

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

ADRIANO C. MAQUIAVELI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DOS ESPELHOS RETROVISORES NA
PERCEPÇÃO HUMANA

São Bernardo do Campo

2011

ADRIANO C. MAQUIAVELI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DOS ESPELHOS RETROVISORES NA
PERCEPÇÃO HUMANA

Dissertação apresentada ao Centro
Universitário da FEI para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica,
orientado pelo Prof. Dr. Agenor Fleury.

São Bernardo do Campo

2011

Maquiaveli, Adriano do Carmo

Estudo da influência da vibração dos espelhos retrovisores na percepção humana / Adriano do Carmo Maquiaveli. São Bernardo do Campo, 2011.

107 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Agenor de Toledo Fleury

1. Vibrações. 2. Vértices. 3. Óptica. 4. Espelhos. 5. Olho. I. Fleury, Agenor de Toledo, orient. II. Título.

CDU 534



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE- 10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Adriano do Carmo Maquiaveli

Matrícula: 208103-2

Título do Trabalho: **Estudo da Influência da Vibração dos Espelhos Retrovisores na Percepção Humana.**

Área de Concentração: Sistemas da Mobilidade

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Data da realização da defesa: 15 / Junho / 2011

ORIGINAL ASSINADA

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 15 / junho / 2011.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Ass.: _____

Prof. Dr. Eric Conrado de Souza

Ass.: _____

Prof. Dr. Raul Gonzalez de Lima

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

A Deus, a minha esposa, a meus pais e aos
meus colegas de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer a Deus, por ter me ajudado a vencer todas as barreiras com as quais me debati para a realização deste trabalho

Gostaria de agradecer também aos professores e colegas da FEI pela paciência e compreensão em especial ao Prof. Dr. Agenor Fleury por acreditar na proposta deste trabalho.

A todos os meus familiares: esposa, pais, irmãos, sobrinhos, sogros, etc., pelo apoio dado nos momentos de cansaço.

A todos os colegas de trabalho, excelentes profissionais que dedicaram parte de seu tempo e conhecimento, colaborando profundamente no desenvolvimento desse trabalho.

A General Motors do Brasil, em especial a Engenharia do Produto por incentivar a educação e aperfeiçoamento técnico de seus profissionais.

“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.”

Albert Einstein

RESUMO

Os espelhos retrovisores automotivos são instrumentos indispensáveis que proporcionam a visão de retaguarda ao condutor do veículo. Por se tratar de um componente de segurança, o espelho deve ser estável a ponto de garantir que o condutor não interprete erroneamente a natureza da imagem observada. Com a crescente necessidade de redução de massa, custo e investimentos, os componentes metálicos e estruturais dos espelhos, grandes responsáveis pela rigidez e estabilidade dinâmica da peça, estão sendo substituídos por polímeros. A compensação da perda de rigidez dos materiais é usualmente feita com alterações da geometria dos componentes, porém a dificuldade de prever o comportamento dinâmico dos espelhos tem elevado os custos de desenvolvimento e garantia para a montadora. Atualmente pouco se conhece sobre a percepção óptica da vibração, porém sabe-se que os seus efeitos são maiores em espelhos planos quando comparado com espelhos convexos, por outro lado, os níveis de conforto e aceitação são geralmente testados subjetivamente pelas montadoras depois da construção de protótipos. O presente trabalho tem como objetivo explorar as causas da vibração em um espelho retrovisor automotivo, entendendo os efeitos dessa vibração na percepção visual do motorista, sugerindo um modelo de previsão de vibração para o desenvolvimento de espelhos retrovisores.

Palavra-chave: vibrações, vórtices, óptica, espelhos, olho

ABSTRACT

The outside rearview mirror is a very important safety component on a vehicle and responsible for providing rear vision to the driver. As a safety component, the outside mirror must be stable enough to guarantee that the driver will not have a wrong interpretation of the nature of the reflected image. Due to the growing demand to reduce mass, cost and investments, the metallic structural components of the mirror, responsible for the stiffness and stability, have been replaced by polymers. The solution to compensate for the lower material stiffness, is the component design, even though, it has been very difficult to the automotive engineer forecast the final dynamic behavior of a mirror. Nowadays, the optical vibrations on mirrors are not well understood. However it is well known that the vibration effects are worse on flat mirrors than on convex ones. The performance of a mirror is measured by subjective tests done by automotive engineer during the prototype phase when there is less reaction time and money to fix the project.

The main objective of the present study is to explore the causes of vibration on the outside mirror understanding the effects to the driver vision perception, suggesting a model to predict the vibration on mirror developments.

Keywords: vibration, vortex, optics, mirror, eye

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Tabela do referencial de Gauss.....	52
Tabela 5-1- Dados de simulação usados.....	97
Tabela 5-2 – Tabela de correlação de deslocamento, velocidade e aceleração de um modelo de um quarto de carro com espelho retrovisor.	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fontes de excitação atuantes na carroceria e no espelho retrovisor.	21
Figura 2.2 – Espectro de densidade do perfil de elevação da pista.	23
Figura 2.3 – PSDs de entrada de rugosidade de pista em elevação, velocidade e aceleração para um veículo trafegando a 50mph em uma pista real.	25
Figura 2.4 – Tipos de vibrações Induzidas pelo Escoamento.....	26
Figura 2.5- Visualização de escoamento real com baixo número de Reynolds em torno de um cilindro.....	28
Figura 2.6 – Alterações qualitativas na camada limite e na esteira do escoamento em torno de um cilindro.	29
Figura 2.7 – Esteira de von Kármán em escoamento ao redor de um cilindro.....	30
Figura 2.8 – Pressão distribuída em torno de um cilindro.....	32
Figura 2.9 - Relação entre o número de Strouhal e Reynolds para escoamento sobre cilindro.....	33
Figura 2.10 – Interpretação do modelo bi-dimensional massa-mola para a velocidade reduzida e da amplitude adimensional.....	34
Figura 2.11 – (a) Modelo de um quarto de carro, (b) Diagrama de blocos do modelo de um quarto de carro.....	37
Figura 2.12 – Ganho em resposta do modelo de um quarto de carro para excitações na carroceria, pista, pneu e roda.....	39
Figura 2.13 – Filtro de entre – eixos no movimento de <i>bounce</i> e <i>pitch</i>	41
Figura 2.14 – Plano do movimento de <i>pitch</i> para um automóvel.....	42
Figura 2.15 – Efeitos da razão de frequência natural na posição dos centros de oscilações.....	45
Figura 3.1 – Incidência e reflexão de um raio de luz sobre um espelho plano.	46
Figura 3.2 – Exemplo geométrico da reflexão de raios em um espelho convexo.	48
Figura 3.3 – Geometria de um espelho esférico	49
Figura 3.4 – Espelho estigmático ou de Gauss	49
Figura 3.5 – Representação geométrica da reflexão de raios luminosos no foco de um espelho côncavo.....	50
Figura 3.6 – Representação geométrica da reflexão de raios luminosos no foco de um espelho côncavo.....	50
Figura 3.7 – Construção geométrica de imagem refletida em espelho convexo.	51

Figura 3.8 – Coordenadas cartesianas de referencia usadas no método analítico	51
Figura 3.9 – Projeção da imagem refletida em espelho convexo e referencia de Gauss.	52
Figura 3.10 - Representação dos componentes de um espelho retrovisor automotivo em vista explodida.	54
Figura 4.1 – Corte do olho humano, mostrando seus vários componentes ópticos.....	57
Figura 4.2 – As diferentes camadas da retina	58
Figura 4.3 – Distribuição dos fotorreceptores ao longo da retina.....	61
Figura 4.4 – Musculos oculares	63
Figura 4.5 - Movimentação vertical do observador com relação um mostrados estático.	69
Figura 4.6 - Rotação da abeca do observador com relação um mostrados estático.....	70
Figura 4.7 - Magnitude de vibração do mostrador e do observador abaixo da qual não se pode reduzir a acuidade visual. As linhas para a vibração do mostrador correspondem a $\pm$ 1min de arco; a linha para a vibração do observador é a média de 12 indivíduos expostos a vibração senoidal vertical em um assento rígido sem encosto. Dados do Griffin (1975c); ISO 2631 (International Organization for Standarization 1978.....	72
Figura 4.8 - A defasagem no seguimento dos olhos para 10 observadores olhando alvos com diferentes graus de previsibilidade do movimento causado por faixas de movimento variando	74
Figura 4.9 - Desempenho médio de leitura de oito observadores durante oscilação senoidal de guinada (yaw) do observador ou do alvo. As áreas hachuradas representam $\pm$ 1 desvio padrão; I e II referem-se ao desempenho estático antes e depois da vibração, respectivamente.	75
Figura 4.10 - Acuidade de leitura durante exposição à vibração vertical senoidal, um terço de oitava e aleatória vertical no assento: (a) efeitos das diferentes frequências e tipos de vibração na taxa de erro de leitura (média de 12 observadores); (b) função de densidade de probabilidade da velocidade de <i>pitch</i> da cabeça durante exposição a 2ms^{-2} r.m.s. 10 Hz senoidal e um terço de oitava em faixa aleatória de vibração vertical do assento.	77
Figura 4.11 - Magnitude de aceleração produzindo 10% de erros de leitura quando usado mostrador montado em capacete (HMD – Helmet Mounted Display, caracteres subtendendo 15min de arco em infinito óptico), um pequeno painel montado (SPMD – Small	

Panel Mounted Display, caracteres subtendendo 5min de arco a 0.75m), e um grande painel montado (LPMD – Large Panel Mounted Display subtendendo 5min de arco a 1.5m).	78
Figura 4.12 - Magnitude de aceleração produzindo 10%, 15%, 20% e 30% de erros de leitura para observadores expostos a vibração do assento para frente e para trás (eixo x) com encosto.	79
Figura 4.13 - Porcentagem média dos erros de leitura e dos tempos de leitura para vibração do mostrador (·····), vibração do observador (----) e vibração simultânea do observador e do mostrador (—). Desempenho estático: 6,2% de erro médio de leitura, 27,8s de tempo de leitura; caracteres subtendendo 5min de arco a 0,75m; cinco magnitudes de vibração senoidal (1.0, 1.25, 1.6, 2.0 e 2.5 ms ⁻² r.m.s.); assento rígido sem encosto.....	81
Figura 4.14 - Sensibilidade de contraste como uma função da frequência espacial mostrando os efeitos da vibração. A forma precisa da curva depende de muitos fatores; a vibração reduz a sensibilidade de contraste em altas frequências espaciais mas também podem causar outras mudanças.	84
Figura 4.15 – Relação das elipses de tangência de visibilidade com o gráfico de distribuição de frequência . Fonte: Meldrum (1966).	87
Figura 4.16 – Vista lateral da posição dos olhos (elipse combinada baseada nos 3 veículos estudados por Meldrum (1966).	87
Figura 4.17 – Exemplo do tipo de estudo de visibilidade que pode ser feito com o uso da elipse dos olhos.	88
Figura 4.18 – Movimentação horizontal dos olhos e cabeça, dentro e fora do limite ideal de conforto.	89
Figura 4.19 - Movimentação vertical dos olhos e cabeça, dentro e fora do limite ideal de conforto	90
Figura 4.20 – Ilustração do posicionamento dos espelhos retrovisores segundo a SAE J985.....	90
Figura 5.1 – Fluxograma do cálculo do coeficiente angular da equação da reta de visão de um espelho retrovisor com lente plana.	92
Figura 5.2 – Representação geométrica do coeficiente angular “m” da equação da reta de visão para um espelho retrovisor com lente plana.	92
Figura 5.3 – Fluxograma do cálculo do coeficiente angular da equação da reta de visão de um espelho retrovisor com lente convexa.....	93

Figura 5.4 – Representação geométrica do coeficiente angular “m” da equação da reta de visão para um espelho retrovisor com lente convexa.	94
Figura 5.5 – Modelo de um quarto de carro com dois graus de liberdade usado para determinar a posição do alvo em função do tempo.	96
Figura 5.6 – Esboço do modelo de meio carro com a projeção da reta de visão do motorista à imagem virtual do alvo.	98
Figura 5.7 – Deslocamento angular da linha de visão para o motorista, 540mm afastado de uma lente plana e outra convexa.	100
Figura 5.8 – Motorista a 1500mm da lente, condição equivalente ao espelho do passageiro	100
Figura 5.9 – Deslocamento angular do alvo observado de um veículo a 112km/h	101

NOMENCLATURA

A : Área, Amplitude senoidal

A : Aumento linear transversal

a_f : Aceleração do fluido

a : Distância do eixo dianteiro ao CG do veículo

A_y : Amplitude de vibração vertical

b : Distância do eixo traseiro ao CG do veículo

c : Velocidade do som no fluido, Distância do eixo traseiro ao CG

c : Fator de amortecimento

c_e : Fator de amortecimento do espelho

c_p : Fator de amortecimento do pneu

c_c : Fator de amortecimento crítico, Fator de amortecimento da suspensão

C_L : Coeficiente de Sustentação

C_s : Coeficiente de amortecimento da suspensão

C_{Dp} : Coeficiente de arrasto devido a pressão

C_{Df} : Coeficiente de arrasto devido ao atrito

C_D : Coeficiente de arrasto total

D : Força de arrasto total

d_A : distância entre o eixo traseiro do veículo principal e o alvo

Dc : Dimensão característica do copo (diâmetro, largura, altura, etc)

D_f : Força de arrasto devido ao atrito

D_p : Força de arrasto devido a pressão

f_a : Frequência de ressonância da roda (Hz)

F_i : Força de desbalanceamento

Fr : Número de Froude

f_s : Frequência do zunido

f_n : Frequência natural em Hz

F_x : Força horizontal no sentido do escoamento

F_y : Força vertical normal ao sentido do escoamento

F_{ps} : Força força de pressão tangente a linha de corrente do escoamento

g : Aceleração da gravidade

G_o : Nível de rugosidade

G_z : Amplitude PSD
 G_{zs} : Aceleração PSD da massa suspensa
 G_{zr} : Aceleração PSD da pista de rolagem
 H_V : Resposta em ganho da entrada da pista
 h_z : Altura na coordenada z
 I_y : Momento de inércia de *pitch*
 k : Raio de giração
 k_e : Rigidez do espelho
 k_p : Rigidez do pneu
 k_s : Rigidez da suspensão
 k_f : Ride rate da suspensão dianteira
 k_r : Ride rate da suspensão traseira
 l : Comprimento
 L : Força de sustentação
 Ma : Número de Mach
 m_e : massa do corpo, espelho
 m_c : massa da carroceria
 p : Pressão
 RR : rigidez equivalente
 Re : Numero de Reynolds
 R : Raio de curvatura da linha de corrente
 Re_{cr} : Numero de Reynolds Crítico
 RR : Ride Rate
 St : Numero de Strouhal
 s : Espaço, distância
 U : Perfil de elevação da pista
 U_A : Velocidade do fluido
 U_r : Velocidade reduzida
 U_{fs} : Velocidade na borda da camada limite
 U/f : Período de oscilação
 v : Velocidade do fluido, Número de ondas
 v_o : Número de ondas limite

V : Volume, velocidade

W_s : Força peso tangente a linha de corrente do escoamento

W_A : Peso do eixo

x : distância ao longo da pista

μ : Viscosidade dinâmica do fluido.

ε : Rugosidade da superfície

ε/l : Rugosidade relativa

ρ : Densidade

ρ_e : Densidade da estrutura ou corpo

ρ_f : Densidade do fluido

τ_p : Tensão de cisalhamento

τ : Tensão de cisalhamento

θ : Ângulo de ataque do fluido sobre a superfície do corpo com relação ao escoamento

δ : Espessura da camada limite

ν : Viscosidade cinemática do fluido

ζ : Razão de amortecimento

γ : Peso específico

ω : velocidade de rotação, frequência angular

ω_n : frequência natural não amortecida em rad/s

ω_a : frequência natural amortecida em rad/s

β : Coeficiente de acoplamento

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
NOMENCLATURA.....	15
SUMÁRIO.....	18
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 VIBRAÇÕES EM AUTOMÓVEIS	21
2.1 Fontes de excitação	22
2.1.1 Rugosidade da pista.....	22
2.1.2 Vibração induzida por vórtices	26
2.1.3 Outras fontes de excitação do espelho retrovisor	35
2.2 Propriedades de resposta do veículo às excitações da pista de rolagem.....	36
3 ESPELHOS	46
3.1 Teoria da reflexão de imagens	46
3.1.1 Espelhos planos.....	47
3.1.2 Espelhos esféricos convexos	47
3.1.3 Método Analítico.....	51
3.2 Espelho Retrovisor Automotivo	54
4 O OLHO HUMANO	56
4.1 Fisiologia básica do olho humano.....	56
4.2 A Retina	58
4.3 Percepção visual e periférica.....	59
4.4 Movimento dos olhos.....	61
4.4.1 Reflexo vestibulo-ocular (VOR)	62
4.4.2 Sistema motor ocular.....	62
4.4.3 Nistagmo optocinético (OKN)	64
4.4.4 Sacadas	64

4.4.5	Seguimento.....	64
4.4.6	Fixação	66
4.4.7	Vergência	67
4.4.8	Efeitos da vibração na visão e estímulos.....	68
4.4.9	Efeitos da vibração na visão.....	71
4.4.10	Efeitos da direção da vibração	79
4.4.11	Distância de visão.....	80
4.4.12	Movimento simultâneo de translação do mostrador e do observador	81
4.4.13	Variáveis que afetam a vibração da cabeça.....	82
4.4.14	Influência da tarefa visual na visão	82
4.4.15	A influência do mostrador na visão.....	85
4.5	Modelos de visão usados na indústria automobilística	86
5	MODELO E SIMULAÇÃO.....	91
5.1	Modelo da Reflexão da imagem	91
5.2	Modelo dinâmico do veículo e alvo	94
5.3	Modelo completo	98
6	CONCLUSÃO.....	102
7	PERSPECTIVA DE TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

A vibração em espelhos retrovisores é um problema muito comum na indústria automobilística. Alguns autores com diferentes abordagens estudaram o tema tentando compreender o fenômeno que tem incomodado alguns milhares de motoristas ao redor do mundo.

O tema tem ganhado importância nas montadoras e fornecedores de retrovisores, principalmente com a crescente demanda por materiais alternativos que proporcionem redução de massa e custo, porém, a busca por essas características tem gerado um crescente efeito colateral reclamado pelos consumidores de automóveis, a vibração do espelho.

O presente trabalho aborda a origem das fontes excitadoras de vibração de um espelho retrovisor automotivo, estuda o comportamento dinâmico da peça, buscando compreender os efeitos dessa vibração para o motorista (Griffin, 1996) com a intenção de propor um modelo matemático que auxilie na correlação das amplitudes de deslocamento e frequência de trabalho do espelho com os limites de funcionamento do olho humano. Espera-se que a previsibilidade da vibração do retrovisor permita alterações nos parâmetros estruturais e aerodinâmicos do projeto antes da fase de construção de protótipos, momento em que as alterações no projeto aumentam o custo e gera atrasos de cronograma de desenvolvimento. Muitos estudos referentes à vibração estrutural e aerodinâmica de espelhos retrovisores foram feitos por Hwang (2001), Song e Ayorinde (2005), Kaesler e Stande (2001), Lounsberry (2007) e Watkins (2004) entre outros, os quais estudaram as diferentes fontes de excitação atuantes nos espelhos retrovisores separadamente, preferindo tratá-las como fontes individualmente atuantes ao invés de combinarem duas ou mais em um único modelo de estudo. As principais fontes de excitação abordadas nesta dissertação é a vibração induzida por vórtices Blevins (1990) e Cunha (2005), e as excitações oriundas da pista de rolagem que são transportadas através da carroceria Gillespie (1992) e Jasar (2008).

2 VIBRAÇÕES EM AUTOMÓVEIS

“Os automóveis estão sujeitos a um espectro muito grande de vibrações que é transmitido para os passageiros de forma tátil, visual e auditiva. As vibrações táteis e visuais são conhecidas pelo termo inglês “ride” (0-25 Hz) e as vibrações audíveis (25-25000 Hz) são denominadas em inglês como “noise”. “Ride” é a percepção subjetiva, normalmente associada com o nível de conforto experimentado dentro de um veículo em movimento. A percepção é a resposta a um conjunto de vários fatores como a vibração transmitida ao corpo do ocupante pelo banco, pés e mãos, temperatura, ventilação, espaço interior, acessibilidade e vibração de componentes e acessórios do veículo”, (Gillespie, 1992). Como o termo “ride” é comumente usado na linguagem da engenharia automobilística mundial, convém mantê-lo sem tradução para a língua portuguesa.

O veículo automotor é um sistema dinâmico que responde em vibração a excitações externas e internas. As propriedades de resposta do sistema determinam a magnitude e a direção da vibração imposta ao habitáculo e aos passageiros, sendo um dos critérios mais importantes na avaliação de qualidade de um veículo. As vibrações percebidas nos espelhos retrovisores são consequência da resposta em vibração da carroceria do veículo às excitações de entrada que esta sofre da pista, motor, sistema de transmissão, aerodinâmicas e outras citadas na página 35. As principais fontes de excitação atuantes na carroceria e no estão descritas na Figura 2.1.

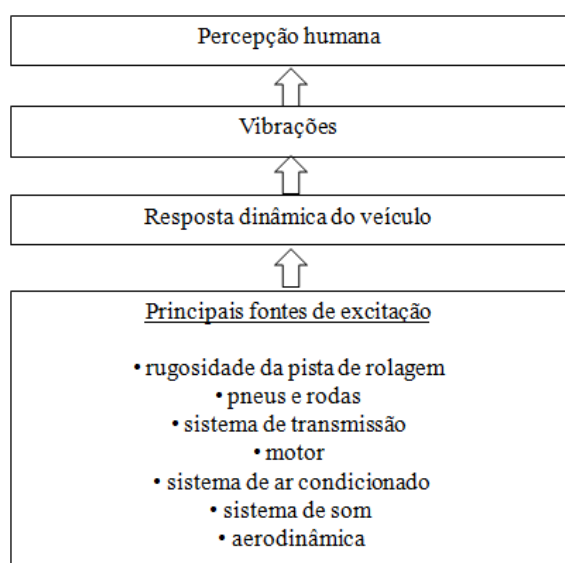


Figura 2.1 – Fontes de excitação atuantes na carroceria e no espelho retrovisor.
Fonte: Autor

2.1 Fontes de excitação

Existem múltiplas fontes de excitação para vibração de um automóvel, por isso, é comum classificá-las como fontes externas e internas. As fontes de excitação externa são aquelas que não pertencem ao veículo, por exemplo, a rugosidade da pista de rolagem e excitações aerodinâmicas. As fontes de excitação interna são oriundas de mecanismos do próprio veículo, que trabalham em rotação como pneus e roda, sistema de transmissão e motor.

Para os estudos dos espelhos retrovisores poderíamos adicionar mais algumas fontes excitadoras como o sistema de refrigeração e o sistema de som (alto-falantes), mesmo assim os testes experimentais realizados durante a validação dos espelhos retrovisores ao longo dos últimos anos na indústria automotiva mostram que as maiores alterações de resposta em vibração dos espelhos retrovisores devem-se principalmente aos diferentes tipos de pista de rolagem sobre as quais o veículo trafega, por isso, as demais fontes de excitação serão apenas citadas nesta revisão.

2.1.1 Rugosidade da pista

A rugosidade da pista de rolagem refere-se a todas as imperfeições ou falhas na superfície de rolagem como consequência dos materiais usados na pavimentação, o desgaste ao tempo e emendas de manutenção que causam um deslocamento em elevação transmitido ao veículo à medida que este se move ao longo da pista. A rugosidade superficial da pista pode ser medida em vários trechos de uma estrada ou com o uso de medidores de perfil de alta velocidade, podendo ser descrita por si própria ou por suas propriedades estatísticas. Usa-se a função densidade espectral, PSD (Power Spectral Density), para representar a rugosidade, transformando seu sinal aleatório de banda larga em uma série de senos variando em amplitude e fase. A Figura 2.2 mostra o gráfico da densidade espectral do perfil de elevação de algumas pistas, Gillespie (1992, p. 127). A frequência espacial mostrada na abscissa do gráfico representa a quantidade de picos de elevação da pista (número de ondas) por comprimento (ciclos/metro) e é o inverso do comprimento de onda, enquanto que a ordenada representa a amplitude ou rugosidade da pista.

Na Figura 2.2 foram representadas três tipos de pistas de rolagem, a curva superior representa um pavimento de concreto com laje e junta de dilatação, a intermediária um pavimento asfáltico e a inferior é uma pista similar a de concreto porém revestida com uma camada de asfalto betuminoso, resultando em uma superfície mais lisa. A PSD de cada pista é única, mesmo assim todas as pistas apresentam característica de queda em amplitude com o aumento da frequência espacial pois os desvios de elevação são muito maiores para trechos de centenas de metros de pista do que em trechos menores. Observa-se que o pavimento de concreto causa maior excitação de vibração para maior números de ondas, excitação de alta frequência, enquanto que o asfalto betuminoso causa maior excitação de vibração para menor numero de ondas, excitação de baixa frequência.

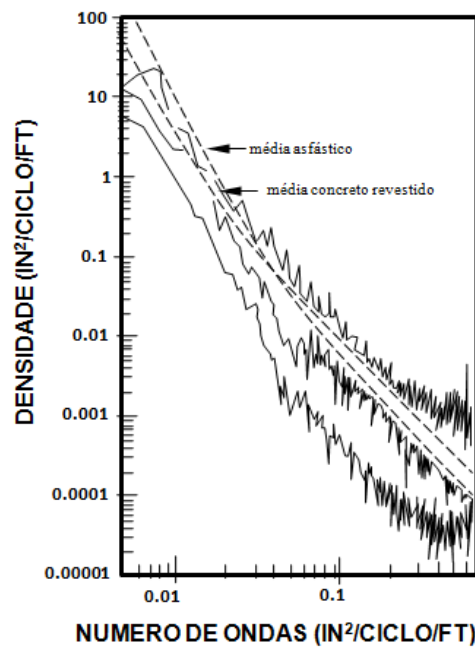


Figura 2.2 – Espectro de densidade do perfil de elevação da pista.
Fonte: Gillespie, 1992

A PSD para as propriedades médias da pista mostrada na Figura 2.2 pode ser expressa pela equação (2.1):

$$G_z(v) = \frac{G_o \left[1 + \left(\frac{v_o}{v} \right)^2 \right]}{(2\pi v)^2} \quad (2.1)$$

$G_z(v)$: Amplitude PSD ($m^2/ciclos/m$)

v : Número de ondas (ciclos/metro)

G_o : Parâmetro de magnitude de rugosidade (nível de rugosidade)

$G_o = 1.25 \times 10^5$ - para pistas rugosas

$G_o = 1.25 \times 10^6$ - para pistas lisas

v_o : Número de ondas de corte

$v_o = 0.1640$ ciclos/metro para asfalto

$v_o = 0.0065$ ciclos/metro para blocos de concreto

Gillespie (1992), sugere que a equação (2.1) combinada com uma sequência aleatória de números é um método útil para gerar perfis de rugosidade aleatória contendo a qualidade espectral das pistas tipicamente usadas para estudo de ride em veículos automotores. O perfil de rugosidade também pode ser modelado como uma simples onda senoidal conforme a equação (2.2).

$$U = A \sin(2\pi v X) \quad (2.2)$$

U : Perfil de elevação da pista

A : Amplitude senoidal

v : Número de ondas (ciclos/m)

X : distância ao longo da pista (m)

A relação de velocidade de deslocamento do veículo, “V”, e o tempo, “t”, podem substituir a distância “X” da equação (2.2), resultado na equação (2.3).

$$U = A \sin(2\pi v V t) \quad (2.3)$$

V : velocidade do veículo

t : tempo de deslocamento

A transformação da frequência espacial do perfil de elevação da pista (ciclos/metro) em frequência temporal (Hz) é resultado da multiplicação da velocidade do veículo pelo número de ondas da função PSD, Figura 2.3. Como a aceleração é a medida mais usada para vibrações de ride, a rugosidade da pista também pode ser interpretada como uma entrada em aceleração, diferenciando a função temporal do perfil de elevação (2.3), em perfil de velocidade e aceleração, sendo o ultimo resultando na equação (2.4).

$$\ddot{U} = -(2\pi vV)^2 A \sin(2\pi vVt) \quad (2.4)$$

Como uma frequência temporal, a amplitude da entrada em aceleração aumentará com o quadrado da velocidade. Observa-se na Figura 2.3, que como entrada em aceleração, a rugosidade apresenta sua maior excitação de entrada no veículo em alta frequência.

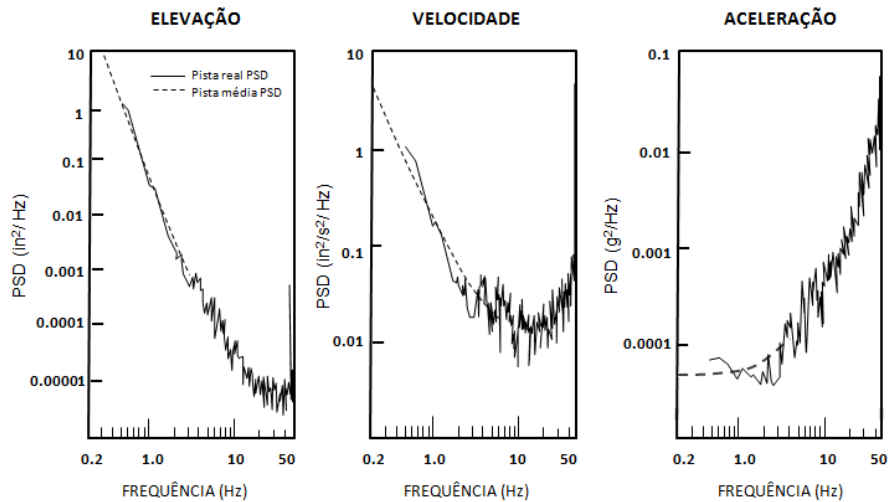


Figura 2.3 – PSDs de entrada de rugosidade de pista em elevação, velocidade e aceleração para um veículo trafegando a 50mph em uma pista real.

Fonte: Gillespie, 1992

A diferença de rugosidade da pista entre a trajetória das rodas direitas e esquerdas gera a excitação de rolagem também conhecida no termo em inglês, “roll”. As excitações de rolagem são observadas como uma entrada vertical presente em cada roda através da normalização da diferença de amplitude de cada lado de trajetória das rodas pela amplitude média da trajetória das rodas direita e esquerda para cada faixa do número de ondas da PSD. Em baixa frequência espacial, a entrada é bem menor em magnitude do que a entrada vertical do veículo. Em frequências espaciais maiores, a magnitude de entrada da rolagem normalizada aumenta devido à tendência de solavancos causada pela perda de correlação

entre as trajetórias das rodas direita e esquerda. Segundo Gillespie (1992), a ressonância de rolagem ocorre em baixas frequências, de 0.5 a 1 Hz para a maioria dos veículos, mesmo assim a resposta em *bounce* é predominante. O modo de *bounce* caracteriza um movimento translacional vertical da carroceria do veículo, veja a Figura 2.13.

2.1.2 Vibração induzida por vórtices

O escoamento de um fluido pode através de variados mecanismos induzir a vibração de estruturas sólidas nele imersas. Esta interação é conhecida como Vibração Induzida pelo Escoamento, ou, Vibração Induzida por Vórtices (VIV). A vibração das asas de uma aeronave, pontes, chaminés e espelhos retrovisores externos são todos exemplos de estruturas que sofrem, de variadas formas, vibração induzida pelo escoamento.

A vibração de baixa frequência (de 1 a 2 Hz) é chamada de “galope” e é resultado das forças de elevação e arrasto desenvolvidas pelo ar ao redor do corpo, a vibração instável (aleatória) é chamada de “tremulação” e a vibração de alta frequência, chamada de “zunido” por estar dentro da faixa frequências audíveis. A Figura 2.4 (Blevins, 1990) mostra a variedade de configurações de escoamento capazes de provocar a vibração de estruturas mecânicas.

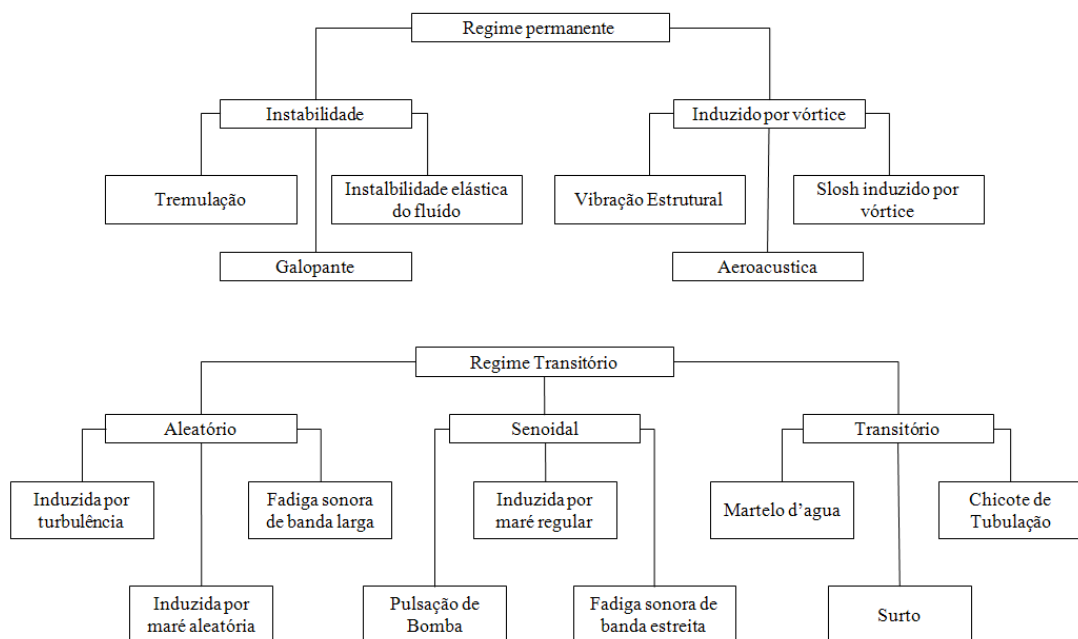


Figura 2.4 – Tipos de vibrações Induzidas pelo Escoamento.
Fonte: Autor “adaptado de” Blevins , 1990

Uma das fontes de vibração em estudo é a excitação causada pela emissão alternada de fluido com grande concentração de vorticidade. Um vórtice é uma idealização matemática de um fenômeno físico, mas na prática o que se observa são distribuições de vorticidade ao longo do domínio do escoamento (Cunha, 2005).

Quando um corpo se move através de um fluido, há uma interação entre o corpo e o fluido. Esta interação pode ser descrita por forças que atuam na interface fluido-corpo. Estas forças por sua vez, podem ser descritas em função da tensão de cisalhamento na parede τ_p , provocada pelos efeitos viscosos, e da tensão normal que é devida à pressão, p . A componente da força resultante na direção do escoamento é denominada arrasto, D (“drag”), e a que atua na direção normal ao escoamento é denominada sustentação, L (“lift”). As duas forças podem ser obtidas pela integração das tensões de cisalhamento e de pressão normais ao corpo em estudo.

$$D = \int dF_x = \int p \cdot \cos\theta \cdot dA + \int \tau_p \cdot \sin\theta \cdot dA \quad (2.5)$$

$$L = \int dF_y = - \int p \cdot \sin\theta \cdot dA + \int \tau_p \cdot \cos\theta \cdot dA \quad (2.6)$$

F_y : Força vertical normal ao sentido do escoamento

F_x : Força horizontal no sentido do escoamento

p : Pressão

θ : Ângulo de ataque do fluido sobre a superfície do corpo com relação ao escoamento

A : Área transversal

τ_p : Tensão de cisalhamento

As forças de arrasto e sustentação são consequência de vários efeitos físicos no universo do escoamento, como o gradiente de velocidade, gradiente de pressão, arrasto por atrito, arrasto devido a pressão, forma e tamanho do corpo, efeitos de compressibilidade e rugosidade superficial do corpo.

O campo de velocidades ao redor de corpos rombudos altera qualitativamente com a variação do número de Reynolds. O número de Reynolds representa uma razão entre a ordem

de grandeza das forças inerciais e das forças viscosas. As forças viscosas se fazem representativas principalmente na camada limite do escoamento, ou seja, nas regiões de contorno (“bordas”) do domínio do escoamento. Essas bordas são representações da interface entre o fluido e outros corpos, como por exemplo, a superfície de um espelho retrovisor externo de um automóvel. O parâmetro D presente no número de Reynolds é uma dimensão característica do corpo. Portanto, o número de Reynolds é particular à configuração do escoamento. Quando não há um corpo e não existe forma de se definir uma dimensão característica ao domínio do escoamento não faz sentido se definir o número de Reynolds.

$$Re = \frac{U_A \times Dc}{\nu} \quad (2.7)$$

Re: Numero de Reynolds

U_A : Velocidade do fluido

Dc : Dimensão característica do corpo (diâmetro)

ν : Viscosidade cinemática do fluido

Assume-se que o escoamento fora da camada limite, é aproximadamente invíscido, e o sistema pode ser modelado pelas equações de Euler para escoamento de fluidos perfeitos. A Figura 2.5 mostra as linhas de corrente aproximadas do escoamento real em torno de um cilindro fixo para baixos valores de Re .

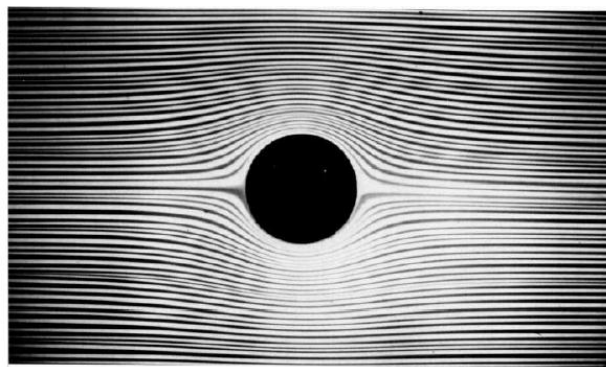


Figura 2.5- Visualização de escoamento real com baixo número de Reynolds em torno de um cilindro
Fonte: van Dike, 1982.

Como o número de Reynolds, expresso pela equação (2.7), é um parâmetro que mede a magnitude relativa entre as forças de origem inercial e as forças de origem viscosa, quando $Re \ll 1$ (Munson, 1997) as forças inerciais são desprezíveis em comparação com as forças viscosas; o mesmo vale para $Re \gg 1$. A Figura 2.6 mostra as variações da configuração do escoamento ao redor de um cilindro, para diferentes números de Reynolds.

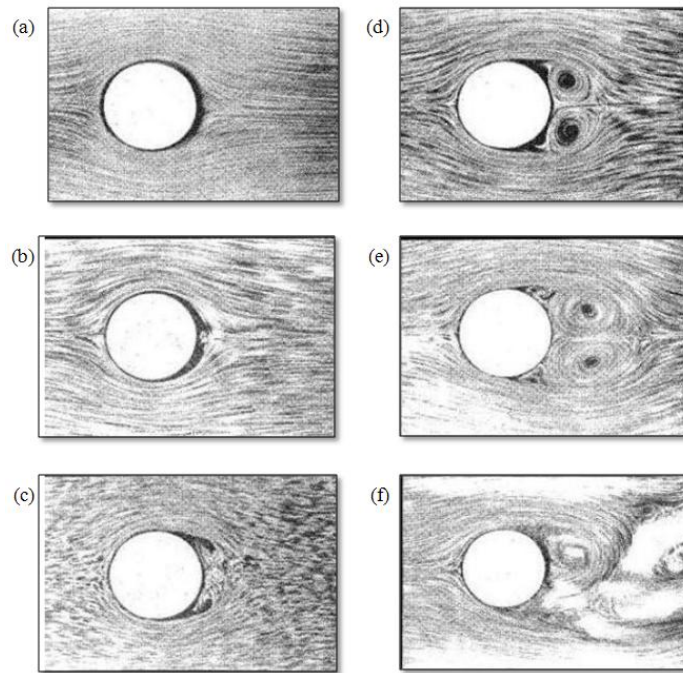


Figura 2.6 – Alterações qualitativas na camada limite e na esteira do escoamento em torno de um cilindro.
Fonte: Batchelor , 1967

Observa-se na Figura 2.6 (a), que o escoamento fora da camada limite é potencial, isto é, o escoamento apresenta pouca assimetria longitudinal. A medida que o número de Reynolds aumenta, observam-se alterações na espessura da jusante do escoamento, Figura 2.6 (b). Na Figura 2.6 (c), pode-se observar como a camada limite descola da superfície do corpo. Verifica-se o surgimento de duas bolhas de recirculação a jusante do corpo. A Figura 2.6 (f), mostra o escoamento instável a jusante do corpo com o aumento do número de Reynolds. O escoamento passa a exibir comportamento periódico através do desprendimento alternado de vórtices num padrão conhecido com esteira de von Kármán ilustrado na Figura 2.7. Esse comportamento não varia para aumento do número de Reynolds e também em movimentos oscilatórios do cilindro (Cunha, 2005).

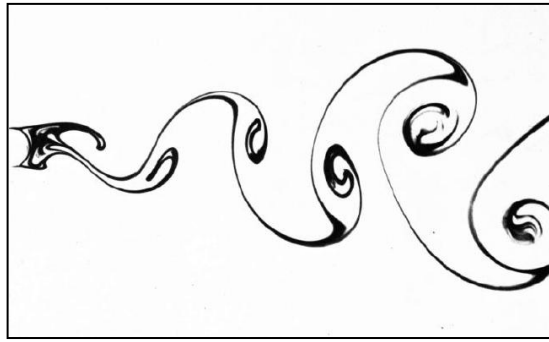


Figura 2.7 – Esteira de von Kármán em escoamento ao redor de um cilindro
Fonte: van Dyke ,1982

A esteira de von Kármán leva o nome do seu descobridor (Theodore von Kármán), é uma das configurações possíveis deste campo de velocidades. O surgimento da esteira de von Kármán está relacionado a uma bifurcação de Hopf, (Cunha, 2005), que ocorre nas soluções das equações de Navier-Stokes para fluido incompressível. O campo de velocidades do fluido mantém-se estacionário até o escoamento atinja o valor de número de Reynolds crítico, Re_{cr} , a partir do qual a esteira de von Kármán passa a ser observada. A partir do número de Reynolds crítico, o escoamento passa a exibir um caráter transitório. Mesmo sendo transitório, o fenômeno exibe características de periodicidade em muitos de seus aspectos, como o campo de velocidade, campo de pressão, força transversal resultante, força longitudinal resultante.

As características mensuráveis são aproximadamente constantes para $Re < Re_{cr}$, neste caso, os valores médios, que definem essas características, variam continuamente com os parâmetros que influenciam o escoamento como: o número de Reynolds, a rugosidade superficial do corpo, a forma geométrica do corpo, entre outros.

O valor $Re = Re_{cr}$ é um ponto de bifurcação do campo de velocidades do fluido. Existem diferenças qualitativas no campo de velocidades para $Re < Re_{cr}$ e $Re > Re_{cr}$. A principal diferença é a estabilidade do campo de vetores.

Quando $Re < Re_{cr}$, tem-se um escoamento estacionário onde a resposta dinâmica é semelhante à de um sistema que apresenta um ponto de equilíbrio assintoticamente estável no sentido de Lyapunov. Significa que o escoamento tende a manter o mesmo comportamento com o passar do tempo.

Quando $Re > Re_{cr}$, tem-se um comportamento periódico e a resposta dinâmica se assemelha à de um sistema que apresenta um ciclo-limite.

Segundo Poincaré, um ciclo-limite é uma trajetória fechada e isolada, que pode aparecer no diagrama de retrato de fases de sistemas não-lineares. Trajetória isolada significa

ausência de outras trajetórias fechadas infinitesimalmente próximas. Por isso, as trajetórias vizinhas a um ciclo-limite devem se aproximar ou se afastar dele. O ciclo-limite é assintoticamente estável quando as trajetórias vizinhas internas e externas se aproximam. Se as trajetórias vizinhas se afastam, o ciclo é instável. Se as trajetórias se aproximam por um lado, mas se afastam pelo outro, o ciclo é considerado semi-estável, Monteiro (2006). Estritamente esse sistema seria estável no sentido de Lyapunov mas não assintoticamente estável. Para diferentes parâmetros como, velocidade de escoamento, forma do corpo, movimento do corpo, rugosidade superficial, viscosidade do fluido e densidade, a esteira de von kármán mostra-se robusta, ou seja, exibe um ciclo-limite estável como resposta. Esta relação é a base que justifica a lógica e o funcionamento dos modelos fenomenológicos nos estudos de vibração induzida por vórtices (VIV).

O estado de movimento do corpo é capaz de interagir intensamente com a dinâmica de escoamento do fluido através de fenômenos não-lineares como histerese, sincronização, comportamento intermitente. O comportamento de um corpo sob VIV apresenta descontinuidade em várias características do movimento de resposta, como sua amplitude de deslocamento, fase relativa e frequência. Estes fenômenos são indícios de uma dinâmica mais complexa que pode estar relacionada com outras bifurcações oriundas do estado de movimentação do corpo, (Cunha, 2005).

As velocidades relativas no escoamento do ar sobre o espelho retrovisor são relativamente baixas, ou seja, com o número de Mach abaixo de 0,1 ($Ma < 0,5$), por isso, o fluido pode ser considerado incompressível.

Strouhal em 1878 e Rayleigh em 1896 estudaram sistematicamente o escoamento ao redor de um cilindro e documentaram qualitativamente várias informações usadas até hoje.

Os resultados obtidos através de simulação numérica ainda não são capazes de prever, nem mesmo qualitativamente, a curva de amplitude de resposta obtida experimentalmente, dificultando a aplicação de métodos numéricos (Cunha, 2005). Os experimentos em canais de circulação de água e túneis de vento continuam sendo a principal fonte de geração de informação e a única forma de comprovar validade de previsões de modelos teóricos ou experimentos numéricos para $10^4 < Re < 10^5$ (Cunha, 2005).

A emissão alternada de vórtices provoca a variação do campo de pressão na superfície do corpo, dando origem às forças oscilatórias (arrasto e sustentação), que excitam alternadamente a estrutura induzindo-a a vibração. A Figura 2.8 mostra a distribuição de pressão sobre um cilindro em um escoamento bidimensional.

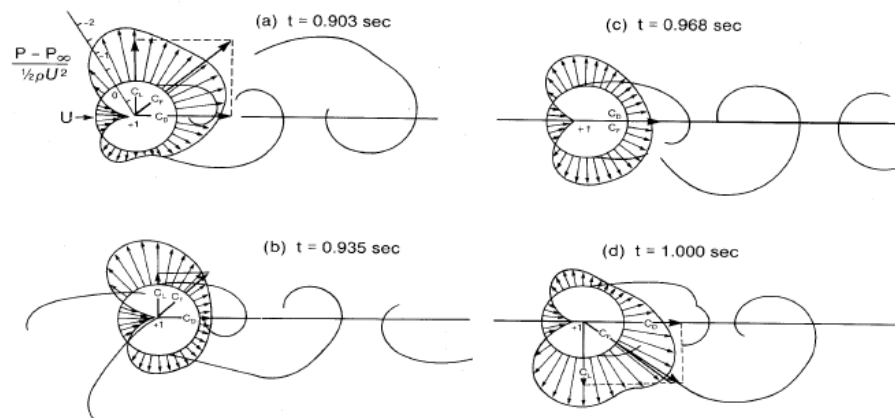


Figura 2.8 – Pressão distribuída em torno de um cilindro
Fonte: Blevins, 1990

Em seus estudos sobre “zunido”, Strouhal descobriu uma relação de proporcionalidade entre o diâmetro, D , a velocidade, U , e a frequência do “zunido” (som emitido pela frequência de emissão dos vórtices), fs . Notou que havia um aumento potência sonora quando a frequência do “zunido” coincidia com a frequência de ressonância da estrutura.

O número adimensional conhecido com número de Strouhal mostrado na equação (2.8) é função do número de Reynolds.

$$St(Re) = \frac{fs \cdot Dc}{U_A} \quad (2.8)$$

St : Numero de Strouhal

fs : Frequência do zunido

Dc : Dimensão característica do corpo (diâmetro)

U_A : Velocidade do fluido

A Figura 2.9, mostra a variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para cilindros circulares. Uma primeira aproximação para o caso de cilindros circulares, o número de Strouhal é considerado como constante, $St=0,2$.

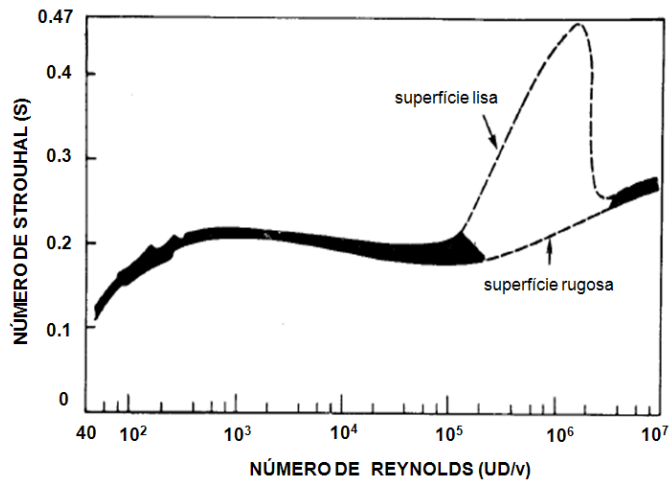


Figura 2.9 - Relação entre o número de Strouhal e Reynolds para escoamento sobre cilindro.
Fonte: Autor “adaptado de” Blevins, 1990

A geometria é o parâmetro mais importante na determinação das forças do escoamento na estrutura. A razão de esbeltez é definida pela equação (2.9):

$$\frac{l}{D} = \frac{\text{comprimento}}{\text{largura}} = \text{razão de esbeltez} \quad (2.9)$$

Geralmente as especificações de geometria incluem também a razão de comprimento na terceira dimensão pela largura, conhecida como relação de aspecto, e a taxa de rugosidade superficial pela largura. À medida que o corpo vibra, este traça o caminho como mostrado na Figura 2.10, (Blevins, 1990). A relação entre a velocidade de escoamento do fluido com a frequência de vibração da estrutura define o passo de um ciclo ou período U_A/f . Segundo Blevins (1990), tanto a amplitude de vibração como com o período, podem ser relacionados com a largura do objeto imerso no escoamento.

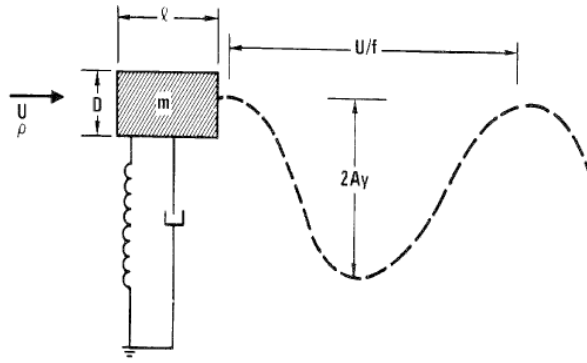


Figura 2.10 – Interpretação do modelo bi-dimensional massa-mola para a velocidade reduzida e da amplitude adimensional
 Fonte: Blevins, 1990.

A força de sustentação que varia harmonicamente é dada pela equação (2.10), onde “ c ” é a uma constante (~ 1 para cilindros), “ A ” é a área projetada do corpo perpendicular a velocidade do fluido, “ ω ” é a frequência circular, “ t ” é o tempo e “ ρ ” é a densidade do ar.

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot \sin(\omega t) \quad (2.10)$$

2.1.3 Outras fontes de excitação do espelho retrovisor

O Pneu também é uma fonte de excitação de entrada na carroceria do veículo e afeta indiretamente o comportamento dinâmico dos espelhos retrovisores. As imperfeições oriundas do processo de manufatura das rodas, pneus, freios e outros componentes do sistema de rodas do veículo podem gerar desbalanceamento de massa, variações dimensionais e variações de rigidez. A deformidade gera forças e momentos atuantes no eixo do veículo, funcionando como fontes de excitação. Eixos de transmissão tipo “cardan” também são fontes de excitação para a carroceria do veículo, tendo como as principais fontes geradoras de vibração a assimetria de rotação, a descentralização de flanges, empenamentos, liberdade de movimento e deflexão do eixo.

O motor como fonte primária de energia de um veículo automotor, fornece torque às linhas de transmissão de força e rotação, sendo mais uma fonte de excitação da carroceria. Quando bem balanceada na carroceria, a massa do motor pode ajudar a controlar a frequência natural do veículo, mesmo sendo uma das fontes de excitação, Gillespie (1992).

Esse trabalho não aprofundará os estudos nos efeitos e imperfeições do sistema de rodagem do veículo, bem como as excitações provenientes do sistema motor e de transmissão do veículo. Outros experimentos realizados na indústria sugerem que existem outras fontes de excitação de vibração atuando nos espelhos retrovisores. Alterações na amplitude de deslocamento da lente do retrovisor já foram encontradas quando o sistema de refrigeração do motor entrava em funcionamento, quando o compressor do sistema de ar condicionado era ligado e quando os alto-falantes das portas emitam determinados tipos de som e músicas. Existem diversas outras fontes de excitação atuando na carroceria e nos espelhos retrovisores, e dada a diferente complexidade de projeto, diferentes interações de materiais e componentes do veículo essas fontes não serão estudadas nesta dissertação.

2.2 Propriedades de resposta do veículo às excitações da pista de rolagem

O comportamento dinâmico do espelho retrovisor depende das excitações que a carroceria do veículo sofre, pode ser também considerado como um sistema de múltiplas entradas entre elas: a pista, o pneu, o motor, o sistema de transmissão, o sistema de ar condicionado e o sistema de som entre outras.

O veículo é considerado um sistema dinâmico e sua suspensão é responsável por transmitir as entradas da pista de rolagem para a carroceria. A massa não suspensa é toda a massa da suspensão, roda, pneu, amortecedores e eixos, responsável pela transmissão das forças de excitação de entrada da carroceria. A massa suspensa é toda a carroceria e seus componentes agregados. O comportamento dinâmico de um veículo pode ser caracterizado quase que totalmente considerando-se as relações de entrada e saída cuja razão entre elas representa o ganho do sistema dinâmico e é conhecida como transmissibilidade Gillespie (1992, p.147). A transmissibilidade é uma razão adimensional da amplitude de resposta para a amplitude de excitação, podendo ser uma relação de forças, deslocamentos, velocidades ou acelerações.

A determinação ou escolha de um modelo matemático que represente o comportamento dinâmico da suspensão é fundamental na análise e interpretação das vibrações da carroceria e do espelho retrovisor. Os modelos de suspensão automotiva mais usados são os de um quarto de carro, meio carro e carro completo. Cada modelo assume suas simplificações e permite com certa facilidade a análise do comportamento dinâmico da suspensão que é o primeiro sistema responsável por isolar a carroceria da rugosidade da pista. A Figura 2.11 (a) e (b), representa o modelo básico simplificado de um quarto de carro e o diagrama de blocos com os deslocamentos e forças presentes no sistema Gillespie, (1992, p.147).

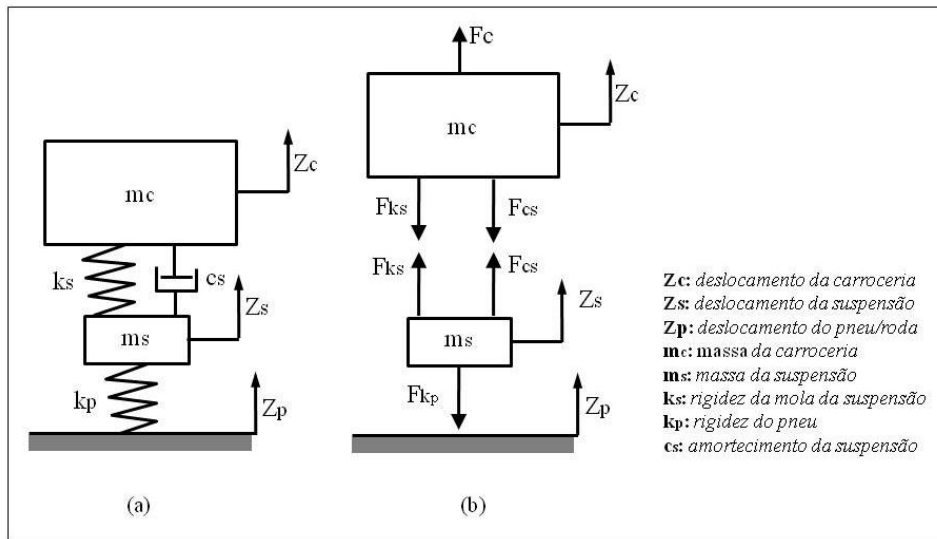


Figura 2.11 – (a) Modelo de um quarto de carro, (b) Diagrama de blocos do modelo de um quarto de carro
Fonte: Autor “adaptado de” Gillespie (1992).

O modelo usado neste trabalho desconsidera os efeitos do amortecimento por histerese presente pneu, por isso, não se observam forças de amortecimento presentes entre o solo e a suspensão. Nos modelos dinâmicos onde o amortecimento do pneu é desprezado, é comum o uso da rigidez equivalente da associação de molas pneu-suspensão, estabelecendo a rigidez efetiva da suspensão, equação (2.11), que é também conhecida pelo termo em inglês “ride rate”.

$$RR = \frac{k_s k_p}{k_s + k_p} \quad (2.11)$$

RR: rigidez equivalente

k_s: Rigidez da suspensão

k_p: Rigidez do pneu

Através da rigidez efetiva suspensão calcula-se a frequência natural não amortecida do sistema de suspensão equação (2.12).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{RR}{m_c}} \quad (2.12)$$

ω_n : frequência natural não amortecida

m_c : massa da carroceria

Como os veículos apresentam amortecedores na suspensão, pode-se calcular a frequência natural amortecida do sistema pela equação (2.13).

$$\omega_a = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta_s^2} \quad (2.13)$$

$$\zeta_s = \frac{C_s}{\sqrt{4k_s m_c}} \quad (2.14)$$

ω_a : frequência natural amortecida em rad/s

ζ_s : Razão de amortecimento (veículos modernos entre 0.2 e 0.4)

C_s : Coeficiente de amortecimento da suspensão

O valor da frequência natural amortecida é muito parecido com o valor da frequência não amortecida, ou seja, em veículos com razão de amortecimento de 0,2 a frequência natural amortecida aproxima-se de 98% da frequência amortecida e 92% para veículos com razão de amortecimento de 0,4. Esta aproximação permite o uso da frequência natural não amortecida na caracterização do veículo. É muito comum o calcular-se a frequência natural de um veículo através da medição de massa e deflexão estática da suspensão. Essa frequência também pode ser calculada com o auxílio do modelo de massa-mola de meio ou um quarto de carro, aplicando-se a segunda lei de Newton para as forças do sistema. Usando as equações diferenciais do movimento, podemos examinar as vibrações produzidas na massa suspensa como resultado das entradas da rugosidade na pista, forças radiais vindas da não uniformidade das rodas e pneus ou outras forças verticais aplicadas diretamente na massa suspensa vindo de outras fontes internas.

As propriedades de resposta também podem ser expressas, examinando-se o ganho em resposta como uma função da frequência. Observa-se na Figura 2.12, adaptada do Gillespie (1992), que a resposta em ganho da massa suspensa de um veículo pode ser uma relação de aceleração, velocidade ou deslocamento com relação ao equivalente de entrada na pista.

Em frequências muito baixas o ganho da massa suspensa é unitário, observa-se também que o ganho na massa suspensa é muito maior devido a rugosidade da pista, pneu e roda do que devido a fontes de excitação na própria carroceria. Os veículos de passeio são projetados para que a frequência natural da massa suspensa seja aproximadamente 1 Hz. Para uma frequência de entrada de pista na ordem de 1 Hz, a massa suspensa ressona sobre a suspensão e consequentemente o ganho aumenta para valores entre 1,5 e 3. A razão de amplitude na ressonância é muito sensível ao nível de amortecimento e a faixa para veículos de passeio fica entre 1,5 e 3. Acima de 1 Hz entre 10 e 12 Hz, a massa não suspensa começa a ressonar, adicionando uma pequena elevação na curva nessa faixa de frequência. O ganho é zero para frequência nula, porque a força no eixo é absorvida pela rigidez do pneu e não se produz aceleração na massa suspensa. O ganho aumenta com a frequência natural passando pela frequência natural da massa suspensa, aproximadamente 1 Hz, e continua a subir até atingir a frequência natural das rodas e pneus na faixa de 10 a 12 Hz quando começa então a diminuir. Em altas frequências o ganho é praticamente unitário porque os deslocamentos se tornam tão pequenos que as forças da suspensão não mudam e são inteiramente dissipadas como aceleração de massa suspensa.

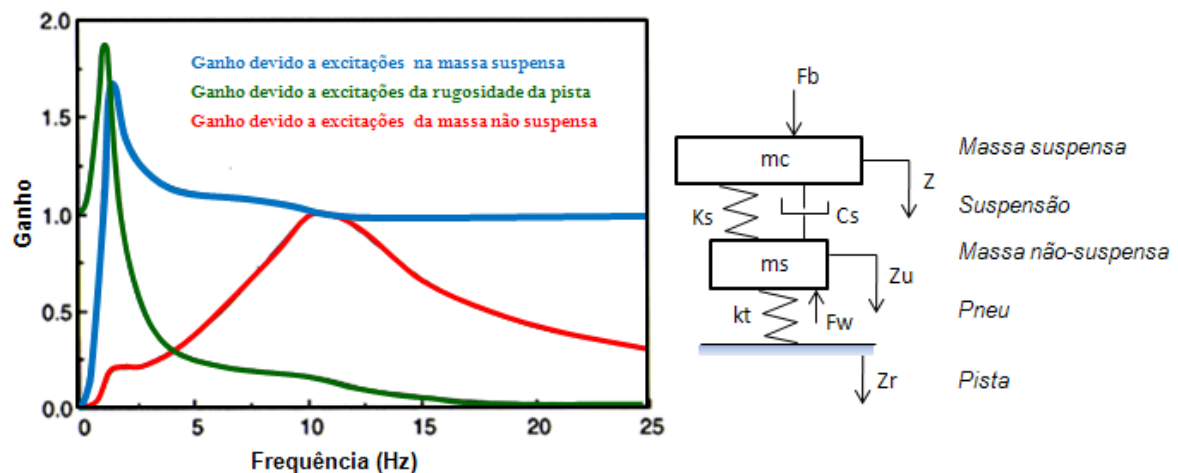


Figura 2.12 – Ganho em resposta do modelo de um quarto de carro para excitações na carroceria, pista, pneu e roda
 Fonte: Autor “adaptado de” do Gillespie (1992).

A rigidez da suspensão predomina na determinação do “ride rate”, e consequentemente na frequência natural do sistema em modo de “bounce”. Como a

aceleração de entrada na massa suspensa aumenta em amplitude com o aumento da frequência, um bom isolamento é atingido mantendo-se a frequência natural o mais baixo possível com a redução da rigidez da suspensão apresentada na equação (2.12), afastando-se a ressonância da massa suspensa do aumento de amplitude da pista.

O amortecimento do sistema de suspensão automotiva é feito em geral com amortecedores hidráulicos, responsáveis pela dissipação da energia. O ganho em resposta da carroceria depende do nível de amortecimento de cada tipo de veículo e aplicação, mas para os veículos de passeio com frequência natural entre 1 e 2 Hz, 40% de amortecimento resulta em um bom compromisso com o “ride” Gillespie (1992, p.156).

A frequência de ressonância da massa não suspensa fica ao redor de 10 Hz, sendo muito maior do que a frequência da massa suspensa. Como o sistema da massa não suspensa é formado por componentes mecânicos com interface dinâmica, os atritos aumentam a taxa de rigidez para baixas movimentações de ride alterando a frequência para 12 – 15 Hz, Gillespie (1992, p.165). Em veículos com suspensão mais pesada, a frequência de ressonância da massa não suspensa diminui, aumentando a transmissibilidade, já em veículos com suspensão mais leve, a frequência de ressonância da massa não suspensa aumenta, porém reduz-se significativamente o ganho, melhorando o desempenho de “ride”.

A maioria das suspensões automotivas são sistemas não lineares e apresentam forças de atrito nos mecanismos, ou seja, ao invés de uma simples relação linear entre força e deslocamento, a suspensão exhibe histerese fazendo com que os movimentos de “ride” sejam tipicamente pequenos em amplitude, envolvendo apenas alguns milímetros do curso da suspensão, fazendo com que a rigidez efetiva seja maior com pequenas deflexões do sistema. Em pistas de rolagem lisas as deflexões da suspensão são menores, resultando em alta rigidez efetiva e pequeno amortecimento enquanto que em pistas mais rugosas, a suspensão sofre maiores deflexões, produzindo uma menor rigidez efetiva e maior amortecimento. O modelo de um quarto de carro não representa totalmente os movimentos de corpo rígido que um automóvel pode sofrer. As excitações de entrada devido à rugosidade da pista de rolagem são diferentes nos eixos dianteiro e traseiro. Quando o veículo se desloca em linha reta, as rodas traseiras seguem a mesma trajetória das rodas dianteiras, logo serão excitadas pelo mesmo perfil de elevação da pista com um atraso de tempo igual à distância entre eixos, dividido pela velocidade do veículo. Esse atraso age como um filtro para as excitações de amplitude de *bounce* e *pitch* e também é chamado de filtro de entre eixos. O movimento de *bounce* pode ser excitado pelo comprimento de onda da pista igual à distância entre eixos do veículo. O

mesmo vale para comprimentos de ondas maiores ou muito maiores que a distância entre eixos e também para menores comprimentos de ondas desde que seu múltiplo inteiro seja igual ao comprimento entre eixos. O movimento de *pitch* é excitado para comprimento de onda maior do que duas vezes a distância entre eixos ou para qualquer outro comprimento de ondas menor que tenha comprimento igual ao dobro da distância entre eixos dividido por um número ímpar inteiro. A Figura 2.13, mostra bem o mecanismo do filtro de entre eixos.

A maioria dos veículos apresenta uma serie de movimentos das direções verticais e rotacionais combinados, por isso não é observado o modo de vibração puramente de *bounce* ou de *pitch*. O comportamento em termos de frequência natural e centro de rotação, pode ser interpretado analiticamente pelas equações diferenciais do movimento.

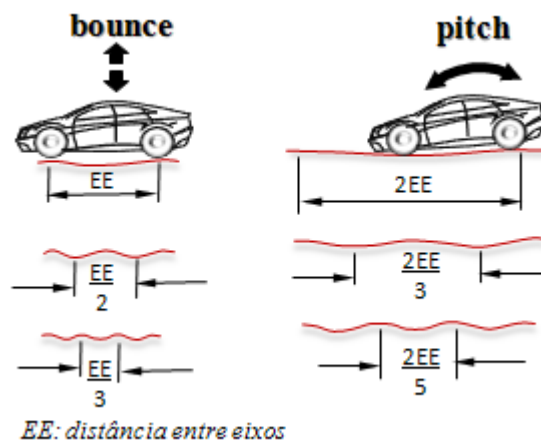


Figura 2.13 – Filtro de entre – eixos no movimento de *bounce* e *pitch*
 Fonte: Autor “adaptado de” Gillespie (1992, p. 169)

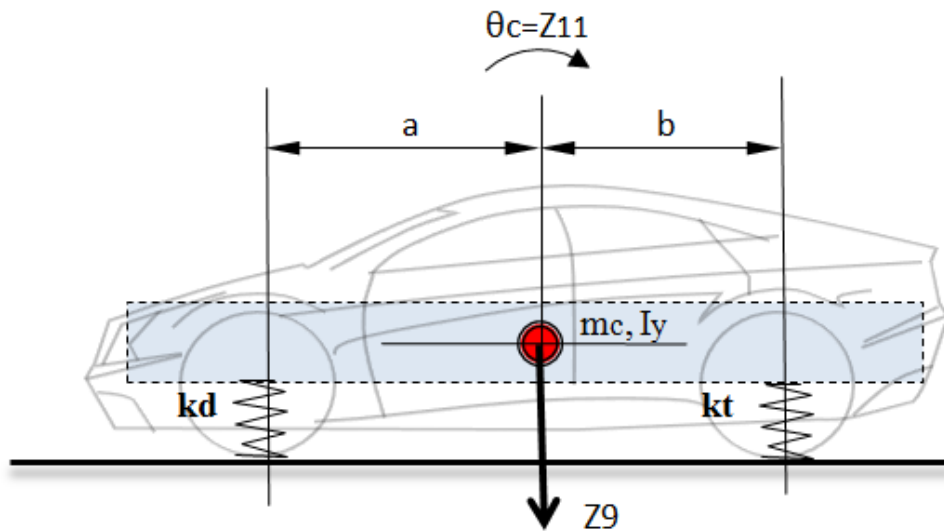


Figura 2.14 – Plano do movimento de *pitch* para um automóvel
 Fonte: Autor “adaptado de” Gillespie (1992, p. 172)

$$\alpha = \frac{(k_d + k_t)}{m_c} \quad (2.15)$$

$$\beta = \frac{(k_t c - k_d b)}{m_c} \quad (2.16)$$

$$\gamma = \frac{(k_d b^2 + k_t c^2)}{m_c k^2} \quad (2.17)$$

$$k = \sqrt{\frac{I_y}{m_c}} \quad (2.18)$$

α, β, γ : Coeficientes de cálculo

k_d : Ride rate da suspensão dianteira

k_t : Ride rate da suspensão traseira

a : Distância do eixo dianteiro ao CG do veículo

b : Distância do eixo traseiro ao CG do veículo

I_y : Momento de inércia de pitch da carroceria

k : Raio de giração da carroceria

θ_c : Rotação de pitch da carroceria

m_c : Massa da carroceria

As equações diferenciais para os movimentos de *bounce* “ Z ” e *pitch* “ θ ” de um veículo de passeio podem ser escritas como:

$$\dot{Z}_{10} + \alpha Z_9 + \beta \theta_c = 0 \quad (2.19)$$

$$\ddot{\theta}_c + \beta \frac{Z_9}{k^2} + \gamma \theta_c = 0 \quad (2.20)$$

$$\ddot{\theta}_c = \dot{Z}_{12} \quad \rightarrow \quad \dot{Z}_{12} + \beta \frac{Z_9}{k^2} + \gamma \theta_c = 0 \quad (2.21)$$

Z_9 : Deslocamento vertical do CG da carroceria

Z_{10} : Velocidade vertical do CG da carroceria

$\dot{Z}_{10}$: Aceleração vertical do CG da carroceria

Z_{11} : Rotação de pitch da carroceria

Z_{12} : Velocidade angular de pitch da carroceria

$\dot{Z}_{12}$: Aceleração angular de pitch da carroceria

O coeficiente β é chamado de coeficiente de acoplamento, e quando seu valor é nulo não há acoplamento, ou seja, os movimentos de *bounce* e *pitch* são independentes. Sem o amortecimento, a solução para as equações diferenciais é na forma senoidal, equações (2.22) e (2.23).

$$Z_9 = Z_9 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.22)$$

$$\theta_c = \theta_c \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.23)$$

Substituindo as equações (2.22) e (2.23) na equação (2.19) obtém-se:

$$-Z_9\omega^2\text{sen}(\omega t) + \alpha Z_9.\text{sen}(\omega t) + \beta\theta_c.\text{sen}(\omega t) = 0 \quad (2.24)$$

$$(\alpha - \omega^2)Z_9 + \beta\theta_c = 0 \quad (2.25)$$

ou ,

$$\frac{Z_9}{\theta_c} = -\frac{\beta}{(\alpha - \omega^2)} \quad (2.26)$$

A mesma solução pode ser aplicada sobre a equação (2.20):

$$\frac{Z_9}{\theta_c} = -\frac{k^2(\gamma - \omega^2)}{\beta} \quad (2.27)$$

As equações (2.26) e (2.27) definem as condições em que os movimentos podem ocorrer. A restrição é que a razão de amplitudes em *bounce* e *pitch* devem satisfazer as equações (2.26) e (2.27). Calculam-se os dois modos de vibração *bounce* e *pitch* igualando-se as equações (2.26) e (2.27):

$$(\alpha - \omega^2)(\gamma - \omega^2) = \beta \left(\frac{\beta}{k^2} \right) \quad (2.28)$$

$$\omega^4 - (\alpha + \gamma)\omega^2 + \alpha\gamma - \frac{\beta^2}{k^2} = 0 \quad (2.29)$$

As raízes da equação (2.29) representam as frequências dos modos de vibrar:

$$\omega_1 = \sqrt{\left(\frac{(\alpha + \gamma)}{2}\right) + \left(\sqrt{\frac{(\alpha - \gamma)^2}{4} + \frac{\beta^2}{k^2}}\right)} \quad (2.30)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\left(\frac{(\alpha + \gamma)}{2}\right) - \left(\sqrt{\frac{(\alpha - \gamma)^2}{4} + \frac{\beta^2}{k^2}}\right)} \quad (2.31)$$

O centro de oscilação pode ser encontrado com as relações de amplitude das equações (2.26) e (2.27) com as duas frequências ω_1 e ω_2 das equações (2.30) e (2.31). Quando a relação Z/θ é positiva, ambos Z e θ podem ser positivos ou negativos, assim, o centro de oscilação estará à frente do CG a uma distância de $x=Z/\theta$. Quando a relação for negativa, o centro de oscilação estará atrás do CG a uma distância $x=Z/\theta$. Uma das distâncias será grande o suficiente para que o centro de oscilação caia fora da distância entre eixos, predominando o movimento de “*bounce*” e outra dentro da distância entre eixos, predominando o movimento “*pitch*”. A posição do centro de oscilação é dependente dos valores relativos de frequência natural das suspensões dianteira e traseira. Para frequências iguais, ocorre apenas movimento de “*bounce*” com centro no infinito e “*pitch*” com centro no CG. Com maior frequência na suspensão dianteira o movimento é combinado com o centro do “*bounce*” a frente do eixo frontal e o centro de “*pitch*” atrás do eixo traseiro. Com maior frequência na suspensão traseira, o centro de “*bounce*” fica atrás do eixo traseiro e o centro de “*pitch*” perto do eixo frontal, caracterizando a melhor condição para “*ride*”, pois os efeitos do movimento de “*bounce*” geram menos incomodo aos ocupantes do veículo, Gillespie (1992, p.175). A Figura 2.15, mostra o local do centro de oscilação.

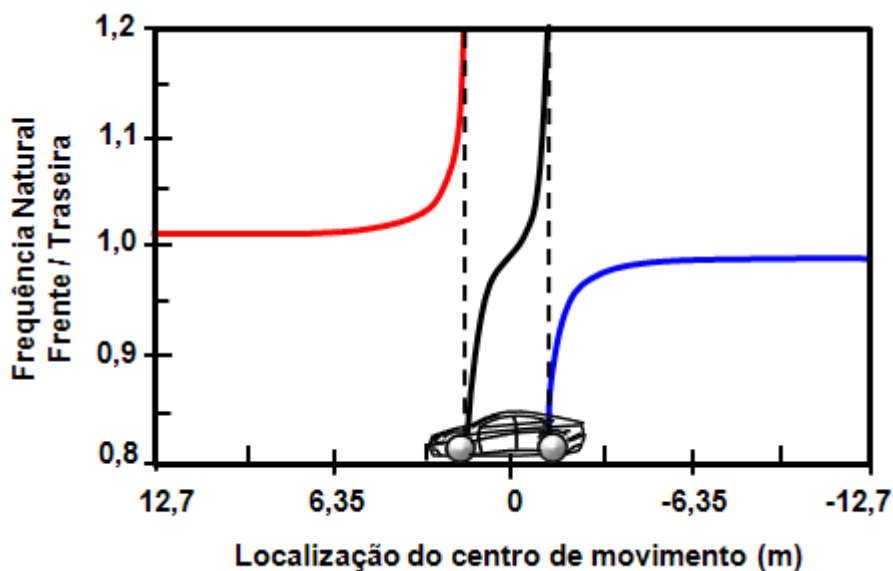


Figura 2.15 – Efeitos da razão de frequência natural na posição dos centros de oscilações
 Fonte: Autor “adaptado de” Gillespie (1992, p.176)

3 ESPELHOS

3.1 Teoria da reflexão de imagens

Sendo o espelho retrovisor automotivo o elemento transmissor da vibração óptica para o motorista, torna-se necessário abordar a teoria da reflexão de imagens em espelhos.

Na indústria automobilística, os espelhos são comumente conhecidos como planos e convexos. Nos espelhos planos, a imagem refletida de um objeto tem as dimensões reais do objeto real, ou seja, pode-se dizer que a imagem refletida é em verdadeira grandeza. No caso dos espelhos convexos, a imagem refletida de um objeto tem dimensões menores do que as do objeto real, sendo assim, tamanho, forma e distância refletida são distorcidos. Os espelhos côncavos não são usados como retrovisores na indústria automobilística, por isso, apenas algumas relações da sua geometria óptica serão abordados nesta dissertação.

A reflexão é o retorno da luz ao meio em que estava se propagando quando atinge um objeto ou obstáculo. A reflexão regular ocorre quando um feixe de raios paralelos incide sobre uma superfície plana e regular, resultando em raios refletidos paralelos. Quando a superfície é irregular, a luz é refletida em todas as direções do espaço, recebendo o nome de reflexão difusa. Esta última é responsável pela nossa percepção dos objetos que nos cercam, pois a maioria dos objetos do nosso ambiente reflete difusamente a luz.

Existem duas leis principais que regem os efeitos da reflexão. A primeira lei diz que o raio incidente (RI), o raio refletido (RR) e a normal (N) são coplanares. A segunda lei diz que o ângulo de reflexão ($\hat{r}$) é igual ao ângulo de incidência ($\hat{i}$).

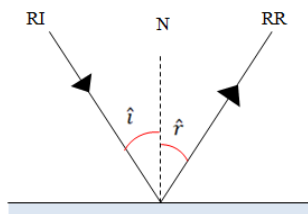


Figura 3.1 – Incidência e reflexão de um raio de luz sobre um espelho plano.
Fonte: Autor

3.1.1 Espelhos planos

Uma superfície plana regular que reflete a luz intensamente é denominada de espelho plano. Um observador, olhando para um espelho, terá a impressão que a luz por ele recebida tem origem em um ponto P' situado nos prolongamentos dos raios refletido e “dentro” do espelho. O ponto P' , de onde parecem provir os raios refletidos que o observador recebe é denominado “ponto imagem virtual”. O ponto P de onde realmente vieram os raios luminosos, é chamado “ponto objeto real”. A distância (d) de um objeto real até a superfície refletora é igual à distância (d') do objeto virtual até a superfície refletora. A mesma relação vale para objetos extensos que tem forma e tamanho, cada forma e dimensão do objeto virtual é igual aos do objeto real. O deslocamento de um objeto real até a superfície refletora é igual ao deslocamento virtual do objeto virtual à superfície refletora. Já o deslocamento de uma imagem refletida em relação ao objeto real é o dobro da distância deslocada entre o objeto real e o espelho. A mesma relação vale para velocidade, ou seja, a velocidade da imagem refletida em relação ao objeto real é o dobro da velocidade do objeto com relação ao espelho. Essas relações são muito importantes para o motorista, pois a interpretação da distância e da velocidade de aproximação do veículo que vem pela retaguarda está diretamente relacionada com a sensação de segurança na realização de manobras.

3.1.2 Espelhos esféricos convexos

As leis da reflexão valem para os espelhos esféricos, no entanto, existem diferenças geométricas dos ângulos de incidência e reflexão. Os ângulos de reflexão e de incidência são medidos a partir da normal à superfície.

Como a superfície é esférica, a normal (N) é uma reta passando por um ponto P na superfície do espelho pelo centro da esfera (C) da qual a calota se originou. A regra vale para qualquer ponto sobre a esfera. A Figura 3.2 a seguir mostra a normal (N) para duas situações distintas (pontos B e P), e mostra que o ângulo de incidência (θ_i) e reflexão (θ_r) segue a segunda lei da reflexão citada anteriormente.

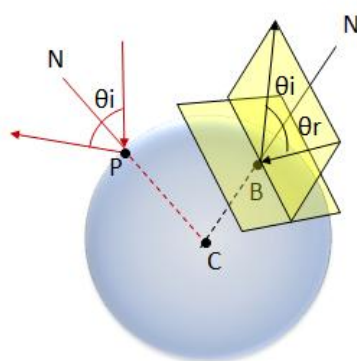


Figura 3.2 – Exemplo geométrico da reflexão de raios em um espelho convexo.
Fonte: Autor

Se um raio ou seu prolongamento passa pelo centro de curvatura (C), o ângulo de incidência (θ_i) é nulo, portanto, o ângulo de reflexão (θ_r) também será nulo.

Para analisarmos o processo da formação da imagem de um objeto em frente a um espelho devemos recorrer a algumas grandezas de natureza geométrica associadas a um espelho esférico, como mostra a figura, e conforme as seguintes definições: o centro de curvatura (C), é o centro da esfera que deu origem à calota; o raio da esfera (R) é a distância do centro da esfera (C) até qualquer ponto sobre a mesma; o vértice do espelho (V) é o ponto equidistante de qualquer ponto sobre as extremidades da calota (o seu polo); o eixo principal (e.p.) é aquele que passa pelo vértice do espelho e pelo seu centro de curvatura; o eixo secundário é qualquer reta paralela ao eixo principal; o plano frontal é qualquer plano perpendicular ao eixo principal; o plano meridiano é qualquer plano que corta a calota passando pelo eixo principal (plano do papel é um plano meridiano); a abertura do espelho (α) é o maior ângulo sobre a calota medido a partir do centro da curvatura (o ângulo associado às extremidades da calota); o foco principal (F) é o ponto do eixo principal pelo qual passam os raios refletidos (ou seus prolongamentos) quando no espelho incidem raios luminosos paralelos ao eixo principal, nas extremidades do vértice, se situa a meia distância entre o vértice (V) e o centro de curvatura (C); a distância focal é a distância que separa o foco principal (F) do vértice (V).

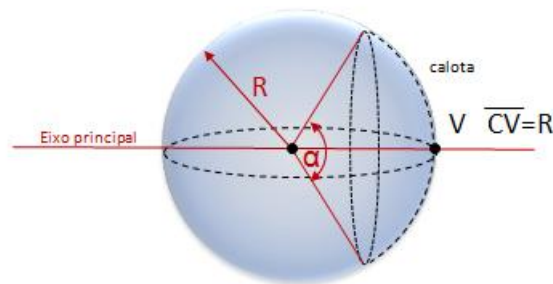


Figura 3.3 – Geometria de um espelho esférico
Fonte: Autor

Na análise da localização da imagem de um objeto qualquer o foco de um espelho desempenha um papel importante.

Um sistema óptico, o qual consegue conjugar a um ponto objeto, um único ponto como imagem é dito estigmático. Os espelhos esféricos só são estigmáticos para os raios que incidem próximos do seu vértice V e com uma pequena inclinação em relação ao eixo principal (condições de Gauss). Um espelho com essas propriedades é conhecido como espelho de Gauss (em homenagem a quem fez essa descoberta). Um espelho que não satisfaz as condições de Gauss (incidência próxima do vértice e pequena inclinação em relação ao eixo principal) é dito astigmático. Um espelho astigmático conjuga a um ponto uma imagem parecendo uma mancha (um borrão). Um espelho de Gauss deve ter, necessariamente, uma abertura muito pequena ($\alpha \leq 10^\circ$) para que a imagem não pareça “borrada”.

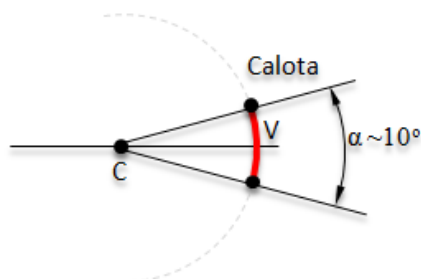


Figura 3.4 – Espelho estigmático ou de Gauss
Fonte: Autor

Para os espelhos côncavos de Gauss pode ser verificado que todos os raios luminosos que incidirem ao longo de uma direção paralela ao eixo principal passam por (ou convergem para) o foco principal do espelho (F) (ou simplesmente foco do espelho), Figura 3.5.

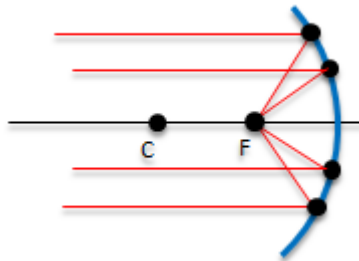


Figura 3.5 – Representação geométrica da reflexão de raios luminosos no foco de um espelho côncavo
Fonte: Autor

Analogamente para os espelhos convexos, a continuação dos raios incidentes no espelho converge para o foco (F), como se esses se originassem neste ponto, Figura 3.6.

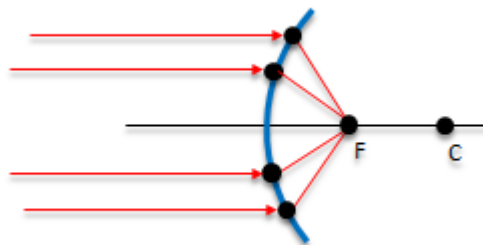


Figura 3.6 – Representação geométrica da reflexão de raios luminosos no foco de um espelho côncavo
Fonte: Autor

A determinação da imagem refletida em um espelho convexo é feita com o conhecimento dos conceitos de incidência e reflexão de ao menos dois raios de luz emitidos ou refletidos pelo objeto real. A combinação dos raios escolhidos para a determinação da imagem pode gerar erros geométricos que comprometam o resultado da análise, por isso, é recomendável que sejam usados: o raio incidente (RI) partindo de um ponto P qualquer do objeto até o centro da esfera (C) e o raio incidente (RI) partindo do mesmo ponto P até o vértice (V) da esfera, Figura 3.7, a solução geométrica resultante desses dois raios se aproximará bastante da solução pelo método analítico.

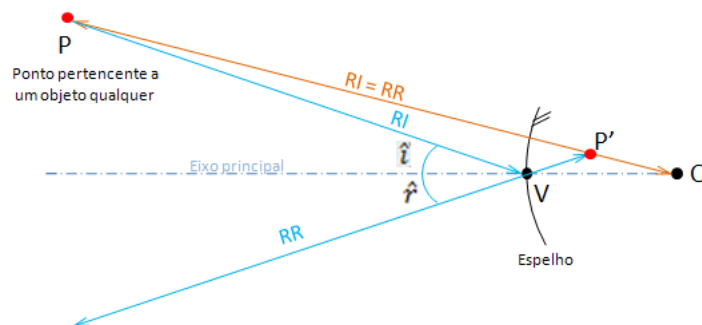


Figura 3.7 – Construção geométrica de imagem refletida em espelho convexo.
Fonte: Autor

3.1.3 Método Analítico

O método analítico permite determinar com precisão a localização, o tamanho da imagem, bem como determinar se houve ou não a inversão da mesma. O método é particularmente útil no caso de objetos extensos.

O que é essencial no método analítico é o uso de um sistema de coordenadas cartesianas. Trata-se de um referencial com origem no vértice do espelho esférico. Tomamos os eixos x e y adotando-se a seguinte convenção.

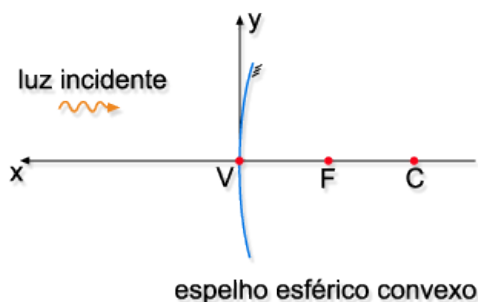


Figura 3.8 – Coordenadas cartesianas de referencia usadas no método analítico
Fonte: Autor

O eixo x (abscissa) é coincidente do eixo principal.

O eixo y (ordenada) é perpendicular ao eixo principal no vértice do espelho.

Um sistema de referência para o qual se adota a convenção para espelhos esféricos acima é conhecido como referencial de Gauss.

Num referencial de Gauss, cada ponto do objeto ou da imagem corresponde um par de coordenadas (x, y). Um ponto P do objeto tem coordenadas (xp, yp).

Atribuí-se os símbolos (p) e (p') para as abscissas do objeto e da imagem, (f) ao valor da abscissa associada ao foco, (C) o valor da coordenada abscissa associada ao centro de curvatura, (o) e (i) para as ordenadas do objeto e da imagem.

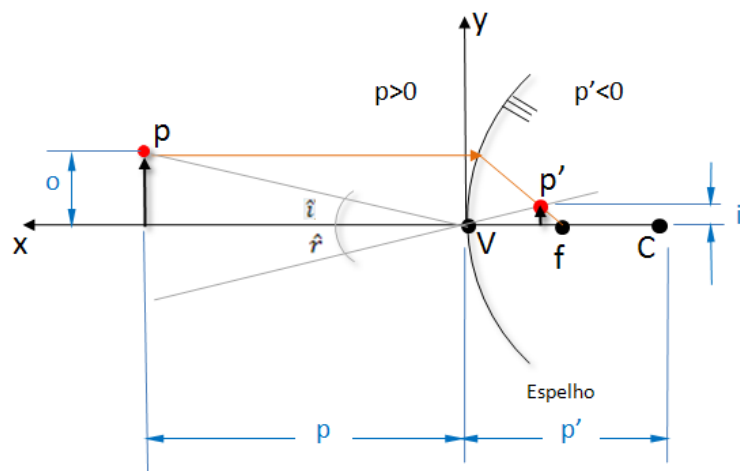


Figura 3.9 – Projeção da imagem refletida em espelho convexo e referencia de Gauss.
Fonte:Autor

Todo referencial de Gauss, Tabela 3-1, é tal que objetos em frente ao espelho têm para quaisquer pontos sobre o mesmo, abscissa positivas e os objetos atrás do espelho têm abscissa negativas.

Tabela 3-1 – Tabela do referencial de Gauss.

$p > 0$	Objetos reais	$p < 0$	Objetos virtuais
$p' > 0$	Imagens reais	$p' < 0$	Imagens virtuais
$f > 0$	Espelhos côncavos	$f < 0$	Espelhos convexos
$\frac{i}{o} > 0$	Se a imagem não for invertida		
$\frac{i}{o} < 0$	Se a imagem for invertida		

Denomina-se aumento linear transversal a relação entre a ordenada de um ponto da imagem com a ordenada do ponto correspondente no objeto, (3.1). Essa mesma relação pode ser encontrada com os valores de abscissa da imagem e objeto. Por semelhança de triângulos, chega-se também à relação da equação (3.2).

$$A = \frac{i}{o} \quad (3.1)$$

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \quad (3.2)$$

A equação (3.3), também chamada de equação de Gauss ou equação fundamental dos espelhos esféricos, pode ser encontrada com o uso das relações matemáticas que estabelecem a semelhança de triângulos. Dadas a distância focal e posição do objeto é possível determinar, analiticamente, a posição da imagem. Sendo f , p e p' as respectivas abscissas, pode-se mostrar que a relação entre essas três grandezas é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (3.3)$$

Portanto, uma vez conhecidas duas abscissas, a terceira fica inteiramente determinada.

3.2 Espelho Retrovisor Automotivo

Os espelhos retrovisores automotivos são os componentes responsáveis por prover visão da retaguarda ao condutor do veículo. Na maioria dos mercados do mundo, existem dois espelhos retrovisores externos por veículo, um localizado do lado do condutor e outro no lado do passageiro. Geralmente são posicionados próximo a coluna A do veículo (vide pagina 86 desse trabalho), dentro do campo de visão confortável ao condutor. A lente refletora do lado do passageiro é convexa, com raio mínimo determinado por legislação de 1200mm (CONTRAN 226, Fevereiro de 2010). A lente refletora do lado do motorista, pode ser plana (legislação norte americana) ou convexa (legislação baseada na Comunidade Européia) com raio mínimo de 1200mm. Além da função primária de prover retrovisão, outras funções foram atribuídas aos espelhos durante os anos de desenvolvimento da indústria automobilística, dentre as quais pode-se citar: o desempenho aerodinâmico, design e aparência, basculamento do Corpo para proteção dos pedestres, capacidade de regulação das lente refletoras provendo campo de visão adaptativo aos diferentes tipos de condutores.

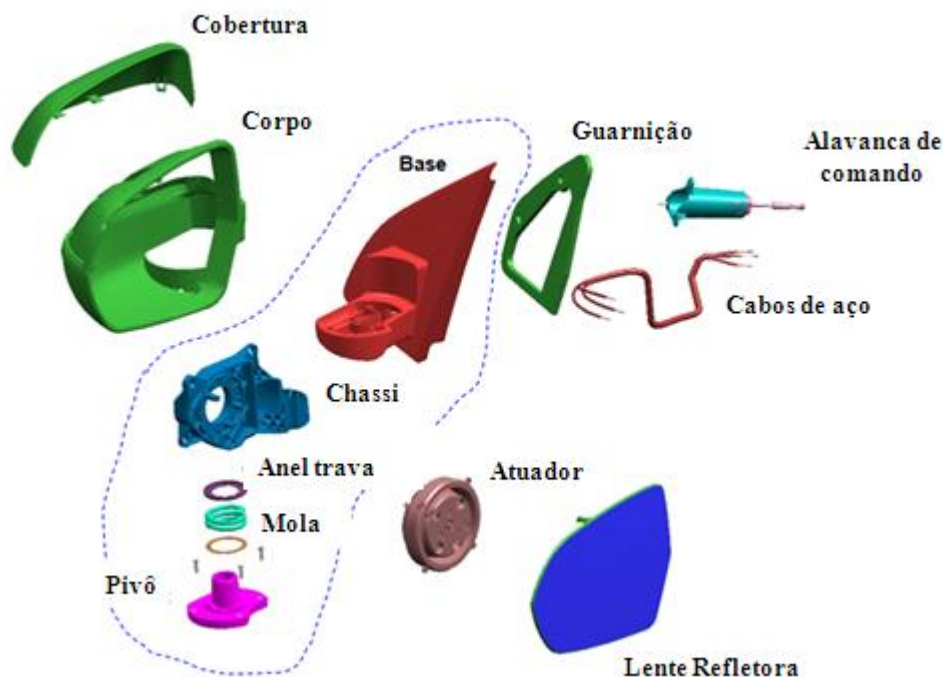


Figura 3.10 - Representação dos componentes de um espelho retrovisor automotivo em vista explodida.
Fonte: GM do Brasil, 2007

Existem normas reguladoras específicas para assegurar o desempenho e construção dos espelhos retrovisores. Dentre as principais estão a ECE R46 (Comunidade Européia), a FMVSS (Estados Unidos da América) e a CONTRAN 226 (Brasil), sendo essa última totalmente baseada na ECE R46. O item 1.1 do Anexo III da CONTRAN 226, requisita a estabilidade do espelho retrovisor quanto à vibração de forma a garantir que o condutor não interprete erroneamente a natureza da imagem observada.

Com o advento de novas tecnologias e o aperfeiçoamento das propriedades mecânicas dos polímeros, bem como a crescente redução dos preços da matéria prima devido ao aumento de demanda, os materiais metálicos vêm perdendo espaço no mercado automobilístico. A cerca de 50 anos, os espelhos retrovisores eram completamente construídos de ligas metálicas. Nos últimos 20 anos seus subsistemas e componentes metálicos foram substituídos por polímeros, restando apenas, os chamados componentes estruturais como a Base de fixação do espelho na porta e o Chassis estrutural do Corpo. Atualmente, apenas os espelhos retrovisores destinados aos chamados mercados de alto desempenho, como o mercado norte americano e europeu são desenvolvidos com ligas metálicas. Os espelhos retrovisores presentes nos atuais veículos espartanos (populares), vendidos nos mercados emergentes, são em sua grande maioria construídos com materiais poliméricos (por exemplo poliamida reforçada), provendo redução de massa, custo e investimento.

A vibração é um dos maiores problemas de qualidade reclamada nos espelhos retrovisores, por isso, a substituição das estruturas metálicas por polímeros, mantendo os mesmos níveis de desempenho, tem sido o grande desafio no desenvolvimento dos novos projetos.

4 O OLHO HUMANO

4.1 Fisiologia básica do olho humano

Como esta dissertação aborda a influência da vibração dos espelhos retrovisores na visão do motorista, considero que o mínimo de compreensão e conhecimento sobre a fisiologia do olho humano é necessária, por isso, as próximas páginas apresentarão algumas descrições fisiológicas relacionadas com o tema que foram adaptadas de Bruno e Carvalho (2008).

O olho humano tem forma aproximadamente esférica com volume aproximadamente de 6.5 cm³, com um diâmetro vertical de aproximadamente 23,48 mm e um diâmetro horizontal de 24,13 mm. Sua massa fica em torno de 7 a 8g o que lhe confere densidade específica maior que a da água, Ocupa um quinto da cavidade orbitária, apresenta distância antropométrica média dos eixos visuais é de cerca de 60mm Bruno e Carvalho (2008).

As diferentes estruturas responsáveis pelo funcionamento do sistema ocular, são subordinadas hierarquicamente à retina, onde se dá a transdução da energia eletromagnética de certos comprimentos de onda (luz) a sinais neurais, completada pelo processo inicial deles. A transmissão de tais informações ao sistema nervoso central é feita pelo nervo óptico que também pode ser considerado a extensão de elementos retinianos (axônios das células ganglionares).

Os sinais precisam ser reconhecidos mentalmente como representações de objetos físicos, por isso, é necessário que se forme uma imagem óptica desses objetos na retina, daí a necessidade de provimento de um sistema de refração, constituído por lentes: a córnea e o cristalino. Tendo este último a capacidade de alterar sua forma para ajustes focais do olho por um mecanismo acionado pelo corpo ciliar e um diafragma, a íris.

As estruturas internas do olho são avasculares parcial (retina) ou totalmente (córnea, cristalino). A nutrição delas é suprida por partes da úvea, uma estrutura subdividida em coróide (uma camada de vasos entremeados em novelos, situada externamente à retina e cobrindo-a em toa a sua extensão), corpo ciliar (que além da ação sobre o cristalino, produz o humor aquoso) e íris.

Humor aquoso, preenchendo a câmara anterior (entre a íris e a córnea) e a posterior (entre íris e cristalino), um transudado do corpo ciliar, e o corpo vítreo, ocupando o maior volume da parte interna do olho e transparentes, para também deixar a luz atravessá-los, dão

sustentação ao cristalino e à retina, mantendo-a bem apostada à coróide. A esclerótica, carapaça externa que modela o olho, completa o sistema de sustentação.

Ainda fazendo parte do olho, existem os elementos promotores de movimentação, os músculos oculares externos e seus envoltórios, as fácias e membranas intermusculares.

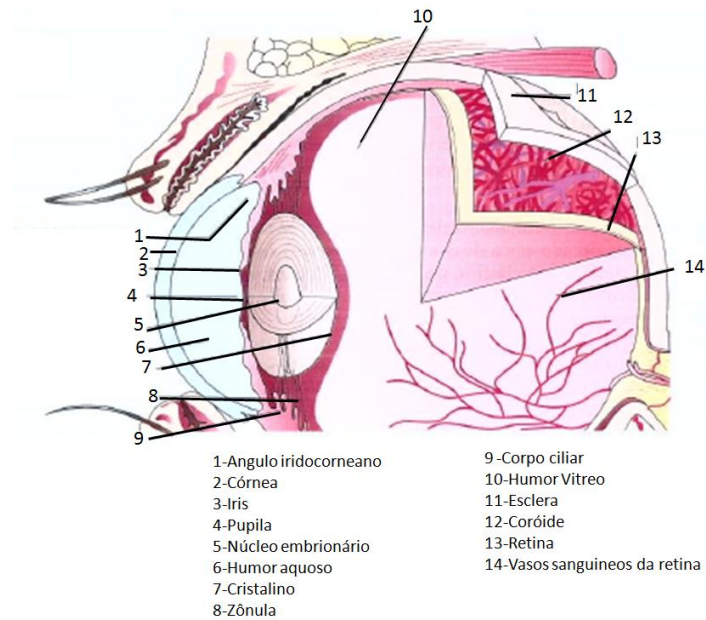


Figura 4.1 – Corte do olho humano, mostrando seus vários componentes ópticos
Fonte: Autor “adaptado de” Bruno;Carvalho, 2008

4.2 A Retina

Com nome derivado do latim *rete*, a retina é uma película bem fina (cerca de 0,09 mm na fóvea, seu centro topográfico”, a 0,56mm próximo ao disco óptico), transparente, mas de alta diversificação e complexidade, constituída por células de vários tipos e respectivas fibras, distribuídas em camadas, classicamente descritas em ordem, da parte mais profunda ou “externa” da retina, junto a coróide, a a parte mais “interna”, junto ao corpo vítreo. Na Figura 4.2, pode-se observar em corte transversal as várias camadas da retina (Bruno; Carvalho, 2008).

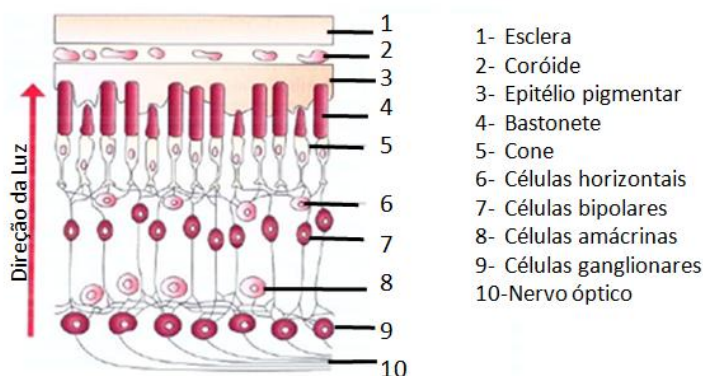


Figura 4.2 – As diferentes camadas da retina
Fonte: Autor “adaptado de” Bruno;Carvalho, 2008

Epitélio pigmentar ou pigmentado (ou *tapetum nigrum*): camada unicelular separada da coróide por uma lamina vítrea. Absorve o excesso de luz incidente sobre o olho, impedindo sua reflexão reverberada, causadora de deslumbramentos e, portanto, baixo rendimento visual. Age como uma barreira de resistência elétrica elevada (a membrana “R”) e lhe é atribuído o papel de filtro molecular seletivo, no intercâmbio de trocas da retina com o coróide, a qual se prende mais fortemente que a própria retina.

Camada de células foto receptoras (ou membrana de Jacob): essas células são as que iniciam o processo visual, absorvendo a luz (comprimentos de onda entre 380 e 760nm, aproximadamente) por meio de pigmentos próprios (iodopsina em cones, rodopsina em bastonetes), o que dá um desequilíbrio em seus potenciais elétricos de membrana, cuja propagação, como onda, é definida como um sinal neural. O fotorreceptor é portanto, o primeiro neurônio da cadeia nervosa da sensação visual. Na verdade , na descrição clássica

da microscopia da retina e que esta sendo seguida, essa camada corresponde apenas aos dentritos das células fotorreceptoras, ficando seus núcleos situados mais internamente.

4.3 Percepção visual e periférica

A visão é um dos 5 sentidos pelo qual o homem consegue perceber atributos geométricos como tamanho, forma e textura de objetos no ambiente ao seu redor. A percepção visual tem sido muito estudada na anatomia, fisiologia (Blohm; Crawford; 2007) e psicologia (Carruth; Robbins; Thomas; Moraes; Letherwood; Nebel, 2006), (Anderson; Matessa; Lebeire, 1997), porém, como um fenômeno anatômico, a visão humana trata da incidência de raios luminosos, de uma fonte qualquer, na retina, que contém células fotorreceptoras (cones e bastonetes). A porção do espaço onde os objetos são visíveis em um determinado momento da observação ocular em uma única direção é dado o nome de campo de visão.

A densidade das células fotorreceptoras é maior na fóvea (centro da retina) e varia na periferia, fato que gera diferenças na percepção visual, dependendo na direção do campo de visão. Desta forma, a região periférica da retina tem menor acuidade visual, e varia com a distância da fóvea resultando em uma sensibilidade de movimento significativa. Do ponto de vista topográfico, a retina é subdividida em uma zona central, com cerca de 5 a 6 mm de diâmetro (16.7° a 20°), avascular, onde predominam os cones, associada então com a função fotópica (alta capacidade resolutiva, visão cromática), e uma zona periférica, em que predominam os bastonetes, associada com a função escotópica (maior sensibilidade em baixas iluminações). A distribuição dos cones e bastonetes na retina pode ser vista na Figura 4.15. Mais periféricamente, mas sendo já conhecida como atrófica, sem sensibilidade à luz, desde a chamada ora serrata (cerca de 6mm à frente do equador ocular e a mais ou menos 6 a 8mm do limbo) até a borda da pupila, recobrando o corpo ciliar e a face posterior da íris, a pars ciliaris retinae e a pars iridica retinae. Essa parte rudimentar tem a mesma origem embrionária da retina (é, por isso, considerada como sua parte), embora também, frequentemente, seja admitida, por sua disposição anatômica, como estrato da úvea anterior.

A retina central é por sua vez subdividida em uma zona mácula de cor cereja, no centro da qual se acha a mácula lúlea (2 a 3mm de diâmetro, correspondendo a cerca de 7° a 10° no campo visual), circunscrevendo a fóveas (1.5mm de diâmetro, cerca de 5° no campo visual, constituída quase que somente de cones), por sua vez em torno da foveola (diâmetro de

0.4 a 0.6mm ou 80' a 120' de arco) com aproximadamente 2500 cones compactados no seu centro (diâmetro de 0.1mm ou 20'), relacionada a uma pequena depressão, o umbo, a região de melhor discriminação de formas (acuidade visual). A maior sensibilidade da fóvea também ocorre por nela faltarem as outras camadas de células e fibras e a luz atingir diretamente os cones. Como nesse local cada cone se liga a uma célula bipolar, por sua vez passando o sinal neural a uma célula ganglionar, o campo receptivo desta equivale ao do diâmetro do cone, cerca de 2 μ m. Essa medida, tomada em termos angulares a partir do segundo ponto nodal do olho (17.2mm à gente da fóvea), corresponde a 24'' que, por sua vez, equivalem a uma acuidade visual máxima de 2.5 (mas raramente alcançada por uma série de outras limitações). Já na periferia, a arquitetura da retina é bem diferente, com vários fotorreceptores (bastonetes) ligando-se a uma célula bipolar e a várias bipolares convergindo seus sinais a uma ganglionar. Daí resulta que o campo receptivo desta (a unidade funcional de recepção sensorial) é muito extenso, ocasionando a redução da capacidade resolutiva de formas, mas em compensação, somando as respostas isoladas de cada célula fotorreceptora para integrá-las em um único sinal (daí a facilitação da percepção de baixas intensidades luminosas). As proporções internas da retina (camadas 6 a 10) são nutridas por sangue trazido pela artéria central da retina (ramo oftálmica) e pela artéria ciliarretiniana, saindo pela veia central da retina. As porções mais externas, pelos coriocapilares da úvea.

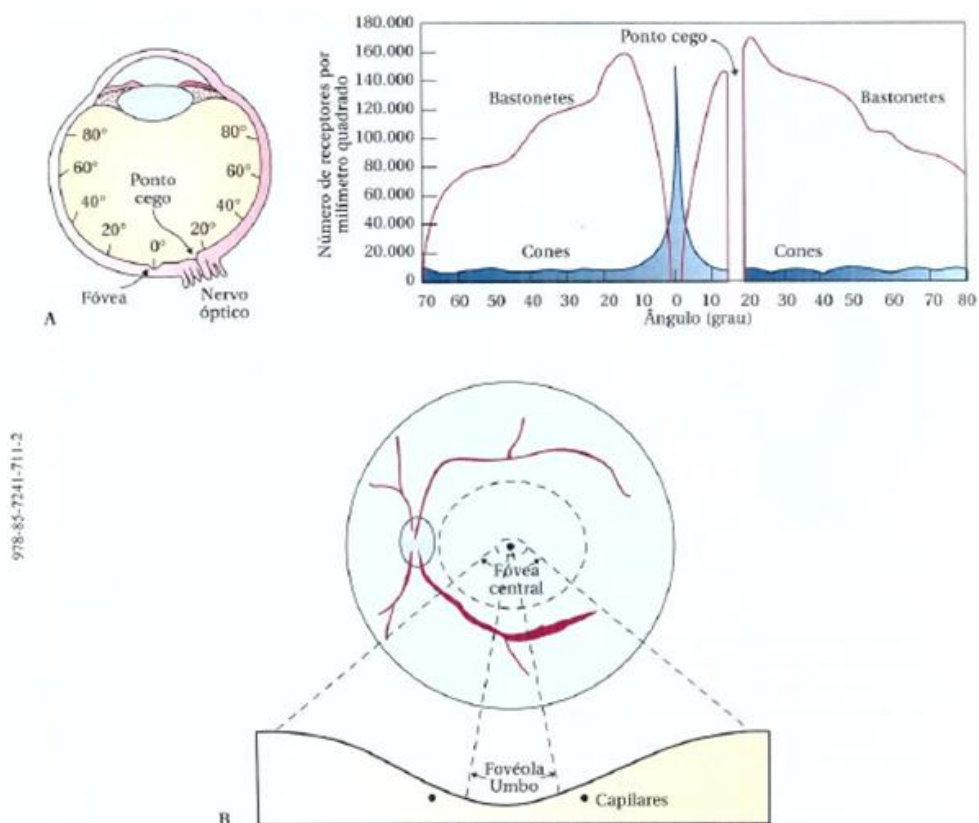


Figura 4.3 – Distribuição dos fotorreceptores ao longo da retina
 Fonte: Autor “adaptado de” Bruno;Carvalho, 2008

4.4 Movimento dos olhos

O movimento dos olhos pode ser voluntário ou involuntário, ajudando na aquisição, fixação e localização dos estímulos visuais. Esses movimentos também compensam a movimentação do corpo do observador, como por exemplo, movimentos de cabeça.

Os primatas e muitos outros vertebrados usam dois tipos de movimento voluntário para seguir visualmente objetos de interesse: seguimento suave e sacadas. Estes movimentos parecem ser iniciados no lóbulo frontal do cérebro.

4.4.1 Reflexo vestibulo-ocular (VOR)

O reflexo vestibulo-ocular (VOR) é o movimento ocular de reflexo que estabiliza as imagens na retina durante o movimento da cabeça. O VOR desencadeia movimentos oculares na mesma velocidade e na direção oposta aos movimentos da cabeça, e por se tratar de um arco reflexo de 3 neurônios, gânglio vestibular, núcleo vestibular e núcleos motores oculares, apresenta características que tornam sua atuação possível com movimentos bastante rápidos. O VOR tem uma latência de 16ms, atua com uma frequência de 0,5 a 5 Hz e com uma velocidade máxima que varia de 30 a 150°/s (Leigh e Zee, 1999). O reflexo vestibulo-ocular é dividido em três planos de atuação: horizontal, vertical e rotatório.

No VOR horizontal, “yaw” (termo em inglês), a cabeça faz um movimento de rotação lateral, os dois canais semicirculares (CSC) são estimulados, sendo um excitado e outro inibido. O canal estimulado excitatoriamente é aquele ao lado para ao qual a cabeça se move, como consequência os olhos conjugados são movimentados para o lado oposto.

No VOR vertical, “pitch” (termo em inglês), a cabeça faz um movimento de rotação vertical, os canais semicirculares são estimulados, provocam um movimento dos olhos de elevação e de ciclorotação para o lado oposto.

No VOR frontal ou de torção, “roll” (termo em inglês), a cabeça faz um movimento no plano frontal, ao se tentar encostar a orelha no ombro leva ao estímulo excitatório dos canais semicirculares, provocando a ciclorotação ocular contraversiva onde os dois olhos apresentam uma torção no sentido oposto ao do labirinto estimulado e um discreto desvio vertical, com a elevação do olho ipsilateral e abaixamento do contralateral (Leigh e Zee, 1999).

4.4.2 Sistema motor ocular

Os nervos motores oculares – oculomotor (III), troclear (IV) e abducente (VI) e os seis músculos oculares extrínsecos (reto superior, reto inferior, reto medial, reto lateral, oblíquo inferior e oblíquo superior) são os responsáveis por qualquer tipo de movimentação ocular. Os neurônios dos III, IV e VI nervos participam igualmente de todos esses movimentos lentos ou rápidos, com diferentes latências, mas não são capazes, por si só, sem informações supra nucleares, de gerar esses movimentos. Para tanto existem diferentes sistemas com a função de deflagrar e organizar tipos diferentes de movimentos oculares, que têm como manter a

imagem estável. Esta estabilização é atingida (1) mantendo a imagem na fóvea, (2) impedindo que haja um deslocamento da imagem em toda a retina. Para isso seja possível, os seis sistemas motores oculares capazes de gerar desde movimentos extremamente rápidos a outros mais lentos e precisos.

Dois sistemas, vestibular e optocinético têm objetivo de manter a imagem estável na retina, enquanto os outros quatro, sacadas, seguimento, vergência e fixação, visam manter a imagem na fóvea da seguinte maneira:

- a) Sistema vestibular estabiliza a imagem durante movimentos da cabeça, com uma curta latência;
- b) Sistema optocinético depende de estímulos visuais e mantém a imagem estável durante movimentos contínuos;
- c) Sacadas trazem imagens para a fóvea;
- d) Seguimento mantém fixos na fóvea estímulos visuais que se deslocam;
- e) Vergência move os olhos em direções opostas para evitar discrepância de imagens em ambas as fóveas;
- f) Fixação mantém os olhos na nova posição atingida após qualquer um dos movimentos citados.

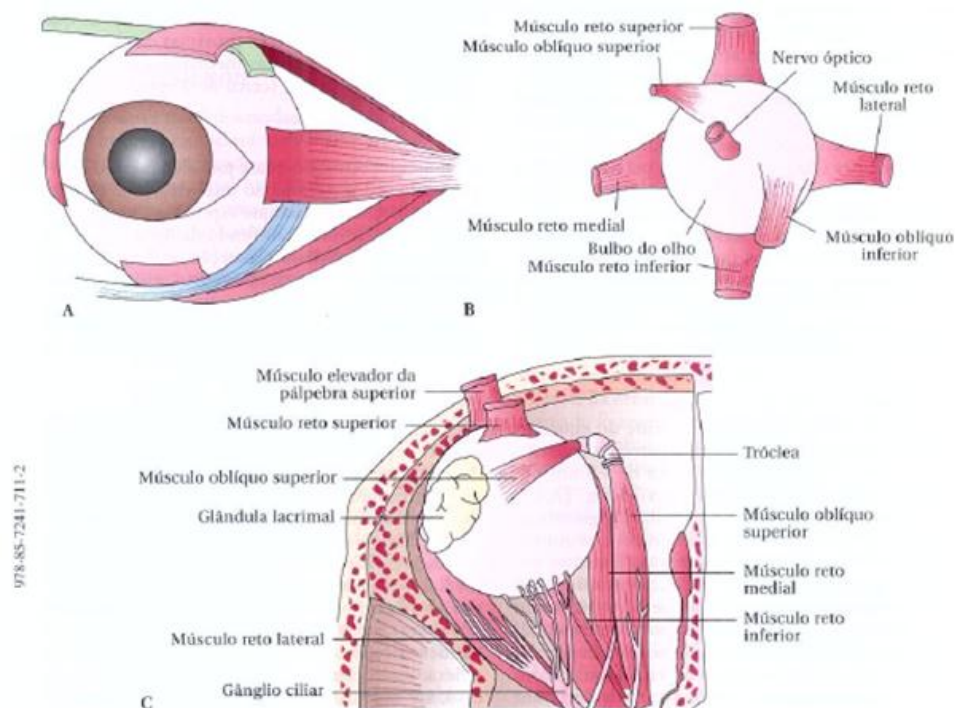


Figura 4.4 – Músculos oculares

4.4.3 Nistagmo optocinético (OKN)

São oscilações repetidas e involuntárias rítmicas de um ou ambos os olhos. É um reflexo que ocorre durante a rotação da cabeça para estabilizar a imagem e se divide em duas fases, uma rápida e uma lenta. A fase lenta é para compensar a rotação da cabeça e a fase rápida é para reiniciar o movimento. A fase lenta é gerada pelo sistema vestibular e a fase rápida responde a sinais do tronco cerebral (Leigh e Zee, 1999).

4.4.4 Sacadas

Sacadas são movimentos oculares bastante rápidos, que têm o objetivo de trazer para a fóvea novos estímulos visuais. Pode –se voluntariamente controlar sua direção e amplitude, mas não sua velocidade. A latência até o início de uma sacada varia de 180 a 220ms, e pode ser atingida uma velocidade de 100 a 600°/s. Para que tal velocidade seja atingida é necessário que haja uma boa sincronização no início e fim do movimento e que vários neurônios motores oculares disparem ao mesmo tempo (Leigh e Zee, 1999).

4.4.5 Seguimento

Os movimentos oculares de seguimento têm a função de manter estáveis na fóvea as imagens de objetos que se deslocam com uma velocidade de 50 a 100°/s. ao contrário dos movimentos de sacada que podem ocorrer com estímulos auditivos, visuais, ou de maneira reflexa. Para que o seguimento ocorra de forma harmônica é imprescindível que haja um estímulo visual (Leigh e Zee, 1999). O seguimento é assimétrico, e a maioria dos homens e primatas tendem a ter um seguimento horizontal melhor do que o vertical. A sacada é diferenciada do seguimento pela sua alta aceleração inicial e desaceleração e pico de velocidade.

O seguimento pode ser dividido em dois estágios: seguimento de ciclo aberto e seguimento de ciclo fechado. O primeiro é a primeira resposta do sistema visual a um objeto em movimento que se deseja seguir e tipicamente gasta 100ms. É tão rápido que os sensores visuais ainda não tiveram tempo de corrigir a velocidade e direção perseguida (Krauzlis; Lisberger, 1994). O segundo estágio leva a partir dos 100ms iniciais o tempo necessário para que o seguimento seja cessado. Essa fase é caracterizada pela correção instantânea de velocidade do seguimento para compensar o escorregamento da retina, ou seja, mantém a velocidade relativa do objeto em movimento com a retina nula. A relação angular da velocidade angular do olho com a velocidade angular do objeto em observação é aproximadamente 1.

O seguimento dos olhos é geralmente iniciado entre 90 e 150ms enquanto que na sacada está entre 200 e 250ms (Joiner e Shelhamer, 2006).

O seguimento na ausência de um objetivo visual é difícil e tipicamente resulta em uma série de sacadas, entretanto, o seguimento é possível dentro de certas circunstâncias como por exemplo, o seguimento contínuo e imaginário da trajetória de um objeto que por um determinado instante de tempo ficou fora do campo visual do observador (Berrihill, 2006)

4.4.6 Fixação

Após os movimentos de nistagmo optocinético, sacada e seguimento, é necessário que os olhos sejam mantidos na nova posição atingida. Atualmente sabe-se que as estruturas bulbopontinas e mesencefálicas estão relacionadas com a função de transformar informações a respeito da velocidade do movimento, codificadas pelos sistemas de sacada, seguimento e pelo VOR, em informações sobre posição ocular (Leigh e Zee, 1999).

É sabido que os olhos nunca param de se movimentar, mesmo durante a fixação. Jurin em 1978, se referiu a “olhos tremendo”, Helmholtz (1860), também admitindo a dificuldade de manter os olhos perfeitamente parados, propôs o termo “admirando a visão”, ação usada para prevenir a fadiga da retina.

Atualmente é aceita a ocorrência de três tipos de movimento dos olhos durante a fixação em seres humanos: tremor, flutuação e micro-sacadas. O tremor às vezes chamado de nistagmo fisiológico é uma oscilação periódica de aproximadamente 90 Hz, sendo o menor dos movimentos dos olhos com amplitude em torno do diâmetro de um cone da fóvea (Martinez; Mackik; Hubel; David, 2004).

A oscilação ocorre simultaneamente com o tremor e são movimentos lentos dos olhos que ocorrem durante os períodos entre micro-sacadas. Durante as oscilações, a imagem do objeto cedo fixada pode mover-se através de uma dúzia de células fotorreceptoras. As oscilações têm a missão compensatória de manter a acuidade visual da fixação na ausência das micro-sacadas, ou quando a compensação feita pelas micro-sacadas é relativamente pobre (Martinez; Mackik; Hubel; David, 2004).

As micro-sacadas, são pequenos puxões e rápidos puxões no movimento do olho como ocorre na fixação voluntária. Eles levam a imagem da retina por uma faixa de dezenas para muitas centenas de células fotorreceptoras e dura aproximadamente 25ms. Cornsweet (1956), propôs que as micro-sacadas servem para retornar os olhos à fixação do objeto, corrigindo de oscilação dos olhos, sendo sua mais importante função, evitar a fadiga da retina. Ainda existem muitas duvidas quanto à função da micro-sacada (Martinez; Mackik; Hubel; David, 2004).

4.4.7 Vergência

Ao contrário dos outros sistemas, os movimentos de vergência (convergência e divergência) são desconjugados, pois os olhos se movem em direções opostas para manter ou obter visão binocular. O objetivo destes movimentos é manter a visão de profundidade e o estímulo para a sua realização é uma disparidade da imagem na retina dos dois olhos (Leigh e Zee, 1999).

Para objetos próximos, os olhos convergem- se e para objetos mais afastados, os olhos se divergem. A convergência está diretamente relacionada à acomodação dos olhos e é considerado um movimento voluntário.

Existem basicamente dois tipos de movimentos de vergência: fusão e acomodação. O primeiro ocorre em resposta a disparidade entre a formação das imagens na retina de cada olho. A vergência de acomodação é estimulada pela perda de foco de imagens na retina e está associada com a acomodação do cristalino e pupilas. O mesmo movimento dos olhos pode ser causado por lentes posicionadas na direção da visão, senso de proximidade do objeto de interesse e senso de movimento de aproximação ou afastamento do objeto alvo da visão (Leigh e Zee, 1999).

Em condições naturais, o movimento de convergência dos olhos vem associado do movimento de sacadas, uma vez que a maioria dos objetos no nosso campo visual difere em plano frontal (horizontal e vertical) e em profundidade. Quando o movimento de vergência está acompanhado do movimento de sacada, o resultado da movimentação é mais rápido do que quando acionados separadamente (Leigh e Zee, 1999).

4.4.8 Efeitos da vibração na visão e estímulos

Muitos estudos experimentais dos efeitos da vibração na visão humana têm se concentrado no grau que essa vibração causa o movimento da imagem na retina e como esse movimento degrada a visão. O movimento da imagem na retina pode ocorrer como resultado do movimento relativo dos olhos e do objeto em observação. No caso do sistema com espelhos retrovisores, além dos olhos e do objeto em observação, o espelho entra como elemento intermediário, fazendo parte do sistema relativo de movimentação composto pelo olho do observador (motorista), o espelho retrovisor e pelo objeto alvo na retaguarda (carro e pedestre entre outros).

4.4.8.1 Vibração do Alvo

Quando o observador está parado e o alvo movimenta-se lentamente com uma frequência inferior a 1 Hz o “seguimento dos olhos” é usado para manter a imagem aproximadamente estável na mesma região da retina. O reflexo de seguimento é um sistema de ciclo fechado que corrige o erro de posicionamento dos olhos assim que são detectados. Quando a frequência de oscilação do alvo aumenta acima de aproximadamente 1 Hz dependendo da previsibilidade do movimento, as defasagens envolvidas nos movimentos oculares podem tornar-se demasiadamente grande e fazendo com que o olho realize uma série movimentos de sacadas discretas para redirecionar a atenção para o ponto correto, conseqüentemente a imagem percorrerá áreas menos sensíveis da retina, resultando em redução de nitidez. Para frequências acima de 2 ou 3 Hz os movimentos de sacada são insuficientemente rápidos para estabilizar a imagem na fóvea e conseqüentemente parece borrada Griffin (2004, p. 127).

4.4.8.2 Vibração do observador

Quando o alvo está parado e o observador está vibrando, os efeitos de translação e rotação da cabeça precisam ser considerados. O movimento de translação da cabeça em uma distância “h”, resulta em um deslocamento angular de “h/d” radianos da imagem de um objeto estacionário a uma distância “d” dos olhos, Figura 4.5.

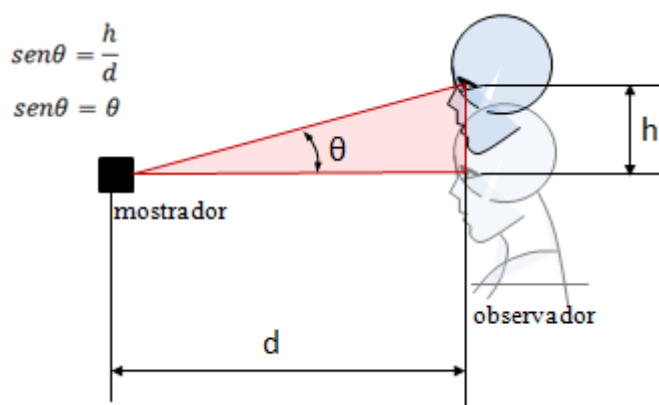


Figura 4.5 - Movimentação vertical do observador com relação um mostrados estático.
Fonte: Autor

Quanto menor a distância “d”, maior será o deslocamento angular relativo, “ θ ”, para um dado deslocamento “h” da cabeça. Quanto maior a distância “d”, mais insignificante será o deslocamento relativo, “ θ ”, do objeto para o observador. A rotação da cabeça em “ θ ”, provocará um deslocamento angular, “ θ ”, da imagem do objeto na retina independente da distância de observação “d”. O movimento de rotação da cabeça ativa o reflexo vestibulo ocular de rotação dos olhos no sentido oposto. Esse movimento compensatório tenta manter constante a linha de visão durante a rotação da cabeça durante os movimentos de *pitch*, roll e yaw, por isso esse é considerado como um sistema de controle ciclo aberto. O sistema de compensação de ciclo aberto é mais efetivo em altas frequências do que o de ciclo-fechado (reflexo de seguimento). O sistema de compensação dos olhos não é suficiente para suportar a visão durante a translação do observador. A correção necessária para a translação da cabeça do observador da distância de observação (observador-objeto) é o reflexo vestibulo ocular que é principalmente gerado pelos canais semicirculares que são mais sensíveis aos movimentos de rotação da cabeça.

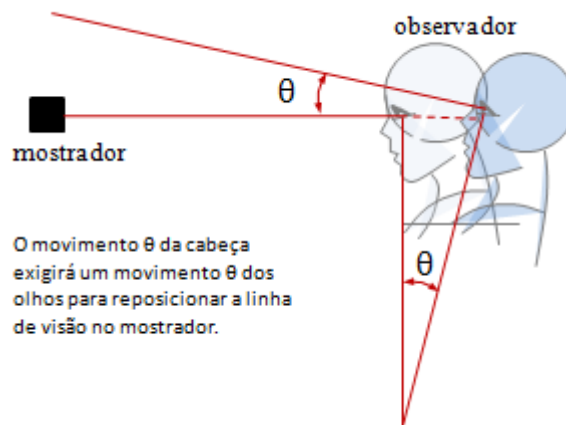


Figura 4.6 - Rotação da cabeça do observador com relação um mostrador estático.
Fonte: Autor

Algumas pesquisas sugerem que o reflexo vestibulo ocular opera em frequências até cerca de 8 ou 10Hz enquanto outras pesquisas sugerem que os movimentos reflexos úteis dos olhos ocorrem em até 20 ou 30 Hz. É importante lembrar em altas frequências os olhos e seus componentes podem oscilar e até ressonar como sistemas passivos excitados pela vibração transmitida a eles pelo automóvel.

4.4.8.3 Vibração simultânea do mostrador e do motorista

Quando o mostrador (espelho) e o observador oscilam em fase através de um grande deslocamento translacional em baixas frequências, o movimento da imagem na retina é menor do que quando o mostrador (espelho) ou o observador oscilando sozinhos. Em baixas frequências abaixo de 1 a 2 Hz, o seguimento dos olhos supera o reflexo vestibulo ocular e com o aumento da frequência a supressão é reduzida e a visão pode ser largamente degradada. Para compreender os efeitos da vibração sobre a visão é necessário considerar as oscilações de translação e rotação e a dependência dos seus efeitos sobre a frequência e a distância de observação.

Existem outros fatores que podem afetar a visão além do movimento da imagem na retina como por exemplo, as vibrações transmitidas ao corpo, alteração de suprimento

sanguíneo (pressão), distúrbios psicológicos, consumo de álcool ou medicamentos e lesões oculares.

4.4.9 Efeitos da vibração na visão

Os olhos passam a perceber o movimento de um objeto quando o seu deslocamento atinge o mínimo limite distinguível para o olho, ou seja, um deslocamento angular de aproximadamente 1min (0.0166graus) de arco, o que corresponde a aproximadamente 0.15mm para uma distância visual de 0.5m (Griffin, 1974). Existem outros fatores envolvidos com a determinação deste limite como a adaptação da luminosidade (contraste) que não será abordada neste trabalho. O limite perceptível da vibração translacional da nitidez de um mostrador, neste caso do espelho, pode ser “aproximada” pelo deslocamento do espelho que é proporcional a distância visual e independente da frequência. Uma vez que o deslocamento é independente da frequência de vibração, a aceleração limite é proporcional ao quadrado da frequência e, enquanto uma aceleração de vibração muito alta é necessária para causar perda de foco em altas frequências, uma aceleração muito baixa de vibração resulta em movimento perceptível a baixas frequências. As acelerações necessárias para causar perda de foco acima de aproximadamente 20Hz são raramente encontradas em mostrador/mostradores (exemplo, a 20Hz mais do que aproximadamente 1.6 ms^{-2} r.m.s serão necessários para causar perda de foco sob boas condições com uma distância visual de 0.5m; a aceleração limite aumenta em proporção a distância visual e o quadrado da frequência). Em frequência abaixo de 1 ou 2 Hz, o seguimento dos olhos ajuda a aliviar os efeitos de qualquer movimento de imagem acima do limite aceitável. Os maiores problemas com a exposição da vibração estão, portanto, muitas vezes no limite inferior da faixa de frequência de cerca de 2 a 20 Hz. Se um observador vibrando vê um objeto muito distante parado, o limite para os efeitos da vibração na visão é independente da vibração de translação dos olhos e somente dependerá do movimento de rotação dos olhos.

Alguns movimentos oculares são produzidos pela transmissão da vibração translacional do banco, causando vibração rotacional da cabeça e dos olhos. Estes movimentos oculares tendem a ser reduzidos pelo reflexo vestibulo ocular. A vibração do observador também causará movimentos de translação da cabeça e olhos. Em distâncias visuais finitas (e proximidade do observador), movimento translacional dos olhos pode causar perda de foco: a

magnitude limite para este efeito aumenta em proporção a distância visual. A Figura 4.7, mostra o limite médio de desfoque para um grupo de indivíduos, determinado com uma vibração senoidal vertical de um assento rígido sem encosto e com uma distância aproximada de 6m (Griffin, 1975c). Estes dados são somente dependentes do movimento de rotação dos olhos, o movimento de translação se torna significativo com distâncias visuais muito menores ou baixas frequências de vibração.

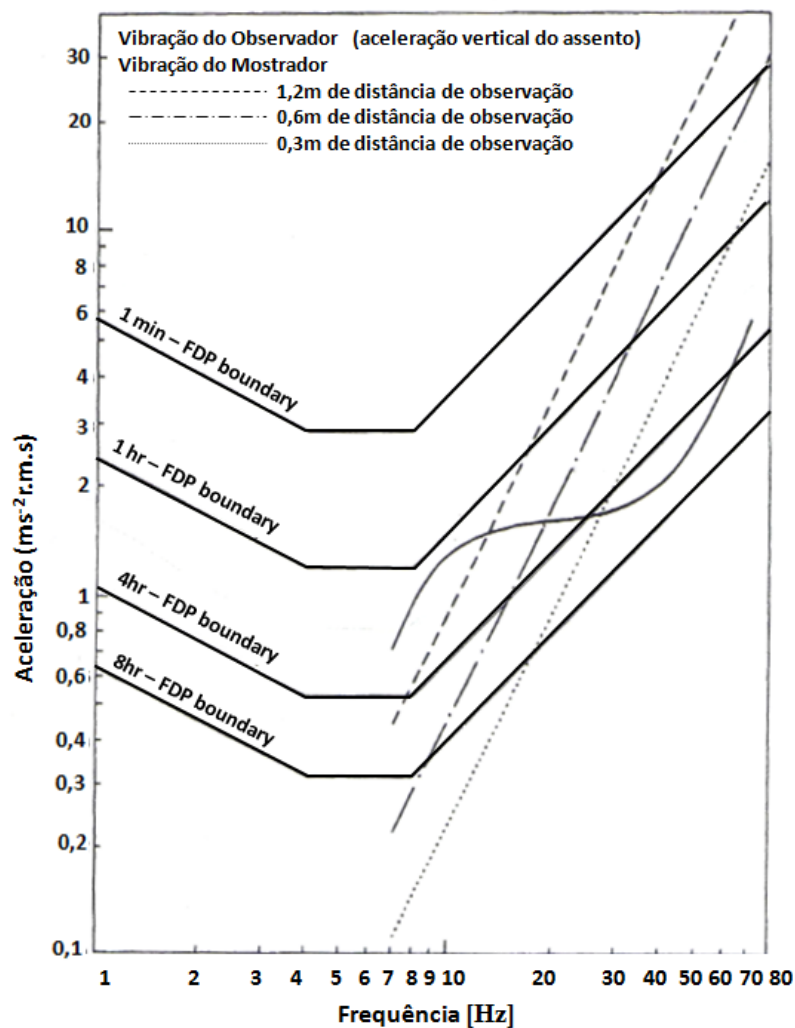


Figura 4.7 - Magnitude de vibração do mostrador e do observador abaixo da qual não se pode reduzir a acuidade visual. As linhas para a vibração do mostrador correspondem a $\pm 1\text{min}$ de arco; a linha para a vibração do observador é a média de 12 indivíduos expostos a vibração senoidal vertical em um assento rígido sem encosto. Dados do Griffin (1975c); ISO 2631 (International Organization for Standardization 1978).
 Fonte: Griffin ,1996

4.4.9.1 Efeitos da frequência de vibração

Em baixas frequências de oscilação é importante compreender as contribuições relativas do reflexo vestibulo ocular e do seguimento no desempenho visual, entendendo como uma pessoa exposta a vibração pode direcionar seus olhos ou cabeça no objeto alvo.

A resposta de frequência do seguimento dos olhos não pode ser definida precisamente pois é um sistema não linear (por exemplo, o aumento da amplitude de deslocamento do alvo a qualquer frequência reduz o ganho) e é dependente da habilidade de prever o movimento do alvo. Um meio simples de variar a previsibilidade de um estímulo sintético é variando sua largura de banda: movimentos Gaussianos de banda larga são menos previsíveis do que movimentos Gaussianos de banda estreita, enquanto os movimentos senoidais são completamente previsíveis. Michel e Jone (1966) mostraram que a defasagem do acompanhamento dos olhos aumenta com o aumento da largura de banda, e apenas a 0.3 Hz os movimentos alvos foram suficientemente lentos para previsibilidade não ser benéfica, Figura 4.8. Muitos modelos foram criados para representar o comportamento de seguimento visual (Laycock, 1978). O movimento de seguimento dos olhos pode ser considerado como tendo uma latência de cerca de 150ms, que limita o desempenho com movimento imprevisível do alvo, mas se o alvo se move de uma forma previsível os movimentos podem ser seguidos com uma precisão consideravelmente maior do que o sugerido por essa defasagem (Bahill and MaDonald, 1983). Pode-se assumir que nas tarefas do mundo real, a precisão da previsibilidade dependerá da familiaridade com o movimento do alvo e diferentes indivíduos serão capazes de atingir diferentes graus de desempenho. Curiosamente não há posição consciente do olho humano; a direção da visão e presume-se estar relacionada ao campo de visão percebido e não do retorno proprioceptivo. Acompanhamento preciso dos olhos usando apenas o movimento da cabeça (não dos olhos) é possível apenas abaixo de 1 Hz (Barnes e Sommerville, 1978; Wells e Griffin, 1987b,c), mas este é novamente, altamente dependente da previsibilidade de movimento do alvo.

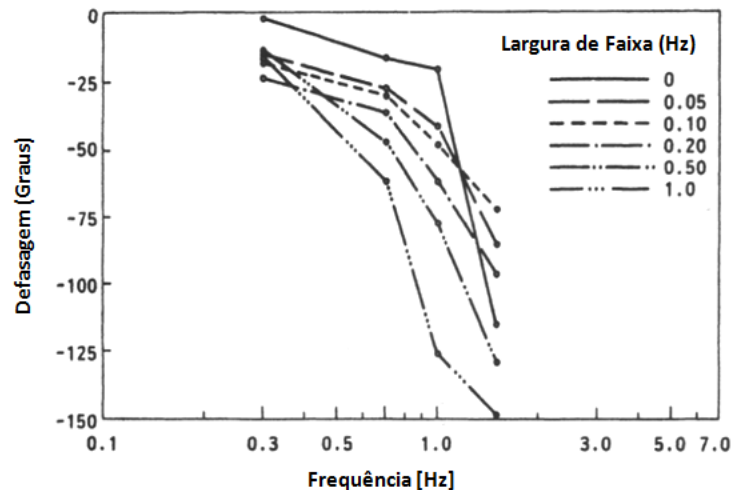


Figura 4.8 - A defasagem no seguimento dos olhos para 10 observadores olhando alvos com diferentes graus de previsibilidade do movimento causado por faixas de movimento variando .

Fonte: Michael e Jones, 1966

Em baixa frequências o reflexo vestibulo ocular (VOR) pode ser suprimido: a supressão depende do campo visual, é maior com a imagem caindo sobre a Fóvea, e parece ser dependente da atividade mental (Barr , 1976; Barnes, 1978; Barnes, 1983a). Em altas frequências as características do reflexo vestibulo ocular (VOR) tem efeito dominante na desempenho visual. Outros resultados podem ser interpretados como sugerindo que o reflexo vestibulo ocular tem efeito benéfico em altas frequências. Wells e Griffin (1983) e Stott (1984) mostraram que a função de transferência da cabeça para os olhos tem um ganho quase unitário e o atraso de fase próximo de zero até 20 Hz ou acima. A frequência de resposta do reflexo vestibulo ocular pode ser determinada, mas ao representá-lo como um sistema linear invariante pode-se negligenciar algumas de suas mais importantes características. Parece que o ganho e a fase podem ser modificados conforme a circunstância. Por exemplo, ao extremo, a inversão esquerdo-direito da visão gerada por prismas em espetáculos artísticos, produz mudanças no ganho do VOR e, depois de alguns dias, a fase reversa do movimento compensatório dos olhos (Melvill Jones, 1977). Similarmente, o ganho do VOR se adapta ao uso das lentes de aumento por um período de alguns dias (Gauthier e Robinson, 1975).

As características do reflexo vestibulo ocular ajudam na estabilização da imagem na retina de qualquer objeto distante durante a maioria as oscilações auto induzidas (por exemplo andando, correndo, pulando e movimentando voluntariamente a cabeça). Entretanto, visão durante movimento auto-induzido é possível através do controle coordenado de todos os tipos de movimento dos olhos e pode envolver ambos um elemento adaptativo (Macdonald, 1983) e

um elemento previsível. A superioridade do reflexo vestibulo ocular sobre o reflexo de seguimento em frequências acima de 0.5Hz foi demonstrado por Benson e Barnes (1978). Estes autores compararam o desempenho de leitura durante (i) oscilação de guinada dos observadores (ii) oscilação de guinada do display/mostrador. A figura 4.4 mostra os resultados obtidos usando oscilações senoidais com uma velocidade de aproximadamente 0.52 rad/s. Oscilação do display/mostrador (por exemplo, o alvo) degradou o desempenho (por exemplo, aumentou os erros de leitura e reduziu o número de dígitos lidos do display/mostrador) em todas as frequências; a oscilação dos observadores apenas teve efeito estatístico significativamente desfavorável na maior frequência.

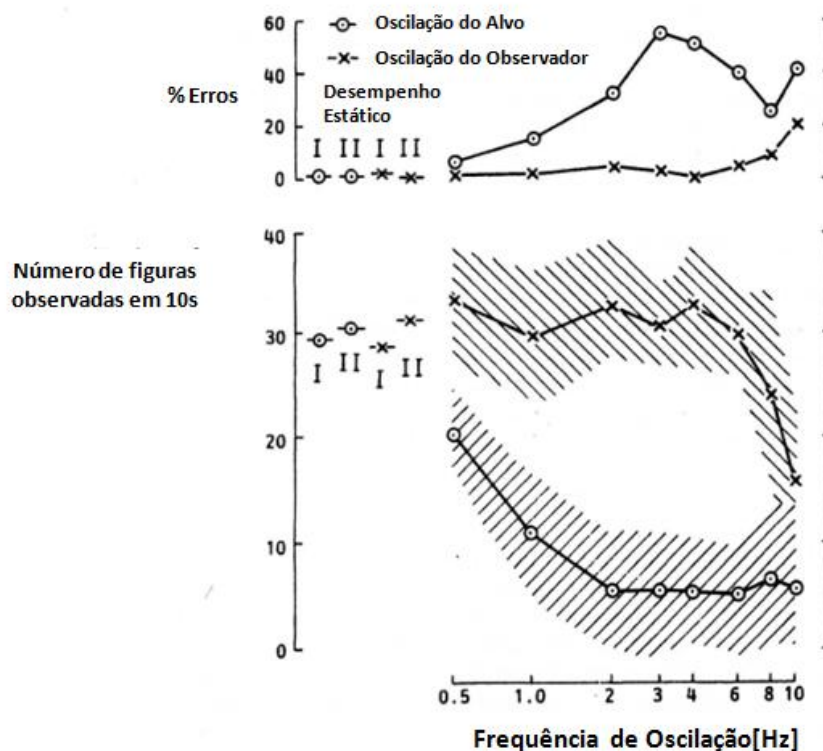


Figura 4.9 - Desempenho médio de leitura de oito observadores durante oscilação senoidal de guinada (yaw) do observador ou do alvo. As áreas hachuradas representam ± 1 desvio padrão; I e II referem-se ao desempenho estático antes e depois da vibração, respectivamente.

Fonte: Autor "adaptado de" Benson e Barnes, 1978

A ressonância parece ser altamente variável entre os indivíduos e, em algumas frequências elevadas, a magnitude de movimentação dos olhos é altamente dependente da postura corporal e das características do assento por exemplo, alguns indivíduos podem

experimental perda focal causada pela vibração transmitida pelas mão e pés. A excitação de ressonância também pode acontecer em alguns veículos, próximo a alguns equipamentos industriais, principalmente se a cabeça vir a entrar em contato direto com alguma fonte de vibração. A importância da ressonância de vibração dos olhos nos efeitos na leitura tende a ser exagerada: geralmente é possível prever a transmissão da vibração de alta frequência para a cabeça. Variações de baixa frequência em acelerações translacionais podem também induzir o movimento dos olhos (Niven, 1966;Stott, 1979). O efeito benéfico de qualquer movimento compensatório do olho associado com oscilação translacional pode aumentar devido a estímulos dos otólitos e pode depender da distância de visão. Se alguma compensação ocorre, esta pode ser combinada com a vergência, que também pode ser afetada pela vibração. Alternativamente, qualquer compensação pode melhorar primeiramente o desempenho dinâmico do seguimento ou ajudar na manutenção da linha horizontal de visão durante movimentos de inclinação da cabeça de baixa frequência.

4.4.9.2 Efeitos no desempenho visual

Se o limite de desfoque é excedido, a extensão de qualquer decréscimo na visão torna-se dependente da natureza da tarefa visual bem como da natureza do movimento da retina. O'Hanlon e Griffin em 1971, apresentaram um simples modelo de previsibilidade de dificuldade de leitura e concluíram que a legibilidade é dependente do tempo que as imagens ficam em uma pequena área da retina, ou, equivalentemente, a velocidade que a mesma atravessa essa área. Para uma frequência senoidal uniaxial de um display/mostrador a previsão de erros de leitura é proporcional a frequência de vibração e a raiz quadrada da magnitude da vibração, (O'Hoanlon e Griffin ,1971) e (Alexander , 1972). Em frequências senoidais e uniaxiais, a visão é possível quando a velocidade da imagem se torna zero no ponto nodal onde ocorre a reversão do movimento. Existe uma maior dificuldade de leitura com o mostrador fora de fase e mais de um eixo de vibração (Meddick e Griffin, 1976). Moseley em 1982, observou que uma maior dificuldade de leitura com vibração senoidal do corpo todo do que com vibração aleatória do corpo inteiro na faixa de terceira oitava. A Figura 4.10 mostra que com vibração aleatória, a probabilidade da velocidade da imagem ser baixa é maior, e consequentemente os erros de leitura por unidade de magnitude de vibração são menores do que com vibração senoidal.

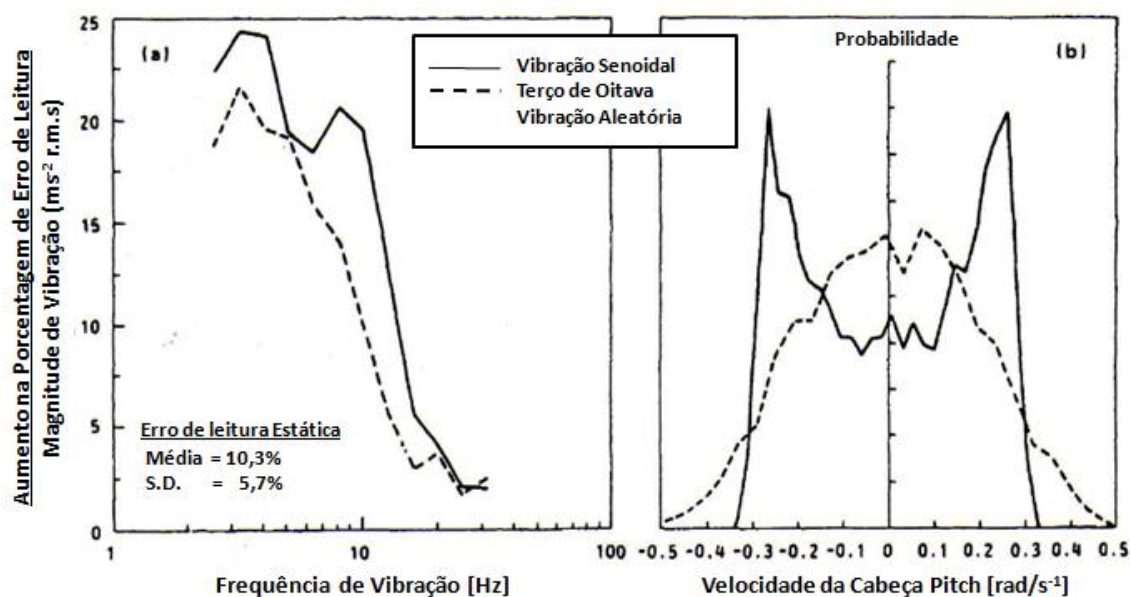


Figura 4.10 - Acuidade de leitura durante exposição à vibração vertical senoidal, um terço de oitava e aleatória vertical no assento: (a) efeitos das diferentes frequências e tipos de vibração na taxa de erro de leitura (média de 12 observadores); (b) função de densidade de probabilidade da velocidade de *pitch* da cabeça durante exposição a 2ms^{-2} r.m.s. 10 Hz senoidal e um terço de oitava em faixa aleatória de vibração vertical do assento.

Fonte: Autor “adaptado de” Moseley, 1982.

Após alguns testes de leitura a diferentes distâncias visuais (0.7 e 1,5m), Furness e Lewis em 1978, encontraram que a maior dificuldade de leitura em baixas frequências com o papel próximo pode ser explicado pelos efeitos da translação da cabeça e do reflexo vestibulo ocular. Para condições de vibrações acima dos limites de desfoque, é possível determinar curvas iguais de desempenho mostrando que magnitude de vibração requerida para produzir o mesmo erro de leitura ou tempos de leitura a cada frequência (por exemplo Lewis e Griffin, 1980a,b). Os 10% das curvas de erro de leitura obtidos com três diferentes mostradores são mostrados na Figura 4.11: dois painéis de mostradores montados em diferentes distâncias (0.75 e 1.5m) mas com os caracteres alfa numéricos na mesma altura para os olhos (5min de arco), e um capacete com um mostrador colimado com caracteres totalizando 15 min de arco a cada olho (Hurness; Lewis, 1978). A maior dificuldade em baixas frequências com o painel próximo e com o capacete mostrador pode ser explicado pelos efeitos da translação da cabeça e do reflexo vestibulo ocular respectivamente. Alguns estudos sugerem que acima da faixa de ressonância das magnitudes de vibração, existe um aumento linear de ambos os erros de leitura e tempos de leitura com o aumento da magnitude de vibração (Lewis e Griffin, 1980a,b).

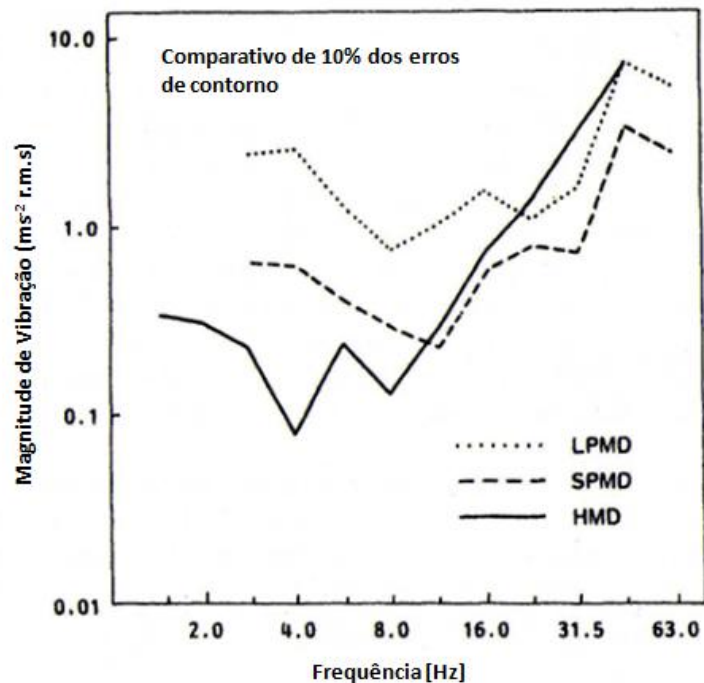


Figura 4.11 - Magnitude de aceleração produzindo 10% de erros de leitura quando usado mostrador montado em capacete (HMD – Helmet Mounted Display, caracteres subtendendo 15min de arco em infinito óptico), um pequeno painel montado (SPMD – Small Panel Mounted Display, caracteres subtendendo 5min de arco a 0.75m), e um grande painel montado (LPMD – Large Panel Mounted Display subtendendo 5min de arco a 1.5m).
Fonte: Autor “adaptado de” Furness e Lewis , 1978

Griffin e Lewis (1980), sugerem que acima da faixa de ressonância os erros e tempos de leitura aumentam linearmente com o aumento da magnitude de vibração, logo, os efeitos dessa magnitude de vibração em cada frequência pode ser indicado pelo aumento do erro de leitura ou pelo tempo de leitura relacionado por unidade de magnitude de vibração. A Figura 4.10, exemplifica um estudo realizado por (Moseley, 1982) para analisar os resultados de Griffin e Lewis. A tarefa experimentada solicitava que o observador lê-se números de 1.1mm de altura em um televisor estático a 750mm de distância dos olhos. Os resultados apresentados indicaram que com 2m/s^2 de vibração r.m.s haverá aproximadamente 40% de erros de leitura com 10Hz de vibração senoidal e aproximadamente 20% de erros de leitura em faixa de vibração aleatória de terça oitava centrada em 10Hz.

4.4.10 Efeitos da direção da vibração

Para uma pessoa sentada, o movimento da imagem na retina pode aumentar devido a vibração vertical e lateral do display/mostrador (equivalente ao movimento dos olhos em *pitch* e *yaw*). Diferenças entre os efeitos do movimento vertical e horizontal da imagem na retina podem ocorrer devido a forma assimétrica dos detalhes visuais do display/mostrador ou porque a imagem é mais susceptível a sobrepor uma imagem adjacente em um direção do que em outra. Os efeitos da vibração do observador são dependentes da direção de uma forma mais complexa porque um único eixo de vibração no assento pode resultar no movimento da cabeça em todos os seis eixos.

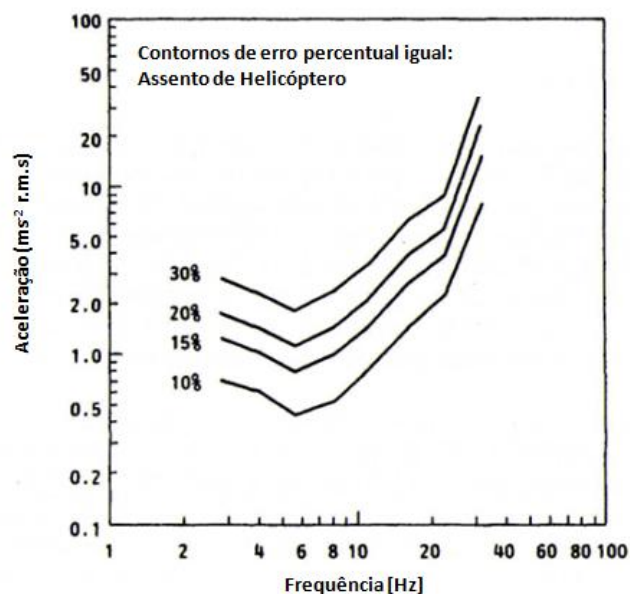


Figura 4.12 - Magnitude de aceleração produzindo 10%, 15%, 20% e 30% de erros de leitura para observadores expostos a vibração do assento para frente e para trás (eixo x) com encosto.
Fonte: Autor “adaptado de” Lewis e Griffin (1980a).

A forma e a medida do movimento da cabeça dependerão das características do banco, postura e, da vibração para frente e para trás, além das características do encosto. Lewis e Griffin em 1980, constataram que indivíduos sentados em um assento plano e rígido sem encosto, as magnitudes das vibrações para frente e para trás e lateral necessárias para causar erros de leitura foram consideravelmente maiores que as magnitudes da vibração vertical necessária para produzir o mesmo efeito. Com vibração para frente e para trás, a adição do

encosto aumenta a transmissão da vibração para a cabeça e aumenta a dificuldade de leitura. A Figura 4.11, mostra a curva dos erros de leitura obtidos com vibração para frente e para trás quando usado o banco de um helicóptero com encosto e lendo números de 1.1mm de altura em um televisor estacionário 750 mm em frente aos indivíduos. No automóvel, pode-se concluir que as diferentes características de suspensão, carroceria assento e encosto do banco, para diferentes tipos de modelos podem alterar significativamente os efeitos da vibração na visão. É importante observar que a adição de mais eixos de movimentação de imagem na retina, pode alterar a característica nodal (ponto de velocidade zero) de movimentos uniaxiais que facilitam a interpretação da imagem. As componentes do vetor velocidade de um movimento de imagem de dois eixos podem apresentar consideravelmente menos tempo de leitura em baixa velocidade do que qualquer um dos outros movimentos componentes. As oscilações de dois eixos de direção são mais prejudiciais a visão, Meddick e Griffin (1976).

4.4.11 Distância de visão

A posição relativa do mostrador e do observador influencia no movimento da imagem na retina. Se o movimento predominante dos olhos é rotacional e o mostrador está parado, a redução da distância de visão aumentará o tamanho e a nitidez da imagem sem causar aumento do desfoque da imagem na retina. Entretanto, se é um movimento de translação do mostrador ou do observador, a redução da distância visual produzirá um aumento proporcional do movimento da imagem. Neste caso, a visão é apenas melhorada para mostradores que se beneficiam mais no aumento do tamanho angular do detalhe do que ele perde dado ao aumento do movimento da imagem na retina. Em aviões é comum o uso de lentes para eliminar o deslocamento translacional relativo entre a imagem e os olhos, por isso, é plausível que motoristas que utilizam lentes corretoras de visão podem sentir diferentes efeitos da vibração do painel de instrumento e do espelho retrovisor.

A importância relativa dos movimentos de translação e rotação dos olhos produzidos pela vibração de um observador depende da frequência e da distância de visão. Quando vendo um mostrador parado em baixa frequência (abaixo de 1Hz), o movimento de translação é dominante e reduções da distância de visão podem ser prejudiciais (elas causarão maior movimento da imagem na retina e exigirão maior magnitude do movimento de seguimento dos olhos e cabeça). Em altas frequências (acima de 10Hz), o movimento rotacional dos olhos

será predominante (Griffin, 1976b) e reduções na distância de visão tendem a ser benéficas. Em frequências intermediárias o movimento dominante provavelmente dependerá das circunstâncias com que o movimento translacional dos olhos tende a se tornar mais importante, e reduções na distância de visão tornam-se menos benéficas, com frequências menores e menores distâncias de visão.

4.4.12 Movimento simultâneo de translação do mostrador e do observador

Os movimentos do mostrador e observador são benéficos quando predomina o movimento de translação, mas ambos devem estar em fase e em baixa frequência. Quando a frequência é alta, o movimento predominante dos olhos é o de rotação, por isso, o movimento deixa de ser simultâneo piorando a nitidez. Em frequências intermediárias, o movimento da cabeça e dos olhos não estão em fase com o mostrador.

Os efeitos do observador, mostrador, e observador e mostrador nos erros de leitura e tempo de leitura são comparados na Figura 4.13. Os dados foram obtidos usando vibração vertical senoidal, um assento rígido, um mostrador rígido e caracteres de 1.1mm de altura a uma distância de 750mm.

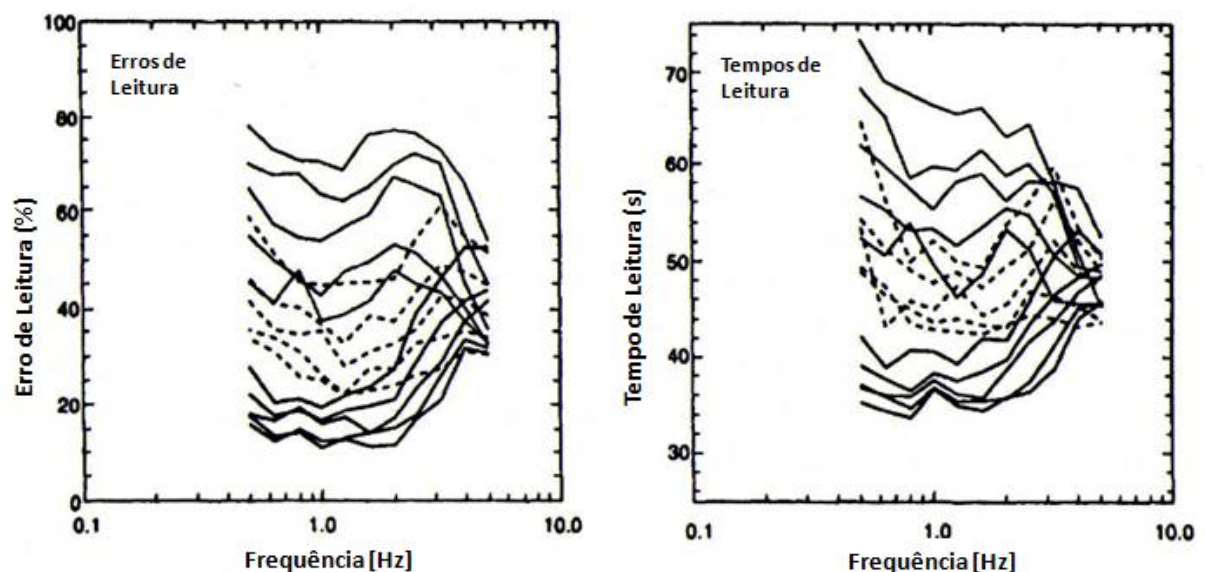


Figura 4.13 - Porcentagem média dos erros de leitura e dos tempos de leitura para vibração do mostrador (·····), vibração do observador (----) e vibração simultânea do observador e do mostrador (——). Desempenho estático: 6,2% de erro médio de leitura, 27,8s de tempo de leitura; caracteres subtendendo 5min de arco a 0,75m; cinco magnitudes de vibração senoidal (1.0, 1.25, 1.6, 2.0 e 2.5 ms⁻² r.m.s.); assento rígido sem encosto.
Fonte: Autor “adaptado de” Moseley e Griffin (1986b).

Pode-se observar que, em baixas frequências, a vibração simultânea do observador e mostrador é altamente benéfica. Com a vibração do mostrador, apenas o movimento de seguimento dos olhos (e da cabeça) podem ser usados e consequentemente o desempenho é pior. Com a vibração do indivíduo, o desempenho é geralmente melhor do que com vibração do mostrador. Na frequência mais alta do estudo, ou seja, a 5Hz não observa-se mais diferença de desempenho para as três condições de visão, Moseley e Griffin (1986b).

4.4.13 Variáveis que afetam a vibração da cabeça

A postura e a configuração do assento afetam a transmissão da vibração para a cabeça, entretanto, o grau que a vibração de corpo inteiro degrada a visão.

Moseley (1981), comparou a transmissão da vibração para a cabeça obtida com diferentes condições de assento. Em 1979, Johnston e Wharf mostraram que o desempenho visual de pilotos de avião de guerra era degradado quando a cabeça encostava no assento ejetável. Obviamente, a relação do corpo com o assento é muito mais complexa do que uma simples excitação uniaxial de vibração vertical atuando no assento do banco. As costas e a cabeça do motorista têm uma interface muito complexa com o encosto do banco, depende do material do estofado, da forma e posição e afetarão diretamente transmissibilidade da vibração para a cabeça e para os olhos .

4.4.14 Influência da tarefa visual na visão

Muitas pesquisas foram realizadas para compreender os efeitos da vibração nas tarefas de leitura de painéis de instrumentos de veículos submetidos a vibração, Griffin (1996). Com a necessidade de aprimoramento dos equipamentos militares (principalmente de aviões), o homem foi submetido ao longo dos últimos anos a ambientes operacionais de trabalho insalubre, às margens do seu próprio limite biológico. A natureza das tarefas visuais dessa seção, referem-se a capacidade de interpretação e leitura de caracteres em painéis de

instrumento de veículos submetidos a vibração, como por exemplo, aviões, caminhões e tratores. No caso do espelho retrovisor, a motorista precisa interpretar com segurança o tipo de alvo refletido no espelho (pedestre, veículo, obstáculo) e a percepção de deslocamento e velocidade de aproximação de veículos na retaguarda. Portanto, existem diferentes relações de quanto aos benefícios referentes ao tamanho do objeto refletido, bem como o contraste.

Muitos estudos citados e realizados por Griffin, sugerem que no caso da leitura de painéis de controle com o observador sofrendo vibração de corpo inteiro, o desempenho é afetado quando ocorre a sobreposição de imagens (caracteres e linhas), tendo pior desempenho quando a vibração causa deslocamento da imagem na retina com magnitude similar a separação dos caracteres. Alguns desses estudos quantitativos provaram que a alteração de tamanho e forma dos caracteres pode beneficiar a legibilidade.

Eveans 1981, Davies (1986), Moseley e Griffin (1987) e Davies e Griffin (1989) tinham investigado os efeitos da vibração na sensibilidade ao contraste, desta forma pode-se encontrar o limite de contraste necessário para identificar formas com diferentes frequências espaciais. O contraste requerido para ver altas frequências espaciais indica habilidade de resolver e perceber detalhes finos, já o contraste requerido para ver baixas frequências espaciais reflete a habilidade visual de formas grandes. A Figura 4.14, ilustra que um efeito da vibração na função de sensibilidade de contraste é degradar a sensibilidade em altas frequências espaciais. Moseley e Griffin (1987) mostraram que os efeitos da vibração nas funções de sensibilidade de contraste pode utilmente prever alguns dos efeitos relativos da vibração na legibilidade de diferentes caracteres alfa numéricos.

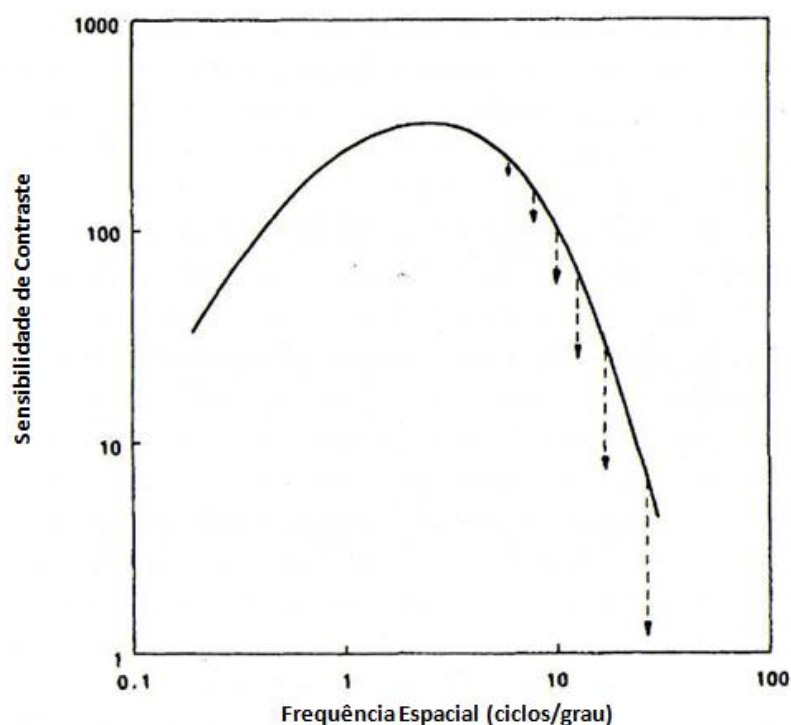


Figura 4.14 - Sensibilidade de contraste como uma função da frequência espacial mostrando os efeitos da vibração. A forma precisa da curva depende de muitos fatores; a vibração reduz a sensibilidade de contraste em altas frequências espaciais mas também podem causar outras mudanças.

Fonte: Autor, “adaptado de” Moseley e Griffin, 1987

Mudanças na iluminação alteram o contraste na campo visual e pode mudar a óptica fotoquímica dos olhos. Os efeitos combinados de baixo contraste e vibração causam uma visão pobre, a qual pode ser melhorada aumentando a iluminação. Isto decorre naturalmente das funções de sensibilidade de contraste e tem sido observada com outras tarefa visuais. (exemplo Rubenstein e Kaplan, 1968). Entretanto, Furness (1981), mostrou que a diminuição no desempenho visual causada pela vibração de corpo inteiro com um mostrador montado no capacete foi maior com maior contraste. Resultados similares tem sido obtidos com monitores de imagem e sugere que legibilidade máxima de caracteres alfa numéricos durante exposição de vibração de corpo inteiro pode ocorrer com o contraste na faixa de 60-80% (Moseley, 1986; Moseley e Griffin, 1986a). O aumento dos efeitos da vibração em maior contraste aumentara parcialmente porque permitirá a percepção de detalhes finos os quais são muito degradados pela visão, Figura 4.14.

4.4.15 A influência do mostrador na visão

Sistemas e dispositivos ópticos que aumentam o campo de visão (como por exemplo, binóculos, telescópios e microscópios) podem aumentar o tamanho da imagem e a magnitude do deslocamento da imagem na retina durante a vibração do dispositivo (Kinney, 1971). Quando considerado os efeitos da vibração em tais sistemas, é necessário considerar suas propriedades ópticas antes de concluir se a translação e rotação serão importantes. Os mostradores de avião são colimados por uma lente para que a imagem pareça vir de uma distância infinita, eliminando o principal problema produzido pelo movimento de translação da cabeça tendendo a melhorar o desempenho com baixas frequências de vibração (Wilson, 1974; Banbury, 1983; Mcleod e Griffin, 1989b). Mostradores montados em capacetes apresentam uma imagem colimada do mostrador montado na cabeça para os olhos, neste caso, o movimento de translação dos olhos, novamente causam pequeno problema mas os efeitos da rotação da cabeça podem ser severos. Em frequências de vibração ao redor de 5Hz existe um movimento apreciável de *pitch* da cabeça mas o reflexo vestibulo ocular estabiliza os olhos para manter constante a linha de visão. O mostrador esta preso a cabeça então tende a mover-se com ela. A oscilação relativa entre o mostrador vibrando e o olho estabilizado pode produzir significativo movimento da imagem na retina e degradar severamente a visão em baixas frequências, como na Figura 4.10 (Barnes, 1978; Furness e Lewis, 1978)

Existe a tendência de que no futuro os espelhos retrovisores sejam substituídos por um sistema de projeção de imagens constituído por uma ou mais telas de projeção e câmeras ao invés do atual sistema de reflexão por espelhos, portanto, será possível melhorar o posicionamento das telas de projeção dentro do habitáculo além de usar um sistema eletrônico estabilizador de movimento, conforme estudos realizados por Lewis em 1984, para mostradores de aeronaves.

Em baixas frequências, que são normalmente responsáveis pela dificuldade de leitura, o deslocamento angular subentendido no olho pelo movimento de translação do objeto em observação é geralmente maior do que o deslocamento angular dos olhos, o qual é compensado pelo movimento rotacional da cabeça devido ao reflexo vestibulo ocular.

4.5 Modelos de visão usados na indústria automobilística

Modelos esquemáticos do olho humano são uma importante ferramenta para o estudo da visão. Permitem entender melhor o papel de cada componente do olho para a qualidade das imagens formadas na retina. Iniciado por Gauss (1841), que estabeleceu as leis básicas que regem as propriedades para a formação de imagens, surgiram muitos modelos teóricos do olho, o primeiro de Moser (1844), depois, Listing, Helmholtz, Gullstrand, Emsley, Schwiegerling, Liou e Brennan e outros. O objetivo principal da modelação matemática do olho é entender como se dá a formação da imagem dos objetos do mundo exterior na retina e quais as relações dos componentes do olho com os problemas oftalmológicos comumente encontrados no ser humano. No campo da engenharia, a simulação e modelagem da visão têm possibilitado o desenvolvimento de dispositivos e sensores, além de auxiliar no desenvolvimento e otimização de sistemas que interagem com a visão humana.

Os modelos de campo de visão digital tradicionais têm usado cones de 30° e 45° de seção circular a partir da pupila para representa a visão central e periférica. Existem modelos mais complexos chamados de Modelos Digitais Humanos que consideram além dos limites de movimentação dos olhos e cabeça, a obstrução do campo de visão causada pela própria face do observador (Vinayak; Sibakar, 2009)

Em 1966, James Meldrum, desenvolveu um dos primeiros trabalhos científicos para estudar a posição dos olhos do motorista para uma população de consumidores de veículos de passeio. Em seu trabalho, Meldrum realizou um total de 2355 testes, e os resultados lhe permitiram construir um gráfico que representasse estatisticamente a distribuição normal variada da posição dos olhos da população de motoristas, Figura 4.15.

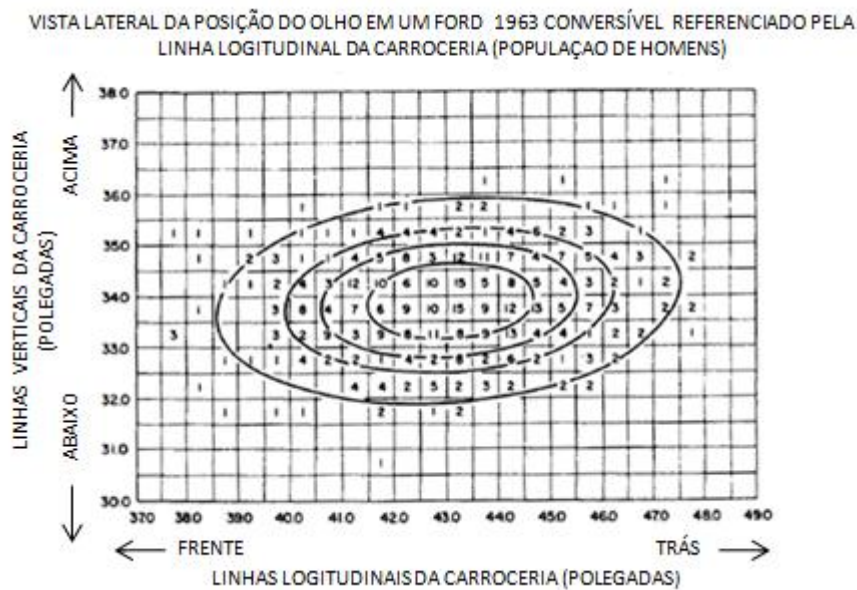


Figura 4.15 – Relação das elipses de tangência de visibilidade com o gráfico de distribuição de frequência .
Fonte: Meldrum (1966).

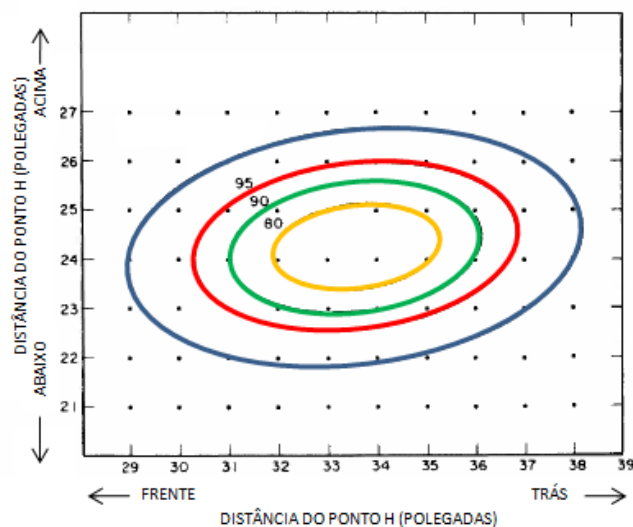


Figura 4.16 – Vista lateral da posição dos olhos (elipse combinada baseada nos 3 veículos estudados por Meldrum (1966)).

Ao se traçar uma reta ou plano tangente (campo de visão) ao contorno de uma das elipses dos olhos que represente o percentual de população desejado, a interpretação é dada: 100% da população que estiver abaixo da tangente terão visibilidade de no mínimo tudo o que estiver até a linha ou plano tangente, sendo que dentre essa mesma população parte terá visibilidade superior. O percentual faltante da população, que foi cortado na seleção da elipse,

que está acima da linha tangente, não terá visibilidade de objetos estiverem acima da tangente. No exemplo da Figura 4.17, o forro interno do teto limita o campo de visão vertical superior dos motoristas, por isso, 95% da população conseguirá observar no mínimo o sinal verde do semáforo, enquanto os outros 5% dos motoristas não enxergarão. Dentre os 95% dos motoristas que tem visibilidade do sinal verde, um percentual conseguirá até enxergar o sinal amarelo e vermelho, mas será a minoria.

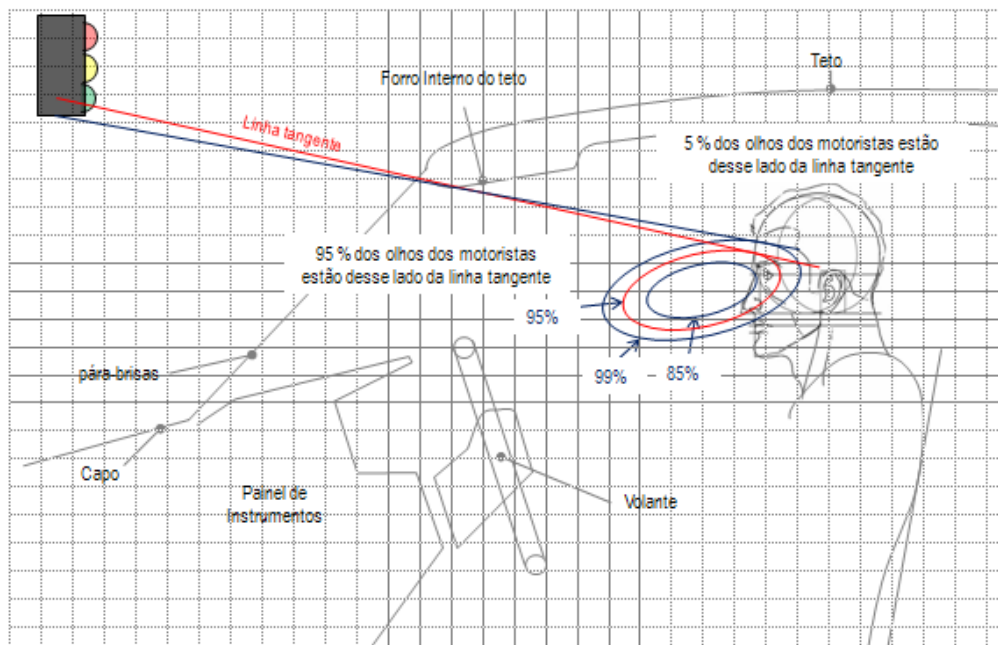


Figura 4.17 – Exemplo do tipo de estudo de visibilidade que pode ser feito com o uso da elipse dos olhos.

Os estudos de Meldrum auxiliaram a Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) a desenvolver normas e requisitos SAE J264:2004-06, SAE J941:2002-09, SAE J985:2009-02 e SAE J1050:2009-01 que normalizaram os estudos de package e visibilidade.

O campo de visão binocular é o campo de visão que pode ser visto pelos dois olhos ao mesmo tempo. O campo de visão ambinocular é o campo de visão total que pode ser visto pela sobreposição dos campos monoculares do olho direito e do olho esquerdo. Já o campo de visão periférica é o campo de visão que se estende no máximo 90 graus na região temporal.

No desenvolvimento de um espelho retrovisor SAE J985:2009-02, todos os esforços devem ser dados para manter a atenção visual do motorista para frente do veículo, ou seja, distrações à atenção do motorista ao que acontece na estrada devem ser mínimas. O movimento dos olhos e cabeça são dois importantes fatores que determinam a localização dos espelhos retrovisores. O modelo comumente usado no desenvolvimento dos espelhos

retrovisores, considera que os olhos podem se movimentar horizontalmente 30 graus para a direita e 30 graus para a esquerda e que a movimentação confortável é de 15 graus para cada lado. Já a cabeça pode movimentar 60 graus para cada lado, sendo que a movimentação confortável é de 45 graus para cada lado, Figura 4.18. A movimentação vertical dos olhos 45 graus para cima e 65 graus para baixo, sendo que a movimentação confortável é de 15 graus para cada lado. A movimentação vertical máxima da cabeça é de 50 graus para cima e 50 graus para baixo e a movimentação confortável é de 30 graus para cada lado, Figura 4.19.

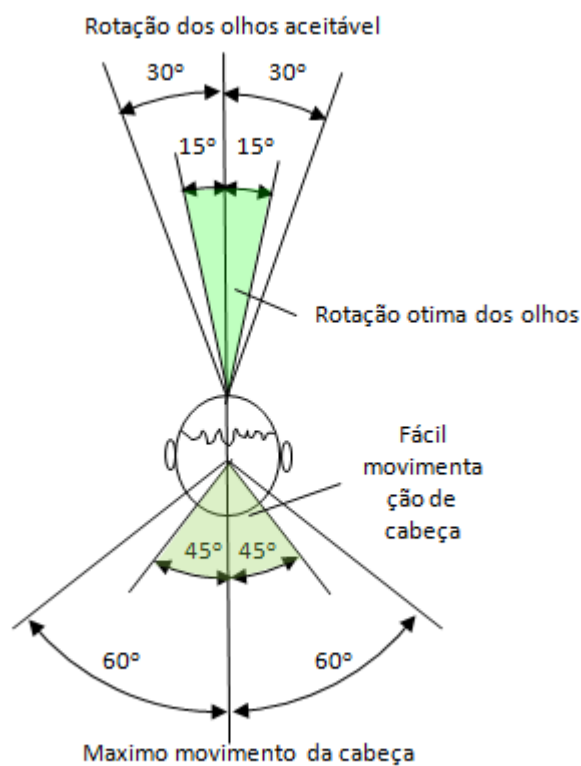


Figura 4.18 – Movimentação horizontal dos olhos e cabeça, dentro e fora do limite ideal de conforto.
Fonte: Autor “adaptado de” SAEJ985 (2009)

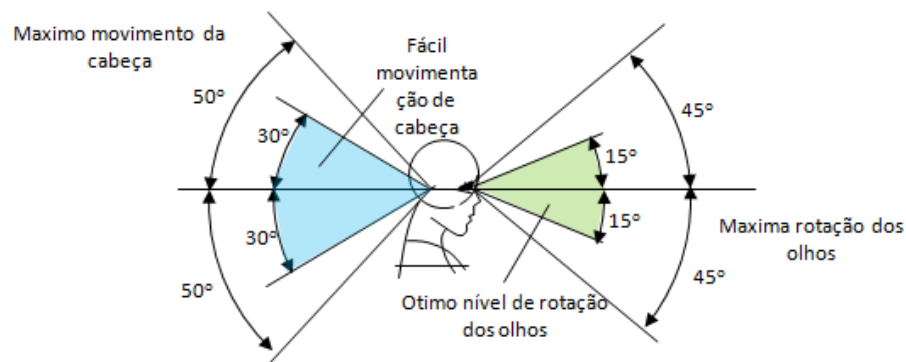


Figura 4.19 - Movimentação vertical dos olhos e cabeça, dentro e fora do limite ideal de conforto .
 Fonte: Autor “adaptado de” SAEJ985 (2009)

Para reduzir a fadiga do motorista e melhorar a eficiência visual de toda a retro visão, a SAE J985 recomenda que os espelhos retrovisores sejam localizados dentro do campo de visão binocular. Os espelhos, de preferência devem estar posicionados horizontalmente a 60 graus da linha de visão frontal (45 graus da movimentação confortável da cabeça mais 15 graus da movimentação dos olhos), podendo ser estendido para 75 graus dependendo da bitola do veículo. Se necessário, são permitidos ângulos de posicionamento maiores dentro dos limites de movimentação dos olhos e cabeça, porém não é recomendável que o motorista se submeta a esse desconforto por longos períodos de tempo. A posição vertical dos espelhos recomendada pela SAE J985, é de 45 graus (30 graus de movimentação confortável da cabeça mais 15 graus de movimentação confortável dos olhos). Nos espelhos posicionados dentro do campo de visão binocular, as imagens serão projetadas próximo da fóvea, aumentando a definição de forma e cores, a percepção de movimentos e reduzindo o tempo de reação da cabeça e olhos do motorista.

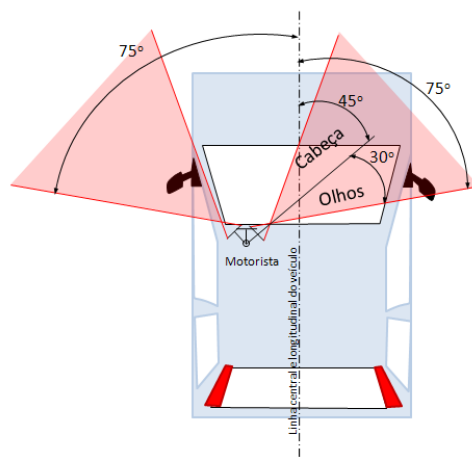


Figura 4.20 – Ilustração do posicionamento dos espelhos retrovisores segundo a SAE J985.

5 MODELO E SIMULAÇÃO

O modelo proposto a seguir avalia a variação do coeficiente angular da equação da reta de visão do motorista do decorrer do tempo de observação, permitindo analisar se a resposta do espelho retrovisor está dentro do limite confortável de percepção visual do motorista. O modelo completo é composto por: modelo de meio carro que adiciona os movimentos de *bounce* e *pitch* da carroceria, modelo de espelho retrovisor que posiciona a lente refletora no espaço dadas as excitações oriundas da carroceria e aerodinâmica, um modelo de banco com motorista que determina a posição espacial dos olhos do observador, um modelo de um quarto de carro que define a posição vertical do veículo alvo na retaguarda. A distância entre o alvo na retaguarda e o observador é adotada como constante. O veículo alvo sofre a mesma excitação de pista sofrida pelo veículo da frente, porém com um atraso de tempo igual à relação da distância com a velocidade de deslocamento. São simuladas duas excitações de entrada, excitação da pista de rolagem e aerodinâmica (VIV). Para a excitação aerodinâmica foi usado o modelo simplificado de VIV de Strouhal, que relaciona a velocidade do veículo com o tamanho do espelho. A VIV excita verticalmente o corpo do espelho, provocando o deslocamento da lente refletora, o que causa uma mudança instantânea na linha de visão do motorista. A excitação da pista de rolagem é aproximada como uma função senoidal, equação (2.3), porém qualquer sinal de pista pode ser usado para análise e simulação.

5.1 Modelo da Reflexão da imagem

Para cada instante de tempo, o alvo, o motorista e o espelho apresentam uma diferente combinação geométrica da linha de visão. A variação do coeficiente angular da equação da reta de visão no tempo determina o limite confortável de percepção visual do motorista. As Figura 5.1 e a Figura 5.2, apresentam de forma simplificada a sequência de cálculos usada para determinação da equação da reta de visão e do seu coeficiente angular para a reflexão de imagem em um espelho retrovisor com lente plana e a construção geométrica esquemática da linha de visão. A Figura 5.3 apresentam também uma sequência de cálculos simplificada, usada na determinação da equação da reta de visão e do coeficiente angular para a reflexão da imagem em espelho retrovisor com lente convexa e a Figura 5.4, mostra a construção geométrica esquemática da linha de visão.

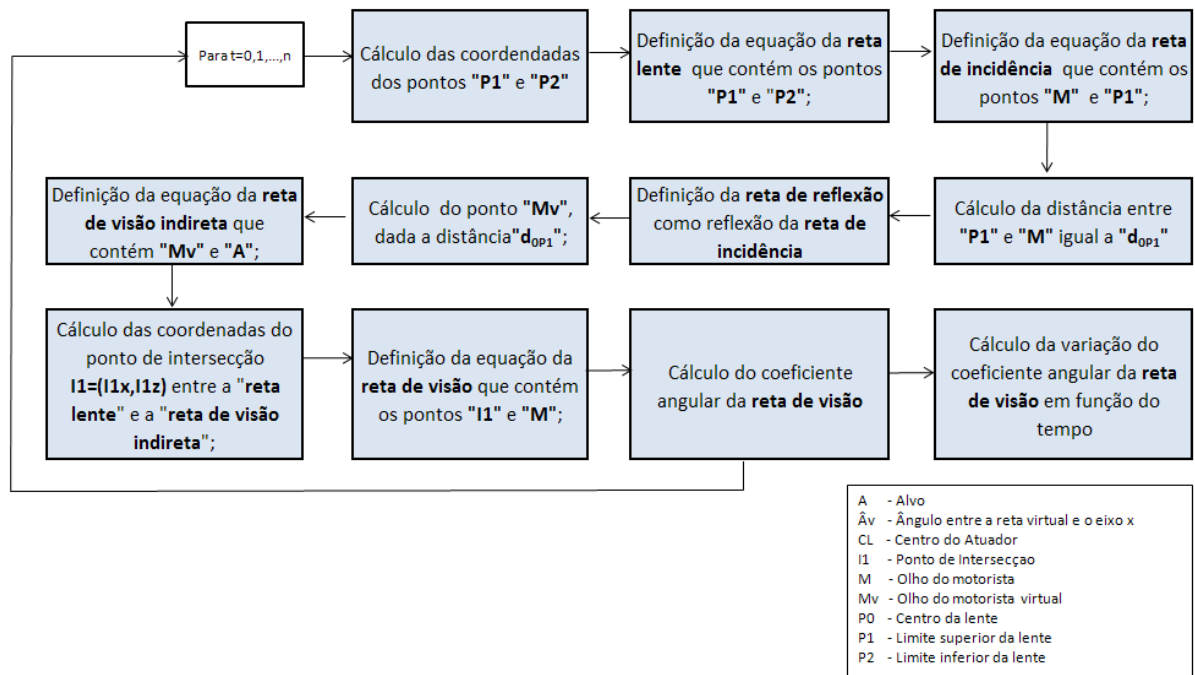


Figura 5.1 – Fluxograma do cálculo do coeficiente angular da equação da reta de visão de um espelho retrovisor com lente plana.

Fonte: Autor

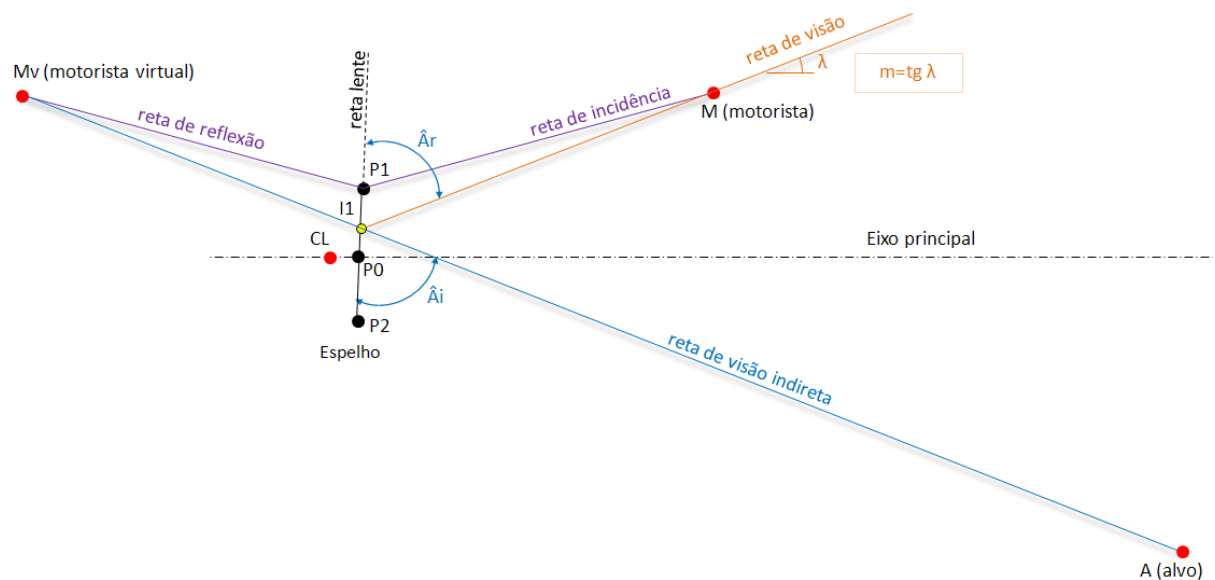


Figura 5.2 – Representação geométrica do coeficiente angular “m” da equação da reta de visão para um espelho retrovisor com lente plana.

Fonte: Autor

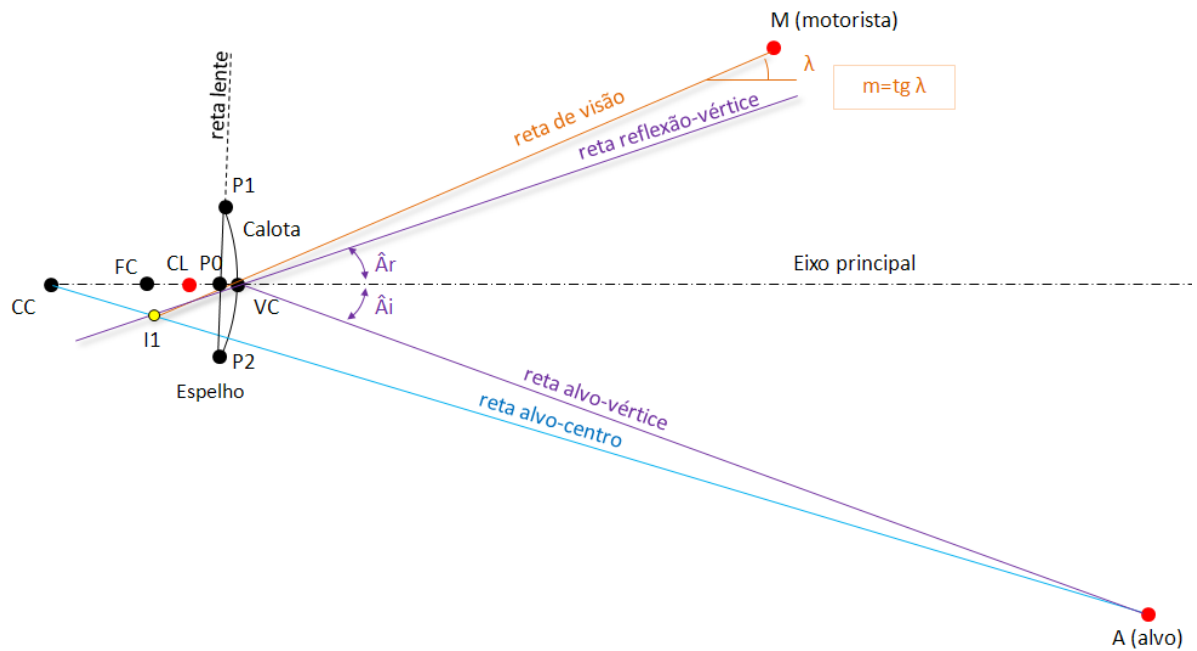


Figura 5.4 – Representação geométrica do coeficiente angular “m” da equação da reta de visão para um espelho retrovisor com lente convexa.

Fonte:Autor

5.2 Modelo dinâmico do veículo e alvo

Os dados de rigidez e amortecimento da suspensão, foram adotados do livro “Vehicle Dynamic Theory and Application” . Os valores de massa dos espelhos retrovisores usados são de três produtos desenvolvidos pela indústria automobilística e os valores de rigidez foram calculados por aproximação pela equação (5.1), baseado nos valores de frequência natural encontrada em testes experimentais para cada produto. Os efeitos do amortecimento do espelho e do pneu foram desconsiderados nas análises, os demais dados usados nas simulações são apresentados na Tabela 5.1.

$$k_e = (2\pi \cdot f_e)^2 \cdot m_e \quad (5.1)$$

k_e : Rigidez do espelho

f_e : Frequência de ressonância do espelho (Hz)

m_e : Massa do espelho (kg)

A entrada da pista de rolagem usada nos dois modelos é descrita pela equação (5.2). A excitação da pista atuante no eixo traseiro é determinado pela relação (5.3), que é a mesma excitação do eixo dianteiro com o atraso de entrada de entre-eixos. O veículo alvo na retaguarda sofre a mesma excitação do perfil de elevação da pista, porém com o atraso determinado pela relação (5.4).

$$U1_A(t) = A. \sin(2\pi. v. V. t) \quad (5.2)$$

$$U3(t) = U1 \left(t - \frac{a + b}{V} \right) \quad (5.3)$$

$$U_{alvo}(t) = U1 \left(t - \frac{a + b + d_A}{V} \right) \quad (5.4)$$

U_1 : deslocamento vertical da pista na roda dianteira

V : velocidade do veículo

v : número de ondas por metro de pista

a : distância entre o eixo dianteiro e o CG do veículo

b : distância entre o eixo dianteiro e o CG do veículo

t : tempo

d_A : distância entre o eixo traseiro do veículo principal e o alvo

A posição vertical do alvo com a variação do tempo foi determinada com o modelo de um quarto de carro apresentado na Figura 5.5.

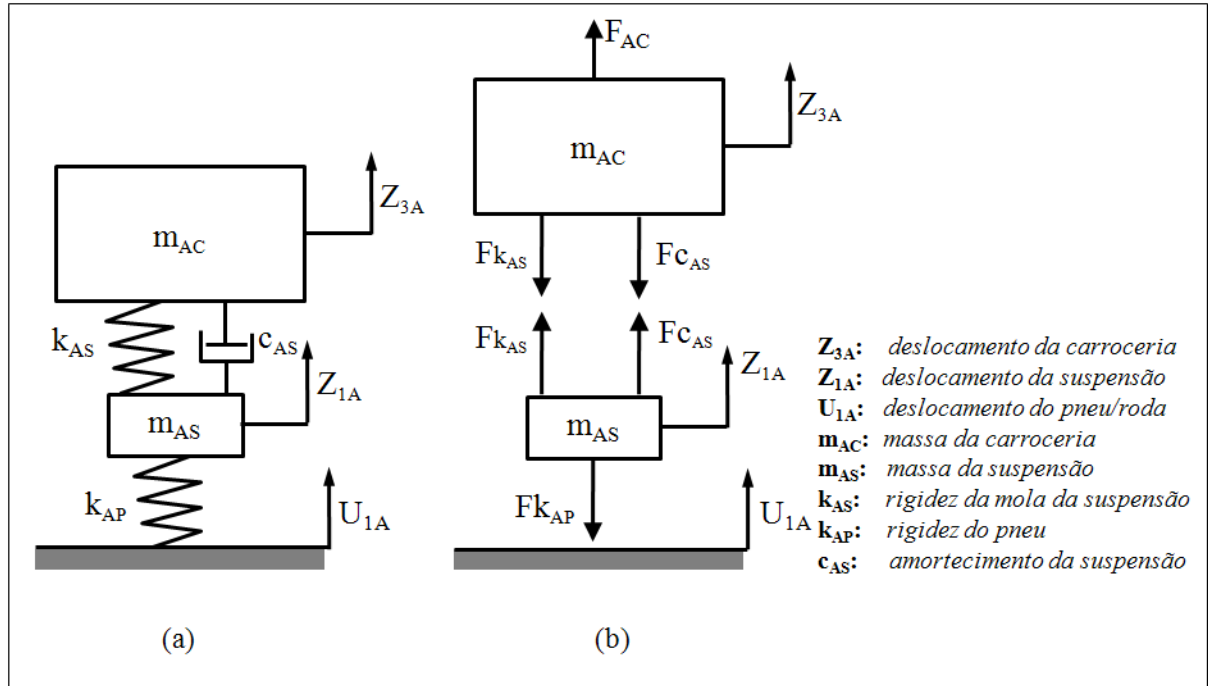


Figura 5.5 – Modelo de um quarto de carro com dois graus de liberdade usado para determinar a posição do alvo em função do tempo.

A equação diferencial (5.5) representa a aceleração vertical da massa do veículo alvo:

$$\ddot{Z}_{4A} = Z_{1A} \left(\frac{k_{AS}}{m_{AC}} \right) + Z_{2A} \left(\frac{c_{AS}}{m_{AC}} \right) + Z_{3A} \left(-\frac{k_{AS}}{m_{AC}} \right) + Z_{4A} \left(-\frac{c_{AS}}{m_{AC}} \right) \quad (5.5)$$

A equação diferencial (5.6) representa a aceleração vertical da massa não suspensa do veículo alvo:

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_{2A} = & Z_{1A} \left(-\frac{k_{AS}}{m_{AS}} - \frac{k_{AP}}{m_{AS}} \right) + Z_{2A} \left(-\frac{c_{AS}}{m_{AS}} \right) + Z_{3A} \left(\frac{k_{AS}}{m_{AS}} \right) \\ & + Z_{4A} \left(\frac{c_{AS}}{m_{AS}} \right) + U_{1A} \left(\frac{k_{AP}}{m_{AS}} \right) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Tabela 5-1- Dados de simulação usados

Parametros		Unidade [S.I]	Valores
ce1	amortec. do espelho diant	[Ns/m]	0
ce2	amortec. do espelho tras.	[Ns/m]	0
cs1	amortec. susp diant	[Ns/m]	1000
cs2	amortec. susp tras.	[Ns/m]	1000
cp1	amortecimento 1 do espelho	[Ns/m]	0
cp2	amortecimento 2 do espelho	[Ns/m]	0
d3	dist. da mola diant do espelho ao CG da carroceria	[m]	0.04
d4	dist. da mola tras. do espelho ao CG da carroceria	[m]	0.3400
b	dist. susp traseira ao CG da carroceria	[m]	1.5
d1	distancia da mola frontal do espelho ao seu CG	[m]	0.03
d2	distancia da mola traseira do espelho ao seu CG	[m]	0.03
a	distancia susp diant. ao CG da carroceria	[m]	1.3
fe	frequencia natural do espelho (dado experimental)	[Hz]	(55), (48.5) e (34)
mc	massa da carroceria	[kg]	375
ms1	massa da suspensão diant	[kg]	75
ms2	massa da suspensão tras.	[kg]	75
me	massa do espelho	[kg]	(1.200), (0.867) e (1.173)
Jc	momento de inercia da carroceria	[kg.m ⁴]	1100
Je	Momento de inércia do espelho	[kg.m ⁴]	1000
ke1	rigidez da mola 1 do espelho	[N/m]	calculado
ke2	rigidez da mola 2 do espelho	[N/m]	calculado
ks1	rigidez da mola da suspensão dianteira	[N/m]	35000
ks2	rigidez da mola da suspensão traseira	[N/m]	35000
kp1	rigidez da mola pneu diant	[N/m]	193000
kp2	rigidez da mola pneu tras.	[N/m]	193000
V	velocidade de deslocamento do veiculo	[km/h]	(60) e (120)

5.3 Modelo completo

A Figura 5.6, representa o esquema de um modelo de meio carro proposto com o espelho retrovisor com dois graus de liberdade. Neste modelo, avalia-se o movimento relativo de *bounce* e *pitch* entre o observador e o alvo. Esse movimento relativo provoca o deslocamento do objeto virtual refletido excitando o sistema vestibulo-ocular, que é responsável por manter o objeto visual o mais próximo possível da fóvea (na retina).

Este modelo de meio carro adiciona o efeito da rotação da lente refletora, e compara os efeitos da convexidade da lente refletora como um potencial filtro de redução de amplitudes de deslocamento. A Tabela 5.3, mostra a correlação de deslocamentos, velocidades e acelerações envolvidas no modelo.

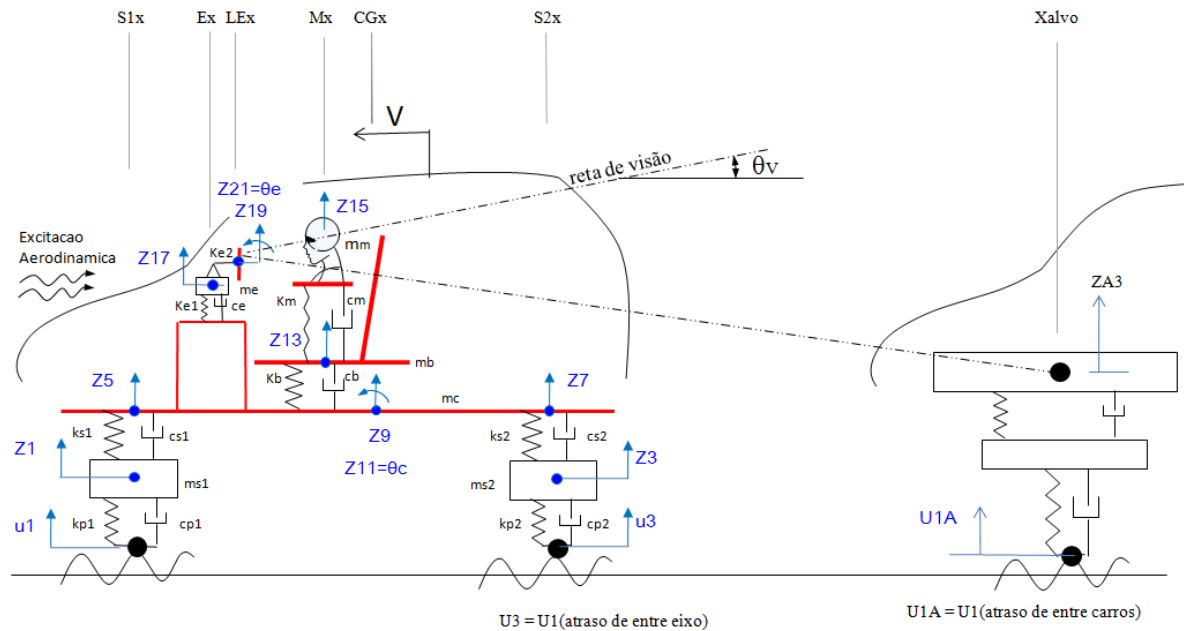


Figura 5.6 – Esboço do modelo de meio carro com a projeção da reta de visão do motorista à imagem virtual do alvo.

Fonte: Autor

Tabela 5-2 – Tabela de correlação de deslocamento, velocidade e aceleração de um modelo de um quarto de carro com espelho retrovisor.

Deslocamento	Velocidade	Aceleração	
Z	$\dot{Z}$	$\ddot{Z}$	
Z_1	Z_2	$\dot{Z}_2$	Suspensão dianteira
Z_3	Z_4	$\dot{Z}_4$	Suspensão traseira
Z_9	Z_{10}	$\dot{Z}_{10}$	Vertical da carroceria
Z_{11}	Z_{12}	$\dot{Z}_{12}$	Rotação da Carroceria
Z_{13}	Z_{14}	$\dot{Z}_{14}$	Vertical do Banco
Z_{15}	Z_{16}	$\dot{Z}_{16}$	Vertical do motorista
Z_{17}	Z_{18}	$\dot{Z}_{18}$	Vertical do espelho
Z_{19}	Z_{20}	$\dot{Z}_{20}$	Vertical da Lente
Z_{21}	Z_{22}	$\dot{Z}_{23}$	Rotação da Lente
U_1	U_2	$\dot{U}_2$	Pista na roda frontal
U_3	U_3	$\dot{U}_4$	Pista na roda traseira

A Figura 5.7, apresenta o deslocamento angular em função do tempo para um espelho montado a 540 mm de distância do motorista. Observa-se claramente que a amplitude de deslocamento é minimizada quando a reflexão ocorrem em lente convexa.

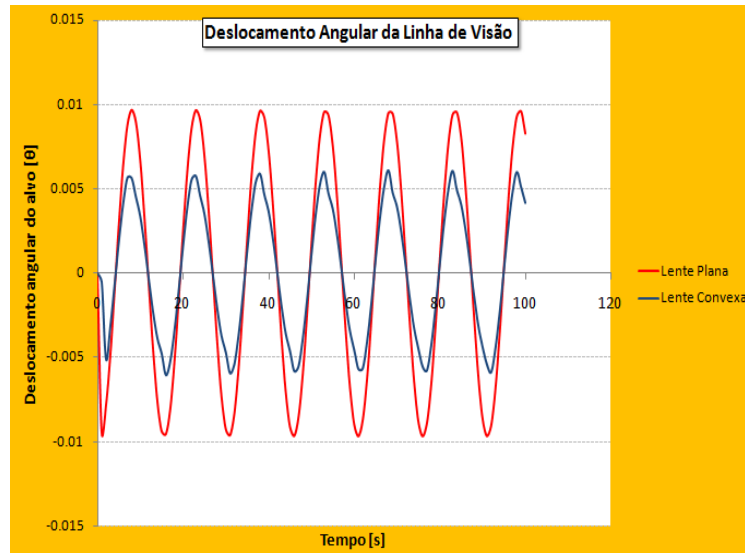


Figura 5.7 – Deslocamento angular da linha de visão para o motorista, 540mm afastado de uma lente plana e outra convexa.
Fonte: Autor

A Figura 5.8, apresenta o deslocamento angular em função do tempo para um espelho montado a 1500 mm de distância do motorista, sendo equivalente a distância do espelho retrovisor do lado direito. Observa-se que quanto maior a distância de observação menor é a amplitude de deslocamento, conseqüentemente a percepção visual é menos afetada.

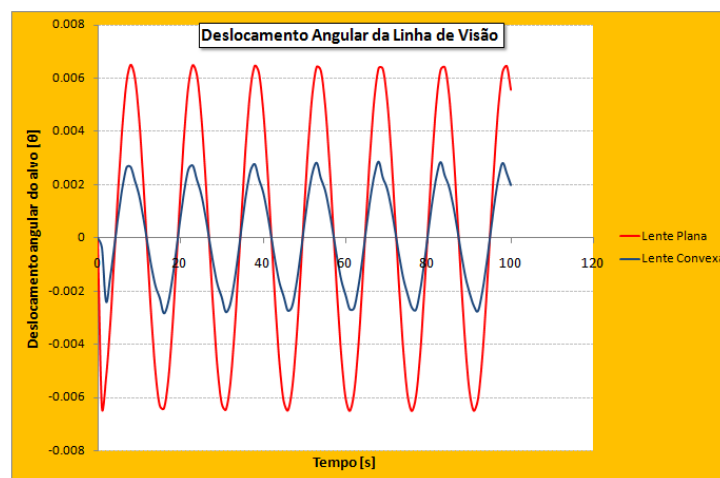


Figura 5.8 – Motorista a 1500mm da lente, condição equivalente ao espelho do passageiro
Fonte: Autor

A Figura 5.9, apresenta o deslocamento angular em função do tempo para um espelho montado a 540mm de distância do motorista, para um veículo se deslocando a 112Km/h.

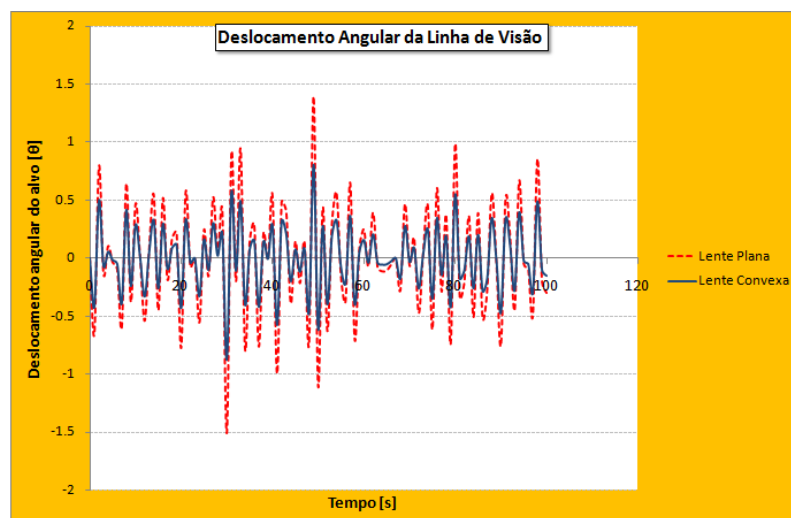


Figura 5.9 – Deslocamento angular do alvo observado de um veículo a 112km/h
Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

As montadoras de automóveis mantêm um complexo grupo de qualidade que trabalha focado na solução dos problemas de garantia reportados pelos clientes através das concessionárias. Além dos problemas reportados pelo sistema da qualidade, existem outras formas de pesquisa que são realizadas com os clientes e potenciais clientes da marca objetivando a compreensão do que se chama a “voz do cliente”, ou seja, o desejo do cliente com relação ao funcionamento dos componentes do veículo. A “voz do cliente”, é traduzida em características técnicas, por exemplo, “o espelho fica tremendo e não consigo ver nada”, é traduzido como “vibração no espelho prejudicando a percepção da imagem”. A tradução do sentimento do cliente é uma das fases mais importantes, e exige muita sensibilidade do engenheiro na sua compreensão. Dentre todas as reclamações reportadas nos diferentes métodos de pesquisa de qualidade para os espelhos retrovisores externos, a que se destaca é a distorção de imagem causada pela vibração excessiva da peça. As montadoras adotam algumas especificações no projeto de espelhos retrovisores, como por exemplo a primeira frequência de ressonância acima de 50Hz. Acredita-se que frequências (de primeiro modo) abaixo de 50 Hz estão relacionadas com uma maior incidência de reclamação dos condutores. Para o motorista, a dificuldade de interpretação de uma imagem refletida pode resultar em erro de percepção de velocidade de outros veículos se aproximando pela retaguarda. Outros motoristas relatam sensação de dor de cabeça, tontura ou enjôo, todas diretamente relacionadas com a segurança veicular e conforto. Sabe-se que a resposta dinâmica dos espelhos retrovisores depende das suas características estruturais como forma e material, porém, com a necessidade de redução de massa e custo, os engenheiros vêm substituindo os componentes estruturais metálicos, geralmente construídos em Alumínio, por polímeros estruturais como por exemplo a Poliamida reforçada com fibra de vidro. Como consequência do uso de novas matérias primas o desempenho dinâmico dos espelhos retrovisores está muito próximo do limite de estabilidade dinâmica “aceitável” que é atualmente praticado nos projetos de espelhos retrovisores, ou seja, qualquer variação não controlada dos parâmetros do projeto pode resultar em vibração, por isso, quanto antes o comportamento dinâmico do espelho retrovisor for conhecido, maior será a possibilidade de correção de projeto e menor será o impacto negativo de qualidade, custo e tempo.

Os resultados encontrados até o momento comprovam que a lente convexa reduz a amplitude de deslocamento do alvo observado. Tal redução de amplitude de deslocamento

angular prova que o uso de espelhos convexos, ou a alteração do raio da lente refletora podem ser usados como um parâmetro ajustável de projeto para redução da amplitude de vibração.

As simulações realizadas não foram conclusivas quanto à correlação dos limites de conforto da visão, (Griffin, 1996) (Leigh e Zee) para as condições de análise propostas no início do trabalho, mesmo assim, é importante mencionar que tal resultado pode estar relacionado com a simplificação do caso real, tridimensional, para o modelo, bidimensional, onde se multiplicam os graus de liberdade, adiciona-se os efeitos de roll, além de toda a complexa dinâmica de deslocamentos do motorista.

Diferentemente do que se esperava no início do trabalho, os efeitos aerodinâmicos encontrados não foram significativos como fonte excitadora de vibração para o modelo proposto, provavelmente por que a força de sustentação atuante sobre o corpo do espelho não seja suficiente para suprimir os efeitos da pista de rolagem sobre a carroceria, diferentemente dos resultados encontrados por Alam e Jaitlee onde seus experimentos consideram que a fonte excitadora é o gradiente de pressão sobre a lente refletora devido ao escoamento ao redor do corpo do espelho.

Mesmo obtendo resultados interessantes do ponto de vista matemático, o modelo proposto neste trabalho precisa ser aperfeiçoado e correlacionado a experimentos físicos que não foram realizados nesta pesquisa.

7 PERSPECTIVA DE TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao desenvolvimento de trabalhos futuros, é de fundamental importância a abordagem experimental de alguns casos permitindo o aperfeiçoar o modelo com dados experimentais.

A abordagem mais promissora sobre a influência da VIV em espelhos retrovisores é a abordagem de Leigh e Zee, considerando as pressões atuantes sobre a superfície da lente refletora.

Do ponto de vista estrutural, existe uma vasta área a ser explorada como o complexo comportamento dinâmico dos materiais plásticos usados atualmente na fabricação de espelhos retrovisores.

REFERÊNCIAS

ALAM F.; JAITLEE R. e tal. **Aerodynamic Effects on an Automotive Rear Side View Mirror.** (article)

ANDERSON, J. R.; MATESSA, M.; LEBEIRE, C. ACT-R: A theory of higher level cognition and its relation to visual attention. *Human Computer Interaction*, 12(4), 439-462, 1997.

BATCHELOR, G. K. **An Introduction to Fluid Dynamics.** 1. ed. Cambridge University, 1967.

BERRIHILL, ME.; CHIU, T. HUGHES, HC. **Smooth pursuit of nonvisual motion.** *Journal Neurophysiology* 96(1):461-5. PMID 16672304, Jul. 2006.

BLEVINS, R. D. **Flow-Induced Vibration.** New York: Krieger, 1990.

BLEVINS, R. D. **Applied Fluid Dynamics Handbook.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1984.

BLOHM ,G; CRAWFORD, J.D. **Computations for geometrically accurate visually guided reaching in 3-D space.** *Journal of Vision* 7(5):4,1-22, 2007.

BRUNO, O. M.; CARVALHO, L. A. V. **Óptica e Fisiologia da Visão.** 1.Ed. São Paulo: Roca, 2008.

CARRIE, I. G. **Fundamentals Mechanics of Fluids.** New York: MacGraw-Hill, 1974.

CARRUTH, D.; ROBBINS, B.; THOMAS, M.; MORAIS, A.; LETHERWOOD, M.; NEBEL, K. **Symbolic Model of Perception in Dynamic 3D Environments.** Proceedings of the 25th Army Science Conference, Orlando, FL, 2006.

CUNHA, L. D. **Vibração Induzida por Vórtices: Análise Crítica de Modelos Fenomenológicos.** 2005. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GILLESPIE, T. D. **Fundamental of vehicle dynamics.** [S.l.]: SAE, 1992.

HOMSI, E.; NARAIN, M. **Vibration control of body mounted plastic mirror design.** Detroit: SAE Technical Paper - 982312, 2004.

HUCHO, G.M., et al. **Aerodynamics of Road Vehicles.** [S.l.]: Butterworth-Heinemann

HWANG H. **Robust optimization of an automobile rearview mirror for vibration reduction.** [S.l.]: Springer, 2001.

[JASAR, R.N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application.** New York: Springer, 2008.
JOINER, W.N.; SHELHAMER, M. **Pursuit and saccadic tracking exhibit a similar dependence on movement preparation time.** *Exp Brain Research* 2006 Sep; 173(4):572-86
PMID 16550393

KAESLER, J.P.; STANEF, D.A. **Attenuation of rear view mirror vibration.** Australia: University of Adelaide, 2001.

KRAUZLIS, R.J.; LISBERGER S.G. **Temporal properties of visual motion signals for the initiation of smooth pursuit eye movements in monkeys.** *Journal Neurophysiology* 72(1):150-62. PMID 7965001, Jul. 1994.

LEIGH, R.J.; ZEE, D.S. **Neurology of eye movements.** 3.Ed. Philadelphia: Oxford University Press, 1999.

LOUNSBERRY, T. et al. **Laminar Flow Whistle on a Vehicle Side Mirror.** Detroit: SAE Technical Paper, 2007.

MARTINES, S.C.; MACKNIK, S.; HUBEL; DAVID, H. The role of fixation eye movements in visual perception. *Natural Reviews Neuroscience* 5(3):229-240 (2004). doi:10.1038/nrn1348.

MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas Dinâmicos.** 2. Ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MUNSON, B. R. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.** [S.l.]: Blucher, 1997.

MELDRUM, J. F. Automobile Driver Eye Position. Detroit: SAE Technical Paper 650464, 1966.

OGAWA, S.; KAMIOKA, T. **Review of aerodynamic noise prediction using CFD.** Detroit: SAE Technical Paper, 1999.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas.** 4. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory.** 8. ed. Germany: Springer, 2003.

SONG, F.; AYORINDE, E. O. **Influence of material property on vibration characteristics of the automotive rearview mirror.** Jornal of Thermoplastic Composite Materials. Sage Publication, 2005.

VAN DYKE. M. **An Albumn of Fluid Motion.** 1. ed. [S.l.]:Parabolic, 1982.

VINAYAK ; SIBAKAR S. **Geometric Estimation of FoV for Vision Modeling in DHM.** Indian Institute of Science. SAE Technical Paper, 2009.

WATKINS, S. **On The Causes of Image Blurring in External Rear View Mirrors.** Detroit: SAE Technical Paper, 2004.

WATKINS, S; OSWALD, G. **The flow field of automobile adds-on – with particular reference to the to the vibration of external mirrors.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999.

SAE J264:2004-06. **Vision Glossary.**

SAE J941:2002-09. **Motor Vehicle Drivers' Eye Location.**

SAE J985:2009-02. **Vision Factors Considerations in Rearview Mirror Design.**

SAE J1050:2009-01. **Describing and Measuring the Driver's Field of View.**

GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration.** Ed. 1996. Great Britain: Elsevier Ltd, 2004.