobre a carroça até o momento em que ela comece a se deslocar. A força aplicada será medida e chamada de força de atrito estático. Em seguida, várias forças serão aplicadas à carroça fazendo-a se deslocar para frente e para trás a fim de medir sua aceleração.

▫ Medição da força de atrito estático

Nessa parte foi utilizado o sensor de força e o sensor de posição. O sensor de força foi bem calibrado para que houvesse uma correspondência quando a carroça foi puxada ou quando ela fosse empurrada.

O sensor de força foi instalado na frente da carroça e o sensor de posição sobre uma mesa, como pode ser visto na Figura 21.

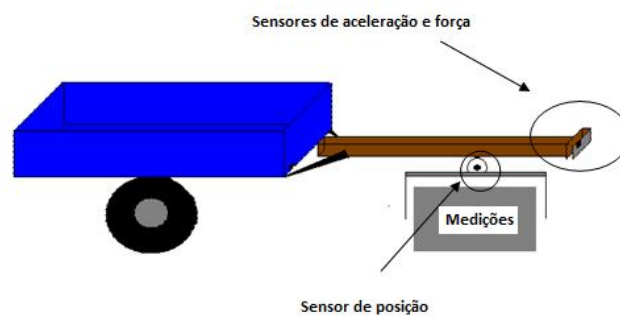


Figura 21 – Montagem da experiência

Foram colocadas diferentes cargas sobre a carroça e aplicadas várias forças. A força necessária para que a carroça começasse a se deslocar foi medida.

Na tabela 6, a tensão foi medida quando a carroça foi puxada e empurrada.

Tabela 6 – Medição da força aplicada sobre a carroça para fazê-la se deslocar

Quando a carroça é empurrada	Massa (kg)	Tensão Média (V)
Carroça vazia	147	17,2
Carroça + 22 kg	169	35,7

Quando a carroça é puxada	Massa (kg)	Tensão Média (V)
Carroça vazia	147	84
Carroça + 22 kg	169	135,5

O que se pode concluir pela tabela 6 é que à medida que se aumenta a massa da carroça, a força para fazê-la se deslocar também

aumenta, como já era esperado. Observa-se também que a força para puxá-la é maior que a força para empurrá-la, o que faz concluir que a carroça encontra-se sobre uma rampa.

A tabela 6 também foi utilizada para deduzir as equações (19) e (20) abaixo, considerando que o sensor de força atua de forma linear.

$$(19)$$

$$(20)$$

a tensão para empurrar a carroça e a tensão para puxar a carroça.

As equações (19) e (20) foram utilizadas para encontrar a relação V/kg tanto no sentido de empurrar quanto de puxar a carroça, essa relação foi 6,58V/kg para quando a carroça foi empurrada e 2,34V/kg para quando ela fosse puxada. Utilizando essas relações e o fato da força peso ser igual à força de atrito estático, essa última pôde ser calculada e os resultados encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 – Dedução da força de atrito estático para quando a carroça é empurrada e para quando ela é puxada.

Quando a carroça é empurrada	Massa (kg)	Peso (N)	Medição do Sensor (V)	Medição do Sensor (kg)	Força de Atrito estático (N)
Carroça Vazia	147,00 [*]	1442,07	17,20	2,61	25,64
Carroça + 22kg	169,00	1657,89	35,70	5,43	53,22

Quando a carroça é puxada	Massa (kg)	Peso (N)	Medição do Sensor (V)	Medição do Sensor (kg)	Força de Atrito estático (N)
Carroça Vazia	147,00 [*]	1442,07	84,00	35,90	352,15
Carroça + 22kg	169,00	1657,89	135,50	57,91	568,06

Os resultados da tabela 7 foram postos em um gráfico, Figura 22, e através dele o coeficiente de atrito foi deduzido tanto para quando a carroça foi empurrada, dando um resultado de 0,13, quanto para quando a carroça foi puxada, dando um resultado de 1,00.

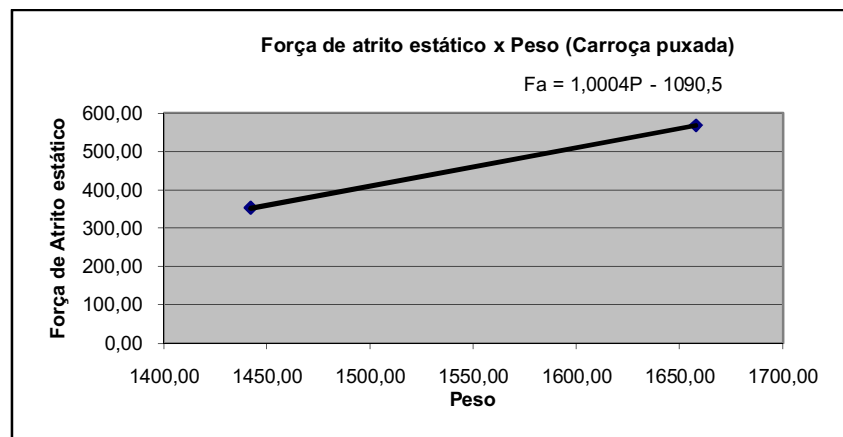
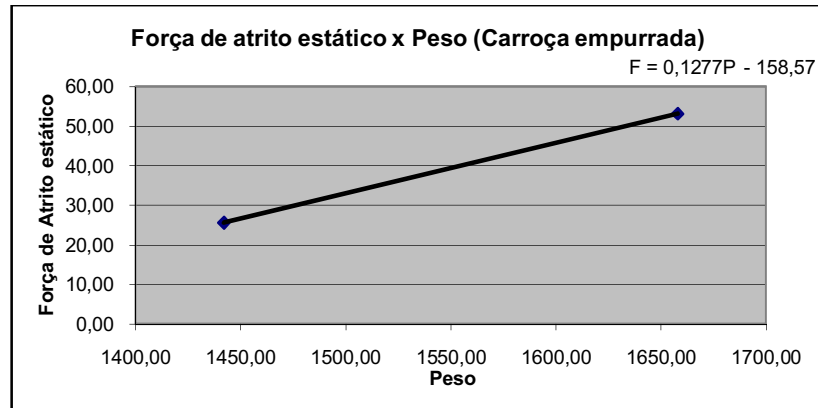


Figura 22 – Gráfico da força de atrito estático x força peso para o caso em que a carroça foi empurrada e para o caso em que a carroça foi puxada.

Uma vez deduzido o coeficiente de atrito estático é possível deduzir a massa da carroça utilizando a equação (11). Os resultados encontrados podem ser vistos na tabela 8.

Tabela 8 – Dedução da massa da carroça com a utilização do coeficiente de atrito estático deduzido experimentalmente

Carroça Empurrada				
Força de Atrito estático (N)	Coefficiente de atrito estático	Massa deduzida (kg)	Diferença com relação ao valor real	Erro (%)
25,63	0,13	20,10	-126,90	86,33
53,20		41,71	-105,29	75,32

Carroça puxada				
Força de Atrito estático (N)	Coefficiente de atrito estático	Massa deduzida (kg)	Diferença com relação ao valor real	Erro (%)
352,15	1,00	35,90	-111,10	75,58
568,06		57,91	-89,09	65,74

▫ Medição da força de atrito dinâmico

Nesta parte do experimento foram utilizados o sensor de aceleração e o sensor de força, que foram instalados na frente da carroça como mostrado na Figura 23.

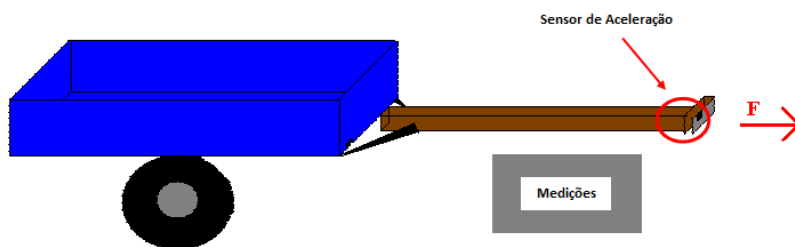


Figura 23 – Montagem da experiência para medição do coeficiente de atrito dinâmico.

Da mesma forma que para a experiência anterior, diferentes cargas foram postas sobre a carroça, mas dessa vez ao invés de medir o momento que ela começou a se deslocar, foi feito com que ela se deslocasse tanto para frente quanto para trás e a força aplicada e a aceleração adquirida pela mesma foram medidos.

Nesse experimento foi utilizada a terceira lei do atrito, equação (4). A força aplicada para deslocar a carroça foi medida no momento em que se tinha a aceleração nula e a carga sobre a mesma

era de 169 kg e 204 kg. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 9.

Tabela 9 – Medição da tensão correspondente a força aplicada sobre a carroça tanto para o caso em que ela foi empurrada, quanto para o caso em que ela foi puxada

Carroça empurrada		
Massa (kg)	Peso (N)	Medição do sensor (V)
169	1657,89	81,53
204	2001,24	111,33

Carroça puxada		
Massa (kg)	Peso (N)	Medição do sensor (V)
169	1657,89	122,00
204	2001,24	192,00

A força para empurrar a carroça é maior que a força para puxá-la, o que leva novamente a conclusão que ela encontra-se sobre uma rampa.

Com a tabela 9 as equações (21) e (22) abaixo foram encontradas, e após a regulação do offset a relação V/kg pôde ser deduzida, resultando em 0,85V/kg para quando a carroça era empurrada e 2,00V/kg para quando a carroça foi puxada.

(21)

(22)

Utilizando as relações V/kg encontradas, a força de atrito dinâmico foi deduzida e seus valores encontram-se na tabela 10 .

Tabela 10 – Dedução da força de atrito dinâmico para quando a carroça é empurrada e para quando ela é puxada

Carroça empurrada				
Massa (kg)	Peso (N)	Medição do Sensor (V)	Medição do Sensor (kg)	Força de Atrito estático (N)
169,00	1657,89	81,53	95,76	939,44
204,00	2001,24	111,33	130,76	1282,80

Carroça puxada				
Massa (kg)	Peso (N)	Medição do Sensor (V)	Medição do Sensor (kg)	Força de Atrito estático (N)
169,00	1657,89	122,00	61,00	598,41
204,00	2001,24	192,00	96,00	941,76

Os resultados da tabela 10 foram postos em um gráfico, como mostrado na Figura 24 e através dele o coeficiente de atrito dinâmico foi deduzido tanto para quando a carroça foi empurrada, dando um resultado de 1,00, quanto para quando a carroça foi puxada, dando um resultado de 1,00.

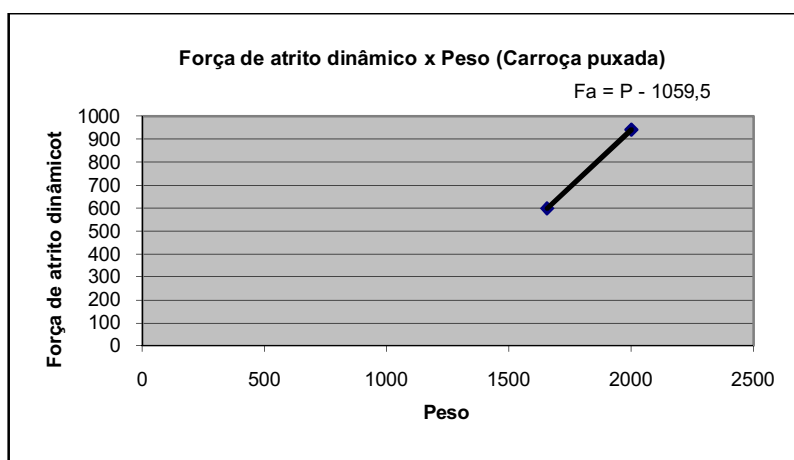
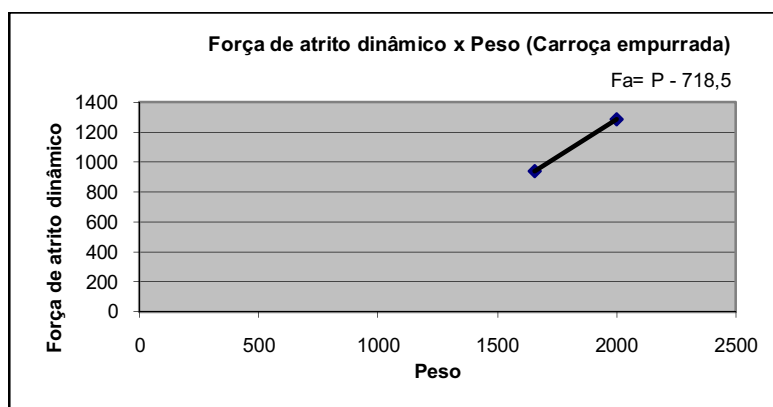


Figura 24 - Gráfico da força de atrito estático dinâmico x força peso para o caso em que a carroça foi empurrada e para o caso em que a carroça foi puxada.

Uma vez deduzido o coeficiente de atrito dinâmico, é possível deduzir a massa da carroça utilizando a equação (15). Os resultados encontrados podem ser vistos na tabela 11.

Tabela 11 - Dedução da massa da carroça com a utilização do coeficiente de atrito dinâmico deduzido experimentalmente

Carroça Empurrada			
Força de atrito dinâmico (N)	Coeficiente de atrito dinâmico	Massa deduzida (kg)	Erro (%)
939,44	1	95,76	43,34
1282,80		130,76	35,90

Carroça puxada			
Força de atrito dinâmico (N)	Coeficiente de atrito dinâmico	Massa deduzida (kg)	Erro (%)
598,41	1	61,00	66,91
941,76		96,00	52,94

12. Bibliografia

- [1] BALBINOT, Alexandre e BRUSAMARELLO, Valner João. Instrumentação e fundamentos de medidas. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- [2] SINCLAIR, Ian R. *Sensors and Transducers*. 3ª Edição, Oxford: Newnes, 2001.
- [3] LIRA, J. G. A., LUCIANO, B. A., Freire, R. C. S. e Castro, W. B. *Ligas amorfas e ligas nanocristalinas: aplicações em dispositivos eletroeletrônicos*. Eletricidade Moderna, nº375, São Paulo, v. XXXIII, pp. 154-161, junho 2005.
- [4] PEREZ, José-Philippe. *Mécanique points matériels, solides, fluides avec 250 exercices et problèmes résolus*. Paris: Masson, 1995.
- [5] FANCHON, Jean Louis. *Guide de mécanique sciences et technologies industrielles*. 1996.
- [6] MARTIN, Michel. *Le pneumatique: Liaison au Sol*. 2003.



- [7] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pneumatique_\(v%C3%A9hicule\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pneumatique_(v%C3%A9hicule))
acessado em 19/08/2011.
- [8] TIPLER, Paul A. Física para cientistas e engenheiros, volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica. 4ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- [9] *Accelerometers Guide*. Texas Instruments
- [10] <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/106> acessado em 30/08/2011
- [11] SLEMON, G. R. *Equipamentos magnetelétricos, Vol. 1*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1974, 240 p.
- [12] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 3ª Edição, Nova York: Springer-Verlag, 2004.