

MARCELO CELESTINO

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO DE
CALIBRAÇÃO DE VELOCÍMETRO AUTOMOTIVO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

**São Paulo
2007**

MARCELO CELESTINO

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE DISPOSITIVO DE
CALIBRAÇÃO DE VELOCÍMETRO AUTOMOTIVO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

ORIENTADOR:
Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 11 de Abril de 2007.

Marcelo Celestino

Oswaldo Horikawa

FICHA CATALOGRÁFICA

Celestino, Marcelo

Estudo e implementação de dispositivo de calibração de velocímetro automotivo / M. Celestino. – São Paulo, 2007.
101p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Medição de velocidade 2.Processamento de imagens 3.Fluxo óptico
4.Velocímetro sem contato I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me soprou o espírito.

Aos meus pais, que me proporcionaram o renascimento.

À minha esposa, pelo estímulo e incansável apoio.

E especialmente ao amigo e orientador Prof. Dr. Oswaldo Horikawa, pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho reúne elementos para a análise dos principais problemas e dificuldades inerentes à implementação de um dispositivo para a aferição de velocímetros de veículos automotores, de forma a atender a legislação prevista no código nacional de Trânsito, determinada pela Portaria n.º 115 de 1998, que define erros máximos permitidos para velocímetros de $\pm 5\text{km/h}$ para velocidades de até 100km/h e de $\pm 5\%$ para velocidades acima de 100km/h .

Inicialmente são apresentados e comparados os principais métodos de medição de velocidade abordados na literatura. A partir desta análise, é implementado um método inovador decorrente do efeito de escorrimento ou *blur*, onde, através do estudo das características e regularidades contidas em uma única imagem borrada, será determinada a velocidade da superfície em análise.

A partir de uma bancada que simula o solo em movimento e, utilizando-se uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*) e um *frame grabber*, fez-se a aquisição de imagens da superfície asfáltica em movimento. A informação de velocidade pôde então ser determinada, através da análise das regularidades contidas na imagem dinâmica devido ao efeito de escorrimento ou efeito *blur*.

Obteve-se resultados suficientes para a aferição de velocímetros, com erros máximos abaixo de 5% . A técnica desenvolvida e avaliada na prática através de uma bancada que simula o asfalto em movimento, demonstrou uma precisão de $0,8\%$ numa faixa de velocidades de 0 a 20km/h , de $1,5\%$ numa faixa de velocidades de 20 a 60km/h e de $2,5\%$ numa faixa de velocidades de 60km/h a 80km/h . Finalmente foram investigados os fatores preponderantes que limitaram os erros nesta ordem de grandeza.

ABSTRACT

This work gathers elements for the study and analysis of the main problems and difficulties inherent to the implementation of a device to the gauging of a speedometer of automotive vehicles, in order to meet the foreseen legislation described by the governmental decree n° 115 from 1998, which defines the maximum allowed error for speedometers of $\pm 5\text{km/h}$ for speeds till 100km/h and $\pm 5\%$ for speeds above 100km/h .

From this study, a new method, based on the blur effect, is proposed. In the method, the speed of the target surface is determined by analyzing the characteristics and regularities contained in a single blurred image.

Starting from a device that simulates the soil movement and, using a CCD (*Charge Coupled Device*) camera and a *frame* grabber, the acquisition of images of the moving asphalt surface was done. The information of speed then could be determined, through the study of the regularities contained in the dynamic image due to the blur effect.

The necessary results for the gauging have been achieved with success, with precision below 5% . The developed and evaluated technique in practice through a device that simulates the asphalt in movement has demonstrated a precision of $0,8\%$ in a range of speeds from 0 to 20km/h , $1,5\%$ in a range of speeds from 20km/h to 60km/h and $2,5\%$ in a range of speeds from 60km/h to 80km/h . Finally, it was investigated the preponderant factors which have limited the errors in this order of greatness.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos	1
1.2.	Organização da dissertação.....	2
2.	TÉCNICAS EXISTENTES PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE	4
2.1.	Técnicas contactantes e técnicas não-contactantes	5
2.2.	Técnicas baseadas no efeito Doppler	7
2.2.1.	Técnicas baseadas em espalhamento de laser	8
2.2.2.	Técnicas baseadas em microondas.....	9
2.2.3.	Técnicas baseadas em ondas de rádio	10
2.3.	Técnicas baseadas em GPS.....	11
2.4.	Técnicas baseadas em processamento de imagens	13
2.5.	Comparação entre as técnicas existentes	14
3.	TÉCNICAS BASEADAS EM PROCESSAMENTO DE IMAGENS (PI) .	16
3.1.	Determinação do fluxo óptico	17
3.2.	Revisão das técnicas existentes.....	20
3.2.1.	Métodos diferenciais	21
3.2.2.	Métodos baseados em regiões	22
3.2.3.	Métodos baseados em contornos.....	23
3.2.4.	Métodos baseados em energia.....	24
3.3.	Implementação do método baseado em regiões	26
3.4.	Limitação dos métodos abordados na literatura.....	29
3.5.	Apresentação de propostas alternativas	30
3.5.1.	Método utilizando efeito estroboscópico	32
3.5.2.	Método utilizando efeito de escorrimento ou <i>Blur</i>	35

4.	MÉTODO DE ESCORRIMENTO OU <i>BLUR</i>	36
4.1.	<i>Shutter Speed</i> ou Velocidade do obturador.....	36
4.2.	Definição do efeito de escorrimento ou <i>blur</i>	37
4.3.	Modelo matemático do efeito <i>blur</i>	39
4.4.	Análise do efeito <i>blur</i> em uma superfície asfáltica	44
4.4.1.	Composição estrutural da mistura asfáltica.....	44
4.4.2.	Superfície asfáltica borrada.....	45
4.5.	Desenvolvimento da técnica <i>blur</i>	46
4.5.1.	Eliminação das bordas da imagem original	46
4.5.2.	Equalização do histograma	47
4.5.3.	Contagem de segmentos contínuos de mesmo tamanho	51
4.5.4.	Tamanho dos pedriscos da camada asfáltica.....	56
4.5.5.	Análise de erros de medição	58
5.	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA, EXPERIMENTO E ANÁLISE	60
5.1.	Figura esquemática do equipamento implementado	60
5.2.	Equipamento construído	61
5.2.1.	Visão geral do dispositivo implementado	61
5.2.2.	Aquisição de imagens em movimento	62
5.2.3.	Dispositivo de geração de velocidade	63
5.2.4.	Sistema de tração.....	64
5.2.5.	Sensor para medição da velocidade	65
5.2.6.	Seletor de velocidades.....	66
5.2.7.	Superfície asfáltica	67
5.4.	Tamanho da amostragem de imagens	71
5.5.	Relação entre o número de <i>pixels</i> e o deslocamento em mm.....	73
5.6.	Resultados obtidos a diferentes velocidades	73
5.7.	Determinação do tempo ideal de abertura do <i>Shutter</i>	76
5.8.	Análise experimental dos erros de medição.....	77
5.9.	Diagrama de blocos do procedimento implementado.....	79

6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
6.1.	Modelo e hipóteses consideradas	81
6.2.	Análise dos resultados experimentais.....	84
7.	CONCLUSÕES.....	90
8.	PERSPECTIVAS FUTURAS	91
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
10.	ANEXO A – CÓDIGO DO PROGRAMA PRINCIPAL.....	97
11.	ANEXO B – CÓDIGO DE “SIMULAÇÃO DE ESTROBOSCÓPIO”	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. – Aferição de velocímetro utilizando roda padrão [URL 5]	1
Figura 2.1. – Sistema contactante	5
Figura 2.2. – Roda padrão [URL 5]	6
Figura 2.3. – Sistema não contactante	6
Figura 2.4. – Configuração típica de um sensor de efeito Doppler [URL 6]	7
Figura 2.5. – Geração de <i>speckles laser</i> em uma superfície irregular [URL 6]	8
Figura 2.6. – Aparelho baseado no espalhamento laser [URL 6]	8
Figura 2.7. – Sensor de microondas [URL 4].	9
Figura 2.8. – Sensor de ondas de rádio [URL 5]	10
Figura 2.9. – Posicionamento do sensor [URL 5]	11
Figura 2.10. – Sensor GPS [URL 16]	11
Figura 2.11. – Exemplos de aplicação do sensor GPS [URL 16]	12
Figura 2.12. – Princípio básico da técnica de processamento de imagens	13
Figura 3.1. – Princípio básico da técnica de processamento de imagens	16
Figura 3.2. – Fluxo óptico de uma imagem em movimento	17
Figura 3.3. – Registro de uma imagem em <i>frames</i> consecutivos	18
Figura 3.4. – Representação de velocidade de uma partícula	19
Figura 3.5. – Imagem $I_0(x)$, no instante t_0	22
Figura 3.6. – Imagem $I_0(x;s)$, no instante t_1	22
Figura 3.7. – Imagem original	23
Figura 3.8. – Contornos originados	23
Figura 3.9. – Imagem no instante t_0	26
Figura 3.10. – Imagem deslocada horizontalmente no instante t_1	26
Figura 3.11. – Imagem original	26
Figura 3.12. – Imagem deslocada	26
Figura 3.13. – Imagem real \times matriz de pixels	28
Figura 3.14. – Correlação de diferentes áreas	28
Figura 3.15. – Fluxo óptico	28

Figura 3.16. – FOV (Field of View) da câmera	29
Figura 3.17. – Intervalo entre frames sucessivos	30
Figura 3.18. – Câmera de altíssima velocidade Multrecam NAC fx RX6.	30
Figura 3.19. – Carta de tempos para aquisição com estroboscópio	32
Figura 3.20. – Imagens sobrepostas geradas com estroboscópio	33
Figura 3.21. – Registro do deslocamento	33
Figura 3.22. – Correlação entre sub-imagens deslocadas	34
Figura 3.23. – Estroboscópio Digital Lutron DT-2269	34
Figura 3.24. – Comparação de métodos de aquisição	35
Figura 4.1. – Imagem Original	37
Figura 4.2. – Imagem Borrada (com <i>blur</i>)	37
Figura 4.3. – Identificação de Segmentos em uma fotografia dinâmica	38
Figura 4.4. – Imagem ideal $f(x,y)$	40
Figura 4.5. – Imagem com <i>blur</i> $g(x,y)$	40
Figura 4.6. – Imagem ideal sem <i>blur</i>	41
Figura 4.7. – Imagem ideal com <i>blur</i>	41
Figura 4.8. – Imagem com <i>blur</i> contendo diversos segmentos de reta	42
Figura 4.9. – Gráfico de contagem de segmentos	43
Figura 4.10. – Mistura asfáltica convencional	44
Figura 4.11. – Fotografia estática de um segmento de asfalto	45
Figura 4.12. – Fotografia dinâmica de um segmento de asfalto	45
Figura 4.13. – Distorções produzida nas bordas	46
Figura 4.14. – Os quatro histogramas característicos básicos	48
Figura 4.15. – Transformação de equalização de histograma	49
Figura 4.16. – Imagem original	49
Figura 4.17. – Imagem com histograma equalizado	49
Figura 4.18. – Imagem borrada original	50
Figura 4.19. – Imagem com histograma equalizado	50
Figura 4.20. – Histograma da imagem original	50
Figura 4.21. – Histograma equalizado	50

Figura 4.22. – Imagem com histograma equalizado	51
Figura 4.23. – Imagem modificada com mapa de cores	51
Figura 4.24. – Imagem tridimensional	52
Figura 4.25. – Representação de um segmento em <i>pixels</i>	53
Figura 4.26. – Matriz contendo <i>pixels</i> com intensidade maiores que 120	53
Figura 4.27. – vetor de <i>pixels</i>	54
Figura 4.28. – Gráfico de contagem de segmentos	55
Figura 4.29. – Centros de massa das pedras	56
Figura 4.30. - Gráfico de uma imagem estática	57
Figura 5.1. – Esquemático do equipamento implementado	60
Figura 5.2. – Dispositivo de geração de velocidade	61
Figura 5.3. – Câmera CCD (<i>Charge Coupled Device</i>)	62
Figura 5.4. – <i>Frame Grabber</i>	62
Figura 5.5 – Imagem simulada do asfalto em movimento	62
Figura 5.6. – Estrutura do dispositivo de velocidade	63
Figura 5.7. – Sistema de tração	64
Figura 5.8. – Sensor Hall	65
Figura 5.9. – Seletor de velocidades	66
Figura 5.10. – Superfície asfáltica	67
Figura 5.11. – Segmento curto	68
Figura 5.12. – Segmento longo	68
Figura 5.13. – Segmento longo 3D	69
Figura 5.14. – Diferentes Thr (<i>Threshold</i>) de um segmento longo	69
Figura 5.15. – Curva de contagem de segmentos claros	71
Figura 5.16. – Máximo comprometido	71
Figura 5.17. – Comparação entre amostras de diferentes tamanhos	72
Figura 5.18. – Número de <i>pixels</i> por cm	73
Figura 5.19. – Medição de diferentes deslocamentos	74
Figura 5.20. – Comparação de diferentes velocidades	75
Figura 5.21. – Diagrama de blocos do procedimento implementado	79

Figura 6.1. – Velocidade Real X Velocidade Calculada	87
Figura 6.2. – Escolha de uma câmera ideal	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Técnicas existentes para medição de velocidade	4
Tabela 2 – Comparação entre Técnicas existentes	15
Tabela 3 – Velocidade × tempo de abertura do <i>shutter</i>	77
Tabela 4 – Erros da velocidade calculada	77
Tabela 5 – Erro da velocidade real	78
Tabela 6 – Erros (velocidade real x velocidade calculada)	78
Tabela 7 – Aquisições a 2,0 ms	85
Tabela 8 – Deslocamentos acima de 50 <i>pixels</i>	85
Tabela 9 – Aquisições a 1,0 ms	86
Tabela 10 – Aquisições com deslocamentos abaixo da faixa indicada	86
Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos experimentalmente	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CM	Centro de Massa
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FOV –	<i>Field Of View</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
LASCA	<i>Laser speckle contrast analysis</i>
MATLAB®	Software de implementação de cálculos computacionais
NTSC	<i>National Television Systems Committee</i>
PI	Processamento de imagens
<i>Thr</i>	<i>Threshold</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos

Segundo a Portaria n.º 115, de 1998 do INMETRO, a determinação da velocidade dos veículos automotivos em instrumentos de medição, é fator essencial para a segurança dos condutores, que devem respeitar a legislação prevista no código nacional de Trânsito.

Assim, torna-se essencial que o registro do parâmetro de velocidade, por medidores de velocidade para veículos, se situem dentro dos limites estabelecidos no Regulamento Técnico Metrológico apresentado na Portaria n.º 115 do INMETRO. Esta base determina que os erros máximos admitidos para medição em serviço de veículos automotores, sejam de $\pm 5\text{km/h}$ para velocidades até 100km/h e de $\pm 5\%$ para velocidades acima de 100km/h . Assim, assume-se que o desvio padrão 2σ seja inferior a 5% .

A partir desta referência, pretende-se elaborar uma técnica, e construir um dispositivo que forneça parâmetros confiáveis para a aferição de velocímetros de veículos automotivos, atendendo a legislação vigente. [INMETRO, Portaria n.º 115, 1998].



Figura 1.1. – Aferição de velocímetro utilizando roda padrão [URL 5]

Atualmente, a forma mais comum de se aferir velocímetros no final de uma linha de produção de veículos, é através de rodas contactantes acopladas ao veículo, conforme mostra a figura 1.1. Nesta abordagem, a roda padrão permanece em contato com o solo durante a aferição do velocímetro.

Todavia, este método apresenta algumas restrições, principalmente quando há escorregamento entre a roda de calibração e o solo, implicando em erros de medição. O escorregamento pode ocorrer principalmente quando a superfície encontra-se molhada. Isto leva a orientar a abordagem da dissertação para a análise das técnicas não contactantes, onde não há contato entre o sensor e a superfície de rodagem do veículo.

O objetivo deste trabalho é implementar um dispositivo não contactante capaz de aferir velocímetros automotivos no final de uma linha de produção de veículos, a fim de garantir a repetibilidade amostral de indicação de velocidade.

1.2. Organização da dissertação

O presente trabalho é organizado em oito capítulos que, a seguir, são descritos sucintamente.

No presente capítulo, são discriminadas as variáveis de contorno da dissertação, determinados os objetivos a serem abordados e metas a serem atingidas.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica referente às técnicas existentes para a determinação da velocidade de superfícies, abordando métodos contactantes e não-contactantes, incluindo técnicas utilizando o princípio do efeito Doppler e técnicas utilizando PI (Processamento de imagens).

No capítulo 3 apresenta-se a revisão bibliográfica referente às principais técnicas baseadas em processamento de imagens para a determinação do fluxo óptico, definido como sendo o movimento aparente dos padrões de brilho em uma seqüência

de imagens. São abordados os métodos diferenciais, métodos baseados em regiões, métodos baseados em contornos e métodos baseados em energia. Também são apresentadas duas propostas alternativas para a determinação da velocidade de uma superfície, abrangendo o método utilizando o efeito estroboscópico e o método utilizando o efeito de escorrimento ou *blur*.

O capítulo 4 é dedicado ao detalhamento da técnica de medição de velocidade, baseada no efeito de borramento da imagem ou efeito *blur*. A partir deste ponto, analisa-se uma superfície específica, a superfície asfáltica.

No capítulo 5 são apresentados os materiais e métodos necessários para a implementação do sistema de aferição de velocímetros, utilizando a técnica de escorrimento ou *blur*.

No capítulo 6 são descritos os resultados experimentais obtidos a partir do dispositivo de aferição de velocímetros implementado.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais da dissertação.

O capítulo 8 finaliza o trabalho, apresentando recomendações quanto a perspectivas de futuros trabalhos sobre o tema.

2. TÉCNICAS EXISTENTES PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

Neste capítulo, são discutidas as técnicas de medição de velocidade abordadas na literatura e analisadas as vantagens e desvantagens de cada técnica.

Conforme indicado na tabela 1, as técnicas de medição de velocidade podem ser classificadas de diferentes formas. Pode-se dividir os métodos em dois grupos principais: métodos contactantes, onde há o contato com a superfície que se deseja determinar a velocidade e métodos não contactantes, onde não há o contato com a superfície. [Zucker, S.W. 1981]

A grandeza de medição dos métodos contactantes é o número de pulsos por volta dos roletes ou rodas em contato com o solo, que pode ser medida através de sensores de rotação.

Contato com a superfície	Princípio de Medição	Técnica
Métodos contactantes	Efeito Hall Células fotoelétricas Sensores magnéticos	Roda em contato com o solo
Métodos não contactantes	Efeito Doppler	Espalhamento de laser
		Microondas
		Ondas de rádio
		Ultra-som
	GPS (Posicionamento Global por satélites)	Satélite
	Processamento de Imagem	Processamento de Imagem

Tabela 1- Técnicas existentes para medição de velocidade

Para os métodos não contactantes, utiliza-se o efeito Doppler como princípio fundamental, que é aplicado em distintas técnicas como: espalhamento de *speckles* laser, ondas de rádio, ultra-som ou microondas.

Outros métodos não contactantes que não utilizam o efeito Doppler como princípio são: o GPS, que utiliza satélites que orbitam ao redor do planeta e o processamento de imagem, que será abordado detalhadamente a partir do capítulo 4.

2.1. Técnicas contactantes e técnicas não-contactantes

A primeira possível classificação dos métodos para medição de velocidades de superfícies refere-se ao contato do sensor com a superfície que se pretende determinar a velocidade. São métodos contactantes, aqueles em que há contato entre o sensor e a superfície em movimento, conforme exemplifica a figura 2.1. O método de medição de velocidade de superfícies mais comumente empregado na aferição de velocímetros baseia-se na utilização de mecanismos que têm como característica principal, o contato físico de um sistema mecânico (rolete ou roda) com a superfície que se deseja medir a velocidade.

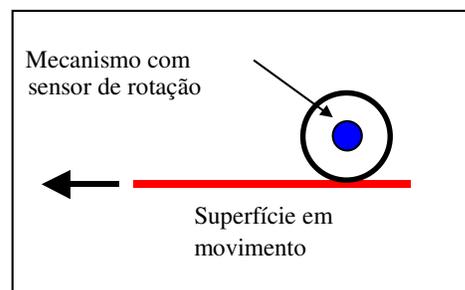


Figura 2.1. – Sistema contactante

O mecanismo de mola instalado na base da haste garante contato permanente da roda com o solo, conforme mostra a figura 2.2. Os sensores contactantes comumente servem de referência para a aferição de outros sensores. [URL 5]



Figura 2.2. – Roda padrão [URL 5]

O principal inconveniente desta abordagem é o escorregamento da roda em relação à superfície em movimento, o que afeta diretamente na aferição do velocímetro. Além disso, a roda está sujeita a alteração de diâmetro, devido ao desgaste do pneu em contato com o solo, sem contar com as irregularidades da superfície, que afetam a precisão na determinação da velocidade.

Tornou-se então conveniente o desenvolvimento de métodos alternativos para a determinação da velocidade, onde não houvesse o contato físico entre a superfície que se deseja determinar a velocidade e o sistema que quantifique esta grandeza, conforme mostra a figura 2.3. Todavia, o emprego de tal técnica não se propagou tão facilmente, devido aos custos envolvidos e à compatibilidade de uma solução que abrangesse uma ampla gama de materiais.

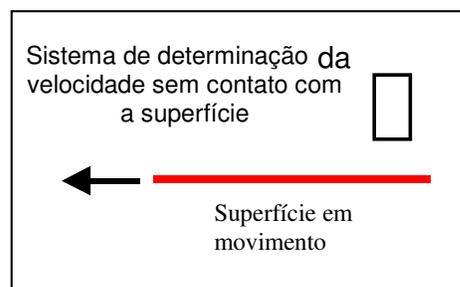


Figura 2.3. – Sistema não contactante

2.2. Técnicas baseadas no efeito Doppler

O Efeito Doppler é aplicado em sensores, abrangendo campos acústicos, ondas de rádio, microondas, ondas eletromagnéticas (*laser*), de frequência específica e bem definida. Um campo é gerado em direção ao objeto em movimento, sendo refletido pelo objeto. A frequência da onda refletida é proporcional à velocidade do objeto que se pretende determinar a velocidade.

Parte do sinal emitido (laser, microondas, ondas de rádio) é refletido de volta para o sensor, que recebe a frequência modificada, proporcionalmente à velocidade do objeto. A alteração da frequência observada depende do ângulo α entre o observador e a direção de movimento da fonte conforme mostra a figura 2.4.

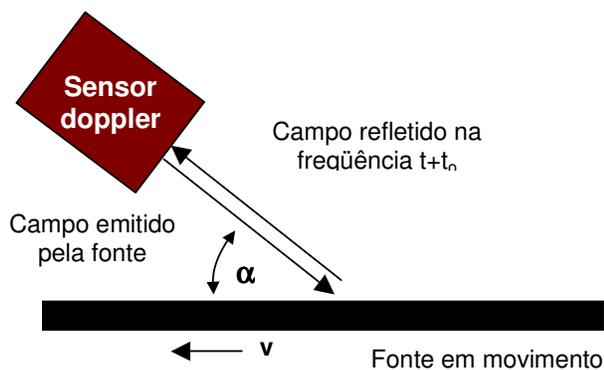


Figura 2.4. – Configuração típica de um sensor de efeito Doppler [URL 6]

Considerando-se v_{real} a velocidade linear real, a velocidade medida v_{med} será dada por $v_{med} = v_{real} \cdot \cos(\alpha)$. Sendo f_d a alteração da frequência emitida e v a velocidade, pode-se relacionar as grandezas por $f_d = 2v/\lambda \cos \alpha$, onde λ é o comprimento de onda do campo emitido. Desta forma, a velocidade real do objeto em movimento é dada por:

$$v_{real} = \frac{\lambda \cdot f_d}{2 \cos \alpha} \quad (2.1)$$

2.2.1. Técnicas baseadas em espalhamento de laser

Quando um feixe de luz coerente (laser) incide em uma superfície difusora ou não especular, forma-se um padrão granulado de alto contraste denominado *speckle*. *Speckle* é um padrão de interferências produzida pela luz coerente refletida ou espalhada por diferentes partes da superfície iluminada, conforme a figura 2.5. [Pusey, P. N., 1976]

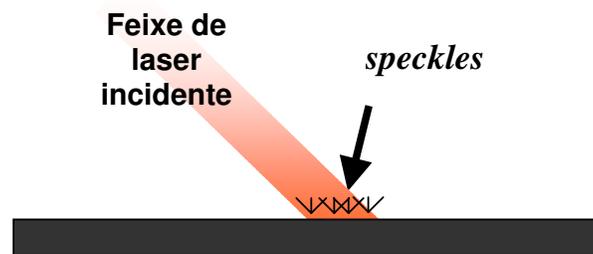


Figura 2.5. – Geração de *speckles laser* em uma superfície irregular [URL 6]

Iluminando-se uma superfície rugosa com um feixe estreito de laser, pode-se observar o espalhamento de luz, ou padrão de *speckles*. Todos os velocímetros a laser baseiam-se no princípio de geração de padrões de *speckles*. A figura 2.6. mostra um aparelho baseado no espalhamento laser.



Figura 2.6. – Aparelho baseado no espalhamento laser [URL 6]

Para um observador que olha para um objeto em movimento, iluminado pela luz laser, os *speckles* parecem cintilar: a intensidade de um único *speckle* varia aleatoriamente no tempo. Deduz-se que as estatísticas temporais de primeira e segunda ordem das flutuações do *speckle* contém informação sobre a velocidade do espalhamento. [URL 6]

Uma técnica muito conhecida é a LASCA (*Laser speckle contrast analysis*), ou análise do contraste do *speckle laser*. A partir de um único laser, aparato óptico adequado, uma câmera CCD, um *frame grabber* e um PC, pode-se montar um aparato simples. [Briers, J.D. e Webster, S., 1995] e [Briers, J. D., 1996]

2.2.2. Técnicas baseadas em microondas

O princípio básico de funcionamento consiste na detecção da variação de frequência entre o sinal transmitido e o sinal recebido. Quando um objeto se movimenta dentro do campo de atuação do sensor, este reflete o sinal de microondas, causando uma alteração do sinal original, que é detectado pelo sensor ilustrado pela figura 2.7. O sensor então amplifica o sinal de baixa intensidade recebido, através de um circuito acoplado ao sensor.

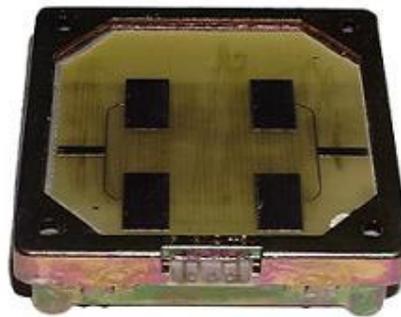


Figura 2.7. – Sensor de microondas [URL 4].

O sensor aplica-se em sensores de colisão, para a medição da velocidade de superfícies, para a detecção de presença (em veículos ou ambientes internos) e para o controle de tráfego.

Esta técnica tem sido amplamente empregada em máquinas agrícolas, pois, com os modernos equipamentos de produção, que dosam quantidades precisas de sementes, fertilizantes e pesticidas, a medição precisa da velocidade do solo tornou-se essencial [URL 4].

A frequência Doppler é proporcional ao ângulo do sensor em relação ao solo. À medida que o veículo se movimenta, o ângulo entre o solo e o sensor varia de maneira imprevisível, o que implica na geração de um erro na medição da velocidade do solo. Além disso, o solo contém irregularidades, tornando-se um refletor ineficaz para sinais de microondas.

Estes sensores têm aplicação principalmente em máquinas agrícolas, sendo aplicados em medições abaixo de 60km/h e precisão de $\pm 5\%$. [URL 4].

2.2.3. Técnicas baseadas em ondas de rádio

O princípio básico de funcionamento consiste na detecção da variação de frequência entre o sinal transmitido e o sinal recebido. Quando um objeto se movimenta dentro do campo de atuação do sensor, este reflete as ondas de rádio, causando uma alteração do sinal original, que é detectado pelo sensor, ilustrado pela figura 2.8.



Figura 2.8. – Sensor de ondas de rádio [URL 5]

Conforme mostra a figura 2.9., o sensor pode ser montado em um veículo, sendo apontado para o solo e usado para medir a velocidade relativa entre o veículo e o

chão. O sensor tem aplicação em superfícies asfálticas, concretos, chão de terra, ou com cascalho. Esta solução garante um erro entre 1 e 2%. [URL 5]

Todavia o método apresenta um inconveniente devido à necessidade de o sensor ter um ângulo constante em relação ao solo, conforme mostra a figura 2.9., tornando-se importante considerar fatores como movimento ou vibração da suspensão e formação de spray de água ou poeira no momento de se escolher um local ideal para a montagem do sensor.

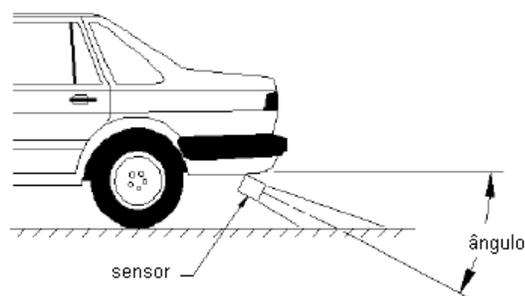


Figura 2.9. – Posicionamento do sensor [URL 5]

2.3. Técnicas baseadas em GPS

O GPS (Sistema Global de Posicionamento) é um sistema de navegação baseado em satélites, constituído por uma rede de 24 satélites posicionados na órbita pelo departamento de defesa dos Estados Unidos. A figura 2.10. mostra um sistema baseado em coordenadas de posicionamento global.



Figura 2.10. – Sensor GPS [URL 16]

O satélite GPS tem um relógio atômico, e recebendo sinais dos últimos três satélites, o receptor pode prever sua distância relativa a cada um destes satélites. Através de triangulação, a posição do receptor é então calculada.



Figura 2.11. – Exemplos de aplicação do sensor GPS [URL 16]

A grande vantagem da utilização do GPS, é que não há interferência direta do escorregamento das rodas em relação ao solo, pois a posição relativa do receptor em relação ao satélite é determinada através variação dos sinais aquisitados, contribuindo assim para o cálculo da velocidade do veículo. Esta abordagem é capaz de medir a velocidade de forma eficaz e rápida, com precisão de 0,1km/h, conforme exemplificado na figura 2.11. [URL 16]

Todavia, o método baseado em GPS também apresenta algumas desvantagens, pois depende das condições climáticas, tendo melhor desempenho em condições de céu aberto ou sem nuvens. Além disso, o método pode apresentar problemas relacionados ao bloqueio do sinal do GPS, devido a altos prédios ou árvores na área ao redor do veículo.

2.4. Técnicas baseadas em processamento de imagens

O princípio básico de funcionamento consiste na aquisição de imagens ou seqüências de imagens através de uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*), ou dispositivo de carga acoplada. A imagem é capturada por uma placa que digitaliza a imagem analógica, convertendo-a em um padrão reconhecível. A imagem ou seqüência de imagens é armazenada em um arquivo padrão para então ser analisada por um software capaz de converter os dados recebidos através de técnicas de processamento de imagens. A figura 2.12. representa o princípio básico da técnica de processamento de imagens.

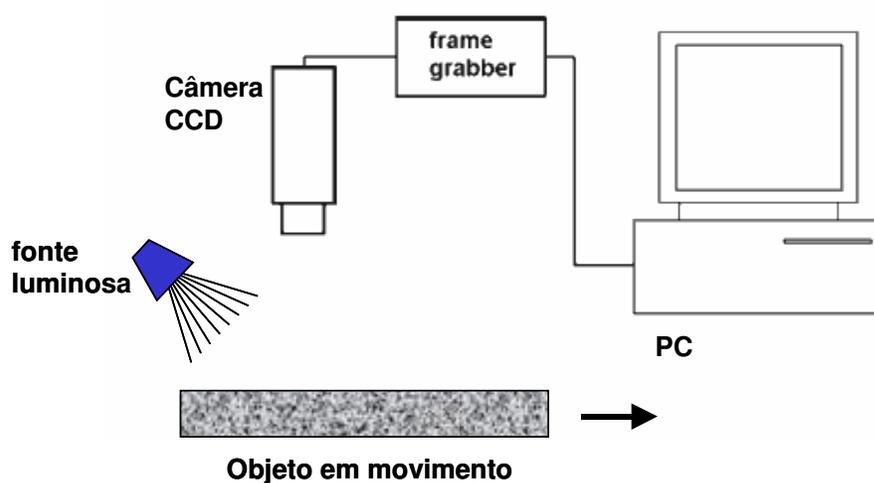


Figura 2.12. – Princípio básico da técnica de processamento de imagens

A diferença básica entre as técnicas conhecidas de processamento de imagem, está nas diferentes abordagens adotadas, para o processamento das imagens digitalizadas. Estas técnicas são abordadas mais detalhadamente no capítulo 3.

2.5. Comparação entre as técnicas existentes

Entre os métodos apresentados, pode-se excluir diretamente os métodos contactantes, pois não funcionam em caso de escorregamento da roda em relação à superfície.

Entre os métodos não contactantes, eliminou-se o método de espalhamento de laser, pois sua implementação depende da aquisição de uma fonte de laser potente para a iluminação do solo, de custo consideravelmente elevado, considerando-se os recursos disponibilizados para implementação deste trabalho.

Eliminam-se também os métodos de ondas de rádio e microondas, devido à necessidade de o sensor estar alinhado paralelamente à direção do veículo, além de terem uma aplicação restrita, devido à necessidade de calibração da escala de medição, proporcional ao tamanho dos obstáculos onde o veículo trafega.

A técnica que mostrou grande viabilidade é o método que utiliza sensor GPS, tendo implementação imediata, pois seria necessário somente a aquisição do equipamento e a instalação do mesmo em um veículo. O sensor GPS possui precisão na ordem de 0,1km/h independente da superfície em que o veículo trafega, por um custo de aquisição relativamente baixo. Todavia, o método GPS depende das condições climáticas, tendo melhor desempenho em condições de céu aberto ou sem nuvens. Além disso, objetos na área ao redor do veículo, como altos prédios e árvores podem causar o bloqueio do sinal do GPS.

Optou-se então pelo método que utiliza processamento de imagens, pois além de não apresentar restrições no que diz respeito ao ambiente onde são executadas as medições, é relativamente fácil de ser implementado e pode se chegar a um erro suficientemente pequeno, atendendo a proposta inicial exigida pela Portaria n.º 115, de 1998 do INMETRO, a um baixo custo de implementação.

Na tabela 2 são apresentadas as vantagens e desvantagens dos métodos abordados:

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Contactante Roda de medição	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão na ordem de 0,1km/h • Funciona em qualquer tipo de superfície: asfalto molhado, cascalho, terra ou barro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não funciona em caso de escorregamento da roda padrão em relação à superfície.
Contactante Sensor instalado na transmissão de veículos	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de aquisição relativamente baixo • Robusto e de fácil instalação 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão na ordem de 1 a 10km/h • Em veículos com marcha reduzida, apresenta problemas de indicação no momento da transição de marcha. • Não funciona em caso de escorregamento das rodas em relação à superfície.
Espalhamento de laser e efeito Doppler	<ul style="list-style-type: none"> • Independe do escorregamento das rodas • É muito preciso, na ordem de 0,01km/h 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de uma fonte de luz coerente potente, de custo consideravelmente elevado • Depende da posição relativa do sensor em relação ao solo, devido à necessidade de ajuste do foco, tendo seu funcionamento prejudicado em superfícies irregulares • A medição pode ser afetada com spray de água ou sujeira das rodas
Microondas e efeito Doppler	<ul style="list-style-type: none"> • Independe do escorregamento das rodas • Custo de aquisição relativamente baixo • Robusto e de fácil instalação 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisão na ordem de $\pm 5\%$. • Necessidade de o sensor estar alinhado paralelamente à direção da superfície em movimento • Depende do fator de calibração, proporcional ao tamanho dos obstáculos onde o veículo trafega
Ondas de rádio e efeito Doppler	<ul style="list-style-type: none"> • Independe do escorregamento das rodas • Custo de aquisição relativamente baixo • Robusto e de fácil instalação 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de o sensor estar alinhado paralelamente à direção da superfície em movimento • A medição pode ser afetada com spray de água ou sujeira das rodas
GPS	<ul style="list-style-type: none"> • Tem precisão na ordem de 0,1km/h • Independe da superfície em que o veículo trafega • Custo de aquisição relativamente baixo • Independe do escorregamento das rodas em relação ao solo 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende das condições climáticas, tendo melhor desempenho em condições de céu aberto ou sem nuvens • Objetos na área ao redor do veículo, como altos prédios e árvores podem causar o bloqueio do sinal do GPS, causando redução no número de satélites que estão sendo rastreados
Processamento de imagens	<ul style="list-style-type: none"> • Tem precisão na ordem de 0,5km/h • Independe do escorregamento das rodas em relação ao solo • É relativamente fácil de ser implementado 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende da distância do sensor em relação ao solo, tendo seu funcionamento prejudicado em superfícies irregulares • Depende da iluminação da superfície que se deseja determinar a velocidade • A medição pode ser afetada com spray de água ou sujeira das rodas

Tabela 2 – Comparação entre Técnicas existentes

3. TÉCNICAS BASEADAS EM PROCESSAMENTO DE IMAGENS (PI)

Neste capítulo são abordados os principais métodos de medição de velocidade, fundamentados em técnicas baseadas em processamento de imagens, conforme proposto no item anterior.

Nesta abordagem, o princípio básico de funcionamento consiste na aquisição de imagens ou seqüências de imagens através de uma câmera CCD. A imagem é capturada por uma placa, que digitaliza a imagem analógica, convertendo-a em um padrão reconhecível, conforme mostra a figura 3.1. A imagem é armazenada em um arquivo padrão para então ser analisada por um software capaz de converter os dados aquisitados através de técnicas de processamento de imagens. [Anandan, P., 1987]

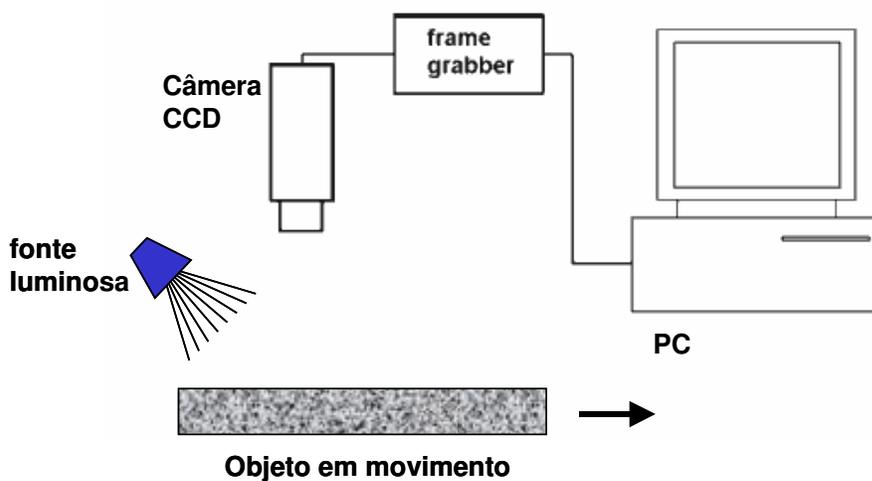


Figura 3.1. – Princípio básico da técnica de processamento de imagens

3.1. Determinação do fluxo óptico

O Fluxo óptico é definido como o movimento aparente dos padrões de brilho em uma seqüência de imagens. Descreve a direção e a velocidade do movimento relativo entre o observador e a cena, através de vetores representados por setas direcionais [Anandan, P., 1989].

O fluxo óptico é a distribuição de velocidade, relativa a um observador, sobre os pontos de uma imagem, carregando informação para análise dinâmica da cena em movimento [Enkelmann, W., 1986]. Define-se como fluxo óptico bidimensional, como o campo de velocidade no plano da imagem, devido ao movimento do observador, relativamente aos objetos e à cena, ou movimento aparente, que se dá devido a uma mudança na intensidade da imagem entre *frames* sucessivos que mimetizam movimentos do observador ou do objeto. O fluxo óptico, representado na figura 3.2., é determinado pelo vetor de velocidade de cada *pixel* em uma imagem [Jain, R., 1995].

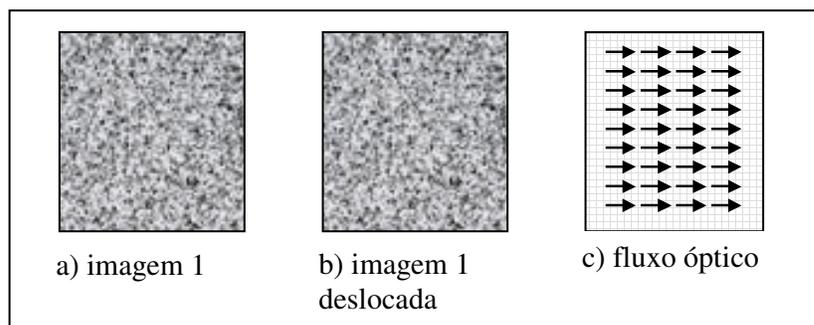


Figura 3.2. – Fluxo óptico de uma imagem em movimento

Neste capítulo são apresentados os principais métodos de determinação do fluxo óptico abordados na literatura. Tais métodos se baseiam na análise espaço-temporal de uma seqüência de imagens ou *frames* consecutivos. Na figura 3.3., representou-se no *frame 1* uma imagem original, que após um tempo bem definido, deslocou-se de dx e dy , conforme representada no *frame 2*.

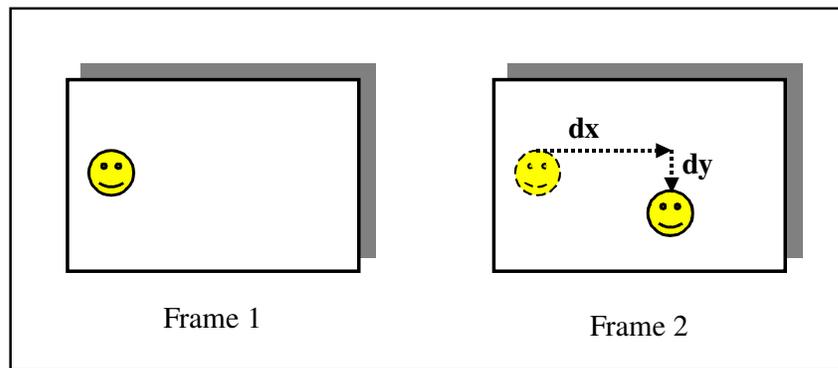


Figura 3.3. – Registro de uma imagem em *frames* consecutivos

O movimento real, registrado a partir de uma seqüência de imagens resulta de um processo complexo envolvendo diversos fatores como a iluminação da cena, a forma e a rugosidade da superfície em movimento, a formação de sombras e reflexo, e também de características do sensor usado para aquisição de imagens.

Todavia, é necessário distinguir entre movimento real, ou campo bidimensional de velocidades, e movimento aparente, ou fluxo óptico. O fluxo óptico pode ser composto, a partir da observação espaço-temporal de variações das intensidades entre dois *frames* consecutivos. [Tiziritas, G., 1994]

Classicamente, um vetor de fluxo óptico é representado pelas suas componentes horizontais e verticais, $v_x(x,y)$ e $v_y(x,y)$. Para se calcular o fluxo óptico, deve-se encontrar pontos correspondentes entre dois *frames* consecutivos. Para tal tarefa, utiliza-se a informação de que regiões na vizinhança dos pontos correspondentes possuem padrões de intensidade similares.

Seja o modelo geométrico do campo bidimensional de velocidades representado por

$$x = \frac{X}{Z}, \quad y = \frac{Y}{Z} \quad (3.1)$$

onde (x,y) representa as coordenadas, em relação ao ponto tridimensional do espaço (X,Y,Z) , conforme mostra a figura 3.4. Se a projeção é paralela, ou ortográfica, então as coordenadas (x,y) se tornam $x=X$ e $y=Y$.

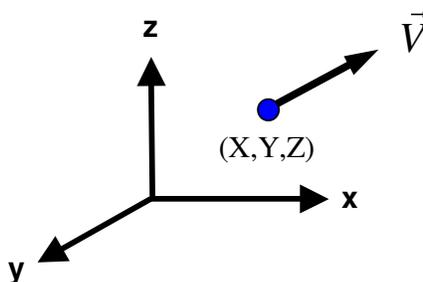


Figura 3.4. – Representação de velocidade de uma partícula

Seja $\vec{V} = \left(\frac{dX}{dt}, \frac{dY}{dt}, \frac{dZ}{dt}\right)$ o vetor tridimensional da velocidade do ponto (X,Y,Z) . O vetor velocidade bidimensional do ponto (x,y) é obtido por

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{Z} \frac{dX}{dt} - \frac{X}{Z^2} \frac{dZ}{dt} \\ \frac{dy}{dt} = \frac{1}{Z} \frac{dY}{dt} - \frac{Y}{Z^2} \frac{dZ}{dt} \end{cases} \quad (3.2)$$

Considera-se finalmente a projeção paralela de 3.2., pois a velocidade medida encontra-se em um plano conhecido. Obtém-se portanto:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{dX}{dt} \\ \frac{dy}{dt} = \frac{dY}{dt} \end{cases} \quad (3.3)$$

3.2. Revisão das técnicas existentes

A seguir são apresentadas as principais técnicas de processamento de imagem (PI), que extraem estimativas locais da translação de uma imagem. São quatro os principais métodos para medição do fluxo óptico de uma superfície em movimento [Fleet, D.J., 1992]:

- Métodos diferenciais ou baseados em pontos;
- Métodos comparativos ou baseados em regiões;
- Métodos baseados em contornos;
- Métodos baseados em energia.

Estes métodos têm os seguintes pré-requisitos:

- É desejável que se trabalhe com o mínimo escorrimento da imagem registrada, ou idealmente que se trabalhe com imagens congeladas.
- É necessário que o tempo entre *frames* sucessivos seja bem definido e regular.
- É necessário que um segmento de imagem registrado em um *frame*, também seja registrado em um *frame* consecutivo.

3.2.1. Métodos diferenciais

Inicialmente usadas somente em estruturas de imagens bidimensionais, os métodos diferenciais foram originalmente baseados na suposição de que variações temporais na intensidade da imagem podem ser modeladas localmente através da translação de imagens [Fennema, C. e Thompson W., 1979] e [Nagel, H.H., 1983].

Técnicas diferenciais são freqüentemente descritas como baseadas em intensidade, na qual a velocidade é computada diretamente a partir da intensidade da imagem, em termos de suas derivadas espaço temporais [Barnard, S.T. e Thompson, W.B., 1980] e [Glazer, F., 1987]

Considerando-se x como a posição espacial e t como o valor do tempo, tem-se a fórmula geral dos métodos baseados em gradiente [Nagel, H.H., 1987]:

$$\nabla I \cdot v + I_t = 0 \quad (3.4)$$

sendo:

$I(x,t)$ é a função de intensidade da imagem

$\nabla I \cdot v = (I_x, I_y)$ e I_t são derivadas parciais de primeira ordem de $I(x,t)$

$v = (u, v)$ é a velocidade da imagem.

Considerando-se $v_n = v_n n$, onde n é a direção do gradiente de intensidade, a velocidade normal e direção são dadas por:

$$v_n = \frac{-I_t(x,t)}{\|I_x(x,t), I_y(x,t)\|} \quad (3.5)$$

$$n = \frac{(I_x(x,t), I_y(x,t))^T}{\|I_x(x,t), I_y(x,t)\|} \quad (3.6)$$

3.2.2. Métodos baseados em regiões

Técnicas diferenciais são essencialmente baseadas em pontos e tem como pré-requisito a diferenciabilidade da intensidade da imagem, variando no tempo. Se, todavia houver complicações como problemas de diferenciação devido a ruídos ou devido a um pequeno número de *frames* no processo de aquisição de imagens, então torna-se natural utilizar técnicas baseadas em regiões [Glazer, F., Reynolds, G. e Anadan, P., 1983].

Tais métodos objetivam encontrar a melhor aproximação entre regiões de imagens de *frames* sucessivos. Tornou-se comum se formular técnicas baseando-se em medidas de correlação entre áreas. É o caso do método *Matching* ou de Correlação [Glazer, F., Reynolds, 1983].

Considere $W(x)$ uma função janela 2-d centrada na origem com $|W(x)| \rightarrow 0$ quando $|x| \rightarrow \infty$. Então, $W(x-x_0)I(x,t)$ denotará um segmento da imagem centrada em x_0 no instante t . A velocidade 2-d estimada v é definida quando o deslocamento s remete o melhor ajuste entre regiões de imagens centradas em x_0 no instante t_0 e x_0+s no instante t_1 [Fleet, D.J., 1992]. Desta forma conforme as figuras 3.5 e 3.6., tem-se:

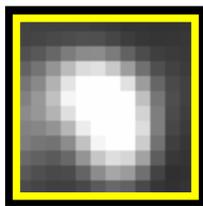


Figura 3.5. – Imagem $I_0(x)$, no instante t_0

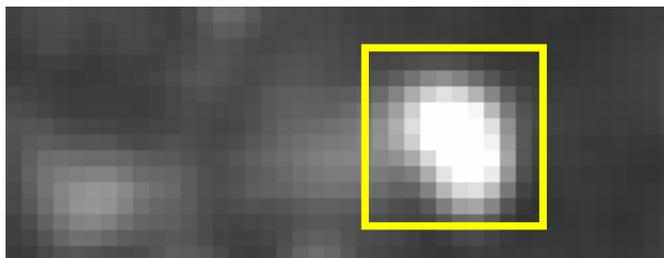


Figura 3.6. – Imagem $I_0(x;s)$, no instante t_1

$$I_0(x) \equiv W(x - x_0)I(x, t_0) \quad (3.7)$$

$$I_0(x; s) \equiv W(x - x_0)I(x + s, t_1) \quad (3.8)$$

Encontrar a melhor semelhança entre as imagens representadas pelas equações 3.7 e 3.8 é essencialmente um problema de otimização. Neste caso, procura-se maximizar a medida de similaridade (em s), através da correlação cruzada:

$$S(I_0(x), I_1(x, s)) = \frac{\|I_0(x), I_1(x, s)\|}{\|I_0(x)\| \|I_1(x, s)\|} \quad (3.9)$$

3.2.3. Métodos baseados em contornos

Métodos baseados em contornos originam-se da idéia de que a percepção visual humana dos movimentos resulta da identificação de características em uma cena individual, seguido pelo processo de correspondência que associa estas características em um *frame* consecutivo.

O uso de contornos e bordas é atrativo pois podem ser facilmente extraídos de imagens e facilmente localizados, conforme mostram as figuras 3.7. e 3.8. Todavia, abrange um universo limitado de imagens, pois se apresenta ineficaz no trato de superfícies lisas [Hildreth, E.C., 1984] e [Waxman, A. e Wohn, K., 1984]

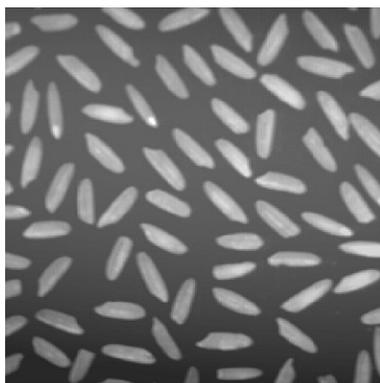


Figura 3.7. – Imagem original

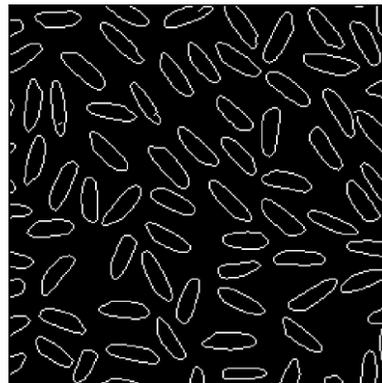


Figura 3.8. – Contornos originados

Neste método, deve-se ter impreterivelmente características da imagem que garantam boa localização das bordas, e que as mesmas sejam estáveis em relação ao tempo.

Assume-se também que as imagens tenham contornos nítidos e que as bordas sejam bem definidas e isoláveis, a fim de se facilitar o processo de correlação explicitado anteriormente. Estes pré-requisitos impostos delimitam consideravelmente o tipo de seqüência a ser analisada.

3.2.4. Métodos baseados em energia

São métodos baseados na análise de freqüência, utilizando as amplitudes relativas resultantes de filtros diferenciais para calcular a velocidade da imagem [Adelson, 1985; Hegger, 1987], utilizando a formulação baseada na transformada de Fourier.

Considere-se a seqüência $f(x,y,t)$, $t=0,1,\dots,T-1$, de T imagens digitais de *frames* de tamanho $M \times N$ gerados a partir de uma câmara estática. Começa-se o desenvolvimento assumindo que todos os *frames* têm um fundo homogêneo de intensidade zero, exceto um objeto formado por um único *pixel* de intensidade 1, que se movimenta com velocidade constante. Supõe-se que para o *frame* 1 ($t=0$) o plano da imagem é projetado no eixo x , ou seja, as intensidades são somadas através das colunas. Esta operação leva a um vetor $1-D$ com M entradas de intensidade 0, exceto no local onde o objeto é projetado. Multiplicando-se as componentes do vetor por $\exp[j2\pi k_1 x \Delta t]$, $x=0,1,\dots,M-1$, com o objeto em (x',y') naquele instante de tempo, produz uma soma igual a $\exp[j2\pi k_1 x' \Delta t]$. Nesta notação, k_1 é um inteiro positivo, e Δt é o intervalo de tempo entre os *frames*.

Supondo que no *frame* 2 ($t=1$) o objeto move-se para as coordenadas $(x'+1,y')$, ou seja, move paralelamente 1 *pixel* no eixo x , então repetindo o processo, leva à soma $\exp[j2\pi k_1 (x'+1)\Delta t]$. Se o objeto continua a movimentar-se em 1 *pixel* por *frame*, então em qualquer instante inteiro de tempo, o resultado é $\exp[j2\pi k_1 (x'+t)\Delta t]$, que se torna através da fórmula de Euler [Gonzalez, R.C., 1993]:

$$\exp[j2\pi k_1 (x'+t)\Delta t] = \cos[j2\pi k_1 (x'+t)\Delta t] + j \operatorname{sen}[j2\pi k_1 (x'+t)\Delta t] \text{ para } t=0,1,\dots,T-1$$

(3.10)

Em outras palavras, este processo leva à senóide de frequência k_1 . Se o objeto se movimentar v_1 *pixels* (na direção x) entre *frames* sucessivos a senoidal terá frequência $v_1 k_1$. Devido à variação de t entre 0 e $T-1$ em incrementos inteiros, restringindo-se k_1 a valores inteiros, leva a transformada discreta de Fourier da senóide complexa a ter dois picos – um localizado na frequência $v_1 k_1$ e outro em $T - v_1 k_1$.

Então, encontra-se o pico $v_1 k_1$ no espectro de Fourier. A divisão deste resultado por k_1 leva a encontrar o resultado v_1 , que é a velocidade da componente na direção x , desde que se conheça o tempo decorrido entre os *frames* sucessivos. Similarmente, pode-se obter a componente v_2 no eixo y .

Para uma seqüência de T imagens digitais de tamanho $M \times N$, a somatória de projeções ponderadas no eixo x em qualquer instante inteiro de tempo é

$$g_x(t, k_1) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y, t) e^{j2\pi k_1 x \Delta t} \quad t=0, 1, \dots, T-1 \quad (3.11)$$

Similarmente, a soma de projeções no eixo y é

$$g_y(t, k_2) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y, t) e^{j2\pi k_2 y \Delta t} \quad t=0, 1, \dots, T-1 \quad (3.12)$$

em que, k_1 e k_2 são inteiros positivos.

As transformadas de Fourier das duas equações anteriores são

$$G_x(u_1, k_1) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} g_x(t, k_1) e^{-j2\pi u_1 t/T} \quad u_1=0, 1, \dots, T-1 \quad (3.13)$$

$$G_y(u_2, k_2) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} g_y(t, k_2) e^{-j2\pi u_2 t/T} \quad u_2=0, 1, \dots, T-1 \quad (3.14)$$

Na prática, utiliza-se o algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*), obtendo $u_1 = k_1 \cdot v_1$ e $u_2 = k_2 \cdot v_2$. [Gonzalez, R.C., 1993].

3.3. Implementação do método baseado em regiões

A análise de técnicas de processamento de imagem para a determinação de velocidade implicou na implementação de um dos métodos conhecidos, a fim de se obter a velocidade de uma superfície, a partir de duas imagens reais, obtidas com o deslocamento de uma imagem em movimento de translação. Para isto utilizou-se o método de correlação entre duas imagens distintas, conforme figuras 3.9. e 3.10.

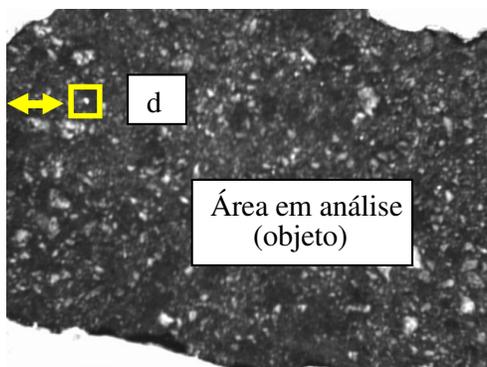


Figura 3.9. – Imagem no instante t_0

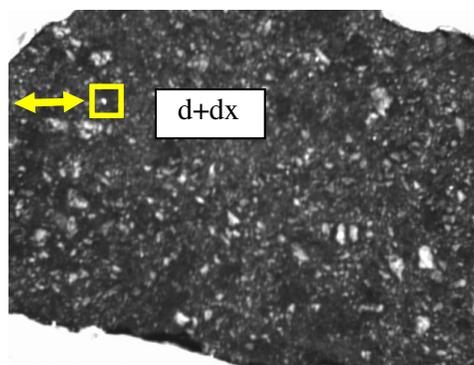


Figura 3.10. – Imagem deslocada horizontalmente no instante t_1

Ampliando-se as áreas em análise, tem-se:

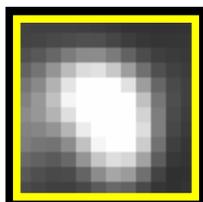


Figura 3.11. – Imagem original

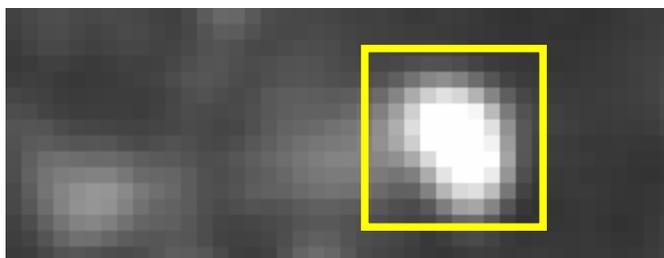


Figura 3.12. – Imagem deslocada

A tarefa a ser realizada é achar a imagem da figura 3.11. na figura 3.12. Feito isto, determina-se o deslocamento relativo do objeto em relação à origem.

Determinado o deslocamento, calcula-se a velocidade da superfície, dividindo-se o deslocamento pelo intervalo de tempo entre os dois *frames* consecutivos.

A partir de uma seqüência de imagens, obtém-se uma imagem A, em um instante inicial e uma imagem B em um instante subsequente. As imagens são registradas em duas matrizes distintas: matriz A e matriz B respectivamente. A máxima correlação entre a matriz A e sub-matrizes de B (com o mesmo tamanho de A) determina a distância percorrida durante o intervalo de tempo entre os *frames* consecutivos.

Utilizou-se o módulo com aplicação em processamento de imagens do software MATLAB® (software de implementação de cálculos computacionais, visualização e programação). No MATLAB®, a função descrita $corr2(matriz\ A, matriz\ B)$, calcula o coeficiente r de correlação entre duas matrizes bidimensionais de tamanho (M×N), através da relação:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) \cdot (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2) \cdot (\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (3.15)$$

Exemplo:

Seja $A = \begin{bmatrix} 75 & 66 \\ 45 & 67 \end{bmatrix}$ e $B = \begin{bmatrix} 75 & 66 \\ 40 & 67 \end{bmatrix}$, obtém-se substituindo-se os elementos de A e

B diretamente na fórmula acima, obtém-se $r = \frac{584}{584,78} = 0,9987$.

Desta forma $corr2(A,B) = 0,9987$

A definição de correlação descrita é aplicada a sub matrizes da imagem estudada, tendo como elementos tons de cinza entre 0 e 255.

A figura 3.13. mostra um exemplo de uma matriz representando uma imagem real:

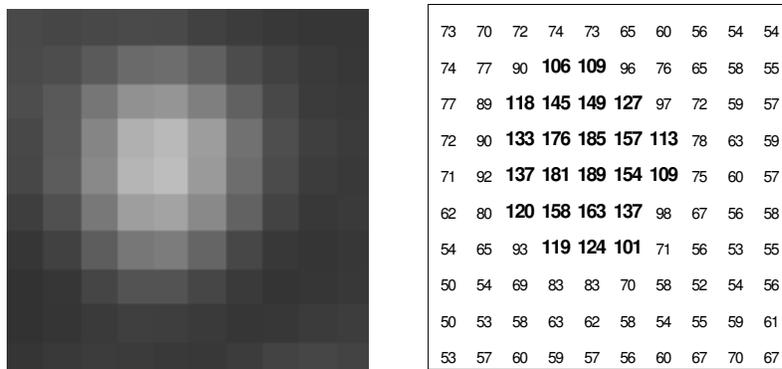


Figura 3.13. – Imagem real × matriz de pixels

Com a ferramenta MATLAB® (software de implementação de cálculos computacionais, visualização e programação), obtém-se a correlação entre a figura 3.11. e trechos correspondentes de mesmo tamanho da figura 3.12. Desta forma obtém-se a amplitude do deslocamento em uma direção conhecida – neste caso, fez-se a captura de imagens tomando-se o cuidado de evitar deslocamentos verticais, a fim de se obter o deslocamento somente com a componente horizontal. Quando a correlação é máxima, obtém-se o deslocamento desejado. Obteve-se a correlação máxima com o deslocamento de 23 *pixels*. Sistemáticamente, foram calculados os vetores deslocamento de 100 áreas da figura 3.14., a fim de se obter o campo de velocidades correspondente à área em análise (figura 3.15.). O campo de velocidades obtido apresenta todos os vetores com deslocamento de 23 *pixels*, todos alinhados na mesma direção (horizontal).

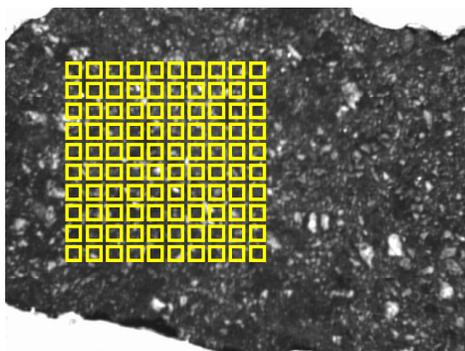


Figura 3.14. – Correlação de diferentes áreas

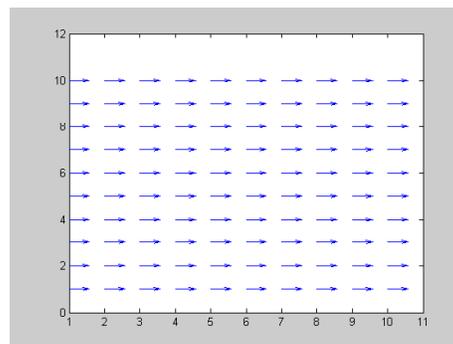


Figura 3.15. – Fluxo óptico

3.4. Limitação dos métodos abordados na literatura

Embora as técnicas até então apresentadas baseiem-se em sólidos fundamentos teóricos, todas têm como pré-requisito o registro de uma região específica em *frames* sucessivos, com um intervalo de tempo bem definido entre eles. Tais técnicas não podem ser aplicadas na abordagem deste trabalho, considerando-se câmeras convencionais de baixa velocidade, pois não funcionam em velocidades acima de 50km/h, conforme explicado a seguir:

Fixando-se uma câmera CCD na carroceria de um veículo, conforme figura 3.16., pode-se determinar a velocidade da superfície do solo, através de técnicas de processamento de imagem. Considerando-se a distância entre a câmera e o solo de 60cm, obtém-se uma imagem útil de 45cm, determinado pelo campo de visão da câmera (FOV – *Field Of View*):

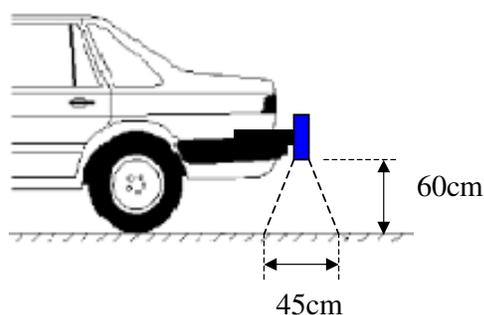


Figura 3.16. – FOV (Field of View) da câmera

Considerando-se o padrão NTSC (*National Television Systems Committee*), obtém-se o registro de 30 *frames* por segundo. Tem-se então um intervalo de 1/30s ou 33,3ms entre dois *frames* consecutivos. A uma velocidade de 100km/h, o deslocamento da câmera em 33,3ms é de 93cm.

Nesta situação, conforme mostrado na figura 3.17., as imagens registradas nos *frames* 1 e 2 são completamente diferentes, o que impossibilita a aplicação das técnicas abordadas na literatura para velocidades desta ordem de grandeza.

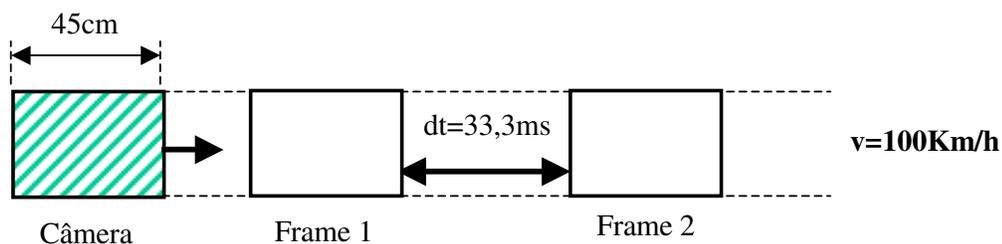


Figura 3.17. – Intervalo entre frames sucessivos

3.5. Apresentação de propostas alternativas

Os métodos abordados na literatura baseiam-se na análise espaço-temporal de uma seqüência de imagens ou *frames*, ou seja, o pré-requisito destes métodos é o registro de uma mesma imagem deslocada em *frames* sucessivos, com um tempo bem definido entre estas duas imagens.

O problema poderia ser tecnicamente resolvido, utilizando câmeras de alta velocidade (figura 3.18.), como as usadas em filmagens de testes de impacto de veículos ou *crash test*, o que levaria à aplicação imediata das técnicas abordadas na literatura. Todavia, tais sistemas de captação em alta velocidade são de custo muito elevado.



Figura 3.18. – Câmera de altíssima velocidade Multrecam NAC fx RX6.

Empresas especializadas em captação em vídeo de alta velocidade, comercializam câmeras de alta velocidade com sensores CCD e CMOS. A captação pode ser feita em velocidades variáveis, de até 10000 *frames* por segundo. Cada um dos *frames* pode ser capturado em velocidades variadas, até 1/200000 de segundo, independente do número de quadros por segundo, como é o caso da câmera indicada na figura 31.

[URL 7]

Eliminando-se a possibilidade de aplicação imediata dos métodos existentes para a determinação da velocidade, são apresentadas algumas propostas que resolvam o problema e atendam ao objetivo principal da dissertação.

Os dois métodos propostos a seguir têm como base a determinação da velocidade, a partir da informação contida em uma única imagem. Esta abordagem resolve o problema abordado no item anterior, onde é necessário que uma região específica seja registrada em sucessivos *frames*, o que não é possível a altas velocidades.

A seguir são abordadas duas propostas, ambas obtendo a informação de velocidade contida em uma única imagem. Inicialmente é apresentado um método baseado no efeito estroboscópico e em seguida é apresentada uma técnica baseada no efeito do escorrimento da imagem em movimento, ou efeito *blur*.

3.5.1. Método utilizando efeito estroboscópico

Para se resolver o problema de registro de imagens em *frames* consecutivos, propõe-se a utilização de um estroboscópio, capaz de iluminar duas imagens sucessivas em um único registro de imagem, conforme indicado pela carta de tempos da figura 3.19.

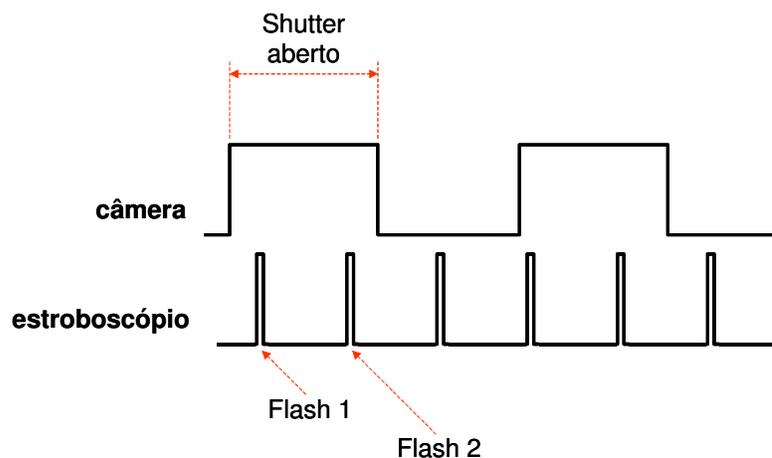


Figura 3.19. – Carta de tempos para aquisição com estroboscópio

O tempo de exposição ou *shutter speed* é determinado pelo intervalo de tempo em que o diafragma da câmera permanece aberto recebendo luz. Para uma câmera digital, este tempo é determinado eletronicamente, significando o tempo em que as fotocélulas da matriz CCD acumulam energia luminosa.

Neste método, enquanto o diafragma da câmera (ou *shutter*) permanece aberto, são registradas duas imagens distintas através da iluminação de dois flashes gerados pelo estroboscópio.

A título de explicação, com a ferramenta MATLAB®, obteve-se numericamente a sobreposição de duas imagens estáticas (Anexo B), compondo uma imagem única contendo informação de dois instantes distintos. A imagem gerada é uma imagem sobreposta, contendo duas imagens: uma imagem original e a mesma imagem deslocada, sobreposta, conforme indicado na figura 3.20.

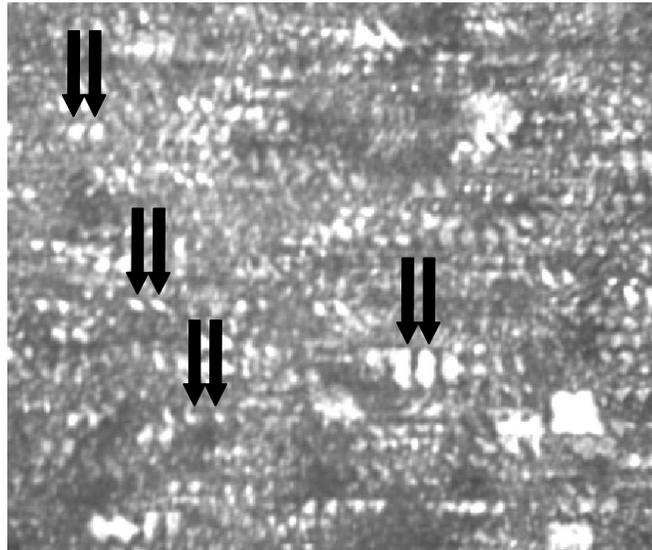


Figura 3.20. – Imagens sobrepostas geradas com estroboscópio

Na figura 3.21., verifica-se uma sub-imagem da figura 3.20. Aplica-se a esta imagem a correlação de imagens, com o objetivo de se determinar o deslocamento entre as duas estruturas.

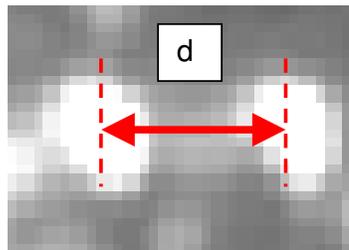


Figura 3.21. – Registro do deslocamento

Considere-se uma sub-imagem da imagem sobreposta de tamanho 50×50 . Simula-se então um deslocamento de 16 pixels , utilizando-se o software de processamento de imagens do MATLAB®. A correlação atinge um valor de máximo, quando a primeira imagem se encaixa com maior perfeição na segunda imagem. Determina-se assim o deslocamento da imagem durante o intervalo de dois flashes consecutivos do estroboscópio. A velocidade calculada é a relação entre o deslocamento determinado e o intervalo entre os flashes consecutivos gerados pelo estroboscópio.

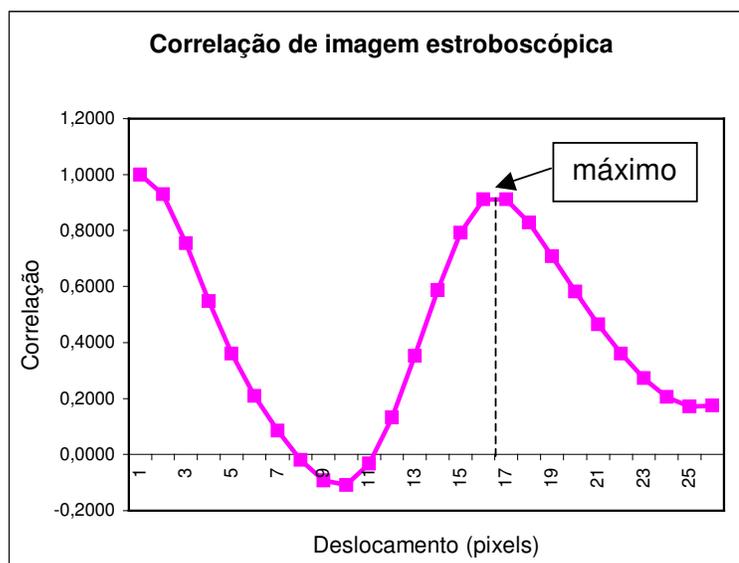


Figura 3.22. – Correlação entre sub-imagens deslocadas

Portanto, conforme indicado na figura 3.22., determina-se o deslocamento da imagem em movimento quando ocorre o máximo indicado em 16 *pixels*.

Para se realizar o experimento, necessita-se de um estroboscópio de alta velocidade, similar ao estroboscópio digital indicado na figura 3.23. [URL 8]



Figura 3.23. – Estroboscópio Digital Lutron DT-2269

O método mostra-se viável e pode ser desenvolvido a baixo custo, todavia requer a aquisição de acessório de características especiais (no caso, o estroboscópio de alta frequência), o que incentivou à continuidade da busca de um método que pudesse atender à proposta inicial, a um menor custo.

3.5.2. Método utilizando efeito de escorrimento ou *Blur*

Os métodos abordados na literatura baseiam-se na análise espaço-temporal de uma seqüência de *frames* sucessivos, tendo como pré-requisito, o registro de uma mesma imagem deslocada em imagens sucessivas, distanciadas de um intervalo de tempo bem definido, conforme indicado na figura 3.24a. Estas técnicas foram originalmente baseadas na hipótese de que variações espaço-temporais na intensidade da imagem podem ser modeladas localmente através da translação de imagens.

Diferentemente dos métodos conhecidos, o método baseado no efeito *blur* proposto, não tem como base a análise espaço-temporal de uma seqüência de imagens. Esta técnica utiliza o efeito de escorrimento ou *blur*, para determinar velocidades instantâneas. O tratamento dos dados contidos em uma única imagem com escorrimento fornece dados suficientes para a determinação da velocidade naquele instante. O único pré-requisito do método é que o tempo de abertura do obturador seja bem definido, conforme indicado na figura 3.24b. [Kang, S., Min, J. e Paik, J., 2001]

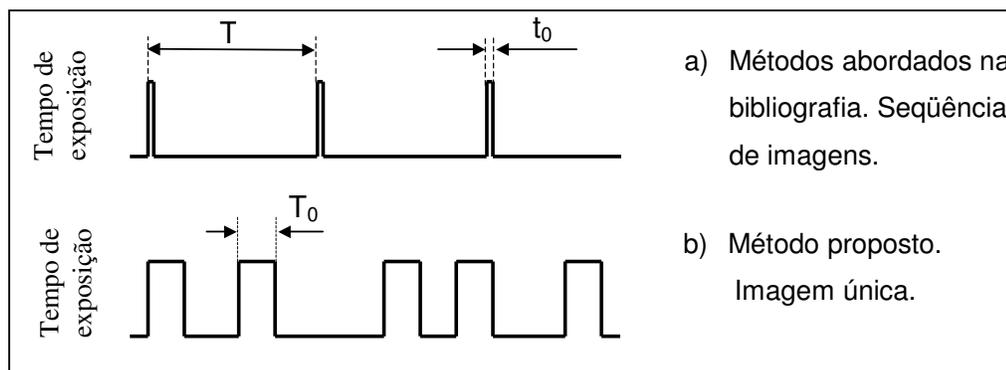


Figura 3.24. – Comparação de métodos de aquisição

Desta forma o próximo capítulo será dedicado à apresentação detalhada do método *blur*.

4. MÉTODO DE ESCORRIMENTO OU *BLUR*

4.1. *Shutter Speed* ou Velocidade do obturador

Na câmera de vídeo, o obturador é o dispositivo que controla o tempo que o CCD (o sensor onde as imagens são formadas) deve receber uma determinada quantidade de luz. Nos dois casos, vídeo e fotografia, a principal função do obturador, além de regular a exposição correta, é controlar o efeito de maior ou menor congelamento da imagem em cenas de movimento. À medida que a velocidade do obturador é diminuída, maior tempo em que a imagem é projetada no CCD.

Ao contrário das máquinas fotográficas tradicionais, onde o obturador é um dispositivo mecânico com partes móveis que se abrem e fecham rapidamente para expor o filme, na câmera de vídeo, o "obturador" é um dispositivo eletrônico. Na realidade, o que faz o obturador funcionar na câmera de vídeo é uma função eletrônica de apagamento, uma corrente elétrica denominada corrente de *purge* (apagar), que percorre as linhas do CCD um pouco antes do ponto em que o mesmo está sendo lido. A variação desta distância é que permite o controle de uma menor ou maior exposição do CCD. Como este controle é eletrônico, não possui partes móveis, é possível obter-se velocidades elevadas de obturação (1/10.000 seg. por exemplo), o que permite congelar com facilidade uma imagem em movimento rápido. [Yasuo, Y., Kazuyochi, H. E Kazuhiro F., 2003]

O método proposto baseia-se no registro de imagens que contenham o efeito de borramento ou efeito *blur*, produzidos pela aquisição de imagens a diferentes tempos de exposição do CCD, ou *shutter speed*.

4.2. Definição do efeito de escorrimento ou *blur*

O efeito *blur* é o resultado do registro de uma imagem em movimento, enquanto o *shutter* da câmera permanece aberto. [Ben-Ezra, E. e Nayar, S.K., 2003] Considere-se uma imagem $f(x,y)$ que se movimenta em um plano bem definido a uma velocidade com uma componente $x_0(t)$ e uma componente $y_0(t)$. A exposição total em qualquer ponto de uma matriz CCD (ou filme de uma câmera fotográfica) é obtida através da integração da exposição instantânea por um intervalo de tempo durante o qual o obturador ou *shutter* está aberto. Então, se T é o tempo de duração da exposição, assumindo-se que o obturador abre e fecha instantaneamente, tem-se:

$$g(x, y) = \int_0^T f[x - x_0(t), y - y_0(t)]dt \quad (4.1)$$

onde $g(x,y)$ é a imagem borrada, também denominada efeito *blur* [Gonzalez, R.C., 1993].

A seguir, são exibidas duas imagens, a primeira (figura 4.1.), sem efeito de escorrimento e a segunda (figura 4.2.), simulando a superposição de 50 imagens, simulando uma velocidade paralela ao eixo x , para a direita.



Figura 4.1. – Imagem Original

Figura 4.2. – Imagem Borrada (com *blur*)

A imagem borrada acima foi simulada através de uma função específica do MATLAB®, que simula o escorrimento de uma imagem.

Nesta abordagem, pretende-se apresentar uma técnica baseada em processamento de imagem, capaz de determinar a velocidade da superfície asfáltica em movimento. A velocidade será obtida a partir da contagem dos segmentos claros contidos em uma única imagem borrada ou com efeito *blur*. A idéia principal desta abordagem é que os segmentos claros formados a partir do borramento de uma imagem, possam ser contados e tenham tamanhos proporcionais à velocidade em que a imagem se desloca naquele instante.

Na figura 4.3. fica identificada a presença de segmentos de mesmo tamanho, e que será posteriormente provado, de tamanho proporcional à velocidade da superfície em movimento.

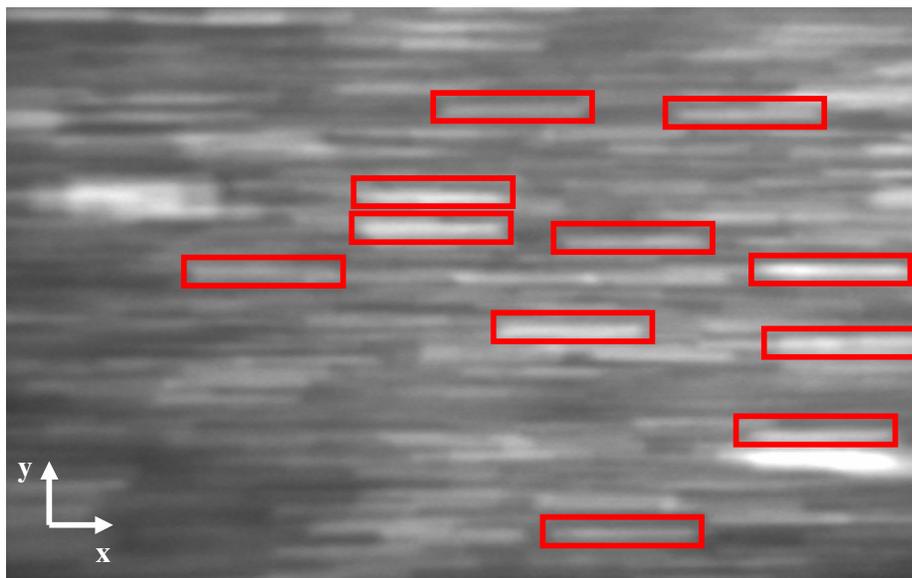


Figura 4.3. – Identificação de Segmentos em uma fotografia dinâmica

4.3. Modelo matemático do efeito *blur*

Considere-se uma imagem $f(x,y)$ que se movimenta em um plano bem definido a uma velocidade com uma componente $x_0(t)$ e uma componente $y_0(t)$. A imagem registrada com efeito *blur* $g(x,y)$ decorre de uma função de espalhamento de pontos (PSF), formulada por [Lin, H.Y., 2004] e [Favaro, P., Burger, M. e Soatto, S., 2004]:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x - \alpha, y - \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + n(x, y) \quad (4.2)$$

em que: $f(x,y)$ a imagem ideal, $g(x,y)$ a imagem com *blur*, $h(x,y)$ a função de espalhamento (PSF) e $n(x,y)$ o termo de ruído randômico [Lin, H.Y., 2004]

No caso de movimento linear, a função PSF $h(x,y)$ é dada por

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{R}, |x| \leq \frac{R}{2} \cos \theta, y = \tan \theta \\ 0, |x| > \frac{R}{2} \cos \theta \end{cases} \quad (4.3)$$

Sendo θ a o ângulo entre a direção do movimento e o eixo x da figura 4.3. e R o comprimento em *pixels* do movimento *blur*.

No caso particular em estudo, parte-se da hipótese de que o movimento seja paralelo ao eixo x da figura 4.3., ou seja, $\theta = 0$, simplificando (4.3) a:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{R}, |x| \leq \frac{R}{2}, y = 0 \\ 0, |x| > \frac{R}{2} \end{cases} \quad (4.4)$$

Conhecendo-se θ , no caso $\theta = 0$, e desconsiderando-se o efeito de $n(x,y)$, para simplificar o problema, 4.2 pode ser transformada em uma equação unidimensional:

$$g(x) = \frac{1}{R} \int_0^R f(x - \alpha) d\alpha \quad (4.5)$$

Para exemplificar a aplicação da formulação do efeito *blur*, toma-se como exemplo um ponto branco (figura 4.4.) com fundo preto, representado por $f(x,y)$:

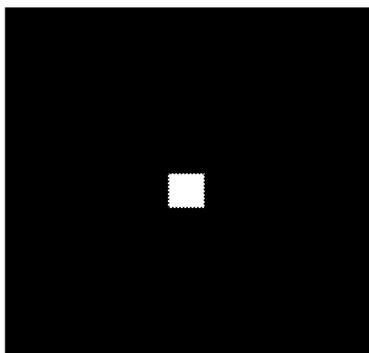


Figura 4.4. – Imagem ideal $f(x,y)$

Aplicando-se diretamente 4.5, com $R=4$, obtém-se a figura 4.5.:

$$g(x) = \frac{1}{4} \int_0^4 f(x - \alpha) d\alpha \quad (4.6)$$

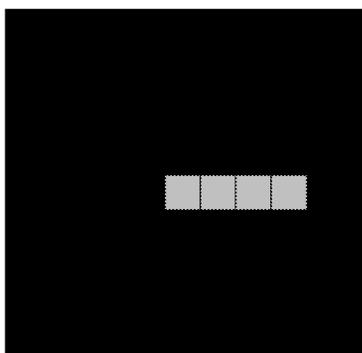


Figura 4.5. – Imagem com *blur* $g(x,y)$

O modelo matemático de um ponto branco isolado aplicado sob um fundo escuro, definido como imagem ideal $f(x,y)$, tem como imagem com *blur*, $g(x,y)$, definido como um segmento de reta, de tamanho proporcional ao tempo de exposição em que o *shutter* permaneceu aberto.

Desta forma, é razoável considerar que, contando-se o número de segmentos de mesmo comprimento contidos em uma imagem borrada, se possa estimar a velocidade da figura em movimento neste determinado instante, já que o tamanho dos segmentos de reta contidos na imagem, são proporcionais à velocidade do objeto em movimento.

Considerando-se agora uma imagem ideal (figura 4.6.), onde por hipótese não há sobreposição, a imagem com *blur* formada (figura 4.7.), será composta por segmentos de mesmo tamanho, proporcionais à velocidade da imagem em movimento naquele instante.

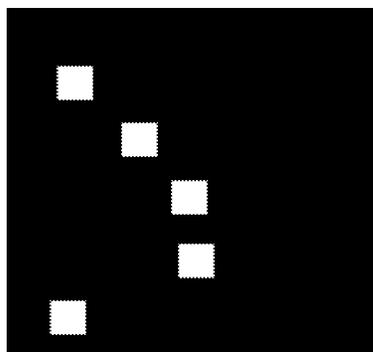


Figura 4.6. – Imagem ideal sem *blur*

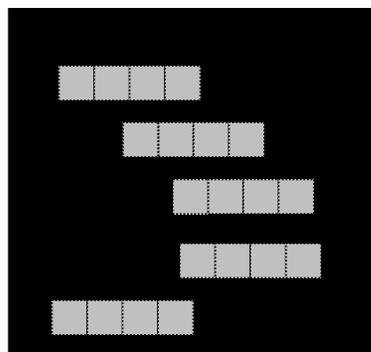


Figura 4.7. – Imagem ideal com *blur*

Neste exemplo, todos os segmentos da imagem com *blur* (figura 4.7.) têm o mesmo tamanho, proporcionais à velocidade do objeto em movimento.

Em uma imagem real, é razoável que se obtenha segmentos com diversos tamanhos, mas prevalece a idéia de que se contando os segmentos de mesmo tamanho, obtenha-se um grande número de segmentos, cujo comprimento seja proporcional à velocidade em análise.

Tomando-se como hipótese a utilização de uma superfície asfáltica, cuja velocidade se pretende determinar, observa-se que esta superfície contém pedriscos brancos ou claros, aplicados sob um fundo escuro de asfalto. Tem-se desta forma, o contraste necessário à aplicação do método *blur*.

O somatório do efeito gerado por diversos pedriscos, gera uma imagem $g(x,y)$ contendo diversos segmentos de reta, com comprimento proporcional à velocidade da superfície em análise, conforme mostra a figura 4.8.

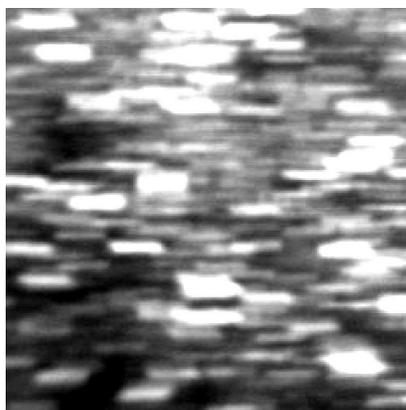


Figura 4.8. – Imagem com *blur* contendo diversos segmentos de reta

A principal proposta deste trabalho parte da hipótese de que, contando-se os segmentos de reta contidos em uma imagem borrada de uma superfície asfáltica, obtenha-se um grande número de segmentos com tamanho proporcional ao deslocamento da imagem real.

A partir desta hipótese, propõe-se um algoritmo para a contagem dos segmentos claros contidos na imagem borrada. O resultado obtido é registrado em um gráfico, que tem no eixo x , o tamanho do segmento encontrado, e no eixo y , o número de segmentos de tamanho x encontrados na imagem borrada, conforme exemplificado na figura 4.9.

O máximo da curva indica o ponto de maior número de segmentos contínuos de mesmo tamanho contidos na imagem borrada, ou seja, este é o deslocamento obtido durante o tempo em que o *shutter* permaneceu aberto. Esta técnica será detalhadamente demonstrada no item 4.5.3.

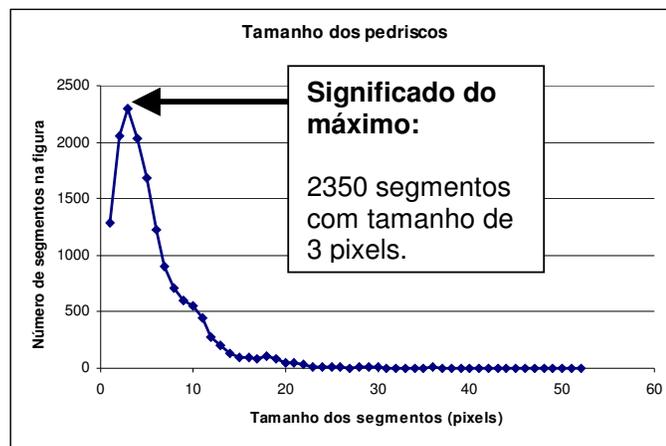


Figura 4.9. – Gráfico de contagem de segmentos

4.4. Análise do efeito *blur* em uma superfície asfáltica

No item anterior decidiu-se estudar as regularidades contidas em uma imagem borrada, no intuito de se determinar a velocidade do anteparo em movimento. A partir deste ponto, é definida a superfície asfáltica (figura 4.10.) como sendo a superfície padrão, cuja velocidade se pretende determinar, pois esta possui nitidamente objetos (cascalhos) branco-acinzentados sobre um fundo escuro.

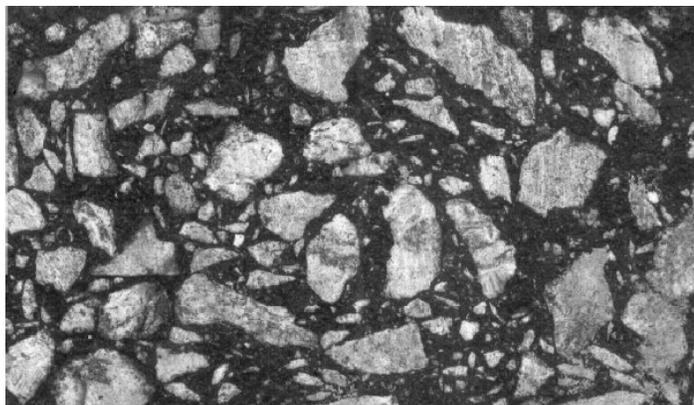


Figura 4.10. – Mistura asfáltica convencional

4.4.1. Composição estrutural da mistura asfáltica

Os asfaltos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Originam-se do petróleo, no qual estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos, seja pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais), seja por destilação em unidades industriais especialmente projetadas [DNER-EM 204/95, 1995].

Segundo o [DNER-ES 313/97, 1997], a mistura asfáltica ou concreto betuminoso é a mistura executada em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado mineral graduado (brita, pedriscos, areia e pó de pedra), material de

enchimento (ou *filler*), ligante betuminoso e fibras (como aditivo estabilizante), espalhada e comprimida a quente.

De acordo com o [DNER-EM 37/97, 1997], agregado graúdo é o seixo rolado, o cascalho, a pedra britada, a escória de alto forno ou outros materiais granulares comprovadamente inertes e de características semelhantes, de diâmetro máximo superior a 4,8mm. O [DNER-EM 38/97, 1997], define como agregado miúdo a areia quartzosa, a areia artificial resultante da britagem de rochas estáveis ou, desde que aprovados, quaisquer outros materiais inertes com características semelhantes, de diâmetro igual ou inferior a 4,8mm.

4.4.2. Superfície asfáltica borrada

Em sua superfície, o asfalto é composto principalmente de agregado miúdo, com materiais rochosos inertes de diâmetro igual ou inferior a 4,8mm. A figura 4.11. representa a superfície de um asfalto convencional, destacando-se o agregado miúdo, branco-acizentado sobre um fundo escuro, representado pelo betume e *filler*. O contraste entre o agregado miúdo e a massa de preenchimento motivou a análise da imagem em movimento desta superfície, pois os sólidos de cor mais clara, deverão gerar um borrão sobre o fundo escuro, conforme identificado na figura 4.12.

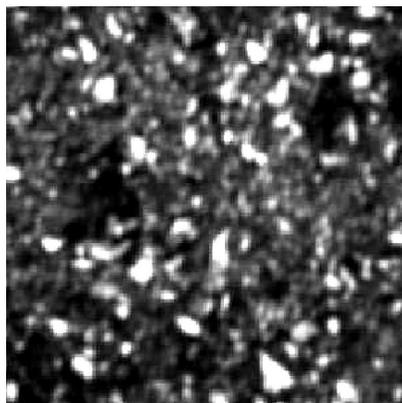


Figura 4.11. – Fotografia estática de um segmento de asfalto

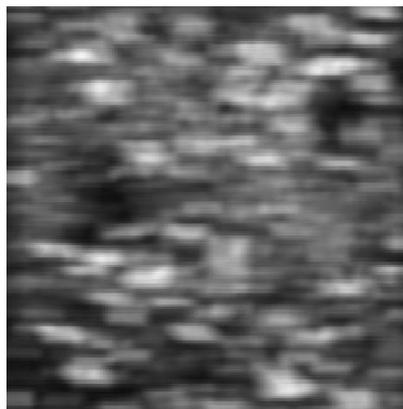


Figura 4.12. – Fotografia dinâmica de um segmento de asfalto

4.5. Desenvolvimento da técnica *blur*

A partir de uma imagem borrada, elaborou-se um método analítico para se contar todos os vetores paralelos gerados. Após a aquisição da imagem, implementou-se um método para contar os vetores de tamanhos idênticos, formados pelo escorrimento dos objetos claros no fundo escuro do asfalto. Prova-se então que o tamanho dos vetores formados é proporcional à velocidade da superfície asfáltica em movimento.

4.5.1. Eliminação das bordas da imagem original

A partir de uma imagem padrão, nota-se que há a presença de distorções nas quatro bordas da figura. Assim, mostra-se necessário eliminar as bordas da imagem original, devido às distorções produzidas pelo conjunto de lentes. Desta forma, é considerada somente a imagem no interior do pontilhado da figura 4.13..

162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183
182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193
192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203
202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213
212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223
222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233
232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243
242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263
262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283
282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293
292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303
302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313
312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323
322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333
332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343

Figura 4.13. – Distorções produzida nas bordas

4.5.2. Equalização do histograma

O método de equalização do histograma foi estudado durante o trabalho, todavia não foi utilizado na prática, pois esta técnica altera irreversivelmente a informação de energia contida na imagem original. Desta forma, esta técnica não foi utilizada no desenvolvimento do método *blur*, sendo mencionada somente por permitir uma melhor visualização do fenômeno, facilitando assim a análise do método implementado.

O histograma de uma imagem digital com níveis de cinza variando de $[0, L-1]$ é uma função discreta $p(r_k)=n_k/n$, onde r_k é o k -ésimo nível de cinza, n_k é o número de *pixels* na imagem com aquele nível de cinza, n é o número total de *pixels* na imagem e $k=0,1,2,\dots,L-1$. Ou seja, $p(r_k)$ dá a estimativa da probabilidade da ocorrência dos níveis de cinza r_k .

O objetivo na equalização do histograma é obter-se um histograma uniforme a partir de uma imagem original. Considere um valor de *pixel* $u \geq 0$, uma variável randômica com função de densidade de probabilidade contínua $p_u(\xi)$ e uma distribuição de probabilidade acumulativa $Fu(\xi) \approx P[u \leq \xi]$. Então a variável randômica

$$v \equiv F_u(u) \equiv \int_0^u p_u(\xi) d\xi \quad (4.7)$$

será uniformemente distribuído em $(0,1)$. Para implementar esta transformação em imagens digitais, suponha que a entrada u tenha L níveis de cinza x_i , $i=0,1,\dots,L-1$, com probabilidades $p_u(x_i)$. Estas probabilidades podem ser determinadas a partir do histograma da imagem queda $h(x_i)$, o número de *pixels* com o valor x_i de níveis de cinza. Então,

$$p_u(x_i) = \frac{h(x_i)}{\sum_{i=0}^{L-1} h(x_i)}, \quad i = 0,1,\dots,L-1 \quad (4.8)$$

A saída v' , também assumida ter L níveis, é dada como segue:

$$v \cong \sum_{xi=0}^u p_u(x_i) \quad (4.9)$$

$$v' \cong \text{Int} \left[\frac{(v - v_{\min})}{1 - v_{\min}} (L - 1) + 0.5 \right] \quad (4.10)$$

Onde v_{\min} é o menor valor positivo de v obtido em 4.9. Agora v' será uniformemente distribuído de forma aproximada, pois v não é uma variável distribuída uniformemente. A figura 4.14. mostra um algoritmo de equalização de histograma para imagens digitais. [Jain, R., 1995]

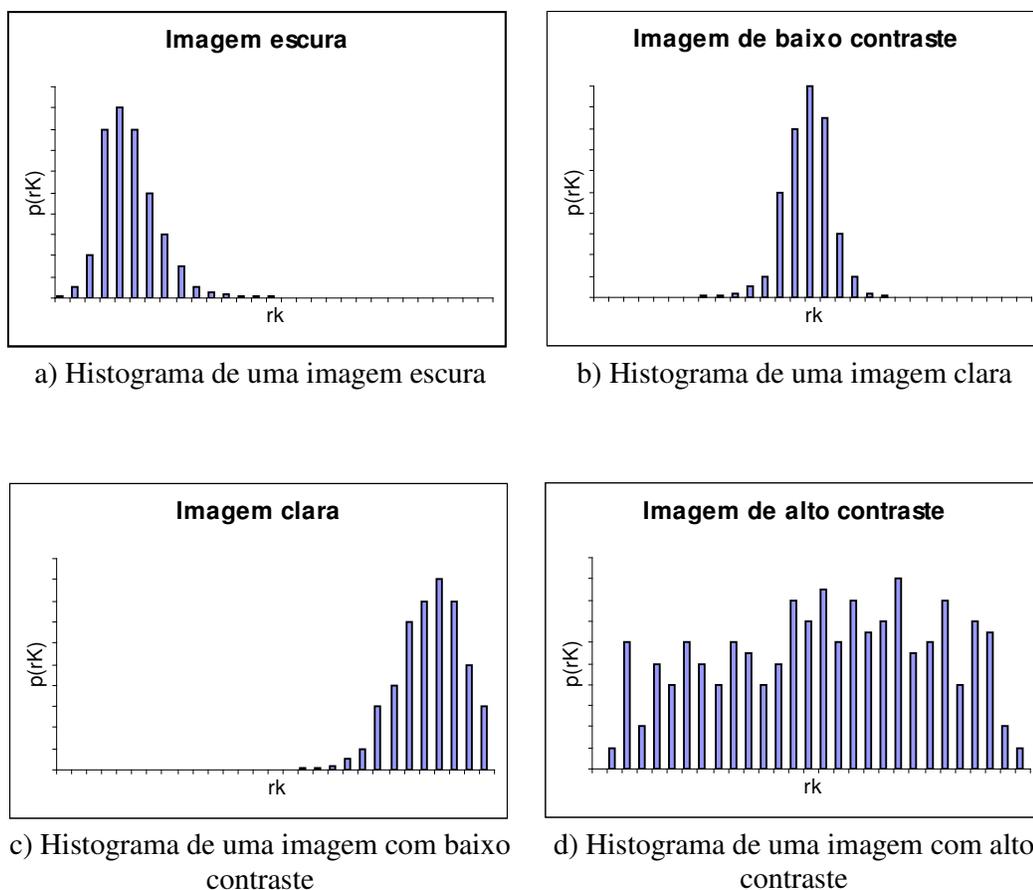


Figura 4.14. – Os quatro histogramas característicos básicos

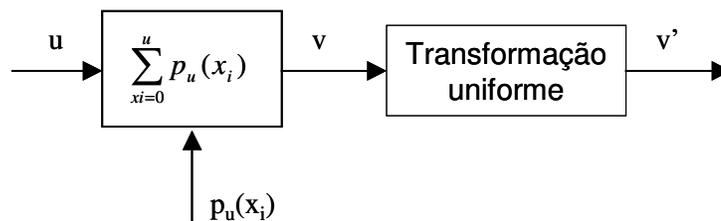


Figura 4.15. – Transformação de equalização de histograma

De 4.5 nota-se que v é uma variável discreta que toma o valor

$$v_k = \sum_{i=0}^k p_u(x_i) \quad (4.11)$$

se $u=x_k$. A equação 4.10 simplesmente requantifica uniformemente o conjunto $\{v_k\}$ para $\{v'_k\}$. Pode-se verificar a imagem original através da figura 4.16. e a imagem equalizada na figura 4.17.

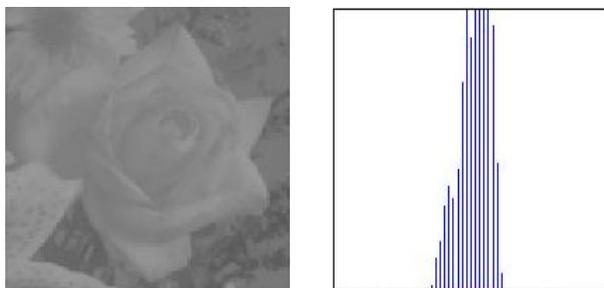


Figura 4.16. – Imagem original

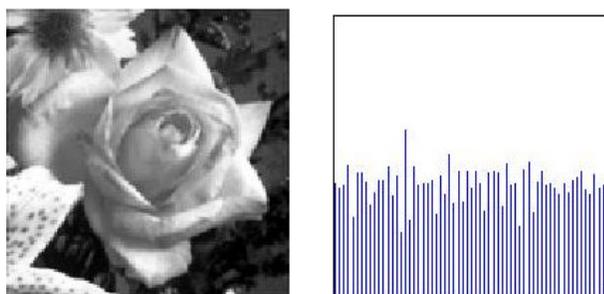


Figura 4.17. – Imagem com histograma equalizado

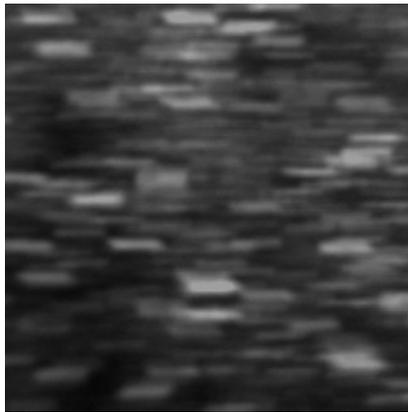


Figura 4.18. – Imagem borrada original

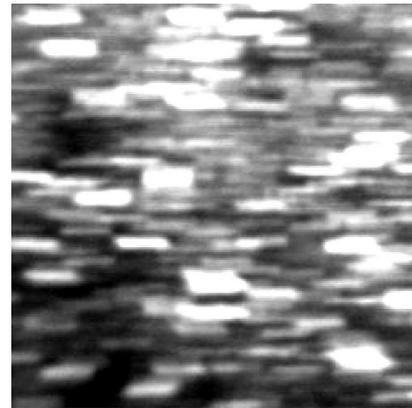


Figura 4.19. – Imagem com histograma equalizado

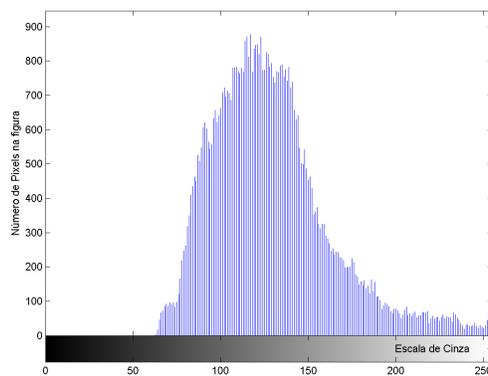


Figura 4.20. – Histograma da imagem original

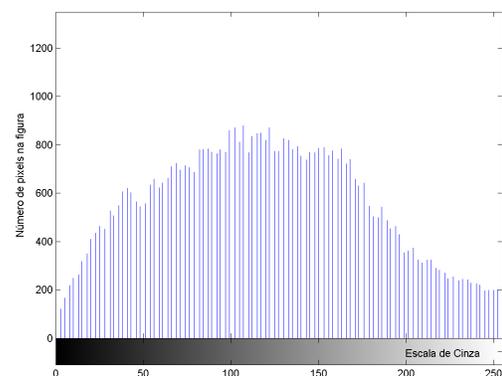


Figura 4.21. – Histograma equalizado

Através da técnica de normalização do histograma, modifica-se a imagem original (figura 4.18.), com o objetivo de tornar a figura mais nítida para o observador (figura 4.19.). As figuras 4.20. e 4.21. representam os respectivos histogramas das imagens.

É importante enfatizar que, normalizando-se o histograma, altera-se a informação de energia luminosa contida na imagem original, pois os picos de energia são extrapolados, implicando em erros na determinação da velocidade da superfície.

4.5.3. Contagem de segmentos contínuos de mesmo tamanho

4.5.3.1. Considerações iniciais

Considere-se o registro de uma imagem em movimento exposta a um intervalo de tempo bem definido a partir de uma câmera CCD. Define-se, em uma escala de 0 a 255, sendo 0 o preto absoluto e 255 o branco absoluto.

Pretende-se contar em uma imagem borrada, o número de segmentos de mesmo tamanho, formados pelo escorrimento devido à exposição contínua da imagem em movimento.

Somente para efeito de visualização, na figura 4.22. foram representadas: a imagem original com histograma equalizado e ao lado, na figura 4.23., a imagem modificada com mapa de cores, sendo as cores quentes (mais escuras) representando os picos e as cores frias (mais claras) representando vales.

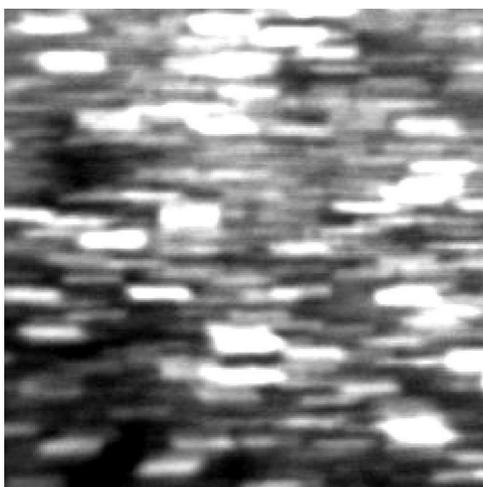


Figura 4.22. – Imagem com histograma equalizado

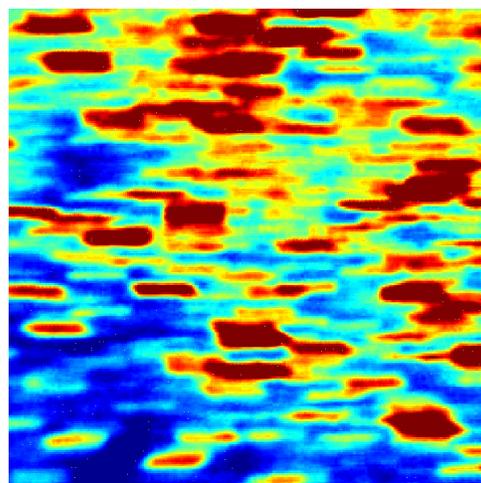


Figura 4.23. – Imagem modificada com mapa de cores

Na figura 4.24., está representada a mesma imagem em três dimensões contendo os picos e vales mencionados anteriormente.

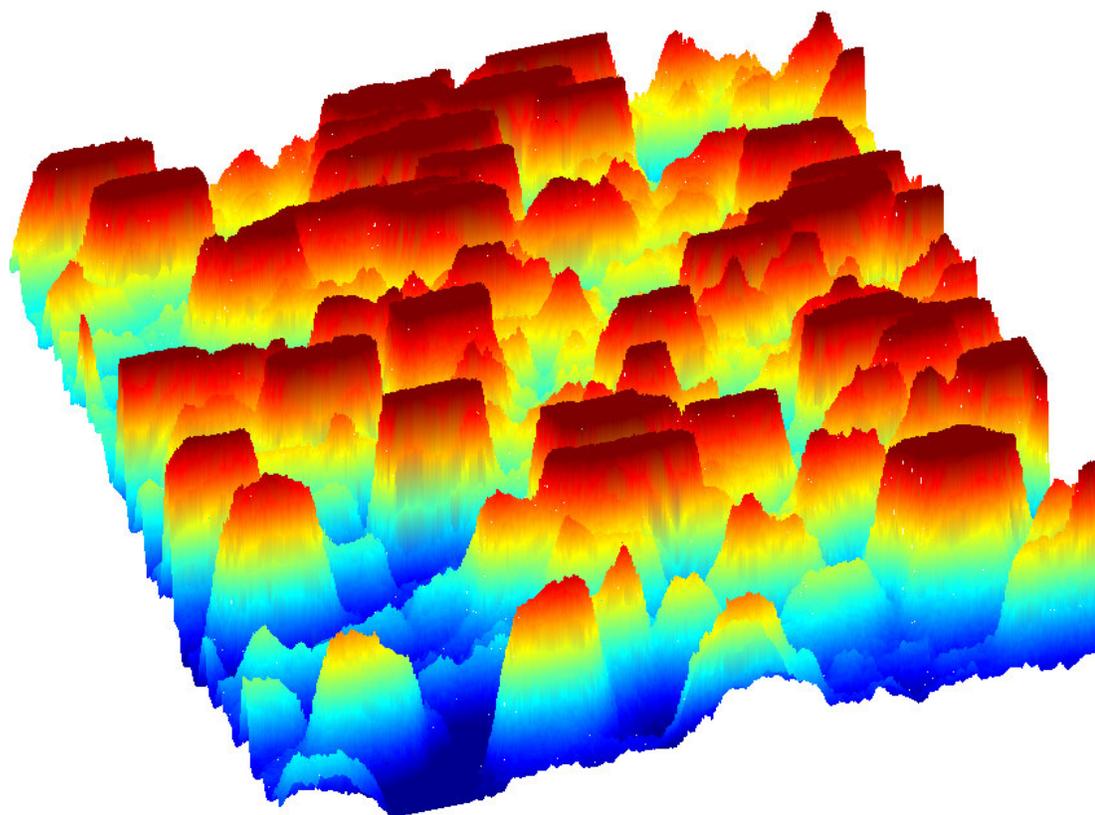


Figura 4.24. – Imagem tridimensional

A partir de imagens semelhantes a esta, será proposto um método capaz de indicar a velocidade da superfície em movimento.

4.5.3.2. Definição de “segmento contínuo”

Defina-se intensidade limite, a intensidade de um *pixel* (de 0 a 255), acima da qual, o *pixel* pertence ao segmento e, abaixo da qual, o *pixel* não pertence ao segmento. A Intensidade limite será indicada por *Thr* (*Threshold*).

Na figura 4.25., tem-se um segmento composto por *pixels*, e na figura 4.26., tem-se a matriz numérica que representa esta imagem. As células hachuradas representam os *pixels* com intensidade maior que 120, numa escala de 0 a 255.

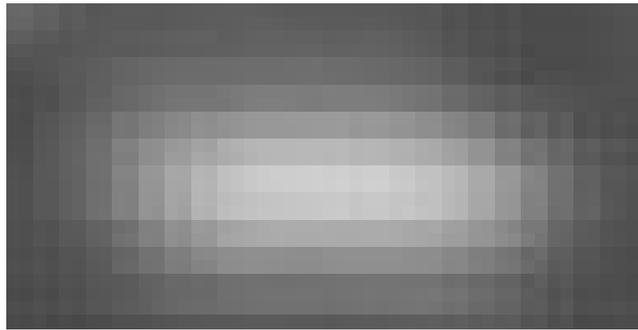


Figura 4.25. – Representação de um segmento em *pixels*

103	104	97	96	90	92	86	87	90	90	90	90	91	92	92	93	93	92	91	90	90	90	90	90	89	89	89	87	86	87	81	83	78	80	76	80	75	76	76	77	79	80	82	83	83							
101	101	96	96	90	92	88	89	89	89	89	89	91	92	93	93	94	94	93	92	91	91	91	92	91	90	88	86	86	80	82	78	79	76	79	75	75	75	75	77	79	80	81	82								
94	94	89	90	86	89	88	90	92	92	93	94	94	96	97	97	94	96	97	97	97	97	97	96	96	97	97	96	92	90	86	83	85	80	81	78	81	76	76	76	76	77	79	80	81	82						
87	87	85	85	85	88	89	91	90	90	91	93	94	95	95	96	96	97	99	99	99	100	100	98	98	99	99	99	94	92	90	84	86	80	80	76	79	73	76	76	76	77	79	80	81	82						
82	82	84	86	88	90	93	94	100	101	103	105	106	107	107	107	108	109	109	109	110	110	110	111	108	108	107	106	105	104	102	100	99	92	93	86	81	83	77	75	75	75	76	77	79	80	81					
79	78	82	83	89	94	95	99	101	103	105	107	109	109	109	109	110	110	110	111	111	111	110	109	108	107	105	103	101	100	93	86	84	78	80	74	79	76	76	77	77	79	80	80	81							
76	75	80	79	88	85	95	95	103	105	109	112	115	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116				
78	78	81	79	88	89	97	98	103	105	109	113	117	119	119	119	119	121	125	127	127	128	124	123	125	125	125	125	124	121	119	115	114	106	106	99	97	97	87	87	86	84	82	80	79	78	79	78				
76	75	84	86	92	95	104	104	119	117	125	128	134	136	143	143	144	146	148	151	152	152	153	153	154	154	155	155	153	148	144	142	141	133	131	123	124	108	111	98	100	88	93	79	83	78	82	78				
76	76	86	87	84	87	107	107	119	117	126	129	130	138	145	145	148	151	152	152	152	153	154	154	155	155	155	153	148	144	142	142	134	132	123	123	107	109	95	100	88	93	79	82	77	79	79	79				
77	77	86	86	86	89	110	112	129	129	141	143	152	154	163	163	173	177	181	183	183	183	184	184	184	185	185	183	182	181	177	177	172	169	163	147	147	130	131	116	114	101	105	91	94	86	88	83				
79	79	87	87	89	95	100	111	112	126	126	141	143	156	164	164	174	174	179	182	183	183	184	184	184	185	185	183	182	181	177	176	171	170	163	159	147	147	129	129	113	112	102	104	89	90	82	83	79	88		
81	78	88	88	86	89	111	112	132	132	150	151	167	164	181	179	192	195	200	203	204	205	206	207	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206		
82	80	88	88	86	89	110	111	129	129	149	149	164	165	182	180	192	195	200	203	204	205	206	207	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	
82	80	88	88	86	89	111	112	129	129	148	147	163	162	181	179	187	190	193	195	197	198	199	200	201	202	200	198	196	194	192	185	180	167	167	151	149	129	134	112	112	97	98	87	85	81	81	81				
82	80	88	86	86	89	111	113	128	128	148	147	163	162	181	179	187	190	193	195	197	198	199	200	201	202	200	198	196	194	192	185	180	167	166	151	149	129	134	112	112	97	98	87	85	81	81	81				
80	79	83	81	80	80	90	90	109	112	128	129	145	142	154	153	163	164	167	170	172	172	172	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173	173		
80	79	84	82	80	89	97	99	112	115	129	130	143	148	151	151	164	164	170	171	170	170	171	170	170	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	
79	77	80	78	84	84	91	92	100	102	114	114	127	128	136	137	141	142	143	143	143	142	141	141	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	
80	79	82	79	84	83	89	90	102	104	113	114	120	124	131	132	140	141	142	142	141	140	140	140	142	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143
77	75	80	77	82	81	87	88	99	97	99	105	104	107	109	111	112	113	112	112	112	113	114	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	
74	73	77	74	80	78	85	86	89	91	88	100	103	104	105	105	111	112	113	114	114	114	114	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115
78	77	80	77	82	80	86	86	91	92	95	100	103	106	107	107	110	111	112	113	113	113	113	113	113	114	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115
74	73	76	71	75	72	76	76	81	81	81	84	85	87	87	88	88	88	91	91	91	91	91	91	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	92	91	
74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74

Figura 4.26. – Matriz contendo *pixels* com intensidade maiores que 120

Na seqüência exemplificada na figura 4.27., considere-se como **intensidade limite 100** ($Thr=100$). Somente os valores maiores ou iguais a 100 farão parte de segmentos.

88	100	105	110	114	47	101	150	153	99	101	55
----	------------	------------	------------	------------	----	------------	------------	------------	----	------------	----

Figura 4.27. – vetor de *pixels*

Desta forma, tem-se :

- 1 segmento medindo 1 *pixel*
- 1 segmento medindo 3 *pixels*
- 1 segmento medindo 4 *pixels*

Na proposta do método *blur*, pretende-se contar em uma imagem contendo escurimento, o número de segmentos contínuos, com intensidades maiores que uma intensidade limite pré-estabelecida.

4.5.3.3. Definição de “gráfico de contagem de segmentos”

Utilizando-se o software de implementação de cálculos computacionais, visualização e programação MATLAB®, pode-se então contar o número de segmentos contínuos, maiores que uma intensidade limite de uma imagem com *blur* (Anexo A).

A figura 4.28. mostra o resultado obtido na contagem de segmentos contínuos da imagem original, estabelecendo-se como intensidade limite 120.

Gera-se desta forma o gráfico contendo o número de segmentos da imagem original.

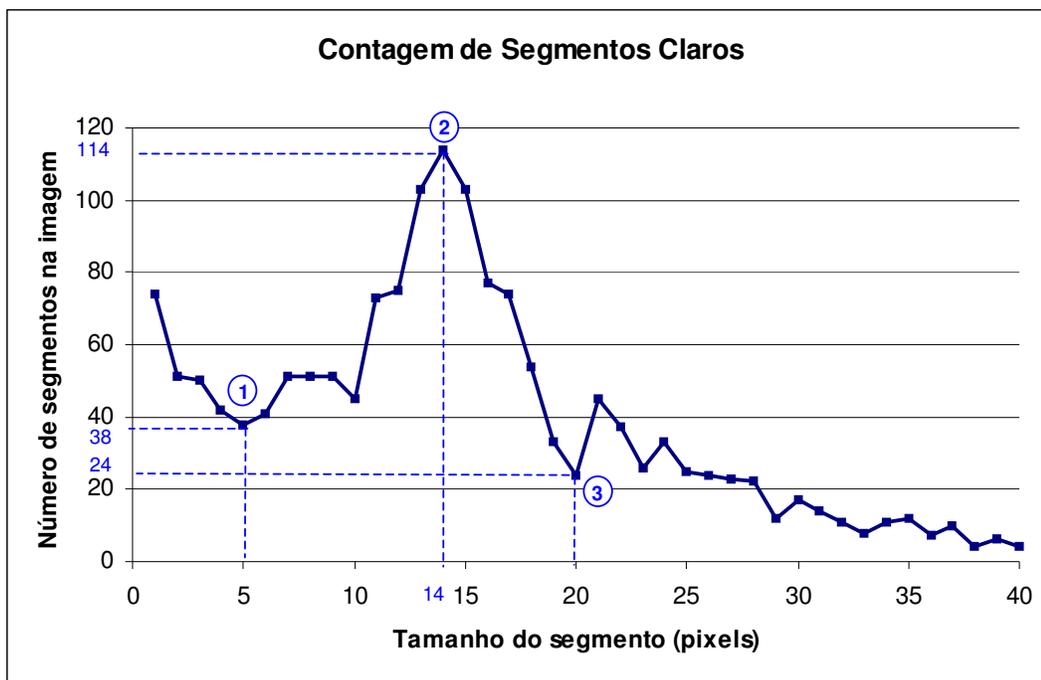


Figura 4.28. – Gráfico de contagem de segmentos

Interpretando-se o gráfico da figura 4.28., pode-se concluir que:

- 1) **Ponto (5;38)** – 38 segmentos contínuos de comprimento 5 *pixels*;
- 2) **Ponto (14;114)** – 114 segmentos contínuos de comprimento 14 *pixels*;
- 3) **Ponto (20;24)** – 20 segmentos contínuos de comprimento 24 *pixels*;

Assim, o máximo da curva indica o ponto de maior número de segmentos contínuos de mesmo tamanho, contidos na imagem borrada, ou seja, este é o deslocamento máximo obtido, considerando-se determinada intensidade limite.

O gráfico indica um deslocamento máximo de 14 *pixels* enquanto o *shutter* da câmera permaneceu aberto, medindo-se o deslocamento da imagem em *pixels* durante um intervalo de tempo dt . Este gráfico será denominado gráfico de contagem de segmentos contínuos de uma imagem.

4.5.4. Tamanho dos pedriscos da camada asfáltica

A determinação do máximo obtido no item 4.4.3. não é suficiente para se assegurar que este valor seja exatamente igual ao deslocamento durante o intervalo de tempo em que o *shutter* permaneceu aberto. Para se determinar este deslocamento, é importante levar em consideração o tamanho do pedrisco da camada asfáltica.

Parte-se da hipótese de que o deslocamento real d durante o intervalo de tempo em que o *shutter* permaneceu aberto, seja igual à distância entre os centros de massa CM da imagem inicial e da imagem final da pedra, conforme mostra a figura 4.29.:

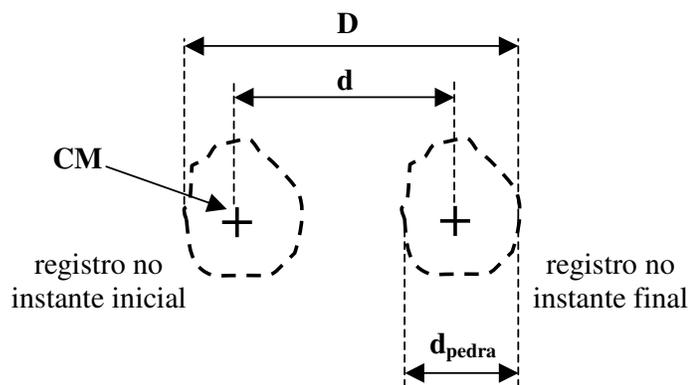


Figura 4.29. – Centros de massa das pedras

Assume-se como hipótese, que a distância d entre os centros de massa das imagens do pedrisco seja igual ao deslocamento total D determinado pelo *blur*, menos o diâmetro do pedrisco, ou seja:

$$d = D - d_{\text{pedra}} \quad (4.12)$$

Para se determinar o diâmetro real dos pedriscos, basta determinar o tamanho dos segmentos para uma imagem estática. Na figura 4.30., tem-se o gráfico de contagem de segmentos para uma figura estática. O máximo obtido determina que o tamanho médio dos pedriscos é de 3 pixels.

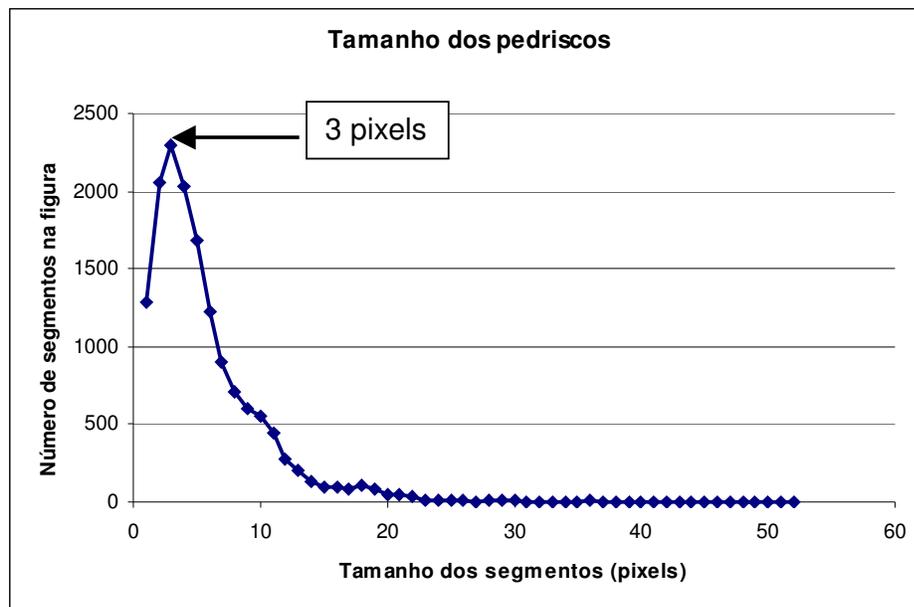


Figura 4.30. - Gráfico de uma imagem estática

4.5.5. Análise de erros de medição

Seja $u = f(x, y, z, \dots, t)$ uma função das variáveis x, y, z, \dots, t . Suponhamos que a avaliação dos valores numéricos das quantidades x, y, z, \dots, t , é feita com uma incerteza (respectivamente, a $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots, \Delta t$, aproximadamente). O valor de u será igualmente determinado com uma incerteza

$$\Delta u = f(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, \dots, t + \Delta t) - f(x, y, z, \dots, t) \quad (4.7)$$

Devido ao erro de avaliação das variáveis independentes. Propõe-se avaliar a incerteza Δu , supondo-se conhecidos as incertezas $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots, \Delta t$.

Supondo os valores absolutos dos $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots, \Delta t$, suficientemente pequenos, pode-se substituir o crescimento total da função pelo diferencial total; obtém-se, então, a igualdade aproximada

$$\Delta u \approx \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \dots + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t. \quad (4.8)$$

Designando-se por $|\Delta^* x|, |\Delta^* y|, \dots, |\Delta^* t|$ os erros absolutos máximos das variáveis correspondentes (os limites dos valores absolutos dos erros), pode-se evidentemente, admitir que:

$$|\Delta^* u| = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| |\Delta^* x| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| |\Delta^* y| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial t} \right| |\Delta^* t|. \quad (4.9)$$

A velocidade da superfície em estudo pode ser dada por:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{N \cdot \frac{S}{P}}{T} = \frac{N \cdot S}{T \cdot P} \quad (4.10)$$

Sendo,

N = deslocamento em (*pixels*) medido pela câmera

S = medida em (mm), determinada na relação P/S (*pixels/mm*)

P = medida em (*pixels*), determinada na relação P/S (*pixels/mm*)

T = tempo em (s) de aquisição de duas imagens

Chega-se à seguinte relação para a determinação do erro $|\Delta^*v|$:

$$|\Delta^*v| = \frac{S}{T.P} |\Delta^*N| + \frac{N}{T.P} |\Delta^*S| + \frac{N.S}{T^2.P} |\Delta^*T| + \frac{N.S}{T.P^2} |\Delta^*P| \quad (4.11)$$

Por exemplo, para:

$\Delta^*N = 1 \text{ pixel}$	$N = 100 \text{ pixels}$
$\Delta^*S = 0,5 \text{ mm}$	$S = 100 \text{ mm}$
$\Delta^*P = 1 \text{ pixel}$	$P = 100 \text{ pixels}$
$\Delta^*T = 1e-4 \text{ s}$	$T = 1/30 \text{ s}$

tem-se:

$$v = \frac{100 \cdot 100}{\frac{1}{30} \cdot 100} = 3000 \text{ mm/s} = 10,8 \text{ km/h}$$

$$|\Delta^*v| = \frac{100}{\frac{1}{30} \cdot 100} \cdot 1 + \frac{100}{\frac{1}{30} \cdot 100} \cdot 0,5 + \frac{100 \cdot 100}{\frac{1}{30^2} \cdot 100} \cdot 10^{-4} + \frac{100 \cdot 100}{\frac{1}{30} \cdot 100^2} \cdot 1 = 84 \text{ mm/s} = 0,3 \text{ km/h}$$

$$V = (10,8 \pm 0,3) \text{ km/h}$$

5. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA, EXPERIMENTO E ANÁLISE

5.1. Figura esquemática do equipamento implementado

A figura 5.1. descreve esquematicamente o aparato implementado para se registrar seqüências de imagens e ao mesmo tempo se medir a velocidade real da superfície em movimento.

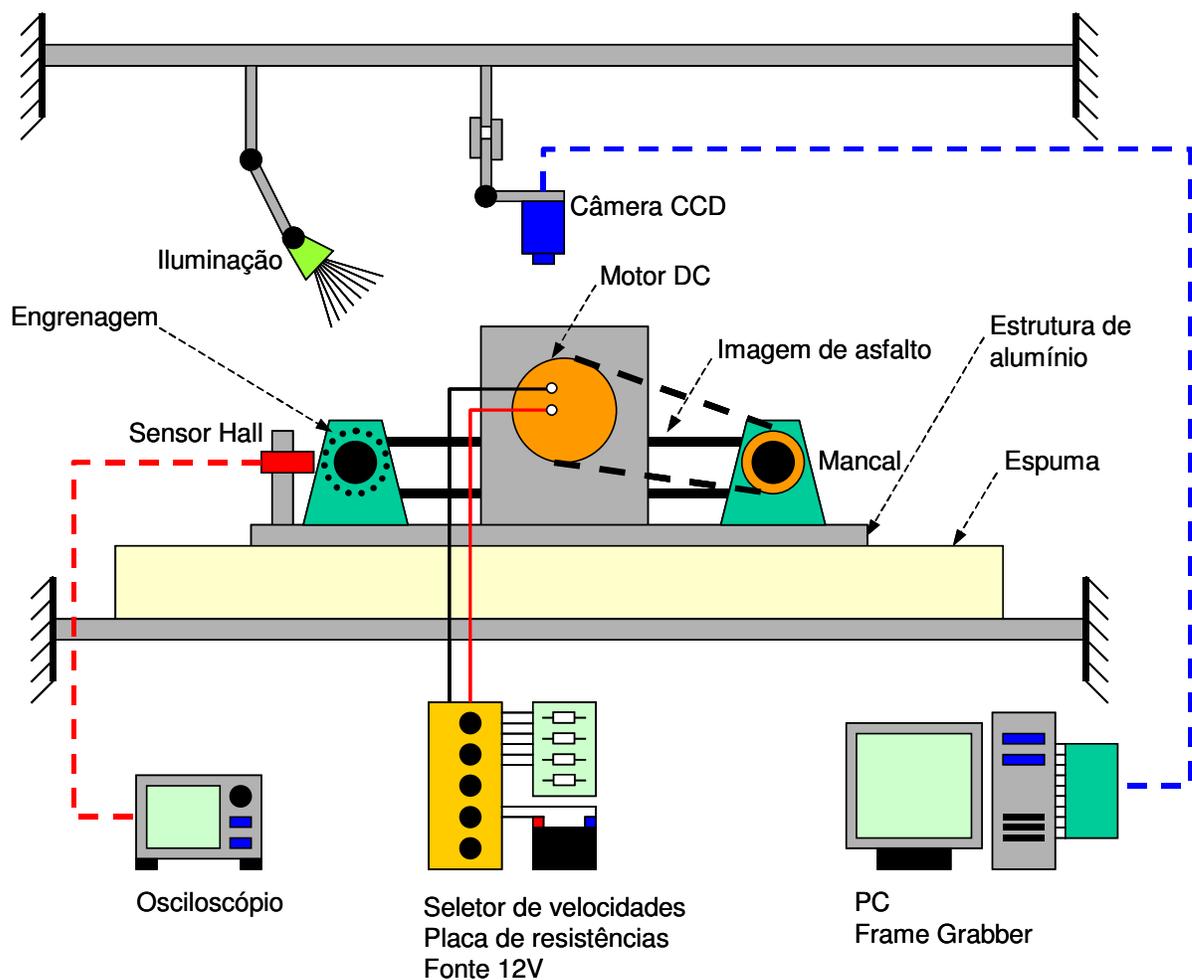


Figura 5.1. – Esquemático do equipamento implementado

5.2. Equipamento construído

5.2.1. Visão geral do dispositivo implementado

Na figura 5.2. visualiza-se o dispositivo de geração de velocidade, composto pelos cilindros paralelos envoltos por uma larga correia simulando a superfície asfáltica. A superfície em movimento de translação é iluminada por um gerador de luz e filmada pela câmera CCD.

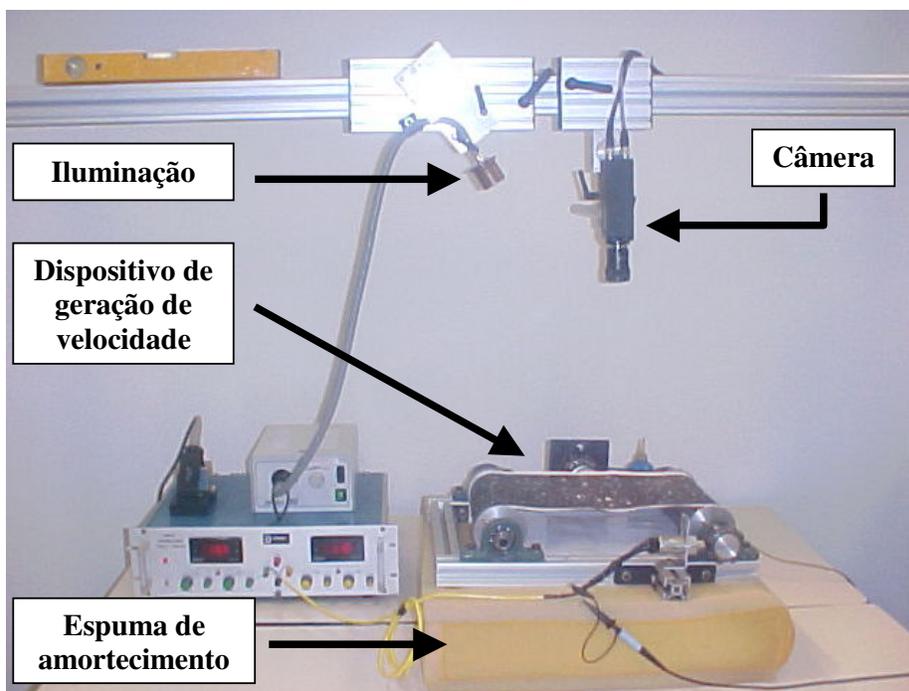


Figura 5.2. – Dispositivo de geração de velocidade

Uma espuma é posicionada abaixo da estrutura que gera a velocidade, para amortecer as vibrações do dispositivo. Um detalhe importante é a fixação da câmera em uma estrutura totalmente independente, da mesa onde está apoiado o dispositivo de geração de velocidade.

5.2.2. Aquisição de imagens em movimento

A aquisição de imagens e seqüências de imagens foi realizada utilizando-se uma câmera Pullnix 9701TM (figura 5.3.) e uma *frame grabber* PCI or PC/104-Plus™ (figura 5.4.). A escolha da câmera deve levar em consideração o escorregamento lateral dos *pixels*, pois se este efeito for considerável, poder-se-ia ter um erro indesejável na implementação do experimento.



Figura 5.3. – Câmera CCD
(Charge Coupled Device)



Figura 5.4. – *Frame Grabber*

A câmera foi posicionada perpendicularmente à imagem em movimento, com o auxílio de um nível (figura 5.2.), gerando o sinal a ser capturado pela placa instalada em um PC. A figura 5.5. mostra a imagem gerada a partir do aparato descrito

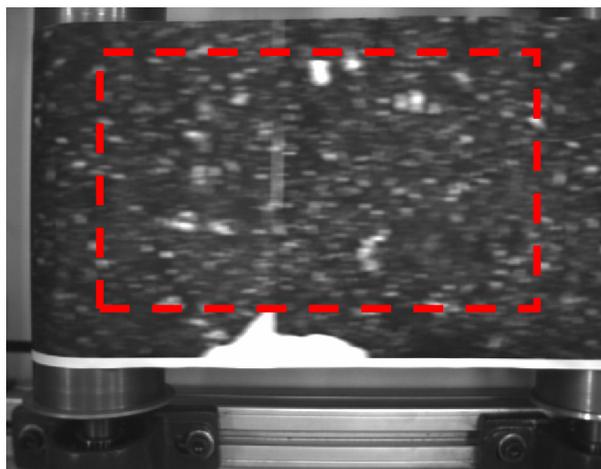


Figura 5.5 – Imagem simulada do asfalto em movimento

5.2.3. Dispositivo de geração de velocidade

Composta por dois eixos paralelos, fabricados de tubos de aço. Externamente aos eixos foram montados eixos de diâmetros maiores, fixados por flanges. Ambos os eixos foram fixados por mancais de esferas, fixados diretamente na estrutura. A estrutura principal foi fabricada com perfis de alumínio (figura 5.6).

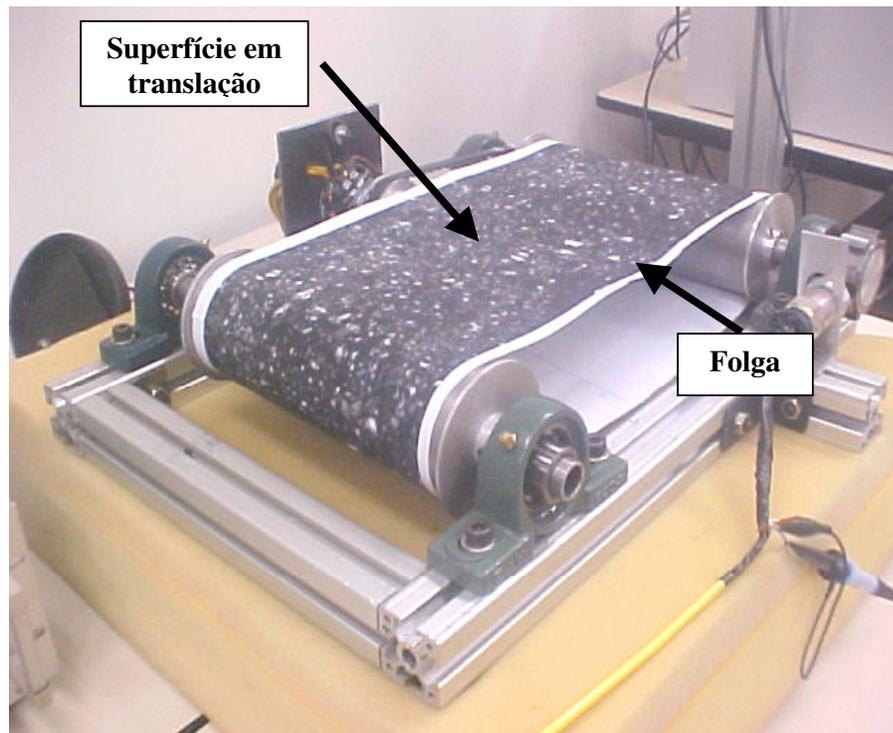


Figura 5.6. – Estrutura do dispositivo de velocidade

A correia que simula a superfície asfáltica foi ajustada com folga, a fim de simular variações da distância do solo em relação à câmera.

5.2.4. Sistema de tração

Um sistema com dois eixos, tracionados por um motor de corrente contínua 12V foi montado, a fim de simular o movimento da superfície asfáltica. O sistema é tracionado através de uma correia e polias dentadas, conforme indicado na figura 5.7.

O perfil pré-fabricado permite ajuste da fixação dos mancais. Desta forma ajusta-se tanto a tensão da correia que traciona o eixo motriz, quanto a tensão da correia que simula a superfície asfáltica.

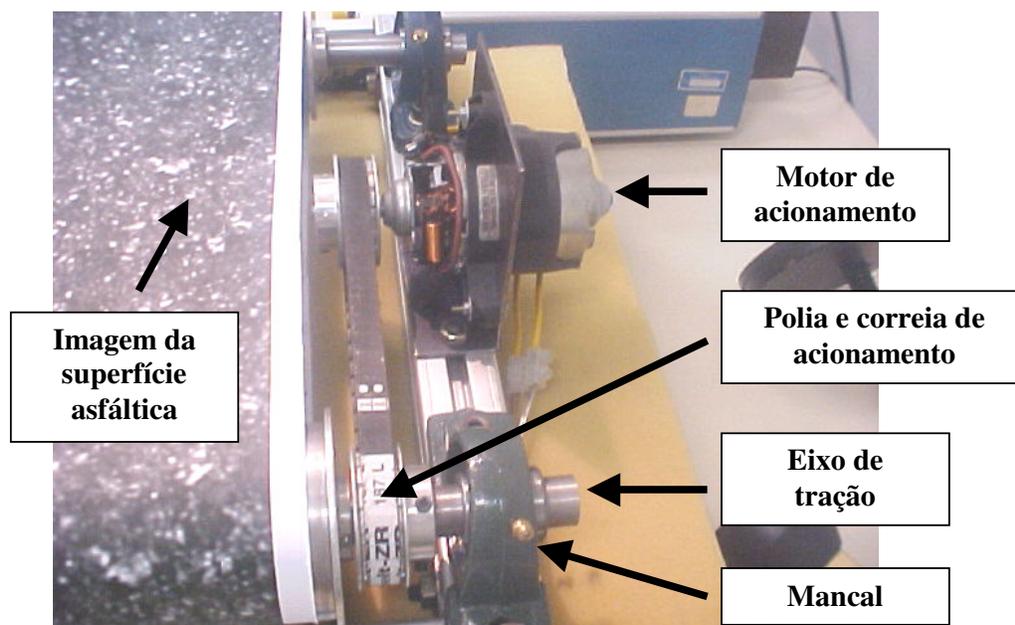


Figura 5.7. – Sistema de tração

5.2.5. Sensor para medição da velocidade

A velocidade do conjunto de tração é monitorada através de um sensor de efeito Hall com saída TTL do tipo onda quadrada. A roda dentada instalada no eixo tracionado, em conjunto com o sensor, possibilitam a leitura da velocidade angular do conjunto através de um osciloscópio (figura 5.8.).

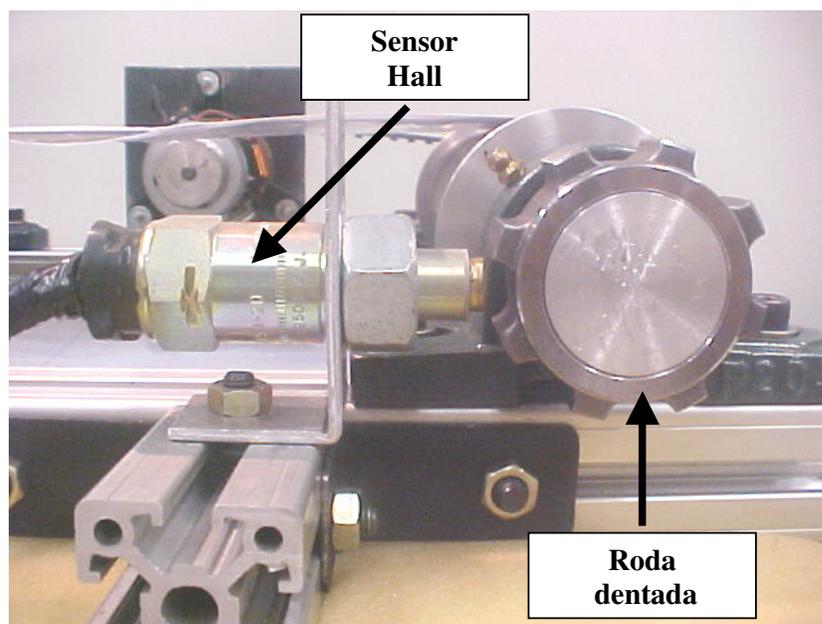


Figura 5.8. – Sensor Hall

Características do sensor:

Fabricante: Siemens VDO

Alimentação: DC 12V, 500mA

Tipo: Sensor Hall VDO 2159

Saída: TTL do tipo onda quadrada

Aplicação: Caixa de câmbio de caminhões

5.2.6. Seletor de velocidades

A principal função do seletor de velocidades é selecionar diferentes velocidades através de chaves de comando. Dependendo da resistência selecionada, pode-se alterar a corrente do motor DC. Com 4 chaves seleciona-se 16 diferentes velocidades distintas (figura 5.9.).

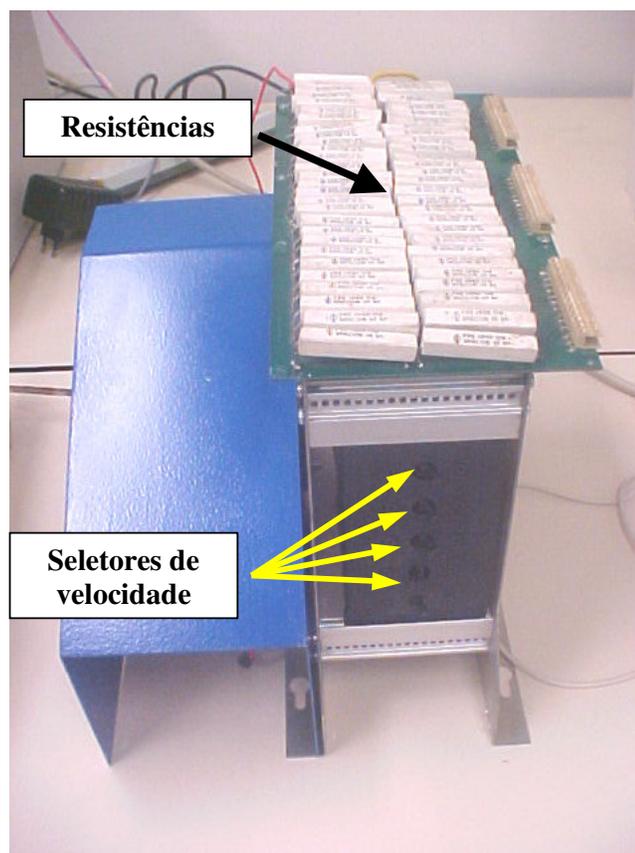


Figura 5.9. – Seletor de velocidades

5.2.7. Superfície asfáltica

O bloco de asfalto foi fixo em uma base de gesso e fotografado. A superfície registrada foi utilizada como padrão para gerar-se a correia que simula o asfalto em movimento. Pode se observado um detalhe fotografado da superfície asfáltica moldada em gesso (figura 5.10.)

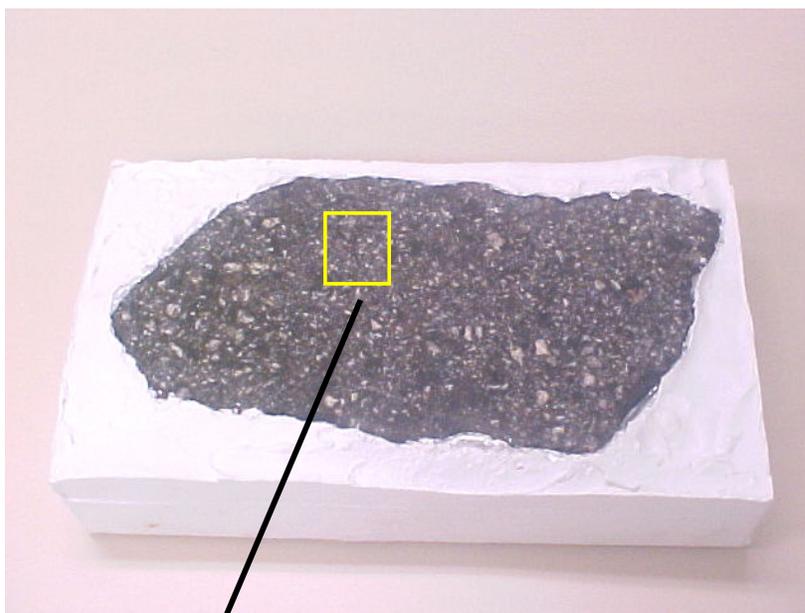
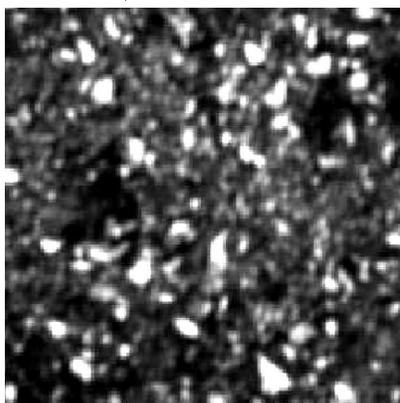


Figura 5.10. – Superfície asfáltica



5.3. Relevância do tamanho do segmento na precisão de medição

Dependendo do *Thr* (*Threshold*) determinado, pode-se obter resultados de comprimentos máximos de segmentos sensivelmente diferentes, para uma mesma imagem. Isto ocorre de forma acentuada nos segmentos menores, como é o caso da figura 5.11.:

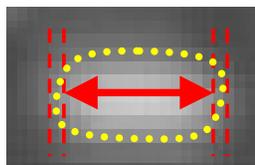


Figura 5.11. – Segmento curto

Para segmentos menores, como é o caso da figura 5.11., o erro percentual pode ser grande. Considerando-se, por exemplo, que haja um erro de 1 *pixel* em um segmento de 5 *pixels*, teria-se um erro de 20%.

Já, em segmentos maiores, como na figura 5.12., este erro torna-se desprezível, pois o erro considerado nas bordas pode ser considerado muito pequeno em relação ao tamanho do segmento. Se houver um erro de 1 *pixel* em um segmento de 50 *pixels*, teria-se um erro de 2%.

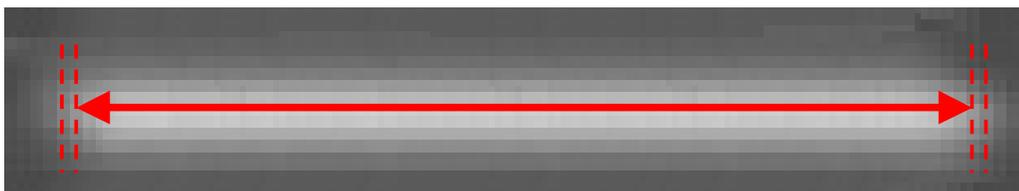


Figura 5.12. – Segmento longo

Dependendo da intensidade limite estabelecida, tem-se diferentes tamanhos de segmentos contínuos. De maneira geral, quanto menor for a intensidade limite, maior será a área abrangida pela imagem escorrida de um pedrisco, conforme demonstrado na figura 5.13.

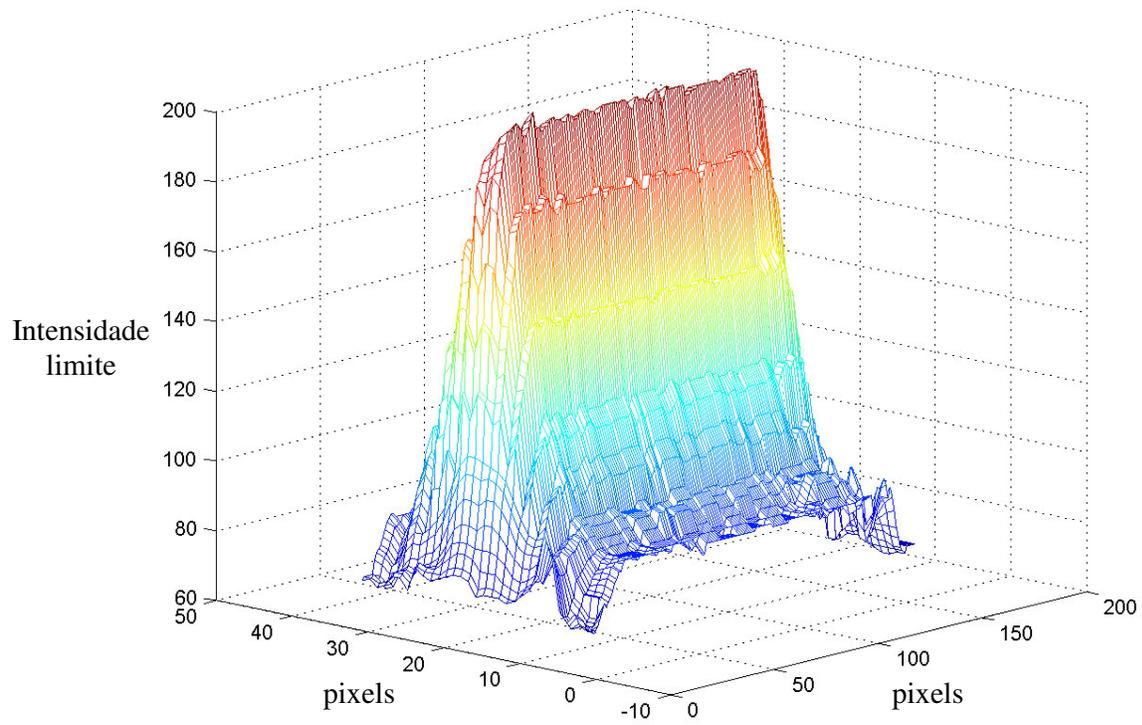


Figura 5.13. – Segmento longo 3D

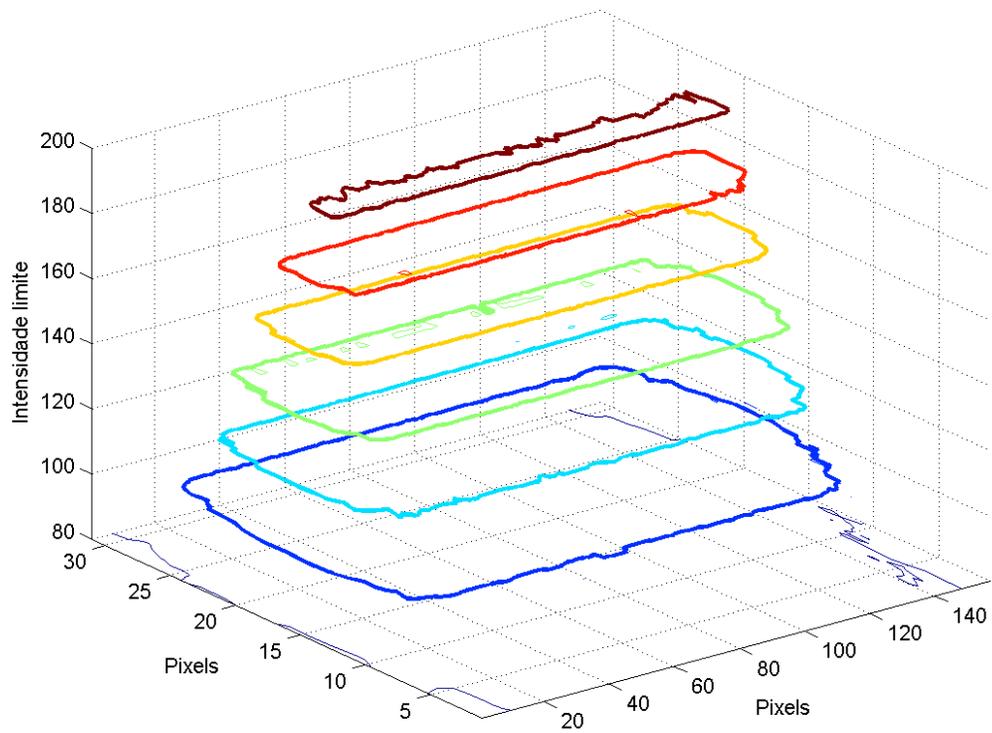


Figura 5.14. – Diferentes Thr (*Threshold*) de um segmento longo

Na figura 5.14 constata-se que para segmentos longos, devido ao fato de se ter o tamanho do segmento muito maior que o efeito gerado nas bordas, o valor da intensidade limite *Thr* não tem influência considerável na determinação do comprimento do segmento contínuo. Assim, pode-se tomar um valor arbitrário de intensidade limite *Thr* a fim de se determinar o comprimento do segmento que se deseja medir.

Outro ponto importante a considerar-se é a questão da contaminação dos *pixels* ou escorregamento lateral. Observa-se na figura 5.11. que a região de contorno do objeto não apresenta variação abrupta, ou seja, os contornos do objeto não são nítidos. Isto ocorre devido à contaminação da região escura pelos *pixels* mais claros, ocasionada devido às características construtivas da câmera, que é composta de uma matriz de elementos fotoeléticos.

Todavia, demonstra-se através das figuras 5.13. e 5.14., que este efeito não tem influência considerável na determinação do comprimento do segmento contínuo, tornando-se desprezível ao trabalhar-se com segmentos longos, conforme mostra a figura 5.12.

Outro aspecto considerável no problema de contaminação é o número de *pixels* da câmera CCD. Quanto maior o número de *pixels*, menor será o efeito devido à contaminação lateral. Este aspecto será abordado minuciosamente no item 6.2.

5.4. Tamanho da amostragem de imagens

Obtém-se experimentalmente a curva de contagem de segmentos, contendo no eixo x o tamanho dos segmentos encontrados na figura com *blur* e no eixo y, o número de vezes que cada segmento com tamanho x ocorreu nesta imagem borrada (figura 5.15.).

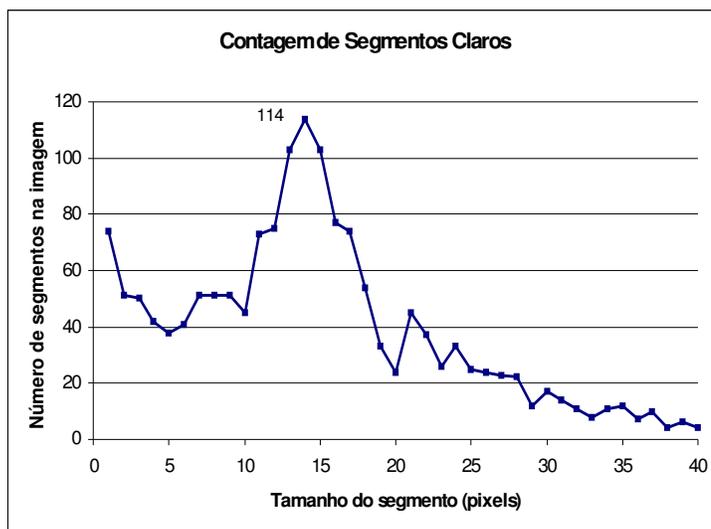


Figura 5.15. – Curva de contagem de segmentos claros

Todavia, à medida que o pico de máximo obtido se desloca para a direita, ele se torna cada vez menor (ou menos proeminente), até que fique irreconhecível.

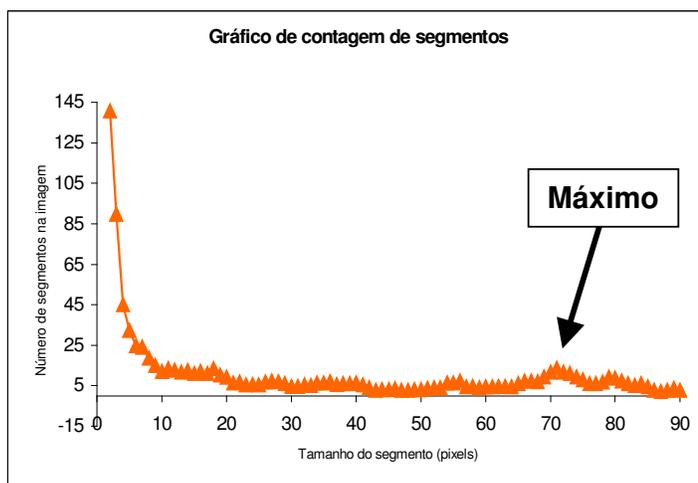


Figura 5.16. – Máximo comprometido

Este caso é exemplificado na figura 5.16. e ocorre devido à sobreposição de segmentos, que se intensifica à medida que a velocidade do objeto aumenta.

Uma forma de se resolver este problema é aumentar a área da figura com *blur* amostrada. Experimentalmente, determina-se que, quanto maior for a área da superfície amostrada, mais proeminente será o máximo do gráfico de contagem de segmentos. Uma forma de se aumentar a área da superfície amostrada, sem aumentar o campo visual, é utilizar o somatório das áreas de *frames* consecutivos de uma seqüência de imagens, conforme demonstra a figura 5.17.

É importante enfatizar que neste caso, o tempo entre os *frames* consecutivos é irrelevante. Assim, o único fator de relevância é o somatório das áreas destas imagens.

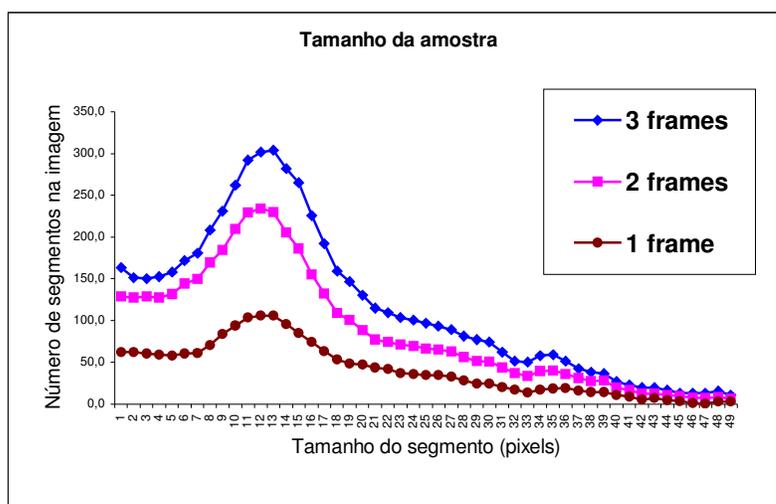


Figura 5.17. – Comparação entre amostras de diferentes tamanhos

Desta forma, a solução do problema não recai nos métodos tradicionais referenciados no item 3.2.. Assim, a utilização de *frames* distintos deve ser entendida como um artifício para se aumentar a área de amostragem, sendo que a técnica desenvolvida continua válida para uma única imagem amostrada.

5.5. Relação entre o número de *pixels* e o deslocamento em mm

A fim de se obter a relação entre o número de *pixels* da imagem e a medida real em mm, utilizou-se uma régua comum, que é posicionada no mesmo plano da imagem do asfalto em análise. A régua é então fotografada, e a relação é estabelecida diretamente através da figura 5.18., repetindo-se a calibração 20 vezes.

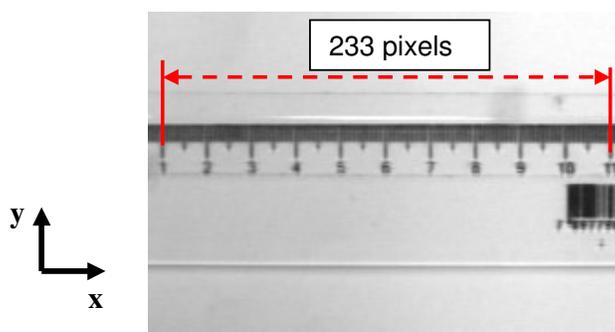


Figura 5.18. – Número de *pixels* por cm

Considerando-se os *pixels* da câmera CCD quadrado, obtém-se a relação de 233 *pixels* por 100 mm, obtendo-se desta forma uma relação de 2,33 *pixels*/mm.

5.6. Resultados obtidos a diferentes velocidades

A partir de uma seqüência de imagens, registradas de forma assíncrona conforme explicado no item 3.5.2., obtém-se cinco curvas de contagem de segmentos, registrando cinco velocidades diferentes da imagem da superfície asfáltica em movimento.

Com um *shutter speed* fixado em 2,0ms e com uma intensidade limite média $Thr=120$, obteve-se os gráficos de contagem de segmentos, conforme mostra a figura 5.19.

Para todas as situações, tem-se:

$Thr = 120 \text{ pixels}$;

$Shutter \text{ speed} = 2 \text{ ms}$

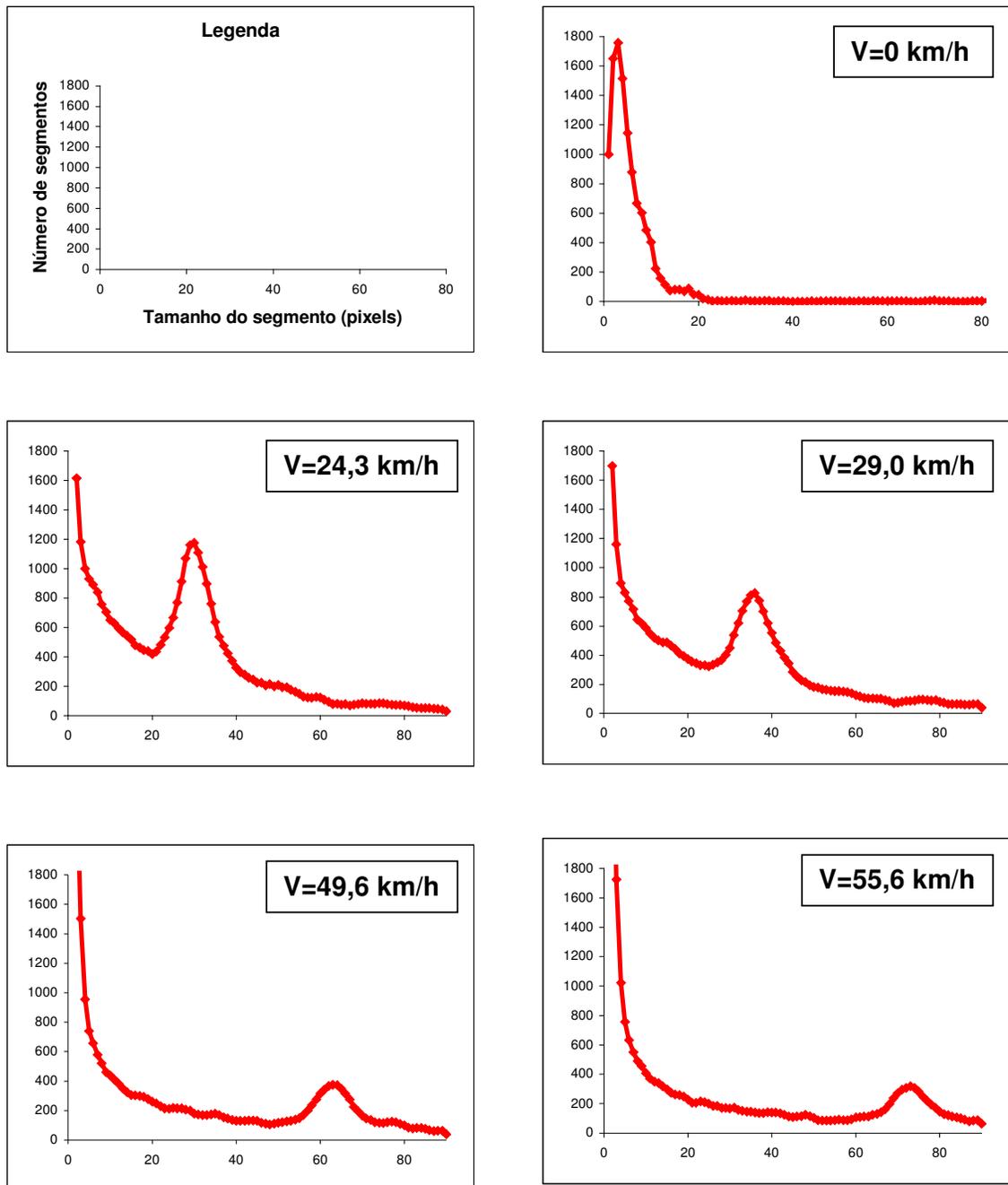


Figura 5.19. – Medição de diferentes deslocamentos

Os gráficos da figura 5.19. podem ser agrupados em um só, podendo-se fazer uma comparação entre os diferentes registros de velocidade. Neste caso, tem-se um grupo de 25 frames e $Thr=120\text{ pixels}$, para uma mesma velocidade de abertura de *shutter* de 2ms.

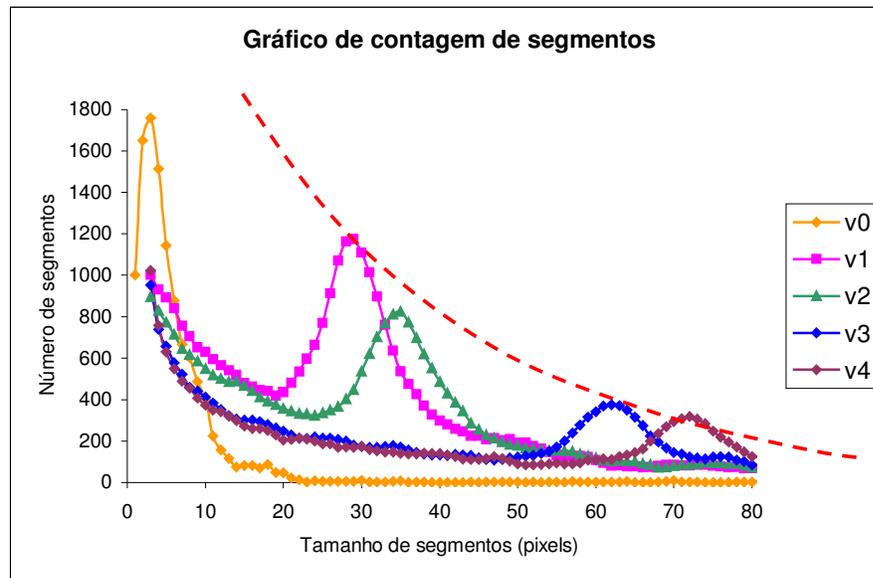


Figura 5.20. – Comparação de diferentes velocidades

Observa-se que, à medida que o pico de máximo obtido se desloca para a direita, o mesmo se torna cada vez menor ou menos proeminente. Este caso é exemplificado na figura 5.20. e ocorre devido à sobreposição de segmentos, que acontece à medida que a velocidade do objeto aumenta. Este problema é resolvido diminuindo-se o *shutter speed*, sendo minuciosamente explicado no item 5.7.

5.7. Determinação do tempo ideal de abertura do *Shutter*

O tempo durante o qual o *shutter* da câmera permanece aberto é fundamental para a determinação da velocidade da superfície em movimento, uma vez que a medida do borrão formado é proporcional ao tempo de exposição da imagem em movimento.

Seja:

$$v = 3,6 \frac{\text{deslocamento}}{\Delta t_{\text{shutter}} \cdot \rho} \quad (5.1)$$

deslocamento = deslocamento em (*pixels*) durante o intervalo Δt

$\Delta t_{\text{shutter}}$ = tempo de abertura do *shutter* em (10^{-3} s)

ρ = densidade em (*pixels*/mm)

v = velocidade em (m/s)

Para se registrar velocidades na ordem de 100km/h (27,77m/s), com $\rho = 2,33$

pixels/mm, e um deslocamento de 130 *pixels*, tem-se $\Delta t_{\text{shutter}} = 2 \times 10^{-3}$ s.

Com $\Delta t_{\text{shutter}} = 1 \times 10^{-3}$ s, o deslocamento seria de 65 *pixels* e com $\Delta t_{\text{shutter}} = 0,5 \times 10^{-3}$ s,

o deslocamento seria de 33 *pixels*. Desta forma, determina-se os limites da variável:

$$\Delta t_{\text{shutter}} \rightarrow 0,5 \sim 2 \text{ ms} \quad (5.2)$$

A escolha do $\Delta t_{\text{shutter}}$ ideal depende da determinação dos comprimentos máximos e mínimos dos segmentos. É estabelecido o comprimento mínimo de 20 *pixels* e o comprimento máximo 70 *pixels* para a determinação dos tempos de abertura ideais.

Mostra-se que para diferentes medições de velocidade, deve-se adotar diferentes tempos de abertura de *shutter*. Deve-se evitar medir-se deslocamentos maiores que 70 *pixels*, aplicando-se diretamente a formulação acima, onde são definidos os seguintes limites de abertura de *shutter*:

Abertura do Shutter (ms)	vel. Min (km/h)	vel. máx (km/h)
4,0	<5	-
2,0	10	40
1,0	20	80
0,5	50	150
0,25	70	300

Tabela 3 – Velocidade × tempo de abertura do *shutter*

5.8. Análise experimental dos erros de medição

Considerando-se $\Delta^*N= 1 \text{ pixel}$, $\Delta^*S= 0,5\text{mm}$, $\Delta^*P= 1 \text{ pixel}$ e $\Delta^*T= 1 \mu\text{s}$ e aplicando-se diretamente os valores na fórmula do erro de velocidade, tem-se:

	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 4	Intervalo 5
P (pixels)	233	233	233	233	233
S (mm)	100	100	100	100	100
T (ms)	4	2	1	0,5	0,25
N (pixels)	50	50	50	50	50
v (km/h)	19,3	38,6	77,3	154,5	309,0
Δ^*v (Km/h)	0,6	1,2	2,3	4,8	10,3

Tabela 4 – Erros da velocidade calculada

O mesmo método é aplicado para a determinação do erro da velocidade real.

Considere-se:

$$v = \frac{\pi \cdot d}{dT} = 11,31 \cdot \frac{d}{T} \quad (5.3)$$

Sendo d (mm) o diâmetro do eixo em revolução e T o tempo que esse eixo leva para dar uma volta completa (ms).

$$|\Delta * v| = 11,31 \cdot \left(\frac{1}{T} \cdot |\Delta * d| + \frac{d}{T^2} \cdot |\Delta * T| \right) \quad (5.4)$$

Considerando-se $\Delta * d = 0,1 \text{ mm}$, tem-se:

	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 4	Intervalo 5
d (mm)	72,3	72,3	72,3	72,3	72,3
T (ms)	40	20	10	5	3
$\Delta * T$ (ms)	0,2	0,1	0,05	0,03	0,02
v (km/h)	20,4	40,9	81,8	163,5	272,6
$\Delta * v$ (km/h)	0,4	0,8	1,7	3,4	5,6

Tabela 5 – Erro da velocidade real

Finalmente, comparando-se os erros entre velocidade real e calculada tem-se:

Intervalo (km/h)	Δv real		Δv calculada	
	(km/h)	%	(km/h)	%
0 - 20	0,4	2,00%	0,6	3,00%
20 - 40	0,8	2,00%	1,2	3,00%
40 - 80	1,7	2,13%	2,3	2,88%
80 - 160	3,4	2,13%	4,8	3,00%
160 - 300	5,6	1,87%	10,3	3,43%

Tabela 6 – Erros (velocidade real x velocidade calculada)

5.9. Diagrama de blocos do procedimento implementado

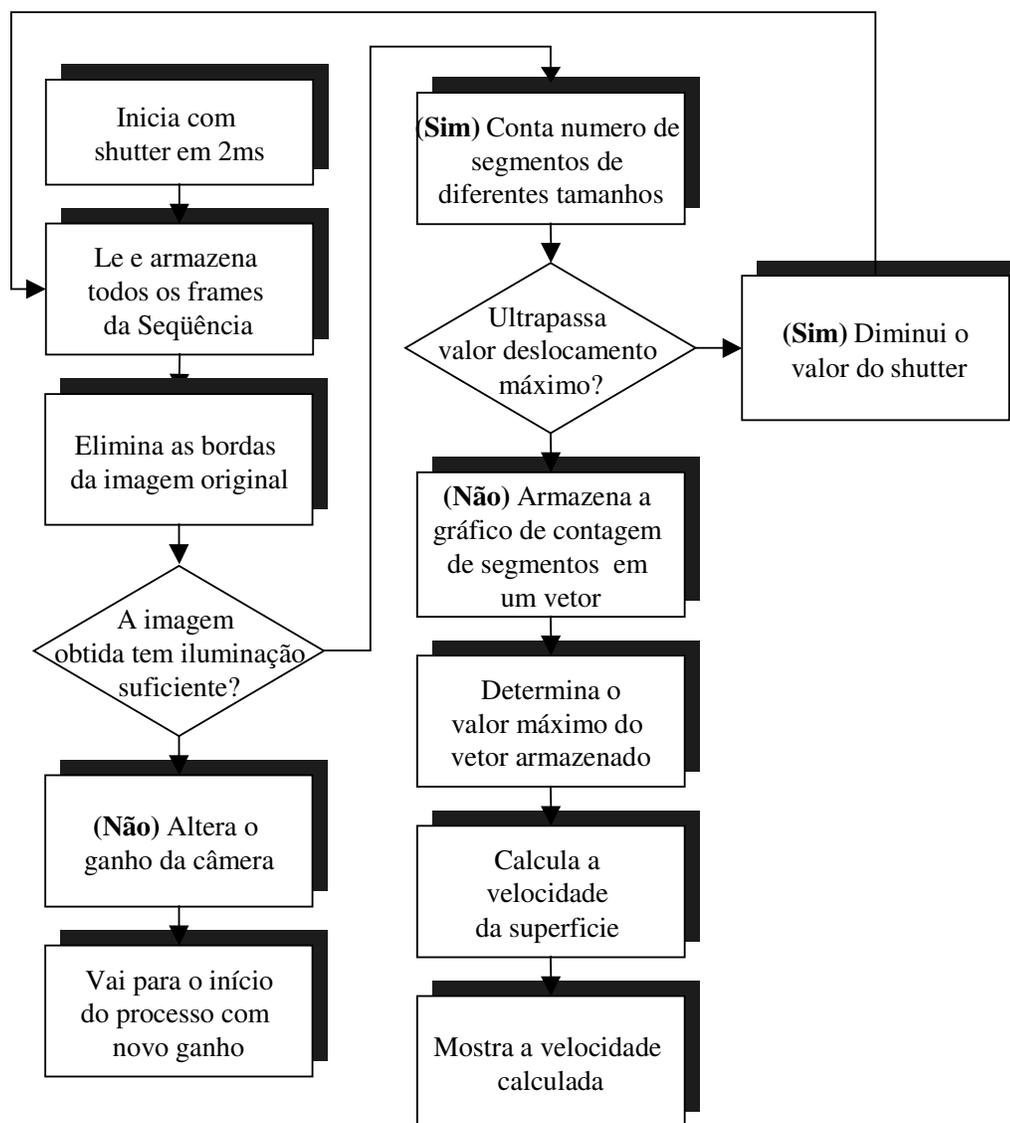


Figura 5.21. – Diagrama de blocos do procedimento implementado

Utilizou-se o software de implementação de cálculos computacionais, visualização e programação MATLAB® para a análise das imagens capturadas. O MATLAB® possui um módulo específico que trabalha somente com processamento de imagens, possuindo funções especiais de leitura, display, processamento, tratamento, entre as funções disponíveis.

A partir deste módulo, pôde-se ler a imagem gravada em um arquivo padrão .avi, que foi transformada em matriz e analisada através de técnicas de processamento de imagem.

O Fluxograma (figura 5.21.) mostra os passos principais implementados no programa, avaliando a velocidade de abertura do *shutter* ideal e o ganho da câmera, que são corrigidos durante o processo.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Modelo e hipóteses consideradas

A partir do modelo matemático proposto para o efeito *blur* enunciado no item 4.2.,

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x - \alpha, y - \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + n(x, y) \quad (6.1)$$

sendo $f(x, y)$ a imagem ideal e $g(x, y)$ a imagem com blur.

e, considerando-se a função PSF

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{R}, |x| \leq \frac{R}{2} \cos \theta, y = \tan \theta \\ 0, |x| > \frac{R}{2} \cos \theta \end{cases} \quad (6.2)$$

são consideradas as seguintes hipóteses:

- 1) O movimento é paralelo ao eixo da câmera, ou seja, $\theta = 0$.
- 2) O efeito do ruído pode ser desconsiderado, ou seja, $n(x, y) = 0$.

A equação 6.1 pode ser transformada em uma equação unidimensional:

$$g(x) = \frac{1}{R} \int_0^R f(x - \alpha) d\alpha \quad (6.3)$$

A partir dos resultados experimentais, constata-se que a hipótese de o movimento ser paralelo ao eixo x (definido na figura 4.3.) é aceitável, pois possíveis componentes do eixo y, perpendicular ao movimento, podem ser consideradas desprezíveis.

A partir deste modelo, considerou-se como hipótese, a aplicação direta em uma figura composta por um ponto branco, aplicado em um fundo totalmente escuro. O resultado obtido foi uma figura composta por um segmento de reta, com tamanho proporcional ao tempo de exposição.

A comprovação experimental do modelo proposto tornou-se possível, partindo-se da hipótese de que os pedriscos brancos da camada asfáltica, aplicados sobre um fundo escuro, reproduzem o modelo proposto em 4.3.

Outra variável de grande importância é o tamanho dos pedriscos que compõem a superfície asfáltica. Considerando-se distância entre os centros de massa do pedrisco no instante inicial e no instante final de um mesmo segmento onde o *blur* é definido, toma-se como hipótese que esta distância seja o tamanho total do *blur* menos o diâmetro do pedrisco. Uma vez que o diâmetro médio dos pedriscos de uma superfície asfáltica seja padronizado pelo Contran, torna-se possível calcular o deslocamento da imagem durante o intervalo de tempo em que a imagem é registrada.

$$\text{Deslocamento da imagem} = \text{tamanho total do } blur - \text{diâmetro do pedrisco} \quad (6.4)$$

O conceito matemático deduzido, foi comprovado experimentalmente, obtendo-se erros consideravelmente pequenos, conforme indicado no item 6.2.

Considerando-se uma velocidade de *shutter* fixa, constata-se que, quanto maior o segmento formado pelo *blur*, menor será o máximo obtido. Isso ocorre devido à sobreposição dos segmentos contidos em uma mesma imagem. Todavia, pode-se eliminar este problema, diminuindo-se o tempo de abertura do obturador ou *shutter speed*.

Por outro lado, prova-se no item 5.3. que, quanto maior for o segmento de *blur*, menor será o erro percentual devido ao efeito das bordas.

A maiores velocidades, principalmente acima de 45km/h, os erros aumentam acima de 1%. Uma hipótese que justifique este erro seria o erro de medição da velocidade de comparação, feita através do sensor Hall instalado no eixo do gerador de velocidade. Esta velocidade comparativa não é tão acurada quanto deveria ser para ser adotada como padrão.

A velocidade tomada como real é obtida a partir da velocidade de rotação da roda dentada. Esta velocidade é obtida diretamente através do osciloscópio, que não garante precisão adequada. Pode-se resolver o problema, utilizando-se sensores com maior número de pulsos por volta. No caso, foi implementado um sensor com 8 pulsos por volta. Encontram-se sensores com até 1000 pulsos por volta.

Outro fator é a falta de sincronia entre as aquisições de imagens e do cálculo da velocidade da engrenagem instalada no eixo do gerador de velocidade.

Diferentemente dos métodos conhecidos, o método *blur*, baseia-se em uma única imagem em movimento. Além disso, determinou-se experimentalmente que, quanto maior for a área de superfície amostrada, mais proeminente será o máximo do gráfico de contagem de segmentos, ou seja, quanto maior o número de *frames* amostrados, a partir de uma seqüência de imagens, mais acentuado será o máximo obtido

6.2. Análise dos resultados experimentais

Sejam definidas as variáveis:

P – deslocamento em *pixels* da superfície durante um intervalo dt

T – tempo em ms que o eixo demora para completar uma volta

Shutter – intervalo de tempo dt em ms, que o *shutter* permaneceu aberto.

Foram feitas 4 aquisições para cada velocidade selecionada. Inicialmente, fixando-se o tempo de abertura do *shutter* em 2ms, foram medidas 3 velocidades distintas, de 24km/h a 60km/h, conforme indicado pela tabelas 7.

Um fator importante a ser observado, é que o deslocamento máximo não ultrapasse a ordem de 50 *pixels*, pois quanto maior o deslocamento medido, menor será o máximo obtido no gráfico de contagem de segmentos da imagem em análise. Quando os deslocamentos passam do limite estabelecido, deve-se diminuir o tempo de abertura do *shutter*.

Nas tabelas 9 e 10, foram feitas 4 aquisições, com o tempo de abertura de *shutter* de 1ms, entre 22km/h a 66km/h. Também para estas medições, o deslocamento máximo de 50 *pixels* também foi respeitado.

Conforme calculado no capítulo 5, as velocidades calculadas estão em todos os casos dentro dos limites determinados, apresentando, em relação à velocidade real, erros abaixo de 1%.

A seguir, são apresentadas 3 tabelas de velocidades registradas com abertura de *shutter* de 2,0ms.

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 1,2$	Velocidade Real (km/h) $\pm 0,8$	Erro (%)
1	36,25	33	2,0	24,81	24,77	0,2%
2	35,25	34	2,0	24,13	24,04	0,4%
3	34,75	34	2,0	23,78	24,04	1,1%
4	35,25	34	2,0	24,13	24,04	0,4%

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 1,2$	Velocidade Real (km/h) $\pm 0,8$	Erro (%)
1	41,25	29,0	2,0	28,23	28,18	0,2%
2	41,25	29,2	2,0	28,23	27,99	0,9%
3	40,25	29,6	2,0	27,55	27,61	0,2%
4	40,75	29,6	2,0	27,89	27,61	1,0%

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 1,2$	Velocidade Real (km/h) $\pm 0,8$	Erro (%)
1	89,75	14	2,0	61,43	58,38	5,2%
2	91,00	13,6	2,0	62,28	60,09	3,6%
3	88,75	14	2,0	60,74	58,38	4,1%
4	92,00	13,6	2,0	62,97	60,09	4,8%

Tabela 7 – Aquisições a 2,0 ms

Com deslocamentos acima de 50 *pixels*, os erros aumentam para percentuais na ordem de 5%.

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 1,2$	Velocidade Real (km/h) $\pm 0,8$	Erro (%)
1	52,00	23,2	2,0	35,59	35,23	1,0%
2	50,25	24,0	2,0	34,39	34,05	1,0%
3	51,50	23,2	2,0	35,25	35,23	0,1%
4	51,25	23,2	2,0	35,08	35,23	0,4%

Tabela 8 – Deslocamentos acima de 50 *pixels*

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 2,3$	Velocidade Real (km/h) $\pm 1,7$	Erro (%)
1	31,75	18,6	1,0	43,94	43,46	1%
2	33,00	18,0	1,0	45,40	45,17	1%
3	32,50	18,8	1,0	43,47	44,49	2%
4	33,25	18,2	1,0	44,91	45,51	1%

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 2,3$	Velocidade Real (km/h) $\pm 1,7$	Erro (%)
1	40,00	14,8	1,0	55,22	54,75	1%
2	41,25	14,6	1,0	55,98	56,46	1%
3	40,75	14,8	1,0	55,22	55,78	1%
4	41,75	14,6	1,0	55,98	57,15	2%

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 2,3$	Velocidade Real (km/h) $\pm 1,7$	Erro (%)
1	17,00	34,8	1,0	23,49	23,27	1%
2	16,25	36	1,0	22,70	22,24	2%
3	16,00	36,4	1,0	22,45	21,90	2%
4	16,00	36,2	1,0	22,58	21,90	3%

Tabela 9 – Aquisições a 1,0 ms

Aquisições de velocidades abaixo da faixa ideal, representando conseqüentemente deslocamentos menores, não afetam consideravelmente o erro envolvido, conforme indicado na tabela 10.

Aquisições	P (pixels)	T (ms)	Shutter (ms)	Velocidade Calculada (km/h) $\pm 2,3$	Velocidade Real (km/h) $\pm 1,7$	Erro (%)
1	48,25	12,6	1,0	64,86	66,05	2%
2	48,00	12,2	1,0	66,99	65,70	2%
3	46,75	12,5	1,0	65,38	63,99	2%
4	49,50	12,4	1,0	65,91	67,76	3%

Tabela 10 – Aquisições com deslocamentos abaixo da faixa indicada

Pode-se resumir os resultados obtidos experimentalmente, conforme a tabela 11:

Shutter (ms)	Velocidade (km/h)	erro (%)
4,0	9,1	0,8%
	11,9	0,6%
	16,5	0,7%
	20,4	1,0%
2,0	24,0	0,5%
	27,8	0,6%
	35,2	0,6%
1,0	44,4	1,3%
	55,6	1,2%
	65,6	2,2%
0,5	70,1	2,8%
	72,6	3,2%

Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos experimentalmente

A partir da tabela 11, observa-se que para velocidades abaixo de 40km/h, obtém-se um erro abaixo de 1%. Para velocidades determinadas com um tempo de abertura de *shutter* de 1,0 ms, esse erro sobe para cerca de 1,5%, e para um tempo de abertura de *shutter* de 0,5 ms, o erro sobe um pouco mais, acima de 2,8%, conforme mostra a figura 6.1.).

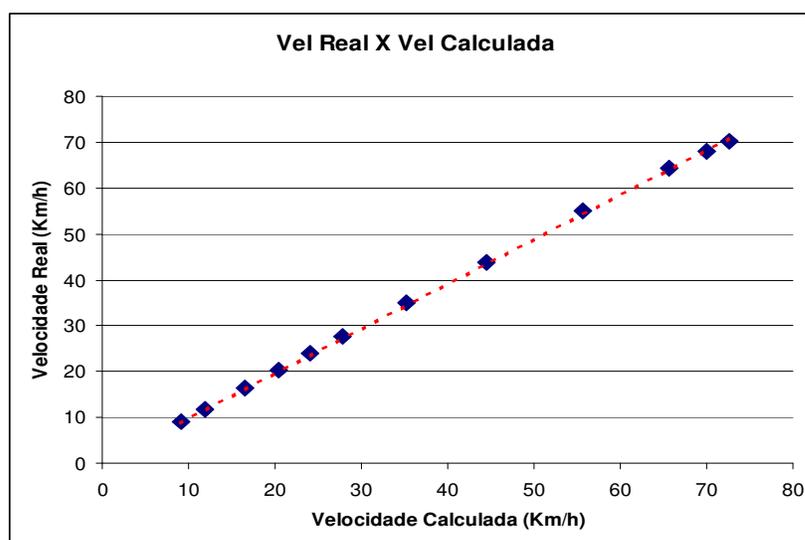


Figura 6.1. – Velocidade Real X Velocidade Calculada

Para se diminuir o erro de velocidade $|\Delta^*v|$ a fim tornar o método apto à aferição de velocímetros, tem-se que limitar $|\Delta^*v|$ a 0,5km/h para velocidades inferiores a 100km/h e igual a 0,5% para velocidades acima de 100km/h.

Analisando-se o erro de velocidade $|\Delta^*v|$ determinada em 4.11. por

$$|\Delta^*v| = \frac{S}{T.P} |\Delta^*N| + \frac{N}{T.P} |\Delta^*S| + \frac{N.S}{T^2.P} |\Delta^*T| + \frac{N.S}{T.P^2} |\Delta^*P| \quad (4.11)$$

Sendo,

N = deslocamento em (*pixels*) medido pela câmera

S = medida em (mm), determinada na relação P/S (*pixels/mm*)

P = medida em (*pixels*), determinada na relação P/S (*pixels/mm*)

T = tempo em (s) de aquisição de duas imagens

Conclui-se que, aumentando-se a relação P/S, torna-se possível alcançar os valores de erro de velocidade $|\Delta^*v|$ desejado. Esta relação depende do número de *pixels* da matriz CCD e da distância da câmera em relação ao objeto. Experimentalmente, fixou-se a relação P/S=2,33 *pixels/mm*. Aumentando-se a relação para 10 *pixels/mm*, torna-se possível atingir a meta desejada para o de erro de velocidade $|\Delta^*v|$.

Tomando-se por exemplo:

$\Delta^*N= 1 \text{ pixel}$	N= 560 <i>pixels</i>
$\Delta^*S= 0,1\text{mm}$	S= 100 mm
$\Delta^*P= 1 \text{ pixel}$	P= 1000 <i>pixels</i>
$\Delta^*T= 1\text{e-}4 \text{ s}$	T= 2 ms

Tem-se $v = (100,0 \pm 0,4) \text{ km/h}$ ou seja, o erro de velocidade $|\Delta^*v|=0,4\%$.

Assim, aumentando-se a resolução da imagem, pode-se diminuir o erro de velocidade $|\Delta \cdot v|$, tornando o método apto à aferição de velocímetros. No caso em estudo, a relação P/S foi aumentada em 4,3 vezes.

Experimentalmente, a câmera utilizada em uma altura fixa registra uma imagem de 10.0cm^2 através de $233 \times 233 \text{ pixels}^2$ ou 54.289 pixels . Aumentando a densidade de $2,33 \text{ pixels/mm}$ para 10 pixels/mm , a mesma área terá $1.000.000 \text{ pixels}$. Assim será necessário uma câmera com 18,4 vezes mais *pixels* que a câmera original. A câmera utilizada registra imagens de $480 \times 640 \text{ pixels}$, ou seja $0,31 \text{ Megapixels}$. Neste caso, uma câmera na ordem de $5,6 \text{ Megapixels}$ seria suficiente para garantir um erro de $0,4\%$, conforme mostra a figura 6.2.

Levantou-se então o gráfico comparando a quantidade de *pixels* da câmera com o erro de velocidade a 100km/h . Conclui-se que, uma câmera de **3,6 Megapixels** seria suficiente para garantir o erro máximo de $0,5\%$, o que é atualmente facilmente encontrado no mercado.

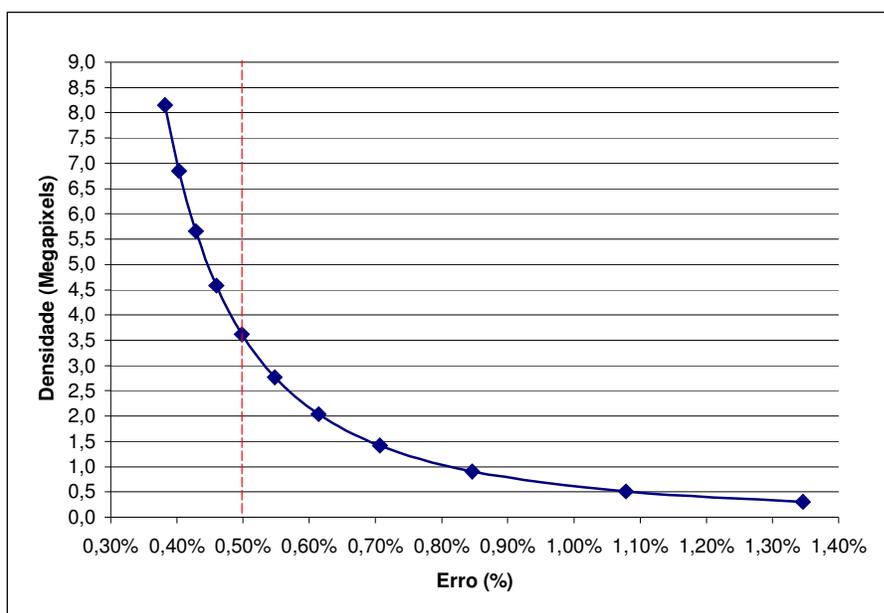


Figura 6.2. – Escolha de uma câmera ideal

7. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos a partir do método de escorrimento de imagens, ou método *blur*, mostraram que a técnica implementada é capaz de aferir velocímetros automotivos, a fim de garantir a repetibilidade amostral de indicação de velocidade no final de uma linha de produção de veículos.

A técnica formulada inova em relação às técnicas abordadas na literatura, pois diferentemente das abordagens que consideram uma seqüência espaço temporal, o método baseado no borramento de imagens, ou método *blur*, baseia-se em uma única imagem com efeito *blur*, ou em seqüências de imagens adquiridas de forma assíncrona, não havendo a necessidade de haver uma regularidade temporal entre *frames* consecutivos.

Neste método, não é necessário haver, o registro de uma imagem estática, em um determinado instante, e da mesma imagem deslocada, em um instante posterior, ou seja, a imagem registrada inicialmente pode ser totalmente distinta da segunda imagem, permitindo a medição de altas velocidades, sem a necessidade de se utilizar uma câmera de altíssima velocidade de aquisição de imagens.

O método implementado funciona com qualquer tipo de iluminação, mesmo que precária, por não tratar o problema conforme aborda a literatura, considerando seqüências espaço temporais, sensíveis à iluminação da superfície em análise, que deve ser homogênea. No caso de pouca iluminação, o problema pode ser resolvido alterando-se o ganho da câmera.

Os resultados experimentais mostram que os erros envolvidos são bastante satisfatórios para a aferição de velocímetros, mantendo-se abaixo de 1% em velocidades de até 40km/h e de 3% para velocidades da ordem de 70km/h, atendendo assim, a legislação prevista pela Portaria n.º 115 de 1998, que define erros máximos permitidos para velocímetros de $\pm 5\text{km/h}$ para velocidades de até 100km/h e de $\pm 5\%$ para velocidades acima de 100km/h.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS

Partindo-se dos conhecimentos adquiridos nesta dissertação, poder-se-ia sugerir como próximo passo, a montagem do sistema em um veículo real. Esta abordagem possibilitará a aquisição de diferentes seqüências de imagens reais do asfalto e de outras superfícies de rodagem. Com isso, será possível a implementação de um algoritmo capaz de adaptar-se a qualquer superfície de rodagem, desde que apresentem o efeito de *blur*, abordado como tema principal.

O algoritmo modificado poderá ser então ser implementado em nível de *hardware*, permitindo o funcionamento do velocímetro em tempo real, e podendo ser instalado em um painel de instrumentos de um veículo.

Outra possibilidade seria fazer uma análise em relação à distância relativa entre a câmera CCD e a superfície em movimento. Sugere-se implementar uma adaptação do software, capaz de processar sinais da distância real entre a câmera e o solo, através da utilização de sensores de distância. O novo parâmetro seria então agregado ao algoritmo de determinação de velocidade da superfície asfáltica.

Uma futura análise importante seria o estudo da influência da luminosidade no experimento e as conseqüências decorrentes desta variação. Sugere-se a aquisição de diversas imagens a diferentes condições de iluminação, alterando-se a intensidade e experimentando-se diferentes fontes de iluminação.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Adelson, E.H. e Bergen, J.R., 1985] “Spacial-temporal energy models for the perception of motion”. J. Opt. Soc. Am. A, 1985.

[Anandan, P., 1987] “Measuring visual motion from image sequences” PhD dissertation, COINS TR 87-21, Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, 1987.

[Anandan, P., 1989] “A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion”. Int. J. Computer Vision 2, 1989.

[Barnard, S.T. e Thompson, W.B., 1980] ”Disparity analysis of images”. IEEE Trans. PAMI 2(4), 1980.

[Ben-Ezra, E. e Nayar, S.K., 2003] “Motion deblurring using hybrid imaging”, in IEEE Computer Vision and Pattern Recognition or CVPR, 2003.

[Briers, J. D., 1996] “Laser Doppler and time-varying speckle: a reconciliation” J.opt. Soc. A, vol. 13, no.2, 1996.

[Briers, J.D. e Webster, S., 1995] “Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full field technique for monitoring capillary blood flow fields”. Opt. Commun., 116, 1995.

[DNER-EM 204-95, 1995] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995), Especificação de material DNER-EM 204/95, Cimentos asfálticos do petróleo, 1995.

[DNER-EM 37-97, 1997] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997), Especificação de material DNER-EM 37/97, Agregado graúdo para concreto de cimento, 1997.

[DNER-EM 38-97, 1997] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997), Especificação de material DNER-EM 38/97, Agregado miúdo para concreto de cimento, 1997.

[**DNER-ES 313/97, 1997**] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997), Especificação de serviço DNER-ES 313/97, Pavimentação – Concreto betuminoso – Norma Rodoviária. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

[**Enkelmann, W., 1986**] "Investigations of multigrid algorithms for the estimation of optical flow fields in image sequences". Proc. Workshop Motion: Representation and Control, Kiawah Island, 1986.

[**Favaro, P., Burger, M. e Soatto, S., 2004**] "Scene and motion reconstruction from defocused and motion-blurred images via anisotropic diffusion". In Proc. 8th European Conference on Computer Vision (ECCV'04), Praga, 2004.

[**Fennema, C. e Thompson W., 1979**] "Velocity determination in scenes containing several moving objects". Computer graphics and image processing 9, 1979.

[**Fleet, D.J., 1992**] "Measurement of image velocity". Kluwer academic publishers, 1992.

[**Glazer, F., 1987**] "Hierarchical motion detection". PhD dissertation, COINS TR 87-02, Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, 1987.

[**Glazer, F., Reynolds, 1983**] "Scene matching through hierarchical correlation. Proc. IEEE CVPR, Washington, 1983.

[**Glazer, F., Reynolds, G. e Anandan, P., 1983**] "Scene matching by hierarchical correlation" Proc. IEEE Conf. Comput. Vision and Pattern. Recognition, Annapolis, MD, 1983.

[**Gonzalez, R.C., 1993**] "Digital image processing". Addison-Wesley Publishing Company, 1993.

[**Hegger, D., 1987**] "Optical flow from spatiotemporal filters". Proc. 1st Int. Conf. Comput. Vision, London, 1987.

[**Hildreth, E.C., 1984**] "The measurement of visual motion". MIT Press: Cambridge, 1984.

[INMETRO, Portaria n.º 115, 1998] Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, Portaria n.º 115 , 1998.

[Jain, R., 1995] “Machine vision”. MIT Press and McGraw-Hill, Inc, 1995.

[Kang, S., Min, J. e Paik, J., 2001] “Segmentation-based spatial adaptive motion blur removal and its application to surveillance systems”, International Conference on Image Processing, 2001.

[Lin, H.Y., 2004] “Motion Blur Removal and its Application to Vehicle Speed Detection”. International Conference on Image Processing (ICIP), 2004.

[Nagel, H.H., 1983] “Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences”. Computer graphics and image processing 21, 1983.

[Nagel, H.H., 1987] “On the estimation of optical flow: relations between different approaches and some new results”. Artificial intelligence 33, 1987.

[Pusey, P. N., 1976] “Photon correlation study of laser speckle produced by a moving rough surface”. J. Phys. D 9, 1399-1409, 1976.

[Tziritas, G., 1994] “Motion Analysis for Image Sequence Coding”. Elsevier Science B.V., 1994.

[Waxman, A. e Wohn, K., 1984] ”Contour evaluation , neighborhood deformation, and global image flow: planar surfaces in motion”. Univ. of Maryland Tech. Rept. CS-TR-1394, 1984.

[Yasuo, Y., Kazuyochi, H. E Kazuhiro F., 2003] “Parameter estimation of uniform image blur using dct. IEICE Trans. Tundamentals, 2003.

[Zucker, S.W. 1981] “Computer vision and human perception: An essay on the discovery of constraints”. Proc. IJC AOl, Vancouver, 1981.

REFERÊNCIAS URL'S

[URL 1] Universidade de São Paulo. São Paulo. Centro de divulgação científica e cultural. Disponível em: <<http://www.cdcc.sc.usp.br/cda/aprendendo-superior/sistemas-digitais/>>. Acesso em: 02/05/06.

[URL 2] <http://www.globalexchange.com.br/tecno26.asp> Acesso em: 21/02/06

[URL 3] <http://www.fazendovideo.com.br/vtigg4.htm> Acesso em: 11/04/06

[URL 4] <http://www.microwave-solutions.com> Acesso em: 13/04/06

[URL 5] <http://www.gmheng.com> Acesso em: 03/01/06

[URL 6] <http://www.lightworksllc.com> Acesso em: 07/02/06

[URL 7] <http://www.nacinc.com> Acesso em: 21/06/06

[URL 8] <http://www.impac.com.br> Acesso em: 22/10/05

[URL 9] http://www.sensormag.com/articles/1299/34_1299/main.shtml

Acesso em: 12/03/06

[URL 10] http://www.smart-microwave-sensors.de/html/doppler_radars.html

Acesso em: 30/01/06

[URL 11] <http://www.foe.de/en/ldv.html> Acesso em: 23/05/06

[URL 12] http://www.polytec.de/polytec-com/l_vel/operation.html

Acesso em: 04/02/06

[URL 13] <http://optics.sgu.ru/SFM/2000/report/Briers/> Acesso em: 13/03/06

[URL 14] http://public.cranfield.ac.uk/sme_staff/fn0288/research.html

Acesso em: 13/11/05

[URL 15] <http://www.ihr.uiowa.edu/projects/lspiv/#fujita> Acesso em: 23/10/05

[URL 16] <http://www.racelogic.co.uk> Acesso em: 08/09/05

10. ANEXO A – Código do Programa Principal

```

% a partir de um arquivo .avi, determina o deslocamento em pixels D

clear all
close all

% importa arquivo .avi
sequencia = importdata('C:\Program Files\Matrox Imaging\Images\seq.avi');

% arm_soma eh a matriz onde as curvas de medição de segmentos sao armazenadas
arm_soma = zeros(600,14);

% le e armazena todos os frames da sequencia
for frame = 1:25;
frame_1= sequencia(frame).cdata;
I=frame_1;
I=I(:, :, 1);

% formato da matriz em analise
lin=350;
col=550;

% Joga em K um pedaço da imagem original
for i = 1:lin
    for j = 1:col
        K(i,j)=I(i+100,j+50);
    end
end

% Filtra a matriz original, ajustando o histograma
J = imadjust(K,[100/255 255/255],[0 1]);
%J = imadjust(K,[ 50/255 155/255],[0 1]);
%J = imadjust(K,[100/255 255/255],[0 1]);
%J = K;

% PROGRAMA PRINCIPAL
% conta segmentos de diferentes tamanhos

% coluna inicial e final de J=0
for linJ = 1:lin
    J(linJ,1)=0;
    J(linJ,col)=0;
end

arm = zeros(600,14);

```

```

% threshold inicial, aumentando de 100 a 240 (threshold do segmento)
tamanho=100;

for segmento = 1:14

comp=0;

for linha = 1:lin
  for coluna = 1:col-1
    if J(linha,coluna)>=tamanho
      comp=comp+1;
      if J(linha,coluna+1)<tamanho
        arm(comp,segmento)=arm(comp,segmento)+1;
        comp=0;
      end
    end
  end
end

tamanho = tamanho+10;
end
arm_soma = arm_soma + arm;
end

arm=arm_soma;

% FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL

% Faz a media entre 3 pontos consecutivos
arm_soma = zeros(600,14);
for j = 1:14
  for i = 1:597
    arm_soma(i+1,j)=(arm(i,j)+arm(i+1,j)+arm(i+2,j))/3;
  end
end

% armazena os maximos das 4 curvas
D = zeros(1,14);
valor_min = 200;
valor_max = 200;

for thr=1:14
  min=0;
  for max_vetor = 12:94
    if arm_soma(max_vetor-1,thr)-arm_soma(max_vetor-10,thr) > 50
      if arm_soma(max_vetor+10,thr)-arm_soma(max_vetor+1,thr) < -50
        if min==0
          valor_min=max_vetor;
        end
      end
    end
  end
end

```

```

        min=1;
    end
    valor_max=max_vetor;
end
end
end

if valor_min+valor_max==400
    tamanho_vetor='sem resultado';
end

% Descobre dentro do vetor, o valor maximo
if valor_min+valor_max~=400
    for vetor = valor_min:valor_max
        if arm_soma(vetor+1,thr) >= arm_soma(vetor,thr)
            D(1,thr) = vetor+1;
        end
    end
end

end

% Determina a media entre os 4 maximos diferentes de 0
numero_picos = 0;
soma_vetor = 0;
tamanho_vetor = tamanho-40;
Distancia_em_pixels='sem resultado';

for t=14:-1:1
    if D(t)~=0;
        soma_vetor = soma_vetor + D(t);
        numero_picos = numero_picos + 1;
        if numero_picos == 4
            Distancia_em_pixels = soma_vetor/4;
        end
    end
    if D(t)==0
        tamanho_vetor=tamanho_vetor-10;
    end
end

% saidas: localizacao no vetor e distancia
tamanho_vetor
Distancia_em_pixels
if numero_picos < 4 & numero_picos~=0
    Dist_pixels_B = soma_vetor/numero_picos
end
end

```

11. ANEXO B – Código de “Simulação de estroboscópio”

```

clear all

% importa arquivo
sequencia = importdata('C:\MATLAB6p5\work\amostra1.tif');

% desloca I1 e armazena em I2
I1 = im2double(sequencia);

for loop_linha = 1:480
    for loop_col = 1:620
        I2 (loop_linha,loop_col) = I1 (loop_linha,loop_col+15);
    end

    for loop_col = 621:640
        I2 (loop_linha,loop_col) = 0;
    end
end

% SOMA
for loop_linha = 1:480
    for loop_col = 1:640
        Isoma (loop_linha,loop_col) = I2 (loop_linha,loop_col) + I1
(loop_linha,loop_col);
        if Isoma(loop_linha,loop_col) >= 1;
            Isoma(loop_linha,loop_col) = 1;
        end
    end
end

% Loop que gera vetor de correlação
for desl = 1:20

% Le janela de ISoma inicial
for loop_linha = 1:30
    for loop_col = 1:30
        Ijanela_soma1 (loop_linha,loop_col) = Isoma
(loop_linha+100,loop_col+100+desl);
    end
end

% Le janela de ISoma deslocada
for loop_linha = 1:30

```

```
    for loop_col = 1:30
        Ijanela_soma2 (loop_linha,loop_col) = Isoma (loop_linha+100,loop_col+100);
    end
end

% Correlação
C(desl)= corr2(Ijanela_soma1,Ijanela_soma2);

end
```