

Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte para obtenção do título de Mestre em Ciência no Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica na Área de Mecatrônica e Dinâmica de Sistemas Aeroespaciais.

Fernando Toshihiko Mitsuyassu

**Sistema Mecatrônico para Medida de Desvios Axial e Radial de Rodas
utilizando Recursos de Visão Computacional**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados.

Prof. Luís Gonzaga Trabasso

Orientador

Prof. Homero Santiago Maciel

Chefe da Divisão de Pós-Graduação

Campo Montenegro

São José dos Campos, SP – Brasil

2002

Sistema Mecatrônico para Medida de Desvios Axial e Radial de Rodas utilizando Recursos de Visão Computacional

Fernando Toshihiko Mitsuyassu

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Alberto Adade Filho - Presidente - IEM / ITA

Prof. Luis Gonzaga Trabasso - Orientador - IEM / ITA

Prof. João Carlos Menezes - IEM / ITA

Prof. Alfredo Rocha de Faria - IEM / ITA

Prof. Oswaldo Horikawa - Escola Politécnica - USP

ITA

Índice

<i>Índice</i>	<i>i</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>v</i>
<i>Índice de Tabelas</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>xii</i>
<i>Sumário</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvi</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>xvii</i>
<i>Dedicatória</i>	<i>xviii</i>
<i>Capítulo I. Introdução</i>	<i>I</i>
<i>Capítulo II. Definições e métodos de medida</i>	<i>8</i>
II.1 Tolerâncias compostas: tolerância de desvio de batida de acordo com British Standards Institution (1982)	<i>8</i>
II.2 Método recomendado para a medida do diâmetro e largura da roda segundo a ALAPA (2001)	<i>12</i>
II.2.1 Cálculo do diâmetro de inspeção (DI) para aros com assento cônicocom 5°	<i>13</i>
II.2.2 Medição da largura da roda (L)	<i>15</i>
<i>Capítulo III. Métodos avaliados para a inspeção de oscilação</i>	<i>16</i>
III.1 Método com o emprego de relógios comparadores	<i>16</i>
III.2 Método com o emprego de sensores LVDT	<i>22</i>
III.3 Método com o emprego de roletes	<i>25</i>

<i>Capítulo IV.</i>	<i>Sistema de Visão</i>	27
IV.1	Técnicas de Iluminação	27
IV.1.1	Iluminação Frontal	27
IV.1.1.1	Iluminação Omni-directional	27
IV.1.1.2	Iluminação Direcional	28
IV.1.2	Iluminação de fundo	29
IV.1.2.1	Iluminação com um campo de luz	29
IV.1.2.2	Iluminação com campo escuro de iluminação	30
IV.1.3	Iluminação Estruturada	31
IV.2	Processamento de Imagens	32
IV.2.1	Detecção de Bordas	32
IV.2.1.1	Operador de gradiente	34
IV.2.1.2	Sobel	35
IV.2.1.3	Laplaciano	37
IV.2.1.4	Marr e Hildreth	38
IV.2.1.5	Detector de bordas de Canny	39
IV.2.2	Transformada de Hough	41
IV.2.2.1	Transformada de Hough para determinar retas	41
IV.2.2.1.1	Informação direcional	42
IV.2.2.2	Transformada de Hough para determinar curvas	43
IV.2.2.2.1	Informação Direcional	44
<i>Capítulo V.</i>	<i>Implementação do sistema mecatrônico proposto</i>	46
V.1	Equipamentos empregados	46
V.2	Programas empregados	47

V.3 Sistema de alimentação e extração de rodas	48
V.3.1 Guia de alimentação	52
V.3.2 Posicionamento inicial da roda	53
V.3.3 Mesa de Transferência	56
V.3.4 Sistema de Elevação	58
V.3.5 Sistema de avanço e recuo da mesa de transferência	60
V.3.6 Sistema de fixação para medição (parte da Estação de Inspeção)	61
V.3.7 Posto de Extração	62
V.3.8 Garra para a extração da roda	63
V.4 Estação de Inspeção	66
V.4.1 Sistema de fixação	68
V.4.2 Sistema de iluminação	69
V.4.3 Ambiente de isolamento do sistema de iluminação	69
V.5 Descrição do procedimento operacional de medição da estação de inspeção	70
V.5.1 Calibração do sistema de visão	72
V.5.1.1 Posicionamento e fixação do calibre	75
V.5.1.2 Captura da imagem do calibre	77
V.5.1.3 Detecção as bordas do calibre	78
V.5.1.4 Obtenção das retas de referência da imagem do calibre	78
V.5.1.5 Obtenção dos pontos de referência da imagem do calibre	85
V.5.1.6 Obtenção da escala e do ângulo de inclinação da imagem	86
V.5.2 Medição da oscilação da roda	91
V.5.2.1 Posicionamento e fixação da roda	92
V.5.2.2 Captura da imagem da roda	93

V.5.2.3	Detecção da borda da roda	93
V.5.2.4	Detecção das retas de interesse	96
V.5.2.4.1	Forma alternativa para se obter a reta que define a largura da roda	99
V.5.2.5	Obtenção dos desvios axial e radial	105
Capítulo VI.	Resultados Obtidos	109
Capítulo VII.	Conclusão	114
Referências Bibliográficas		117
Apêndice A.	Fluxograma para ajustar a melhor circunferência a um dado conjunto de pontos	119
Apêndice B.	Vista inferior de uma roda	123

Índice de Figuras

<i>Figura I.1: Modelo em corte de uma roda</i>	1
<i>Figura I.2: Desenho esquemático do perfil de uma roda</i>	1
<i>Figura I.3: Desenho de produto de uma roda, destacando-se o diâmetro e a largura</i>	2
<i>Figura I.4: Pontos de contato que são utilizados para avaliar a oscilação radial e axial da roda</i>	3
<i>Figura I.5: Modelo em corte para a visualização do perfil do aro</i>	3
<i>Figura I.6: Processo atual que emprega o uso de relógios comparadores</i>	4
<i>Figura I.7: Solução alternativa para medida da oscilação utilizando sensores LVDT</i>	5
<i>Figura I.8: Equipamento para medida da oscilação da roda com o emprego de roletes</i>	6
<i>Figura II.1: Símbolo da tolerância de desvio de batida</i>	8
<i>Figura II.2: Exemplo da aplicação da tolerância à uma peça que revoluciona em torno de um eixo</i>	8
<i>Figura II.3: Interpretação da tolerância aplicada na Figura II.2</i>	9
<i>Figura II.4: Exemplo da tolerância aplicada à uma peça sustentada por dois pontos de rotação</i>	9
<i>Figura II.5: Interpretação da tolerância aplicada na Figura II.4</i>	10
<i>Figura II.6: Exemplo geral de aplicação da tolerância em uma peça</i>	10
<i>Figura II.7: Interpretação da Figura II.6 – parte 1</i>	11
<i>Figura II.8: Interpretação da Figura II.6 – parte 2</i>	11
<i>Figura II.9: Interpretação da Figura II.6 – parte 3</i>	11
<i>Figura II.10: Representação esquemática para a medida da largura e diâmetro da roda segundo a norma ALAPA</i>	12
<i>Figura II.11: Posicionamento da esfera no assento do pneu</i>	13

<i>Figura II.12: Esquema para cálculo do diâmetro de inspeção de aros</i>	13
<i>Figura II.13: Esquema para o cálculo da largura da roda</i>	15
<i>Figura III.1: Montagem manual da roda no dispositivo de inspeção</i>	16
<i>Figura III.2: Esquema do dispositivo de posicionamento da roda para inspeção de oscilação</i>	17
<i>Figura III.3: Esquema para a medição da oscilação radial</i>	17
<i>Figura III.4: Esquema para a medição da oscilação axial</i>	18
<i>Figura III.5: Movimentação manual da roda para a inspeção</i>	18
<i>Figura III.6: Representação geométrica da correção da leitura da oscilação radial (run-out)</i>	19
<i>Figura III.7: Manuseio de até quatro relógios comparadores ao mesmo tempo</i>	21
<i>Figura III.8: Sistema com o emprego de LVDT</i>	22
<i>Figura III.9: Esquema para medir a oscilação radial utilizando-se sensores LVDT</i>	23
<i>Figura III.10: Esquema para medir a oscilação axial utilizando-se sensores LVDT</i>	23
<i>Figura III.11: Esquema para a medida de oscilação através do emprego de roletes</i>	25
<i>Figura III.12: Sistema com o emprego de roletes</i>	26
<i>Figura IV.1: Esquema de Iluminação Omni-Direcional difusa</i>	28
<i>Figura IV.2: Esquema de Iluminação Direcional</i>	28
<i>Figura IV.3: Esquema de Iluminação com um campo de luz</i>	29
<i>Figura IV.4: Esquema de Iluminação com campo escuro de luz</i>	30
<i>Figura IV.5: Esquema de Implementação de iluminação estruturada</i>	31
<i>Figura IV.6: Detecção de bordas por operadores de derivação [4]: (a) faixa clara sobre fundo escuro; (b) faixa escura sobre um fundo claro.</i>	33
<i>Figura IV.7: Região de uma imagem de tamanho 3x3</i>	35

<i>Figura IV.8: Máscara Sobel utilizada para computar o valor do gradiente em y, Gy, no ponto central da região 3x3</i>	35
<i>Figura IV.9: Máscara Sobel utilizada para computar o valor do gradiente em x, Gx, no ponto central da região 3x3</i>	35
<i>Figura IV.10: Máscara para computar o Laplaciano</i>	37
<i>Figura IV.11: Parametrização de retas</i>	41
<i>Figura IV.12: Acumulador para computar a retas</i>	42
<i>Figura V.1: Sistema de alimentação e extração de rodas</i>	48
<i>Figura V.2: Seqüência de movimentação do sistema de alimentação e extração de rodas</i>	50
<i>Figura V.3: Guia de alimentação (dimensões em milímetros)</i>	52
<i>Figura V.4: Dispositivo para o posicionamento da roda</i>	53
<i>Figura V.5: Detalhe do dispositivo para o posicionamento da roda (dimensões em milímetros)</i>	53
<i>Figura V.6: Representação para o posicionamento do dispositivo</i>	54
<i>Figura V.7: Posição do dispositivo para rodas de 13", 14", 15", 16" e 17"</i>	55
<i>Figura V.8: Mesa de Transferência (dimensões em milímetros)</i>	56
<i>Figura V.9: Acomodação de uma roda de 15" na mesa de transferência</i>	57
<i>Figura V.10: Esquema para projeto dos degraus da mesa de transferência</i>	57
<i>Figura V.11: Sistema de elevação de rodas</i>	58
<i>Figura V.12: Detalhe geométrico do sistema de elevação</i>	58
<i>Figura V.13: Detalhe do sistema de elevação (dimensões em milímetros)</i>	59
<i>Figura V.14: Mesa de transferência elevada e abaixada</i>	59
<i>Figura V.15: Sistema de avanço e recuo da mesa de transferência</i>	60
<i>Figura V.16: Mesa de transferência elevada e avançada</i>	60
<i>Figura V.17: Sistema de fixação para medição da Roda</i>	61

<i>Figura V.18: Posto de extração da roda</i>	62
<i>Figura V.19: Garra para a extração da roda</i>	63
<i>Figura V.20: Detalhe geométrico do sistema de rotação da garra</i>	63
<i>Figura V.21: Detalhe geométrico do sistema rotacionado da garra</i>	64
<i>Figura V.22: Seqüência de extração – Avanço da garra e fixação da roda</i>	64
<i>Figura V.23: Seqüência de extração – Recolhimento da garra e elevação da roda</i>	64
<i>Figura V.24: Sequência de extração – Avanço da garra e colocação da roda na gancheira</i>	65
<i>Figura V.25: Sequência de extração – Recolhimento da Garra</i>	65
<i>Figura V.26: Modelo da estação de inspeção</i>	66
<i>Figura V.27: Protótipo da estação de inspeção</i>	67
<i>Figura V.28: Sistema de fixação da roda</i>	68
<i>Figura V.29: Protótipo do sistema de fixação</i>	68
<i>Figura V.30: Detalhe da aba do aro da roda</i>	70
<i>Figura V.31: Modelo do Calibre</i>	72
<i>Figura V.32: Protótipo do Calibre</i>	72
<i>Figura V.33: Referências do calibre</i>	74
<i>Figura V.34: Posicionamento e fixação do calibre na base de medida</i>	75
<i>Figura V.35: Posicionamento e fixação do calibre na base de medida – protótipo</i>	75
<i>Figura V.36: Montagem do calibre no sistema de medição</i>	76
<i>Figura V.37: Detalhe da montagem do calibre no sistema de medição</i>	76
<i>Figura V.38: Imagem do calibre capturada para calibração do sistema</i>	77
<i>Figura V.39: Borda do calibre utilizando Sobel</i>	78
<i>Figura V.40: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = 90^\circ$ (r1)</i>	79
<i>Figura V.41: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = -90^\circ$ (r2)</i>	80
<i>Figura V.42: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = 0^\circ$ (r3)</i>	80

<i>Figura V.43: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = 180^\circ$ (r4)</i>	81
<i>Figura V.44: Representação das retas obtidas através da transformada de Hough</i>	82
<i>Figura V.45: Representação das retas obtidas através da transformada de Hough sobreposta à imagem original</i>	82
<i>Figura V.46: Ajuste da reta aos pontos da borda</i>	83
<i>Figura V.47: Representação das retas obtidas através do ajuste por mínimos quadrado</i>	84
<i>Figura V.48: Representação das retas obtidas através do ajuste por mínimos quadrados sobreposta à imagem original</i>	84
<i>Figura V.49: Sobreposição do método de Hough com e sem a utilização dos mínimos quadrados</i>	85
<i>Figura V.50: Representação da intersecção entre a reta horizontal que passa por ptm e as retas r3 e r4</i>	87
<i>Figura V.51: Representação esquemática da imagem do calibre rotacionada</i>	88
<i>Figura V.52: Representação da intersecção entre a reta vertical que passa pelo ponto ptm e as r1 e r2</i>	89
<i>Figura V.53: Montagem do protótipo para a medição da oscilação da roda</i>	91
<i>Figura V.54: Montagem e fixação da roda no suporte de medição</i>	92
<i>Figura V.55: Montagem e fixação da roda no Suporte de medição – protótipo.</i>	92
<i>Figura V.56: Imagem capturada da aba da roda</i>	93
<i>Figura V.57: Borda da roda – Operador Sobel</i>	94
<i>Figura V.58: Erro na detecção da borda da roda – Operador Sobel</i>	94
<i>Figura V.59: Borda da roda – Operador Canny</i>	95
<i>Figura V.60: Borda do assento do pneu</i>	96
<i>Figura V.61: Borda da lateral da roda que define sua largura</i>	97
<i>Figura V.62: Sobreposição das bordas selecionadas à imagem original</i>	97

<i>Figura V.63: Ajuste das retas aos pontos do assento do pneu e da largura da roda</i>	98
<i>Figura V.64: Sobreposição das retas do assento e da largura da roda à imagem original</i>	99
<i>Figura V.65: Apresentação dos arcos tangentes a reta que define a largura a roda</i>	100
<i>Figura V.66: Parâmetros de uma circunferência</i>	100
<i>Figura V.67 Acumulador para identificar o par de parâmetro da curva de maior ocorrência</i>	101
<i>Figura V.68 Borda dos arcos tangentes a resta que define a largura da roda</i>	103
<i>Figura V.69 Ajuste do melhor arco aos pontos da borda</i>	104
<i>Figura V.70: Pontos para medida da oscilação da roda, segundo o procedimento atual</i>	105
<i>Figura VI.1: Resultado da medida da oscilação radial</i>	110
<i>Figura VI.2: Resultados variação da distância o ponto de medida ao eixo da roda</i>	111
<i>Figura VI.3 Resultado da variação da inclinação do assento do pneu</i>	111
<i>Figura VI.4: Resultados da medida da oscilação axial</i>	112
<i>Figura VI.5: Resultado de medidas da oscilação axial baseando-se nos arcos da aba da roda</i>	113

Índice de Tabelas

<i>Tabela I-1: Valores usuais de tolerância de oscilação</i>	4
<i>Tabela IV-1: Curvas analíticas</i>	43
<i>Tabela V-1: Tolerâncias dos desvios da roda</i>	46
<i>Tabela V-2: Valores dos parâmetros do calibre</i>	73
<i>Tabela V-3: Parâmetros do calibre</i>	86
<i>Tabela V-4: Parâmetros das retas de referência da imagem do calibre</i>	86
<i>Tabela V-5: Parâmetros dos pontos de referência da imagem do calibre</i>	86
<i>Tabela V-6: Resumo da correlação entre imagem e o real</i>	90
<i>Tabela V-7 Parâmetros da reta de interesse da imagem da roda</i>	99
<i>Tabela V-8: Parâmetros da reta deslocada 8,00 [mm] da aba</i>	106
<i>Tabela V-9: Parâmetros da reta deslocada 8,00 [mm] d assento do pneu</i>	108

Lista de Símbolos

d	deslocamento medido na direção normal ao assento do pneu, Figura III.6
h	distância do centro da esfera de inspeção do diâmetro a roda
l	deslocamento medido na direção radial da roda, Figura III.6
pt1	ponto para referência do calibre, intersecção entre r1 e r3, Figura V.33
pt2	ponto para referência do calibre, intersecção entre r1 e r4, Figura V.33
pt3	ponto para referência do calibre, intersecção entre r2 e r3, Figura V.33
pt4	ponto para referência do calibre, intersecção entre r2 e r4, Figura V.33
r	raio da esfera de inspeção
r1	reta para referência do calibre, Figura V.33
r2	reta para referência do calibre, Figura V.33
r3	reta para referência do calibre, Figura V.33
r4	reta para referência do calibre, Figura V.33
x_i	coordenada no eixo X do i-ésimo ponto da circunferência, (V.17)
x_{ptm}	coordenada no eixo X do ponto ptm
$x_{r3}(y_{ptm})$	coordenada no eixo X do ponto de intersecção entre a reta r3 e a reta horizontal que passa pelo ponto ptm
$x_{r4}(y_{ptm})$	coordenada no eixo X do ponto de intersecção entre a reta r4 e a reta horizontal que passa pelo ponto ptm
x_0	coordenada no eixo X do centro da circunferência dada pela Equação (V.14)
y_i	coordenada no eixo Y do i-ésimo ponto da circunferência, Equação (V.17)
y_{ptm}	coordenada no eixo Y do ponto ptm

$y_{r1}(x_{ptm})$	coordenada no eixo Y do ponto de intersecção entre a reta r1 e a reta vertical que passa pelo ponto ptm
$y_{r2}(x_{ptm})$	coordenada no eixo Y do ponto de intersecção entre a reta r2 e a reta vertical que passa pelo ponto ptm
y_0	coordenada no eixo Y do centro da circunferência dada pela Equação (V.14)
D	diâmetro da roda
Di	diâmetro de inspeção da roda
H1	parâmetro de referência do calibre a partir da base de apoio do suporte, Figura V.31
H2	parâmetro de referência do calibre a partir da base de apoio do suporte, Figura V.31
L	Largura da roda
L1	parâmetro de referência do calibre a partir do eixo do suporte, Figura V.31
L2	parâmetro de referência do calibre a partir do eixo do suporte, Figura V.31
α	metade do ângulo entre os pontos de contato entre a esfera de inspeção e a roda
β	ângulo do assento cônico do pneu
θ	ângulo da normal à reta, Figura IV.11 ângulo da direção da borda, Figura V.66
θ_{im}	ângulo de inclinação da imagem
θ_{reta}	ângulo da reta deslocada da largura do aro
θ_{r1}	ângulo da normal a reta r1
θ_{r2}	ângulo da normal a reta r2
θ_{r3}	ângulo da normal a reta r3
θ_{r4}	ângulo da normal a reta r4

ρ	distância da reta à origem, Figura IV.11
	raio da circunferência dada pela Equação (V.14)
ρ_i	raio do i-ésimo ponto, Equação (V.17)
ρ_{im}	distância da reta à origem da imagem em pixel
ρ_{med}	raio médio dados n pontos da circunferência, Equação (V.18)
ρ_{real}	distância da reta à origem da imagem em milímetros
ρ_{r1}	distância da reta r1 à origem
ρ_{r2}	distância da reta r2 à origem
ρ_{r3}	distância da reta r3 à origem
ρ_{r4}	distância da reta r4 à origem
$\sigma\rho$	desvio padrão do valor do raio ρ
$\Delta x_{calibre}$	distância entre as retas r3 e r4 do calibre
Δx_{im}	distância, na imagem, entre os pontos de intersecção das retas r3 e r4 com a reta horizontal que passa pelo ponto ptm
Δx_{real}	distância, em milímetros, entre os pontos de intersecção das retas r3 e r4 com a reta horizontal que passa pelo ponto ptm
$\Delta x_{real}/\Delta x_{im}$	unidades em milímetros por pixel no eixo horizontal
$\Delta y_{calibre}$	distância entre as retas r1 e r2 do calibre
Δy_{im}	distância em pixel, entre os pontos de intersecção das retas r1 e r2 com a reta vertical que passa pelo ponto ptm
Δy_{real}	distância, em milímetros, entre os pontos de intersecção das retas r1 e r2 com a reta vertical que passa pelo ponto ptm
$\Delta y_{real}/\Delta y_{im}$	unidades em milímetros por pixel no eixo vertical

Sumário

A roda automotiva é um item de segurança do veículo, cujo desenvolvimento e produção é complexo e requer um rigoroso controle dimensional. Atualmente o sistema de medição da oscilação da roda, situada entre as etapas de produção, consiste no emprego de relógios comparadores. Desta forma, a qualidade da informação obtida depende da habilidade do operador em manipular o dispositivo de medição, estando também, suscetível ao desgaste físico por trabalho repetitivo.

Soluções alternativas, para a medição da oscilação da roda, também foram estudadas, como por exemplo, o emprego de equipamentos com sensores LVDT e roletes, os quais não apresentaram resultados satisfatórios.

Devido a estes fatos, este trabalho tem como objetivo projetar um sistema mecatrônico, que utiliza recursos de visão computacional, para medir a oscilação da roda, buscando resolver os problemas apresentados por outros métodos comentados.

Foi desenvolvido um protótipo da estação de medição, aonde foram realizados vários experimentos com rodas reais, que comprovaram a facilidade do uso do sistema proposto.

Abstract

Wheels are one of the most important components of an automobile, whose developing and manufacturing process are complex and require accurate inspection. The current inspection system uses dial gauges. Hence, the quality of the measurement depends on the operator's ability to manipulate dial gauges and is also susceptible to wear due to repetitive work.

Alternative measurement schemes have been tried out without expected results, including a system based on the use of LVDT sensors and an automatic system based on the contact between cylindrical rollers and the wheel.

Because of that, this work presents the study of a mechatronic device that employs computer vision resources, to measure the run-out of automotive wheels.

The prototype of a measurement station has been developed where several experiments with real wheels were conducted to evidence the ease to use of the system proposed.

Agradecimentos

À meus Pais,

Professores,

Colegas e Amigos do ITA,

Colegas e Amigos de trabalho da ArvinMeritor.

Dedicatória

Aos meus pais, Itiro Mitsuyassu e Diuda Sawaco Mitsuyassu, que me deram a base para o meu desenvolvimento.

Capítulo I. Introdução

A roda automotiva de aço é um item de segurança do veículo, composta em sua maioria por dois componentes, o aro e o disco. Estes componentes são produzidos por processos de laminação e estampagem respectivamente, e então montados e soldados formando a roda, como mostrado na Figura I.1 e na Figura I.2.



Figura I.1: Modelo em corte de uma roda

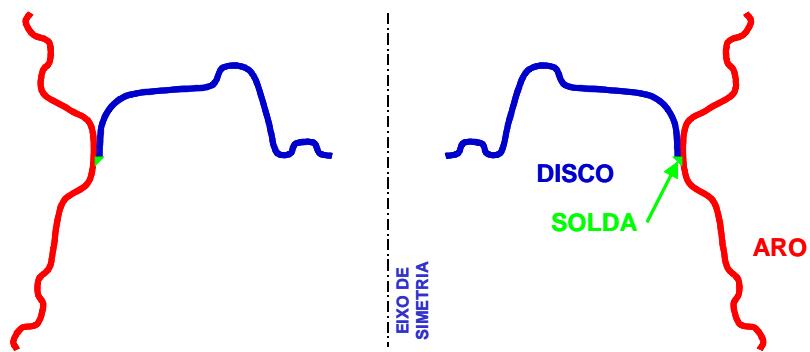


Figura I.2: Desenho esquemático do perfil de uma roda

Para que a roda seja certificada, tanto pela montadora de veículos como pela empresa fabricante de rodas, é necessário que seja aprovada em rigorosos testes de resistência, durabilidade e controle dimensional, entre outros.

Em relação ao controle dimensional, que é o escopo deste trabalho, pode-se exemplificar o desvio axial e radial como as dimensões a serem controladas. Os desvios axial e radial são, essencialmente, as variáveis de controle da largura e diâmetro da roda, respectivamente. No entanto, estas medidas são controladas com a roda em movimento ao redor do seu eixo de rotação, comumente denominado, desvios de batida (run-out).

Uma grande variação dos desvios axial e radial pode prejudicar o balanceamento, a circularidade da roda, a montagem do pneu, a segurança e desta forma, causar a reprovação da roda.

Na Figura I.3 é apresentado o desenho de produto de uma roda com suas especificações geométricas, aonde são destacadas a especificação de largura e de diâmetro da roda.

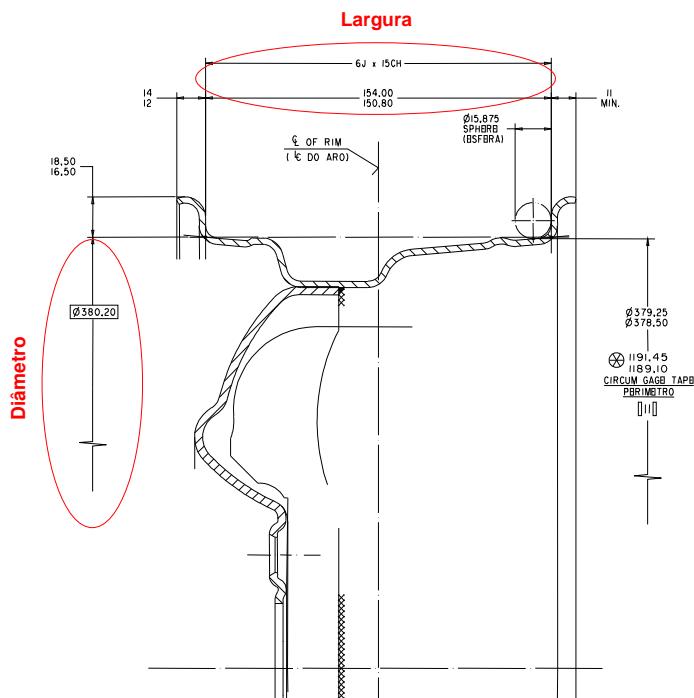


Figura I.3: Desenho de produto de uma roda, destacando-se o diâmetro e a largura

Na Figura I.4 são apresentados os pontos de contato entre uma esfera de 16 [mm] e a aba da roda, pontos os quais são utilizados conforme ALAPA (2001), para efetuar as medidas de desvio axial e radial, ou seja pontos aonde são medidos a oscilação axial e radial da roda.

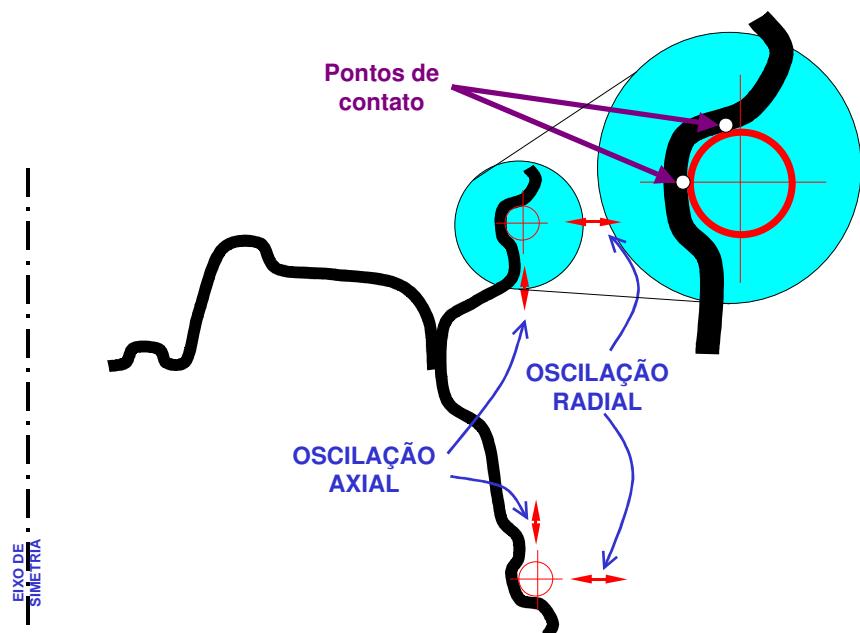


Figura I.4: Pontos de contato que são utilizados para avaliar a oscilação radial e axial da roda



Figura I.5: Modelo em corte para a visualização do perfil do aro

As tolerâncias dos desvios axial e radial, atualmente especificadas pelas montadoras, são apresentadas na Tabela I-1.

Tabela I-1: Valores usuais de tolerância de oscilação

	Desvios	
	Axial [mm]	Radial [mm]
Veículos de passeio	0.5 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8
Veículos tipo Pickup	$\cong 1.0$	$\cong 1.0$

O processo de medição atual emprega o uso de relógios comparadores para medir o desvio axial e radial da roda, conforme a Figura I.6. Este processo requer que o posicionamento e a leitura dos relógios sejam realizados manualmente, fazendo com que a qualidade dos resultados obtidos dependa da habilidade do funcionário.



Figura I.6: Processo atual que emprega o uso de relógios comparadores

Uma solução alternativa utiliza sensores LVDT (Linear Variable Differential Transducer), para efetuar as medidas do desvio axial e radial da roda, como mostrado na Figura I.7. No entanto, o projeto em sua concepção atual carece de robustez ocasionando freqüentemente danos aos sensores. A simples substituição de relógios comparadores por sensores não alcançou os resultados esperados, o que requer uma nova formulação.



Figura I.7: Solução alternativa para medida da oscilação utilizando sensores LVDT

Outra solução alternativa foi avaliada. Desta vez um sistema com o emprego de roletes, como mostrado na Figura I.8. No entanto este também não apresentou bom resultado, pois a inspeção é realizada em etapas intermediárias da produção, após a montagem e antes da pintura; desta forma a leitura é prejudicada pelo acúmulo de sujeira nos roletes.

O sistema com roletes é eficiente para inspeção de rodas pintadas, no entanto, a inspeção é requerida antes da pintura, pois o processo de pintura ocorre de forma contínua e dura em torno de 2 horas. Portanto se a inspeção fosse realizada após a pintura, a tomada de

uma eventual ação corretiva seria muito demorada e no caso de uma eventual não conformidade seria necessário o sucateamento de um lote em torno de 5000 peças em processo de pintura.

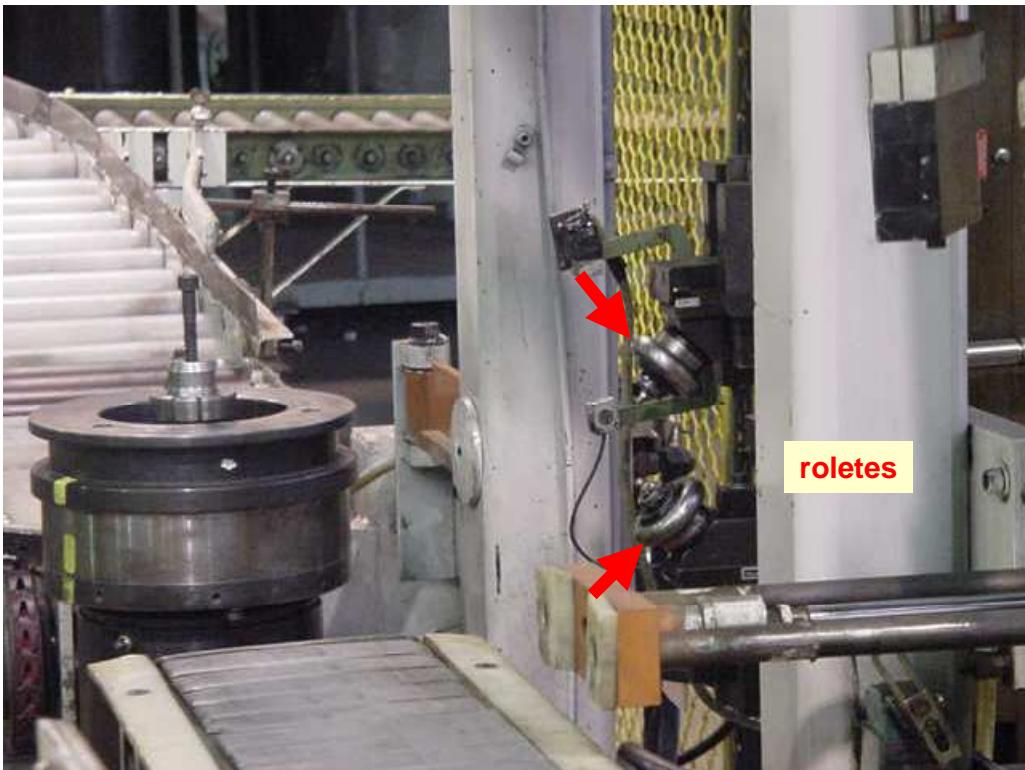


Figura I.8: Equipamento para medida da oscilação da roda com o emprego de roletes

Dentro deste contexto, é proposto como objetivo do trabalho o desenvolvimento de um sistema mecatrônico, utilizando recursos de visão computacional, para realizar a inspeção da oscilação da roda. Adicionalmente à funcionalidade de inspeção, o sistema mecatrônico proposto automatiza também o processo de carregamento e descarregamento da estação de inspeção.

Para comprovar a aplicabilidade do sistema, foi construído um protótipo da estação de inspeção para teste com rodas reais.

O mecanismo de carga e de descarga da roda foi modelado e simulado através do aplicativo ADAMS.

A tese é composta por seis capítulos, além da introdução.

No Capítulo II são apresentadas as definições e as especificações para medir a oscilação da roda.

No Capítulo III é apresentada a avaliação de três dos métodos existentes para medir a oscilação da roda. Neste capítulo é descrito o método de medição da oscilação através do emprego de relógios comparadores, sensores LVDT e roletes, bem como suas vantagens e desvantagens.

No Capítulo IV é apresentada uma introdução ao sistema de visão computacional, aonde é dada ênfase às técnicas de iluminação e ao processamento de imagem.

No Capítulo V é apresentada a descrição da implementação do trabalho proposto para medir a oscilação da roda. Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento do sistema de alimentação e extração, e da estação de medição.

No Capítulo VI são apresentados os resultados do trabalho segundo o método proposto.

No Capítulo VII são apresentadas as conclusões do trabalho realizado.

Capítulo II. Definições e métodos de medida

II.1 Tolerâncias compostas: tolerância de desvio de batida de acordo com British Standards Institution (1982)

Desvio de Batida (oscilação) é uma medida realizada com o componente em movimento ao redor de um eixo de rotação especificado ou rotacionando-o quando é sustentado por pontos especificados de rotação.

A tolerância desvio de batida pode ser aplicada às superfícies de um sólido de revolução e às faces que são perpendiculares ao eixo.

O símbolo da tolerância desvio de batida é apresentado na Figura II.1.



Figura II.1: Símbolo da tolerância de desvio de batida

Quando a tolerância é aplicada à superfície de um sólido de revolução, o valor da tolerância é o máximo desvio da superfície, em qualquer ponto fixo ao longo desse movimento, durante uma revolução do componente ao redor do eixo de rotação (Figura II.2) ou quando sustentado por dois pontos especificados de rotação (Figura II.4).

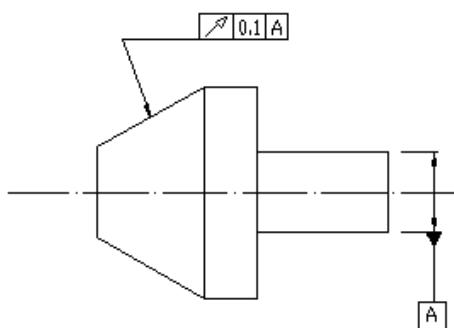


Figura II.2: Exemplo da aplicação da tolerância à uma peça que revoluciona em torno de um eixo

Para o exemplo apresentado na Figura II.2, a interpretação é a seguinte:

Durante uma revolução completa da peça ao redor do eixo de rotação, o valor do desvio de batida, medido na direção normal à superfície aplicada a tolerância, não deve exceder 0.1 [mm] (Figura II.3)

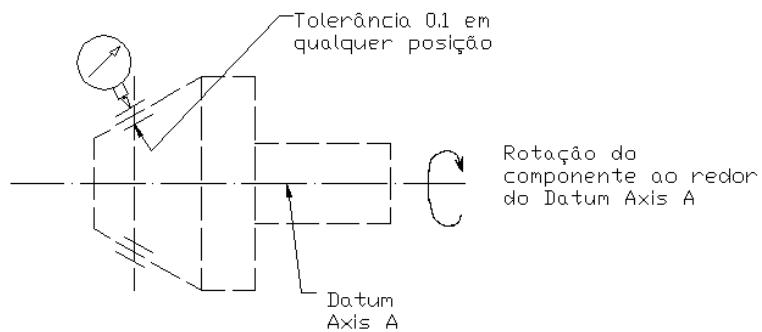


Figura II.3: Interpretação da tolerância aplicada na Figura II.2

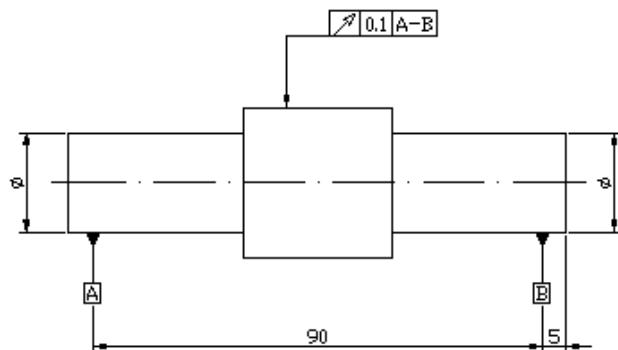


Figura II.4: Exemplo da tolerância aplicada à uma peça sustentada por dois pontos de rotação

Para o exemplo apresentado na Figura II.4, a interpretação é a seguinte:

Durante a revolução completa da peça, quando sustentada por dois pontos de rotação específicos, o valor do desvio de batida, medido na direção normal à superfície aplicada a tolerância, não deve exceder 0.1 [mm] (Figura II.5).

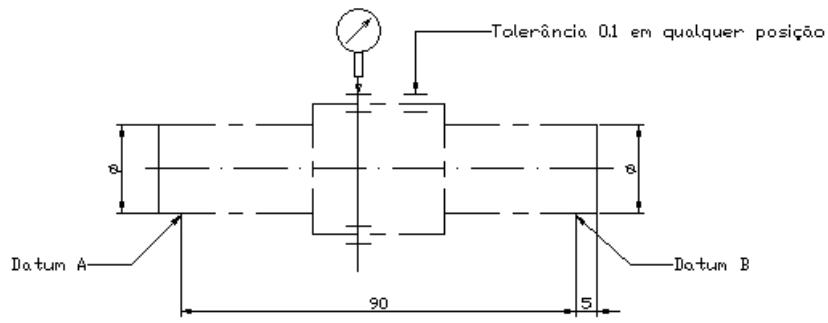


Figura II.5: Interpretação da tolerância aplicada na Figura II.4

É mostrado a seguir um exemplo com aplicações gerais da tolerância do desvio de batida.

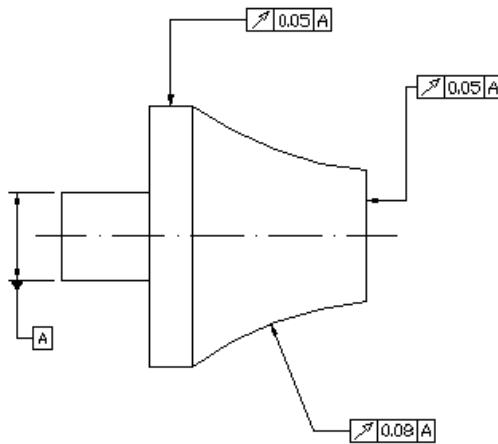


Figura II.6: Exemplo geral de aplicação da tolerância em uma peça

Para o exemplo apresentado na Figura II.6, a interpretação é separada em três partes:

Parte 1 (Figura II.7) - Durante uma revolução completa da peça ao redor do eixo de rotação, o valor do desvio de batida, medido na direção normal ao longo da superfície cilíndrica, em nenhum ponto, pode exceder 0.05 [mm].

Parte 2 (Figura II.8) – Durante uma revolução completa da peça ao redor do eixo de rotação, o valor do desvio de batida, medido na direção normal ao longo da superfície, em nenhum ponto, pode exceder 0.08 [mm].

Parte 3 (Figura II.9) – Durante uma revolução completa da peça ao redor do eixo de rotação, o valor do desvio de batida, medido na direção normal ao plano da face perpendicular ao eixo de rotação, em nenhum ponto pode exceder 0.05 [mm].

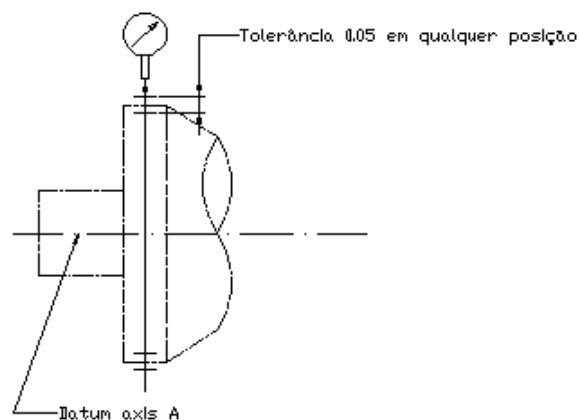


Figura II.7: Interpretação da Figura II.6 – parte 1

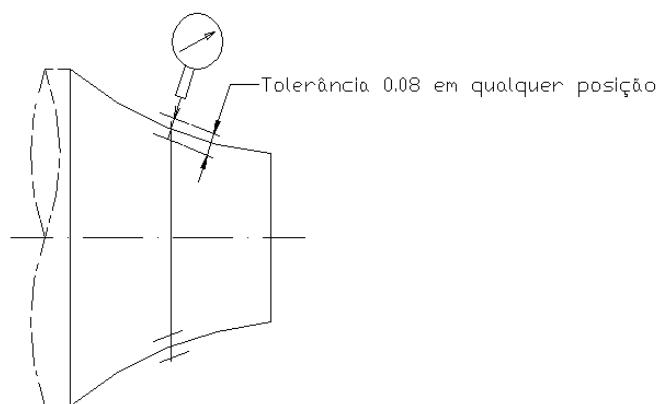


Figura II.8: Interpretação da Figura II.6 – parte 2

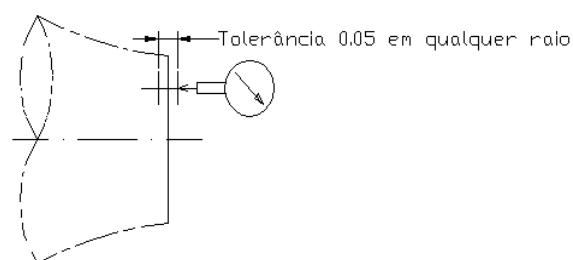


Figura II.9: Interpretação da Figura II.6 – parte 3

II.2 Método recomendado para a medida do diâmetro e largura da roda segundo a ALAPA (2001)

A norma da Associação Latino Americana de Aros e Pneus (ALAPA) padroniza que, para medir a largura e o diâmetro da roda, seja utilizada uma esfera de 16 [mm] de diâmetro. Posicionando-se uma esfera de 16 [mm] de diâmetro na aba do aro da roda, como mostrado na Figura II.10, serão obtidos os pontos de contato entre o aro e a esfera pelos quais serão possíveis o cálculo do diâmetro e da largura da roda e posteriormente, o cálculo da oscilação da roda.

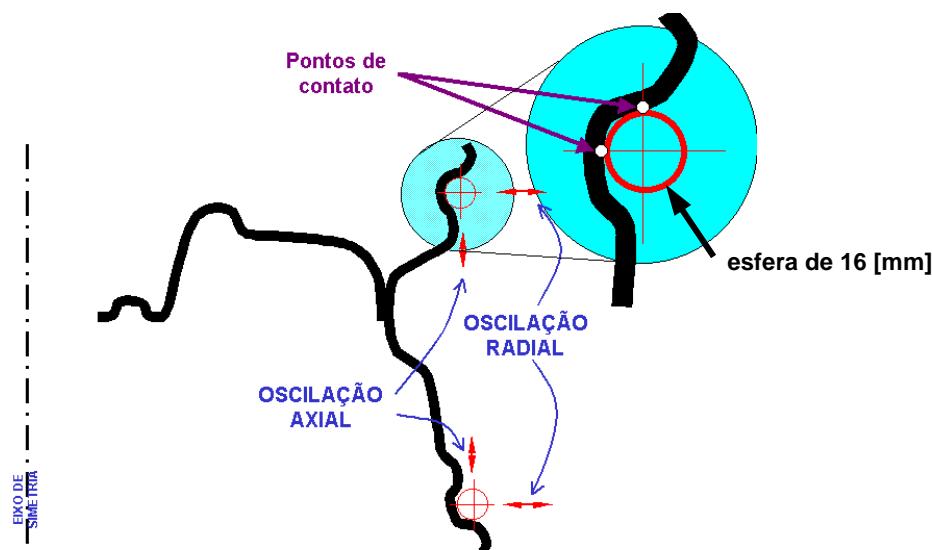


Figura II.10: Representação esquemática para a medida da largura e diâmetro da roda segundo a norma ALAPA

II.2.1 Cálculo do diâmetro de inspeção (DI) para aros com assento cônico com 5°

A Figura II.11 representa a esfera posicionada no assento do pneu do aro, aonde se deseja medir o diâmetro da roda (D) e calcular o diâmetro de inspeção (DI). Na Figura II.12 é apresentada a forma esquemática do posicionamento da esfera no assento do pneu para efeitos de cálculo.

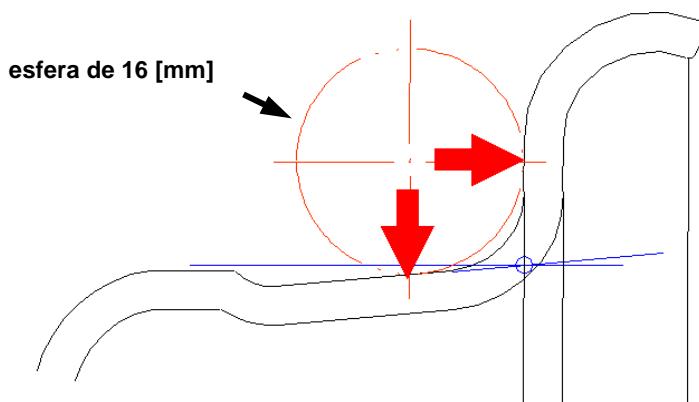
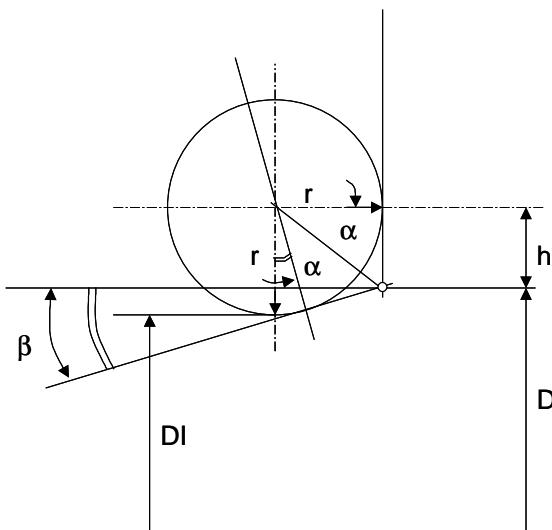


Figura II.11: Posicionamento da esfera no assento do pneu



DI – Diâmetro de inspeção

D – Diâmetro da roda

r – Raio da esfera de inspeção

β – Ângulo do assento cônico do pneu

h – Distância do centro da esfera de inspeção ao ponto do diâmetro da roda

2α – Ângulo entre os pontos de contato entre a esfera de inspeção e a roda

Figura II.12: Esquema para cálculo do diâmetro de inspeção de aros

Da Figura II.12 tem-se, que:

$$\frac{DI}{2} = \frac{D}{2} + h - r \quad (II.1)$$

$$DI = D - 2 \cdot (r - h) \quad (II.2)$$

também, da Figura II.12, obtém-se:

$$h = r \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (II.3)$$

$$\alpha = \frac{90^\circ - \beta}{2} \quad (II.4)$$

logo:

$$DI = D - 2 \cdot (r - r \cdot \operatorname{tg}(\alpha)) = D - 2 \cdot r \cdot \left(1 - \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ - \beta}{2}\right)\right) \quad (II.5)$$

d = diâmetro da esfera de inspeção = $2r$

$$DI = D - d \cdot \left(1 - \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ - \beta}{2}\right)\right) \quad (II.6)$$

Para:

$$d = 16,00 \text{ [mm]}$$

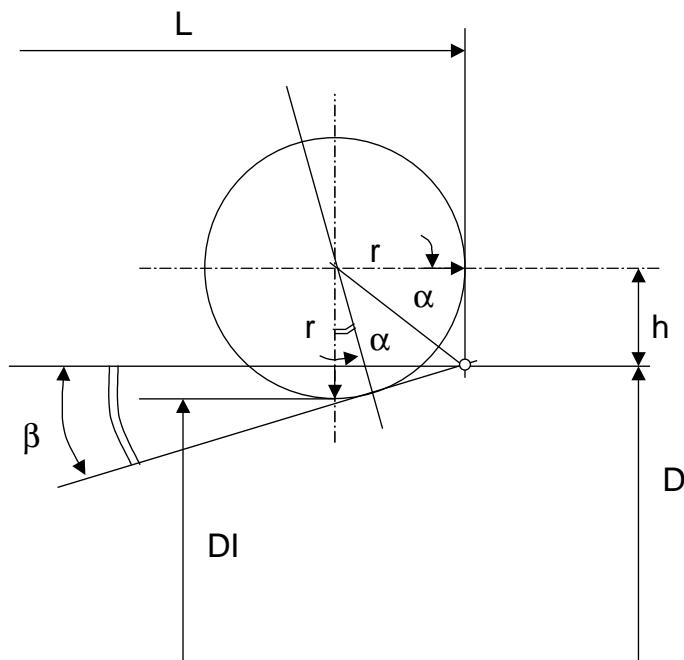
$$\beta = 5^\circ \text{ (ângulo de inclinação do assento do pneu)}$$

tem-se:

$$DI = D - 1.338701 \quad (II.7)$$

II.2.2 Medição da largura da roda (L)

A largura da roda (L) pode ser medida diretamente pelo ponto de contato da esfera com o aro da roda, conforme a Figura II.13.



Di – Diâmetro de inspeção

D – Diâmetro da roda

L – Largura da roda

r – Raio da esfera de inspeção

β – Ângulo do assento cônico do pneu

h – Distância do centro da esfera de inspeção ao ponto do diâmetro da roda

2α – Ângulo entre os pontos de contato entre a esfera de inspeção e a roda

Figura II.13: Esquema para o cálculo da largura da roda

Capítulo III. Métodos avaliados para a inspeção de oscilação

Para a medida do valor do diâmetro e largura da roda, bem como para a variação destas medidas, atualmente, existem três métodos possíveis de serem utilizados:

1. com o emprego de relógios comparadores;
2. com o emprego de sensores LVDT;
3. com o emprego de roletes.

III.1 Método com o emprego de relógios comparadores

Neste método, a roda é posicionada manualmente no dispositivo de inspeção, como mostrado na Figura III.1, guiada pelo furo central (furo guia), apoiando a superfície de apoio na superfície do dispositivo, como mostrado esquematicamente na Figura III.2.



Figura III.1: Montagem manual da roda no dispositivo de inspeção

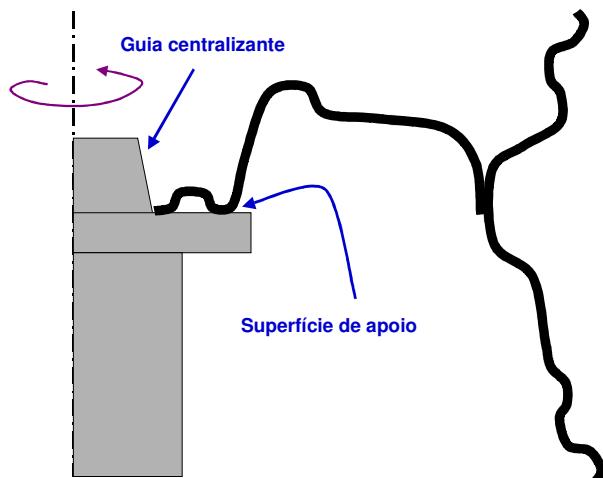


Figura III.2: Esquema do dispositivo de posicionamento da roda para inspeção de oscilação

Em seguida os relógios comparadores são colocados nas posições de medição. Estas posições são definidas pelo ponto de contato da esfera de 16 [mm], como apresentado no item II.2, ou seja, a 8 [mm] da aba, para medir a oscilação radial e a 8 [mm] da base do assento, para medir a oscilação axial, conforme mostrado na Figura III.3 e na Figura III.4 respectivamente.

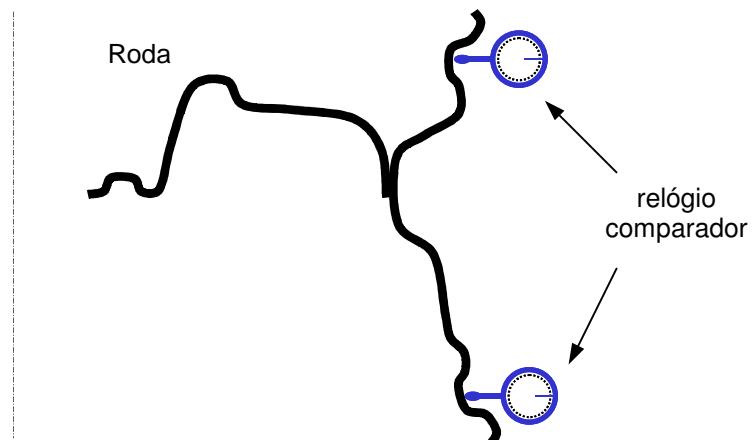


Figura III.3: Esquema para a medição da oscilação radial

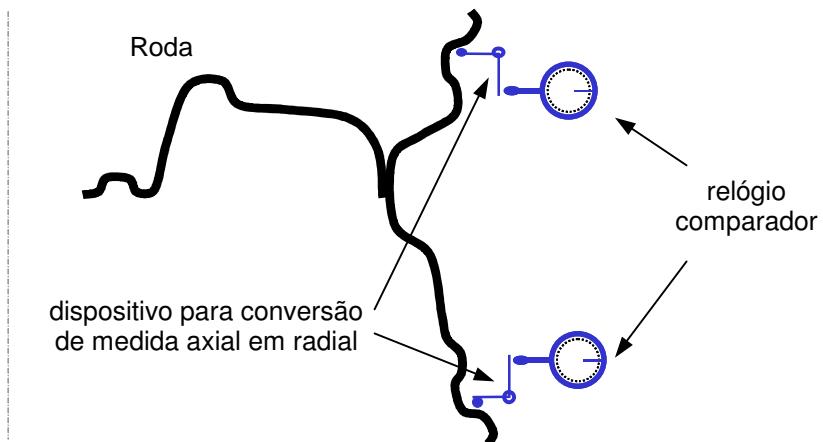


Figura III.4: Esquema para a medição da oscilação axial

Após o posicionamento dos relógios comparadores, a roda é rotacionada manualmente ao redor de seu eixo, como mostrado na Figura III.5, e é verificada a variação apresentada pelos relógios comparadores, e se a mesma está dentro da tolerância definida em projeto, cujo valor usual é apresentado na Tabela I-1.



Figura III.5: Movimentação manual da roda para a inspeção

Para a oscilação radial seria necessária a correção da leitura efetuada no relógio comparador, na fase de projeto da roda, a tolerância é aplicada na superfície do assento do aro e não na direção radial.

Desta forma, a medida a ser controlada será, conforme mostrado na Figura III.6:

$$d = l \cdot \cos(\beta) \quad (\text{III.1})$$

onde:

d – valor a ser controlado definido em projeto

l – valor medido com o uso de relógios comparadores (oscilação radial)

β – ângulo do assento do aro

No caso, tem-se que o ângulo do assento do aro é 5° , logo:

$$d = l \cdot \cos(5^\circ) = 0,99619 \cdot l \quad (\text{III.2})$$

Devido à pequena diferença entre o valor medido e a medida de controle, um fator de 0,99619, esta correção pode ser considerada desprezível quando é realizada a leitura durante o processo de produção.

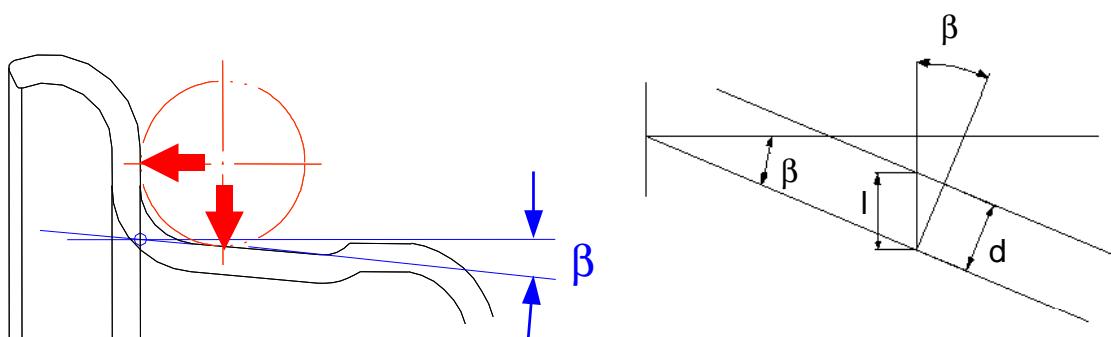


Figura III.6: Representação geométrica da correção da leitura da oscilação radial (run-out)

O método com o emprego de relógios comparadores apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

- Vantagens:
 - processo barato – requer apenas o emprego de relógios comparadores e uma base para fixar a roda e os relógios comparadores.
- Desvantagens:
 - a configuração é manual;
 - a alimentação e extração da roda é realizada manualmente, conforme apresentado na Figura III.1;
 - a qualidade dos resultados depende da habilidade do operador em trabalhar com o dispositivo, pois requer do mesmo a leitura dos ponteiros dos relógios comparadores que oscilam durante a inspeção;
 - dificuldade na leitura dos dados – é requerido do operário a leitura de até quatro relógios comparadores, como mostrado na Figura III.7;
 - é suscetível à fadiga do operador por trabalho repetitivo.

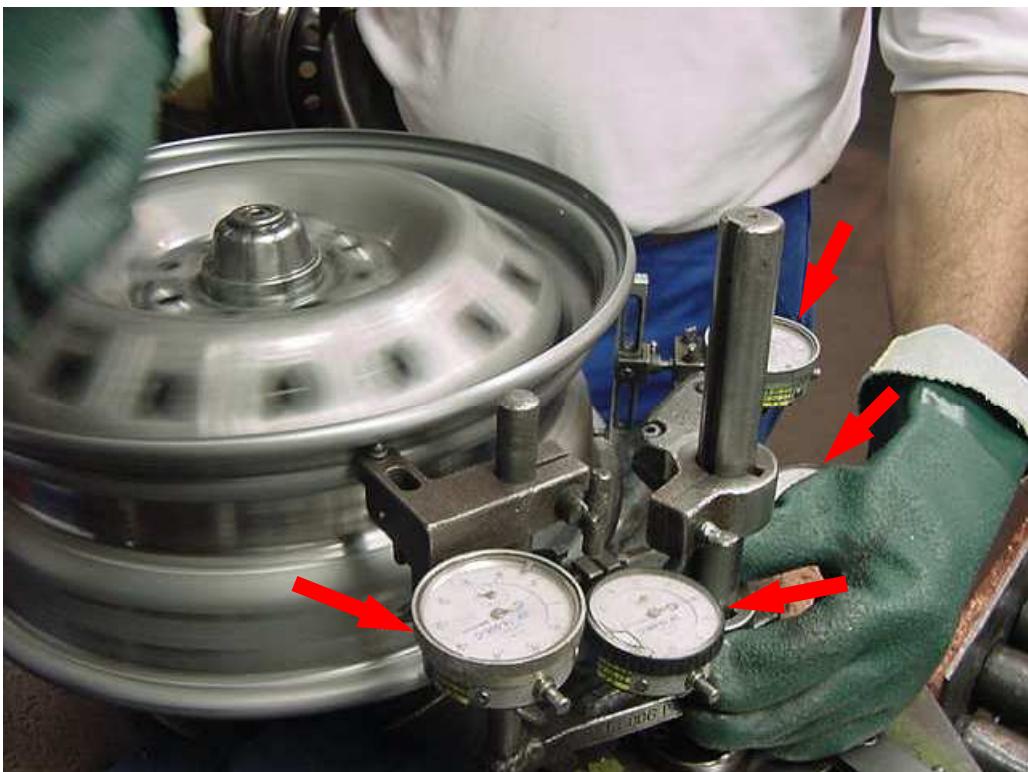


Figura III.7: Manuseio de até quatro relógios comparadores ao mesmo tempo

III.2 Método com o emprego de sensores LVDT

Este método é semelhante ao com o emprego de relógios comparadores.

A roda é posicionada manualmente no dispositivo de inspeção, como apresentado na Figura III.8.

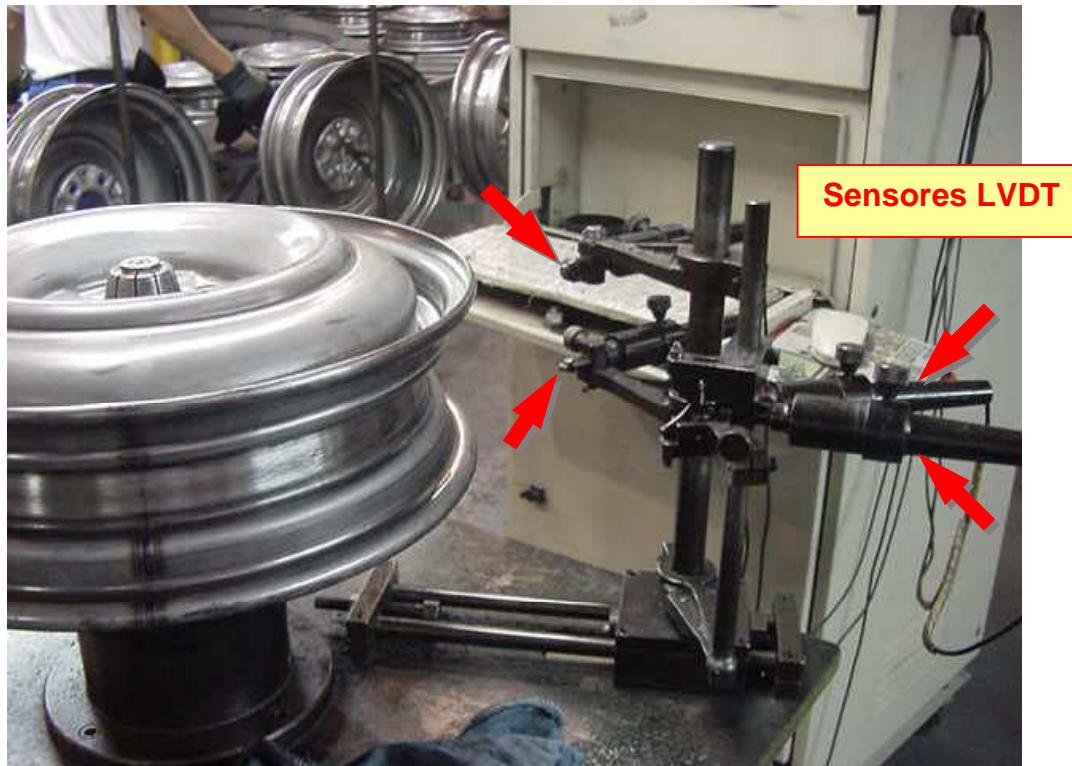


Figura III.8: Sistema com o emprego de LVDT

O dispositivo com os sensores LVDT são aproximados para que realizem a leitura da medida, como apresentado na Figura III.9 e na Figura III.10.

Em seguida, a roda é rotacionada com o auxílio de um motor e os dados são registrados por meio de um computador.

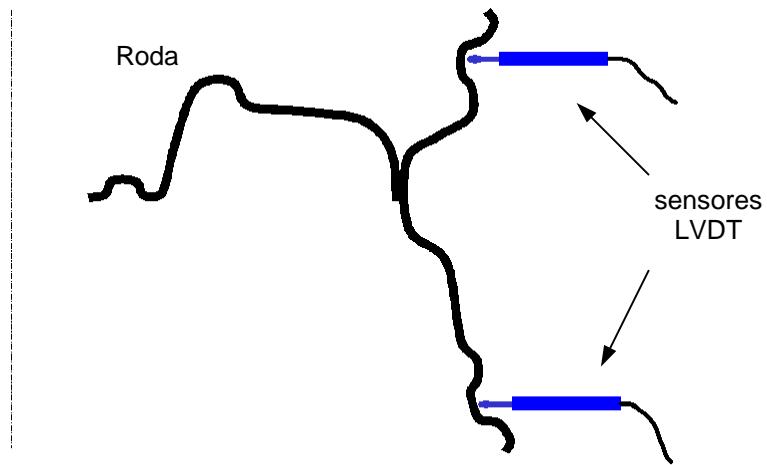


Figura III.9: Esquema para medir a oscilação radial utilizando-se sensores LVDT

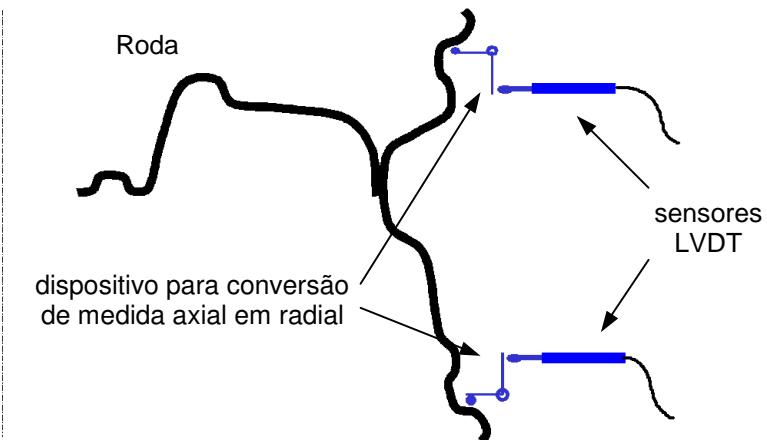


Figura III.10: Esquema para medir a oscilação axial utilizando-se sensores LVDT

O dispositivo avaliado que emprega sensores LVDT apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

- Vantagens:
 - a leitura e o registro dos dados são realizados eletronicamente;
- Desvantagens:
 - a alimentação e a extração de rodas são realizadas de forma manual;
 - o equipamento analisado, apresentado na Figura III.8, não foi desenvolvido com a concepção de produto mecatrônico, pois somente os relógios comparadores foram substituídos pelos sensores LVDT;
 - o sistema apresenta o processo de medição de oscilação lento, aproximadamente 1 minuto por roda, necessitando de um melhor projeto de implementação para que venha a apresentar melhores resultados.

III.3 Método com o emprego de roletes

Este método emprega roletes que representam a esfera de 16 [mm] em contato com a roda e deste modo mede simultaneamente a oscilação radial e axial, conforme apresentado na Figura III.11. O dispositivo real de medida é apresentado na Figura III.12.

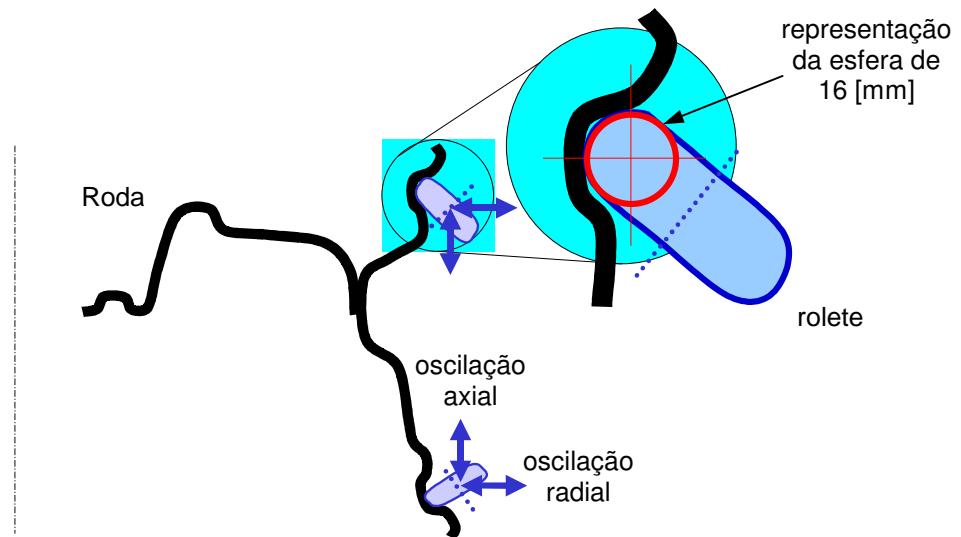


Figura III.11: Esquema para a medida de oscilação através do emprego de roletes

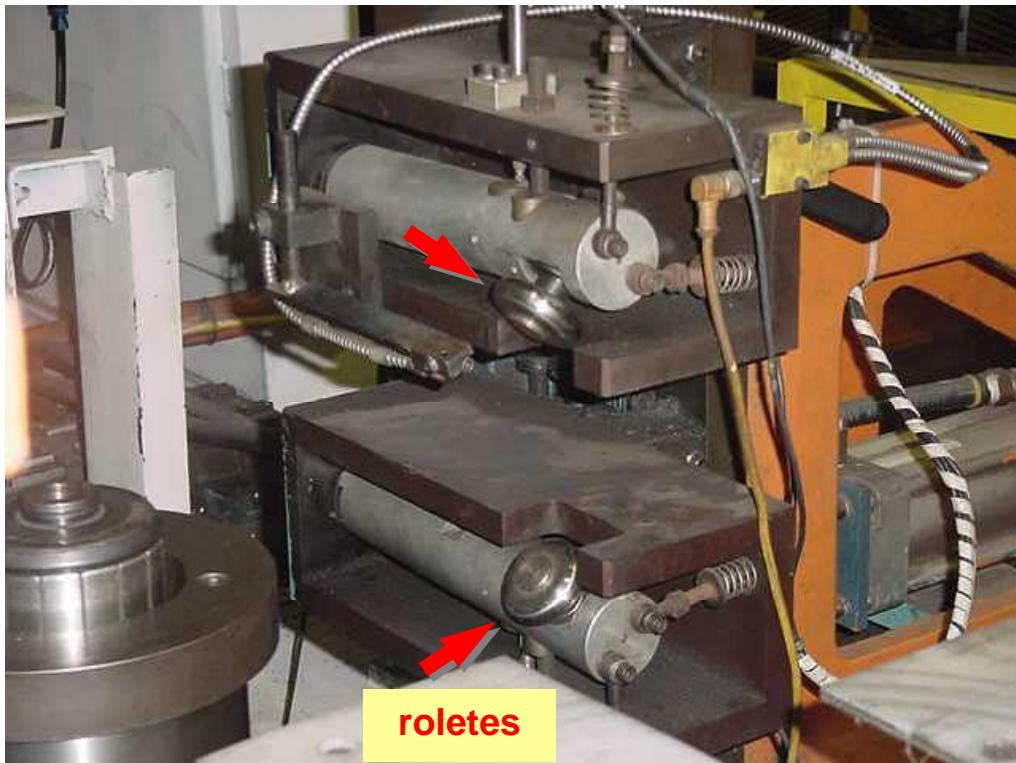


Figura III.12: Sistema com o emprego de roletes

O método com o emprego de roletes apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

- Vantagens:
 - o emprego do rolete permite que seja realizada a leitura simultânea da oscilação radial e axial;
 - a leitura e o registro de dados são realizados de forma eletrônica;
 - apresenta o registro da posição em que se realiza a medida da oscilação da roda, permitindo desta forma obter a uniformidade da roda, ou seja, a circularidade e a excentricidade.
- Desvantagens:
 - acumula sujeira no rolete prejudicando a leitura;
 - não aplicável para a medida de oscilação antes do processo de pintura.

Capítulo IV. Sistema de Visão

IV.1 Técnicas de Iluminação

A correta escolha e o controle do tipo de iluminação para uma dada situação, levam a redução de problemas futuros com o tratamento do resultado obtido, simplificando o processo de obtenção da informação requerida.

Dentre as técnicas de iluminação podem-se destacar:

- Iluminação frontal;
- Iluminação de fundo;
- Iluminação estruturada.

IV.1.1 Iluminação Frontal

A Iluminação frontal consiste na forma de iluminação aonde a fonte de luz se localiza à frente do objeto a ser visualizado. Neste tipo de iluminação, pode-se destacar:

- iluminação Omni-direcional;
- iluminação direcional.

IV.1.1.1 Iluminação Omni-directional

Esta é uma forma de iluminação uniforme que pode eliminar sombras de objetos apropriadamente posicionados e ajustados, como mostrado na Figura IV.1.

Esta forma de iluminação iluminará praticamente todos os aspectos do objeto, os quais poderiam normalmente aparecer como regiões escuras, segundo Awcock & Thomas (1995)..

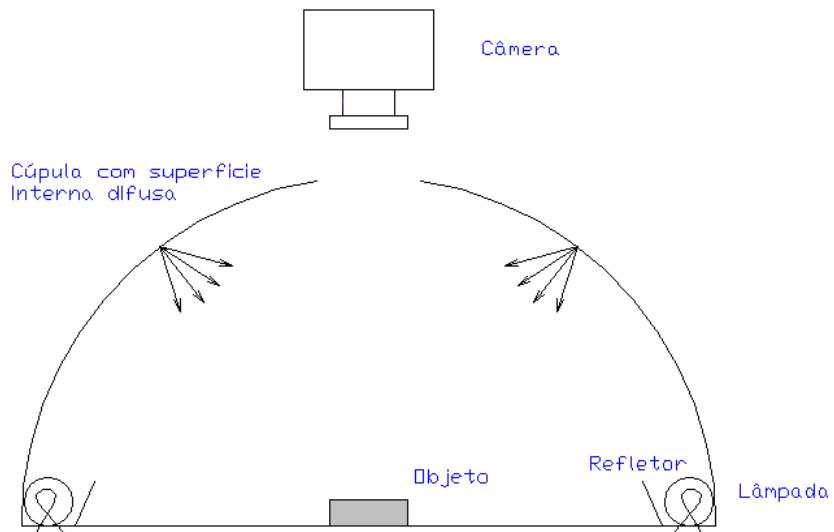


Figura IV.1: Esquema de Iluminação Omni-Direcional difusa

IV.1.1.2 Iluminação Direcional

Esta é uma variação da técnica de iluminação frontal, através da utilização de luz direcional para destacar superfícies com texturas, como mostrado na Figura IV.2.

Quando é dada a importância a detecção do número e área de furos, desprezando a sua profundidade, esta técnica de iluminação simplifica os subseqüentes processamentos de imagem, segundo Awcock & Thomas (1995).

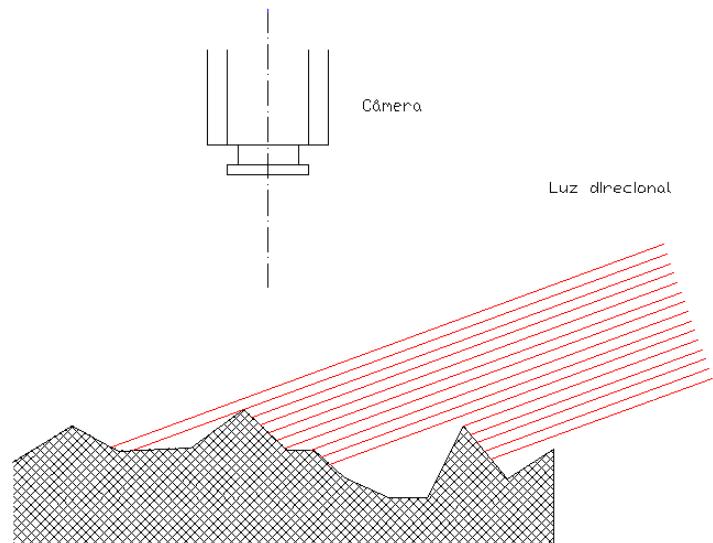


Figura IV.2: Esquema de Iluminação Direcional

IV.1.2 Iluminação de fundo

A Iluminação de fundo consiste na forma de iluminação aonde a fonte de luz se localiza atrás do objeto a ser visualizado. Neste tipo de iluminação, pode-se destacar:

- iluminação com um campo de luz;
- iluminação com campo escuro de iluminação.

IV.1.2.1 Iluminação com um campo de luz

Esta forma de iluminação é destinada a obtenção da silhueta de peças. Esta técnica pode ser empregada em aplicações de inspeção visual que envolve a forma de peças, onde está interessado na linha externa que define a forma da peça, segundo Awcock & Thomas (1995).

Esta técnica requer uma superfície de iluminação difusa, sendo que o objeto a ser inspecionado fique posicionado entre a superfície de iluminação e câmera, como mostrado na Figura IV.3.

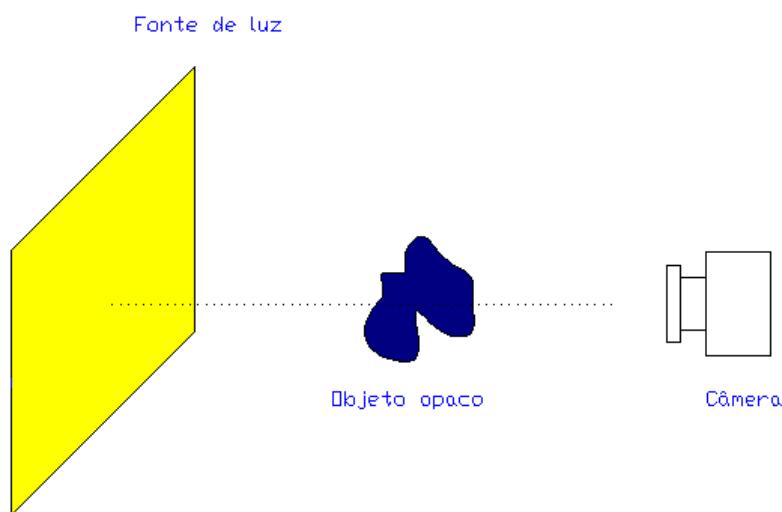


Figura IV.3: Esquema de Iluminação com um campo de luz

IV.1.2.2 Iluminação com campo escuro de iluminação

Esta forma de iluminação é empregada para se visualizar bordas de materiais transparentes ou translúcidos, segundo Awcock & Thomas (1995).

Esta técnica consiste em uma superfície de iluminação a qual a sua região central é desprovida de luz, de forma que não existam os raios de luz emergente atrás do objeto que incidam diretamente no mesmo, como mostrado na Figura IV.4. Para que a região central não emita luz, pode ser providenciada uma máscara para ser posicionada no local. Desta forma os raios de luz provenientes das bordas da superfície de iluminação serão refratados pelo material translúcido que compõe o objeto.

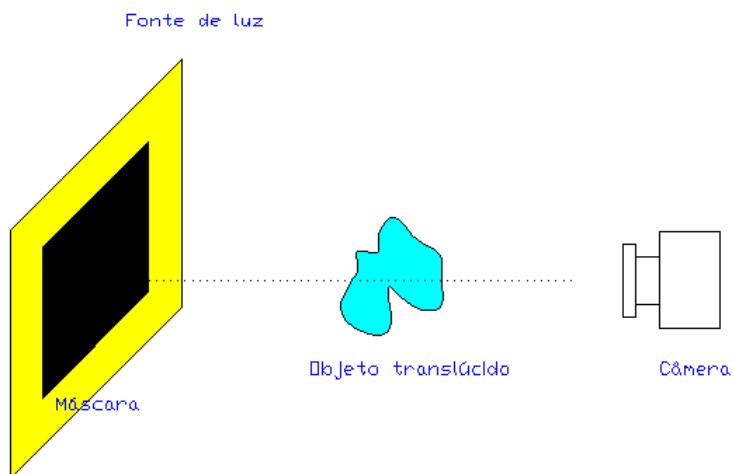


Figura IV.4: Esquema de Iluminação com campo escuro de luz

IV.1.3 Iluminação Estruturada

O uso de faixas de luz incidentes na superfície de formas tridimensionais, sob certas condições, pode revelar a forma e a orientação da superfície deste objeto.

Tal fato é possível de ser verificado através da distorção da faixa de luz ao incidir sobre a superfície do objeto, como mostrado na Figura IV.5.

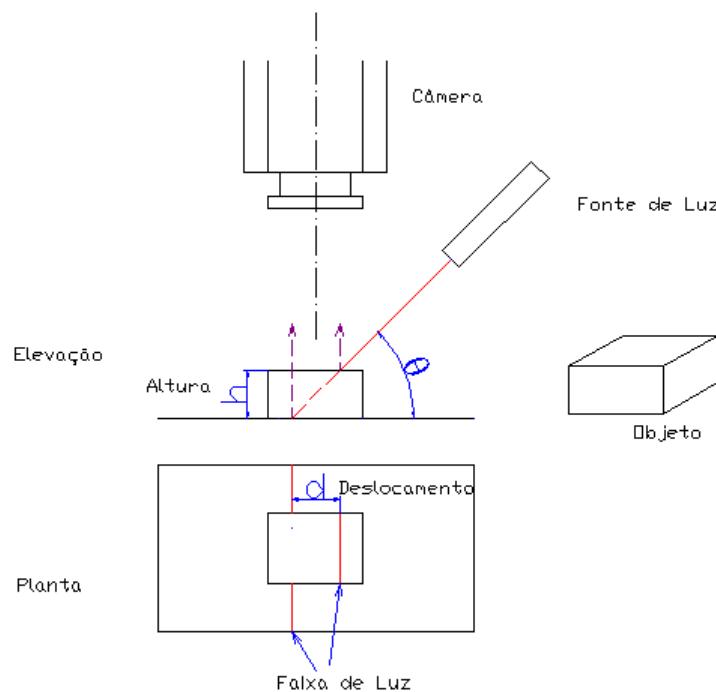


Figura IV.5: Esquema de Implementação de iluminação estruturada

IV.2 Processamento de Imagens

IV.2.1 Detecção de Bordas

Uma borda é o limite entre duas regiões com propriedades relativamente distintas de nível de cinza, Gonzalez & Woods (2000). Desta forma assumindo que as regiões são suficientemente homogêneas de forma que seja possível determinar a transição entre as duas regiões apenas pela descontinuidade dos níveis de cinza, a maioria das técnicas para a detecção de bordas se baseia na computação de um operador local.

A representação deste conceito é apresentada na Figura IV.6, aonde são mostradas as imagens, (a) uma faixa clara sobre um fundo escuro e (b) uma faixa escura sobre um fundo claro. Em seguida é mostrada como é a variação da intensidade de cinza ao longo de uma linha horizontal, para as duas imagens. Também é apresentada a primeira derivada do perfil de níveis de cinza, o que mostra que a mesma pode ser utilizada na detecção de bordas enquanto que a segunda derivada pode ser utilizada para determinar se o pixel da borda localiza-se no lado claro ou escuro da imagem.

A primeira derivada pode ser obtida através do operador gradiente enquanto que a segunda pode ser obtida através do operador laplaciano.

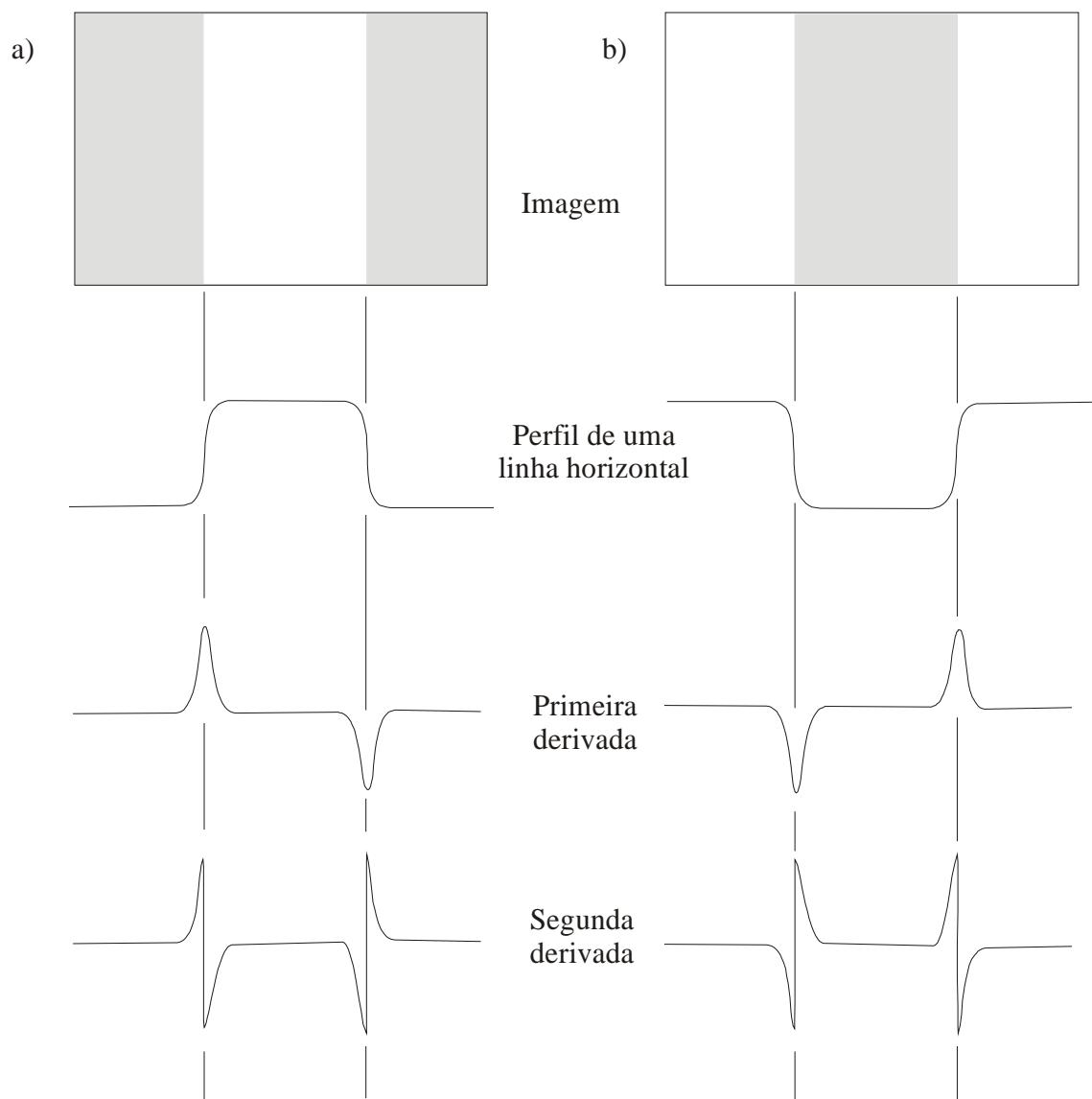


Figura IV.6: Detecção de bordas por operadores de derivação [4]: (a) faixa clara sobre fundo escuro; (b) faixa escura sobre um fundo claro.

IV.2.1.1 Operador de gradiente

O operador gradiente indica a direção de maior variação positiva da intensidade, independente da orientação do sistema de coordenadas adotado.

O gradiente de uma imagem $f(x,y)$ na posição (x,y) é dado por:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (IV.1)$$

onde:

G_x - gradiente na direção x

G_y - gradiente na direção y

A magnitude do gradiente é dada por:

$$\nabla f = mag(\nabla f) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (IV.2)$$

A direção do gradiente é dada por:

$$\alpha(x, y) = arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (IV.3)$$

Versões discretas do gradiente:

$$G_x = [1 \ 0 \ -1] \quad (IV.4)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

O operador gradiente na formulação apresentada acima aumenta o ruído, no entanto, os operadores de Sobel reduzem esse efeito, segundo Gonzalez & Woods (2000).

IV.2.1.2 Sobel

O operador Sobel implementa, de maneira digital, os efeitos de diferenciação e de suavização, reduzindo assim os efeitos do ruído, segundo Gonzalez & Woods (2000).

\mathcal{Z}_1	\mathcal{Z}_2	\mathcal{Z}_3
\mathcal{Z}_4	\mathcal{Z}_5	\mathcal{Z}_6
\mathcal{Z}_7	\mathcal{Z}_8	\mathcal{Z}_9

Figura IV.7: Região de uma imagem de tamanho 3x3

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Figura IV.8: Máscara Sobel utilizada para computar o valor do gradiente em y, G_y , no ponto central da região 3x3

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Figura IV.9: Máscara Sobel utilizada para computar o valor do gradiente em x, G_x , no ponto central da região 3x3

Ao convoluir as máscaras apresentadas nas Figura IV.8 e Figura IV.9 com a região da imagem apresentada na Figura IV.7, tem-se, para o pixel central, a expressão do operador de Sobel dada por:

$$G_x = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (IV.6)$$

$$G_y = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (IV.7)$$

onde os z são as intensidades de cinza em suas respectivas posições, como mostrado na Figura IV.7.

O valor do próximo ponto é obtido deslocando-se a máscara para a posição do próximo pixel e então é computado o gradiente. O procedimento é realizado até que se tenha percorrido toda a imagem.

A magnitude do gradiente é obtida pela Equação (IV.2).

IV.2.1.3 Laplaciano

O Laplaciano é uma derivada de segunda ordem, que quando aplicado a uma função bidimensional $f(x,y)$ apresenta a seguinte forma:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (IV.8)$$

Para o caso de uma região 3x3, a forma mais freqüentemente encontrada na prática é:

$$\nabla^2 f = 4z_5 - (z_2 + z_4 + z_6 + z_8) \quad (IV.9)$$

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Figura IV.10: Máscara para computar o Laplaciano

O Laplaciano é raramente utilizado para a detecção de bordas, pelo fato de ser sensível ao ruído e por produzir bordas duplas, como mostrado na Figura IV.6.. Desta forma o uso do Laplaciano se restringe basicamente a localização da borda.

IV.2.1.4 Marr e Hildreth

A teoria de Marr-Hildreth prevê um pré-processamento visando uma suavização do ruído, através da convolução da imagem com um filtro Gaussiano.

O procedimento pode ser descrito como:

1. Convoluir a imagem I com uma função gaussiana bidimensional;
2. Aplicar o Laplaciano na imagem convoluida, obtendo-se, assim, L;
3. As localizações das bordas serão aquelas que apresentarem cruzamentos por zero em L.

A convolução bidimensional pode ser expressa por:

$$I * G(i, j) = \sum_n \sum_m I(n, m) G(i - n, j - m) \quad (IV.10)$$

onde G é uma função Gaussiana bidimensional dada pela forma:

$$G_\sigma(x, y) = \sigma^2 e^{-\frac{(x^2+y^2)}{\sigma^2}} \quad (IV.11)$$

Depois da convolução da imagem o operador Laplaciano pode ser aplicado. No entanto, neste caso a ordem não afeta o resultado, podendo-se calcular o Laplaciano da Gaussiana analiticamente e depois convoluí-lo com a imagem, segundo Parker (1996).

O Laplaciano da Gaussiana é dado por:

$$\nabla^2 G_\sigma = \left(\frac{r^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) e^{\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (IV.12)$$

onde:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (IV.13)$$

IV.2.1.5 Detector de bordas de Canny

John Canny (1986) definiu objetivos para um detector e características de um bom detector de bordas:

1. Boa detecção. O detector deve identificar somente bordas, todas elas, e nenhuma delas podem ser omitidas;
2. Boa Localização. A distância entre os pixels da borda encontrada devem estar o mais próximo do centro da borda real;
3. Uma única resposta para uma única borda. O detector não deve identificar múltiplas bordas aonde na verdade existe apenas uma.

Canny tenta encontrar um filtro que maximize o produto da fração sinal-ruído e localização submetido a restrições de múltiplas respostas, e enquanto o resultado é muito complexo para ser obtido analiticamente, uma eficiente aproximação revela-se ser a primeira derivada da função gaussiana, segundo Parker (1996).

Lembrando que a gaussiana tem a forma:

$$G(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (IV.14)$$

A derivada em x é desta forma:

$$G'(x) = \left(-\frac{x}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (IV.15)$$

Em duas dimensões, a gaussiana é dada por:

$$G(x, y) = \sigma^2 e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (IV.16)$$

e G derivada em ambas as direções x e y. A aproximação do filtro ótimo de Canny para detectar bordas é G'.

O algoritmo de Canny para a detecção de borda, segundo Parker (1996), consiste de:

1. Ler a imagem I a ser processada;
2. Criar a máscara 1D gaussiana G para convoluir com I. O desvio padrão s desta gaussiana é parâmetro do detector de bordas;
3. Criar uma máscara 1D da primeira derivada da gaussiana nas direções x e y (horizontal e vertical), respectivamente G_x e G_y. É utilizado o mesmo valor de s do passo 2 acima;
4. Convoluir a Imagem I com G ao longo das linhas para se obter I_x, a componente x da imagem, e ao longo das colunas para obter I_y, a componente y da imagem;
5. Convoluir I_x com G_x para obter I_{x'}, a componente de I convoluída com a primeira derivada da gaussiana, e convoluir I_y com G_y para se obter I_{y'};
6. Para se ver o resultado deste ponto as componentes x e y devem ser combinadas. A magnitude do resultado em cada pixel (x,y) é computado como:

$$M(x, y) = \sqrt{I'_x(x, y)^2 + I'_y(x, y)^2} \quad (IV.17)$$

IV.2.2 Transformada de Hough

Neste tópico é dada a atenção aos pontos da imagem, buscando verificar se determinados pontos pertencem a alguma determinada curva.

IV.2.2.1 Transformada de Hough para determinar retas

A transformada de Hough para determinar retas, segundo Duda & Hart (1972), baseia-se em parametrizá-las conforme a Figura IV.11, em função de θ , o ângulo que a normal à reta forma com a origem, e ρ , a distância da reta à origem:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (IV.18)$$

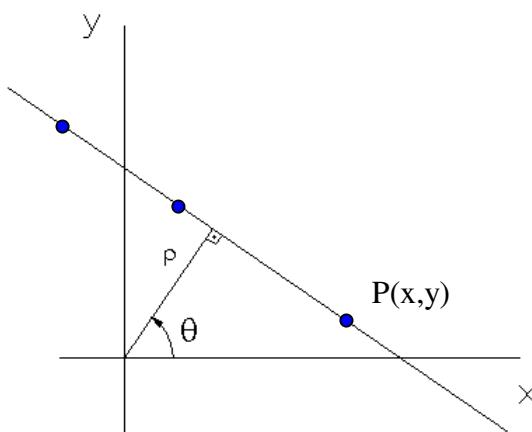


Figura IV.11: Parametrização de retas

Para se determinar qual reta é definida por determinados pontos da imagem, são empregados os acumuladores, mostrado na Figura IV.12, onde $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$ e $(\rho_{\min}, \rho_{\max})$ são os domínios dos valores da inclinação e da distância da reta à origem, respectivamente.

Inicia-se o acumulador com zeros. Então para cada ponto (x, y) no plano da imagem, varia-se o parâmetro θ de θ_{\min} à θ_{\max} calculando-se o valor de ρ correspondente utilizando-se a Equação (IV.18). Os valores ρ obtidos são arredondados para o valor mais próximo

permitido de ρ no intervalo $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$. Para cada par (θ, ρ) obtido é incrementado de um valor da célula correspondente no acumulador.

Ao final deste procedimento o número obtido em cada célula corresponde ao número de pontos no plano xy que se localizam na reta dada pela equação (IV.18).

ρ	θ	θ_{\min}		0°		θ_{\max}
ρ_{\min}						
0						
				(θ, ρ)		
ρ_{\max}						

célula correspondente à reta (θ, ρ) que será incrementada a cada ocorrência.

Figura IV.12: Acumulador para computar a retas

IV.2.2.1.1 Informação direcional

O uso simples da transformada de Hough demanda o processamento exaustivo para cada ponto da imagem, visto que, para se definir as retas pelas maiores ocorrências do par (θ, ρ) , é requerido o cálculo da Equação (IV.18) variando-se o parâmetro θ de θ_{\min} à θ_{\max} para se obter o valor de ρ correspondente.

No entanto, quando se trata de pontos de borda na imagem, é necessário, para se obter os mesmos, o cálculo do gradiente da intensidade do nível de cinza na direção x e y da imagem, e desta forma é determinada a direção da borda, dada então por:

$$\alpha(x, y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (IV.19)$$

onde:

$\alpha(x, y)$ - ângulo da reta normal a linha da borda

G_x - gradiente da intensidade de cinza na direção x da imagem

G_y - gradiente da intensidade de cinza na direção y da imagem

Desta forma, cada ponto (x, y) da borda pode pertencer a apenas uma única reta (θ, ρ) , onde θ é a direção da borda especificada pela Equação (IV.19), e ρ é calculada pela Equação (IV.18).

IV.2.2.2 Transformada de Hough para determinar curvas

Analogamente ao apresentado a uma reta, pode-se especificar equações para diferentes formas analíticas, conforme Ballard (1981), como apresentado na Tabela IV-1.

Tabela IV-1: Curvas analíticas

Forma analítica	Parâmetros	Equação
Reta	ρ, θ	$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$
Circunferência	x_0, y_0, ρ	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \rho^2$
Parábola	x_0, y_0, ρ_x, θ	$(y - y_0)^2 = 4\rho_x(x - x_0)$
Elipse	$x_0, y_0, \rho_x, \rho_y, \theta$	$\frac{(y - y_0)^2}{\rho_y^2} + \frac{(x - x_0)^2}{\rho_x^2} = 1$

Para determinar se determinados pontos da imagem pertencem a uma determinada curva, é realizado um processo semelhante ao apresentado para a reta. Varia-se, para cada ponto da imagem, o valor de $n-1$ parâmetros da curva e obtém-se o valor do parâmetro restante, onde n é o número total de parâmetros da curva. Para cada ocorrência de um grupo de valores dos parâmetros, é incrementada a sua ocorrência no acumulador. A maior

ocorrência de um grupo de valores dos parâmetros indica a curva a qual os pontos possam pertencer.

IV.2.2.2.1 Informação Direcional

Da mesma forma que para a reta, o uso simples da transformada de Hough, para diferentes curvas, requer o processamento exaustivo para testar diferentes valores dos parâmetros da curva para cada ponto da imagem.

Novamente, ao se tratar de pontos de bordas, o processamento pode ser reduzido. Um exemplo de cálculo considerando a direção da borda é apresentado abaixo para o caso de uma circunferência, semelhante ao apresentado por Ballard (1981), o qual pode ser aplicado a outras curvas.

Para uma circunferência tem-se a equação:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \rho^2 \quad (IV.20)$$

fazendo $X = (x - x_0)$ e $Y = (y - y_0)$, tem-se:

$$X^2 + Y^2 = \rho^2 \quad (IV.21)$$

derivando-se em função de X, tem-se:

$$2X + 2Y \frac{\partial Y}{\partial X} = 0 \quad (IV.22)$$

mas $\frac{\partial Y}{\partial X}$ é uma informação conhecida do ponto da borda. Fazendo $\frac{\partial Y}{\partial X} = \xi$, tem-se da

Equação (IV.22):

$$X^2 = Y^2 \xi \quad (IV.23)$$

substituindo na Equação (IV.21):

$$Y^2 \xi + Y^2 = \rho^2 \quad (IV.24)$$

logo:

$$Y = \pm \frac{\rho}{\sqrt{\xi^2 + 1}} \quad (IV.25)$$

e então:

$$X = \pm \rho \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + 1}} \quad (IV.26)$$

dados x , y , ρ e $\frac{\partial Y}{\partial X}$, pode-se determinar x_0 e y_0 como:

$$x_0 = x \pm \rho \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + 1}} \quad (IV.27)$$

$$y_0 = y \pm \frac{\rho}{\sqrt{\xi^2 + 1}} \quad (IV.28)$$

Capítulo V. Implementação do sistema mecatrônico proposto

O sistema mecatrônico proposto é composto por duas partes principais: (i) a estação de medição de run-out que utiliza recursos de visão computacional e (ii) a estação de carregamento e descarregamento das rodas da estação de medição.

A implementação da estação de medição assistida por visão computacional requer o emprego de técnicas de iluminação e rotinas de detecção de bordas que foram revistas resumidamente no Capítulo IV.

Para a roda em estudo, as restrições de oscilação são apresentadas na Tabela V-1.

Tabela V-1: Tolerâncias dos desvios da roda

	valores máximos permitidos [mm]
Média do desvio Radial	0.50
Média do desvio Lateral	0.80
Desvio Radial Individual	0.80
Desvio Lateral Individual	0.80

V.1 Equipamentos empregados

Os equipamentos empregados são:

- Microcomputador Pentium III 650 MHz;
- Placa digitalizadora DT-3120 da DataTranslation;
- Câmera KP-M1, preto e branco, da Hitachi;
- Lentes: distância focal de 16 e 25 mm.

V.2 Programas empregados

Os programas computacionais empregados são:

- DT-Acquire 3.2.0;
- Matlab.
- ADAMS

V.3 Sistema de alimentação e extração de rodas

Para o projeto proposto foi estudado o sistema de alimentação e extração, através da modelagem e análise com o emprego do aplicativo ADAMS. O sistema é fundamental para manter a cadência de produção, sem prejuízo pela inserção de um processo de medição.

O sistema de alimentação e extração, mostrado na Figura V.1, se baseia em uma mesa de transferência universal, para atender diferentes diâmetros de rodas, que realiza a função de retirar a roda da esteira rolante da linha de produção e então alimentar e remover a roda da estação de medição. O funcionamento é baseado na elevação da roda para efetuar a transferência de postos da roda.

Para auxiliar no fluxo de linha de produção, o sistema é provido de uma garra para colocar a roda, quando aprovada, diretamente na linha de transporte de rodas que se baseia “ganchos”, aonde as rodas vão penduradas. Este meio de transporte de rodas é comumente conhecida como gancheira.

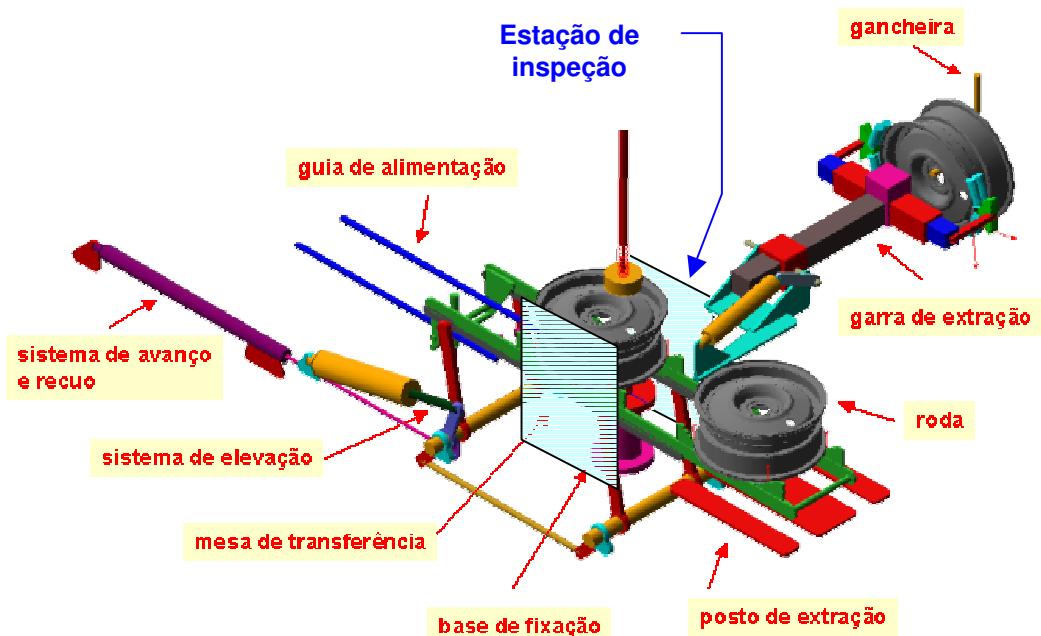


Figura V.1: Sistema de alimentação e extração de rodas

É apresentada, na Figura V.2, a seqüência de movimentação do sistema de alimentação da roda. As figuras (a), (b) e (c) mostram a elevação da mesa de transferência em conjunto com a roda a ser medida e a roda medida, e mostram o avanço da garra de extração para capturar a roda já medida. As figuras (d) e (e) mostram o recolhimento e a rotação da garra com a roda medida. As figuras (f), (g), (h) e (i) mostram o avanço da mesa de transferência para posicionar a roda a ser medida e extrair a roda medida, e mostram a colocação da outra roda medida na “gancheira”. As figuras (j), (k), (l), (m) e (n) mostram a descida da mesa de transferência para o posicionamento da roda a ser medida na base se fixação (estaçao de medição) e a roda medida é posicionada no posto de extração, e mostram o reposicionamento da garra de extração. Após o posicionamento da roda na estação de medição, a mesa de transferência recua para a sua posição inicial e é iniciada a medição.

É apresentada a seguir uma descrição detalhada de cada uma das partes constituintes do dispositivo de alimentação e extração.

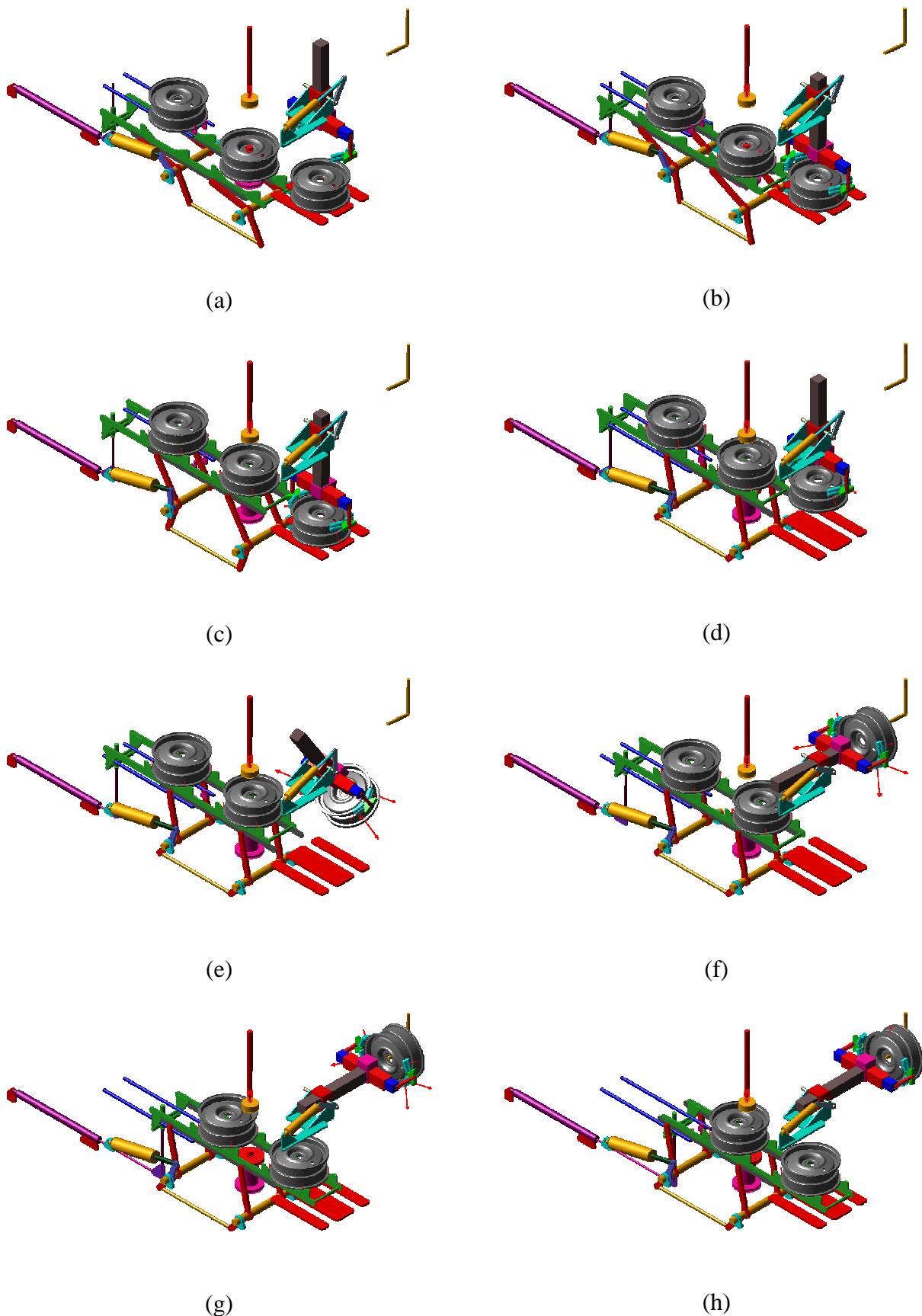
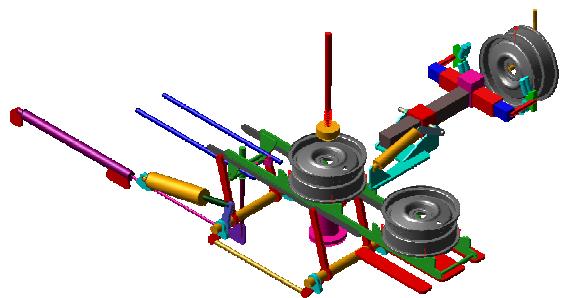
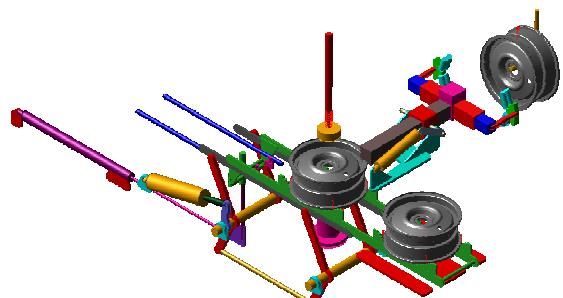


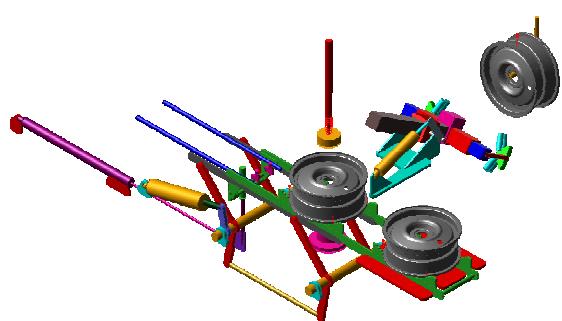
Figura V.2: Seqüência de movimentação do sistema de alimentação e extração de rodas



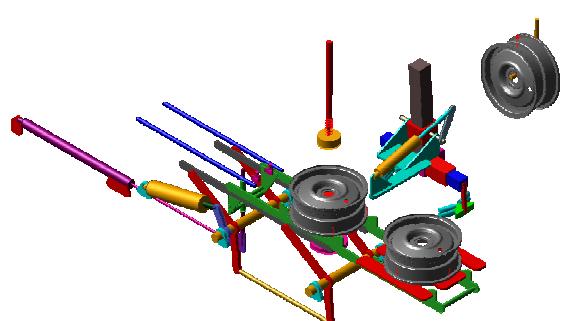
(i)



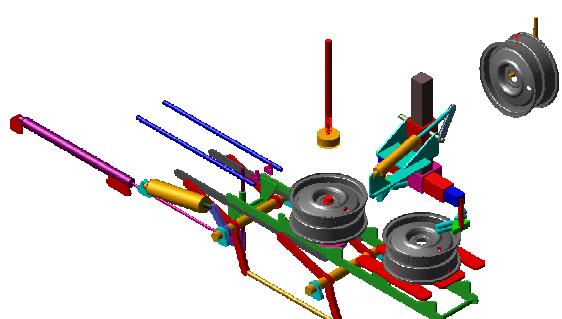
(j)



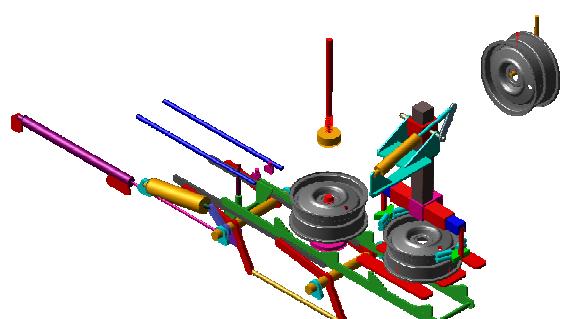
(k)



(l)



(m)



(n)

Figura V.2: (continuação)

V.3.1 Guia de alimentação

A alimentação de rodas ao sistema de medição de oscilação será proveniente de esteira rolante, no entanto, para simplificar o modelo é representado por duas barras por onde a roda deslizará pela ação da gravidade, como mostrado na Figura V.3.

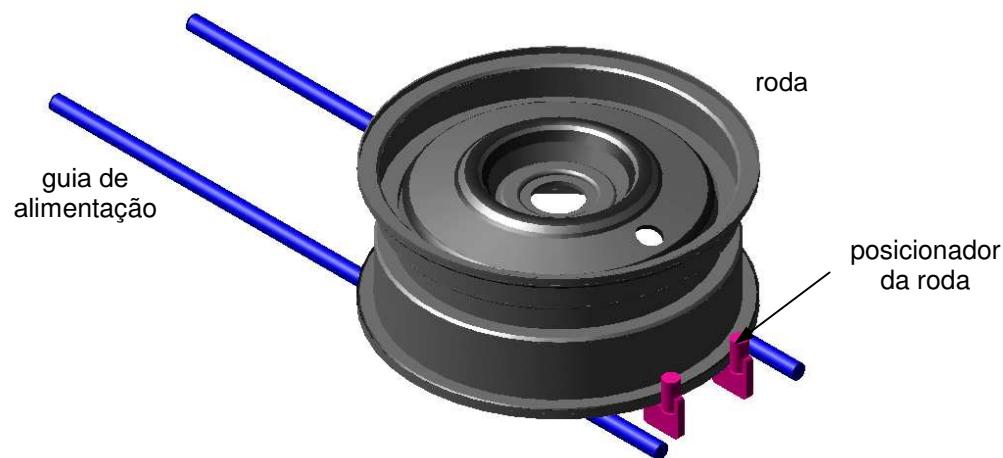


Figura V.3: Guia de alimentação (dimensões em milímetros)

V.3.2 Posicionamento inicial da roda

Para que o sistema funcione adequadamente é requerido o correto posicionamento inicial da roda. Para isso foi desenvolvido um dispositivo, apresentado na Figura V.4 e na Figura V.5, que centraliza rodas de diferentes diâmetros.

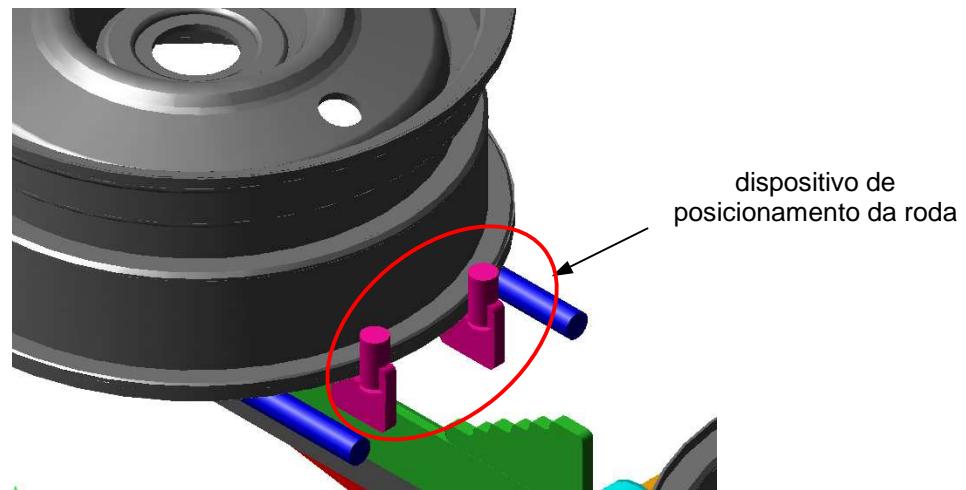


Figura V.4: Dispositivo para o posicionamento da roda

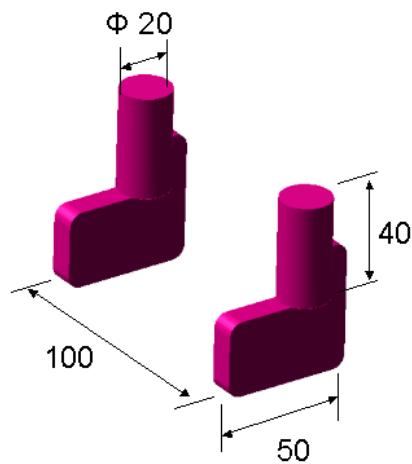


Figura V.5: Detalhe do dispositivo para o posicionamento da roda (dimensões em milímetros)

A posição do dispositivo centralizador em relação à posição desejada do centro da roda é dada, conforme a Figura V.6, por:

$$D = \sqrt{(R+r)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (V.1)$$

onde:

D – distância do centro da roda ao centro dos cilindros do dispositivo

R – raio externo da roda

r – raio do cilindro do dispositivo

d – distância entre o centro dos cilindros do dispositivo

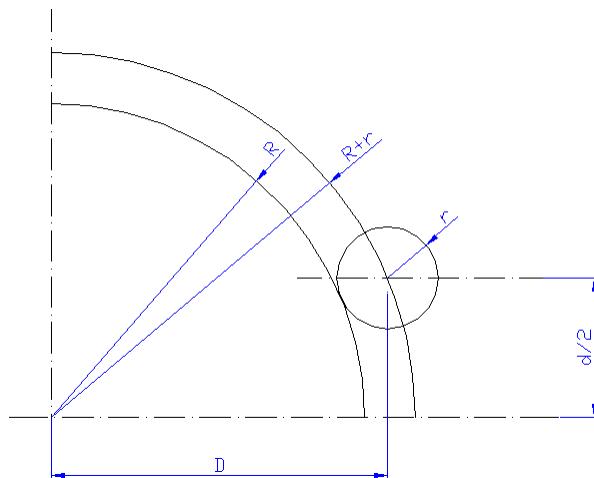


Figura V.6: Representação para o posicionamento do dispositivo

O raio externo da roda é calculado por:

$$R = \frac{D_{roda}}{2} + H_{aba} \quad (V.2)$$

onde:

D_{roda} – diâmetro nominal da roda

H_{aba} – altura da aba da roda

Portanto para rodas de 13", 14", 15", 16" e 17", considerando-se a altura da aba de 23 [mm], tem-se que a posição do dispositivo será dada por 192, 205, 218, 231 e 244 [mm] respectivamente, como apresentado na Figura V.7.

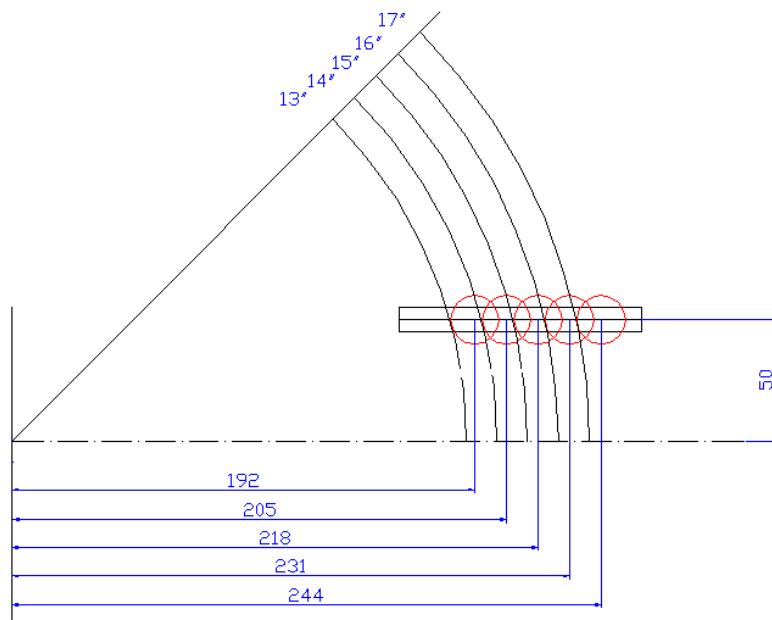


Figura V.7: Posição do dispositivo para rodas de 13", 14", 15", 16" e 17"

V.3.3 Mesa de Transferência

Para a transferência da roda da linha de alimentação e extração de rodas para o sistema de medição, foi desenvolvida uma mesa de transferência que permite o processamento de rodas de diferentes diâmetros.

A mesa, mostrada na Figura V.8, permite trabalhar com rodas de diferentes diâmetros sem a necessidade de reconfiguração, devido aos degraus projetados para o dispositivo, aonde cada degrau é calculado para cada diâmetro de roda que venha a se trabalhar. A Figura V.9 apresenta uma roda de 15" acomodada nos degraus da mesa de transferência.

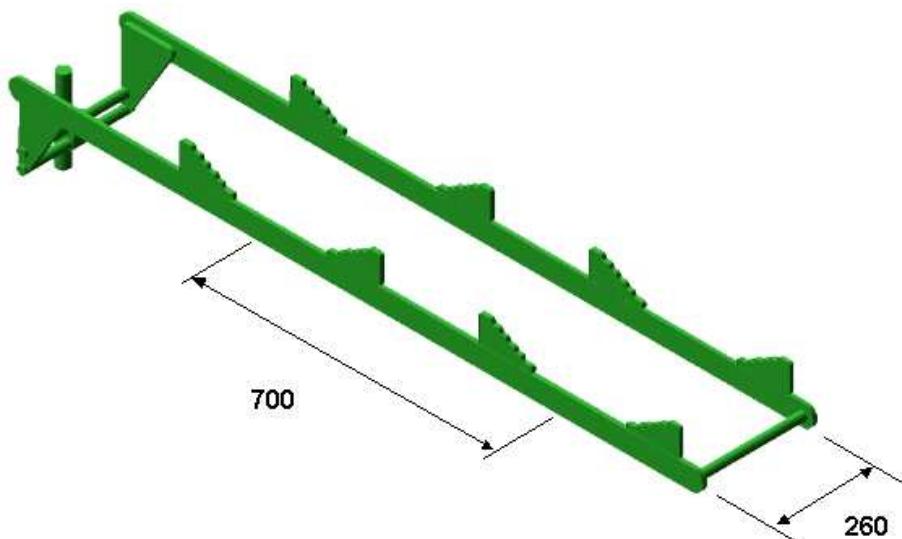


Figura V.8: Mesa de Transferência (dimensões em milímetros)

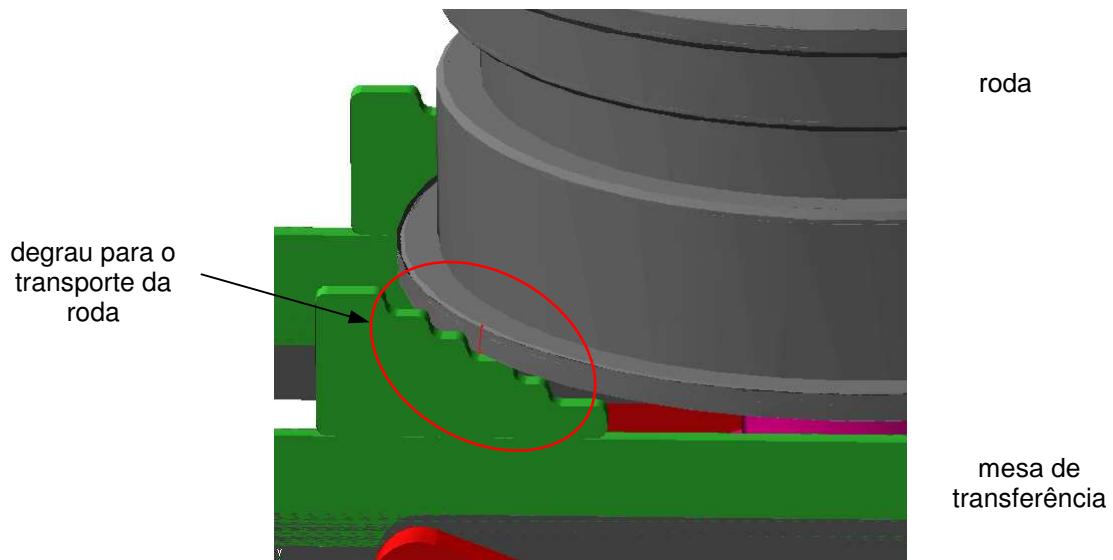


Figura V.9: Acomodação de uma roda de 15" na mesa de transferência

Cada degrau é projetado em função do diâmetro da roda que irá transportar. Os degraus são traçados em função da distância entre as mesmas e o diâmetro externo da roda a qual se deseja trabalhar, como mostrado na Figura V.10

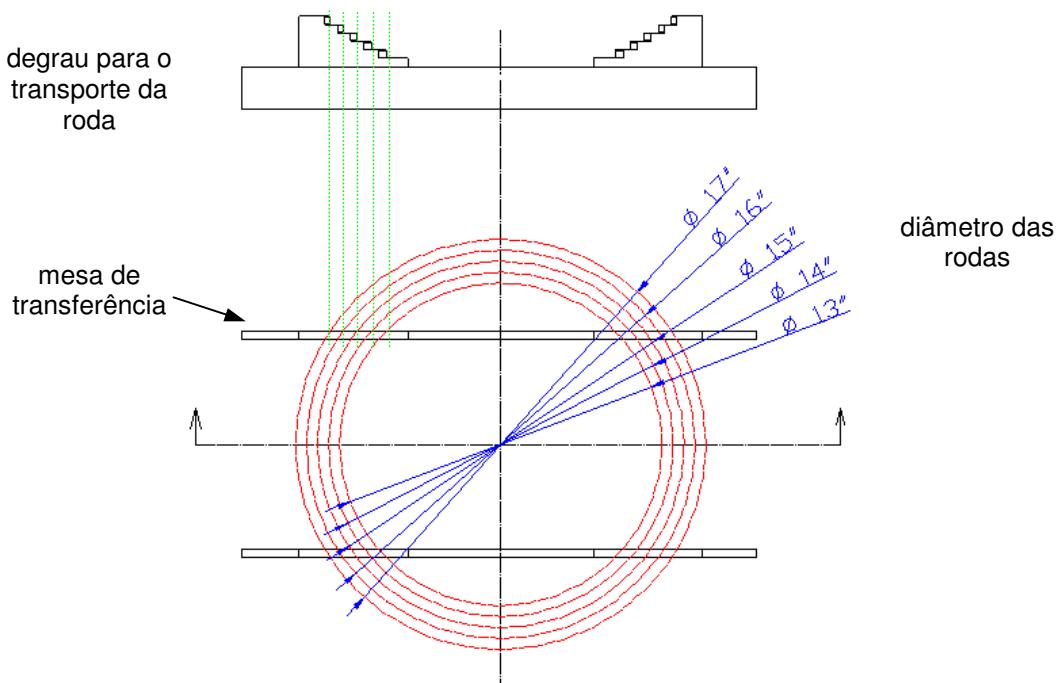


Figura V.10: Esquema para projeto dos degraus da mesa de transferência

V.3.4 Sistema de Elevação

Para que a roda possa ser transferida da guia de alimentação para o posto de medição e do posto de medição para o posto de extração, é requerido que a roda seja elevada. O sistema de elevação é apresentado na Figura V.11, cujos detalhes são apresentados na Figura V.12.

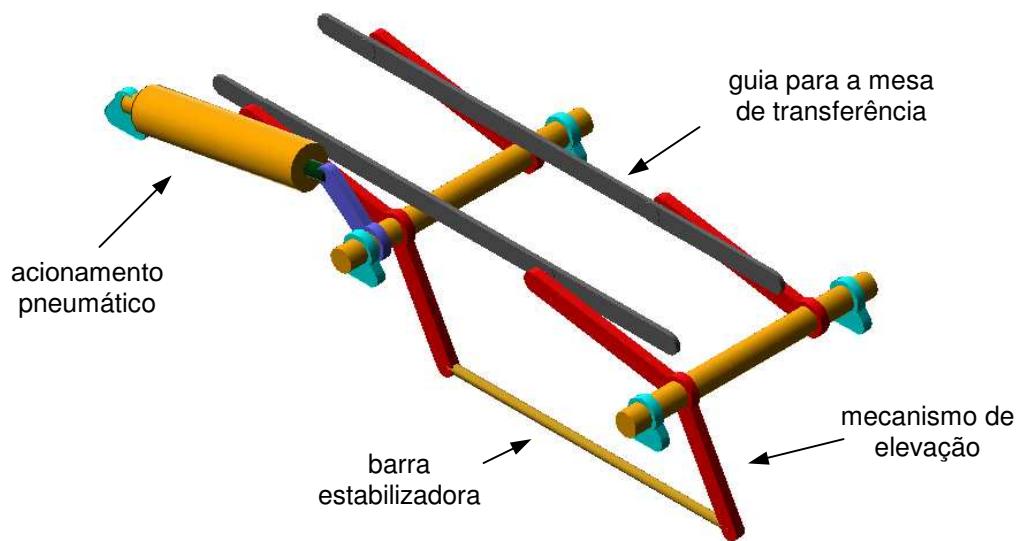


Figura V.11: Sistema de elevação de rodas

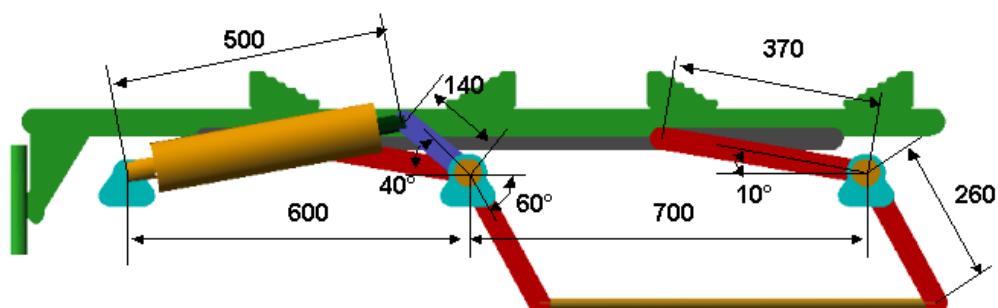


Figura V.12: Detalhe geométrico do sistema de elevação

O sistema de elevação permite que a mesa seja elevada a uma altura de até 300 [mm] para o curso do cilindro de 160 [mm], como mostrado na Figura V.13. A altura de 300 [mm] para o sistema apresentado permite trabalhar com rodas de diferentes diâmetros e rodas com distância de até 170 [mm] do assento da roda à aba interna da roda, Figura V.14.

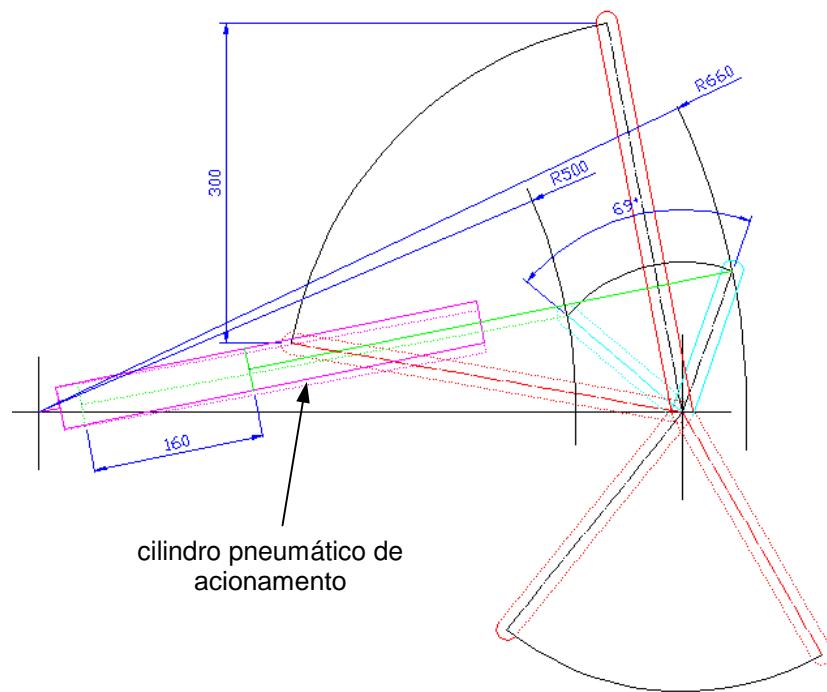


Figura V.13: Detalhe do sistema de elevação (dimensões em milímetros)

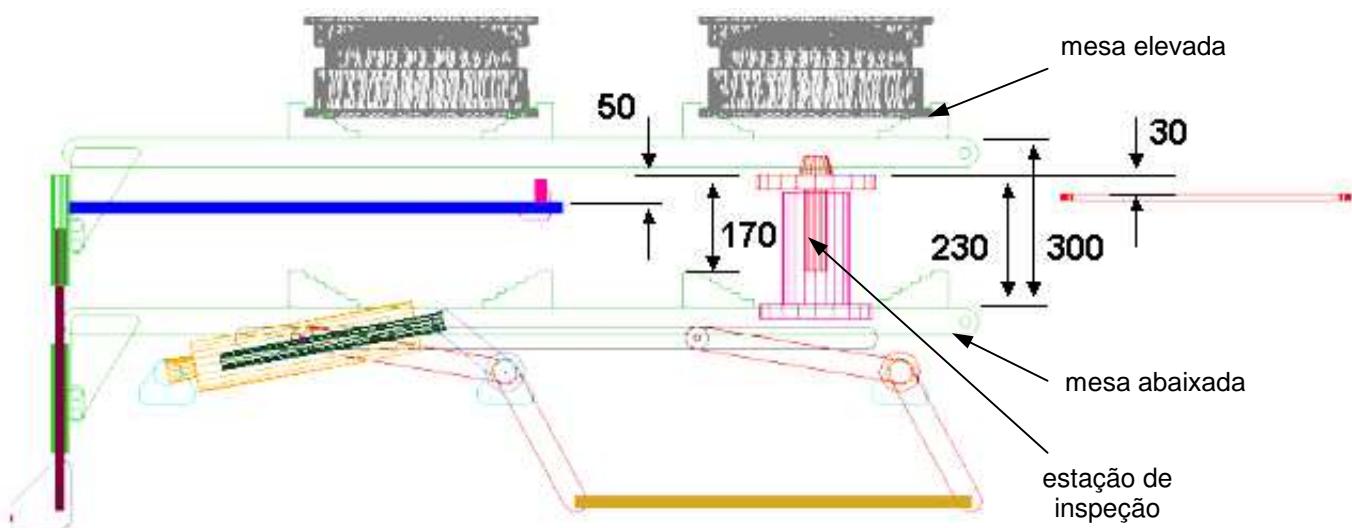


Figura V.14: Mesa de transferência elevada e abaixada

V.3.5 Sistema de avanço e recuo da mesa de transferência

O sistema de avanço e recuo da mesa é efetuado através da utilização de um cilindro pneumático com o curso de 700 [mm], Figura V.15. A distância de 700 [mm] é referente à distância entre os postos de trabalho, Alimentação – Medição e Medição – Extração.

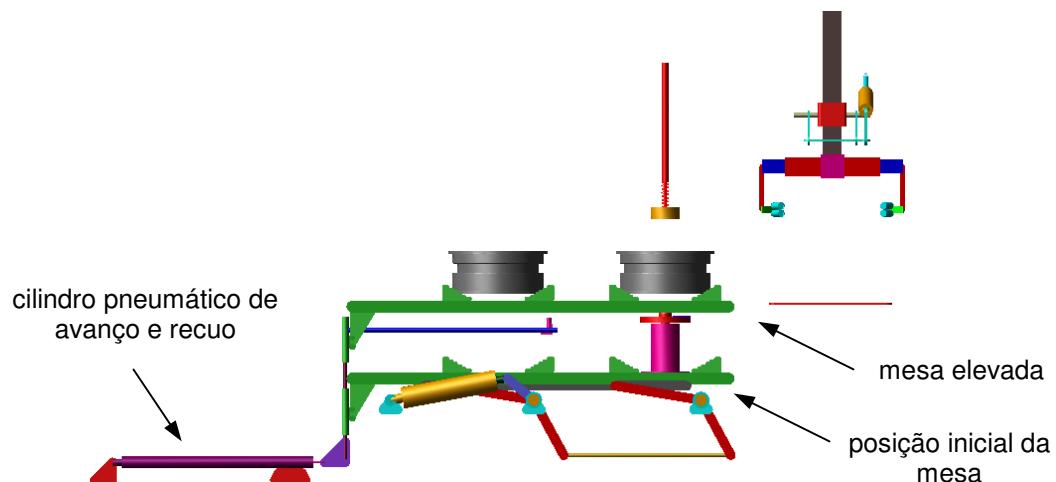


Figura V.15: Sistema de avanço e recuo da mesa de transferência

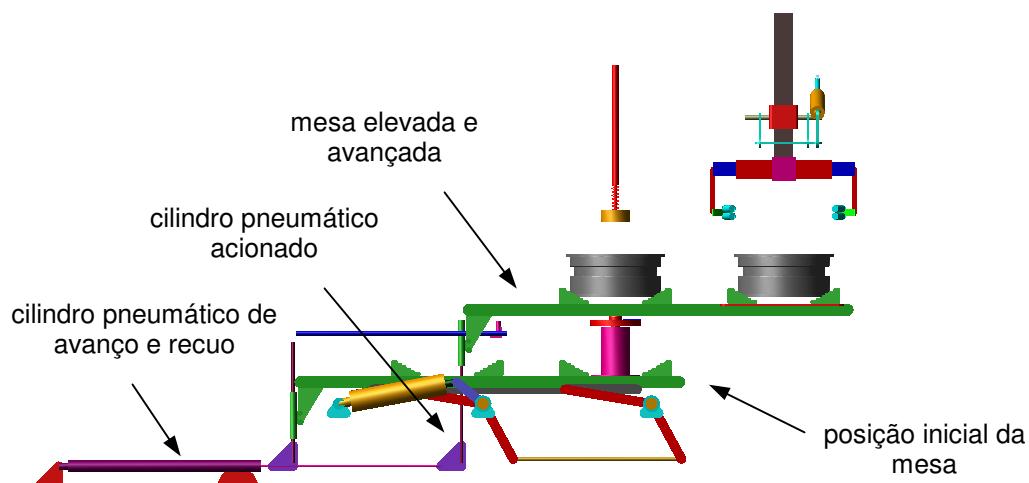


Figura V.16: Mesa de transferência elevada e avançada

V.3.6 Sistema de fixação para medição (parte da Estação de Inspeção)

Para realizar a medição é necessário o posicionamento e a fixação da roda. Para isso é utilizada uma base com uma placa de apoio cuja rotação é efetuada por um motor de passo, Figura V.17. A centralização é obtida através da pinça cônica que expande por ação de um cilindro pneumático cuja haste atravessa o conjunto.

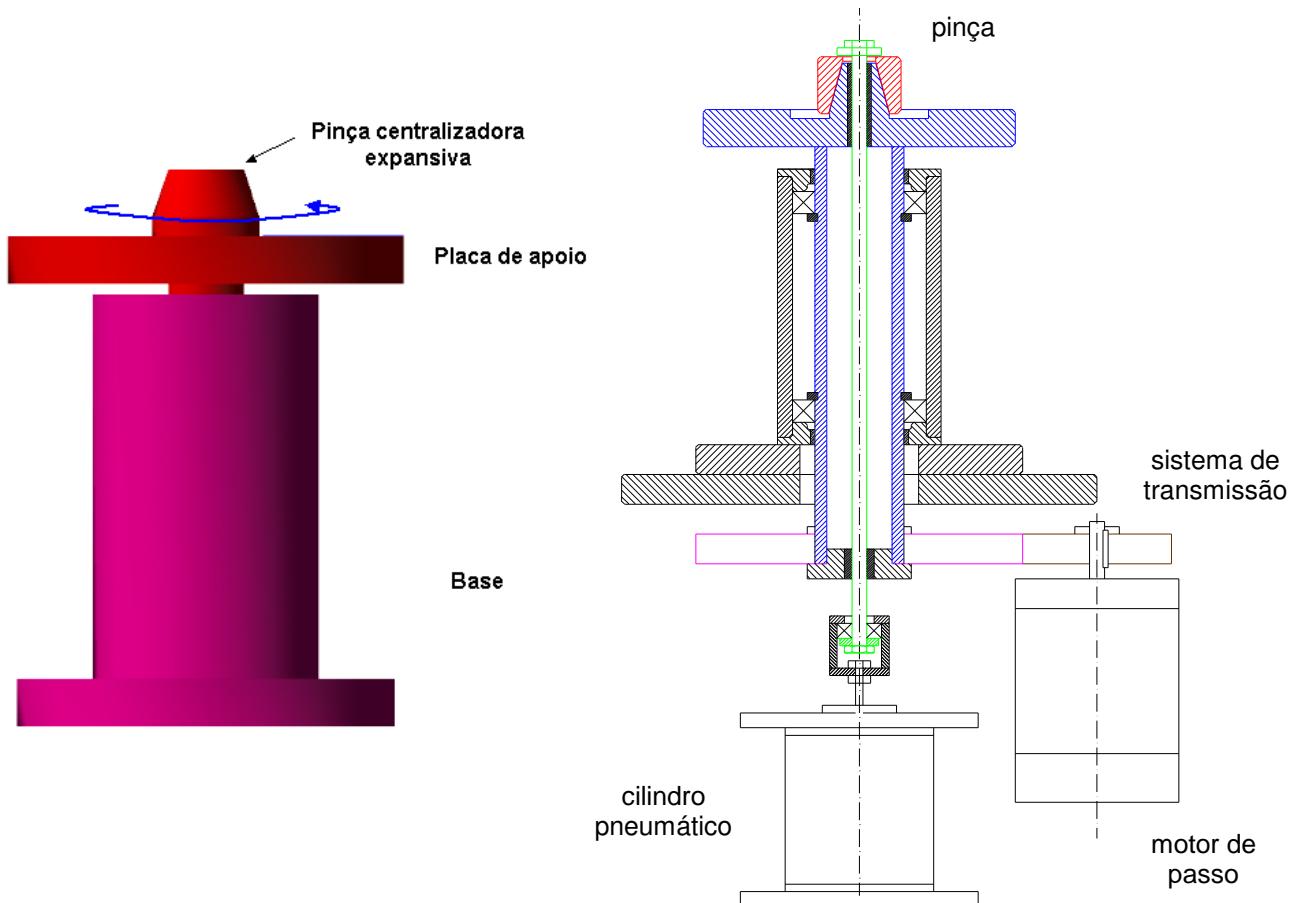


Figura V.17: Sistema de fixação para medição da Roda

V.3.7 Posto de Extração

Após efetuada a medição, a roda é novamente elevada e então colocada no posto de extração, conforme mostrado na Figura V.18.

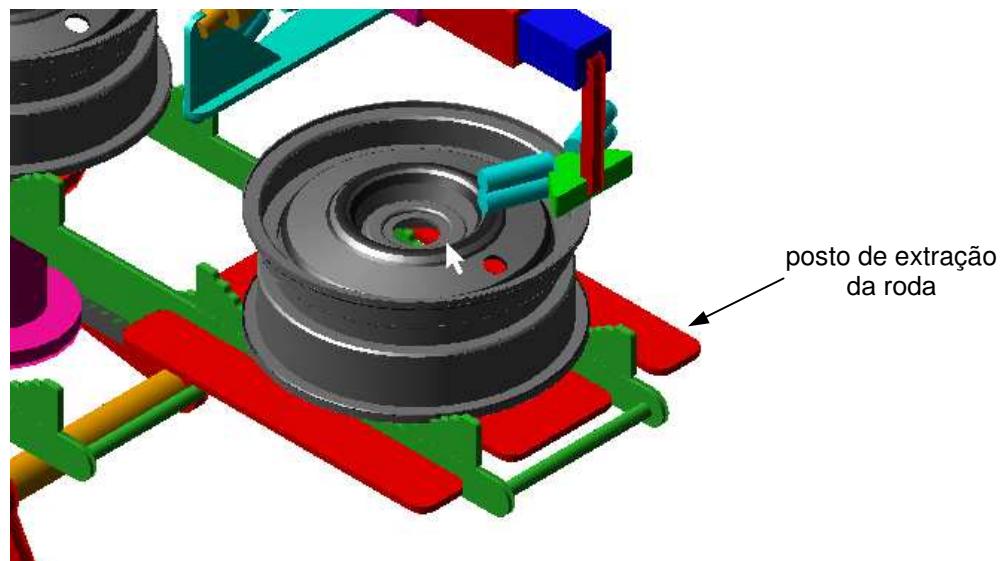


Figura V.18: Posto de extração da roda

V.3.8 Garra para a extração da roda

A garra para extração é empregada para apanhar a roda que se encontra no posto de extração como mostrado na Figura V.19, e coloca-la na gancheira de onde seguirá para as etapas seguintes de produção.

A Figura V.20 apresenta algumas características geométricas da garra de extração e a Figura V.21 apresenta o sistema da garra na posição rotacionada para colocar a roda na gancheira.

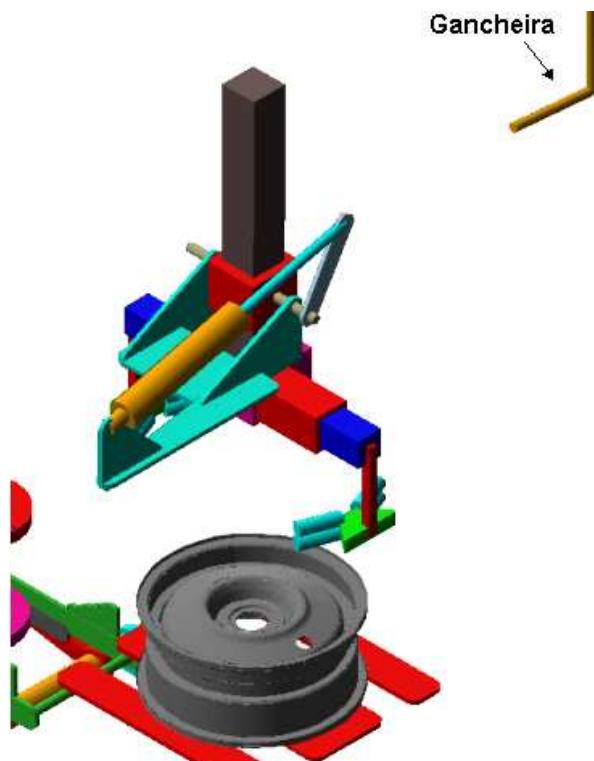


Figura V.19: Garra para a extração da roda

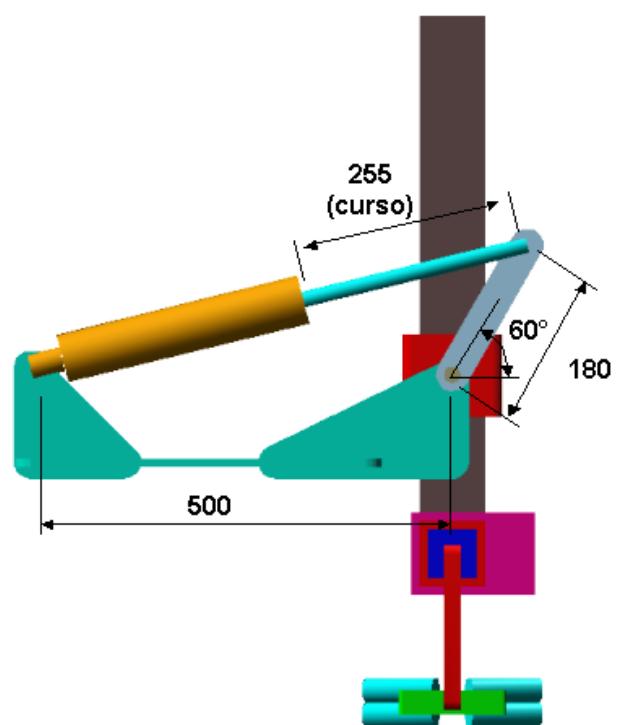


Figura V.20: Detalhe geométrico do sistema de rotação da garra

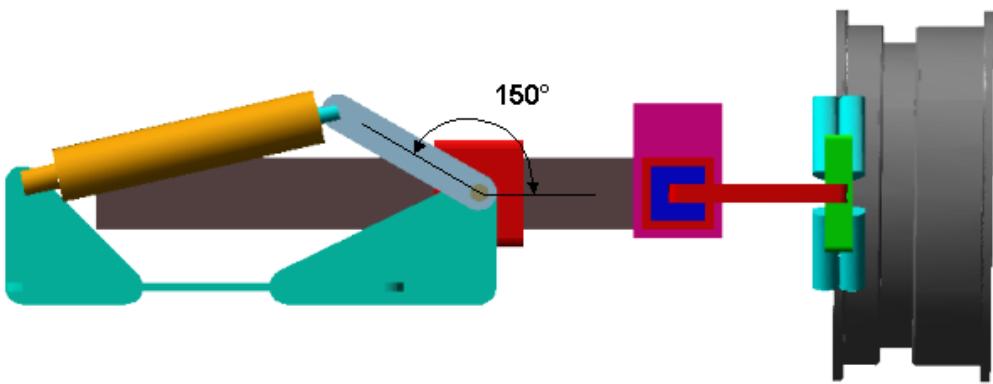
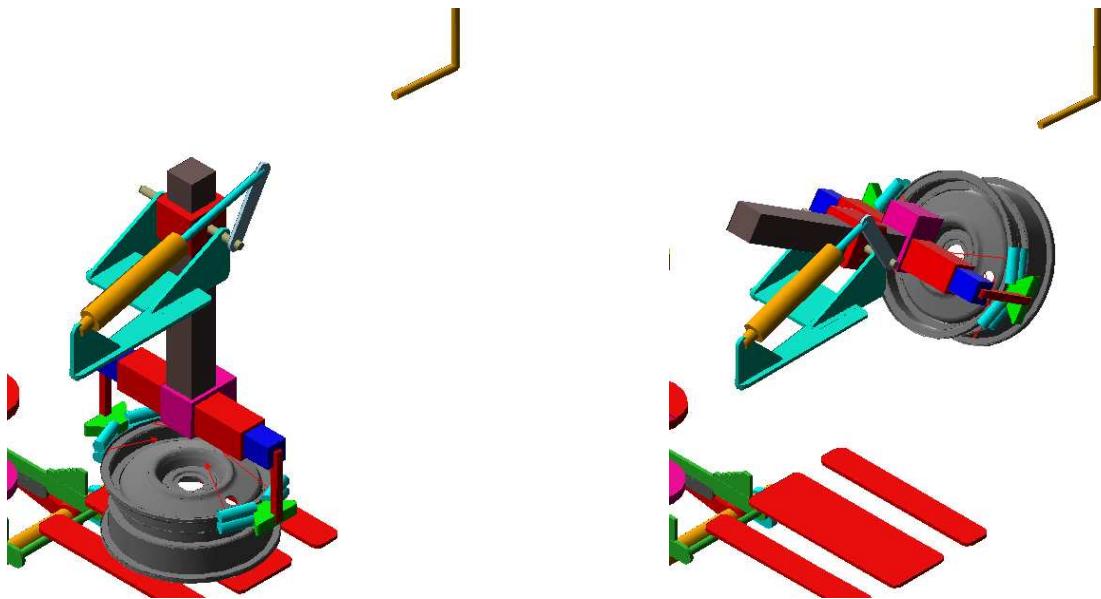


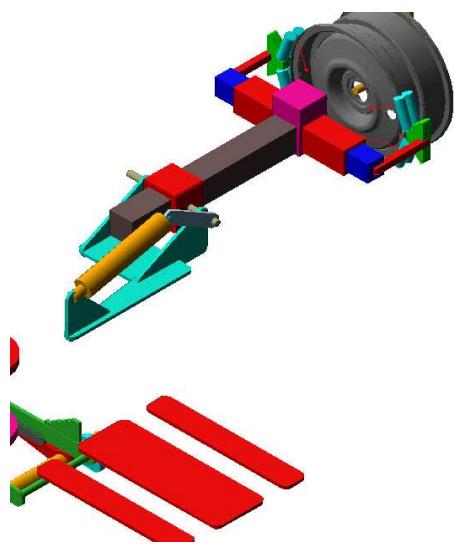
Figura V.21: Detalhe geométrico do sistema rotacionado da garra

A seguir são apresentadas algumas etapas de movimentação da garra, onde foi empregado o aplicativo ADAMS para avaliar o dispositivo.

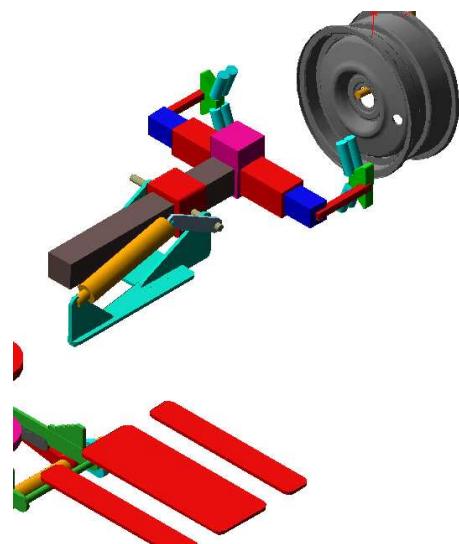


*Figura V.22: Seqüência de extração –
Avanço da garra e fixação da roda*

*Figura V.23: Seqüência de extração –
Recolhimento da garra e elevação da roda*



*Figura V.24: Sequência de extração –
Avanço da garra e colocação da roda na
gancheira*



*Figura V.25: Sequência de extração –
Recolhimento da Garra*

V.4 Estação de Inspeção

Para se medir a oscilação da roda foi necessário o desenvolvimento e a implementação do protótipo da estação de inspeção, conforme apresentado nas Figuras V.26 (modelo esquemático) e V.27 (protótipo real), o qual consiste em:

- sistema de fixação da roda, para o controle do posicionamento da roda;
- sistema de iluminação, para o controle da iluminação;
- ambiente para isolar o sistema de iluminação.

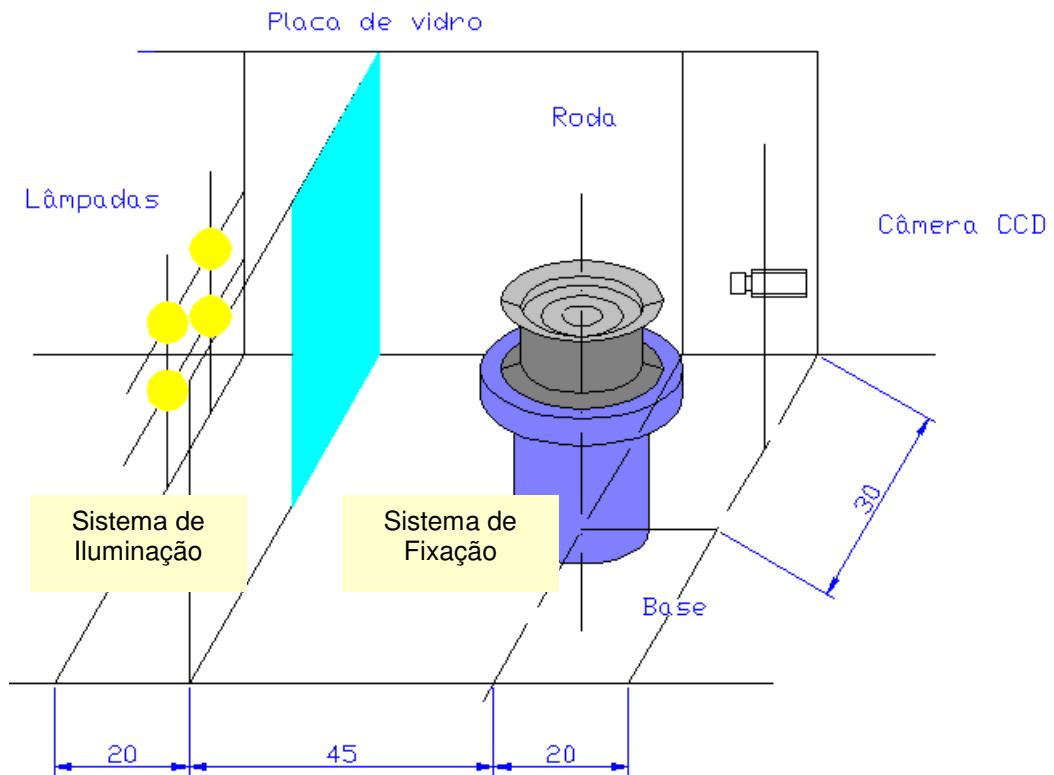


Figura V.26: Modelo da estação de inspeção



Figura V.27: Protótipo da estação de inspeção

V.4.1 Sistema de fixação

O sistema de fixação consiste em uma base com eixo rotacional, que apresenta um pino cônico central, o qual com o auxílio de uma pinça expansiva, centraliza a roda.

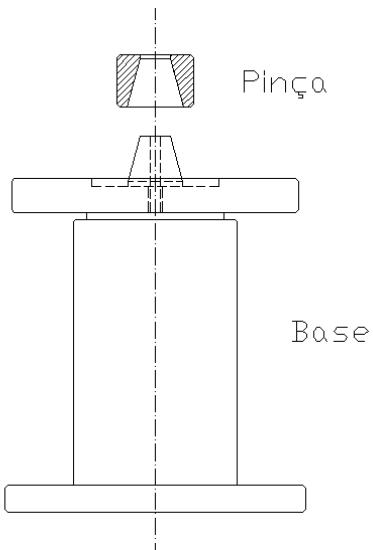


Figura V.28: Sistema de fixação da roda



Figura V.29: Protótipo do sistema de fixação

V.4.2 Sistema de iluminação

Para este trabalho foi escolhida a iluminação de fundo, devido ao fato de se buscar o contorno da roda.

Os componentes empregados no sistema são:

- 4 lâmpadas dicroicas 50 W – para a iluminar e evitar que haja oscilação nas imagens capturadas;
- 1 dimmer – para controle da intensidade de iluminação;
- 1 placa de vidro jateados 30 x 45 [mm] – para ressaltar a reflexão difusa;

V.4.3 Ambiente de isolamento do sistema de iluminação

Para isolar o sistema de variações externas de iluminação foi empregada uma caixa de dimensão 450 x 780 x 700 [mm], de modo que comportasse todo o sistema de inspeção.

V.5 Descrição do procedimento operacional de medição da estação de inspeção

O desenho do aro é iniciado traçando-se o diâmetro e a largura da roda em função do centro geométrico da mesma. A partir do ponto de intersecção, P, entre as retas que definem o diâmetro e a largura da roda é traçado o assento do pneu, cujo ângulo é medido em relação à linha axial. Em seguida, é traçado o raio de concordância, R, entre a linha da largura da roda e a linha do assento do pneu. Este processo é apresentado na Figura V.30.

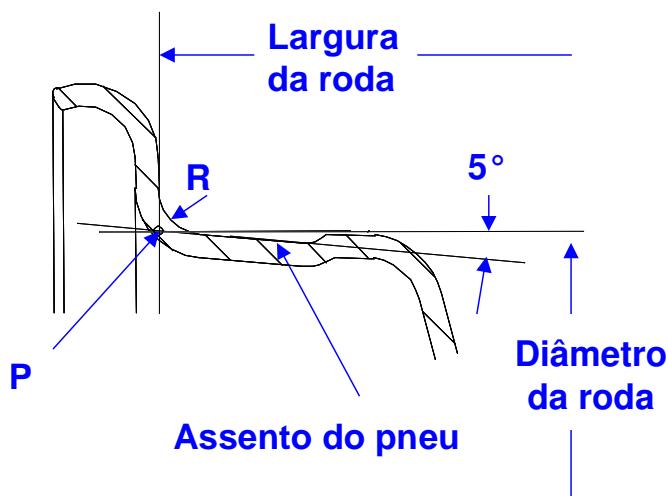


Figura V.30: Detalhe da aba do aro da roda

Devido ao traçado do raio R, torna-se impossível medir diretamente a coordenada do ponto P que referencia a largura e o diâmetro da roda; desta forma é recomendado o procedimento apresentado no item II.2 para medir o diâmetro da roda. Pelo mesmo motivo, há a necessidade do uso do princípio de esferas para medir a oscilação radial e axial da roda.

No entanto, utilizando-se recursos de visão computacional pode-se buscar a reconstrução das retas que definem o assento e a largura da roda e analisando-as, obter a oscilação da roda, que é o principal objetivo do procedimento de medição.

Para se obter as retas que definem o assento do pneu e largura da roda são necessárias duas etapas:

1. calibração do sistema de visão;
2. medida da oscilação da roda.

V.5.1 Calibração do sistema de visão

Para a operação da estação de inspeção foi desenvolvido um sistema de calibração para aferir o sistema de visão que medirá a oscilação das rodas.

O calibre consiste de um dispositivo de aço com um furo central guia, cujo modelo é mostrado na Figura V.31 e o protótipo na Figura V.32, que é centralizado do mesmo modo que a roda, na base de fixação.

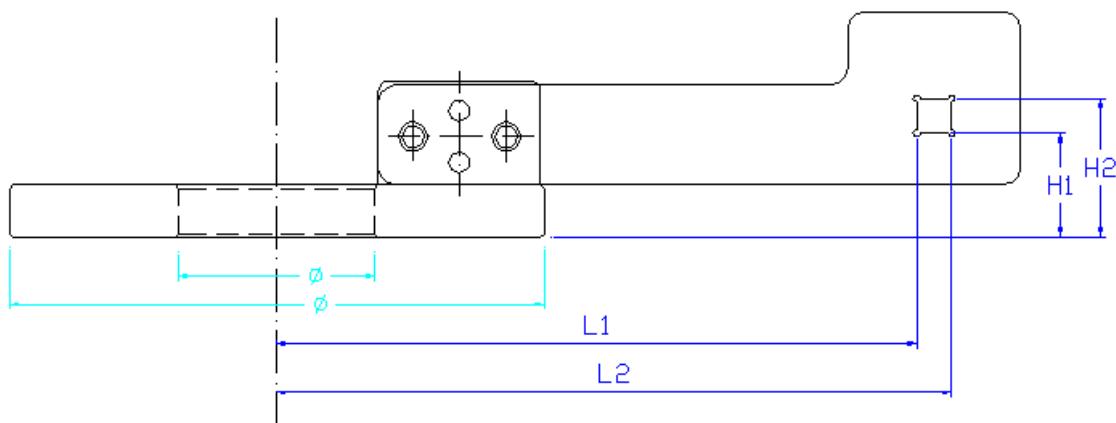


Figura V.31: Modelo do Calibre



Figura V.32: Protótipo do Calibre

As referências para calibrar o sistema, apresentadas na Figura V.33, são dadas pelas dimensões L1, L2, H1 e H2, cujas medidas são apresentadas na Tabela V-2. Estas dimensões foram adotadas de forma que fiquem no mesmo campo de visão ao se trabalhar com a roda sem a necessidade da movimentação da câmera.

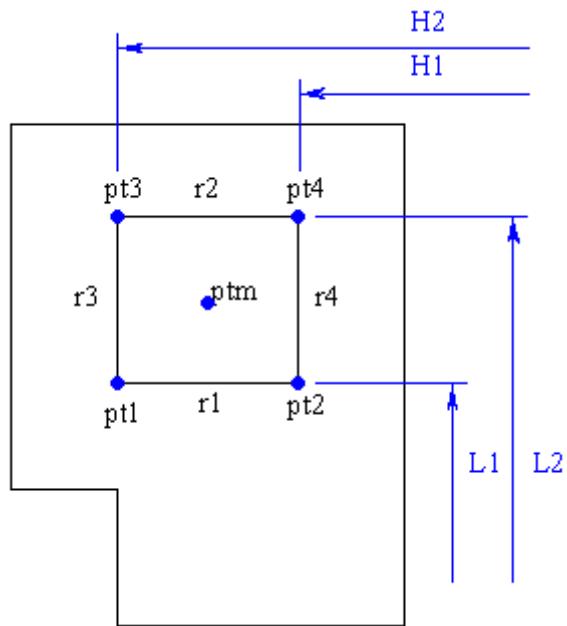
Tabela V-2: Valores dos parâmetros do calibre

parâmetros	valor [mm]
L1	185,563 ± 0,001
L2	195,481 ± 0,001
H1	29,941 ± 0,001
H2	39,992 ± 0,001

O calibre foi construído com tolerância de $\pm 0,025$ [mm] e posteriormente as dimensões foram medidas utilizando-se o equipamento de medição tridimensional de incerteza $\pm 0,001$ [mm]

O procedimento adotado para a calibração apresenta os seguintes passos:

1. posicionar e fixar o calibre na base de fixação;
2. capturar a imagem do calibre;
3. detectar as bordas do calibre na imagem;
4. obter as retas de referência da imagem;
5. obter os pontos de referência da imagem;
6. obter a escala e ângulo de inclinação da imagem.



pt1, pt2, pt3, pt4 e ptm	– pontos de referência
r1, r2, r3 e r4	– retas de referência
L1, L2, H1 e H2	– distâncias de referência à base de fixação

Figura V.33: Referências do calibre

V.5.1.1 Posicionamento e fixação do calibre

O posicionamento do calibre é efetuado através do furo guia com o auxilio da pinça expansiva, Figura V.34.

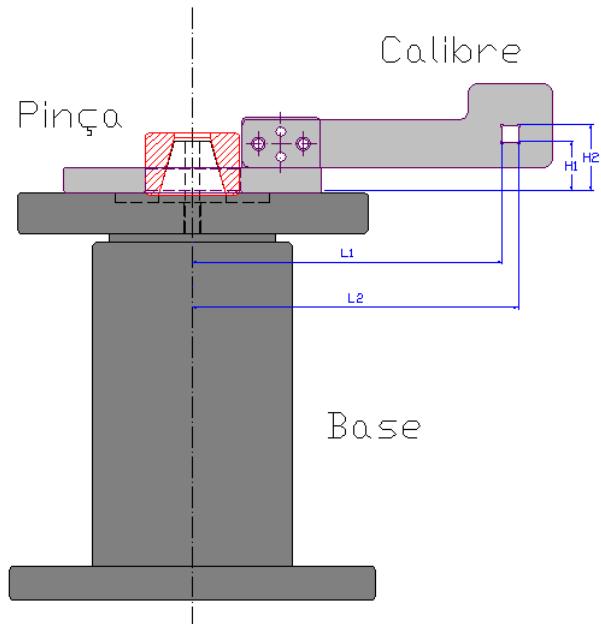


Figura V.34: Posicionamento e fixação do calibre na base de medida



Figura V.35: Posicionamento e fixação do calibre na base de medida – protótipo

Na Figura V.36 é mostrado o conjunto calibre e base de fixação na estação de inspeção e na Figura V.37 é apresentado uma vista obliqua do mesmo.

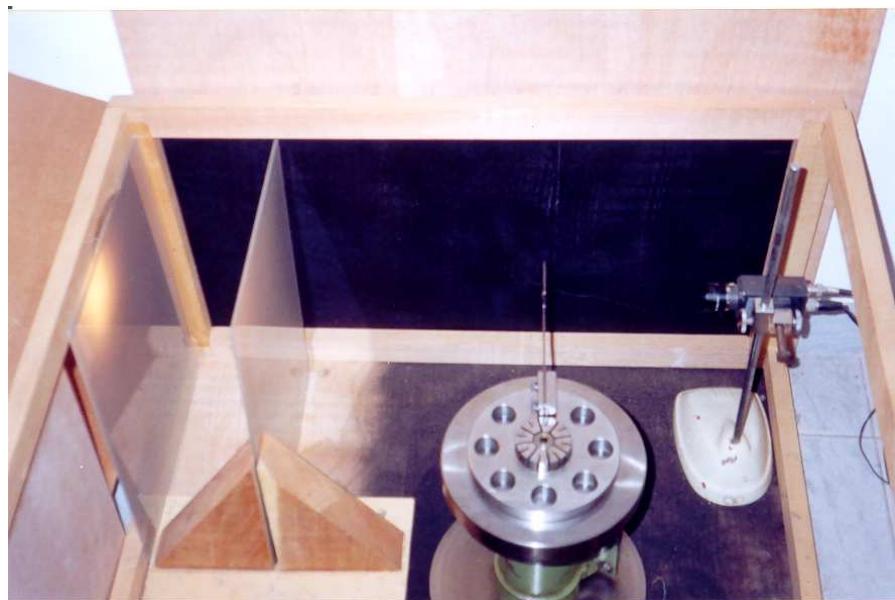


Figura V.36: Montagem do calibre no sistema de medição



Figura V.37: Detalhe da montagem do calibre no sistema de medição

V.5.1.2 Captura da imagem do calibre

Uma imagem capturada do calibre é apresentada na Figura V.38, aonde a imagem está rotacionada de 90° em relação a posição apresentada no modelo da Figura V.34, devido a câmera estar rotacionada. Verifica-se, ainda na imagem da Figura V.38, que a câmera não está perfeitamente alinhada, pois as linhas internas do furo do calibre não estão alinhadas com a linha vertical e horizontal do sistema de visão, no entanto o pequeno desalinhamento será corrigido pelo procedimento a ser apresentado.

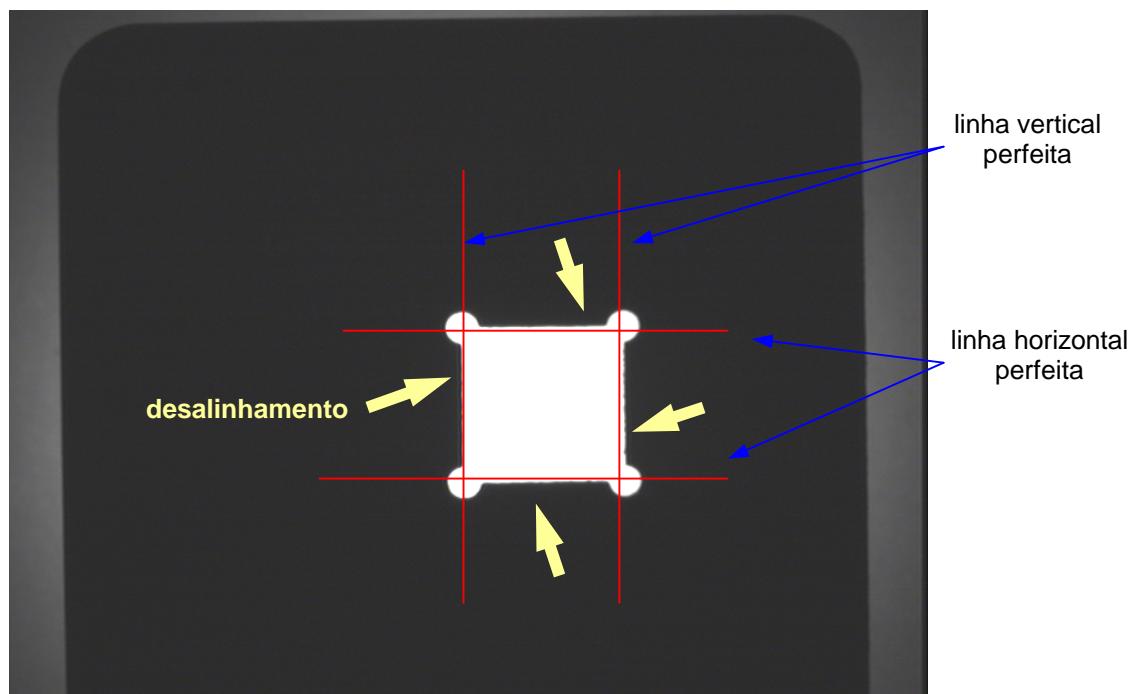


Figura V.38: Imagem do calibre capturada para calibração do sistema

V.5.1.3 Detecção as bordas do calibre

Na Figura V.39 é apresentada a borda detectada utilizando-se o operador de Sobel.

Nesta etapa só foram detectados os pontos que formam a borda do calibre, portanto, ainda não existem retas ou curvas.

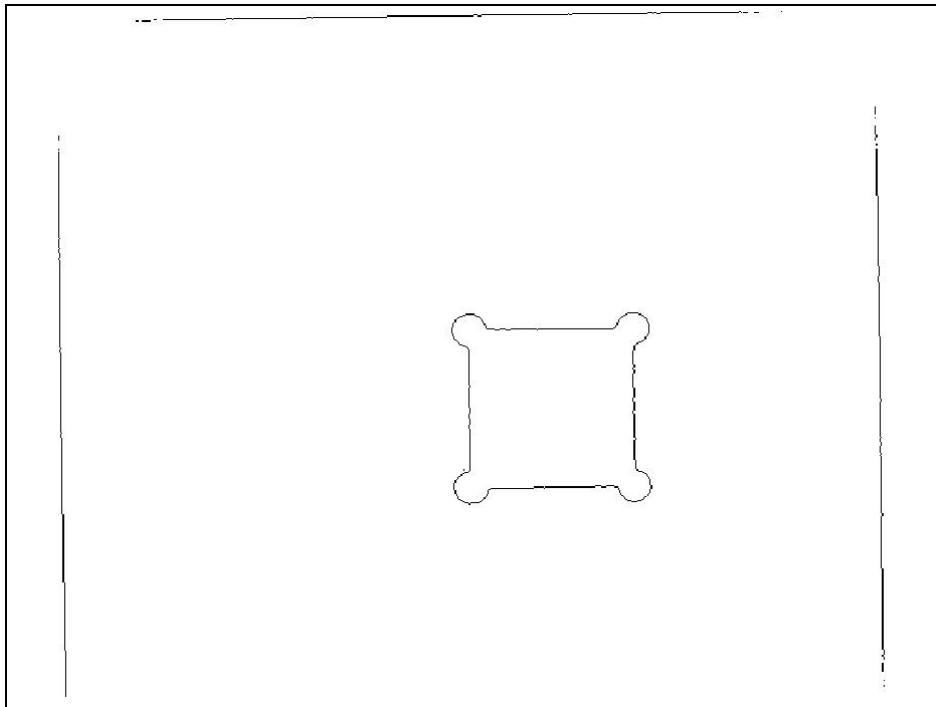


Figura V.39: Borda do calibre utilizando Sobel

V.5.1.4 Obtenção das retas de referência da imagem do calibre

As retas de referências, r1, r2, r3 e r4 do calibre já foram apresentadas na Figura V.33, bem como os valores de L1, L2, H1 e H3, na Tabela V-2.

As retas especificadas podem ser obtidas através do emprego da transformada de Hough. No entanto a aplicação convencional da transformada de Hough prevê a análise de todos os pontos (x,y) da borda, através da Equação (V.3), variando-se o ângulo da normal da reta, θ , de -90° a 90° e obtendo o correspondente valor da distância, ρ , da reta ao ponto de referência. No entanto, utilizando-se a informação da direção da borda obtida durante a sua

deteção e pelo fato da orientação das retas ser conhecida, pode-se reduzir o esforço no processamento.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (V.3)$$

Desta forma, separando-se os pontos que apresentam a direção da borda $\theta = 90^\circ$, dentro de uma tolerância $\Delta\theta$, obtém-se os pontos que formam a reta $r1$, como mostrado na Figura V.40. Da mesma forma, separando se os pontos que apresentam a direção da borda $\theta = -90^\circ, 0^\circ$ e 180° , obtém-se os pontos que formam as retas $r2$, $r3$ e $r4$, que são apresentados nas Figura V.41, Figura V.42 e Figura V.43, respectivamente.

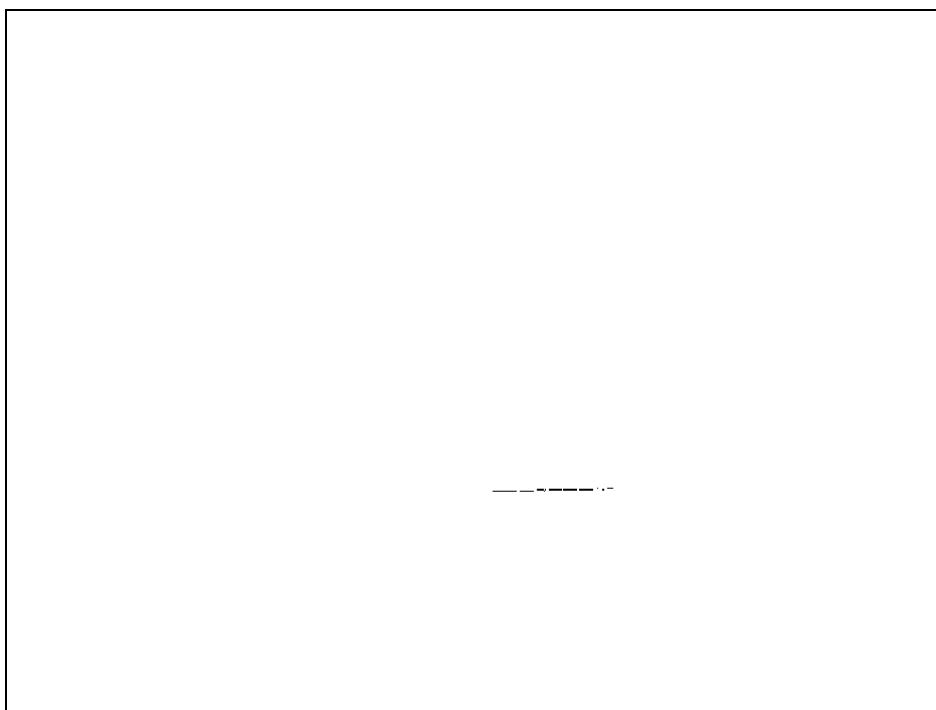


Figura V.40: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = 90^\circ$ ($r1$)

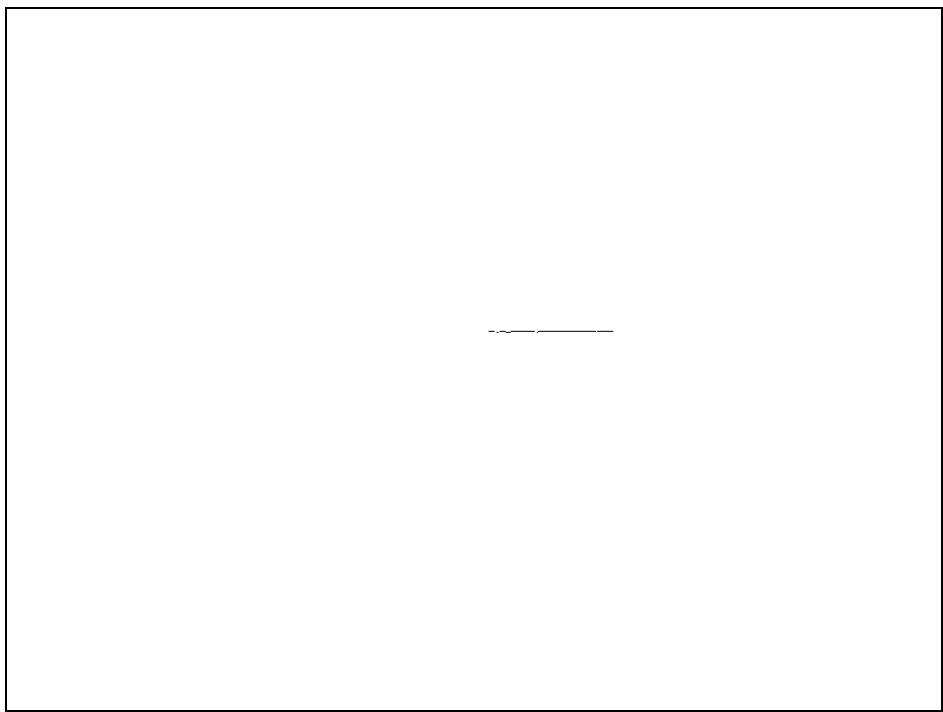


Figura V.41: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = -90^\circ$ (r2)

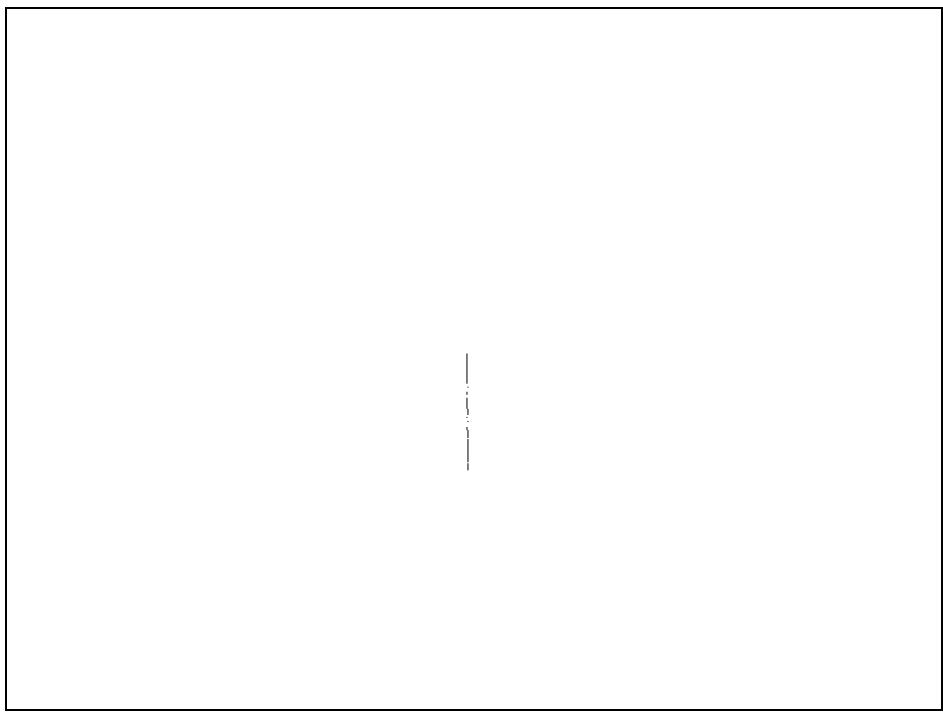


Figura V.42: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = 0^\circ$ (r3)

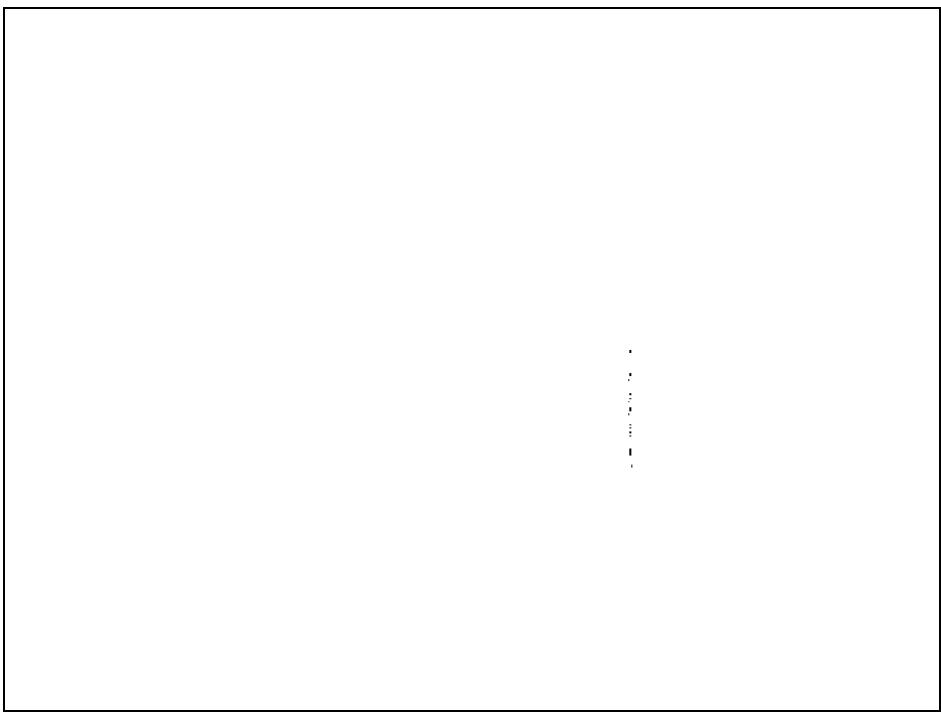


Figura V.43: Pixels da imagem cuja borda apresenta direção $\theta = 180^\circ$ (r4)

computando-se as retas como pares de (θ, ρ) , tem-se, para os casos anteriores:

$$r1(90^\circ, 395)$$

$$r2(-90^\circ, 265)$$

$$r3(0^\circ, 379)$$

$$r4(180^\circ, 515)$$

No entanto, o resultado acima não apresenta a resolução requerida, pois representa retas perfeitamente alinhadas, conforme apresentado na Figura V.44, o que não corresponde à realidade, conforme mostrado na Figura V.45.

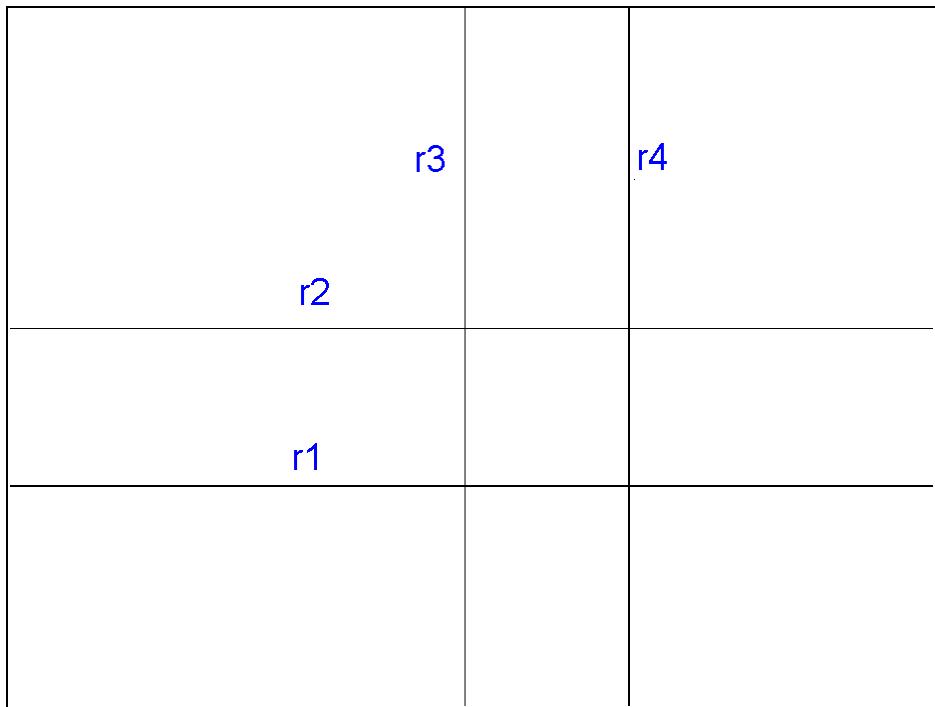


Figura V.44: Representação das retas obtidas através da transformada de Hough

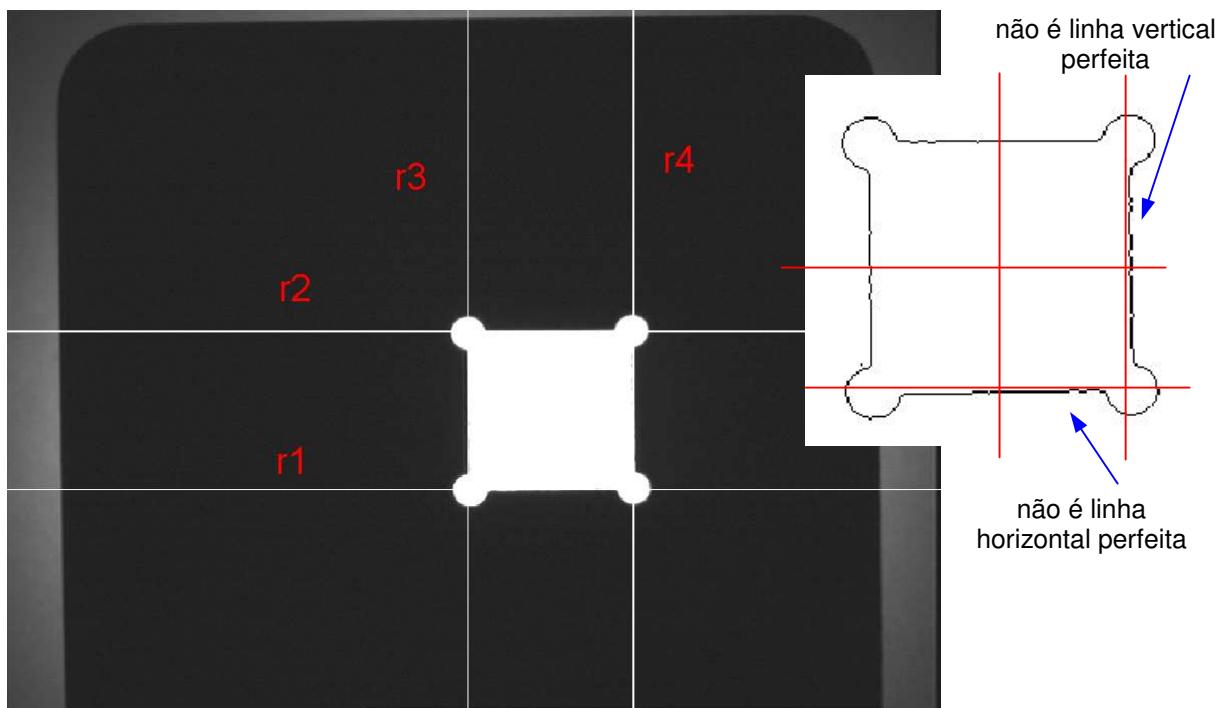


Figura V.45: Representação das retas obtidas através da transformada de Hough sobreposta à imagem original

à imagem original

Para se obter uma melhor aproximação das retas, toma-se os pontos selecionados e ajusta-se uma reta pelo método dos mínimos quadrados. Desta forma além de obter a melhor reta para os pontos, passa a se trabalhar com resolução menor que um pixel, conforme mostrado na Figura V.46.

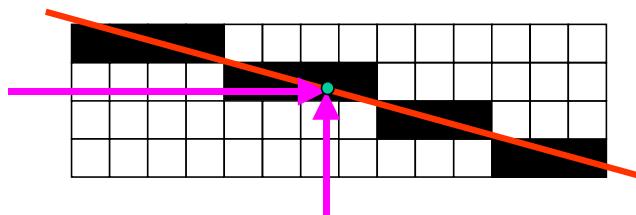


Figura V.46: Ajuste da reta aos pontos da borda

Desta forma têm-se as retas, para esse exemplo, dadas por:

$$r1(91,093^\circ ; 403,75)$$

$$r2(-89,831^\circ ; 266,39)$$

$$r3(0,7996^\circ ; 374,80)$$

$$r4(180,39^\circ ; 512,66)$$

Estas retas, apresentadas na Figura V.47 e na Figura V.48, permitem que o sistema de visão seja calibrado conforme as condições reais.

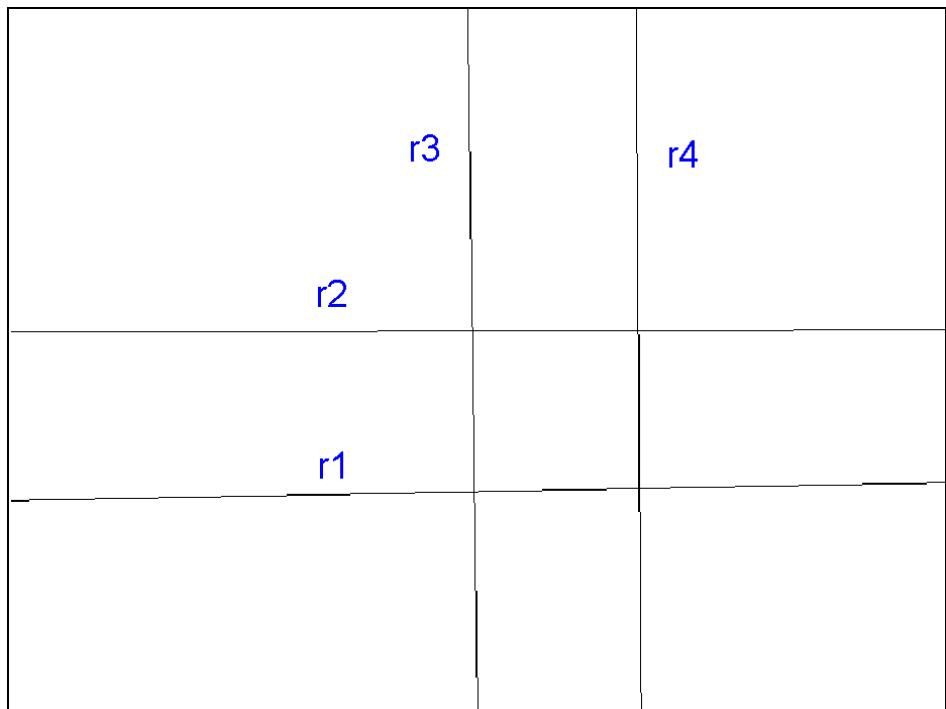


Figura V.47: Representação das retas obtidas através do ajuste por mínimos quadrados

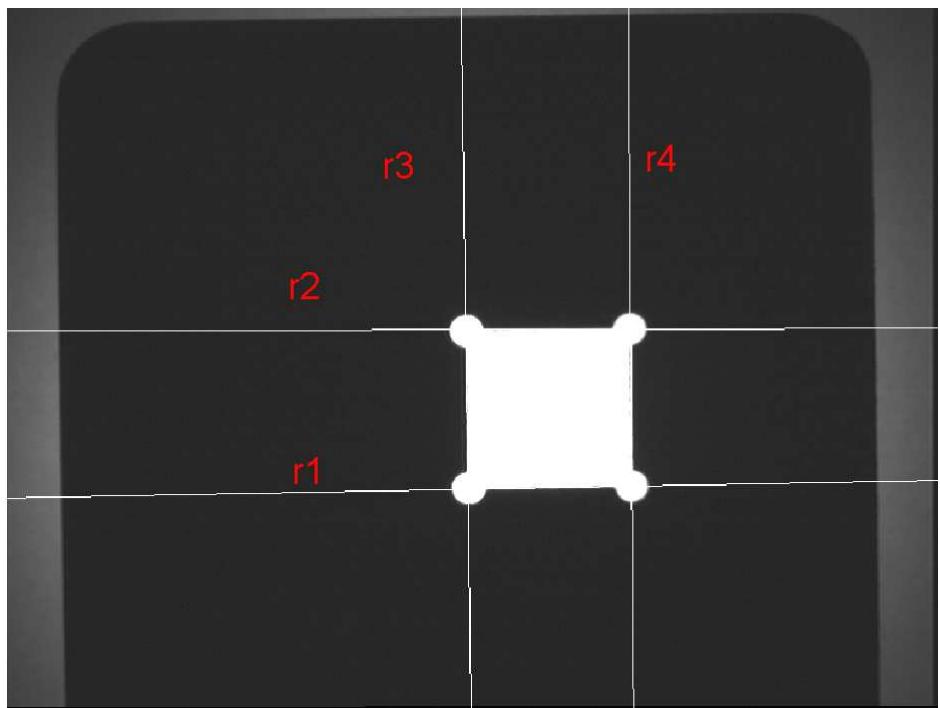


Figura V.48: Representação das retas obtidas através do ajuste por mínimos quadrados
sobreposta à imagem original

A Figura V.49 apresenta as retas obtidas através da transformada de Hough do método tradicional e utilizando o ajuste por mínimos quadrados, verifica-se desta forma o diferente alinhamento das retas.

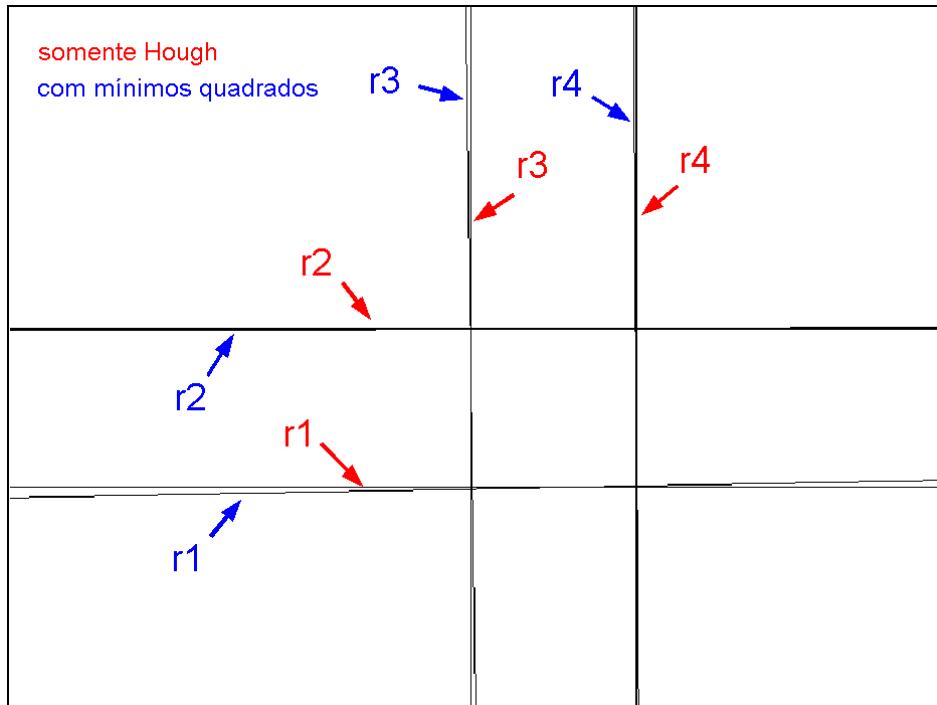


Figura V.49: Sobreposição do método de Hough com e sem a utilização dos mínimos quadrados

V.5.1.5 Obtenção dos pontos de referência da imagem do calibre

Os pontos de referência adotados são os apresentados na Figura V.33, denominados pt1, pt2, pt3, pt4 e ptm.

Os pontos pt1, pt2, pt3 e pt4 são obtidos através da intersecção entre as retas r1 e r3, r1 e r4, r2 e r3, r2 e r4, respectivamente. Para as retas apresentadas em V.5.1.4 tem-se:

$$\text{pt1} (380,37;396,56)$$

$$\text{pt2} (515,37;393,98)$$

$$\text{pt3} (378,54;265,27)$$

$$\text{pt4} (514,49;264,87)$$

O ponto de referência ptm pode ser obtido através da média da posição dos pontos pt1, pt2 pt3 e pt4, logo:

$$\text{ptm} (447,19;330,17)$$

V.5.1.6 Obtenção da escala e do ângulo de inclinação da imagem

Obtidas as retas e os pontos de referência da imagem e tendo os valores dos parâmetros de referência do calibre, pode-se determinar os valores para a correção das imagens posteriormente capturadas.

Tabela V-3: Parâmetros do calibre

parâmetros	valor [mm]
L1	185,563 ± 0,001
L2	195,481 ± 0,001
H1	29,941 ± 0,001
H2	39,992 ± 0,001

Tabela V-4: Parâmetros das retas de referência da imagem do calibre

retas	θ [°]	ρ [pixel]
r1	91,09	403,75
r2	-89,83	266,39
r3	0,80	374,80
r4	180,39	512,66

Tabela V-5: Parâmetros dos pontos de referência da imagem do calibre

pontos	x [pixel]	y [pixel]
ptm	447,19	330,17
pt1	380,37	396,56
pt2	515,37	393,38
pt3	378,54	265,27
pt4	514,49	264,87

A inclinação da imagem será dada pela inclinação das retas obtidas. Deste modo a média da inclinação das retas.

$$\theta_{im} = \frac{(\theta_{r1} - 90^\circ) + (\theta_{r2} + 90^\circ) + (\theta_{r3} - 0^\circ) + (\theta_{r4} - 180^\circ)}{4} \quad (V.4)$$

Desta forma tem-se para o arranjo experimental:

$$\theta_{im} = 0,61^\circ$$

A referência do eixo horizontal x da imagem é obtida através da distância dos pontos de intersecção da reta horizontal que passa por ptm e as retas r3 e r4, como mostrado na Figura V.50..

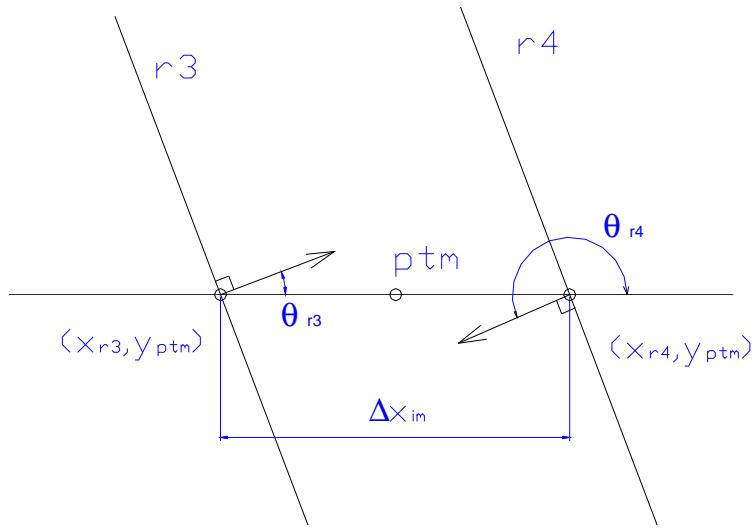


Figura V.50: Representação da intersecção entre a reta horizontal que passa por ptm e as retas r3 e r4

Desta forma tem-se:

$$\Delta x_{im} = x_{r4}(y_{ptm}) - x_{r3}(y_{ptm}) \quad (V.5)$$

$$\Delta x_{im} = \left(-y_{ptm} \cdot \tan(\theta_{r4}) + \frac{\rho_{r4}}{\cos(\theta_{r4})} \right) - \left(-y_{ptm} \cdot \tan(\theta_{r3}) + \frac{\rho_{r3}}{\cos(\theta_{r3})} \right) \quad (V.6)$$

$$\Delta x_{im} = \left(-330,17 \cdot \tan(180,39) + \frac{-512,66}{\cos(180,39)} \right) - \left(-330,17 \cdot \tan(0,77) + \frac{359,74}{\cos(0,77)} \right) \quad (V.7)$$

$$\Delta x_{im} = 510,42 - 370,23 = 140,20 [pixel]$$

Do calibre tem-se que a distância entre as retas r3 e r4 é dada por:

$$\Delta x_{calibre} = H_2 - H_1 \quad (V.8)$$

$$\Delta x_{calibre} = 39,992 - 29,941 = 10,051 [mm]$$

No entanto, a imagem está rotacionada de θ_{im} , como representado na Figura V.51.

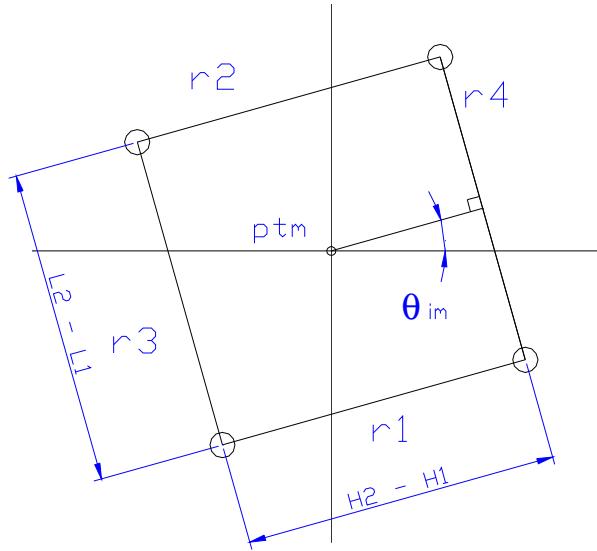


Figura V.51: Representação esquemática da imagem do calibre rotacionada

Logo, o fator de escala em x da imagem será dada por:

$$\frac{\Delta x_{real}}{\Delta x_{im}} = \frac{\Delta x_{calibre} / \cos(\theta_{im})}{\Delta x_{im}} \quad (V.9)$$

$$\frac{\Delta x_{real}}{\Delta x_{im}} = \frac{10,051 / \cos(0,61)}{140,20} = 0,071695 [mm / pixel]$$

Analogamente, a referência y (eixo vertical) da imagem é obtida através da distância dos pontos da intersecção da reta vertical que passa por ptm com as retas r1 e r2, como representado na Figura V.52.

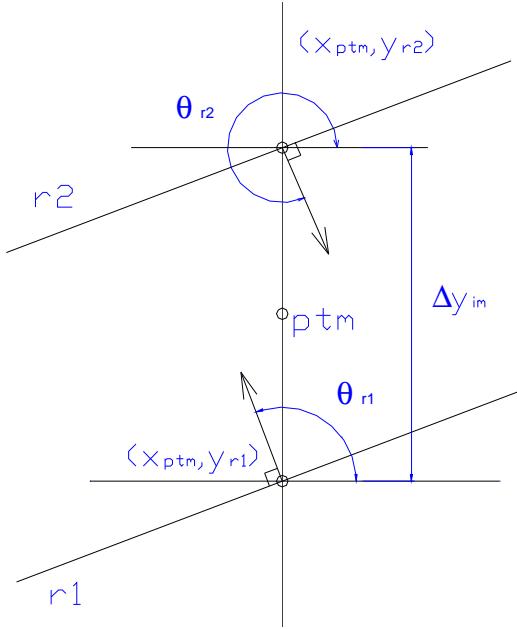


Figura V.52: Representação da intersecção entre a reta vertical que passa pelo ponto ptm e as r1 e r2

Portanto tem-se:

$$\Delta y_{im} = y_{r2}(x_{ptm}) - y_{r1}(x_{ptm}) \quad (V.10)$$

$$\Delta y_{im} = \left(-\frac{x_{ptm}}{\operatorname{tg}(\theta_{r2})} + \frac{\rho_{r2}}{\operatorname{sen}(\theta_{r2})} \right) - \left(-\frac{x_{ptm}}{\operatorname{tg}(\theta_{r1})} + \frac{\rho_{r1}}{\operatorname{sen}(\theta_{r1})} \right) \quad (V.11)$$

$$\Delta y_{im} = \left(-\frac{447,19}{\operatorname{tg}(-89,83)} + \frac{266,39}{\operatorname{sen}(-89,83)} \right) - \left(-\frac{447,19}{\operatorname{tg}(91,09)} + \frac{-403,75}{\operatorname{sen}(91,09)} \right)$$

$$\Delta y_{im} = -265,06 + 395,31 = 130,25 \text{ [pixel]}$$

Do calibre tem-se:

$$\Delta y_{calibre} = L_2 - L_1 \quad (V.12)$$

$$\Delta y_{calibre} = 195,481 - 185,563 = 9,918 \text{ [mm]}$$

Devido à rotação da imagem tem-se:

$$\frac{\Delta y_{real}}{\Delta y_{im}} = \frac{\Delta y_{calibre} / \cos(\theta_{im})}{\Delta y_{im}} \quad (V.13)$$

$$\frac{\Delta y_{real}}{\Delta y_{im}} = \frac{9,918 / \cos(0,61)}{130,25} = 0,07615 [mm/pixel]$$

A Tabela V-6 apresenta os parâmetros obtidos através do procedimento de calibração.

Tabela V-6: Resumo da correlação entre imagem e o real

parâmetros		valor	unidade
ptm	coordenada x	447,19	pixel
	coordenada y	330,17	pixel
ptm	distância do assento da roda	34,967	mm
	distância do eixo da roda	190,52	mm
Inclinação da imagem		0,61	°
$\Delta x_{real}/\Delta x_{im}$		0,072	mm/pixel
$\Delta y_{real}/\Delta y_{im}$		0,076	mm/pixel

V.5.2 Medição da oscilação da roda

Uma vez calibrado o sistema de visão, pode-se realizar a medição da oscilação da roda.

A Figura V.53 mostra a montagem do protótipo para realizar a medição. Os passos para a medição podem ser definidos como:

1. posicionar e fixar a roda na base de fixação;
2. capturar a imagem da roda;
3. detectar a borda da roda;
4. detectar as retas de interesse;
5. obter a característica de interesse.



Figura V.53: Montagem do protótipo para a medição da oscilação da roda

V.5.2.1 Posicionamento e fixação da roda

Conforme mencionado anteriormente, a roda será posicionada e fixada na base para medição através do furo guia com o auxílio da pinça expansiva, conforme apresentado anteriormente e representada na Figura V.54 e na Figura V.55.

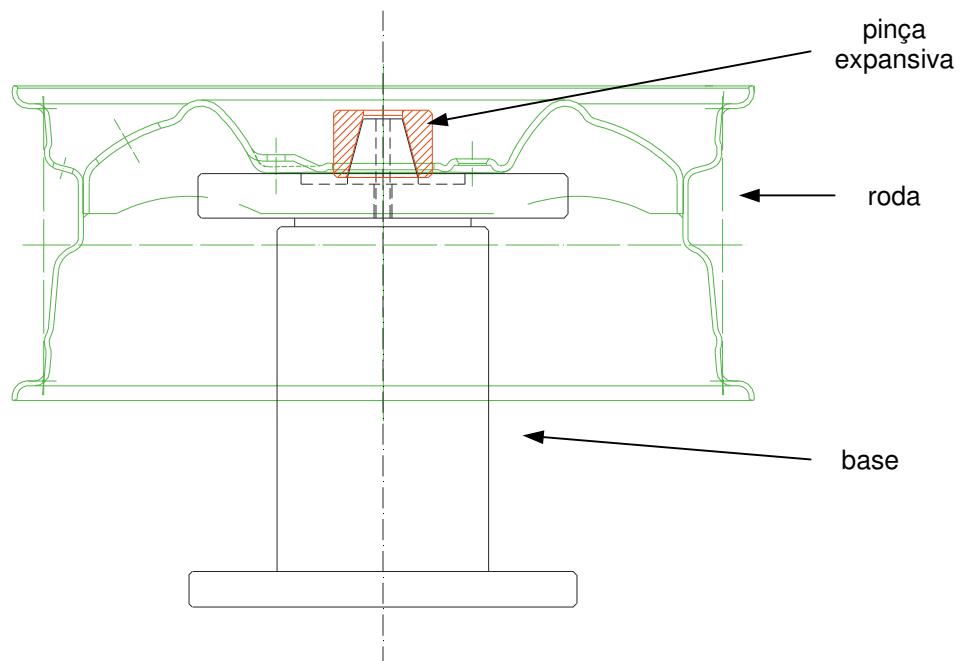


Figura V.54: Montagem e fixação da roda no suporte de medição



Figura V.55: Montagem e fixação da roda no Suporte de medição – protótipo.

V.5.2.2 Captura da imagem da roda

Uma vez ajustado a intensidade de iluminação através do dimmer e foco da câmera, procede-se a captura da imagem da roda, como mostrado na Figura V.56.

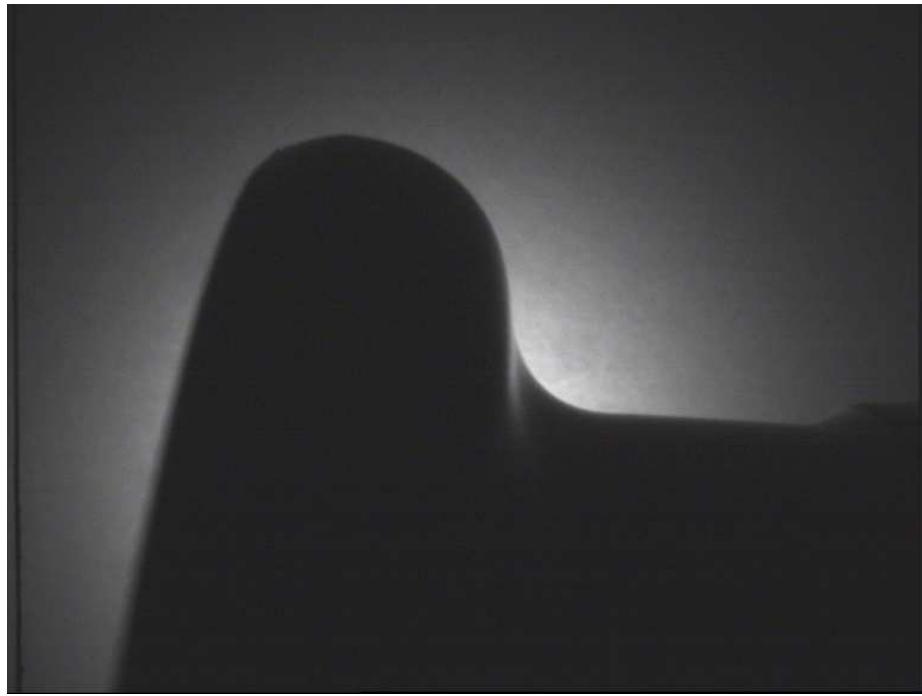


Figura V.56: Imagem capturada da aba da roda

V.5.2.3 Detecção da borda da roda

Para a obtenção da borda da roda, foi avaliada a utilização do operador Sobel. No entanto, o mesmo não apresentou bons resultados, vindo a resultar em bordas definidas ou pouco definidas, Figura V.57 e Figura V.58, para diferentes imagens capturadas da roda. Tal fato é devido à roda apresentar a forma cilíndrica e por ser feita de material reflexivo, o que requer uma iluminação mais bem controlada. Trabalhando-se com o operador de Canny, obtém-se melhores resultados, como pode ser visto na Figura V.59, no entanto requer maior esforço de processamento que o método de Sobel.

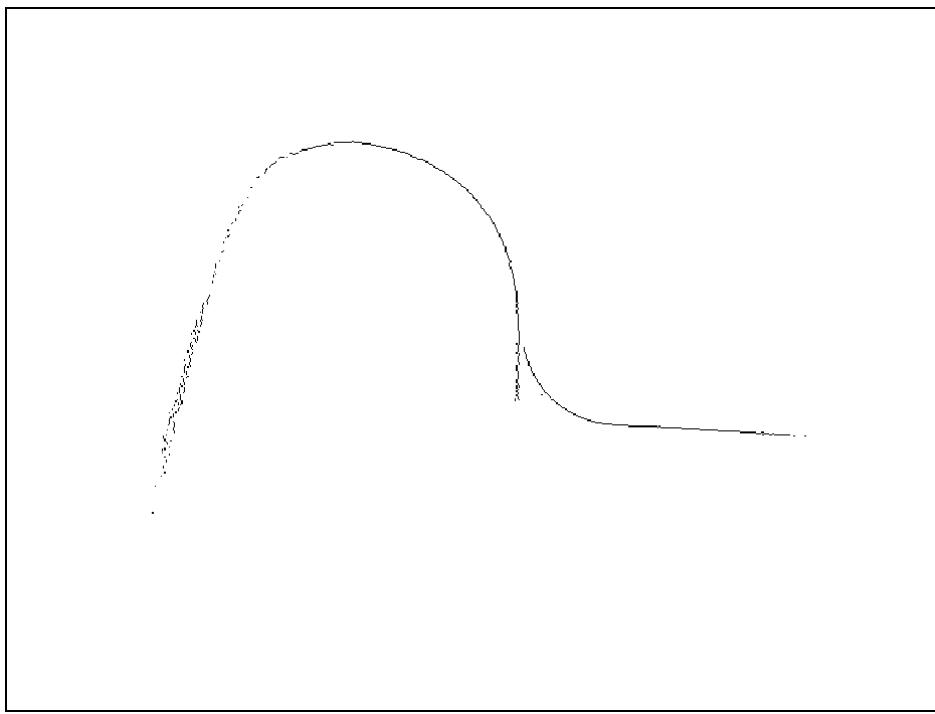


Figura V.57: Borda da roda – Operador Sobel

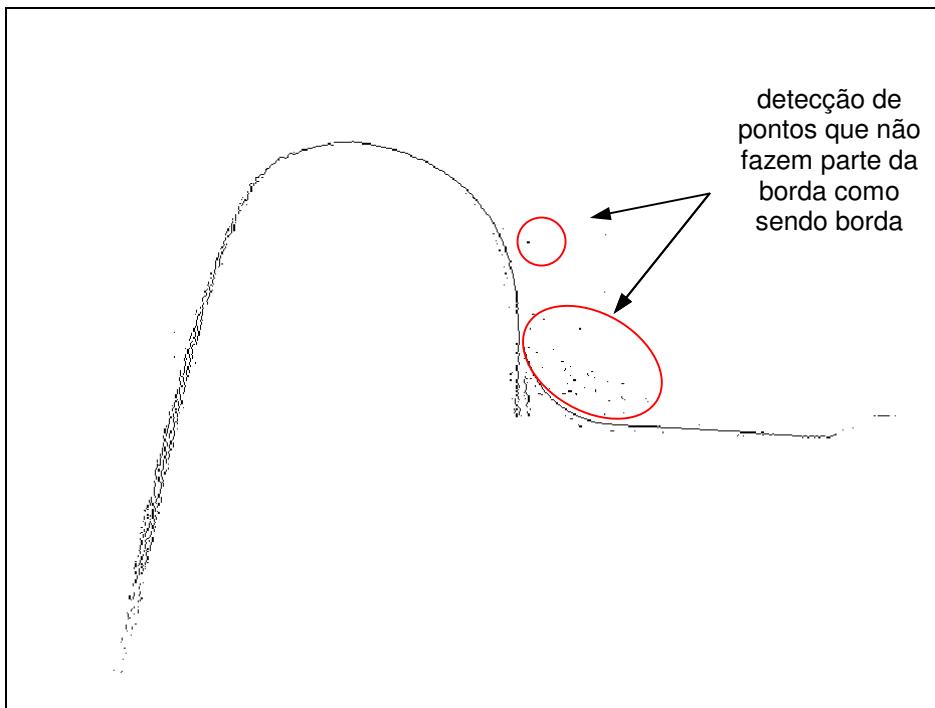


Figura V.58: Erro na detecção da borda da roda – Operador Sobel

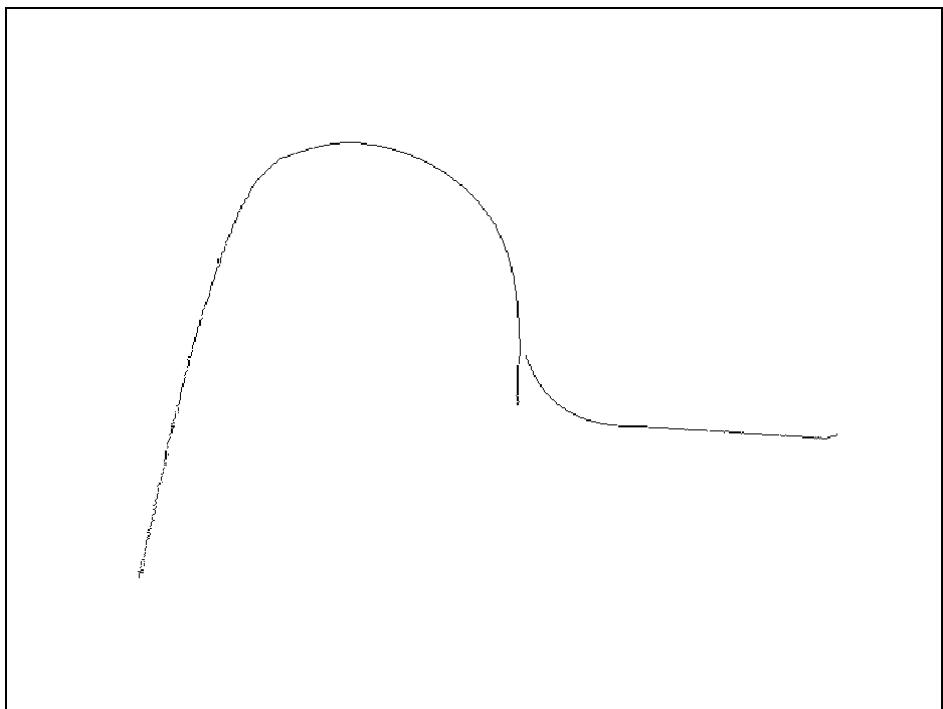


Figura V.59: Borda da roda – Operador Canny

V.5.2.4 Detecção das retas de interesse

Beneficiando-se, mais uma vez, do fato de pesquisar retas “conhecidas” pode-se simplificar o processo de busca, selecionando-se os pontos da borda que apresentam a direção normal à reta do assento, conforme mostrado na Figura V.60, e a reta da lateral que define a largura da roda, mostrada na Figura V.61.

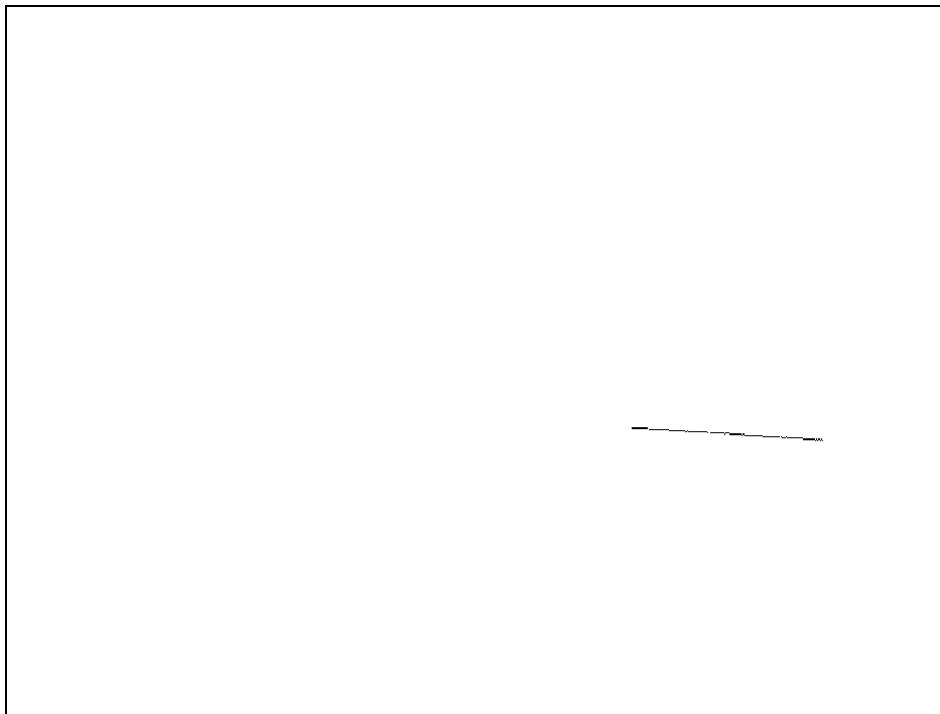


Figura V.60: Borda do assento do pneu

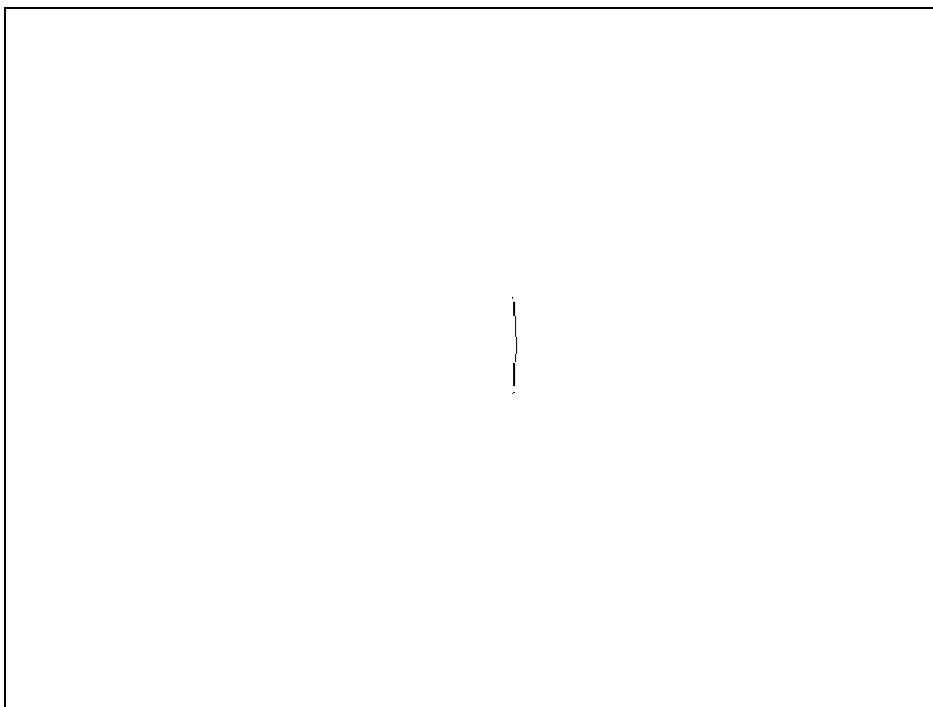


Figura V.61: Borda da lateral da roda que define sua largura

Na Figura V.62, pode-se observar o resultado obtido do procedimento proposto, superpondo-se a imagem original aos pontos da reta obtida.



Figura V.62: Sobreposição das bordas selecionadas à imagem original

Determinando-se os pontos de interesse da borda da roda, ajusta-se as retas ao pontos, como mostrado na Figura V.63, conforme apresentado no item V.5.1.4, utilizando se o método dos mínimos quadrados, para a obtenção das retas do calibre.

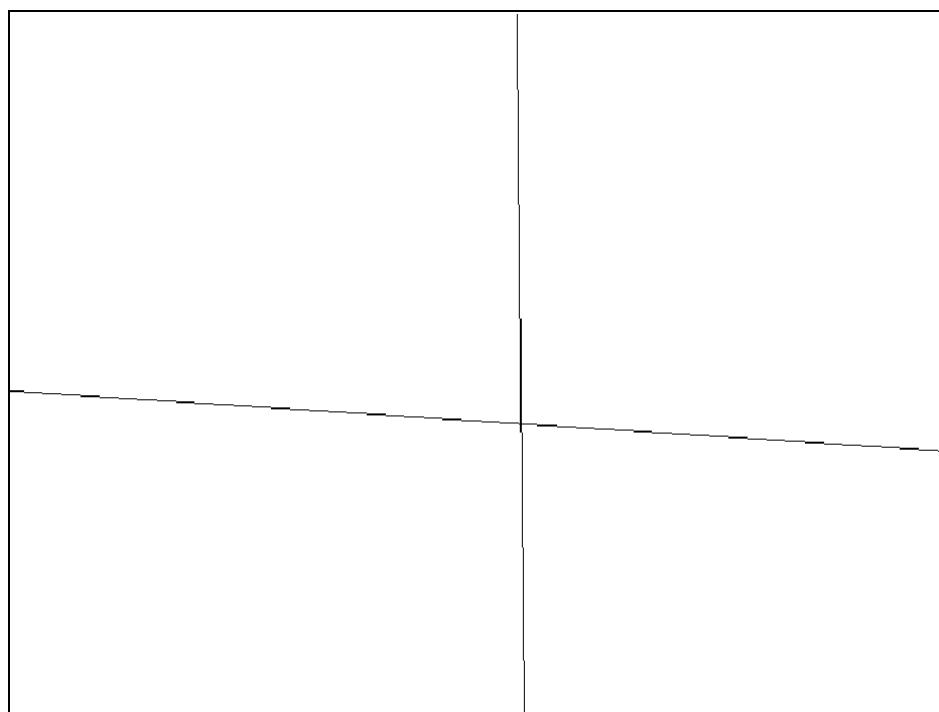


Figura V.63: Ajuste das retas aos pontos do assento do pneu e da largura da roda

Na Figura V.64 é apresentada a sobreposição das retas obtidas através do método proposto à imagem original da roda.

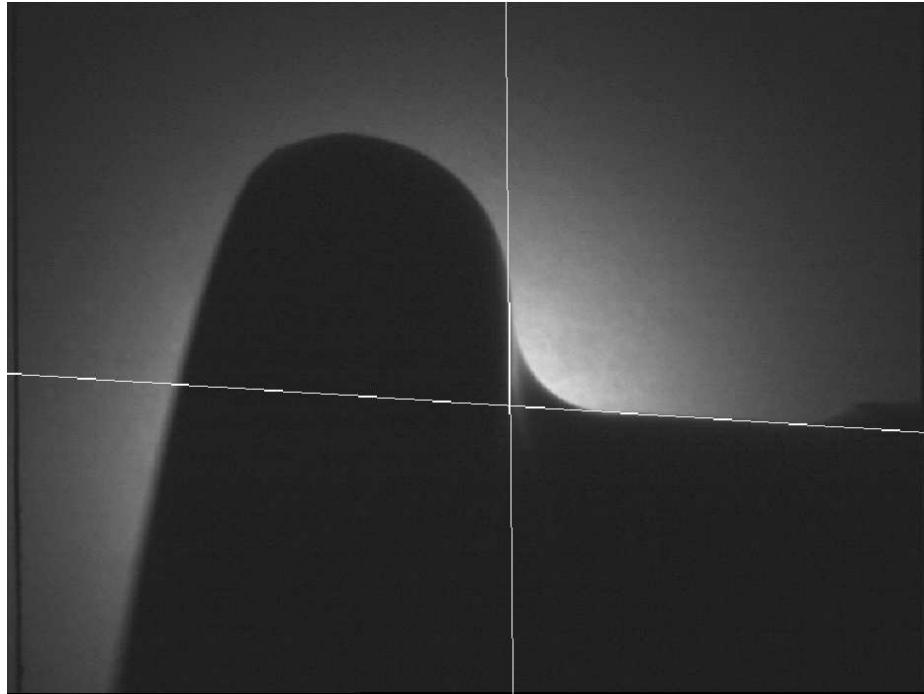


Figura V.64: Sobreposição das retas do assento e da largura da roda à imagem original

Para esta secção da roda tem-se:

Tabela V-7 Parâmetros da reta de interesse da imagem da roda

	$\theta [^{\circ}]$	ρ [pixel]
Reta do assento	86,34	309,88
Reta da largura	0,62	416,80

V.5.2.4.1 Forma alternativa para se obter a reta que define a largura da roda

Uma região plana é especificada no projeto, como apresentada na Figura V.30, que define a largura da roda é apresentada em destaque na Figura V.65 como a reta de interesse. No entanto, o processo de fabricação não garante a formação desta região plana. Desta forma o processo de ajuste de uma reta nesta região é dificultado, devido ao pequeno número de pontos obtidos que definem a reta.

Uma forma alternativa para se construir a reta que define a largura da roda é obter os arcos adjacentes à mesma e então obter a reta que faz tangência a ambos os arcos, conforme a Figura V.65.

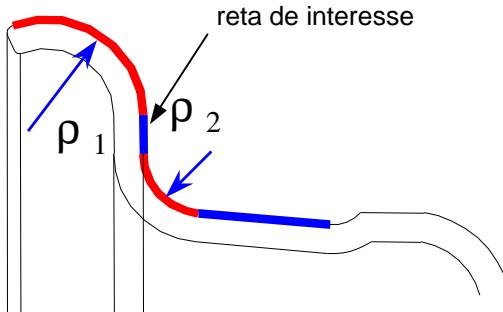


Figura V.65: Apresentação dos arcos tangentes a reta que define a largura a roda

Utilizando-se a transformada de Hough para uma circunferência, tem-se:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \rho^2 \quad (\text{V.14})$$

onde x_0 , y_0 e ρ são os parâmetros da curva a serem calculados, respectivamente as coordenadas x e y da origem do raio do arco/circunferência e o raio do arco/circunferência.

Uma vez conhecida a direção da borda, θ , pode-se reduzir o processamento necessário.

De acordo com a Figura V.66, tem-se:

$$x_0 = x - \rho \sin \theta \quad (\text{V.15})$$

$$y_0 = y - \rho \cos \theta \quad (\text{V.16})$$

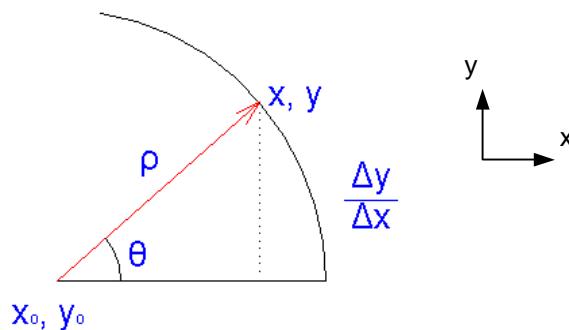


Figura V.66: Parâmetros de uma circunferência

Sendo as variáveis x , y e θ conhecidas, os parâmetros x_0 e y_0 dependem apenas da distância ρ . Desta forma, seria necessário variar o valor de ρ de ρ_{\min} à ρ_{\max} e computar a maior ocorrências dos parâmetros para identificar a reta a qual cada ponto pertence.

Como a peça é um produto conhecido cujas dimensões são conhecidas, pode-se utilizar o valor aproximado do raio ρ de cada arco especificado. A roda em estudo apresenta raio ρ_1 mínimo de 9.50 [mm] e o raio ρ_2 máximo de 6.50 [mm].

Desta forma, será calculado, para cada ponto, o valor de x_0 e y_0 através da Equação (V.15) e da Equação (V.16), apenas para dois valores de ρ , o que reduz o esforço computacional.

Usando-se o mesmo processo de cálculo da transformada de Hough para uma reta, a cada ocorrência do par x_0, y_0 , o valor de ocorrência é incrementada na respectiva célula, como apresentado na Figura V.67.

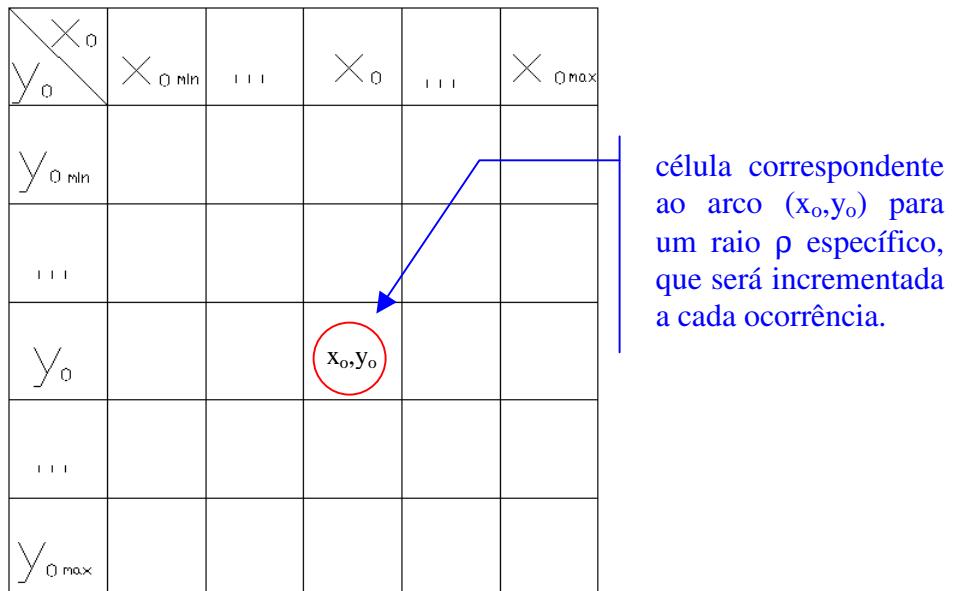


Figura V.67 Acumulador para identificar o par de parâmetro da curva de maior ocorrência

Os pontos que fazem parte dos arcos serão identificados pelo conjunto de pontos que apresentaram a maior ocorrência do par x_0, y_0 para cada curva, para uma dada tolerância Δx_0 e Δy_0 aos parâmetros.

Da mesma forma que para as retas, o uso simples da transformada de Hough não obtém a melhor curva que se ajusta aos pontos especificados. Sendo assim, é necessário um processamento complementar para o ajuste da mesma.

O algoritmo para se ajustar a melhor circunferência para um conjunto de pontos, sendo conhecido o valor inicial de x_0, y_0 e ρ , é constituído pelas etapas seguintes:

1. Cálculo do valor do raio do i-ésimo ponto, ρ_i , para um par x_0, y_0 , através da Equação (V.17):

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (V.17)$$

2. Cálculo do raio médio, ρ_{med} :

$$\rho_{med} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{n} \quad (V.18)$$

3. Cálculo do desvio padrão do valor do raio, $\sigma\rho$, para um dado x_0 e y_0 :

$$\sigma\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\rho_i - \rho_{med})^2}{n-1}} \quad (V.19)$$

4. Alteração dos valores de x_0 e y_0 e recalcular o valor do desvio padrão do valor do raio, enquanto a alteração dos valores de x_0 e y_0 reduzir o valor do desvio padrão, ou até atingir uma incerteza aceitável.

Detalhes do algoritmo são apresentados no Apêndice A.

Buscando detectar os pontos dos arcos tangentes à reta que define a largura da roda, verifica-se que é obtido um número maior de pontos, Figura V.68,o que permite um melhor ajuste de uma curva a estes pontos, como mostrado na Figura V.69.

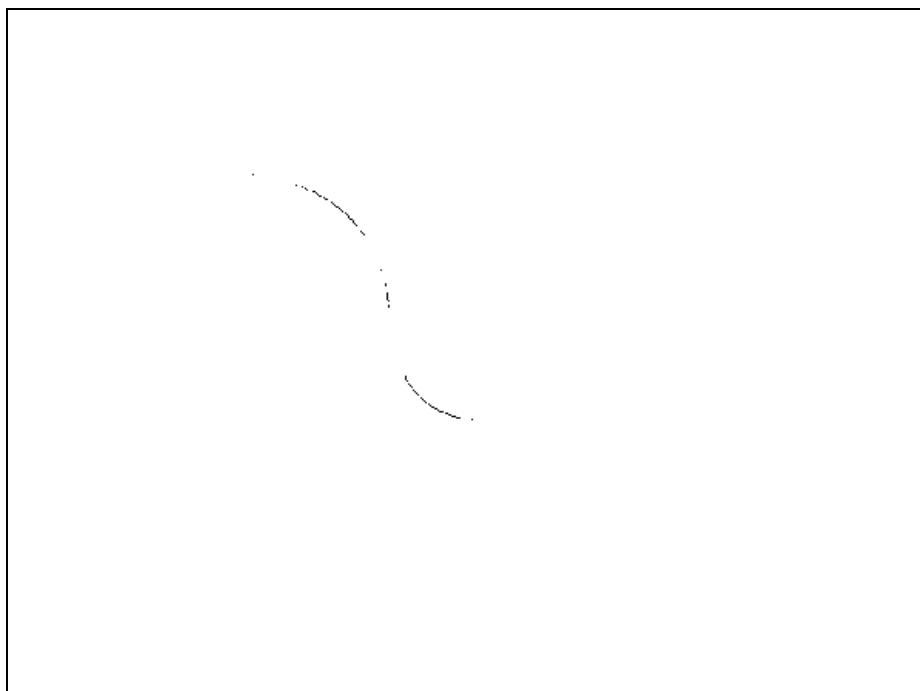


Figura V.68 Borda dos arcos tangentes a resta que define a largura da roda

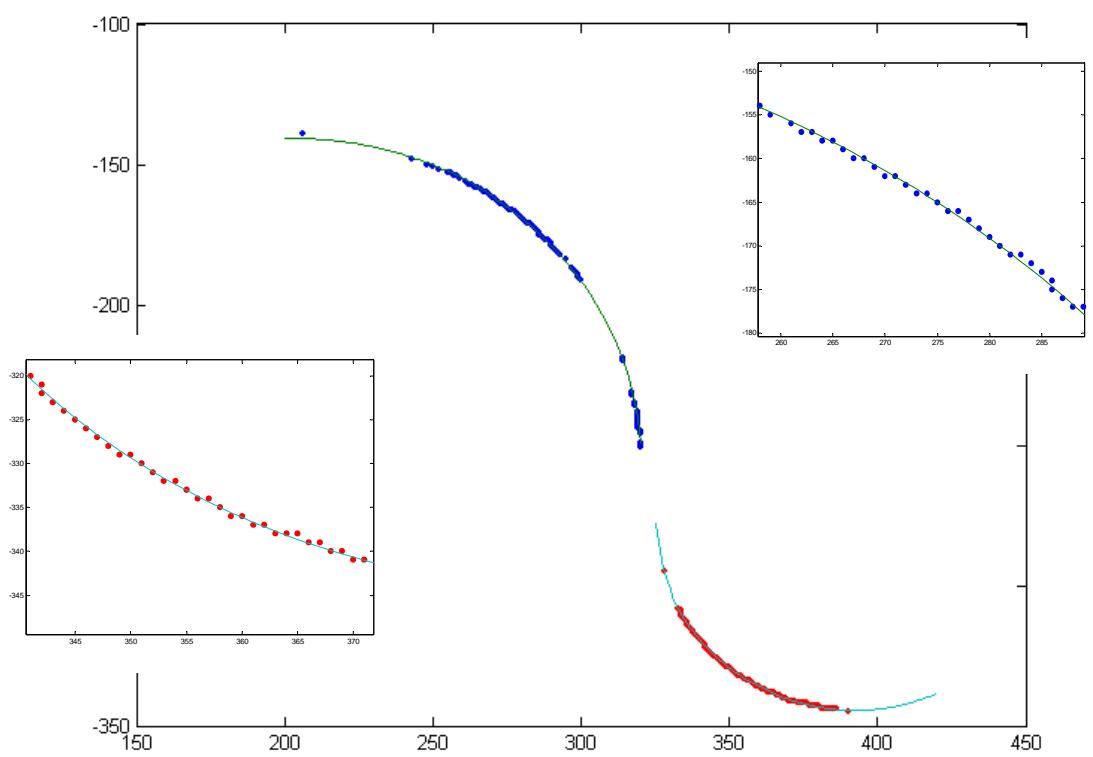


Figura V.69 Ajuste do melhor arco aos pontos da borda

V.5.2.5 Obtenção dos desvios axial e radial

Para poder se avaliar o procedimento de medição do projeto proposto é preciso que seja possível compará-lo com o processo de medida existente e possível de ser realizado na metrologia da empresa, aonde se emprega o equipamento de medição tridimensional que utiliza um apalpador e apresenta uma incerteza de 0,001 [mm]. Desta forma para medir a oscilação radial será considerado um ponto a 8,00 [mm] da aba da roda e para medir oscilação axial será considerado um ponto a 8,00 [mm] do assento do pneu, conforme mostrado na Figura V.70.

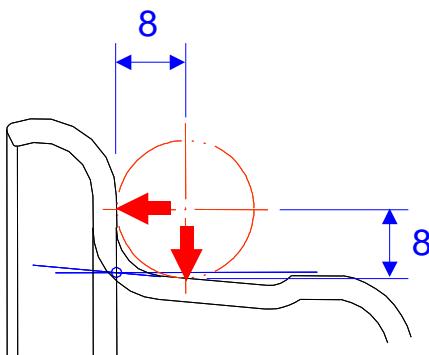


Figura V.70: Pontos para medida da oscilação da roda, segundo o procedimento atual

Portanto é necessário obter, na imagem, a reta deslocada 8,00 [mm] da aba do aro.

Para esta roda tem-se:

- largura = 152,40 [mm]
- distância do centro de aplicação de carga na roda = 40,00 [mm]
- distância do assento da roda ao ponto ptm = 34,967 [mm]

Logo, a distância do ponto ptm, do calibre apresentado em V.5.1, à reta deslocada 8,00 [mm] da aba será dada por:

$$\rho_{real} = \left(\frac{152,4}{2} - 40 - 8 \right) + 34,967 = 6,767 [mm]$$

Convertendo-se esse valor para a unidade de imagem, e considerando a rotação da imagem de $\theta_{im} = 0,61^\circ$, tem-se:

$$\rho_{im} = \left(\left(\frac{\rho_{real} \sin(\theta_{reta} + \theta_{im})}{\Delta y_{real}} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{real} \cos(\theta_{reta} + \theta_{im})}{\Delta x_{real}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (V.20)$$

$$\rho_{im} = \left(\left(\frac{6,767 \sin(0,61)}{0,07615} \right)^2 + \left(\frac{6,767 \cos(0,61)}{0,07170} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\rho_{im} = 94,379 [pixel]$$

Portanto a reta deslocada 8,00 [mm] da aba, possui os parâmetros apresentados na Tabela V-8.

Tabela V-8: Parâmetros da reta deslocada 8,00 [mm] da aba

	valor	unidade
ângulo θ	0,61	$^\circ$
distância ao ponto ptm	94,379	pixel

Da mesma forma, é necessário obter a reta deslocada 8,00 [mm] do assento do pneu, ou seja, o offset é calculado por:

$$\frac{D}{2} + h \quad (V.21)$$

conforme apresentado na Figura II.12, onde D é o diâmetro da roda e h é dada pela Equação (II.3):

$$h = r \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (V.22)$$

onde r é o raio da esfera e α é dado pela (II.4):

$$\alpha = \frac{90^\circ - \beta}{2} \quad (V.23)$$

onde β é a inclinação do assento, no caso, 5° .

Logo, tem-se que a distância da reta deslocada 8,00 [mm] do assento do pneu dada por:

$$\frac{D}{2} + r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ - \beta}{2}\right) \quad (V.24)$$

Portanto a distância da reta deslocada ao ponto ptm será:

$$\rho_{real} = \left(\frac{D}{2} + r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ - \beta}{2}\right) \right) - y_{ptm} \quad (V.25)$$

$$\rho_{real} = \left(\frac{381,00}{2} + 8,00 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ - 5^\circ}{2}\right) \right) - 190,52$$

$$\rho_{real} = 7,31[\text{mm}]$$

Convertendo-se esse valor para a unidade de imagem, e considerando-se a rotação da imagem de $\theta_{im} = 0,61^\circ$, tem-se da Equação(V.20):

$$\rho_{im} = \left(\left(\frac{7,31 \operatorname{sen}(90^\circ + 0,61)}{0,07615} \right)^2 + \left(\frac{7,31 \operatorname{cos}(90^\circ + 0,61)}{0,07170} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\rho_{im} = 95,995[\text{pixel}]$$

Portanto a reta deslocada 8,00 [mm] do assento do pneu possui os parâmetros apresentados na Tabela V-9.

Tabela V-9: Parâmetros da reta deslocada 8,00 [mm] d assento do pneu

	valor	unidade
ângulo θ	0,61	$^{\circ}$
distância ao ponto ptm	95,995	pixel

Tendo-se ambas as retas determinadas, pode-se obter o ponto de intersecção entre a reta do assento e a reta deslocada da aba, o que permitirá medir a oscilação radial da roda. O ponto de intersecção entre a reta da aba e a reta deslocada do assento permitirá medir a oscilação axial da roda.

A oscilação axial da roda é dada pela variação, na direção do eixo, do ponto de intersecção entre a reta da aba do aro e a reta deslocada 8,0 [mm] do assento, quando medido em várias secções da roda completando um giro de 360° .

A oscilação radial da roda é dada pela variação, na direção do radial, do ponto de intersecção entre a reta do assento do pneu e a reta deslocada 8,0 [mm] da aba do aro, quando medido em várias secções da roda completando um giro de 360° .

Capítulo VI. Resultados Obtidos

A seguir são apresentados os resultados obtidos através do método proposto utilizando-se os recursos de visão computacional para se medir a oscilação radial e axial da roda.

Os resultados foram comparados aos medidos na metrologia empregando-se um equipamento de medição tridimensional que utiliza um apalpador para realizar as medidas de oscilação axial e radial da roda. O método de medição é semelhante ao com o emprego de relógios comparadores, no entanto, ao invés da roda rotacionar, a mesma fica parada e o apalpador percorre toda a borda da roda para medir a oscilação. A incerteza apresentada pelo equipamento de medição tridimensional é de 0,001 [mm].

Os resultados não foram comparados aos obtidos com o sistema empregado na produção, uma vez que o mesmo apresenta somente o valor final da oscilação da roda, não permitindo uma melhor comparação entre os sistemas, medindo-se ponto a ponto da roda.

O resultado da oscilação radial obtido pela metrologia foi de 0,34 [mm], enquanto que pelo método proposto a leitura obtida foi de 0,40 [mm]. A diferença dos resultados é aceitável, visto que o protótipo empregado apresenta uma resolução em torno de 0,07 [mm/pixel], conforme apresentado na Tabela V-6, e a correlação dos resultados foi de 0,929.

Desta forma, a oscilação radial da roda pode ser medida pelo sistema proposto, segundo as especificações técnicas, conforme os resultados apresentados na Figura VI.1.

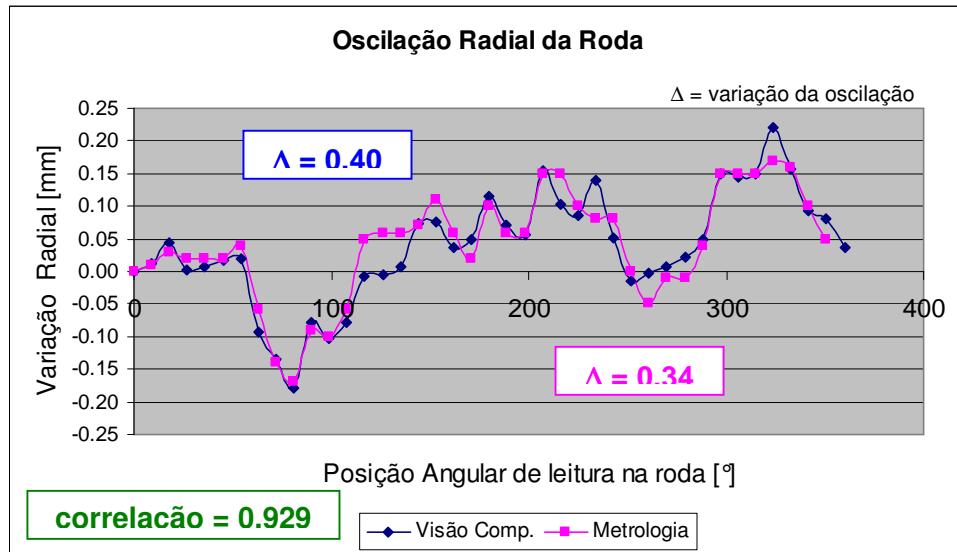


Figura VI.1: Resultado da medida da oscilação radial

O método com o emprego de relógios comparadores ou sensores LVDT não retornam a informação da oscilação radial em função da secção medida, como o processo proposto. A medição da oscilação radial, em função da posição angular, permite avaliar melhor o processo de manufatura, ou seja, verificar se a oscilação apresenta ou não um padrão devido ao processo de manufatura.

Além da oscilação radial da roda, o método proposto permite a obtenção da variação da distância do ponto de medida ao eixo da roda, como mostrado na Figura VI.2. Esta informação permite que se avalie a circularidade e o diâmetro da roda, dados que não pode ser obtido através do método com o emprego de relógios comparadores ou sensores LVDT, e que são necessários para a aprovação da roda.

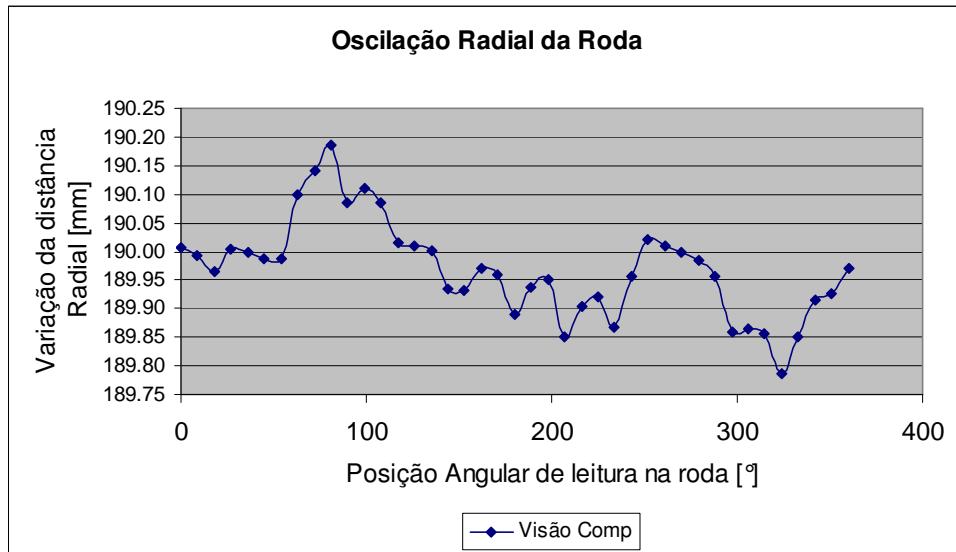


Figura VI.2: Resultados variação da distância o ponto de medida ao eixo da roda

Também pelo método proposto, pode ser obtida a variação da inclinação do assento do pneu, conforme mostrado na Figura VI.3. Novamente, esta informação não pode ser obtida por outros métodos apresentados.

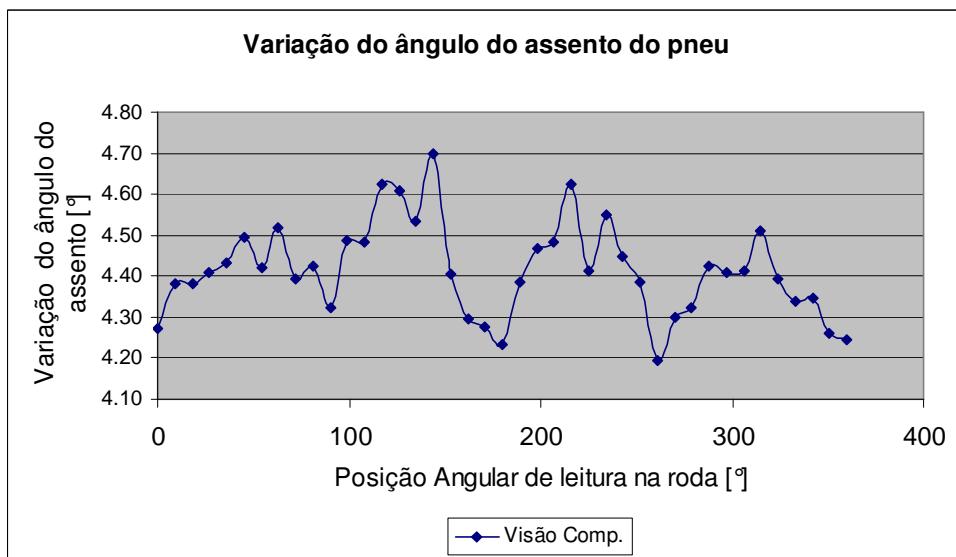


Figura VI.3 Resultado da variação da inclinação do assento do pneu

Utilizando-se o princípio de se detectar os pontos que definem a reta da largura da roda e então ajustar uma reta a estes pontos, não apresentou bons resultados na medição da oscilação axial, como mostrado na Figura VI.4. Pode-se verificar que pela metrologia, foi obtida uma oscilação axial de 0,23 [mm] enquanto que o método proposto apresentou uma oscilação axial de 0,45 [mm]. Os resultados também apresentaram baixa correlação de 0,128. Tal problema ocorreu devido ao fato de se conseguir apenas poucos pontos na região citada e devido a não garantia da existência de uma reta.

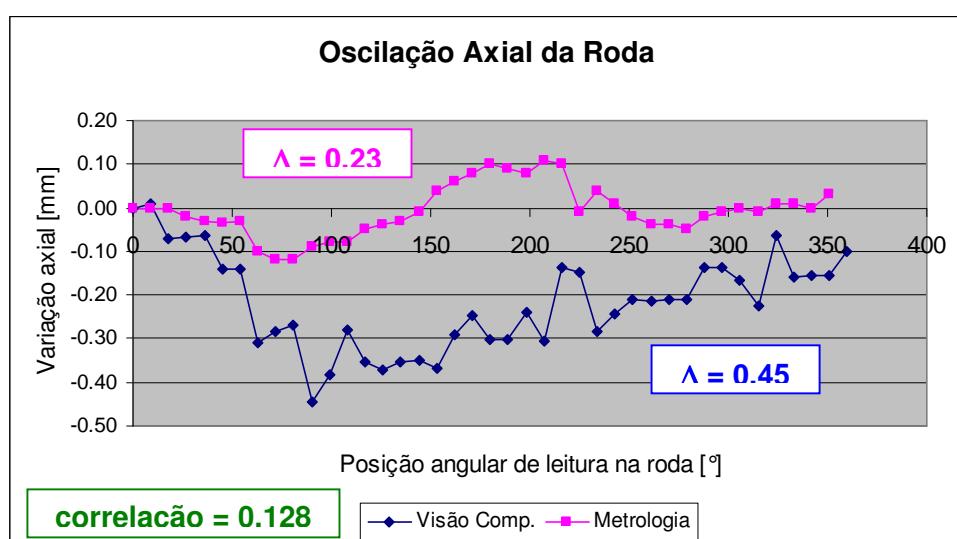


Figura VI.4: Resultados da medida da oscilação axial

Para contornar o problema, buscou-se detectar os arcos adjacentes à reta que define a largura da roda. Uma vez obtido estes arcos, a reta é obtida através da tangência aos mesmos. Este procedimento melhorou os resultados obtidos, conforme pode ser observado na Figura VI.5, apresentando uma correção de 0,624, porém o problema não foi resolvido, a contento.

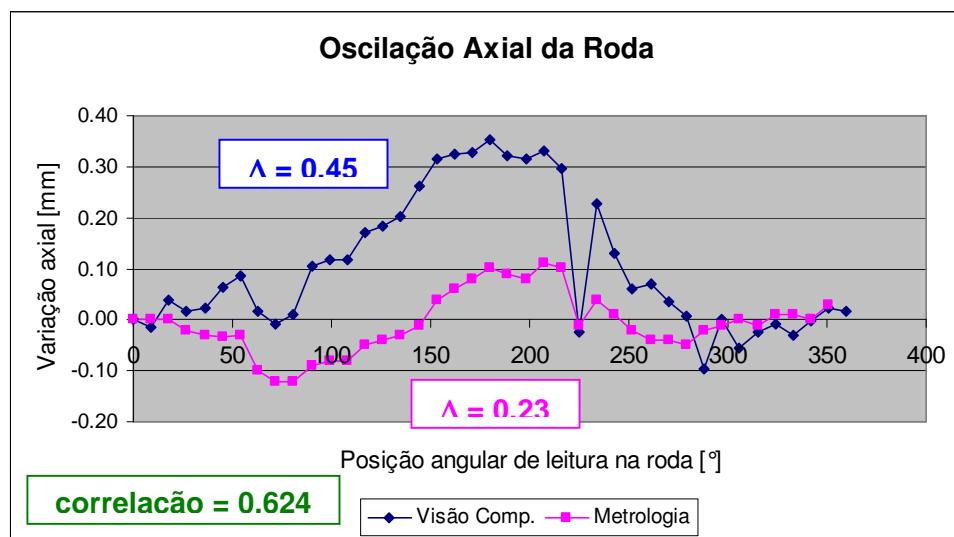


Figura VI.5: Resultado de medidas da oscilação axial baseando-se nos arcos da aba da roda

Capítulo VII. Conclusão

O método proposto apresenta bons resultados para a medida da oscilação radial, devido o fato de que a região medida, o assento do pneu, é uma região bem definida, o que facilita o ajuste de uma reta e consequente medição.

Não é possível simplificar o procedimento de medida da oscilação axial, buscando somente ajustar uma reta à parte lateral da aba da roda. Tal procedimento não é possível devido a poucos pontos identificados na imagem como sendo uma reta. Outro problema apresentado ao tentar ajustar uma reta a esta região, é que o processo de fabricação da roda não garante que esta região seja necessariamente uma reta, dificultando esta simplificação.

O procedimento de se detectar os arcos adjacentes à reta lateral da aba do aro da roda e então determinar a mesma, como sendo a reta tangente aos dois arcos, apresenta melhores resultados de ajuste da reta, do que o processo que visa somente detectar os pontos da reta e posterior ajuste aos pontos. No entanto, não apresentou resultados satisfatórios quanto aos valores de oscilação axial da roda, comparando-se esses valores com aqueles obtidos pelos métodos convencionais.

O motivo de não ter obtido resultados de oscilação axial próximos aos obtidos pela metrologia, é devido ao fato da aba da roda ser uma superfície, que quando vista de perfil, pode apresentar um “plano”, o que dificulta a identificação da borda, diferente da região do assento do pneu que é uma “linha”. Ou seja, para se obter uma boa leitura de oscilação axial é necessário um controle mais rigoroso no alinhamento da câmera e um jogo especial de lentes, reduzindo, deste modo, os problemas de distorção da imagem.

Ter só um bom alinhamento da câmera, não garante um bom resultado de leitura da oscilação axial, visto que, ao estar lendo a informação de uma região “plana”, um defeito próximo à região de leitura pode prejudicar a leitura.

A utilização do método proposto permite uma análise mais detalhada do produto, visto que é possível medir a distância dos pontos medidos do assento do pneu, bem como a inclinação do assento. Estas informações não são obtidas pelo método atual de medida da oscilação. Por exemplo, para a roda analisada, pode-se verificar que pela Figura VI.3, a variação da inclinação do assento do pneu forma 4 “picos” e 4 “vales”, o que leva a comprovar que a interferência de montagem e a solda interferem na inclinação do assento do pneu, pois aonde se localiza a solda, houve a ocorrência dos “vales”, ou seja, a redução do ângulo. O ângulo especificado para esta roda é $5\pm1[^\circ]$. Um exemplo de montagem e solda da roda é apresentado no Apêndice B.

Independente dos resultados obtidos, a metodologia empregada neste trabalho, de se obter uma curva prévia através do emprego da transformada de Hough e então refinar a informação referente à curva, ajustando-a aos pontos obtidos, é prático e funcional, reduz o esforço de processamento e aumenta a precisão da curva encontrada em relação aos pontos.

A modelagem do sistema de alimentação e extração permitiu o dimensionamento funcional do sistema, visando atender a função básica de alimentação e extração, assim como atender a necessidade de manter a cadência da linha de produção e de se poder trabalhar com diferentes tamanhos de rodas.

E como trabalhos futuros, teremos:

- O estudo da utilização de iluminação estruturada para a medida da oscilação da roda, buscando resolver os problemas encontrados neste trabalho, referente à oscilação axial, pois a iluminação estruturada visa a leitura da uma linha projetada sobre uma peça. Obtendo-se os pontos que definem o perfil da peça, pode-se utilizar o método empregado neste trabalho para se obter as informações da geometria da peça, como retas, raios e a oscilação. No entanto, é possível prever dificuldades na leitura da linha de luz projetada sobre a roda, visto que a roda é uma peça um pouco reflexiva.

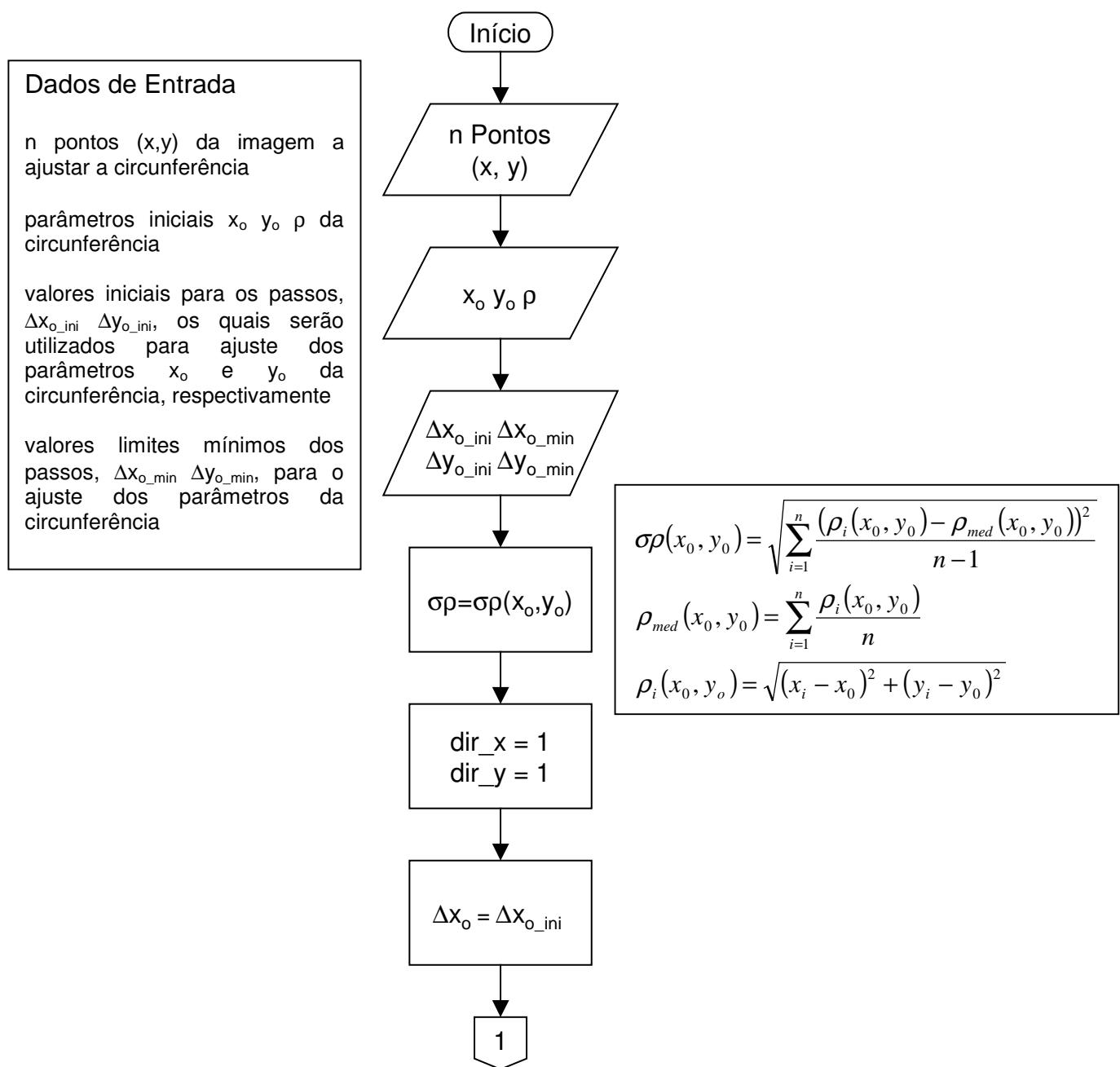
- A adaptação do sistema laboratorial aos padrões industriais, através da utilização de câmeras de maior resolução e desta forma realizar testes com um número maior de rodas e analisar a repetitibilidade do sistema.
- A expansão do sistema para aferir perfis de aros, uma vez que o procedimento utilizado visa a obtenção do perfil da aba da roda para posteriormente obter a oscilação da roda.
- A análise estrutural do sistema de alimentação, assim como o controle, uma vez que se concentrou, neste trabalho, na análise funcional do sistema de alimentação.
- A apresentação do trabalho no congresso da SAE no 2º Semestre de 2003.

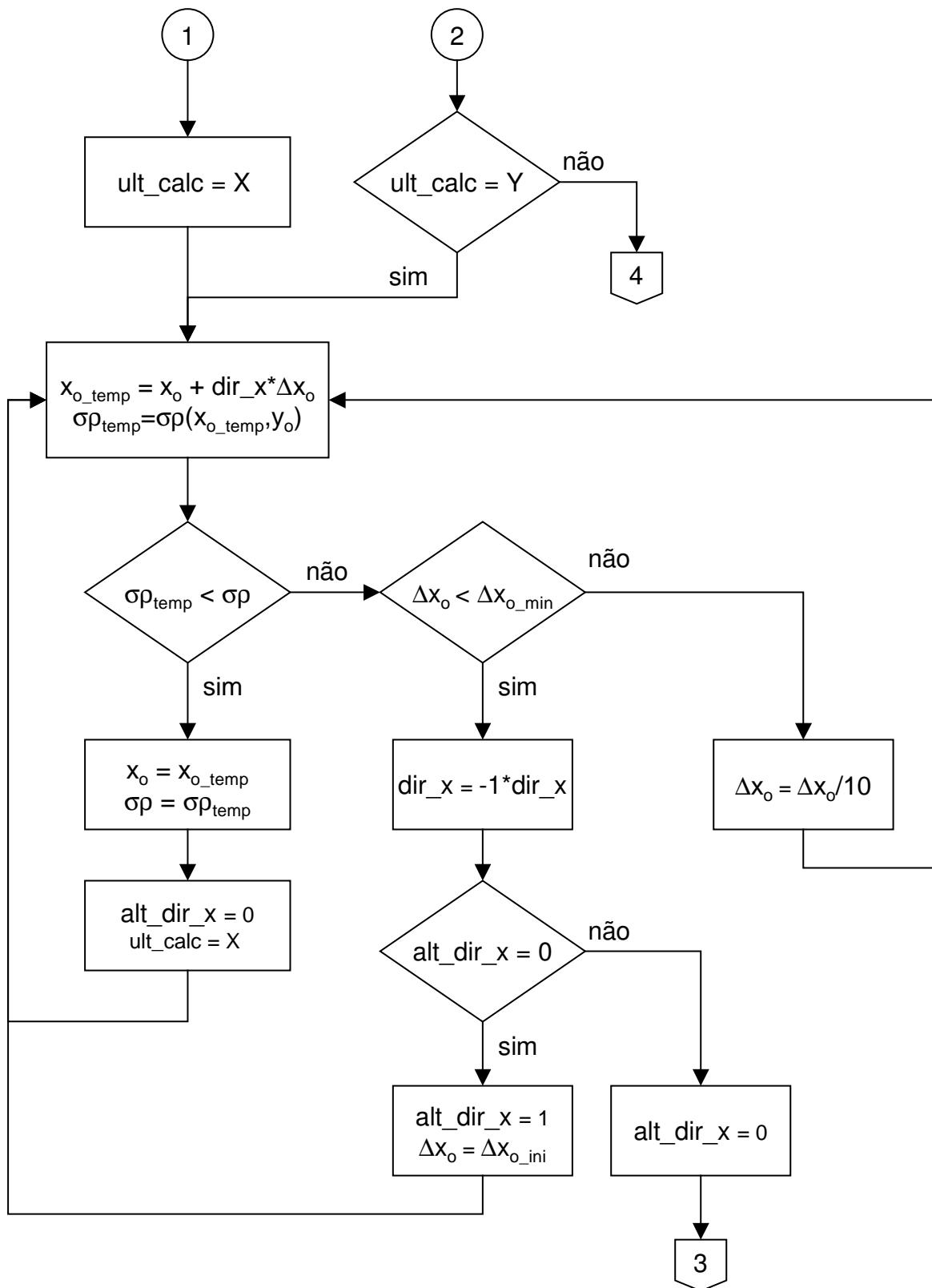
Referências Bibliográficas

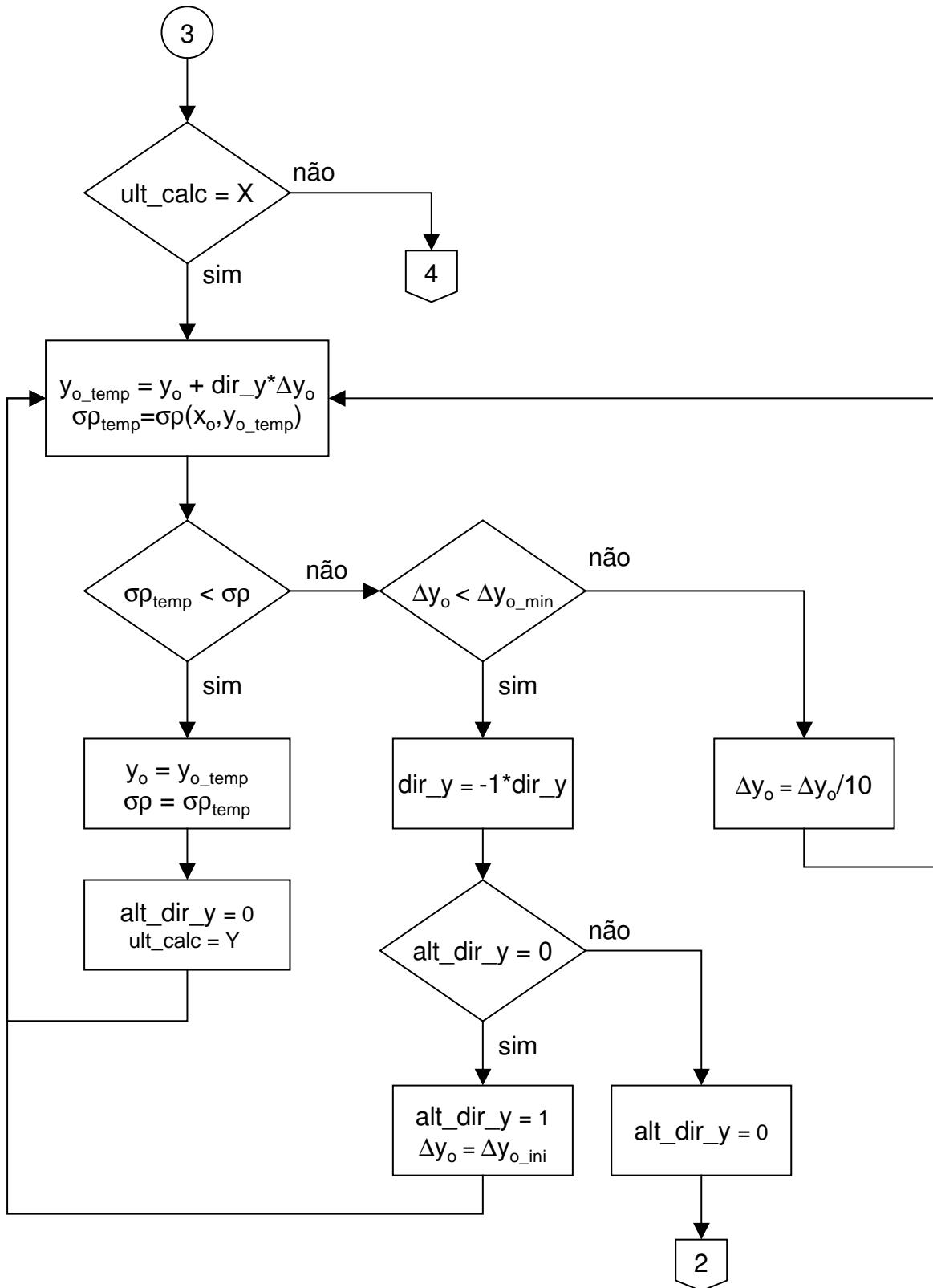
- ALAPA (2001) – *Associação Latino Americana de Pneus e Aros – 2001*
- AWCOCK, G. L. & Thomas, R. (1995), *Applied Image Processing*, MACMILLAN.
- BALLARD, D. H. (1981), *Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes*, *Pattern Recognition*, vol. 13, n° 2, pp 111-122.
- BARNARD, S. T. & THOMPSON, W. B. (1980), *Disparity Analysis of Images*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-2, n° 4, July, pp 333-340.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1982), *Introduction to geometrical tolerancing*, PD7304: pp 23-24.
- CANNY, J. (1986), *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-8, n° 6, November, pp 679-698.
- CHEN, J. S. & MEDIONI, G. (1989), *Detection, Localization, and Estimation of Edges*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, n° 2, February. pp 191-198.
- DUDA, R. O. & HART, P. E. (1972), *Use of the Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures*, Communications of the ACM, vol. 15, n° 1, January, pp 11-15.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. (2000), *Processamento de Imagens Digitais*, Editora Edgard Blücher.
- MITSUYASSU, F. T. & TRABASSO, L. G. (2002), *Design of a Novel Mechatronic Device for Car Wheels Quality Assurance*, Proceeding of Mechatronics 2002, University of Twente the Netherlands, 23-26 June, 2002.
- PARKER, J. R. (1996), *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, Inc.

PRATT, W. K. (1991), *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons, Inc.

Apêndice A. Fluxograma para ajustar a melhor circunferência a um dado conjunto de pontos







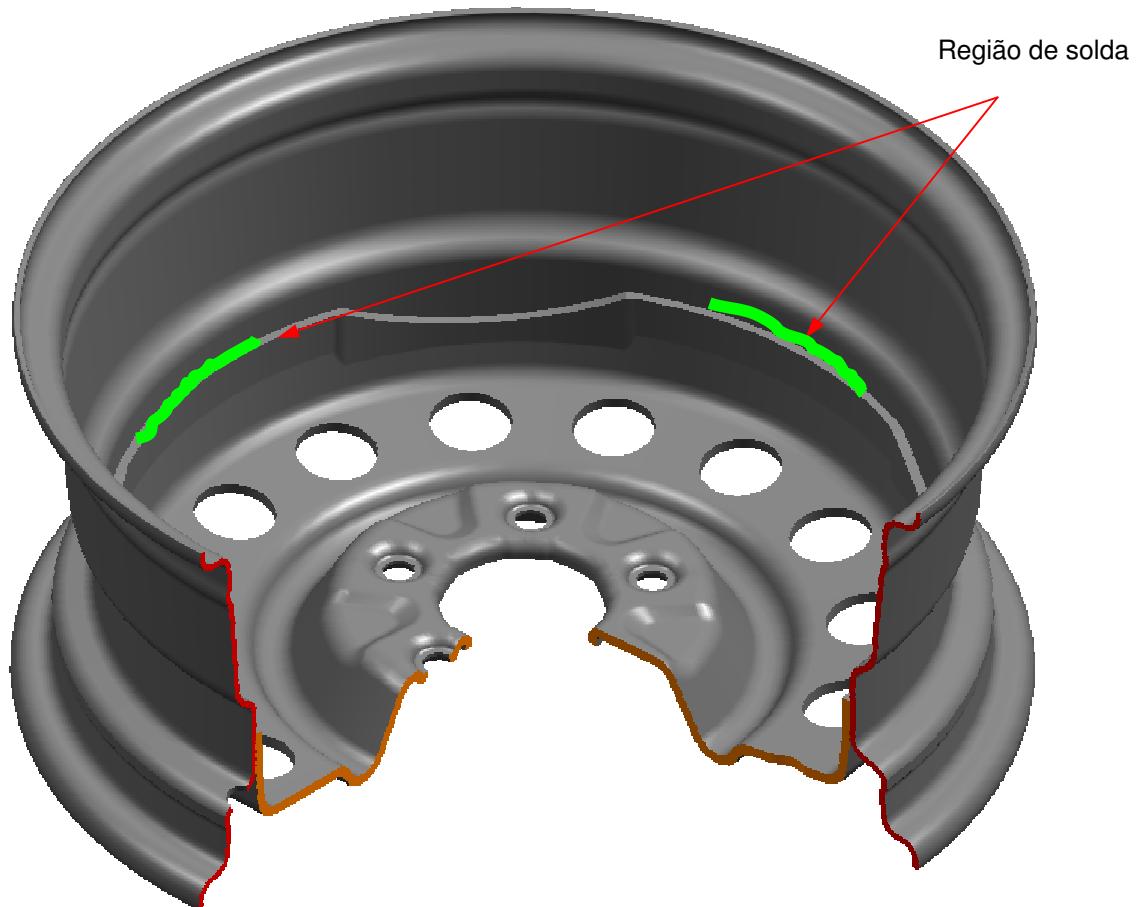
4

$$\rho_{\text{med}} = \rho_{\text{med}}(x_o, y_o)$$

ρ_{med}
 x_o
 y_o

término

Apêndice B. Vista inferior de uma roda



FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO				
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TM	2. DATA 06 Março 2002	3. DOCUMENTO N° CTA/ITA-IEM/TM-015/2002	4. N° DE PÁGINAS 124	
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Sistema Mecatrônico para Medida de Desvio Axial e Radial de Rodas utilizando Recursos de Visão Computacional				
6. AUTOR(ES): Fernando Toshihiko Mitsuyassu				
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica – ITA/IEM				
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Mecatrônica, Roda automotiva, Visão computacional, Metrologia, Oscilação de Rodas				
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Mecatrônica; Rodas de veículos; Automóveis; Metrologia; Oscilações; Controle de processos; Visão por computadores; Engenharia mecânica.				
10. APRESENTAÇÃO: ITA, São José dos Campos, 17 de Dezembro de 2002. 124 páginas				
11. RESUMO: <p>A roda automotiva é um item de segurança do veículo, cujo desenvolvimento e produção é complexo e requer um rigoroso controle dimensional. Atualmente o sistema de medição da roda, situada entre etapas de produção, consiste no emprego de relógios comparadores. Desta forma, a qualidade da informação obtida depende da habilidade do operador em manipular o dispositivo de medição, estando também, suscetível ao desgaste físico por trabalho repetitivo.</p> <p>Soluções alternativas, para a medição da oscilação da roda, também foram estudadas, como por exemplo o emprego de equipamentos com sensores LVDT e roletes, os quais não apresentaram resultados satisfatórios.</p> <p>Devido a estes fatos, este trabalho tem como objetivo projetar um sistema mechatrônico, que utiliza recursos de visão computacional, para medir a oscilação da roda, buscando resolver os problemas apresentados por outros métodos comentados.</p>				
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> CONFIDENCIAL <input type="checkbox"/> SECRETO				